



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ
ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

ΙΩΑΝΝΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΘΕΜΕΛΑΚΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΝΙΚΟΛΑΟΣ Γ. ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ

ΑΘΗΝΑ ΟΚΤΩΒΡΗΣ 2017

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT	9
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ	11
1.1 Ορισμός σύνθετων υλικών.....	11
1.2 Κατασκευαστικές μέθοδοι σύνθετων υλικών.....	12
1.3 Περιέλιξη ινών και εφαρμογές υλικών από περιέλιξη ινών.....	17
2. ΔΟΚΙΜΕΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	22
2.1 Συμβατικές μέθοδοι χαρακτηρισμού.....	22
2.2 Δοκιμές χαρακτηρισμού καμπύλων δοκιμίων.....	25
2.3 Ιστορική αναδρομή	28
2.4 Μέθοδος διαιρούμενου δίσκου.....	31
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ	34
3.1 Γενική περιγραφή και σκοπός πειραματικής διαδικασίας.....	34
3.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά	35
3.3 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά	36
3.4 Ονοματολογία	37
4. ΔΟΚΙΜΗ ΔΙΑΙΡΟΥΜΕΝΟΥ ΔΙΣΚΟΥ.....	39
4.1 Περιγραφή δοκιμής.....	39
4.2 Πειραματική διαδικασία	49
4.3 Μελέτη βελτίωσης πειραματικής διάταξης.....	57
5. ΑΠΟΤΕΛΑΣΜΑΤΑ	66
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	107
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	109
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	112
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	124

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον Καθηγητή μου κ. Νικόλαο Τσούβαλη, ο οποίος μου χάρισε την ευκαιρία να ασχοληθώ με την παρούσα διπλωματική εργασία.

Απευθύνω επίσης ευχαριστίες στον κ. Αστρινό Παπαδάκη για την συμβολή του και την υποστήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της εργασίας. Όπως επίσης σημαντική ήταν και η βοήθεια των κ. Θανάση Μαρκουλή και κ. Χάρη Ξάνθη και γι αυτό τους ευχαριστώ ιδιαίτερα.

Ακόμα ευχαριστώ την εταιρία B&T Composites για την κατασκευή και συνεισφορά των πειραματικών δοκιμίων.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω βαθύτατα την οικογένεια μου καθώς και όλους τους ανθρώπους που βρίσκονται δίπλα μου και με στηρίζουν σε κάθε βήμα μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διεξήχθη μια σειρά πειραματικών δοκιμών χαρακτηρισμού υλικού σε δακτυλιοειδή δοκίμια από σύνθετα υλικά κατασκευασμένων με τη μέθοδο περιέλιξης ινών. Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν με χρήση ινών άνθρακα και ινών βασάλτη συνδυασμένες με κατάλληλο σύστημα εποξικής ρητίνης. Για τη μελέτη των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε μια τροποποιημένη και βελτιωμένη εκδοχή της πειραματικής μεθόδου διαιρούμενου δίσκου (split-disk test - ASTM D2290). Η βελτιωμένη εκδοχή της πειραματικής μεθόδου εφαρμόστηκε με σκοπό την αξιόπιστη μέτρηση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας κατά την περιφερειακή διεύθυνση των δοκιμίων. Δοκίμια διαφορετικών γεωμετρικών (διάμετρος, πάχος, πλάτος) και κατασκευαστικών (υλικό ενίσχυσης, δύναμη τάνυσης περιέλιξης, αριθμός δεσμών περιέλιξης) χαρακτηριστικών κατασκευάστηκαν και εξετάστηκαν προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδραση των παραπάνω παραμέτρων στα αποτελέσματα της πειραματικής δοκιμής. Επιπλέον, μετρήθηκαν οι φυσικές ιδιότητες όλων των δοκιμίων (περιεκτικότητα ινών, πυκνότητα). Τέλος, στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε γραμμική ανάλυση αντοχής με χρήση πεπερασμένων στοιχείων της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε.

ABSTRACT

In the present study, a series of material characterization tests on composite filament wound ring shaped specimens was carried out. Carbon and Basalt fibers combined with epoxy resin system were used for manufacturing the composites specimens. For the implementation of the tests a modified and improved version of the split-disk test method (ASTM D2290) was used. The improved split-disk test method was applied in order to lead to the reliable measurements of the strength and the Young's modulus in the hoop direction of the specimens. Specimens of various geometric (diameter, width, thickness) and manufacturing (material, tensioning force, number of tows) characteristics were manufactured and tested in order to investigate the effect of the aforementioned parameters on the results of the split-disk test. Additionally, the physical properties (fiber weight fraction, density) of the specimens were measured. Finally in the present study a linear finite element stress analysis of the test fixture was carried out.

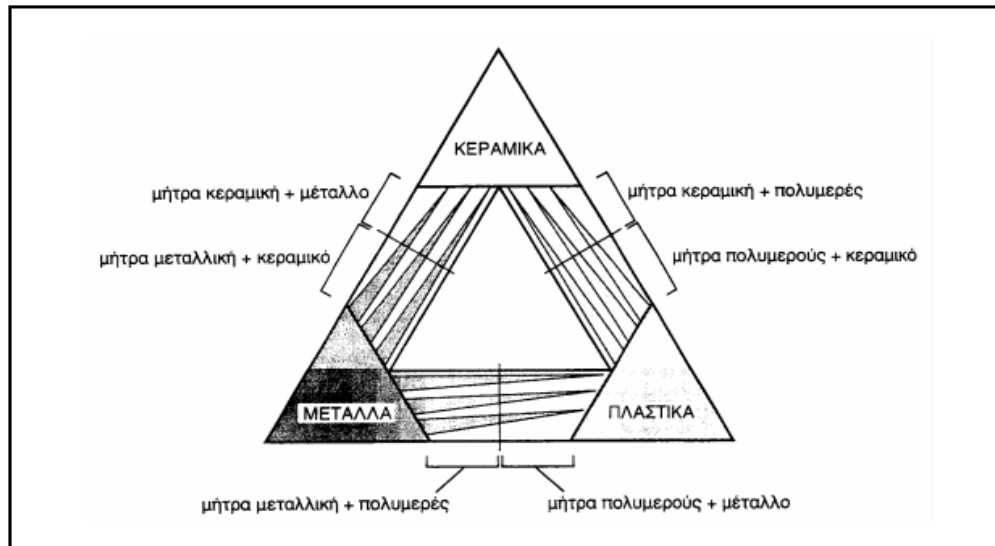
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ

1.1 Ορισμός σύνθετων υλικών

Για ένα σύστημα ο όρος «σύνθετο» σημαίνει ότι αυτό αποτελείται από δύο ή περισσότερα διακριτά μέρη. Από γενική άποψη, λοιπόν, ένα υλικό αποτελείται από δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά ή φάσεις, μπορεί να χαρακτηριστεί ως σύνθετο υλικό (composite material). Ειδικότερα, στην επιστήμη των υλικών, ως σύνθετο χαρακτηρίζεται ένα υλικό του οποίου τα συνιστώσα στοιχεία έχουν αισθητά διαφορετικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες με αποτέλεσμα και το παράγωγο υλικό να έχει σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από αυτές των επιμέρους στοιχείων του. Για να καταταχθεί ένα υλικό στην κατηγορία των σύνθετων υλικών θα πρέπει οι ιδιότητες του ενός από τα μέρη του να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από των υπολοίπων (≥ 5 φορές) και η κατ' όγκο περιεκτικότητα όλων των μερών να μην είναι πολύ μικρή ($>10\%$). (Τσούβαλης, 1998).

Για τους Agarwal & Broutman (1990) ως σύνθετα υλικά ορίζονται «τα υλικά τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μία συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους.»

Το ένα, από τα συστατικά μέρη, χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης. Στο ΣΧΗΜΑ 1.1 παρουσιάζεται ο συνδυασμός ανά δύο των βασικών οικογενειών υλικών (μεταλλικά, πολυμερικά και κεραμικά υλικά) και οι ομάδες συνθέτων που προκύπτουν.



ΣΧΗΜΑ 1.1: Κατηγορίες Σύνθετων Υλικών.

1.2 Κατασκευαστικές μέθοδοι σύνθετων υλικών

Η μορφοποίηση ινωδών σύνθετων υλικών περιλαμβάνει συνήθως τα ακόλουθα τρία στάδια:

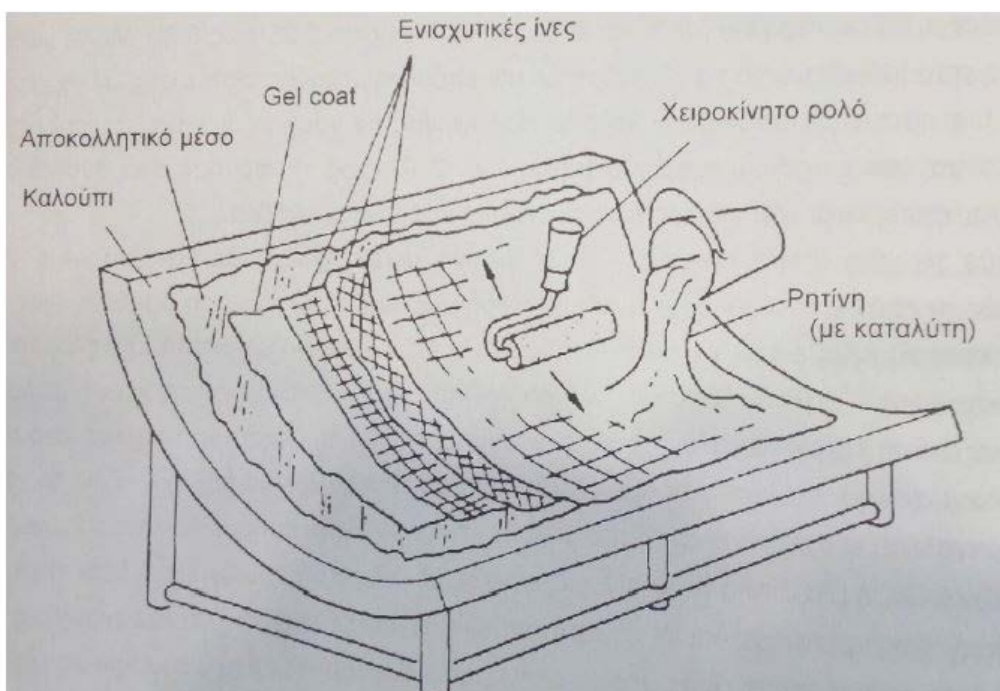
1. Παραγωγή των ινών
2. Διάταξη-διευθέτηση των ινών σε ιστό, πλέγμα ή πακέτα (yarn, tow, roving), όπου οι μεμονωμένες ίνες ομαδοποιούνται κατάλληλα ανά 100-100.000
3. Εισαγωγή των ινών στη μήτρα

Με βάση το υλικό της μήτρας, οι μέθοδοι μορφοποίησης ινωδών σύνθετων υλικών μπορούν να καταταγούν στις εξής κατηγορίες:

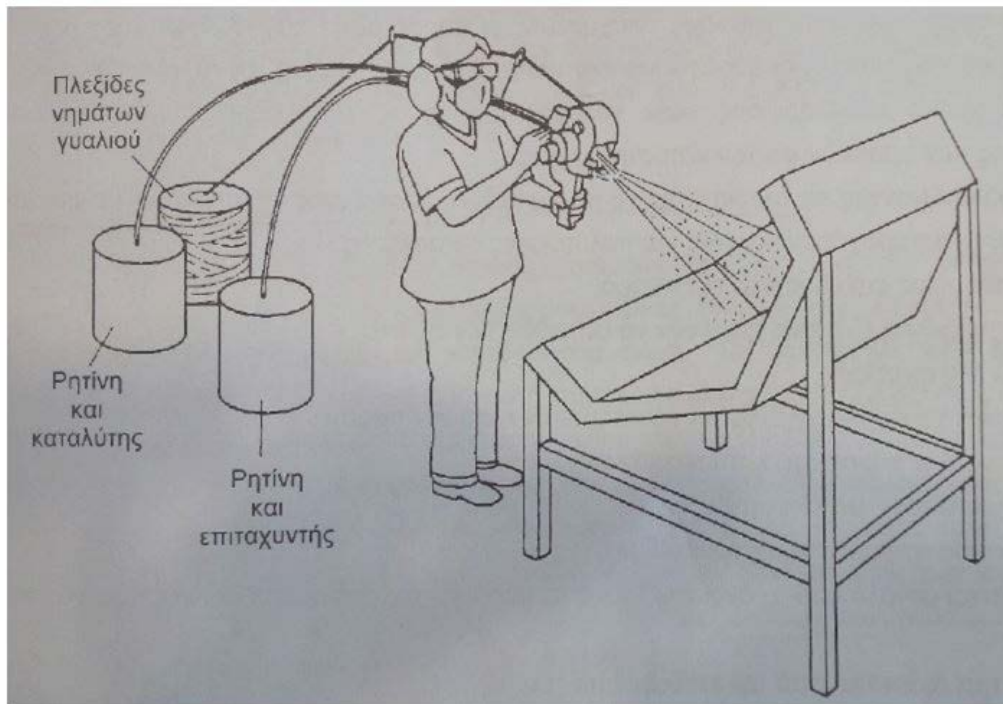
- A. Μορφοποίηση συνθέτου οργανικής μήτρας
 - a. Ασυνεχής μορφοποίηση συνθέτου
 - i. Μορφοποίηση με απλή επαφή (contact moulding)
 - ii. Μορφοποίηση με πίεση (compression moulding)
 - iii. Μορφοποίηση με διαιρετό καλούπι (matched die moulding)
 - iv. Έκχυσης ρητίνης (resin transfer moulding, RTM)
 - a. Συνεχής μορφοποίηση συνθέτου
 - i. Περιέλιξη νήματος (filament winding)
 - ii. Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheet moulding process, SMC)
 - iii. Μορφοποίηση με εμβάπτιση (pultrusion)
- B. Μορφοποίηση συνθέτου μεταλλικής μήτρας
 - a. Συνδιέλαση (co-extrusion)
 - b. Μορφοποίηση με χύτευση (casting process)
 - c. Συμπύεση σε στερεή κατάσταση
 - d. Απόθεση υλικού μήτρας

C. Μορφοποίηση συνθέτου κεραμικής μήτρας

Στην ναυπηγική εφαρμόζονται κυρίως οι μέθοδοι μορφοποίησης σύνθετων υλικών οργανικής μήτρας. Πιο συγκεκριμένα, για την κατασκευή σκαφών από σύνθετα υλικά η πιο συνηθισμένη μέθοδος είναι αυτή της μορφοποίησης με απλή επαφή, όπου τα υλικά ενίσχυσης περιλαμβάνουν συνεχείς ίνες σε μορφή υφασμάτων καθώς και κοντές ίνες τυχαίας διεύθυνσης. Η μήτρα γενικά είναι ρητίνη, συνήθως πολυεστερική και μπορεί να εφαρμοστεί με ένα ρολό χεριού, με συσκευή ψεκασμού ή χειρονακτικά. Αυτή η διεργασία γενικά γίνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και σε ατμοσφαιρική πίεση. Δύο παραλλαγές της μορφοποίησης αυτής είναι η επίστρωση με το χέρι (Hand Lay-up, ΣΧΗΜΑ 1.2) και η επίστρωση με ψεκασμό (Spray-up, ΣΧΗΜΑ 1.3).

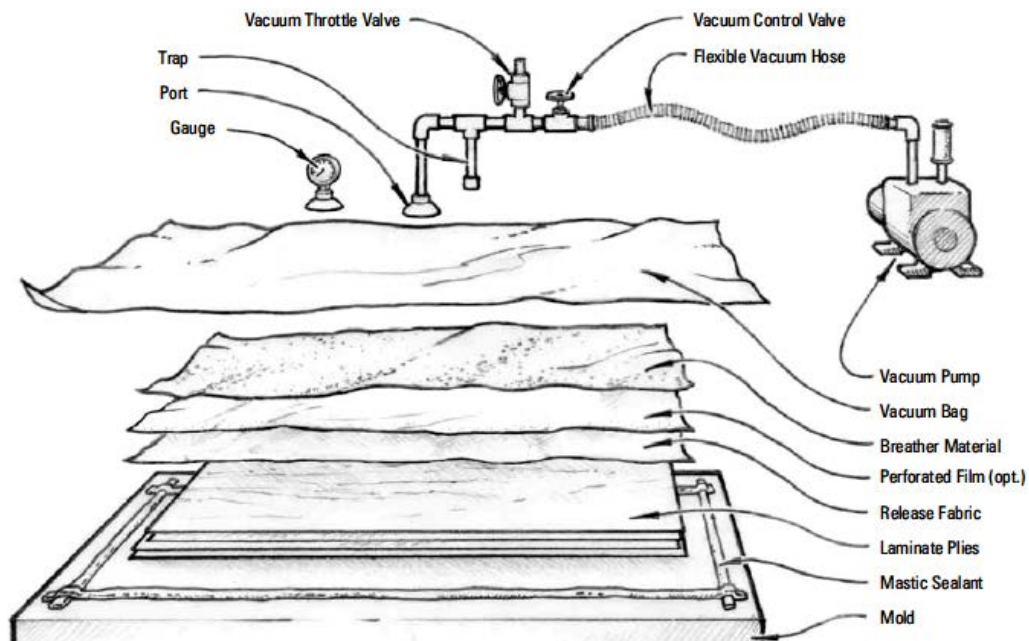


ΣΧΗΜΑ 1.2: Μέθοδος επίστρωσης με το χέρι.

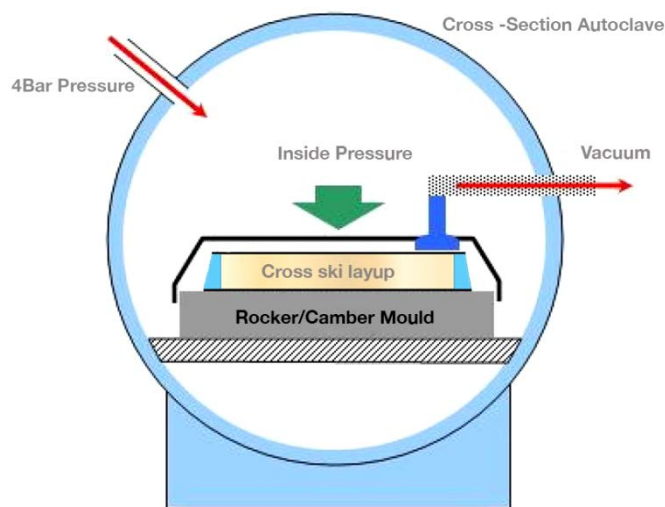


ΣΧΗΜΑ 1.3: Μέθοδος επίστρωσης με ψεκασμό.

Η μορφοποίηση με πίεση είναι μια μέθοδος βελτιωμένη σε σχέση με τη μορφοποίηση με απλή επαφή. Περιλαμβάνει την άσκηση πίεσης στην επιφάνεια του μη στερεοποιημένου πολύστρωτου, με σκοπό την απομάκρυνση της περίσσειας ρητίνης καθώς και των κενών αέρα. Παράλληλα επιτυγχάνεται υψηλότερη συγκέντρωση ινών και καλύτερη πρόσφυση μεταξύ των στρωμάτων του ελάσματος. Πολλές φορές επιβάλλεται ταυτόχρονα και θερμότητα προκειμένου να επιταχυνθεί ο πολυμερισμός και να αναπτυχθεί πλήρως η αντοχή και η δυσκαμψία του υλικού. Η μέθοδος εφαρμόζεται με δύο τεχνικές, είτε με σάκο κενού (vacuum bag moulding, ΣΧΗΜΑ 1.4), είτε σε θερμαινόμενο θάλαμο πίεσης (autoclave moulding, ΣΧΗΜΑ 1.5). Γενικότερα, η μέθοδος αυτή παράγει προϊόντα πολύ υψηλής ποιότητας καθώς και καλής επαναληψιμότητας ως προς τις ιδιότητές τους.

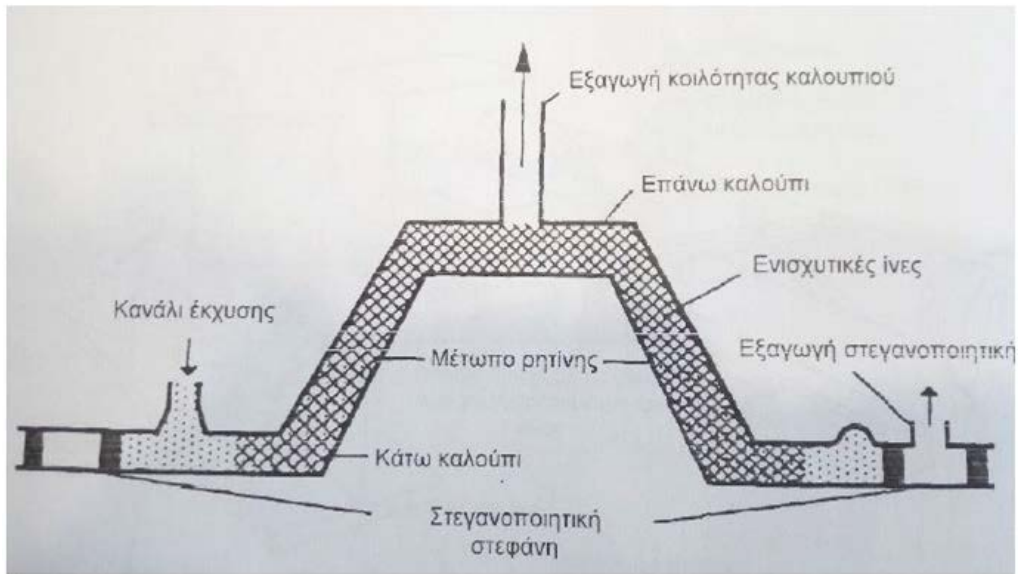


ΣΧΗΜΑ 1.4: Μορφοποίηση σε σάκο κενού.



ΣΧΗΜΑ 1.5: Μορφοποίηση σε θερμαινόμενο θάλαμο πίεσης.

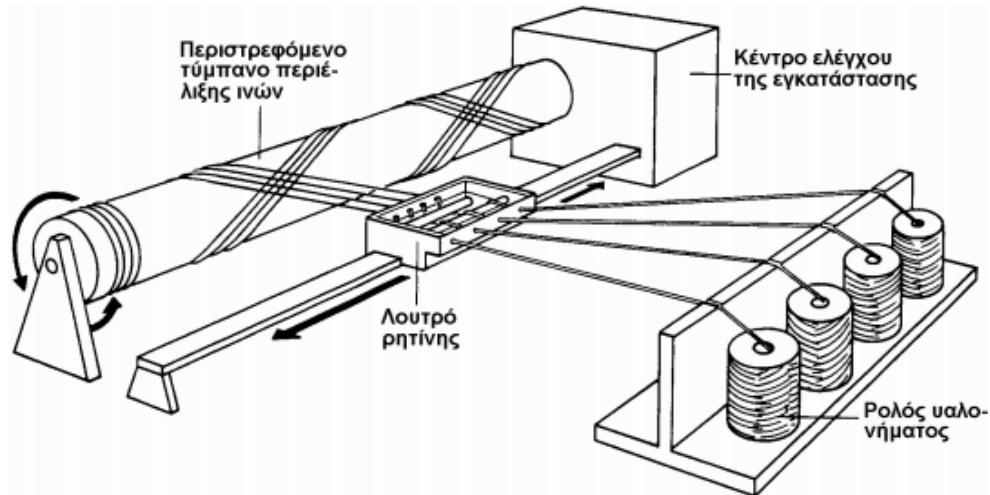
Όταν υπάρχει ανάγκη για προϊόντα με υψηλές απαιτήσεις ανοχών και μεγάλη περιεκτικότητα ινών συνίσταται η μορφοποίηση με έκχυση ρητίνης (resin transfer moulding). Κατά τη διαδικασία αυτής της μεθόδου, οι ενισχυτικές ίνες τοποθετούνται μεταξύ δύο καλουπιών τα οποία καθορίζουν και τη γεωμετρία του προϊόντος. Στη συνέχεια, η ρητίνη εκχύνεται με πίεση μέσα στην ειδική κοιλότητα μεταξύ των καλουπιών ώστε να μετατοπιστεί ο αέρας και να εξαεριστεί στις άκρες (ΣΧΗΜΑ 1.6). Η μέθοδος έκχυσης ρητίνης ενδείκνυται σε περιπτώσεις που απαιτούνται προϊόντα απόλυτα καθορισμένης γεωμετρίας και λείων επιφανειών.



ΣΧΗΜΑ 1.6: Μορφοποίηση με έκχυση ρητίνης.

Από τις μεθόδους συνεχής μορφοποίησης σύνθετων υλικών θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο αποκλειστικά η μέθοδος περιέλιξης ινών καθώς με αυτήν κατασκευάστηκαν τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

1.3 Περιέλιξη ινών και εφαρμογές υλικών από περιέλιξη ινών



ΣΧΗΜΑ 1.7: Μορφοποίηση με περιέλιξη ινών

Με τη μέθοδο περιέλιξης ινών (filament winding, ΣΧΗΜΑ 1.7) είναι δυνατόν να κατασκευαστούν οικονομικά και ποιοτικά κατασκευές εκ περιστροφής συμμετρικές, όπως κυλινδρικά και σφαιρικά κελύφη ή κύλινδροι με ημισφαιρικά καπάκια στα άκρα. Η διαδικασία περιλαμβάνει περιέλιξη νημάτων υπό τάση πάνω σε περιστρεφόμενο κυλινδρικό καλούπι (mandrel) το οποίο καθορίζει την εσωτερική γεωμετρία. Οι ίνες είναι σε μορφή συνεχών πλεξίδων νήματος (rovings) οι οποίες συχνά τυλίγονται πολλές μαζί δημιουργώντας μια ζώνη (λωρίδα) ινών και είτε διαποτίζονται με ρητίνη αμέσως πριν τυλιχτούν στο καλούπι (wet-winding) είτε είναι προεμποτισμένες με μερικά στερεοποιημένη ρητίνη (dry-winding). Η περιέλιξη μπορεί να είναι ελικοειδής όπου το αξονικό καλούπι περιστρέφεται συνεχώς κατά τον διαμήκη άξονα που διέρχεται από το κέντρο του, ενώ ο βραχίονας τροφοδοσίας ινών κινείται συνεχώς, μπρος πίσω, με ταχύτητες συγχρονισμένες με αυτές του άξονα, σε οριζόντια διεύθυνση παράλληλη σε αυτόν. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνονται συγκεκριμένες γωνίες περιέλιξης. Η περιέλιξη μπορεί να είναι πολική όπου ο βραχίονας τροφοδοσίας των ινών περιστρέφεται γύρω από ένα ακίνητο καλούπι. Η τοποθέτηση των ινών γίνεται υπό συγκεκριμένη γωνία που καθορίζεται από τη σχετική θέση καλουπιού και βραχίονα και ελέγχεται από την μονάδα ελέγχου της μηχανής. Μόλις το καλούπι καλυφθεί πλήρως με το επιθυμητό πάχος ινών, ξεκινάει η διαδικασία της σκλήρυνσης της ρητίνης επάνω στο καλούπι και πιθανόν μέσα σε φούρνο, ανάλογα με το σύστημα της ρητίνης και τα

χαρακτηριστικά σκλήρυνσής του. Μετά από τον πλήρη πολυμερισμό της ρητίνης το καλούπι αφαιρείται αφήνοντας το τελικό κυλινδρικό σύνθετο υλικό. Τα αξονικά καλούπια πρέπει να αντέχουν τα θλιπτικά φορτία που αναπτύσσονται από τις τάσεις περιέλιξης καθώς και τις υψηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται κατά την σκλήρυνση της ρητίνης, για το λόγο αυτό είναι συνήθως χαλύβδινα και για την ευκολότερη αποκόλληση τους έχουν μικρή κωνικότητα ή είναι διαιρετά. Σε ορισμένες εφαρμογές το καλούπι δεν αφαιρείται μετά το τέλος της διαδικασίας και αποτελεί μόνιμο μέρος του τελικού προϊόντος. Η γωνία περιέλιξης της ίνας έχει επίδραση στις ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Υψηλές γωνίες περιέλιξης (κοντά στις 90°) θα παρέχουν περιφερειακή αντοχή, ενώ χαμηλότερες γωνίες θα παρέχουν μεγαλύτερη διαμήκη/ αξονική αντοχή σε εφελκυσμό. Η διαδικασία περιέλιξης είναι μία διαδικασία κατάλληλη για αυτοματοποίηση και για επίτευξη υψηλών ρυθμών παραγωγής. Επίσης, η μικρή επίδραση του ανθρώπινου παράγοντα στην παραγωγική διαδικασία οδηγεί σε προϊόντα υψηλής ποιότητας καθώς και σε μείωση του κόστους λόγω των λιγότερων εργατοωρών.

Λόγω αυτών των πλεονεκτημάτων η παραγωγή σύνθετων υλικών με τη μέθοδο της περιέλιξης ινών αυξάνεται συνεχώς έχοντας εφαρμογή σε κλάδους όπως η ναυπηγική, η αεροναυπηγική και άλλες βιομηχανίες. Η εφαρμογή τέτοιων υλικών σε στρατιωτικά αεροπλάνα, ελικόπτερα, δορυφόρους, σκάφη αναψυχής καθώς και σε αρκετά κομμάτια των αυτοκινήτων είναι απόδειξη της ολοένα και αυξανόμενης χρήσης των σύνθετων υλικών.

Πιο συγκεκριμένα, η χρήση των συνθέτων υλικών στη ναυτιλία, αποτελεί μια από τις μεγάλες μεταπολεμικές επιτυχίες, καθώς μετέτρεψε την κατασκευή πλοίων από μια βιοτεχνία πολυάριθμων μικρών ναυπηγείων, σε μια μαζικής παραγωγής πλοίων βιομηχανία. Το ενισχυμένο με ίνες γυαλιού πλαστικό (GRP), είναι σήμερα το δημοφιλέστερο υλικό σε διάφορες εφαρμογές στις θαλάσσιες μεταφορές. Ενώ συνήθως τα μεγάλα πλοία κατασκευάζονται από χάλυβα, πάνω από το 80% των πλωτών σκαφών μήκους μικρότερου των 40m, περίπου, αποτελούνται από πλαστικό με υαλοβάμβακα (Smith 1990). Αυτό συμβαίνει κυρίως γιατί η κατασκευή σε GRP είναι οικονομικότερη για σχετικά μικρά σκάφη. Τα σύνθετα υλικά κερδίζουν συνεχώς έδαφος λόγω της καλής τους συμπεριφοράς σε υδάτινο περιβάλλον αλλά και των υψηλών ειδικών τους ιδιοτήτων (λόγος τιμής ιδιότητας προς ειδικό βάρος).

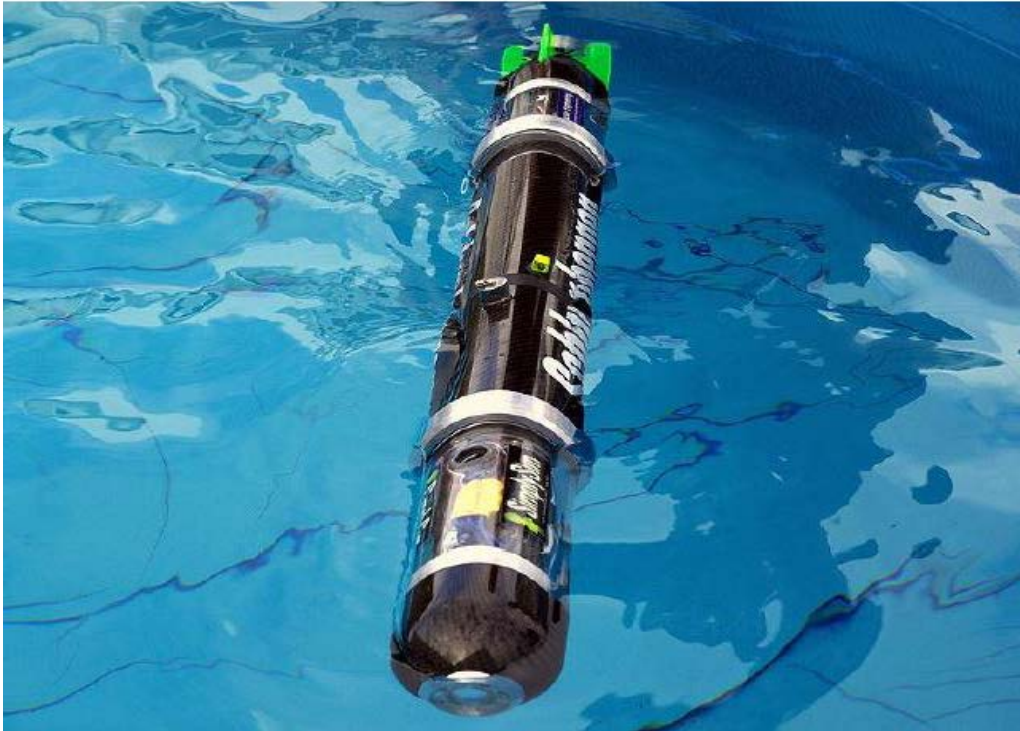
Τα υλικά που παράγονται με την μέθοδο περιέλιξης ινών, προορίζονται για στοιχεία κυλινδρικών διατομών. Ιδιαίτερη εφαρμογή βρίσκουν σε υποθαλάσσιους αγωγούς μεταφοράς πετρελαίου καθώς και σε δίκτυα σωληνώσεων σκαφών. Ακόμη μία εφαρμογή που συναντώνται τα συγκεκριμένα υλικά μέσα στα σκάφη είναι οι άξονες μετάδοσης ισχύος (drive shaft) που σε ορισμένες περιπτώσεις μικρών σκαφών τείνουν να αντικατασταθούν από σύνθετα υλικά λόγω εξοικονόμησης βάρους. Με το ίδιο σκεπτικό, ήδη, φρακτές πλοίων, καταστρώματα και υπερκατασκευές που χρησιμοποιούνται είναι κατασκευασμένα από πλαστικό. Επιπλέον οι ναυπηγικές κατασκευές και τα εξαρτήματα που κατασκευάζονται με τη μέθοδο αυτή συμπεριλαμβάνουν δεξαμενές αποθήκευσης χημικών όπου υπάρχει ανάγκη για αντοχή σε μεγάλες εσωτερικές και εξωτερικές πιέσεις. Οι δεξαμενές με μεγάλη αντοχή σε εσωτερικές πιέσεις προορίζονται για τη μεταφορά και αποθήκευση καυσίμων όπως το

υδρογόνο ή το φυσικό αέριο (CNG tank). Αντίστοιχα, οι κύλινδροι με αντοχή στις εξωτερικές πιέσεις χρησιμοποιούνται ως προστατευτικά περιβλήματα πίεσης (pressure housings). Άλλες εφαρμογές των σύνθετων υλικών συναντώνται σε πλωτήρες, θόλους ηχοβολιστικών, κελύφη τορπιλών καθώς και γαστρών πίεσης για υψηλών απαιτήσεων υποβρύχια οχήματα (αυτόνομα ή και επανδρωμένα). Τέλος υπάρχει εφαρμογή στους κυλίνδρους που υποστηρίζουν τις ηλεκτρικές έλικες πηδαλιουχίας (tunnels for electric bow thrusters), στα κατάρτια των ιστιοπλοϊκών σκαφών αλλά και στις κωπηλατικές λέμβους και στα κουπιά κωπηλασίας.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποιες εφαρμογές των σύνθετων υλικών στη ναυτιλία όπως, σε δεξαμενές αποθήκευσης φυσικού αερίου (ΣΧΗΜΑ 1.8), σε κατασκευές υποβρύχιων οχημάτων (ΣΧΗΜΑ 1.9) καθώς και σε κατασκευές πολεμικών σκαφών (1.10). Στο ΣΧΗΜΑ 1.11 παρουσιάζονται, γενικά, οι εφαρμογές των σύνθετων υλικών σε πολεμικά και συμβατικά πλοία.



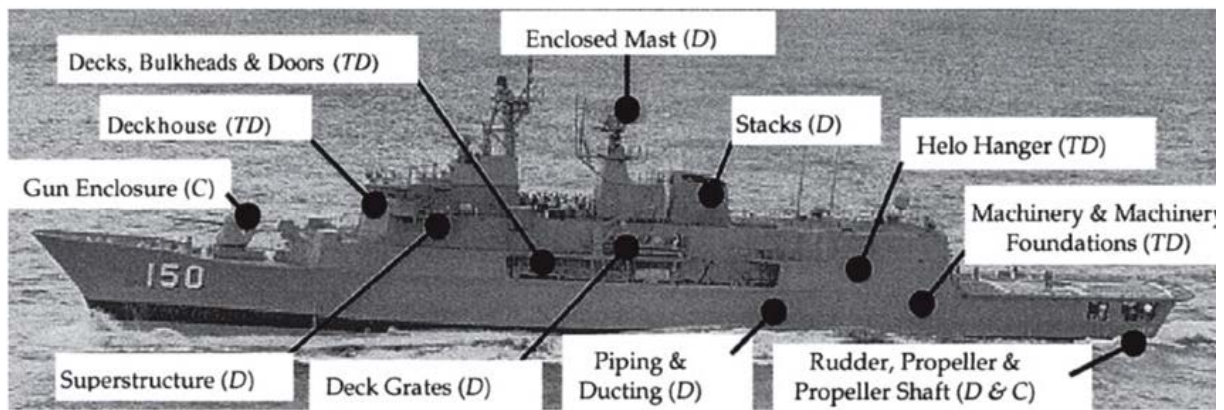
ΣΧΗΜΑ 1.8: Δεξαμενή αποθήκευσης φυσικού αερίου κατασκευασμένη με περιέλιξη ινών.



ΣΧΗΜΑ 1.9: Αυτόνομο υποβρύχιο όχημα κατασκευασμένο από σύνθετα υλικά.



ΣΧΗΜΑ 1.10: Κορβέτες τύπου Visby του σουηδικού πολεμικού ναυτικού, κατασκευασμένες από σύνθετα ελάσματα τύπου sandwich με πυρήνα αφρού PVC και περιβλήματα από υβριδικά φύλλα άνθρακα-γυαλιού.



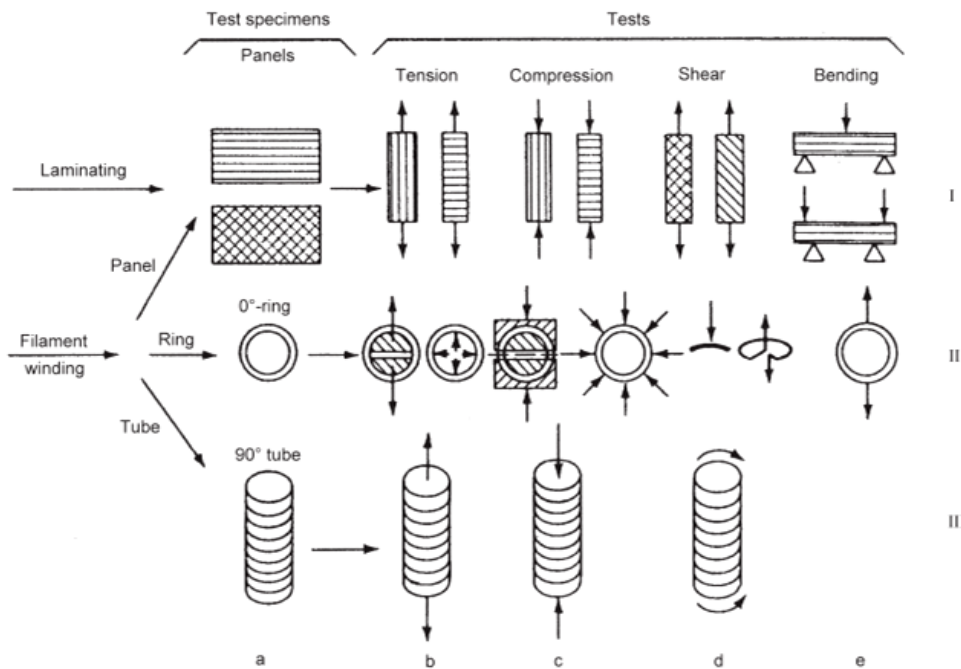
ΣΧΗΜΑ 1.11: Εφαρμογές κατασκευών από σύνθετα υλικά σε πολεμικά πλοία και σε συμβατικά πλοία γενικότερα.

2. ΔΟΚΙΜΕΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η ανάγκη χαρακτηρισμού των υλικών έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη προτύπων που προσδιορίζουν πλήρως τις διαδικασίες μέτρησης των ιδιοτήτων των περισσότερων υλικών ευρείας χρήσης. Τα πρότυπα αυτά είναι αναγκαίο να υπακούουν σε διεθνώς αναγνωρισμένους κανονισμούς. Έτσι το 1898 ιδρύθηκε η Αμερικανική Εταιρία Δοκιμών και υλικών (American Society for Testing and Materials, ASTM) με σκοπό την ανάπτυξη και δημοσίευση ομόφωνα αποδεκτών τεχνικών προτύπων που αφορούν στην κατασκευή υλικών, προϊόντων, συστημάτων και υπηρεσιών.

2.1 Συμβατικές μέθοδοι χαρακτηρισμού

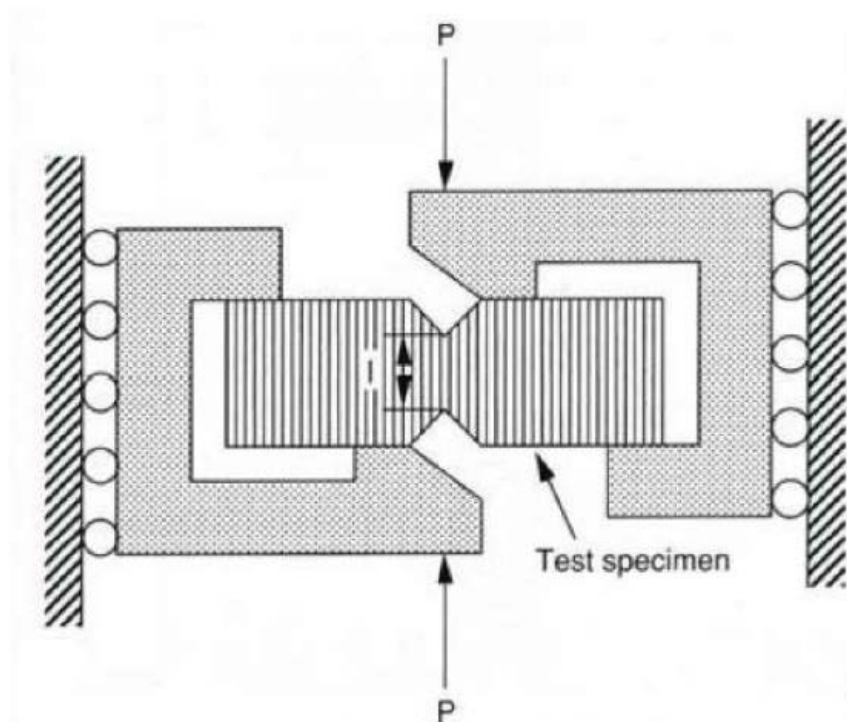
Η ανάπτυξη της τεχνογνωσίας γύρω από τα σύνθετα υλικά και η αυτοματοποίηση της παραγωγής οδήγησαν στην ολοένα και αυξανόμενη εφαρμογή τους σε διάφορους βιομηχανικούς κλάδους. Έτσι δημιουργήθηκε η ανάγκη ύπαρξης προτύπων για τον προσδιορισμό των φυσικών και μηχανικών τους ιδιοτήτων. Σκοπός των προτύπων είναι ο πειραματικός προσδιορισμός ,μέσω συγκεκριμένης διαδικασίας, της ιδιότητας ενός υλικού χρησιμοποιώντας δοκίμια αυτού με κατάλληλη διαμόρφωση έτσι ώστε τα αποτελέσματα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αξιοπιστία. Το ΣΧΗΜΑ 2.1 αποτελεί απεικόνιση των διαφόρων δοκιμών που μπορούν να εφαρμοστούν σε επίπεδα δοκίμια (I), σε δακτυλίους (II) και σε σωληνωτά δοκίμια (III).



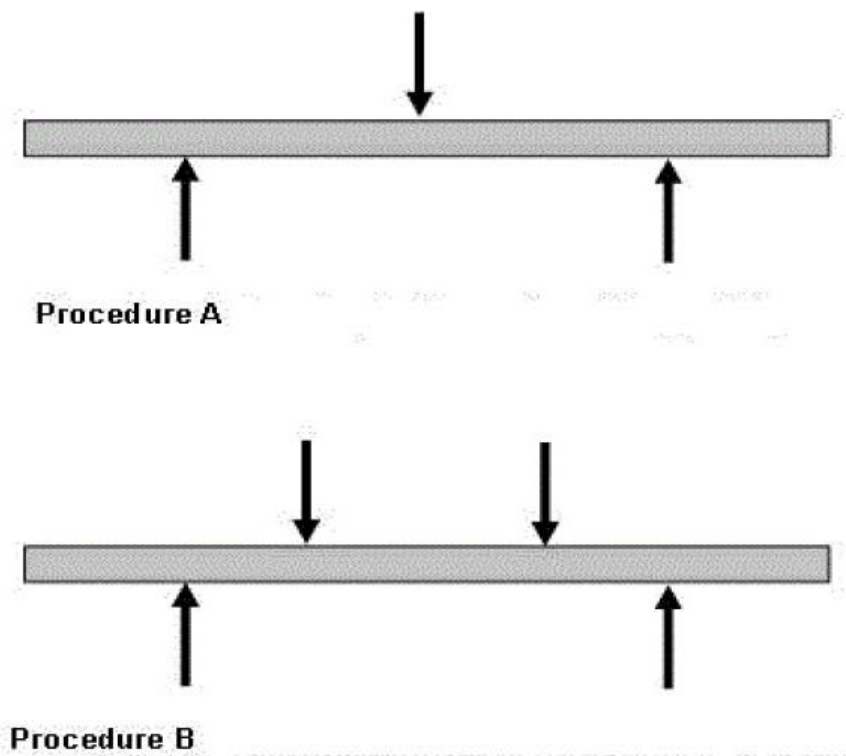
ΣΧΗΜΑ 2.1: Δοκιμές χαρακτηρισμού δοκιμίων από περιέλιξη ινών.

Οι συμβατικές δοκιμές που μπορούν να πραγματοποιηθούν σε επίπεδα δοκίμια είναι αυτές του εφελκυσμού, της θλίψης, της διάτμησης και της κάμψης. Στις δοκιμές εφελκυσμού εφαρμόζεται το πρότυπο ASTM D3039, στο οποίο λεπτό επίπεδο δοκίμιο του υλικού, σταθερής διατομής, εφελκύεται μονοτονικά με ταυτόχρονη καταγραφή του φορτίου. Ως ολική αντοχή θεωρείται το μέγιστο φορτίο, ενώ το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται μέσω του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων. Οι ιδιότητες του υλικού σε θλίψη υπολογίζονται με ίδια διαδικασία με αυτή του εφελκυσμού μέσω του προτύπου ASTM D3410. Ο υπολογισμός της αντοχής του υλικού σε διάτμηση μπορεί να επιτευχθεί μέσα από πληθώρα κατάλληλων προτύπων. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει το πρότυπο ASTM D3518 όπου μονοτονικός εφελκυσμός, όπως αναφέρεται στο πρότυπο ASTM D3039, ασκείται σε επίπεδα συμμετρικά δοκίμια με γωνία προσανατολισμού των ινών $\pm 45^\circ$ ως προς τον κύριο άξονα του υλικού. Σε αυτή την περίπτωση, η διατμητική αντοχή υπολογίζεται από το φορτίο που παραλαμβάνει το δοκίμιο, ενώ το μέτρο διάτμησης, από το διάγραμμα διατμητικών τάσεων-παραμορφώσεων. Μια άλλη μέθοδος για τον προσδιορισμό των διατμητικών ιδιοτήτων ενός υλικού είναι η άσκηση θλιπτικής φόρτισης σε δοκίμιο με εγκοπές όπως ορίζεται από το πρότυπο ASTM D3846. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται καθαρή διάτμηση μεταξύ των δύο εγκοπών. Τέλος οι διατμητικές ιδιότητες ενός υλικού μπορούν να υπολογιστούν με την πειραματική διαδικασία που ορίζει το πρότυπο ASTM D5379, όπου δοκίμιο με εγκοπές τύπου V φορτίζεται μέσω ειδικής διάταξης που παρουσιάζεται στο ΣΧΗΜΑ 2.2, εμφανίζοντας διάτμηση μεταξύ των εγκοπών στο μέσο του δοκιμίου. Οι καμπτικές ιδιότητες του υλικού υπολογίζονται με την κάμψη τριών ή τεσσάρων σημείων (ΣΧΗΜΑ 2.3) ενός δοκιμίου σταθερής ορθογωνικής διατομής, όπως ορίζεται από το πρότυπο ASTM D7264.

Στις εν λόγω διαδικασίες οι καμπτικές ιδιότητες μετριοούνται κάτω από το σημείο εφαρμογής της φόρτισης ή μεταξύ των δύο μελών εφαρμογής της φόρτισης αντίστοιχα.



ΣΧΗΜΑ 2.2: Τυπική διάταξη προτύπου ASTM D5379.



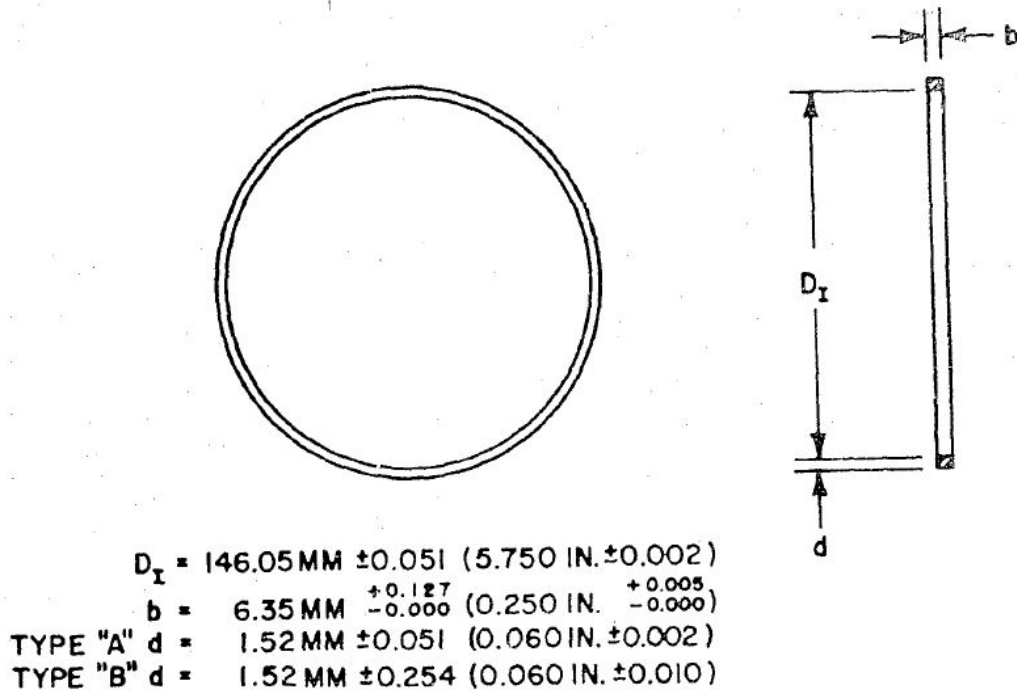
ΣΧΗΜΑ 2.3: Κάμψη τριών (procedure A) και τεσσάρων (procedure B) σημείων σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D7264.

2.2 Δοκιμές χαρακτηρισμού καμπύλων δοκιμίων

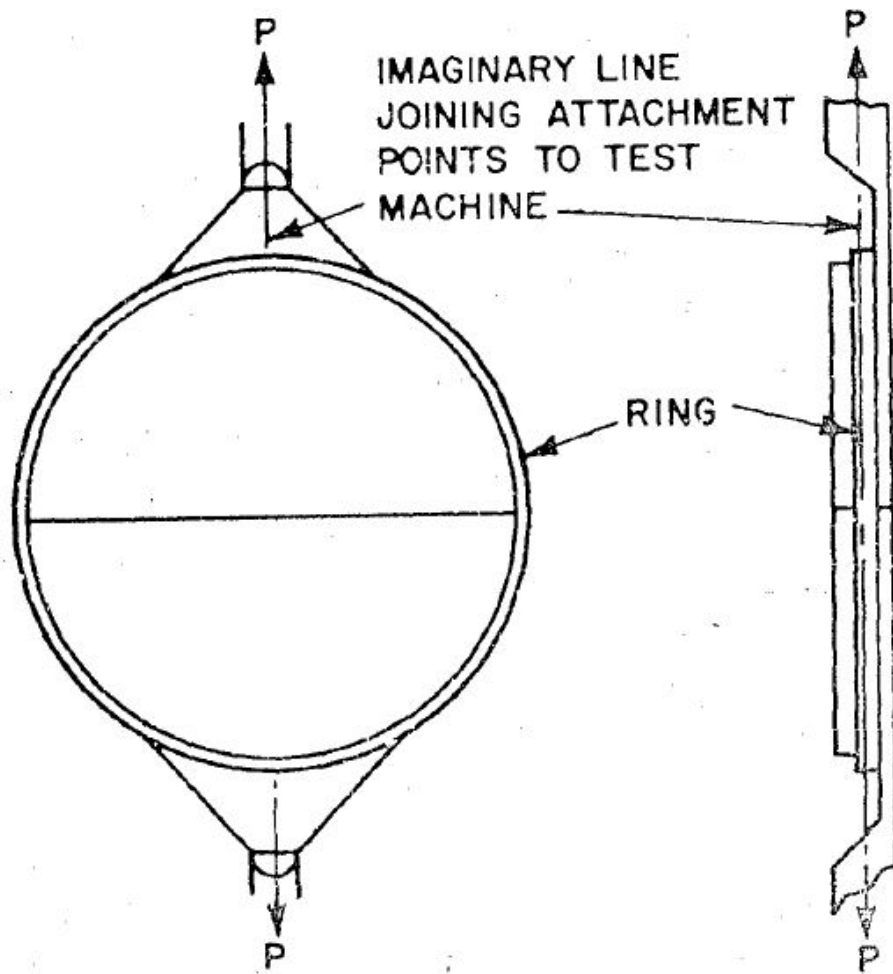
Οι δοκιμές που παρουσιάστηκαν παραπάνω αφορούν επίπεδα δοκίμια. Ωστόσο με τη μέθοδο της περιέλιξης των ινών παράγονται κυρίως καμπύλα κυλινδρικά προϊόντα. Το γεγονός αυτό καθιστά δύσκολο τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων ενός τέτοιου δοκιμίου με τις συμβατικές μεθόδους που αναλύθηκαν. Γι αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν μέθοδοι συμβατές για καμπύλα δοκίμια. Συγκεκριμένα το Αμερικάνικο Ναυτικό Εργαστήριο πυροβολικού (US Naval Ordnance Laboratory) ή αλλιώς NOL σχεδίασε πειραματικές διαδικασίες υπολογισμού των μηχανικών ιδιοτήτων υλικών κατασκευασμένων με περιέλιξη ινών και με καμπύλα σχήματα. Οι σημαντικότερες εξ αυτών είναι η πειραματική δοκιμή δακτυλίων με τη μέθοδο διαιρούμενου δίσκου και η κάμψη δοκιμίων με μικρή ακτίνα καμπυλότητας.

Η πρώτη μέθοδος αναφέρεται στον υπολογισμό της τάσης αστοχίας του υλικού στην περιφερειακή διεύθυνση ενίσχυσης των ινών. Κατά την πειραματική αυτή διαδικασία σε δακτυλιοειδές δοκίμιο, με διάμετρο 150mm, πλάτος 6.35mm και πάχος 1.52mm, σκαρίφημα του οποίου παρουσιάζεται στο ΣΧΗΜΑ 2.4, ασκείται εσωτερική πίεση μέσω ειδικής διάταξης διαιρούμενου δίσκου (ΣΧΗΜΑ 2.5). Η μέγιστη αντοχή υπολογίζεται από το μέγιστο φορτίο θραύσης που δύναται να φέρει το δοκίμιο. Η διαδικασία αυτή ορίζεται με βάση το πρότυπο ASTM D2290.

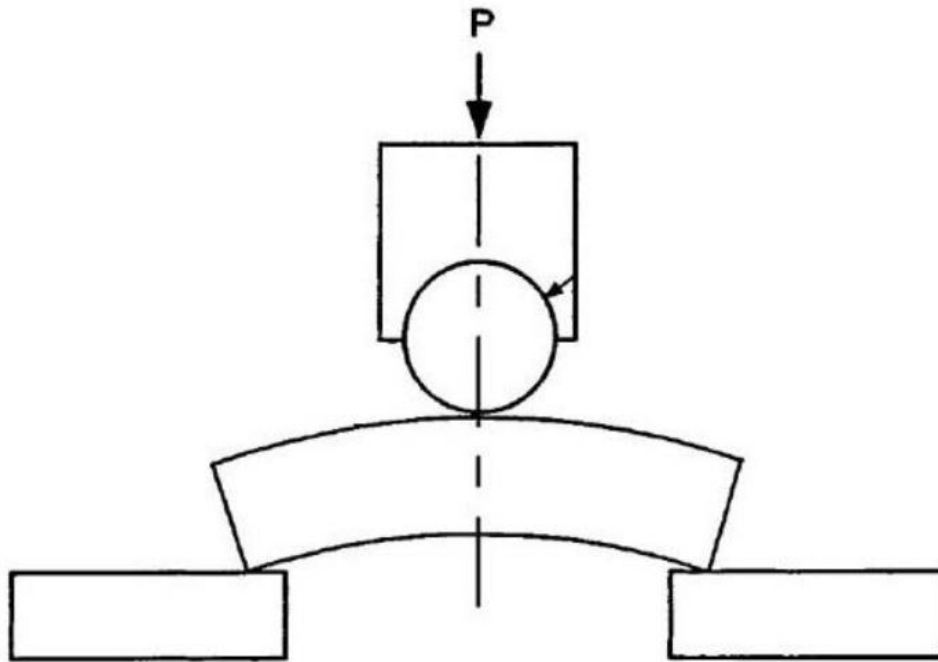
Η δεύτερη πειραματική δοκιμή, προσδιορίζει την αντοχή δοκιμίου μικρής ακτίνας καμπυλότητας σε κάμψη σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D2344. Κατά το πρότυπο αυτό το δοκίμιο τοποθετείται πάνω σε στηρίγματα που επιτρέπουν την πλευρική κίνηση όπως απεικονίζεται στο ΣΧΗΜΑ 2.6, ενώ η δύναμη εφαρμόζεται μέσω ειδικής διάταξης κατευθείαν στο κέντρο του δοκιμίου. Ομοίως με το προηγούμενο πρότυπο, η μέγιστη αντοχή υπολογίζεται από το μέγιστο φορτίο θραύσης που δύναται να φέρει το δοκίμιο.



ΣΧΗΜΑ 2.4: Δακτυλιοειδές δοκίμιο σύμφωνα με το NOL.



ΣΧΗΜΑ 2.5: Τυπική διάταξη διαιρούμενου δίσκου.

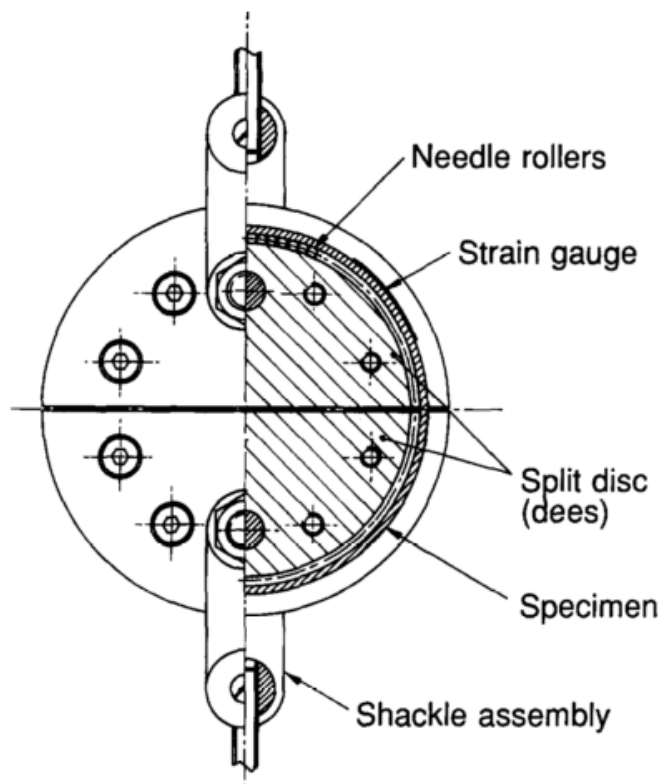


ΣΧΗΜΑ 2.6: Διάταξη πειραματικής μεθόδου όπως ορίζεται από το πρότυπο ASTM D2344.

2.3 Ιστορική αναδρομή

Η δοκιμή διαιρούμενου δίσκου (split disk) κέρδιζε ολοένα και περισσότερο έδαφος λόγω της σχετικά εύκολης διάταξης της. Ωστόσο τα αποτελέσματα που παράγονταν από αυτήν, όσον αφορά στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, ήταν χαμηλότερα από τα αναμενόμενα γεγονός που οφείλεται στην ύπαρξη τριβής μεταξύ των κομματιών του δίσκου και του δακτυλοειδούς δοκιμίου καθώς και στην ανάπτυξη ανεπιθύμητων καμπτικών τάσεων στο ανυποστήρικτο σημείο του δοκιμίου. Πιο συγκεκριμένα για την κάμψη, λόγω ασυνέχειας της επαφής της επιφάνειας του δοκιμίου με αυτή του δίσκου εμφανίζονται φαινόμενα τοπικής κάμψης. Το φαινόμενο αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη θλιπτικών τάσεων στην εξωτερική επιφάνεια μειώνοντας τις αντίστοιχες εφελκυστικές. Γι αυτούς τους λόγους διάφοροι ερευνητές και επιστήμονες τα τελευταία χρόνια παρουσίασαν διάφορες εναλλακτικές, βελτιωμένες δοκιμές για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων καμπύλων δοκιμίων.

Αρχικά οι Jones, Middleton και Owen (1996) πρότειναν τη χρήση μικρών κυλινδρικών βελόνων (needle-rollers) μεταξύ του διαιρούμενου δίσκου και του δοκιμίου με σκοπό την μείωση της τριβής. Επιπλέον κατάφεραν να επιτύχουν μια πιο ομοιόμορφη παραμόρφωση του δακτυλίου. Παρ όλα αυτά η ύπαρξη καμπτικών τάσεων στα ανυποστήρικτα κομμάτια του δακτυλίου συνέχισε να υφίσταται ενώ παράλληλα παρατηρήθηκε τριβή από τις βελόνες, αν και μικρότερη σε μέγεθος σε σχέση με την αρχική. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διάταξη του διαιρούμενου δίσκου με χρήση βελόνων (ΣΧΗΜΑ 2.7).

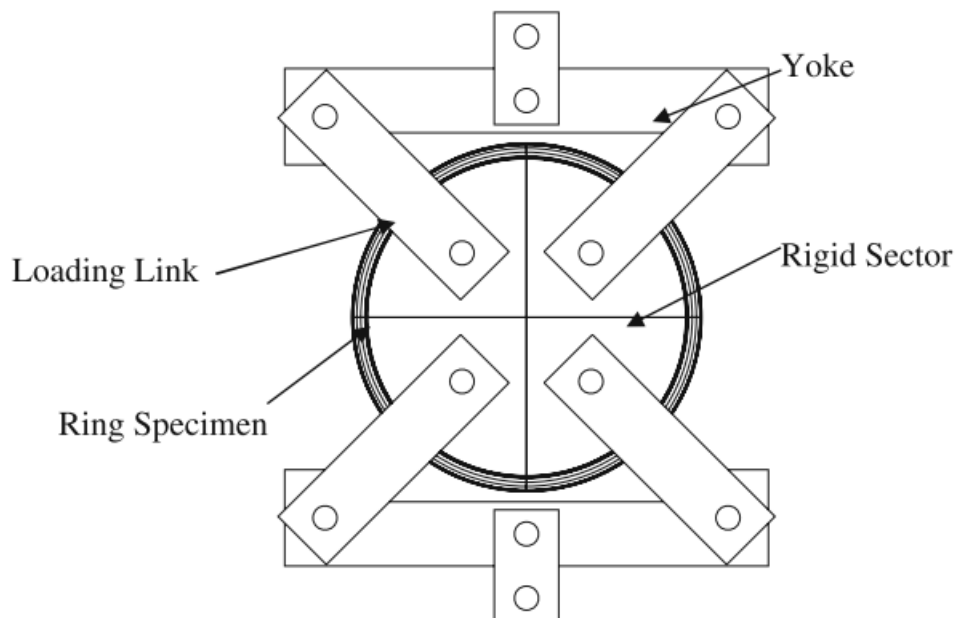


ΣΧΗΜΑ 2.7: Πειραματική διάταξη διαιρούμενου δίσκου με needle-rollers.

Αργότερα οι Yoon, Kim και Cho (1997) κάνοντας πειράματα για τον υπολογισμό των εφελκυστικών ιδιοτήτων δακτυλιοειδών δοκιμίων παρατήρησαν με τη σειρά τους το φαινόμενο ανάπτυξης τριβής μεταξύ των δίσκων και του δοκιμίου καθώς και της ύπαρξης καμπτικών τάσεων στις πειραματικές τιμές. Έτσι προκειμένου να επιτύχουν μια σχετική ταύτιση των πειραματικών τιμών με τις θεωρητικές, χρησιμοποίησαν σκόνη γραφίτη στις επιφάνειες επαφής του διαιρούμενου δίσκου με τα δοκίμια, μειώνοντας έτσι την τριβή. Επιπλέον, οι ερευνητές απέδειξαν ότι οι καμπύλες φορτίου-παραμόρφωσης κατά την φόρτιση και αποφόρτιση του δοκιμίου εμφάνιζαν έναν βρόγχο υστέρησης οφειλόμενο στην ύπαρξη τριβής, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η κλίση των καμπυλών και επομένως το μέτρο ελαστικότητας των δοκιμίων. Αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων έδειξαν ότι η μέση κλίση των δύο ανεπτυγμένων καμπυλών είναι σχεδόν ίση με την κλίση της καμπύλης που αντιστοιχεί στην περίπτωση χωρίς τριβή μεταξύ των δύο σωμάτων. Με τον τρόπο αυτό, η αξιοπιστία της μέτρησης του συντελεστή ελαστικότητας αυξάνεται καθώς καθίσταται ανεξάρτητη από την τριβή.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε κυλίνδρους από περιέλιξη ιών εφαρμόζοντας εσωτερική πίεση με σκοπό τον προσδιορισμό των μηχανικών τους ιδιοτήτων (Karpuz 2005). Την ίδια χρονιά μια άλλη ομάδα ερευνητών (Kaynak, Salim et al. 2005) προχώρησε σε δοκιμές με τη μέθοδο διαιρούμενου δίσκου σε σωλήνες από σύνθετα υλικά. Σκοπός ήταν ο προσδιορισμός της επίδρασης κατασκευαστικών παραμέτρων, όπως το είδος της ρητίνης, ο τύπος της ενισχυτικής ίνας και η γωνία περιέλιξης στην αντοχή των δοκιμίων.

Αργότερα ομάδα επιστημόνων (Hamed et al 2008) πραγματοποίησε δοκιμές με εσωτερική πίεση σε σύνθετα υλικά από γυαλί και άνθρακα, ενώ, παράλληλα, οι Walsh και Adams (2008) πρότειναν την χρήση μιας εναλλακτικής και βελτιωμένης μορφής διαιρούμενου δίσκου. Συγκεκριμένα αντί για δύο μισά κομμάτια του δίσκου, χρησιμοποίησαν μια διάταξη με τέσσερα τεταρτημόρια κομμάτια (Quadrant ring test) έτσι ώστε η διανομή της τάσης στο δακτυλιοειδές δοκίμιο να είναι περισσότερο ομοιόμορφη. Η διάταξη του Quadrant ring test παρουσιάζεται στο ΣΗΜΑ 2.8. Σκοπός της συγκεκριμένης διάταξης ήταν ο περιορισμός των καμπτικών τάσεων και η εξάλειψη της τριβής. Παρ' όλα αυτά κατά την διάρκεια των πειραμάτων παρατηρήθηκε περιστροφή των τεταρτημόριων δίσκων στην αρχή της φόρτισης. Επιπλέον, οι τιμές της αντοχής σε εφελκυσμό ήταν αρκετά παρόμοιες με τη μέθοδο του διαιρούμενου δίσκου των 2 κομματιών.



ΣΧΗΜΑ 2.8: Διάταξη Quadrant ring test.

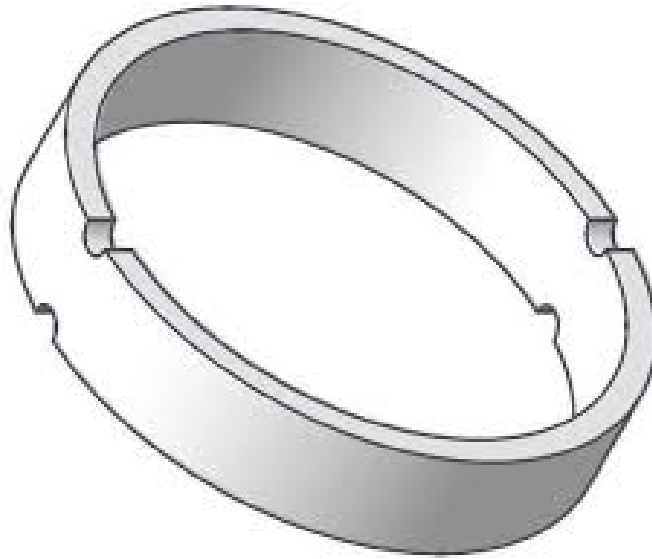
Οι Cain, Case και Lesko (2009) παρουσίασαν ένα καινοτόμο εργαλείο για την αντιμετώπιση των κοινών προβλημάτων της μεθόδου δοκιμής split disk, χρησιμοποιώντας μονώσεις PTFE και υδραυλικό υγρό για ομοιόμορφη εφαρμογή πίεσης στην εσωτερική επιφάνεια των δακτυλίων. Μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η παραμόρφωση των μονώσεων μετά από κάποιον αριθμό επαναλήψεων, με αποτέλεσμα να μην εφαρμόζουν κατάλληλα σε επόμενα δοκίμια. Ακολούθως, οι Chen, Li et al. (2011) πραγματοποίησαν κάποιες ακόμα δοκιμές με τη μέθοδο του διαιρούμενου δίσκου, ενώ παρόμοιες δοκιμές έγιναν και από τον Rafiee (2012) ο οποίος ταυτόχρονα πραγματοποίησε και δοκιμές με υδραυλική

πίεση. Τέλος οι Abed, Pinna et al (2014) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του split disc προχώρησαν στην εξακρίβωση της εφελκυστικής τάσης δακτυλίων από ενισχυτικές ίνες άνθρακα.

Ανακεφαλαιώνοντας, τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει διάφορες πειραματικές διαδικασίες και έχουν προταθεί αρκετές βελτιώσεις έτσι ώστε οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών να είναι κατά το μέγιστο αξιόπιστες. Έχουν χρησιμοποιηθεί υδραυλικά μέσα για εφαρμογή πίεσης εσωτερικά σε δακτυλίους, έχουν χρησιμοποιηθεί ειδικές κατασκευές για εφαρμογή ομοιόμορφης εσωτερικής πίεσης, διατάξεις με διαιρούμενους δίσκους για άσκηση εφελκυστικής τάσης περιφερειακά των ενισχυτικών ινών ή τέλος πειράματα άσκησης πίεσης στο εσωτερικό κυλίνδρων. Η δοκιμή διαιρούμενου δίσκου λόγω της απλής πειραματικής διαδικασίας που περιλαμβάνει και των καλών αποτελεσμάτων σε άσκηση εφελκυστικού φορτίου είναι ευρύτατα χρησιμοποιούμενη και θα παρουσιαστεί εκτενέστερα στη συνέχεια.

2.4 Μέθοδος διαιρούμενου δίσκου

Όπως προαναφέρθηκε, η δοκιμή διαιρούμενου δίσκου ήταν αποτέλεσμα της ανάγκης εύρεσης πειραματικών διαδικασιών υπολογισμού μηχανικών ιδιοτήτων για καμπύλα δοκίμια. Η μέθοδος split disk, όπως περιγράφεται από το πρότυπο ASTM D2290 ως συνέχεια του NOL, είναι κατάλληλη για τον προσδιορισμό της αντοχής εφελκυσμού των περισσότερων σύνθετων υλικών, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες πειράματος (προεργασία δοκιμίου, θερμοκρασία και υγρασία περιβάλλοντος χώρου, ταχύτητα μηχανής). Αυτή η μέθοδος δοκιμής εφαρμόζεται σε ενισχυμένους κυλίνδρους θερμοσκληραινόμενης ρητίνης, ανεξάρτητα από τη μέθοδο κατασκευής καθώς επίσης και σε ενισχυμένους σωλήνες με θερμοπλαστική ρητίνη. Τα δοκίμια που εξετάζονται με τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι δακτύλιοι που κόβονται κατά το εγκάρσιο από κυλίνδρους συγκεκριμένης διαμέτρου. Επιπλέον τα δοκίμια φέρουν σύμφωνα με το πρότυπο μία ή δύο εγκοπές όπως απεικονίζεται στο ΣΧΗΜΑ 2.9. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ωστόσο, επιλέχθηκε για λόγους που θα αναλυθούν παρακάτω να μην υπάρξουν τέτοιες διαμορφώσεις στους δακτυλίους.



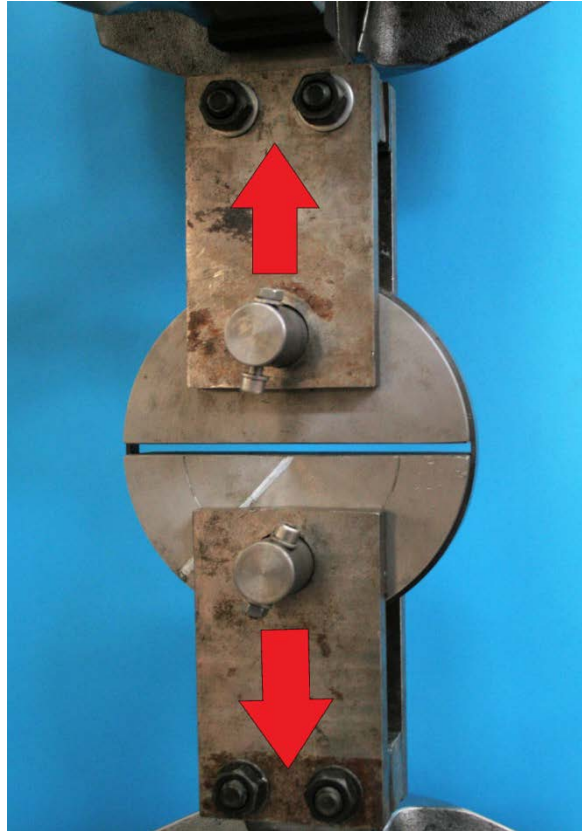
ΣΧΗΜΑ 2.9: Τυπικό σκαρίφημα δοκιμίου σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D2290.

Η διάταξη άσκησης του εφελκυστικού φορτίου στα δοκίμια αποτελείται από έναν διαιρούμενο δίσκο δύο κομματιών με διάμετρο την εσωτερική διάμετρο των δακτυλίων. Κάθε κομμάτι του δίσκου έχει μια οπή έτσι ώστε, με τη βοήθεια ενός πείρου, να συνδεθεί σε ειδική διάταξη η οποία με τη σειρά της ενώνεται στην υδραυλική μηχανή. Καθώς ασκείται δύναμη από την μηχανή οι δύο δίσκοι διαχωρίζονται τραβώντας αξονικά το δοκίμιο και υποβάλλοντάς το σε εφελκυστική φόρτιση (ΣΧΗΜΑ 2.10). Η αντοχή σε εφελκυσμό δίνεται από το πηλίκο του φορτίου που παραλαμβάνει το δοκίμιο προς τη μέση ορθογωνική διατομή (πλάτος × πάχος) αυτού πολλαπλασιασμένη επί δύο (εξίσωση (2.1)).

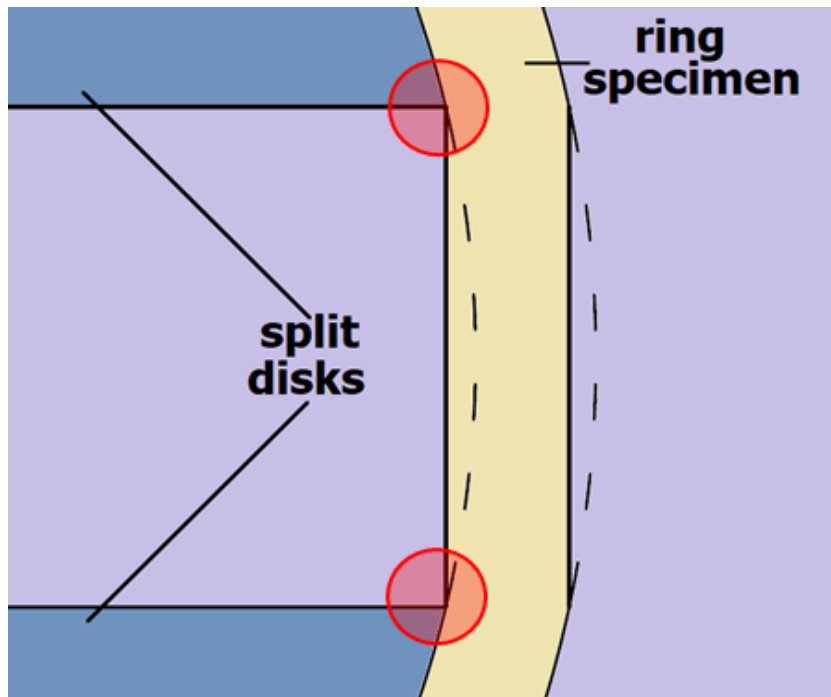
$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{2Am} \quad (2.1)$$

Τέλος εξίσου σημαντικές παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τις πειραματικές δοκιμές είναι η ταχύτητα ανύψωσης της μηχανής καθώς και οι συνθήκες του πειράματος. Σύμφωνα με το πρότυπο, η ταχύτητα διαχωρισμού των δίσκων είναι από 2.5 mm/min έως 12.5 mm/min. Επίσης ο χώρος εκτέλεσης των πειραμάτων πρέπει να έχει θερμοκρασία 23 ± 2 °C και σχετική υγρασία 50 ± 5 %.

Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η εμφάνιση φαινομένου κάμψης στα ανυποστήρικτα σημεία του δοκιμίου κοντά στην επιφάνεια των πλευρών του δίσκου (ΣΧΗΜΑ 2.11), η οποία δημιουργεί ανομοιομορφία στις τάσεις. Το φαινόμενο της κάμψης εμφανίζεται λόγω ασυνέχειας της επαφής της επιφάνειας του δοκιμίου με αυτήν του δίσκου.



ΣΧΗΜΑ 2.10: Διάταξη διαιρούμενου δίσκου και εικονική αναπαράσταση του φορτίου (κόκκινο βέλος) που ασκείται από την υδραυλική μηχανή.



ΣΧΗΜΑ 2.11: Φαινόμενο κάμψης στο ανυποστήρικτο τμήμα του δοκιμίου

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθεί το πειραματικό πρόγραμμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Θα εξηγηθεί ο σκοπός της πειραματικής διαδικασίας, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν και θα παρουσιαστούν τα δοκίμια με συγκεκριμένη ονοματολογία έτσι ώστε να είναι πιο λειτουργική οποιαδήποτε αναφορά σε αυτά.

3.1 Γενική περιγραφή και σκοπός πειραματικής διαδικασίας

Λόγω της έλλειψης τυποποιημένων μεθόδων χαρακτηρισμού σύνθετων υλικών κατασκευασμένων με τη μέθοδο περιέλιξης ινών, κρίθηκε σκόπιμο από το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου να διεξαχθεί μια σειρά δοκιμών που αποσκοπούν στον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων κυλίνδρων κατασκευασμένων από σύνθετα υλικά με την εν λόγω μέθοδο, εξετάζοντας παράλληλα την επίδραση διάφορων κατασκευαστικών παραμέτρων στις ιδιότητες αυτές. Για το χαρακτηρισμό ενός υλικού είναι απαραίτητη η γνώση των φυσικών και των μηχανικών του ιδιοτήτων. Οι φυσικές ιδιότητες που πρόκειται να μετρηθούν είναι η πυκνότητα του σύνθετου υλικού, αλλά και η κατά βάρος περιεκτικότητα του σε ίνες. Οι μετρήσεις θα γίνουν σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM D792-13 και ASTM D3171-15 αντίστοιχα και θα παρουσιαστούν σε επόμενο κεφάλαιο. Έπεται ο προσδιορισμός των βασικότερων μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού οι οποίες είναι το μέτρο ελαστικότητας καθώς και η αντοχή σε εφελκυσμό. Για το σκοπό αυτόν κατασκευάστηκαν κύλινδροι με τη μέθοδο περιέλιξης ινών, με διαφορετικές παραμέτρους όπως το είδος των ενισχυτικών ινών, η δύναμη τάνυσης περιέλιξης καθώς και το πάχος των δεσμών (tows) περιέλιξης. Από τους κυλίνδρους αυτούς προέκυψαν δακτυλιοειδή δοκίμια (ΣΧΗΜΑ 3.1). Όλοι οι κύλινδροι κατασκευάστηκαν από την εταιρία B&T Composites (www.btcomposites.gr). Οι απαιτούμενες δοκιμές για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών έγιναν με τη μέθοδο του διαιρούμενου δίσκου και διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



ΣΧΗΜΑ 3.1: Γενική όψη των δοκιμίων ταξινομημένων σε ομάδες με βάση τα γεωμετρικά και κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά.

3.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Τα δοκίμια που ελέγχθηκαν στην παρούσα μελέτη κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο περιέλιξης νημάτων. Είναι κατασκευασμένα από ίνες άνθρακα και εποξική ρητίνη ενώ κάποια δοκίμια αποτελούνται από ίνες βασάλτη και εποξική ρητίνη και η περιέλιξη σε όλες τις περιπτώσεις είναι στην περιφερειακή διεύθυνση. Πιο συγκεκριμένα, τα περισσότερα δοκίμια αποτελούνται από ίνες άνθρακα T700S Torayca 12000 ινών ανά δέσμη (12K) με αντοχή σε εφελκυσμό 4900MPa και μέτρο ελαστικότητας 230GPa. Επιπλέον κατασκευάστηκαν και ελέγχθηκαν δοκίμια από προεμποτισμένες ίνες άνθρακα και δοκίμια από ίνες βασάλτη προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά και άλλων τύπων ινών. Σε όλες τις περιπτώσεις έχει εφαρμοστεί ένα σύστημα τριών μερών εποξικής ρητίνης αποτελούμενο από εποξική ρητίνη Voraforce TW 100, σκληρυντικό Voraforce TW 150 και καταλύτη Voraforce TC 3000. Αναλυτικά οι ιδιότητες των τύπων ινών και των συστατικών της ρητίνης παρατίθενται στο παράρτημα Α. Τα δοκίμια κατηγοριοποιήθηκαν σύμφωνα με τα γεωμετρικά και κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά σε ξεχωριστές ομάδες. Από κάθε ομάδα δακτυλίων, δοκιμάστηκαν 6 δοκίμια, οδηγώντας στη δοκιμή 72 δοκιμίων συνολικά.

Όσον αφορά στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων, προκειμένου να εξεταστεί η επίδρασή τους στα αποτελέσματα των δοκιμών διαιρούμενου δίσκου, δημιουργήθηκαν και μελετήθηκαν διάφοροι συνδυασμοί διαστάσεων. Ειδικότερα επιλέχθηκαν δοκίμια με εσωτερική διάμετρο 100, 150 και 200mm (ΣΧΗΜΑ 3.2) με σκοπό να αξιολογηθεί η επίδραση της αύξησης της διαμέτρου στις μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Το πλάτος και το πάχος της πλειονότητας των ομάδων των δοκιμίων με ίνες άνθρακα είναι ίδιο και ίσο με 10mm και 2mm αντίστοιχα. Επιπλέον, προκειμένου να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα της μεταβολής του πλάτους και του πάχους για σταθερή διάμετρο, έχει παραχθεί μία ακόμη ομάδα δειγμάτων για την περίπτωση εσωτερικής διαμέτρου 150mm με πλάτος ίσο με 6.35mm και πάχος ίσο με 1.52mm. Σημειώνεται ότι οι τελευταίες διαστάσεις είναι εκείνες που προτείνονται από τη διαδικασία NOL η οποία περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Τέλος οι δύο ομάδες δοκιμίων κατασκευασμένων από ίνες βασάλτη έχουν πλάτος 25mm και 20mm ενώ το πάχος είναι 5mm και στις δύο περιπτώσεις. Οι διαστάσεις στα δοκίμια από ίνες βασάλτη επιλέχθηκαν ώστε να γίνει σύγκριση με δοκίμια από γυαλί με πλάτος 25mm και πάχος 5mm από προηγούμενη διπλωματική εργασία (Κωνσταντινίδης 2016). Ωστόσο τονίζεται ότι τα δοκίμια με πλάτος 25mm δεν κατάφεραν να φτάσουν στην τάση θραύσης τους αφού χρειάζονταν μεγαλύτερο φορτίο από αυτό που μπορούσε να επιβάλλει η υδραυλική μηχανή, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τη τάση αστοχίας. Για το λόγο αυτό στην παρούσα διπλωματική εργασία δοκιμάστηκαν μόνο τα δοκίμια με πλάτος 20mm.



ΣΧΗΜΑ 3.2: Δοκίμια με εσωτερική διάμετρο 100, 150 και 200mm.

3.3 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά

Όσον αφορά στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων, σημαντικό είναι να ληφθεί υπόψη η διαδικασία κατασκευής τους καθώς και οι διάφορες παράμετροι αυτής οι οποίες ενδέχεται να επηρεάσουν την ποιότητα των δοκιμίων που ελέγχθηκαν και συνεπώς τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζονται δύο από τις σημαντικότερες κατασκευαστικές παραμέτρους στην μέθοδο της περιέλιξης ινών, οι οποίες είναι η δύναμη τάνυσης που εφαρμόζεται στις ίνες κατά τη διαδικασία περιέλιξης και ο αριθμός των δεσμών περιέλιξης που χρησιμοποιούνται

ταυτόχρονα κατά την περιέλιξη. Η τελευταία παράμετρος έχει μεγάλη σημασία κατά τη διάρκεια της περιέλιξης του δακτυλίου, καθώς καθορίζει τη μέγιστη δυνατή γωνία που μπορεί να γίνει η περιέλιξη σε σχέση με τον άξονα του κυλίνδρου, προκειμένου να αποφευχθεί η επικάλυψη μεταξύ διαδοχικών tows. Πιο συγκεκριμένα αύξηση του αριθμού των δεσμών περιέλιξης οδηγεί σε αύξηση του πλάτους του νήματος περιέλιξης με αποτέλεσμα να ελαττώνεται η μέγιστη δυνατή γωνία περιέλιξης. Δηλαδή αν και το μεγάλο πλάτος νημάτων περιέλιξης είναι επιθυμητό για την εξοικονόμηση χρόνου κατά την παραγωγική διαδικασία, εμποδίζει την ανάπτυξη μεγάλων γωνιών περιέλιξης κοντά στις 90° (παράλληλα με την περιφερειακή διεύθυνση του κυλίνδρου). Για παράδειγμα στην περίπτωση της μιας δέσμης περιέλιξης η γωνία περιέλιξης μπορεί να φθάσει τιμές ακόμα και μεγαλύτερες των 89° ανάλογα με τη διάμετρο του κυλίνδρου.

Οι περιπτώσεις δυνάμεων τάνυσης περιέλιξης που μελετώνται με σκοπό να αξιολογηθεί η επίδραση τους στις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών είναι αυτές των 8, 25 και 45N. Για να ελεγχθεί η επίδραση του αριθμού των δεσμών περιέλιξης στα αποτελέσματα των δοκιμών κρίθηκε σκόπιμο να εξεταστούν και να συγκριθούν δοκίμια με μία και οχτώ δέσμες περιέλιξης, έχοντας όλα τα άλλα χαρακτηριστικά τους πανομοιότυπα.

3.4 Ονοματολογία

Λόγω των πολλών διαφορετικών παραμέτρων κατασκευής των δοκιμών κρίθηκε αναγκαίο να υιοθετηθεί ένας τρόπος ονοματολογίας αυτών, έτσι ώστε στο όνομα του κάθε δοκιμίου να περιέχονται όλες οι απαραίτητες γεωμετρικές και κατασκευαστικές πληροφορίες. Συγκεκριμένα, το πρώτο τμήμα του ονόματος αφορά στο υλικό κατασκευής του εκάστοτε δοκιμίου. Ειδικότερα, χρησιμοποιούνται τα γράμματα «B» για τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν με ίνες βασάλτη, «C» για τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν με ίνες άνθρακα και «P» για τα δοκίμια τα οποία κατασκευάστηκαν με χρήση προεμποτισμένων ινών άνθρακα. Στη συνέχεια, εκφράζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμών (διαστάσεις σε mm) με τη σειρά που παρατίθενται, δηλαδή η διάμετρος, το πλάτος και το πάχος αυτών (π.χ. B_100_20_5, C_150_6.35_1.52). Ακολουθεί το σύμβολο F (Force) συνοδευόμενο από έναν εκ των αριθμών 8, 25, 45 ώστε να εκφραστεί σε N η δύναμη τάνυσης που ασκείται στις ίνες κατά την περιέλιξη (π.χ. C_200_10_2_F45). Τέλος, προσδιορίζεται ο αριθμός των δεσμών περιέλιξης (tows) που χρησιμοποιήθηκαν ταυτόχρονα κατά την περιέλιξη του εκάστοτε κυλίνδρου. Το εν λόγω χαρακτηριστικό εκφράζεται με τη χρήση του γράμματος «T» συνοδευόμενου από τον αριθμό των tows (1 ή 8) (π.χ. C_100_10_2_F25_T8, C_200_10_2_F8_T1). Ένα τυπικό παράδειγμα, λοιπόν, ονόματος δοκιμίου είναι το P_100_10_2_F8_T1 όπου περιγράφει δακτύλιο από προεμποτισμένες ίνες άνθρακα, με διάμετρο πλάτος και πάχος σε mm 100, 10, 2 αντίστοιχα, και κατασκευασμένο με δύναμη τάνυσης 8N και 1 δέσμη περιέλιξης. Το ΣΧΗΜΑ 3.3 αποτελεί απεικόνιση της διαδικασίας ονοματολογίας των δοκιμών.



ΣΧΗΜΑ 3.3: Ονοματολογία δοκιμίων.

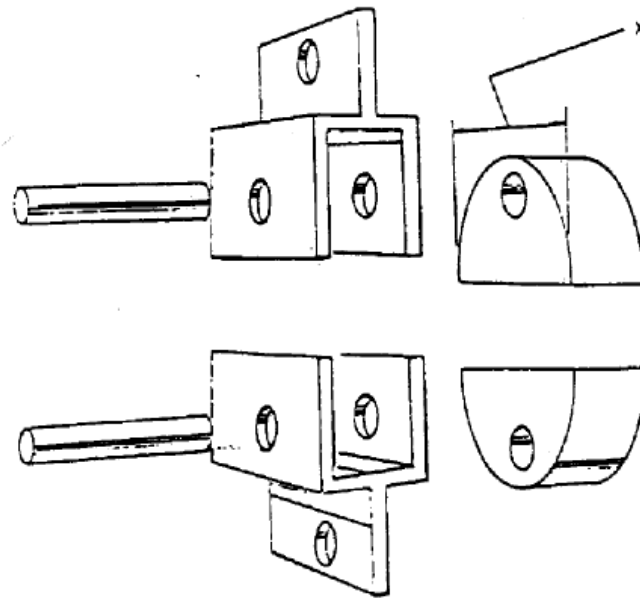
4. ΔΟΚΙΜΗ ΔΙΑΙΡΟΥΜΕΝΟΥ ΔΙΣΚΟΥ

Στην παρούσα εργασία διεξήχθησαν μια σειρά από πειραματικές δοκιμές με τη μέθοδο του διαιρούμενου δίσκου, με σκοπό τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας E και την τάση αστοχίας σ_u του υλικού.

4.1 Περιγραφή δοκιμής

Όλες οι δοκιμές έγιναν σύμφωνα με τη διαδικασία που ορίζει το πρότυπο ASTM D2290, η πειραματική διάταξη του οποίου φαίνεται στα ΣΧΗΜΑΤΑ 4.1 και 4.2. Για την κατάλληλη δοκιμή δακτυλιοειδών δειγμάτων εσωτερικής διαμέτρου 100, 150 και 200mm χρησιμοποιήθηκαν διατάξεις διαιρούμενων δίσκων αντίστοιχων διαστάσεων. Σημειώνεται, ωστόσο, ότι σε σχέση με το πρότυπο παρουσιάστηκε διαφοροποίηση στο σχεδιασμό του split disk. Πιο συγκεκριμένα, ενώ το πρότυπο προτείνει διάκενο μεταξύ των δίσκων τουλάχιστον 63mm ρυθμίστηκε το διάκενο του διαιρούμενου δίσκου στα 5mm. Όπως έχει ήδη εξηγηθεί, η τοπική κάμψη εμφανίζεται στο ανυποστήρικτο τμήμα του δακτυλίου κατά την απομάκρυνση των δύο μερών του δίσκου, γεγονός που προκαλεί την ανομοιόμορφη κατανομή της πίεσης κατά το πάχος. Είναι σαφές ότι, όσο μεγαλύτερο είναι το διάκενο μεταξύ των δύο μισών δίσκων, τόσο πιο έντονη είναι η ροπή κάμψης τοπικά. Έτσι η μείωση του διακένου, σε σύγκριση με το προτεινόμενο από την ASTM D2290, εφαρμόστηκε για να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση της τοπικής κάμψης.

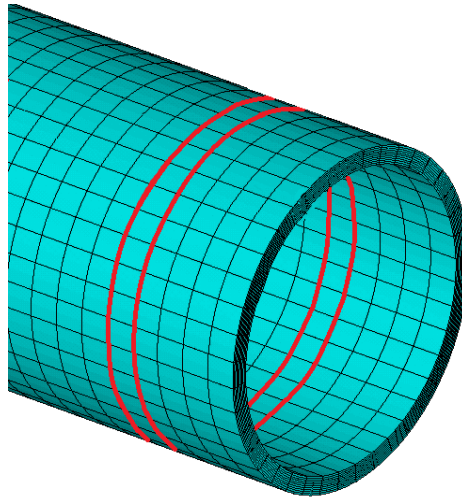
Τα δακτυλιοειδή δοκίμια που ελέγχθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία κόπηκαν κατά το εγκάρσιο (ΣΧΗΜΑ 4.3) από τους κυλίνδρους που κατασκεύασε η εταιρία B&T Composites. Σε σχέση με τα δοκίμια που ορίζει το πρότυπο ως προς τις διαστάσεις αλλά και ως προς την μορφή έχουν σημαντικές διαφορές. Πιο συγκεκριμένα, τα δοκίμια της παρούσας εργασίας δεν φέρουν εγκοπές, προκειμένου να αποφευχθούν οι ιδιομορφίες στην κατανομή των τάσεων τοπικά και οι μετρούμενες παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια των δοκιμών να είναι αξιόπιστες.



ΣΧΗΜΑ 4.1: Τυπική διάταξη προτύπου ASTM D2290.



ΣΧΗΜΑ 4.2: Διάταξη Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας Ε.Μ.Π.



ΣΧΗΜΑ 4.3: Σκαρίφημα δοκιμίων (κόκκινο χρώμα) κομμένα κατά το εγκάρσιο επίπεδο του κυλίνδρου.

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με χρήση της υδραυλικής μηχανής 322 της εταιρίας MTS μέγιστης δυνατότητας φόρτισης 250kN (ΣΧΗΜΑ 4.4). Η συλλογή και η καταγραφή των δεδομένων κατά τη διάρκεια των δοκιμών έγινε μέσω του συστήματος spider 8 (data acquisition system) της εταιρίας HBM (ΣΧΗΜΑ 4.5). Κατά τη διάρκεια των δοκιμών μετρήθηκε η δύναμη αντίδρασης της υδραυλικής μηχανής και η μετατόπιση του κινούμενου μέρους της μηχανής. Επιπρόσθετα, μετρήθηκαν οι περιφερειακές παραμορφώσεις στην εξωτερική επιφάνεια των δακτυλιοειδών δοκιμίων με τη χρήση επιμηκυνσιόμετρων. Όλα τα μεγέθη μετρήθηκαν με συχνότητα δειγματοληψίας 10Hz.



ΣΧΗΜΑ 4.4: Υδραυλική μηχανή δοκιμών MTS 322.



ΣΧΗΜΑ 4.5: Σύστημα πρόσκτησης δεδομένων Spider 8.

Προκειμένου να εξαχθούν πληροφορίες όχι μόνο για την αντοχή των δειγμάτων αλλά και για το μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus), η διαδικασία που προτείνεται από τους Yoon et al. (1997) ακολουθήθηκε σε αυτή τη μελέτη. Όπως αναφέρεται στο ΕΔΑΦΙΟ 2.3 του παρόντος εγγράφου, οι Yoon et al. προτείνουν ότι, για να αποκλειστεί η επίδραση της τριβής από τα εξαγόμενα αποτελέσματα των δοκιμών, το μέτρο ελαστικότητας πρέπει να υπολογιστεί ως η μέση τιμή των μέτρων ελαστικότητας που προκύπτουν από τις καμπύλες φόρτισης και αποφόρτισης του δοκιμίου. Για το σκοπό αυτό, η παρούσα διαδικασία δοκιμής συνίσταται από μια αρχική ελεγχόμενη μετατόπιση φορτίου μέχρι ένα ορισμένο επίπεδο καταπόνησης, μια επακόλουθη αποφόρτιση στην κατάσταση μηδενικής φόρτωσης και μια τελική νέα φόρτωση μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Η τάση που αναπτύσσεται στην περιφερειακή διεύθυνση υπολογίζεται σύμφωνα με την ASTM D2290 μέσω της εξίσωσης (4.1), όπου το F_u αντιπροσωπεύει τη δύναμη που μετράται από τη μηχανή δοκιμής ενώ η A_m είναι η μέση ορθογωνική διατομή των δειγμάτων (πλάτος \times πάχος).

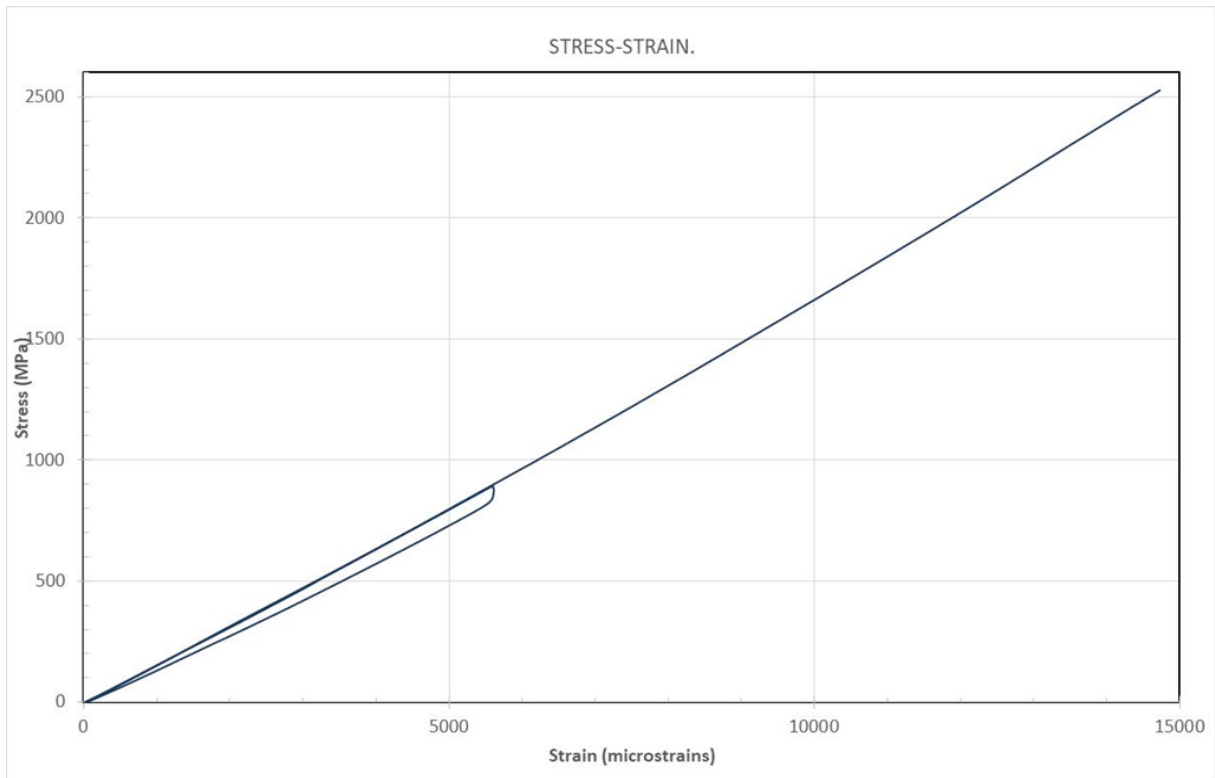
$$\sigma_u = \frac{F_u}{2A_m} \quad (4.1)$$

Για τη διαδικασία φόρτισης και αποφόρτισης, το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D3039 που αναφέρεται στον χαρακτηρισμό επίπεδων δειγμάτων σύνθετων υλικών υπό τάση. Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό, το μέτρο ελαστικότητας πρέπει να θεωρηθεί ίσο με την κλίση του τμήματος της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης μεταξύ των 1000-3000 $\mu\epsilon$, εφόσον η παραμόρφωση μέχρι την αστοχία του δοκιμίου είναι μεγαλύτερη από 6000 $\mu\epsilon$. Στην προκειμένη περίπτωση, η εμπειρία από προηγούμενη μελέτη (Papadakis & Tsouvalis, 2016) έχει δείξει ότι η παραμόρφωση μέχρι την αστοχία παρόμοιων δειγμάτων είναι σημαντικά υψηλότερη από το όριο αυτό. Ως εκ τούτου, η συγκεκριμένη φάση φόρτισης-αποφόρτισης της πειραματικής διαδικασίας ελέγχεται

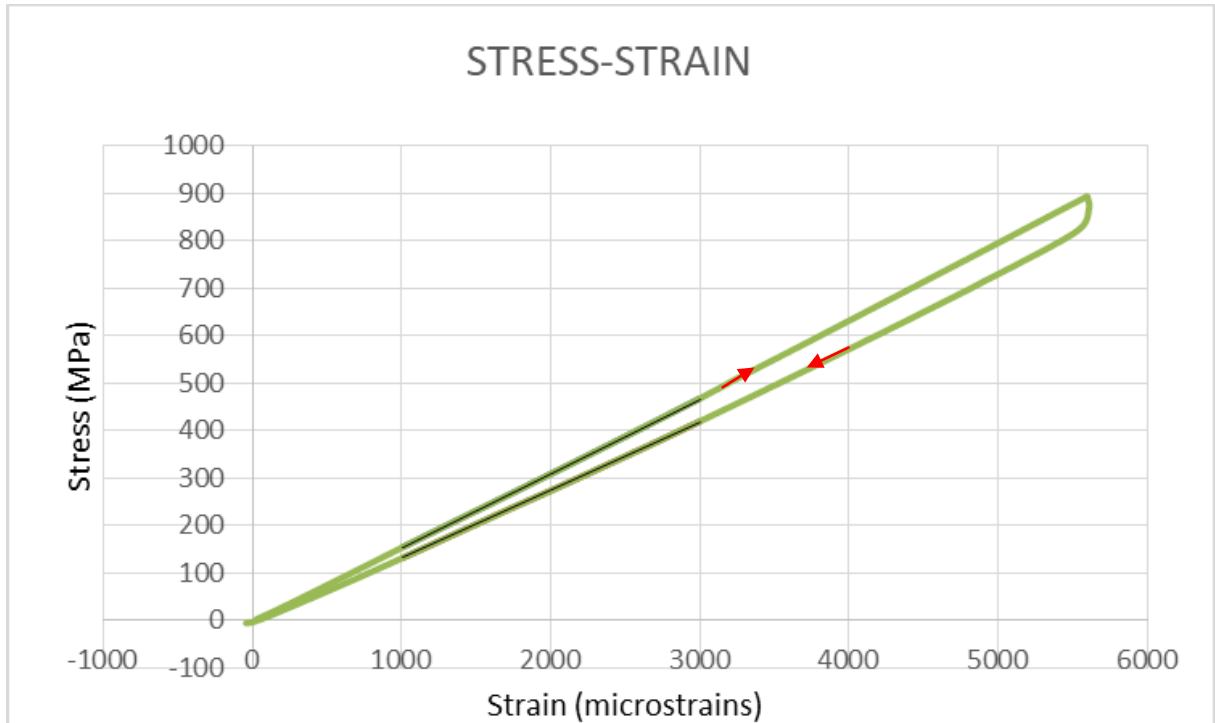
αυτόματα ρυθμίζοντας ένα όριο ελεγχόμενης μετατόπισης (Displacement Control) το οποίο αντιστοιχεί σε επίπεδο παραμόρφωσης λίγο μεγαλύτερο από 3000με.

Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης σχεδιάζονται για ολόκληρη τη διαδικασία που εκτελείται για κάθε δοκίμιο. Μια τυπική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης που προκύπτει από τις δοκιμές αυτής της μελέτης παρουσιάζεται στο ΣΧΗΜΑ 4.6, ενώ στο ΣΧΗΜΑ 4.7 παρουσιάζεται αναλυτικά ο βρόχος υστέρησης που δημιουργείται λόγω τριβής από τη φόρτιση και αποφόρτιση των δοκιμίων. Το γεγονός ότι, όπως φαίνεται στο ΣΧΗΜΑ 4.6, η καμπύλη που αντιστοιχεί στην τελική φόρτιση μέχρι την αστοχία των δειγμάτων συμπίπτει με την καμπύλη της πρώτης φόρτισης μέχρι περίπου τα 4000με δείχνει πως, παρά την αρχική προφόρτιση του δοκιμίου, αυτό παραμένει στην γραμμική-ελαστική περιοχή χωρίς να έχει υποστεί μόνιμες παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια της διαδικασίας προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας. Όσον αφορά στο βρόχο υστέρησης (ΣΧΗΜΑ 4.7) η καμπύλη με τη μεγαλύτερη κλίση (άνω) αντιστοιχεί στη φάση φόρτισης ενώ η καμπύλη με τη μικρότερη κλίση (κάτω), στη φάση αποφόρτισης, αντίστοιχα. Ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας, επιτυγχάνεται με την ακόλουθη εξίσωση (4.2), στην οποία η E αντιστοιχεί στο τελικώς υπολογισμένο Young's modulus στην περιφερειακή διεύθυνση ενώ το E_l και το E_u αντιστοιχούν στις τιμές των μέτρων ελαστικότητας που προέρχονται από τις φάσεις φόρτισης και αποφόρτισης, αντίστοιχα.

$$E = \frac{E_l + E_u}{2} \quad (4.2)$$

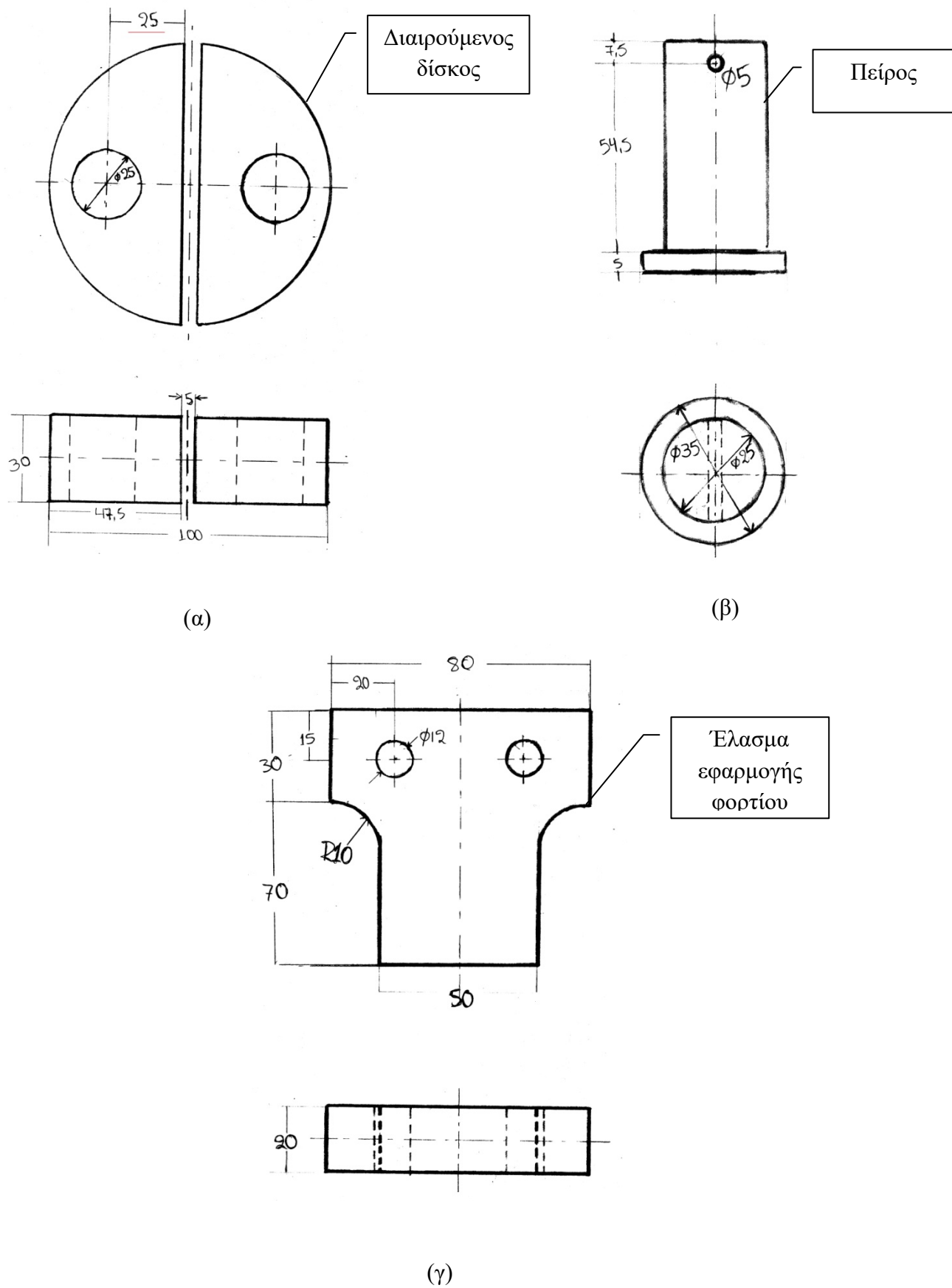


ΣΧΗΜΑ 4.6: Τυπική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου.

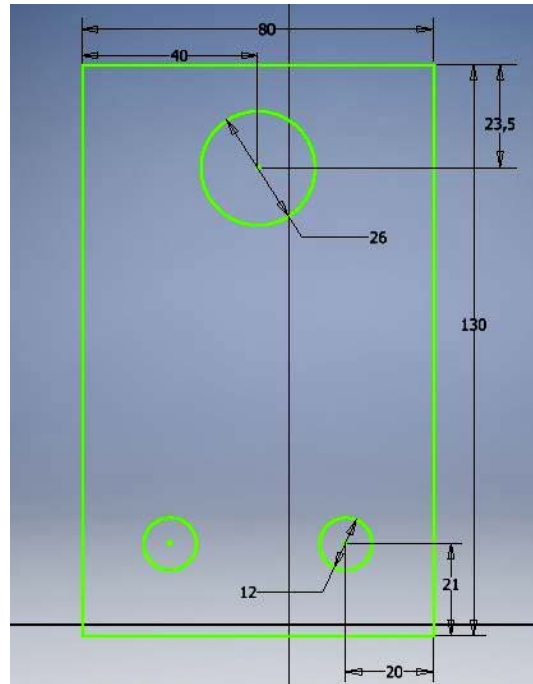
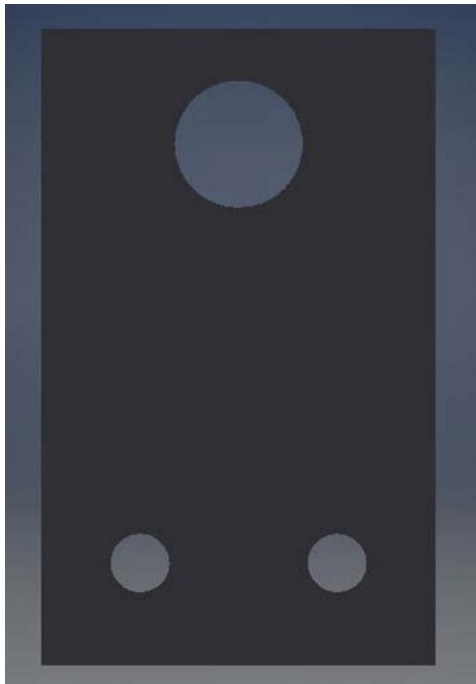


ΣΧΗΜΑ 4.7: Βρόχος υστέρησης καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου.

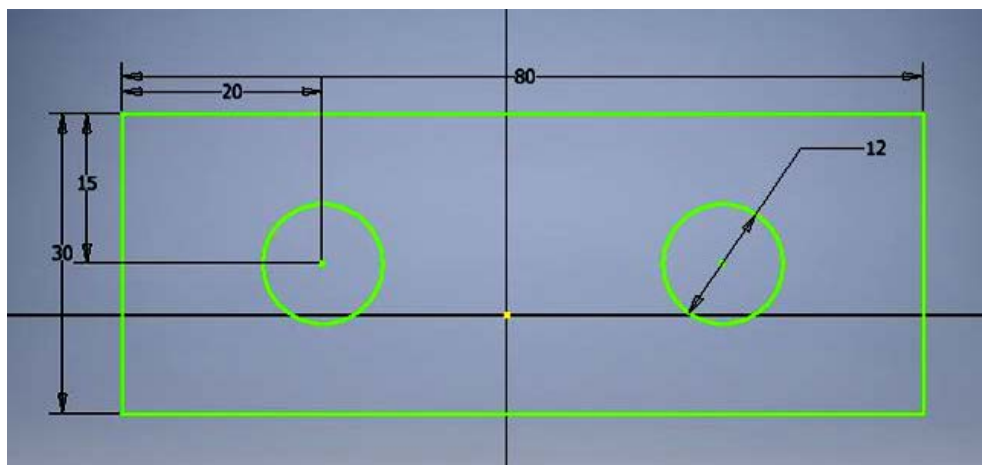
Τέλος η διάταξη μέσω της οποίας ασκήθηκε το εφελκυστικό φορτίο στα δοκίμια σχεδιάστηκε από το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, τα σχέδια της οποίας φαίνονται στο ΣΧΗΜΑ 4.8. Αποτελείται από έναν διαιρούμενο δίσκο με διάμετρο την εσωτερική διάμετρο των δοκιμίων (ΣΧΗΜΑ 4.8α), ο οποίος σε κάθε ένα από τα δύο μέρη του φέρει οπή προκειμένου να συνδεθεί μέσω πείρου (ΣΧΗΜΑ 4.8β) αντικριστά με δύο φλάντζες (ΣΧΗΜΑ 4.9), οι οποίες συνδέονται κοχλιωτά με έλασμα (ΣΧΗΜΑ 4.8γ) που εφαρμόζεται στην υδραυλική μηχανή δοκιμών. Επιπλέον μεταξύ της φλάντζας και του ελάσματος εφαρμογής φορτίου έχει τοποθετηθεί αποστάτης (ΣΧΗΜΑ 4.10). Το υλικό κατασκευής του δίσκου και των υπολοίπων στοιχείων πλην του πείρου ήταν χάλυβας S235, ενώ των πείρων χάλυβας υψηλής αντοχής S355. Η κατασκευή έγινε από την εταιρία B&T Composites. Η πειραματική διάταξη φαίνεται στα Σχήματα 4.11 και 4.12. Όλες οι διαστάσεις που παρουσιάζονται στα κατωτέρω σχήματα είναι σε mm. Σημειώνεται ότι τα σκαριφήματα για διαιρούμενους δίσκους διαμέτρου 150 και 200mm παρατίθενται στο παράρτημα Β.



ΣΧΗΜΑ 4.8: Σκαριφήματα της διάταξης δοκιμών της μεθόδου διαιρούμενου δίσκου.



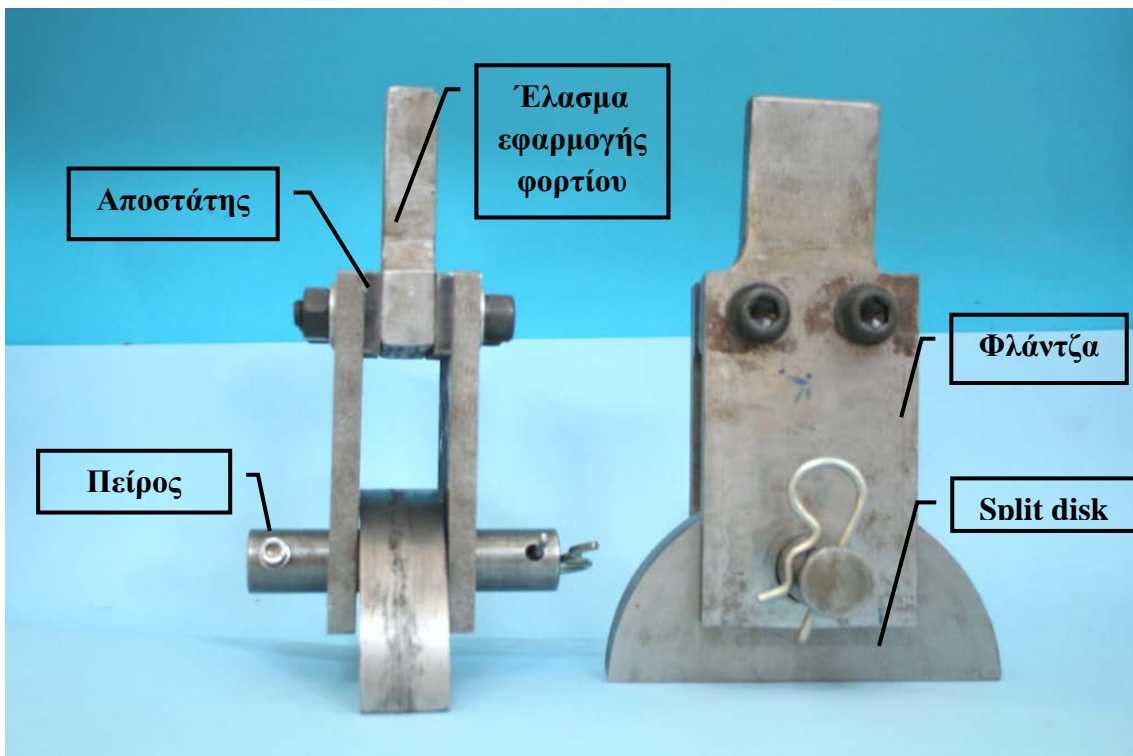
ΣΧΗΜΑ 4.9: Σκαρίφημα φλάντζας πάχους 10mm.



ΣΧΗΜΑ 4.10: Σκαρίφημα του αποστάτη της πειραματικής διάταξης πάχους 10mm.



ΣΧΗΜΑ 4.11: Γενική όψη της διάταξης διαιρούμενου δίσκου.



ΣΧΗΜΑ 4.12: Διάφορες όψεις της πειραματικής διάταξης.

4.2 Πειραματική διαδικασία

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν σύμφωνη με αυτή του προτύπου ASTM D2290-14 εφαρμόζοντας ωστόσο τις διαφοροποιήσεις και τις βελτιώσεις που αναφέρθηκαν στο ΕΔΑΦΙΟ 4.1. Αρχικά πραγματοποιήθηκε η αναλυτική διαστασιολόγηση του κάθε δοκιμίου και η σύγκριση των τιμών που εξήχθησαν με τις ονομαστικές. Οι μετρήσεις του πλάτους (Width) και του πάχους (Thickness) στα δοκίμια έγιναν σε τέσσερα διαφορετικά σημεία, όπου κάθε μέτρηση απείχε από την επόμενη γωνία 90°. Επιπλέον έγιναν δύο μετρήσεις για τη διάμετρο (Diameter) του κάθε δοκιμίου σε διαφορετικά σημεία, με απόσταση 90°. Σαν τελική τιμή για κάθε διάσταση ελήφθη ο μέσος όρος (average value) των μετρήσεων. Υπολογίστηκε, επίσης, η τυπική απόκλιση (standard deviation) καθώς και ο συντελεστής διακύμανσης (coefficient of variation) με σκοπό να αξιολογηθεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων και η απόκλιση τους από τις ονομαστικές διαστάσεις. Οι ονομαστικές τιμές των διαστάσεων αναγράφονται στην ονοματολογία των δοκιμίων όπως έχει εξηγηθεί στο ΕΔΑΦΙΟ 3.4. Τόσο οι ονομαστικές τιμές όσο και οι μετρήσεις παρουσιάζονται στον ΠΙΝΑΚΑ 4.1 που ακολουθεί.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1: Διαστάσεις δοκιμίων διαμέτρου 100mm.

P-100-10-2-F8-T1								
	1	2	3	4	5	6	7	
Width (mm)								
average value	10.05	9.93	10.04	9.95	9.99	10.08	9.98	10.00
standard deviation	0.06	0.08	0.05	0.24	0.14	0.21	0.21	0.08
coef. of variation	0.6%	0.8%	0.5%	2.4%	1.4%	2.1%	2.1%	0.8%
Thickness (mm)								
average value	2.50	2.54	2.46	2.60	2.54	2.60	2.71	2.56
standard deviation	0.07	0.13	0.13	0.20	0.05	0.06	0.05	0.06
coef. of variation	3.0%	2.8%	4.2%	0.3%	1.8%	2.5%	2.0%	1.1%
Diameter (mm)								
average value	100.01	100.00	100.00	100.03	100.03	99.97	99.94	99.99
standard deviation	0.01	0.02	0.02	0.13	0.03	0.08	0.09	0.04
coef. of variation	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.1%	0.1%	0.0%

B-100-25-5-F8-T1						
	1	2	3	4	5	
Width (mm)						
average value	25.03	25.00	25.19	25.31	25.09	25.12
standard deviation	0.13	0.04	0.06	0.40	0.20	0.15
coef. of variation	0.5%	0.2%	0.2%	1.6%	0.8%	0.6%
Thickness (mm)						
average value	5.19	5.25	5.28	5.19	5.14	5.21
standard deviation	0.03	0.08	0.12	0.09	0.04	0.04
coef. of variation	0.6%	1.6%	2.3%	1.8%	0.8%	0.7%
Diameter (mm)						
average value	99.97	99.96	99.93	99.90	99.96	99.94
standard deviation	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01
coef. of variation	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

B-100-20-5-F8-T1						
	1	2	3	4	5	
Width (mm)						
average value	20.11	19.96	20.06	19.93	20.05	20.02
standard deviation	0.12	0.05	0.03	0.06	0.02	0.04
coef. of variation	0.6%	0.3%	0.2%	0.3%	0.1%	0.2%
Thickness (mm)						
average value	5.18	5.17	5.18	5.18	5.12	5.16
standard deviation	0.05	0.03	0.05	0.04	0.03	0.01
coef. of variation	0.9%	0.7%	0.9%	0.7%	0.6%	0.2%
Diameter (mm)						
average value	99.94	99.95	99.96	99.97	99.94	99.95
standard deviation	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
coef. of variation	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

C-100-10-2-F8-T1								
	1	2	3	4	5	6	7	
Width (mm)								
average value	10.02	10.00	10.12	10.10	9.95	9.99	9.97	10.02
standard deviation	0.06	0.18	0.11	0.08	0.21	0.13	0.23	0.07
coef. of variation	0.6%	1.8%	1.1%	0.8%	2.1%	1.3%	2.3%	0.7%
Thickness (mm)								
average value	2.23	2.23	2.22	2.17	2.16	2.19	2.17	2.19
standard deviation	0.10	0.07	0.09	0.03	0.01	0.02	0.01	0.04
coef. of variation	4.7%	3.2%	4.1%	1.2%	0.3%	1.0%	0.4%	1.9%
Diameter (mm)								
average value	100.03	100.05	100.04	100.09	100.09	100.10	100.05	100.06
standard deviation	0.03	0.01	0.03	0.01	0.06	0.04	0.01	0.02
coef. of variation	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%

C-100-10-2-F25-T1								
	1	2	3	4	5	6	7	
Width (mm)								
average value	9.95	10.04	9.79	10.02	10.05	9.69	10.08	9.94
standard deviation	0.05	0.04	0.05	0.06	0.08	0.05	0.07	0.02
coef. of variation	0.5%	0.4%	0.5%	0.6%	0.8%	0.5%	0.7%	0.2%
Thickness (mm)								
average value	2.19	2.15	2.15	2.10	2.08	2.09	2.10	2.12
standard deviation	0.08	0.03	0.08	0.05	0.02	0.02	0.02	0.03
coef. of variation	3.6%	1.2%	3.9%	2.2%	0.9%	0.7%	0.8%	1.4%
Diameter (mm)								
average value	100.06	100.02	100.03	100.03	100.04	99.99	99.99	100.02
standard deviation	0.01	0.04	0.04	0.05	0.02	0.01	0.04	0.02
coef. of variation	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

C-100-10-2-F45-T1								
	1	2	3	4	5	6	7	
Width (mm)								
average value	9.84	9.95	10.07	9.95	10.02	9.99	10.03	9.98
standard deviation	0.02	0.03	0.04	0.03	0.04	0.02	0.09	0.02
coef. of variation	0.3%	0.3%	0.4%	0.3%	0.4%	0.2%	0.9%	0.2%
Thickness (mm)								
average value	2.14	2.10	2.10	2.08	2.08	2.09	2.08	2.09
standard deviation	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.03	0.03	0.01
coef. of variation	0.6%	0.8%	0.8%	1.3%	1.9%	1.5%	1.6%	0.5%
Diameter (mm)								
average value	99.97	99.98	99.96	99.99	100.00	99.99	100.00	99.98
standard deviation	0.01	0.10	0.03	0.01	0.04	0.05	0.05	0.03
coef. of variation	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

C-100-10-2-F8-T8								
	1	2	3	4	5	6	7	
Width (mm)								
average value	10.02	9.80	10.14	10.07	9.86	10.08	9.90	9.98
standard deviation	0.14	0.05	0.09	0.08	0.04	0.03	0.06	0.04
coef. of variation	1.4%	0.5%	0.9%	0.8%	0.4%	0.3%	0.6%	0.4%
Thickness (mm)								
average value	2.31	2.30	2.32	2.38	2.38	2.35	2.38	2.34
standard deviation	0.02	0.08	0.08	0.09	0.12	0.08	0.09	0.03
coef. of variation	0.8%	3.3%	3.5%	3.7%	4.9%	3.2%	4.0%	1.3%
Diameter (mm)								
average value	100.07	100.07	100.11	100.04	100.04	100.02	100.01	100.05
standard deviation	0.03	0.08	0.04	0.10	0.08	0.06	0.01	0.03
coef. of variation	0.0%	0.1%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2: Διαστάσεις δοκιμών διαμέτρου 150mm.

C-150-10-2-F8-T1								
	1	2	3	4	5	6	7	
Width (mm)								
average value	9.99	9.93	9.98	9.96	10.02	9.98	9.87	9.96
standard deviation	0.05	0.32	0.13	0.10	0.07	0.15	0.06	0.09
coef. of variation	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Thickness (mm)								
average value	2.22	2.21	2.20	2.22	2.20	2.21	2.23	2.21
standard deviation	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03
coef. of variation	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Diameter (mm)								
average value	150.21	150.25	150.20	150.21	150.10	150.25	150.26	150.21
standard deviation	0.01	0.07	0.00	0.01	0.00	0.07	0.06	0.03
coef. of variation	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

C-150-6,35-1,52-F8-T1								
A	1	2	3	4	5	6	7	
Width (mm)								
average value	6.44	6.29	6.26	6.32	6.29	6.44	6.37	6.34
standard deviation	0.21	0.23	0.16	0.17	0.18	0.07	0.06	0.07
coef. of variation	3.2%	3.7%	2.6%	2.7%	2.9%	1.1%	0.9%	1.1%
Thickness (mm)								
average value	1.68	1.67	1.66	1.64	1.66	1.67	1.66	1.66
standard deviation	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
coef. of variation	1.0%	1.4%	2.0%	0.9%	0.8%	0.8%	0.6%	0.5%
Diameter (mm)								
average value	151.14	150.95	151.10	151.10	150.95	151.20	150.80	151.03
standard deviation	0.08	0.21	0.03	0.00	0.35	0.14	0.28	0.13
coef. of variation	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.2%	0.1%	0.2%	0.1%

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3: Διαστάσεις δοκιμών διαμέτρου 200mm.

C-200-10-2-F8-T8								
	1	2	3	4	5	6	7	
Width (mm)								
average value	10.26	10.23	10.00	9.89	10.10	10.29	10.17	10.13
standard deviation	0.48	0.21	0.11	0.22	0.10	0.12	0.27	0.13
coef. of variation	4.6%	2.0%	1.1%	2.2%	1.0%	1.2%	2.7%	1.3%
Thickness (mm)								
average value	2.23	2.15	2.15	2.14	2.13	2.10	2.13	2.14
standard deviation	0.07	0.02	0.08	0.03	0.04	0.06	0.07	0.07
coef. of variation	3.1%	1.1%	3.8%	1.6%	1.8%	2.7%	3.1%	3.3%
Diameter (mm)								
average value	200.25	200.42	200.60	200.75	200.52	200.16	200.50	200.46
standard deviation	0.21	0.40	0.14	0.21	0.17	0.20	0.28	0.09
coef. of variation	0.1%	0.2%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.0%

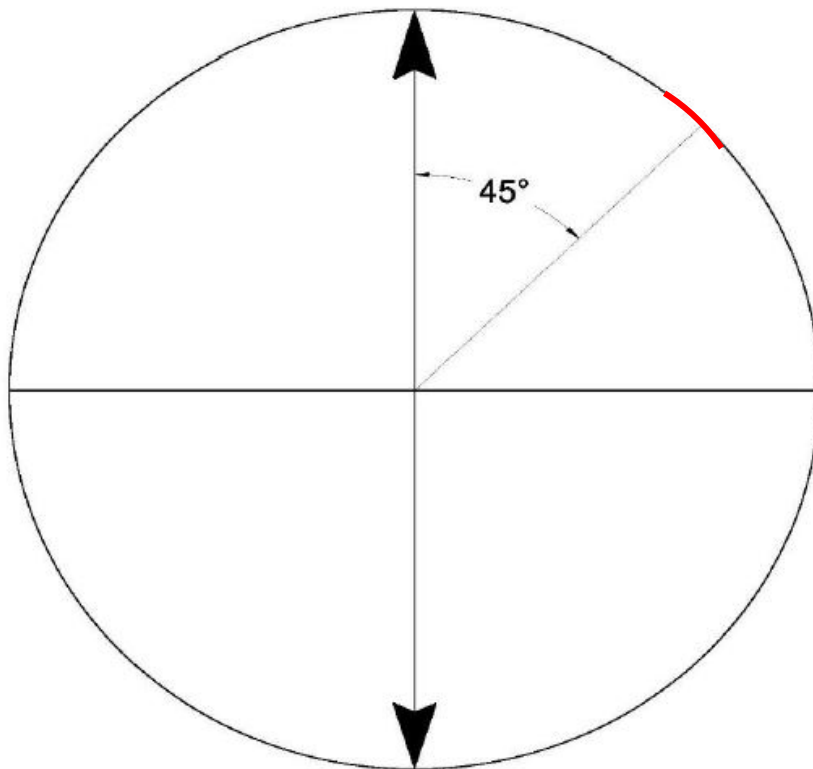
C-200-10-2-F25-T8								
	1	2	3	4	5	6	7	
Width (mm)								
average value	9.99	9.94	9.91	10.17	10.24	10.00	10.27	10.07
standard deviation	0.13	0.05	0.23	0.41	0.25	0.11	0.05	0.13
coef. of variation	1.3%	0.5%	2.3%	4.0%	2.5%	1.1%	0.4%	1.3%
Thickness (mm)								
average value	2.16	2.08	2.10	2.09	2.13	2.11	2.12	2.11
standard deviation	0.09	0.05	0.12	0.07	0.05	0.15	0.06	0.04
coef. of variation	4.1%	2.5%	0.6%	3.5%	2.3%	2.5%	2.8%	1.1%
Diameter (mm)								
average value	200.15	200.20	200.60	200.45	200.25	200.20	200.23	200.30
standard deviation	0.07	0.14	0.28	0.49	0.35	0.28	0.24	0.14
coef. of variation	0.0%	0.1%	0.1%	0.2%	0.2%	0.1%	0.1%	0.1%

C-200-10-2-F45-T8								
	1	2	3	4	5	6	7	
Width (mm)								
average value	10.29	10.02	9.94	10.21	9.80	10.05	10.14	10.06
standard deviation	0.08	0.14	0.10	0.07	0.08	0.06	0.09	0.03
coef. of variation	0.8%	1.4%	1.0%	0.7%	0.8%	0.6%	0.8%	0.3%
Thickness (mm)								
average value	2.14	2.10	2.12	2.08	2.10	2.10	2.15	2.11
standard deviation	0.14	0.05	0.24	0.07	0.17	0.15	0.05	0.07
coef. of variation	0.9%	2.2%	1.3%	3.0%	0.6%	2.1%	2.3%	0.8%
Diameter (mm)								
average value	200.47	200.30	200.55	200.75	200.35	200.25	200.06	200.39
standard deviation	0.61	0.28	0.07	0.21	0.21	0.07	0.06	0.19
coef. of variation	0.3%	0.1%	0.0%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.1%

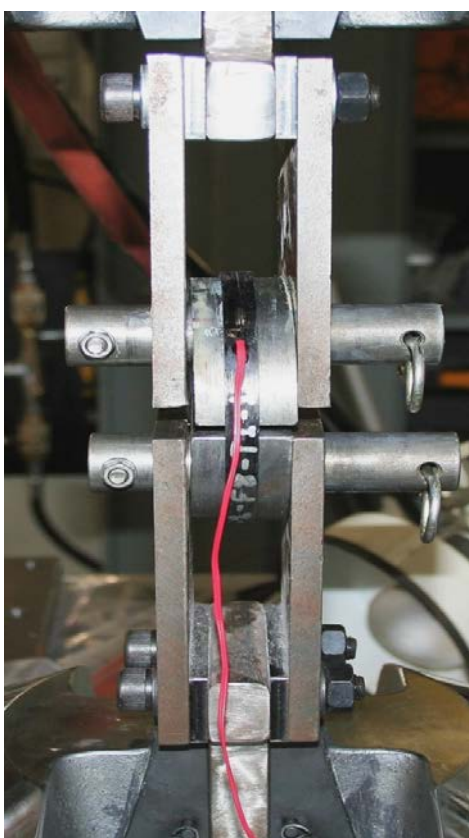
C-200-10-2-F8-T1								
	1	2	3	4	5	6	7	
Width (mm)								
average value	10.20	10.07	9.99	10.21	9.83	10.08	10.06	10.06
standard deviation	0.13	0.12	0.07	0.04	0.19	0.06	0.16	0.05
coef. of variation	1.3%	1.1%	0.7%	0.4%	1.9%	0.6%	1.5%	0.5%
Thickness (mm)								
average value	2.16	2.15	2.16	2.21	2.17	2.17	2.16	2.17
standard deviation	0.01	0.01	0.01	0.06	0.01	0.02	0.01	0.02
coef. of variation	0.4%	0.4%	0.6%	2.6%	0.4%	1.1%	0.2%	0.8%
Diameter (mm)								
average value	200.65	200.60	200.35	200.55	200.50	200.20	200.20	200.65
standard deviation	0.21	0.00	0.07	0.21	0.14	0.14	0.14	0.21
coef. of variation	0.1%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα παρατηρείται ότι σε όλες τις μετρήσεις ο συντελεστής διακύμανσης είναι αρκετά μικρότερος του 5% γεγονός που καθιστά τις διαστάσεις των δοκιμίων αποδεκτές. Παρατηρείται επιπλέον ότι στα δοκίμια που κατασκευάστηκαν με προεμποτισμένες ενισχυτικές ίνες άνθρακα το πάχος ήταν κατά 0.5mm μεγαλύτερο από το ονομαστικό. Παράλληλα φαίνεται ότι στα δοκίμια ονομαστικής διαμέτρου 100mm τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν με οχτώ δέσμες περιέλιξης ταυτόχρονα είχαν λίγο μεγαλύτερο πάχος από τα αντίστοιχα με μία δέσμη. Παρ' όλα αυτά για εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση των κατασκευαστικών παραμέτρων στη γεωμετρία των δοκιμίων θα έπρεπε να γίνουν περισσότερες μετρήσεις σε μεγαλύτερο αριθμό δειγμάτων. Σημειώνεται ότι παρ' όλο που μετρήθηκαν επτά δοκίμια, μόνο τα πρώτα έξι υποβλήθηκαν σε δοκιμές εφελκυσμού, ενώ για τα δοκίμια με ενισχυτικές ίνες βασάλτη η σειρά με ονομαστικό πλάτος 25mm δεν ελέγχθηκε σε μηχανικές δοκιμές καθώς υπήρχε απαίτηση για υψηλά φορτία προκειμένου να επιτευχθεί η θραύση τους.

Στη συνέχεια έγινε ο καθορισμός των σημείων μέτρησης των δοκιμίων και η χάραξη τους προκειμένου να εφαρμοστούν τα επιμηκυσσιόμετρα στην ακριβή θέση μέτρησης. Λόγω έλλειψης πληροφοριών από το διεθνές πρότυπο της θέσης μέτρησης των παραμορφώσεων στην περιφέρεια των δακτυλίων, έγινε διερεύνηση από προηγούμενη διπλωματική εργασία (Κωνσταντινίδης 2016). Σύμφωνα με αυτήν η εφαρμογή επιμηκυσσιόμετρου σε γωνία 45° από τη διεύθυνση άσκησης του φορτίου στα δοκίμια είναι η πιο αντιπροσωπευτική επιλογή. Πιο συγκεκριμένα για τον καθορισμό της θέσης μέτρησης το κύριο πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι η εμφάνιση ροπής κάμψης στα ανυποστήρικτα σημεία του δοκιμίου, η οποία δημιουργεί ανομοιομορφία στις τάσεις επηρεάζοντας την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Έτσι ακολουθήθηκε διαδικασία πολλαπλών μετρήσεων σε διαφορετικά σημεία της περιφέρειας του δακτυλίου. Από τα αποτελέσματα εξήχθη το συμπέρασμα ότι η θέση των 90° ως προς τη διεύθυνση επιβολής της δύναμης εμφανίζει μικρότερες παραμορφώσεις για ίδιες τάσεις σε σχέση με άλλες θέσεις απομακρυσμένες τουλάχιστον κατά 30° από την ιδίομορφη θέση των 90° . Αυτό συμβαίνει γιατί στη θέση αυτή το δοκίμιο κάμπτεται προς το εσωτερικό του με αποτέλεσμα να δημιουργούνται θλιπτικές τάσεις στην εξωτερική επιφάνεια μειώνοντας τις εφελκυστικές. Επίσης παρουσιάζεται ομοιομορφία σε αντιδιαμετρικές και σε συμμετρικές θέσεις μέτρησης. Έχοντας αυτή την εμπειρία, σε όλα τα δοκίμια της παρούσας διπλωματικής εργασίας τοποθετήθηκε μονοαξονικό επιμηκυσσιόμετρο μήκους 5mm της εταιρίας KYOWA στις 45° στην περιφερειακή διεύθυνση των δακτυλίων (ΣΧΗΜΑ 4.13). Το ΣΧΗΜΑ 4.14 που παρουσιάζεται στη συνέχεια αποτελεί τυπική όψη δοκιμίου στο οποίο έχει εφαρμοστεί μονοαξονικό επιμηκυσσιόμετρο.



ΣΧΗΜΑ 4.13: Διάταξη επιμηκυσσιόμετρων.



ΣΧΗΜΑ 4.14: Γενική όψη επιμηκυνσιόμετρου πάνω σε δοκίμιο.

Έπειτα πραγματοποιήθηκε η δοκιμή των δοκιμίων με χρήση της υδραυλικής μηχανής, ασκώντας τους εφελκυστικό φορτίο. Πριν από κάθε δοκιμή, στο εσωτερικό της επιφάνειας των δακτυλίων, στην περιφέρεια των διαιρούμενων δίσκων καθώς και στους πείρους της πειραματικής διάταξης τοποθετήθηκε γράσο με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί το φαινόμενο της τριβής. Σε όλα τα δοκίμια, αρχικά, εφαρμόστηκε μια προφόρτιση με ελεγχόμενη αύξηση φορτίου (Force Control) με ρυθμό 0.5kN/sec και μια αντίστοιχη αποφόρτιση με σκοπό να βελτιωθεί η εφαρμογή του δακτυλίου στον διαιρούμενο δίσκο. Προκειμένου η διαδικασία προφόρτισης να μην προκαλεί σημαντικές παραμορφώσεις στα δοκίμια ρυθμίστηκε η φόρτιση να φτάνει μέχρι ένα όριο (20%περίπου) του φορτίου αστοχίας τους. Για να καθοριστεί το φορτίο αστοχίας και συνεπώς το όριο της προφόρτισης τα δοκίμια με εσωτερική διάμετρο 100mm και αύξοντα αριθμό 1, 2 από όλες τις κατηγορίες υποβλήθηκαν σε φόρτιση μέχρι την θραύση τους ενώ η προφόρτιση σε αυτά έγινε μέχρι το φορτίο των 20kN. Έχοντας πληροφορίες για την αντοχή αυτών των δοκιμίων καθορίστηκε το όριο προφόρτισης για όλα τα δοκίμια που εξετάστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Σημειώνεται ωστόσο, ότι η συγκεκριμένη φάση της πειραματικής διαδικασίας δεν παρουσιάζεται αναλυτικότερα καθώς δεν έχει κάποια επίδραση στα αποτελέσματα και πραγματοποιείται μόνο για πρακτικούς λόγους.

Όπως αναλύθηκε και στο ΕΔΑΦΙΟ 4.1, ακολουθώντας την διαδικασία των Yoon et al. για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας πραγματοποιήθηκε, στη συνέχεια, φόρτιση των δοκιμίων μέχρι ένα όριο και ακολούθως αποφόρτιση τους. Σκοπός είναι να καλυφθεί το εύρος 1000-3000με της παραμόρφωσης για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας. Τέλος ακολουθεί φόρτιση μέχρι την θραύση των δειγμάτων. Η φόρτιση των δοκιμίων στις φάσεις αυτές επιλέχθηκε να γίνει με ελεγχόμενη μετατόπιση της κεφαλής της μηχανής (Displacement Control) με ρυθμό 1mm/min. Από το βρόγχο υστέρησης και την τελική καμπύλη φόρτισης προκύπτουν τα αποτελέσματα για το μέτρο ελαστικότητας και την τάση θραύσης αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα υπολογίζονται με τη διαδικασία που έχει αναλυθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο και θα παρουσιαστούν στη συνέχεια.

4.3 Μελέτη βελτίωσης πειραματικής διάταξης

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσίασε φαινόμενα πλαστικής παραμόρφωσης. Πιο συγκεκριμένα, η οπή των στοιχείων συγκράτησης των διαιρούμενων δίσκων (ΣΧΗΜΑ 4.9) εμφάνισε φαινόμενο «στένωσης» (ovalisation) όπως φαίνεται στα ΣΧΗΜΑΤΑ 4.15-4.16. Έτσι χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Autodesk Inventor Professional 2017 πραγματοποιήθηκε μελέτη αντοχής με πεπερασμένα στοιχεία προκειμένου να ελεγχθούν τα στοιχεία της διάταξης που εμφανίζουν τις μεγαλύτερες τάσεις και να εξετασθεί η αντοχή σε νέες διατάξεις με αλλαγμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

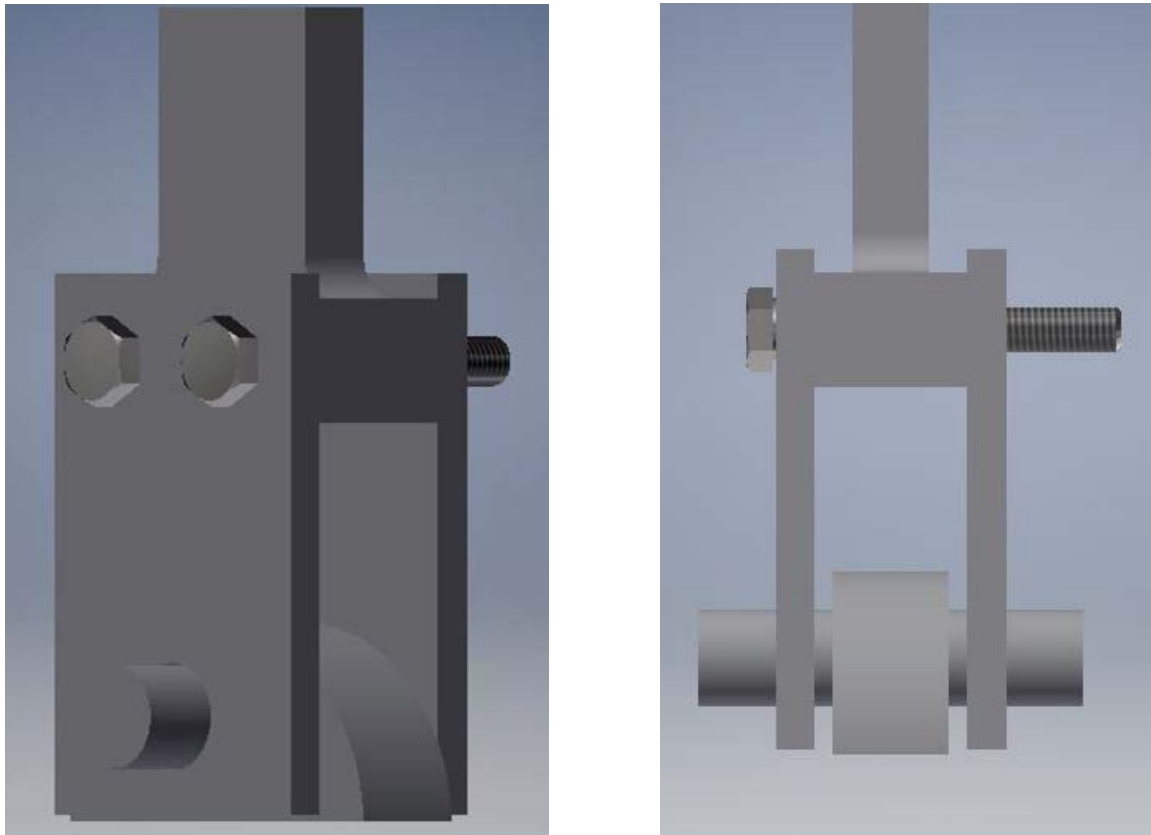


ΣΧΗΜΑ 4.15: Φαινόμενο πλαστικοποίησης στην οπή της διάταξης.



ΣΧΗΜΑ 4.16: Φαινόμενο πλαστικοποίησης στην πειραματική διάταξη.

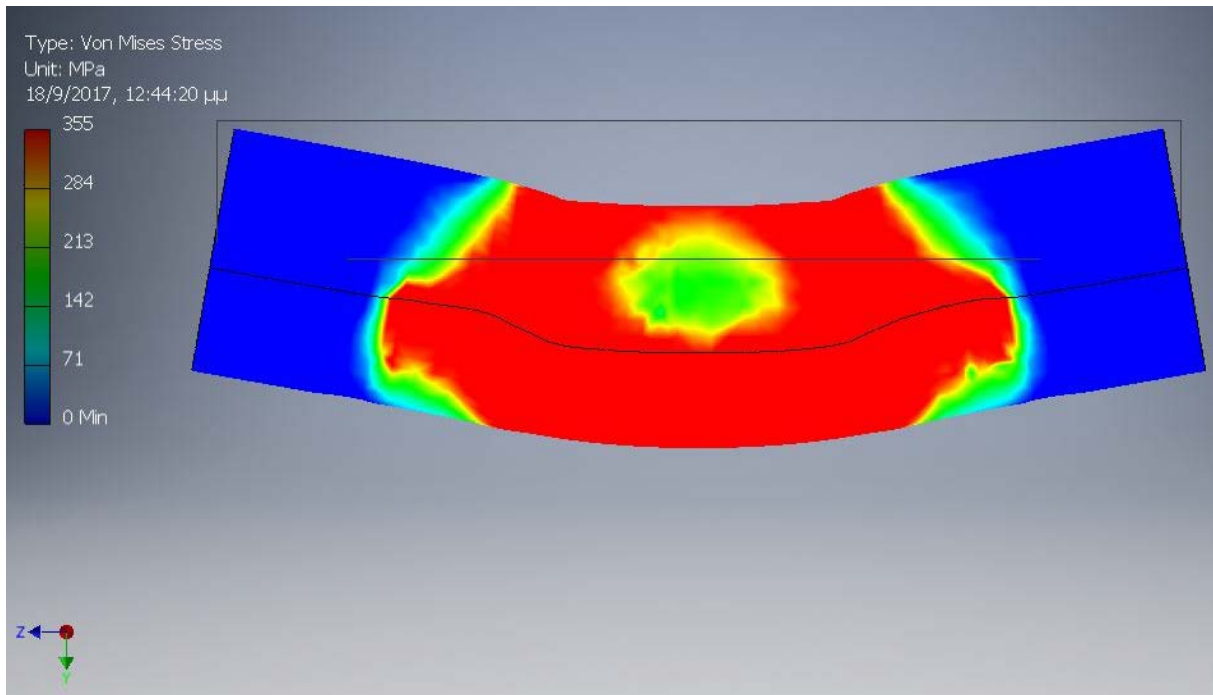
Αρχικά σχεδιάστηκαν στο περιβάλλον του προγράμματος Autodesk Inventor τα επιμέρους κομμάτια της πειραματικής διάταξης τα οποία έχουν παρουσιαστεί στο ΕΔΑΦΙΟ 4.2. Έπειτα εφαρμόζοντας όλες τις απαραίτητες συνοριακές συνθήκες έγινε η συνδεσμολογία τους προκύπτοντας η τελική διάταξη (ΣΧΗΜΑ 4.17).



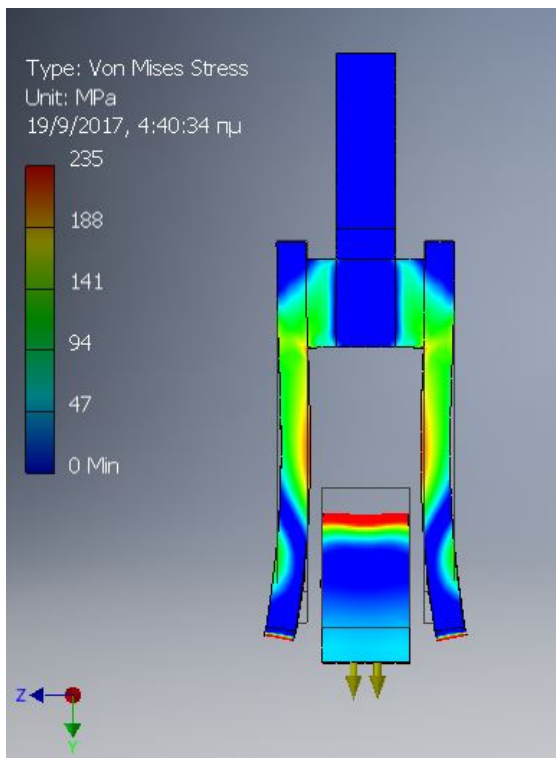
ΣΧΗΜΑ 4.17: Τελική διάταξη που μελετήθηκε με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.

Προκειμένου η ανάλυση τάσεων να ανταποκρίνεται όσο το δυνατόν καλύτερα και αξιόπιστα στη πραγματικότητα, οι παράμετροι της μελέτης επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να προσομοιώνουν την πειραματική διάταξη και τη φόρτιση της κατάλληλα. Πιο συγκεκριμένα, η μελέτη έγινε για τη μέγιστη δυνατότητα φόρτισης της υδραυλικής μηχανής (240kN). Το φορτίο επιλέχθηκε να εφαρμόζεται ως κατανεμημένο στην ελεύθερη επιφάνεια του μισού κομματιού του διαιρούμενου δίσκου με επιφάνεια 100mm×30mm. Ως συνοριακή συνθήκη, ρυθμίστηκε οι πλευρές του ελάσματος εφαρμογής φορτίου να είναι πακτωμένες κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Τέλος η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων ήταν γραμμικά ελαστική με πλήθος στοιχείων 141,915 ενώ ο τύπος τους ήταν Solid Tetrahedral. Από την ανάλυση της υπάρχουσας διάταξης (Model0) εξήχθησαν τα αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται στα ΣΧΗΜΑΤΑ 4.18-4.19. Εκ των αποτελεσμάτων συμπεραίνεται ότι τα στοιχεία της διάταξης στα οποία είχαμε ανάπτυξη μεγάλων τάσεων ήταν ο πείρος, το τμήμα του διαιρούμενου δίσκου και η φλάντζα και πιο συγκεκριμένα η οπή της. Σημειώνεται ότι στα

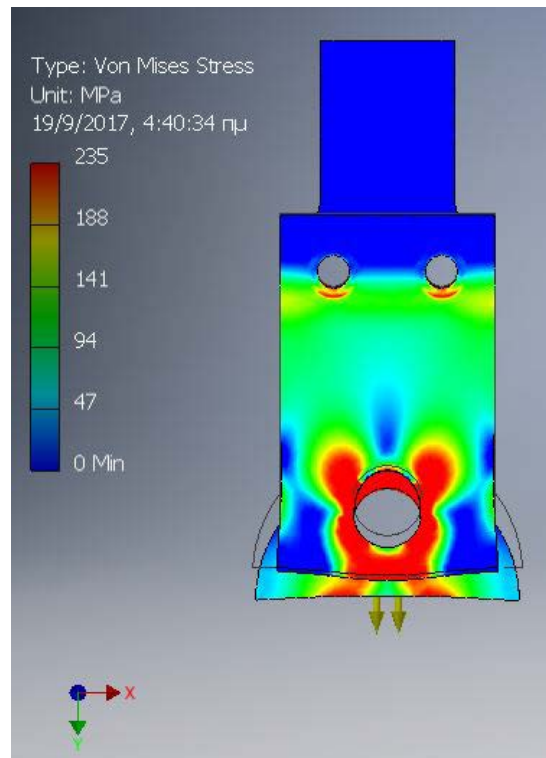
σχήματα οι περιοχές με κόκκινο χρώμα αποτελούν τις περιοχές πλαστικής διαρροής των στοιχείων όπου είναι 235MPa για όλα τα στοιχεία πλην του πείρου όπου είναι 355MPa.



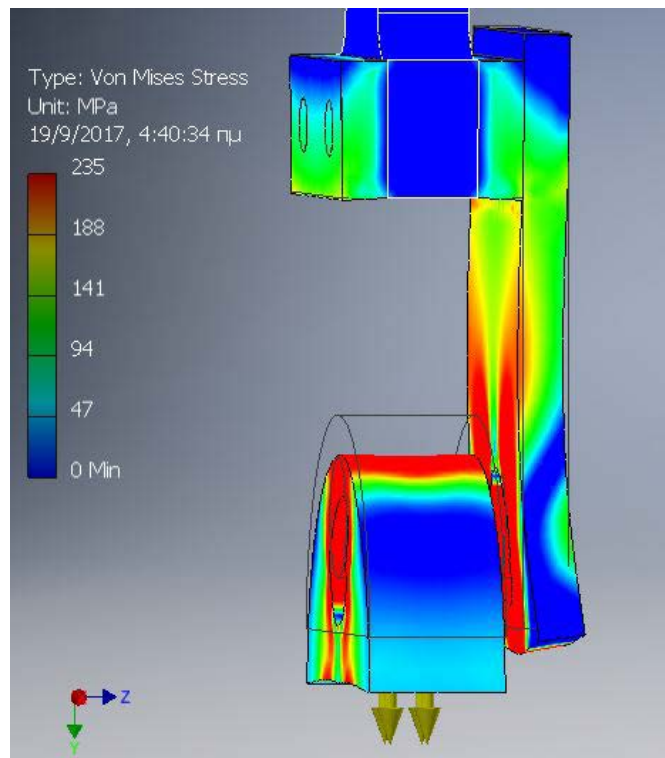
ΣΧΗΜΑ 4.18: Περιοχή πλαστικής παραμόρφωσης πείρου (Model0).



(α)



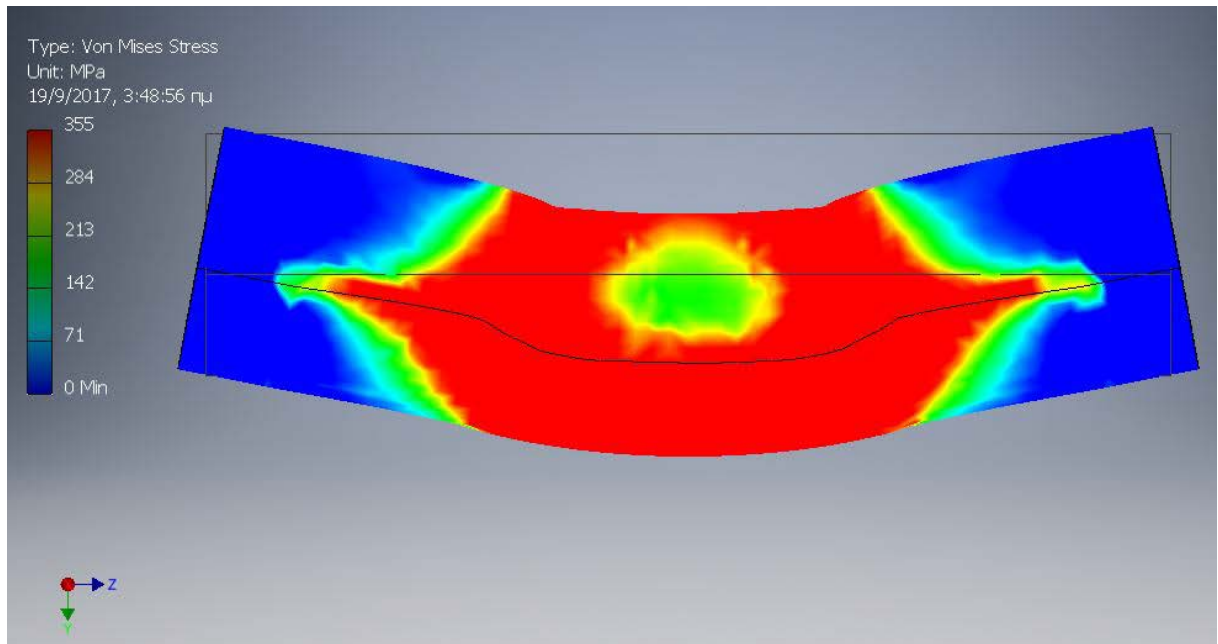
(β)



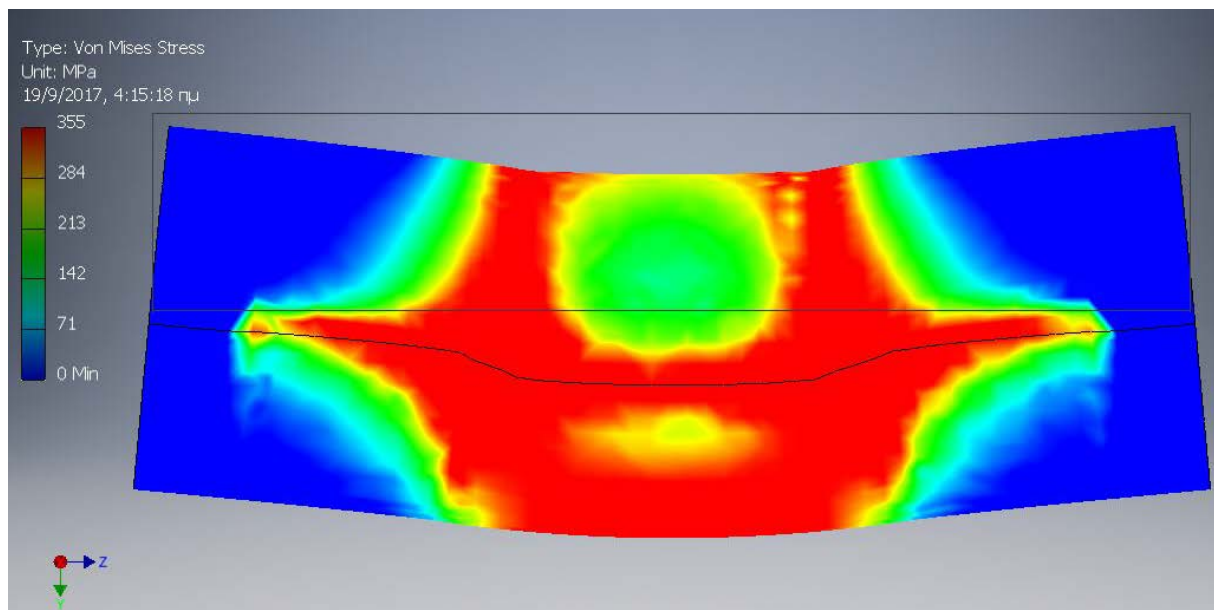
(γ)

ΣΧΗΜΑ 4.19: Απεικόνιση περιοχής πλαστικής παραμόρφωσης στοιχείων πειραματικής διάταξης σε διάφορες όψεις (Model0).

Γι αυτό το λόγο πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων στα μηχανολογικά στοιχεία που προαναφέρθηκαν εφαρμόζοντας αλλαγές στα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά. Αρχικά αυξήθηκε το πάχος της φλάντζας σε 20mm και το πλάτος αυτής σε 100mm. Η τελευταία αλλαγή έγινε προκειμένου να αυξηθεί η μεταλλική επιφάνεια γύρω από την οπή. Το κέντρο της οπής της διάταξης συγκεκριμένα απέχει 50mm από τα πλαϊνά άκρα της διάταξης και η απόσταση του από το κάτω άκρο της αυξήθηκε κατά 1.5mm. Πραγματοποιώντας αυτές τις αλλαγές και με τις διαστάσεις των υπόλοιπων στοιχείων να μένουν ίδιες με τις υπάρχουσες έγινε η πρώτη ανάλυση (Model1) πεπερασμένων στοιχείων τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται παρακάτω. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε νέα ανάλυση στην οποία η διάμετρος του πείρου αυξήθηκε στα 35mm ενώ αντίστοιχα αυξήθηκε και η διάμετρος της οπής της φλάντζας. Το πλάτος και το πάχος αυτής παρέμειναν ίδια με αυτά της πρώτης ανάλυσης. Το κέντρο της οπής απέχει από τα πλαϊνά άκρα 50mm ενώ από το κάτω άκρο 35mm. Τέλος το τμήμα του διαιρούμενου δίσκου έχει οπή 35mm το κέντρο της οποίας απέχει από το κάτω άκρο κατά 22mm (Model2). Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο αναλύσεων (ΣΧΗΜΑΤΑ 4.20-4.23).



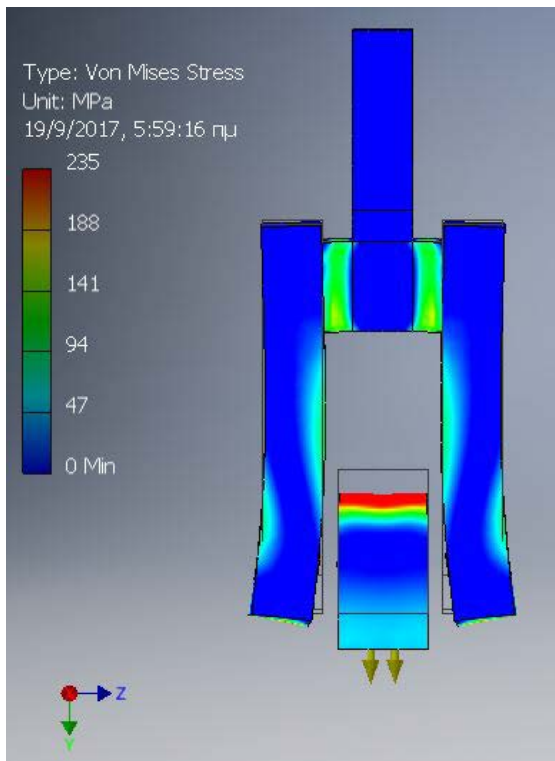
ΣΧΗΜΑ 4.20: Περιοχή πλαστικής παραμόρφωσης πείρου (Model1).



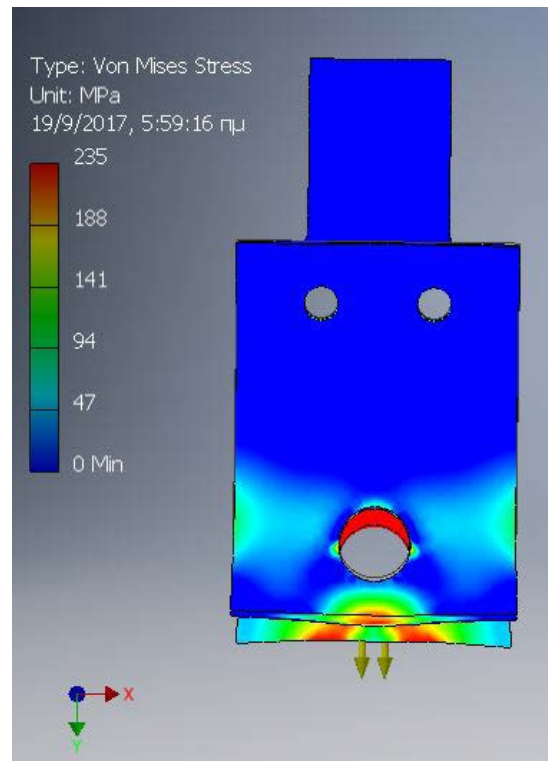
ΣΧΗΜΑ 4.21: Περιοχή πλαστικής παραμόρφωσης πείρου (Model2).

Όπως συμπεραίνεται από τα ΣΧΗΜΑΤΑ 4.18, 4.20 και 4.21, στο δεύτερο μοντέλο η περιοχή του πείρου όπου πραγματοποιείται πλαστική παραμόρφωση είναι μικρότερη σε σχέση με τα μοντέλα των υπόλοιπων αναλύσεων.

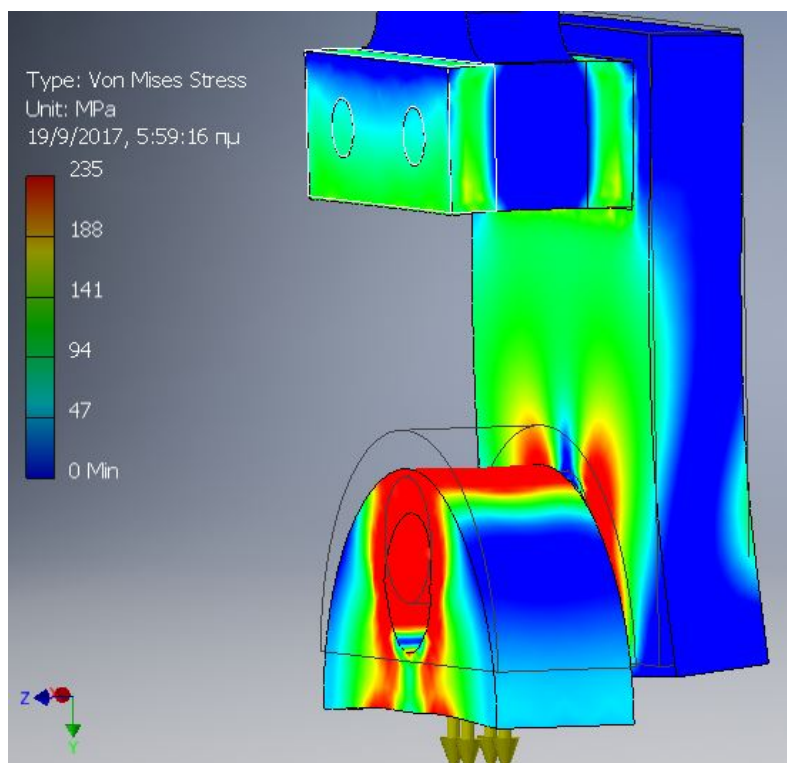
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τα στοιχεία της διάταξης με όριο διαρροής 235MPa.



(α)

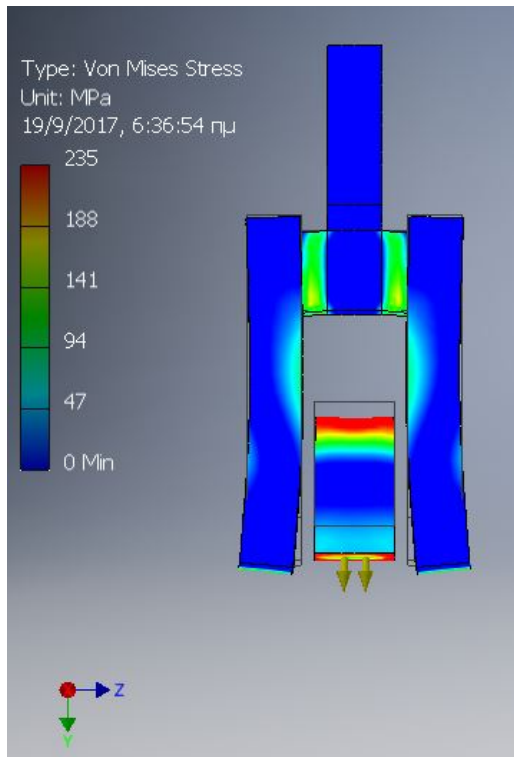


(β)

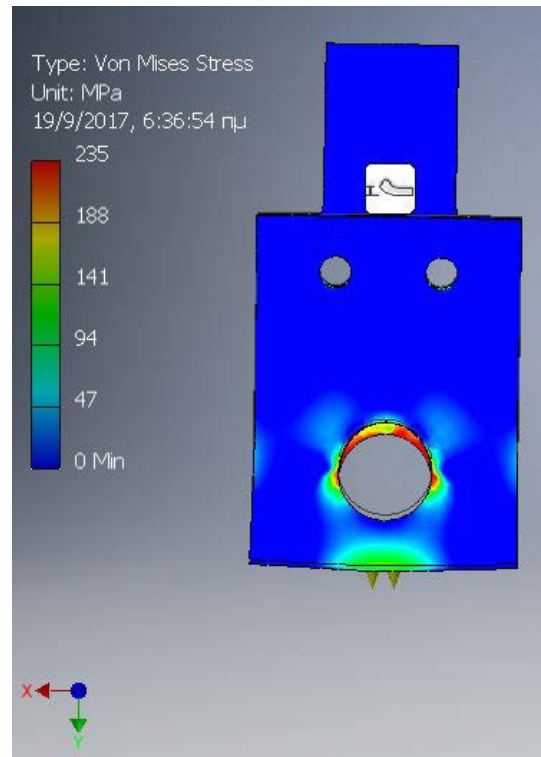


(γ)

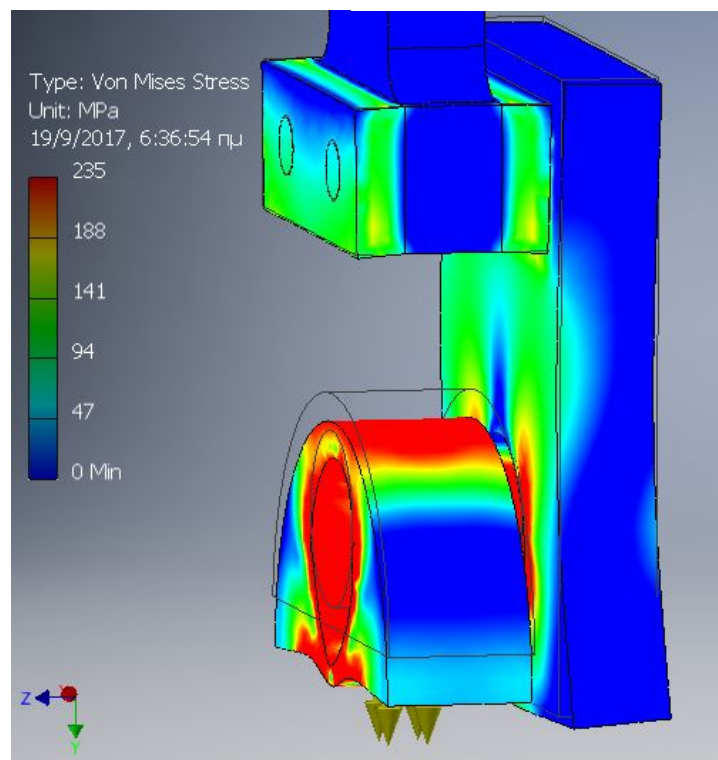
ΣΧΗΜΑ 4.22: Απεικόνιση περιοχής πλαστικής παραμόρφωσης στοιχείων πειραματικής διάταξης σε διάφορες όψεις (Model1).



(α)



(β)



(γ)

ΣΧΗΜΑ 4.23: Απεικόνιση περιοχής πλαστικής παραμόρφωσης στοιχείων πειραματικής διάταξης σε διάφορες όψεις (Model2).

Από τα αποτελέσματα των τριών αναλύσεων που διεξήχθησαν (ΣΧΗΜΑ 4.19 και ΣΧΗΜΑΤΑ 4.22-4.23) συμπεραίνεται ότι η περιοχή πλαστικής παραμόρφωσης γύρω από την οπή της φλάντζας περιορίζεται αρκετά στην τρίτη ανάλυση σε σχέση με τις άλλες δύο. Όσον αφορά στο τμήμα του διαιρούμενου δίσκου, η αύξηση της διαμέτρου της οπής με ταυτόχρονη αύξηση της απόστασης του κέντρου της από την περιφέρεια του κομματιού του δίσκου φαίνεται να προκαλεί μια μικρή μείωση της ανάπτυξης πλαστικών παραμορφώσεων. Σημειώνεται ότι η παραμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας του κομματιού του διαιρούμενου δίσκου (ΣΧΗΜΑ 4.23 (γ)) δεν θα συζητηθεί στην συγκεκριμένη ανάλυση καθώς δεν αποτελεί ρεαλιστική απεικόνιση της παραμόρφωσης της διάταξης και αποτελεί αντιθέτως αποτέλεσμα της εφαρμογής της παραμέτρου του φορτίου στην εν λόγω επιφάνεια.

Για την πληρότητα της ανάλυσης εξήχθησαν συμπεράσματα σχετικά με τη μέγιστη τάση και το μέγιστο βέλος κάμψης που αναπτύσσεται στη διάταξη και στον πείρο. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον ΠΙΝΑΚΑ 4.4 που ακολουθεί. Στις πρώτες δύο αναλύσεις η μέγιστη τάση εμφανίστηκε στον πείρο λόγω της συναρμογής με τη φλαντζωτή διάταξη ενώ στην τρίτη ανάλυση στο κομμάτι του διαιρούμενου δίσκου. Γενικότερα οι τάσεις που υπολογίστηκαν κατά τη διάρκεια των αναλύσεων είναι αρκετά υψηλές λόγω της συγκέντρωσης τάσεων που αναπτύσσονται από τη συναρμογή των στοιχείων της πειραματικής διάταξης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4: Αποτελέσματα αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων πειραματικής διάταξης.

ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΟ ΜΕΓΕΘΟΣ/ΜΟΝΤΕΛΟ	Model0	Model1	Model2
ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ (MPa)	3319	2956	1813
ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΣΗ ΠΕΙΡΟΥ (MPa)	2090	2217	1267
ΜΕΓΙΣΤΟ ΒΕΛΟΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ (mm)	0.327	0.282	0.257
ΜΕΓΙΣΤΟ ΒΕΛΟΣ ΚΑΜΨΗΣ ΠΕΙΡΟΥ (mm)	0.260	0.215	0.150

5. ΑΠΟΤΕΛΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από τις δοκιμές διαιρούμενου δίσκου που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία καθώς και από τις δοκιμές για το χαρακτηρισμό των φυσικών ιδιοτήτων των δοκιμίων από σύνθετα υλικά. Πιο συγκεκριμένα θα αναλυθούν τα αποτελέσματα από τις δοκιμές για τον χαρακτηρισμό της πυκνότητας και της περιεκτικότητας σε ενισχυτικές ίνες των δοκιμίων. Θα παρουσιαστούν οι καμπύλες φορτίου- μετατόπισης (Force- Displacement) και οι καμπύλες τάσης- παραμόρφωσης (Stress-Strain) των δοκιμίων ενώ στο τέλος θα παρουσιαστούν πίνακες με τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων

Όσον αφορά στο χαρακτηρισμό των φυσικών ιδιοτήτων των δοκιμίων, στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν πειράματα μέτρησης της πυκνότητας των υλικών καθώς και της κατά βάρος περιεκτικότητας σε ίνες.

Για τη μέτρηση της πυκνότητας των υλικών ακολουθήθηκε η διαδικασία που ορίζει το πρότυπο ASTM D792-13 (Test Method A). Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν για όλες τις σειρές δοκιμίων χρησιμοποιώντας μικρά κομμάτια διαστάσεων $40 \times 6.35 \times 1.52$ για τα δοκίμια όπως ορίζονταν από το NOL, $35 \times 10 \times 2$ mm για τα υπόλοιπα δοκίμια με ενισχυτικές ίνες άνθρακα και κομμάτια διαστάσεων $6 \times 25 \times 5$ mm για τα δοκίμια με ενισχυτικές ίνες βασάλτη. Τα εν λόγω κομμάτια κόπηκαν από τμήματα δακτυλιοειδών δοκιμίων. Αρχικά, μετρήθηκε η μάζα του κάθε δοκιμίου στον αέρα και στη συνέχεια η μάζα του στο νερό, όπως απεικονίζεται στα ΣΧΗΜΑΤΑ 5.1 και 5.2 αντίστοιχα. Το ειδικό βάρος και η τελική πυκνότητα δίνονται από τις εξισώσεις (5.1) και (5.2) που καθορίζονται από το πρότυπο ASTM D792-13. Εξετάστηκαν 3 δοκίμια για κάθε σειρά δοκιμίων και σαν τελική τιμή για την πυκνότητα του κάθε υλικού ελήφθη ο μέσος όρος των μετρήσεων (average value). Ακόμα, υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση (standard deviation) καθώς και ο συντελεστής διακύμανσης (coefficient of variation) έτσι ώστε να αξιολογηθεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων καθώς και η απόκλισή τους από το μέσο όρο. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρατίθενται στον ΠΙΝΑΚΑ 5.1.

$$\rho_c = \frac{W_a}{(W_a - W_w)} \quad (5.1)$$

$$D = \rho_c \times 997.5 \quad (5.2)$$

Όπου:

W_a (g): Μάζα δοκιμίου στον αέρα.

W_w (g): Μάζα δοκιμίου στο νερό.

ρ_c : Ειδικό βάρος.

D (kg/m^3): Πυκνότητα δοκιμίου.

997.5 (kg/m^3): Πυκνότητα του νερού στους 23° C στους οποίους έγινε η μέτρηση.



ΣΧΗΜΑ 5.1: Μέτρηση της μάζας δοκιμίου στον αέρα.



ΣΧΗΜΑ 5.2: Μέτρηση της μάζας δοκιμίου στο νερό.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1: Μετρήσεις πυκνότητας υλικών.

P_100_10_2_F8_T1				Average Density	standard deviation	coef. of variation
				1238.10	17.14	1.38%
	1	2	3			
W _a (g)	1.0464	1.0657	1.0814			
W _w (g)	0.2137	0.1941	0.2123			
ρ _c	1.2566	1.2227	1.2443			
D (kg/m ³)	1253.49	1219.64	1241.16			

B_100_20_5_F8_T1				Average Density	standard deviation	coef. of variation
				1918.21	63.82	3.33%
	1	2	3			
W _a (g)	1.3259	1.7148	1.5268			
W _w (g)	0.6089	0.8413	0.7465			
ρ _c	1.8492	1.9631	1.9567			
D (kg/m ³)	1844.61	1958.23	1951.79			

C_100_10_2_F8_T1				Average Density	standard deviation	coef. of variation
				1421.74	6.09	0.43%
	1	2	3			
Wa (g)	0.9958	1.0207	1.0100			
Ww (g)	0.2972	0.3076	0.2983			
ρ_c	1.4254	1.4314	1.4191			
D (kg/m ³)	1421.86	1427.78	1415.59			

C_100_10_2_F25_T1				Average Density	standard deviation	coef. of variation
				1413.46	44.54	3.15%
	1	2	3			
Wa (g)	0.9127	0.8982	0.9421			
Ww (g)	0.2490	0.2620	0.2986			
ρ_c	1.3752	1.4118	1.4640			
D (kg/m ³)	1371.73	1408.29	1460.36			

C_100_10_2_F45_T1				Average Density	standard deviation	coef. of variation
				1407.56	42.98	3.05%
	1	2	3			
Wa (g)	0.9380	1.0017	0.9174			
Ww (g)	0.2490	0.3051	0.2776			
ρ_c	1.3614	1.4380	1.4339			
D (kg/m ³)	1357.99	1434.39	1430.30			

C_100_10_2_F8_T8				Average Density	standard deviation	coef. of variation
				1412.96	9.65	0.68%
	1	2	3			
Wa (g)	1.2234	1.2147	1.3339			
Ww (g)	0.3534	0.3580	0.3981			
ρ_c	1.4062	1.4179	1.4254			
D (kg/m ³)	1402.69	1414.34	1421.85			

C_150_10_2_F8_T1				Average Density	standard deviation	coef. of variation
				1380.29	7.33	0.53%
	1	2	3			
<i>W_a</i> (g)	1.0422	1.1296	1.1180			
<i>W_w</i> (g)	0.2849	0.3135	0.3142			
<i>ρ_c</i>	1.3762	1.3841	1.3909			
<i>D</i> (kg/m ³)	1372.76	1380.68	1387.42			

C_150_6,35_1,52_F8_T1				Average Density	standard deviation	coef. of variation
				1412.40	13.37	0.95%
	1	2	3			
<i>W_a</i> (g)	1.0405	1.1038	1.1412			
<i>W_w</i> (g)	0.3105	0.3157	0.3386			
<i>ρ_c</i>	1.4253	1.4006	1.4219			
<i>D</i> (kg/m ³)	1421.78	1397.08	1418.32			

C_200_10_2_F8_T1				Average Density	standard deviation	coef. of variation
				1383.47	25.35	1.83%
	1	2	3			
<i>W_a</i> (g)	0.9339	1.0460	1.0476			
<i>W_w</i> (g)	0.2474	0.3047	0.2936			
<i>ρ_c</i>	1.3604	1.4110	1.3894			
<i>D</i> (kg/m ³)	1356.98	1407.51	1385.92			

C_200_10_2_F8_T8				Average Density	standard deviation	coef. of variation
				1328.21	22.12	1.67%
	1	2	3			
<i>W_a</i> (g)	0.7966	0.9169	0.8048			
<i>W_w</i> (g)	0.1872	0.2380	0.2028			
<i>ρ_c</i>	1.3072	1.3506	1.3369			
<i>D</i> (kg/m ³)	1303.92	1347.19	1333.53			

C_200_10_2_F25_T8				Average Density	standard deviation	coef. of variation
				1413.72	21.20	1.50%
	1	2	3			
Wa (g)	1.0329	1.0631	1.0399			
Ww (g)	0.2915	0.3172	0.3144			
ρ_c	1.3932	1.4253	1.4334			
D (kg/m ³)	1389.69	1421.69	1429.77			

C_200_10_2_F45_T8				Average Density	standard deviation	coef. of variation
				1421.48	25.08	1.76%
	1	2	3			
Wa (g)	1.0968	1.0553	1.0588			
Ww (g)	0.3381	0.3186	0.3009			
ρ_c	1.4456	1.4325	1.3970			
D (kg/m ³)	1442.02	1428.89	1393.53			

Παρατηρείται πολύ καλή επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων με το συντελεστή διακύμανσης να βρίσκεται κάτω του 4%. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι τα δοκίμια με ενισχυτικές ίνες βασάλτη έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα από τα υπόλοιπα που ενισχύθηκαν με ίνες άνθρακα, όπως αναμενόταν, ενώ τα δοκίμια με προεμποτισμένες ίνες άνθρακα έχουν τις μικρότερες τιμές πυκνότητας από όλα τα υπόλοιπα. Σε κάθε περίπτωση οι τιμές για τα δοκίμια από ανθρακονήματα είναι κοντά στις αντίστοιχες τυπικές τιμές που υπάρχουν στην βιβλιογραφία.

Για τη μέτρηση της κατά βάρος περιεκτικότητας των ινών του υλικού ακολουθήθηκε η διαδικασία που ορίζει το πρότυπο ASTM D3171-15. Για τους κυλίνδρους που ενισχύθηκαν με ίνες άνθρακα ακολουθήθηκε η διαδικασία A (Procedure A) που αναφέρεται σε δοκίμια κατασκευασμένα με εποξική ρητίνη. Για τους κυλίνδρους με ενίσχυση από ίνες βασάλτη λόγω έλλειψης πιστοποιημένων προτύπων εφαρμόστηκε η διαδικασία G (Procedure G) του ASTM D3171 η οποία αναφέρεται σε δοκίμια με εποξική ρητίνη και ενισχυτικές ίνες οι οποίες ωστόσο είναι ανθεκτικές σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως οι ίνες γυαλιού. Η διαδικασία αυτή επιλέχθηκε λόγω της καλής αντοχής των ινών βασάλτη σε θερμοκρασίες υψηλότερες ακόμα από εκείνες των ινών γυαλιού.

Για τη μέτρηση της περιεκτικότητας των δοκιμίων με ενισχυτικές ίνες άνθρακα χρησιμοποιήθηκαν μικρά κομμάτια μάζας περίπου 0.5g. Αρχικά, μετρήθηκε η μάζα του κάθε δοκιμίου με ακρίβεια της τάξης του 0.001g. Στη συνέχεια τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε ποτήρι ζέσεως που περιέχει νιτρικό οξύ περιεκτικότητας περίπου 70%, προκειμένου μέσω χημικής προσβολής να διαλυθεί και στη συνέχεια να αφαιρεθεί η μάζα της ρητίνης. Το ποτήρι ζέσεως τοποθετείται σε θερμαντικό μανδύα (heating mantle) μέσω του οποίου παρέχεται σταθερή θερμοκρασία 80°C με ταυτόχρονη ανάδευση του διαλύματος του δοχείου, μέχρις

όπου να διαλυθεί όλη η μάζα της ρητίνης του δοκιμίου, όπως ενδεικτικά απεικονίζεται στο ΣΧΗΜΑ 5.3. Έπεται διήθηση των δοκιμίων υπό πίεση κενού με σκοπό την απομάκρυνση του υγρού διαλύματος. Τέλος, οι εναπομείνουσες ίνες θερμαίνονται σε φούρνο στους 100°C για μία ώρα μετά από την οποία λαμβάνεται δεύτερη μέτρηση της μάζας τους. Η κατά βάρος περιεκτικότητα των ινών δίνεται μέσω της εξίσωσης (5.3) όπως ορίζεται από το πρότυπο.

$$W_f = \frac{M_f}{M_i} \times 100 \quad (5.3)$$

Όπου:

W_f (%): Κατά βάρος περιεκτικότητα των ινών.

M_f (g): Αρχική μάζα δοκιμίου.

M_i (g): Τελική μάζα δοκιμίου μετά την αφαίρεση της ρητίνης.



ΣΧΗΜΑ 5.3: Δοκίμιο από ενισχυτικές ίνες άνθρακα μετά την χημική προσβολή.

Για τα δοκίμια με ενισχυτικές ίνες βασάλτη χρησιμοποιήθηκαν μικρά κομμάτια μάζας 1 γραμμαρίου. Αρχικά, μετρήθηκε η μάζα του κάθε δοκιμίου με ακρίβεια της τάξης του 0.001g. Το δοκίμιο τοποθετείται στη συνέχεια σε προ-ζυγισμένο πυρίμαχο μεταλλικό δοχείο. Για τη

ζύγιση του, το δοχείο καθαρίζεται αρχικά σε κλίβανο αποτέφρωσης στους 500°C και στην συνέχεια ψύχεται σε ξηραντήρα, πριν από τη ζύγιση. Στη συνέχεια, το δοχείο με το δοκίμιο τοποθετείται σε προ-θερμασμένο φούρνο στους 500°C και θερμαίνεται για 6 ώρες μέχρις ότου να καεί όλη η μάζα της ρητίνης, όπως απεικονίζεται στο ΣΧΗΜΑ 5.4. Μετά την καύση, το δοχείο τοποθετείται σε ξηραντήρα και ψύχεται σε θερμοκρασία δωματίου. Τέλος, το δοκίμιο ζυγίζεται ξανά μαζί με το μεταλλικό δοχείο. Η κατά βάρος περιεκτικότητα των ινών δίνεται μέσω της εξίσωσης (5.3) όπου η τελική μάζα του δοκιμίου Mf υπολογίζεται αφαιρώντας την μάζα του μεταλλικού δοχείου από την τελικώς μετρούμενη μάζα.



ΣΧΗΜΑ 5.4: Καύση δοκιμίων σε φούρνο.

Η τιμή σε όλες τις περιπτώσεις πολλαπλασιάζεται επί 100 έτσι ώστε το αποτέλεσμα να δοθεί σε ποσοστό %. Από κάθε σειρά δειγμάτων εξετάστηκαν τρία δοκίμια. Σαν τελική τιμή ελήφθη ο μέσος όρος των μετρήσεων (average value). Επιπλέον, υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση (standard deviation) καθώς και ο συντελεστής διακύμανσης (coefficient of variation) έτσι ώστε να αξιολογηθεί η επαναληψιμότητα των μετρούμενων περιεκτικότητων και η απόκλισή τους από το μέσο όρο. Στη συνέχεια στον ΠΙΝΑΚΑ 5.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2: Αποτελέσματα μετρήσεων κατά βάρος περιεκτικότητας σε ίνες των δειγμάτων.

B_100_20_5_F8_T1				Average Density	standard deviation	coef. of variation
				85.3%	0.6%	0.7%
	1	2	3			
ΑΡΧΙΚΗ ΜΑΖΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	1.421	1.573	1.193			
ΤΕΛΙΚΗ ΜΑΖΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	1.211	1.341	1.022			
ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ	85.0%	85.0%	86.0%			

P_100_10_2_F8_T1				Average Density	standard deviation	coef. of variation
				86.0%	0.0%	0.0%
	1	2	3			
ΑΡΧΙΚΗ ΜΑΖΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	0.507	0.563	0.550			
ΤΕΛΙΚΗ ΜΑΖΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	0.434	0.483	0.472			
ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ	86.0%	86.0%	86.0%			

C_100_10_2_F8_T1				Average Density	standard deviation	coef. of variation
				77.3%	1.1%	1.5%
	1	2	3			
ΑΡΧΙΚΗ ΜΑΖΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	1.093	0.584	0.606			
ΤΕΛΙΚΗ ΜΑΖΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	0.852	0.445	0.473			
ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ	78.0%	76.0%	78.0%			

C_100_10_2_F25_T1				Average Density	standard deviation	coef. of variation
				77.7%	0.6%	0.7%
	1	2	3			
ΑΡΧΙΚΗ ΜΑΖΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	0.581	0.517	0.513			
ΤΕΛΙΚΗ ΜΑΖΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	0.452	0.406	0.396			
ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ	78.0%	78.0%	77.0%			

C_100_10_2_F45_T1				Average Density	standard deviation	coef. of variation
				83.0%	1.7%	2.1%
	1	2	3			
ΑΡΧΙΚΗ ΜΑΖΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	0.541	0.502	0.496			
ΤΕΛΙΚΗ ΜΑΖΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	0.438	0.422	0.419			
ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ	81.0%	84.0%	84.0%			

C_100_10_2_F8_T8				Average Density	standard deviation	coef. of variation
				82.0%	2.0%	2.4%
	1	2	3			
ΑΡΧΙΚΗ ΜΑΖΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	0.602	0.590	0.636			
ΤΕΛΙΚΗ ΜΑΖΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	0.493	0.470	0.532			
ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ	82.0%	80.0%	84.0%			

C_150_10_2_F8_T1				Average Density	standard deviation	coef. of variation
				84.7%	1.2%	1.4%
	1	2	3			
ΑΡΧΙΚΗ ΜΑΖΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	0.645	0.600	0.603			
ΤΕΛΙΚΗ ΜΑΖΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	0.557	0.505	0.509			
ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ	86.0%	84.0%	84.0%			

C_150_6,35_1,52_F8_T1				Average Density	standard deviation	coef. of variation
				83.7%	2.5%	3.0%
	1	2	3			
ΑΡΧΙΚΗ ΜΑΖΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	0.497	0.529	0.493			
ΤΕΛΙΚΗ ΜΑΖΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	0.420	0.429	0.426			
ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ	84.0%	81.0%	86.0%			

C_200_10_2_F8_T1				Average Density	standard deviation	coef. of variation
				82.3%	3.1%	3.7%
	1	2	3			
ΑΡΧΙΚΗ ΜΑΖΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	0.531	0.639	0.594			
ΤΕΛΙΚΗ ΜΑΖΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	0.421	0.527	0.507			
ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ	79.0%	83.0%	85.0%			

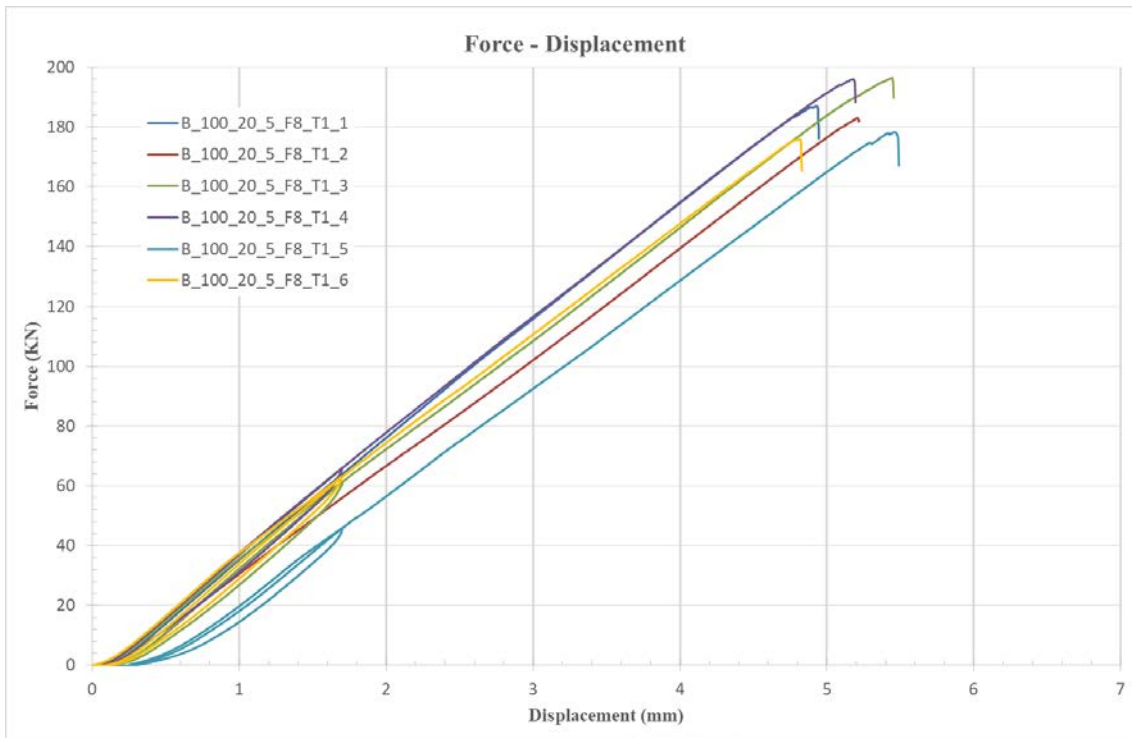
C_200_10_2_F8_T8				Average Density	standard deviation	coef. of variation
				79.3%	1.2%	1.5%
	1	2	3			
ΑΡΧΙΚΗ ΜΑΖΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	0.588	0.576	0.570			
ΤΕΛΙΚΗ ΜΑΖΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	0.470	0.449	0.456			
ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ	80.0%	78.0%	80.0%			

C_200_10_2_F25_T8				Average Density	standard deviation	coef. of variation
				85.7%	6.0%	7.0%
	1	2	3			
ΑΡΧΙΚΗ ΜΑΖΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	0.721	0.647	0.504			
ΤΕΛΙΚΗ ΜΑΖΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	0.614	0.515	0.461			
ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ	85.0%	80.0%	92.0%			

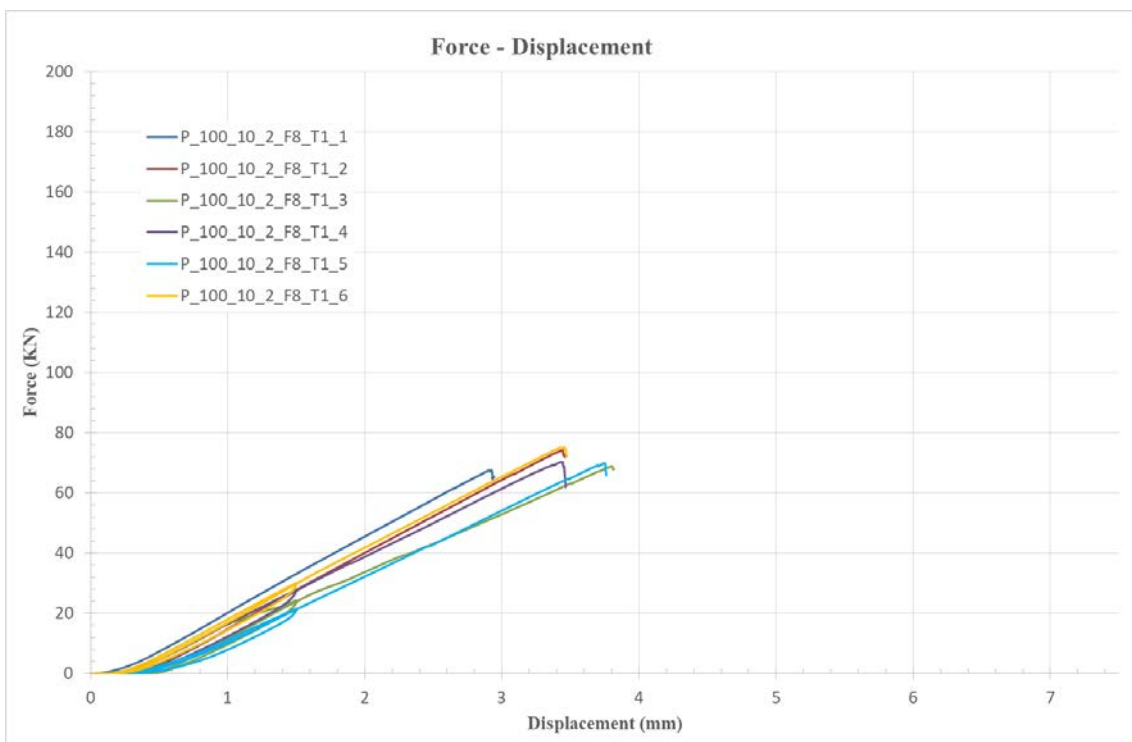
C_200_10_2_F45_T8				Average Density	standard deviation	coef. of variation
				84.7%	1.2%	1.4%
	1	2	3			
ΑΡΧΙΚΗ ΜΑΖΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	0.674	0.625	0.585			
ΤΕΛΙΚΗ ΜΑΖΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	0.576	0.521	0.493			
ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ	86.0%	84.0%	84.0%			

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.2 παρατηρείται πολύ καλή επαναληψιμότητα των μετρήσεων με το συντελεστή διακύμανσης να είναι στις περισσότερες περιπτώσεις μικρότερος του 4% καθιστώντας τα αποτελέσματα αξιόπιστα. Εξάιρεση αποτελεί η σειρά δειγμάτων C_200_10_2_F25_T8 όπου οι μετρήσεις είχαν συντελεστή διακύμανσης 7%. Για την επίδραση των κατασκευαστικών και γεωμετρικών παραμέτρων των δειγμάτων στις κατά βάρος περιεκτικότητες ινών σε αυτά, δεν μπορούμε να εξάγουμε κάποιο συμπέρασμα αξιόπιστο με τα δεδομένα αποτελέσματα.

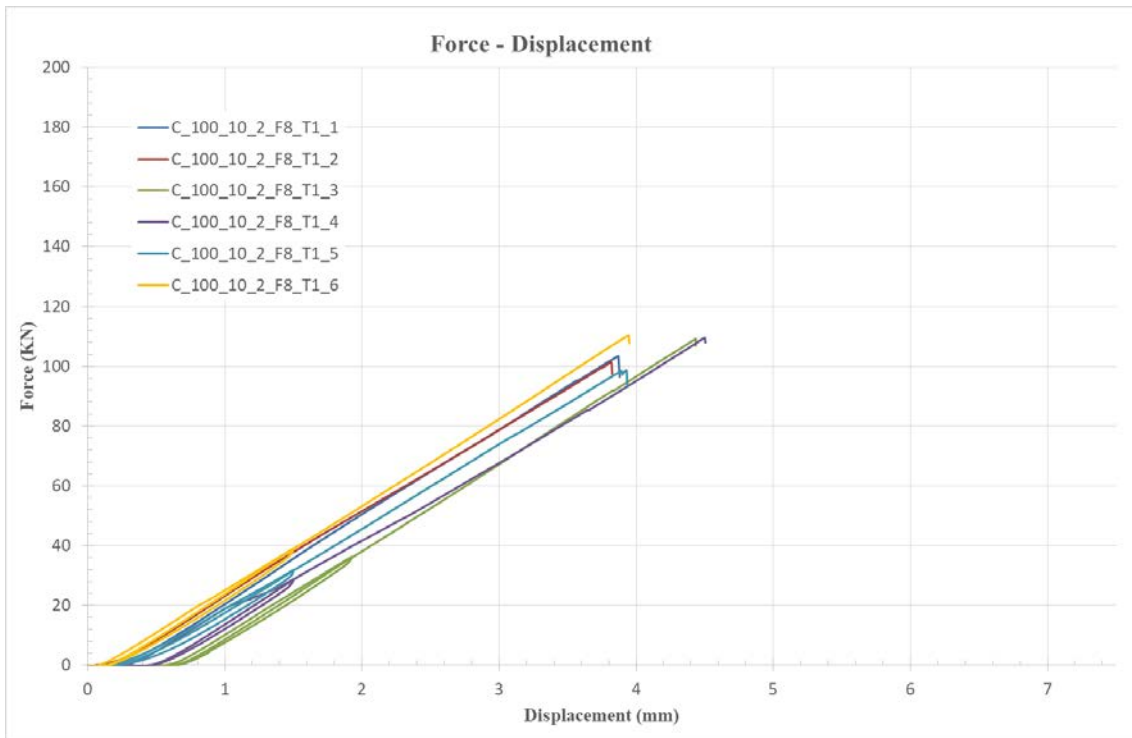
Στα ΣΧΗΜΑΤΑ 5.5-5.28 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης και τάσης-παραμόρφωσης με βάση τα δεδομένα που καταγράφηκαν κατά την δοκιμή εφελκυσμού των δακτυλιοειδών δοκιμίων.



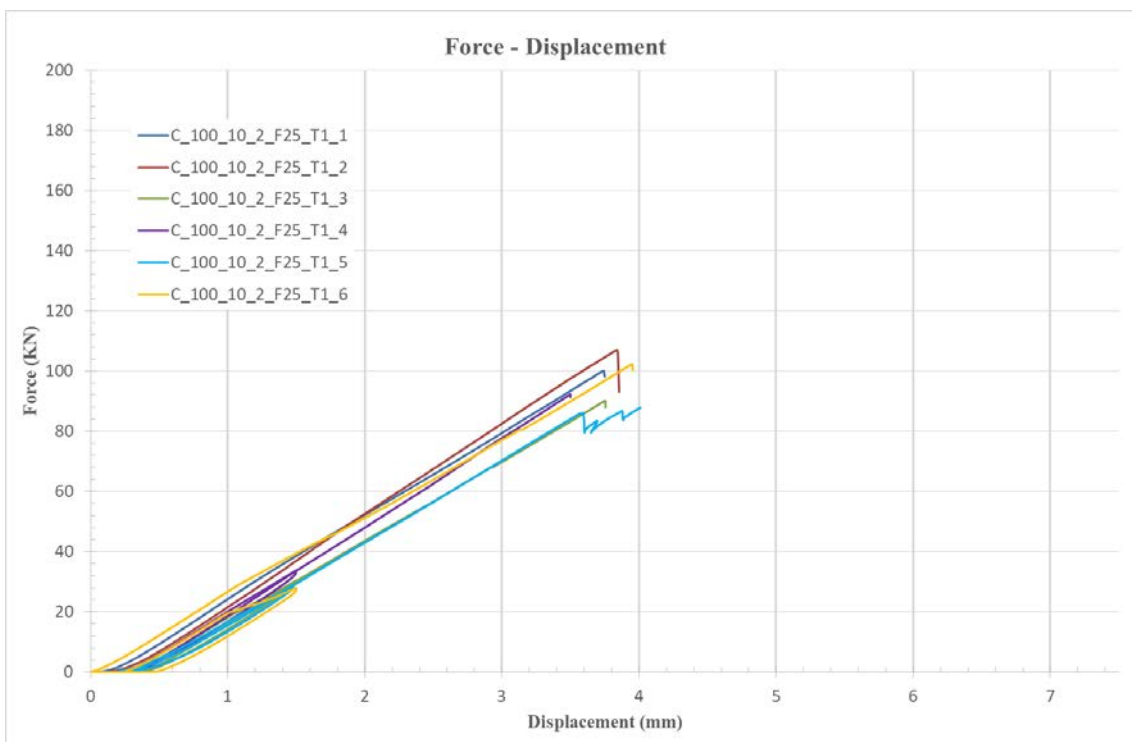
ΣΧΗΜΑ 5.5: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης δοκιμίων B_100_20_5_F8_T1.



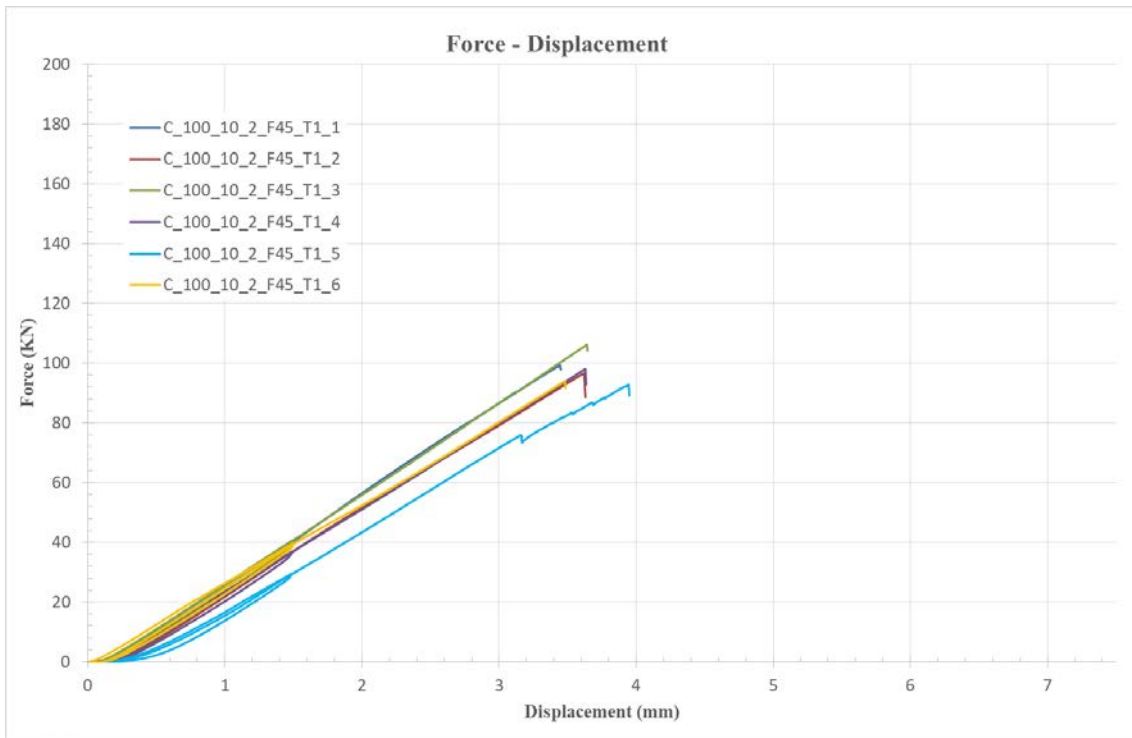
ΣΧΗΜΑ 5.6: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης δοκιμίων P_100_10_2_F8_T1.



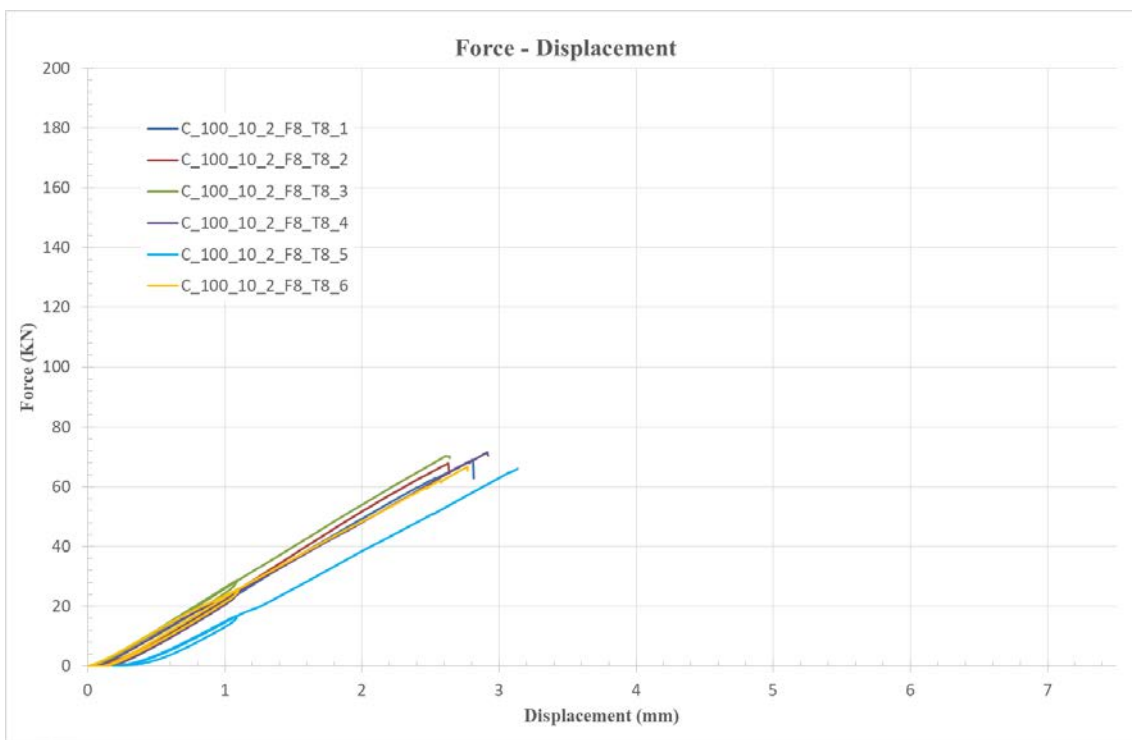
ΣΧΗΜΑ 5.7: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης δοκιμίων C_100_10_2_F8_T1.



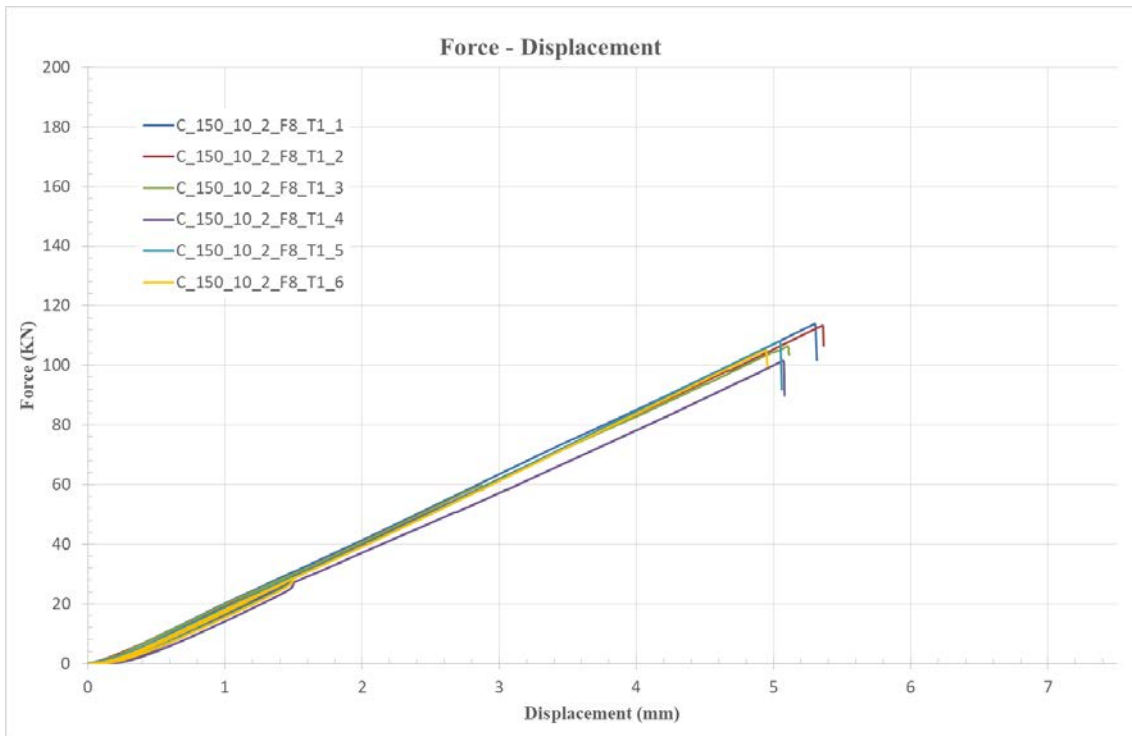
ΣΧΗΜΑ 5.8: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης δοκιμίων C_100_10_2_F25_T1.



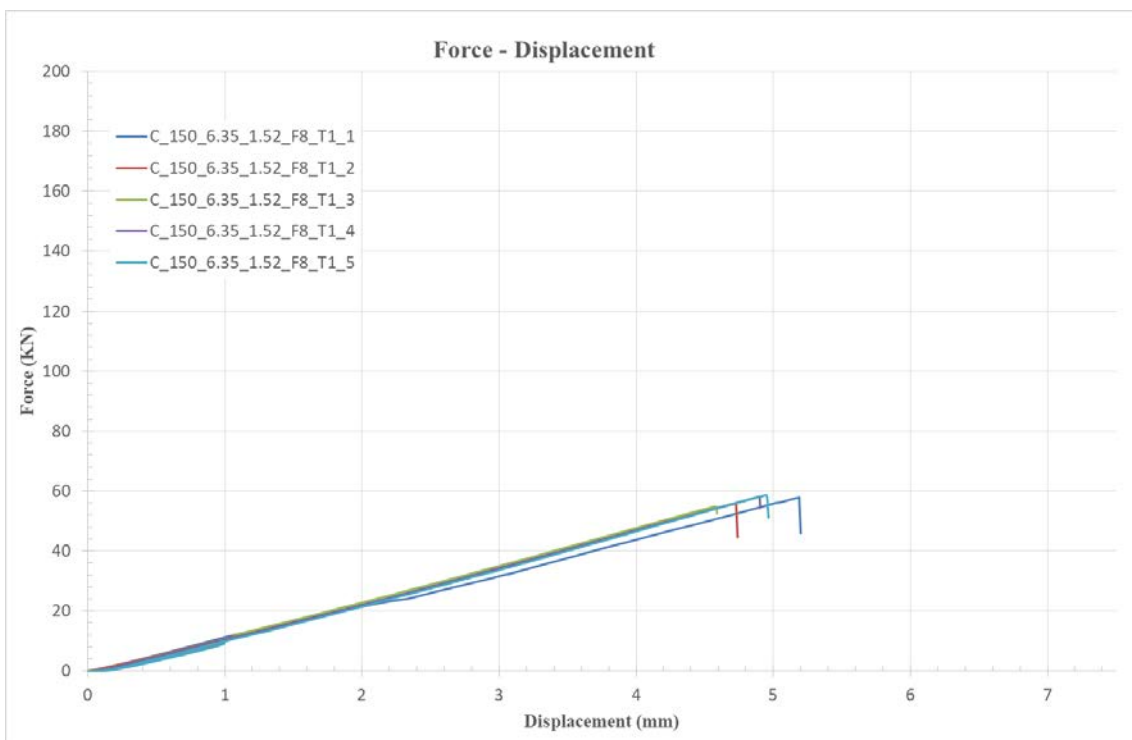
ΣΧΗΜΑ 5.9: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης δοκιμίων C_100_10_2_F45_T1.



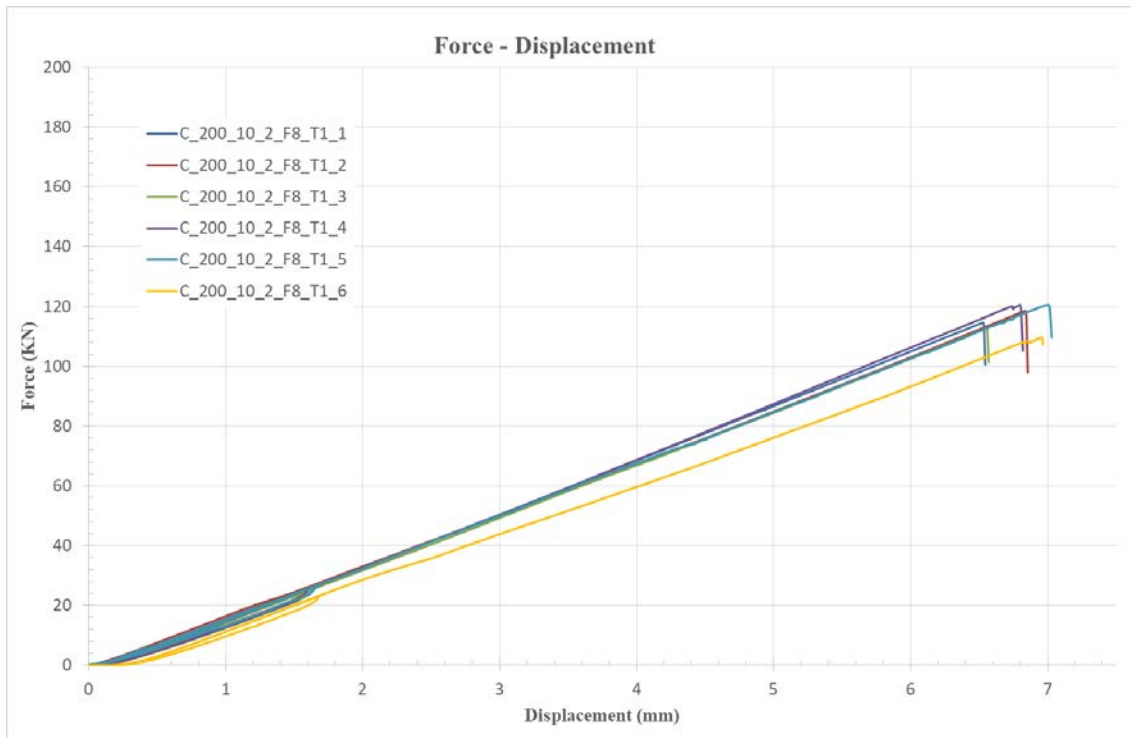
ΣΧΗΜΑ 5.10: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης δοκιμίων C_100_10_2_F8_T8.



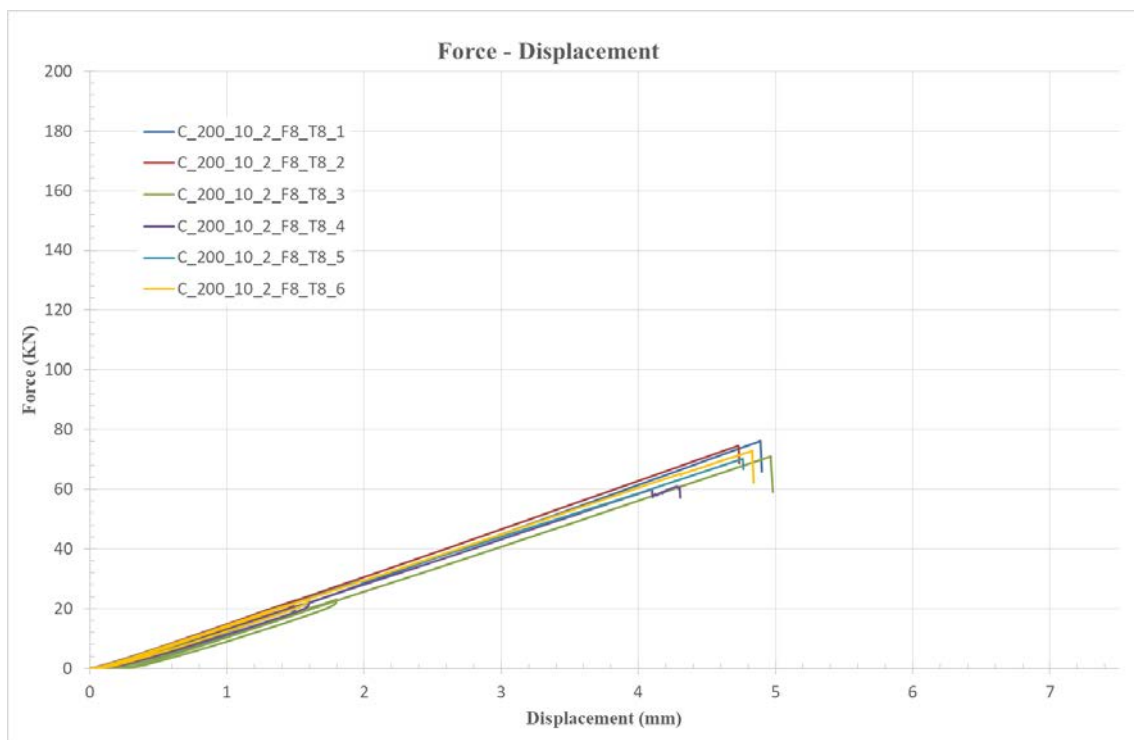
ΣΧΗΜΑ 5.11: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης δοκιμίων C_150_10_2_F8_T1.



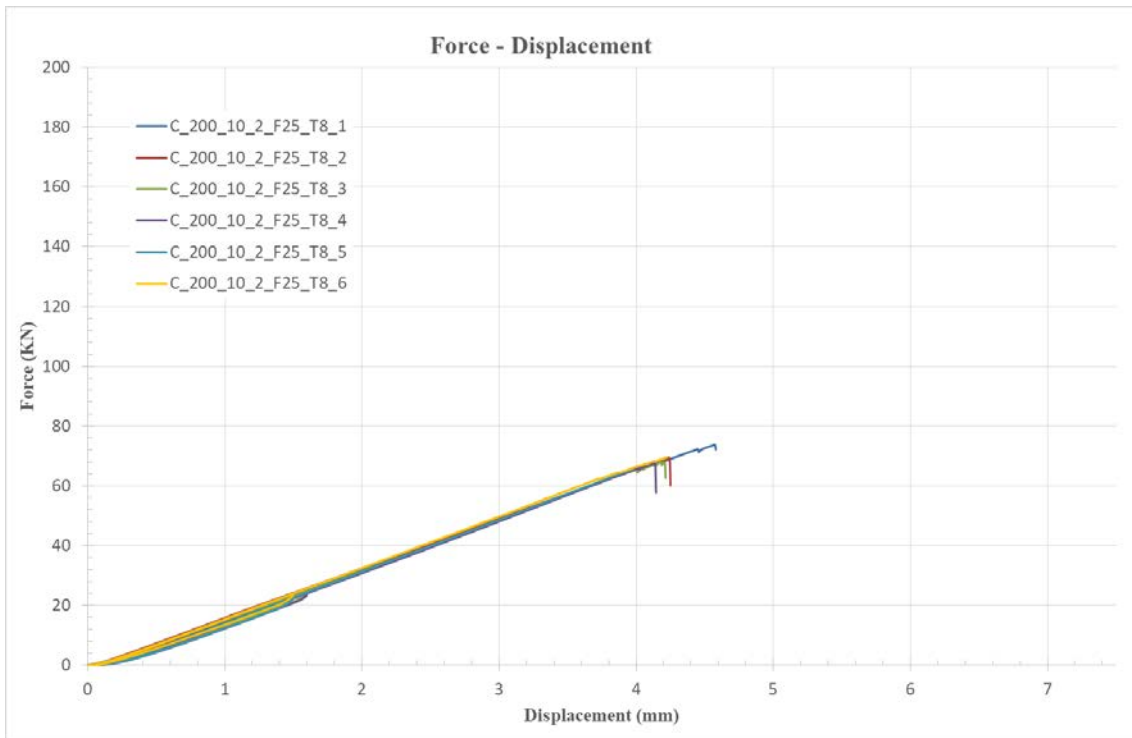
ΣΧΗΜΑ 5.12: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης δοκιμίων C_150_6.35_1.52_F8_T1.



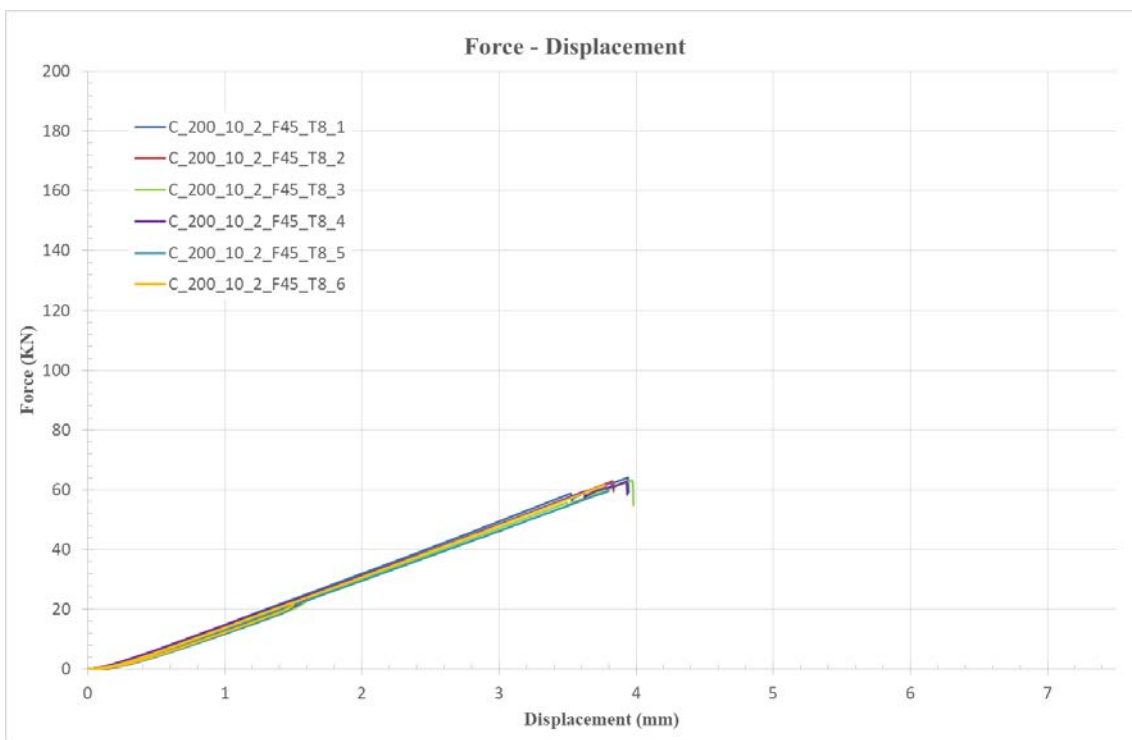
ΣΧΗΜΑ 5.13: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης δοκιμίων C_200_10_2_F8_T1.



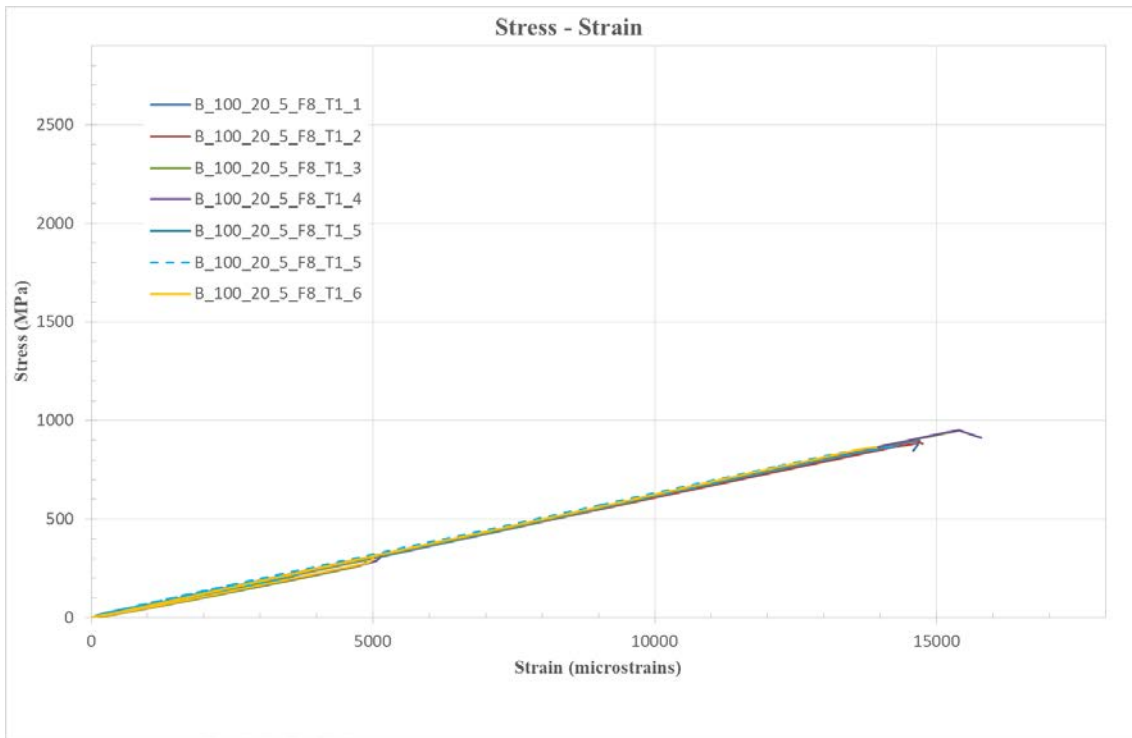
ΣΧΗΜΑ 5.14: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης δοκιμίων C_200_10_2_F8_T8.



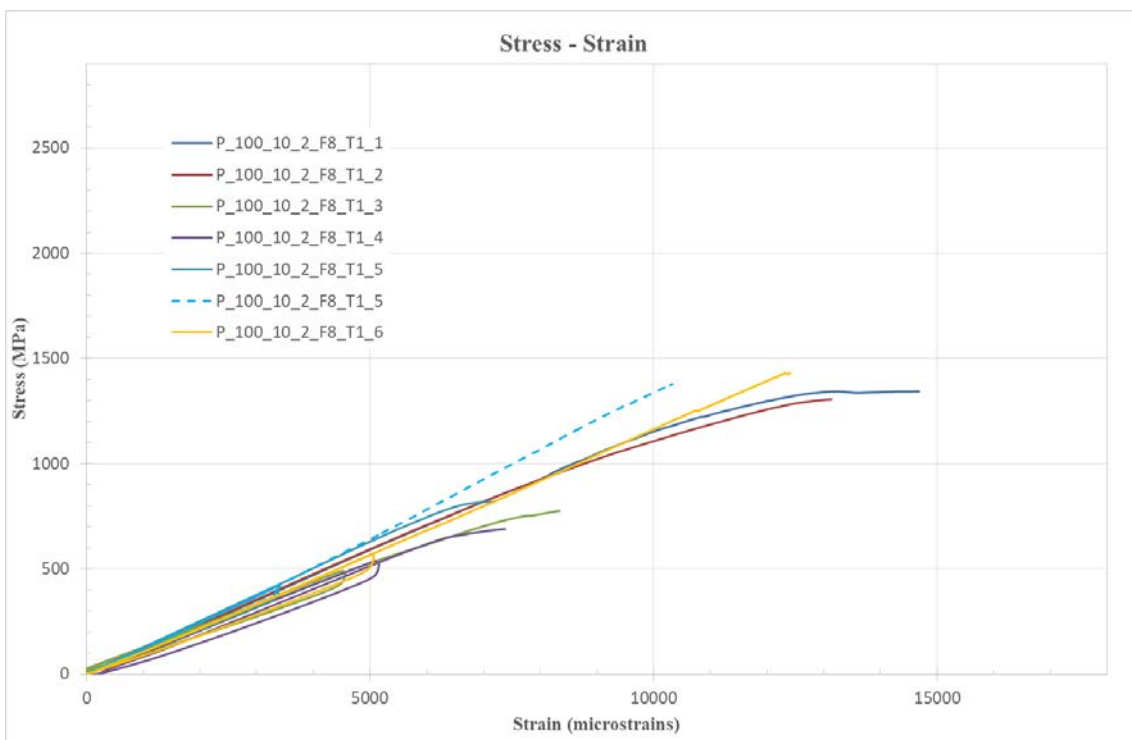
ΣΧΗΜΑ 5.15: Καμπύλες φορτίου- μετατόπισης δοκιμών C_200_10_2_F25_T8.



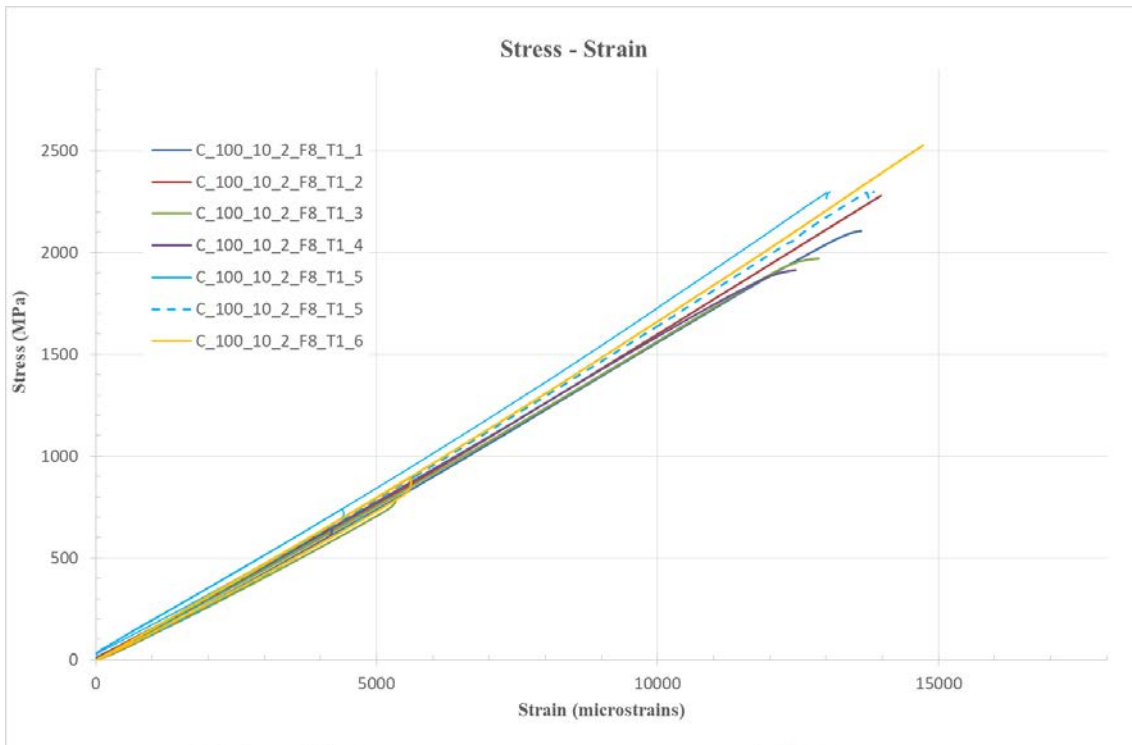
ΣΧΗΜΑ 5.16: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης δοκιμών C_200_10_2_F45_T8.



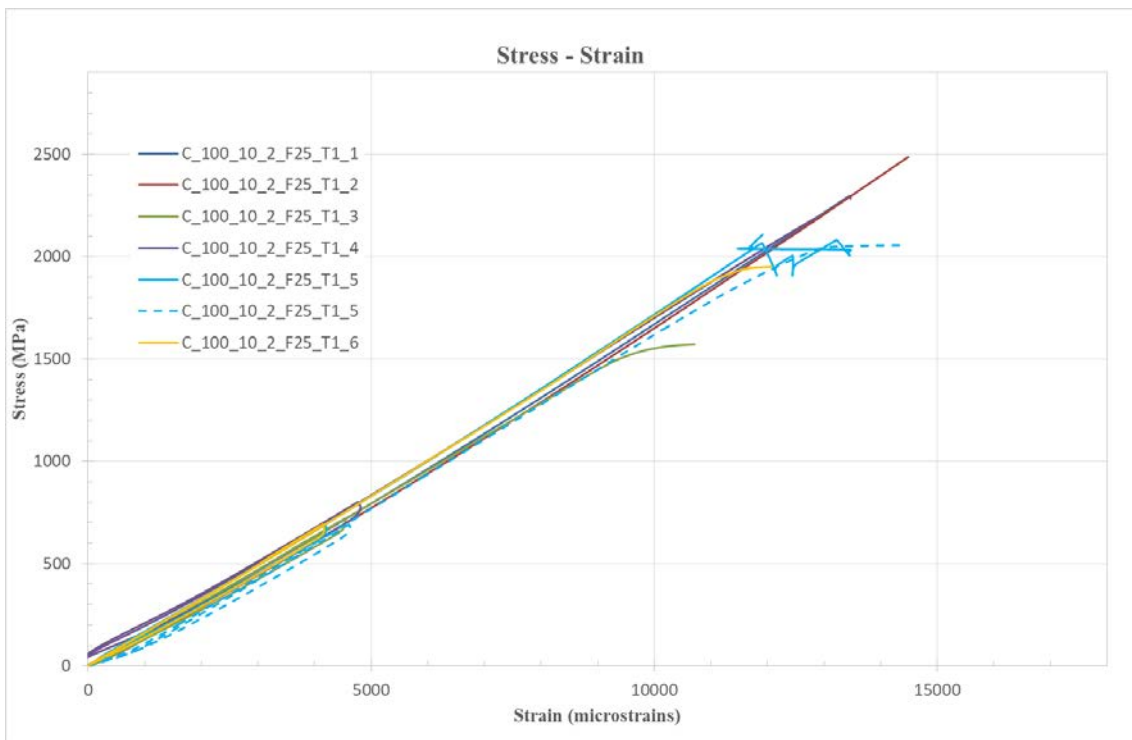
ΣΧΗΜΑ 5.17: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίων B_100_20_5_F8_T1.



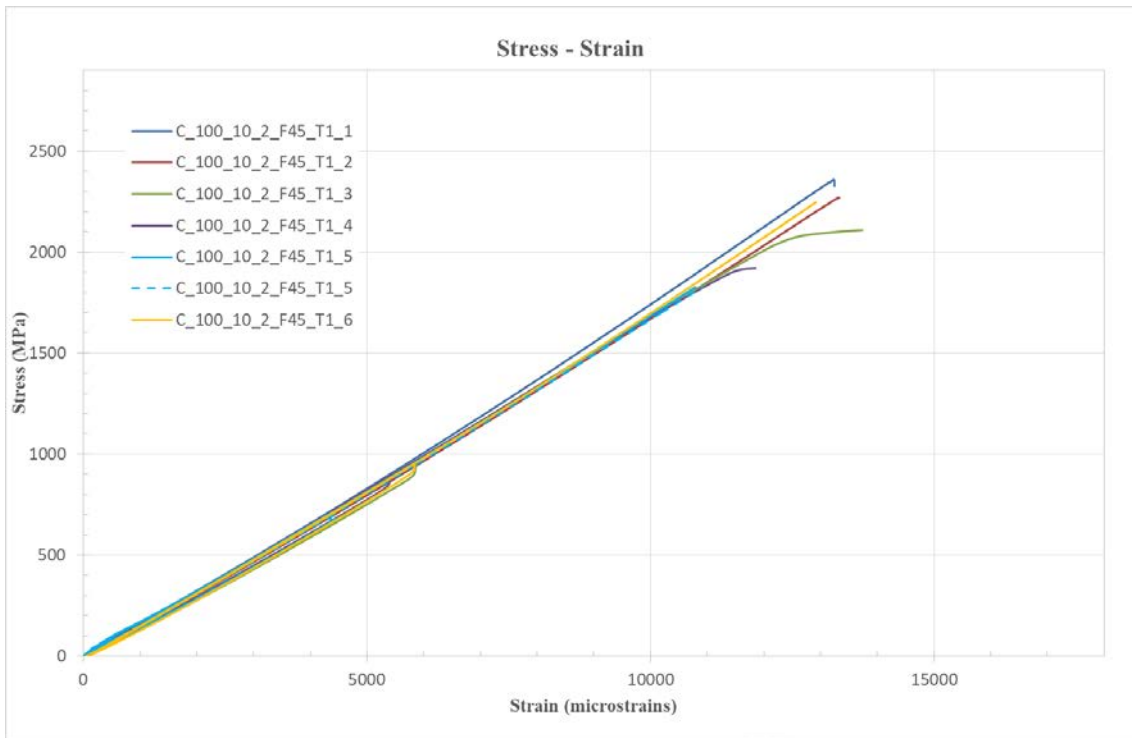
ΣΧΗΜΑ 5.18: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίων P_100_10_2_F8_T1.



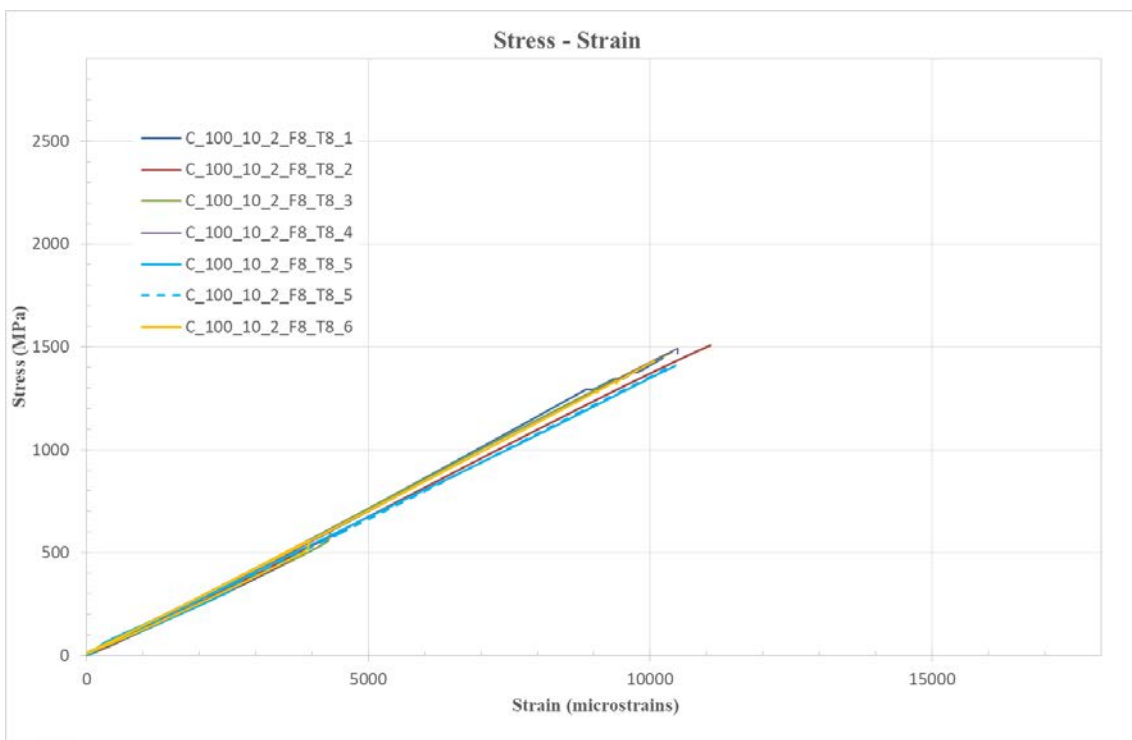
ΣΧΗΜΑ 5.19: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίων C_100_10_2_F8_T1.



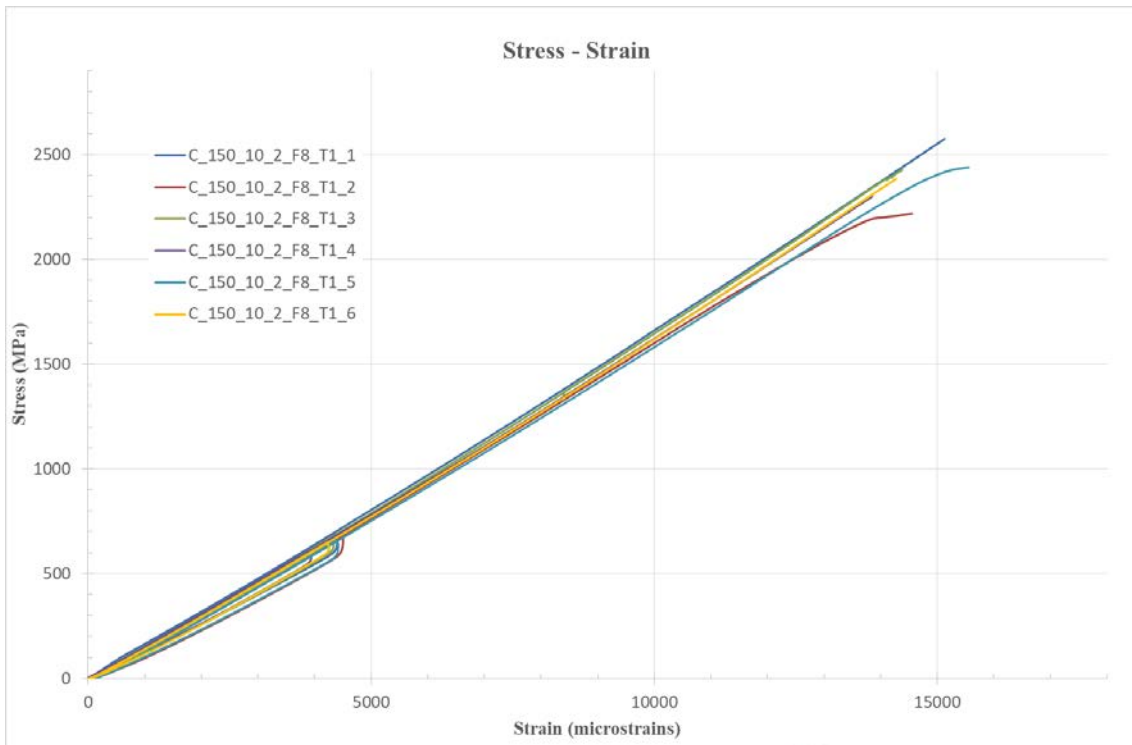
ΣΧΗΜΑ 5.20: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίων C_100_10_2_F25_T1.



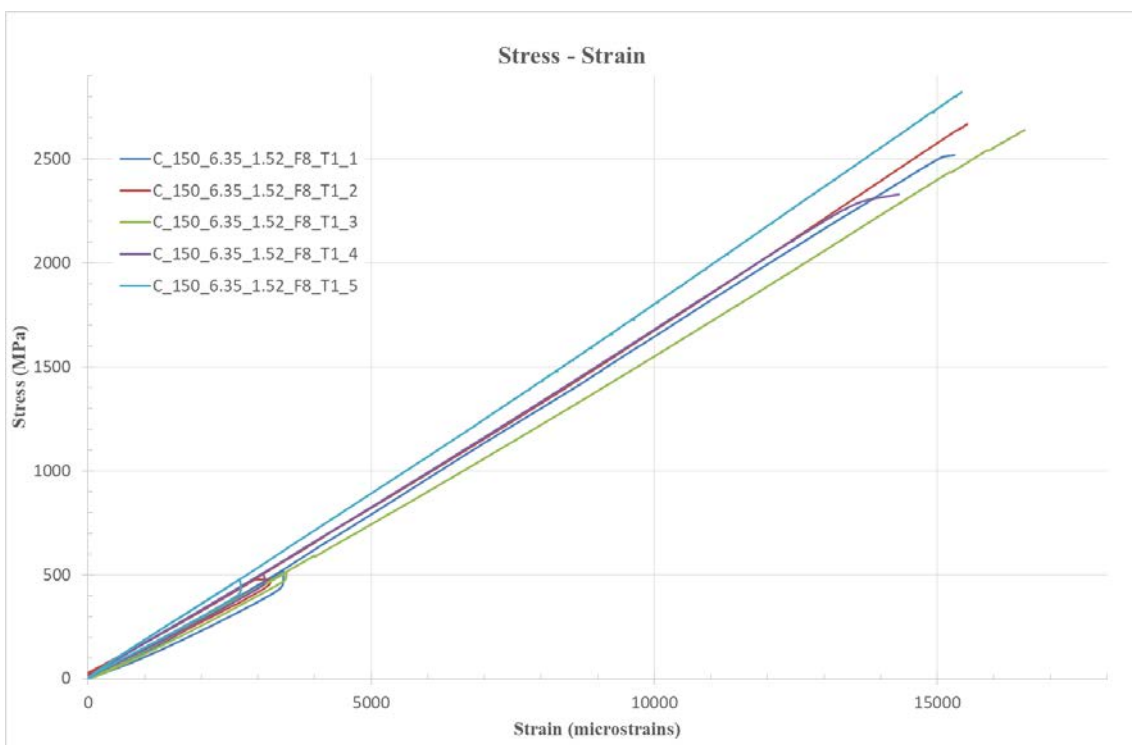
ΣΧΗΜΑ 5.21: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης δοκιμών C_100_10_2_F45_T1.



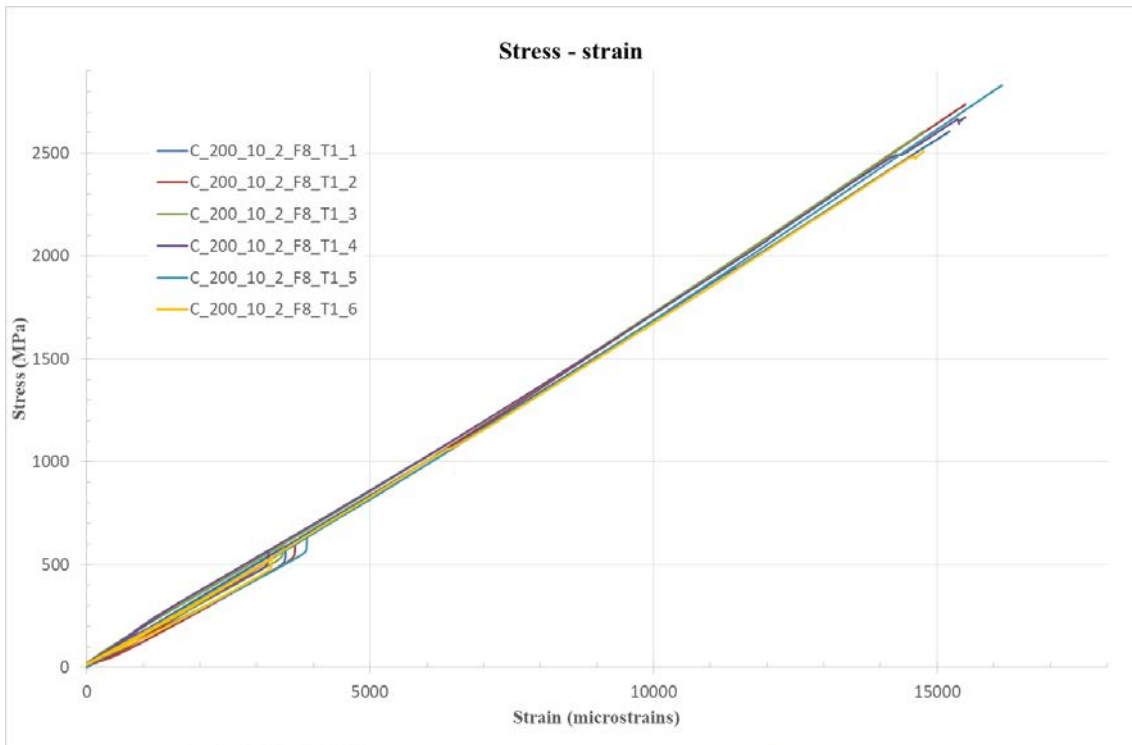
ΣΧΗΜΑ 5.22: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης δοκιμών C_100_10_2_F8_T8.



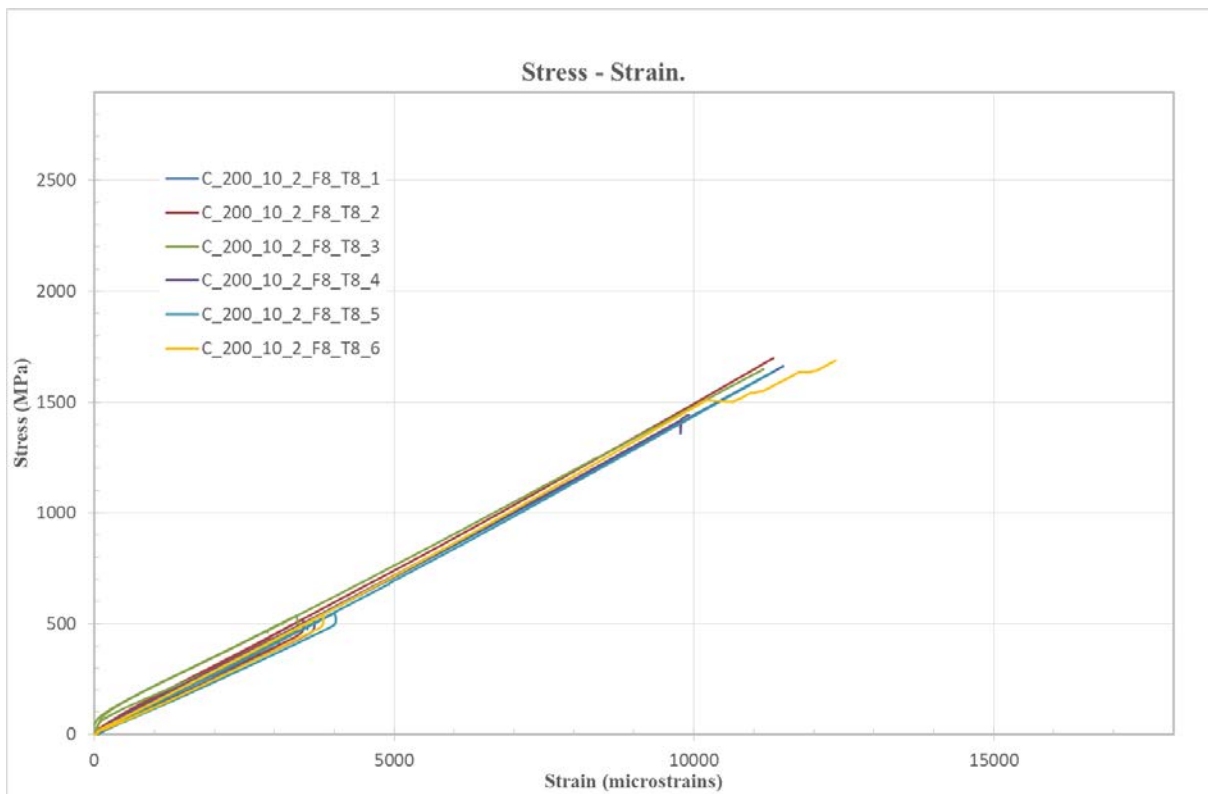
ΣΧΗΜΑ 5.23: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίων C_150_10_2_F8_T1.



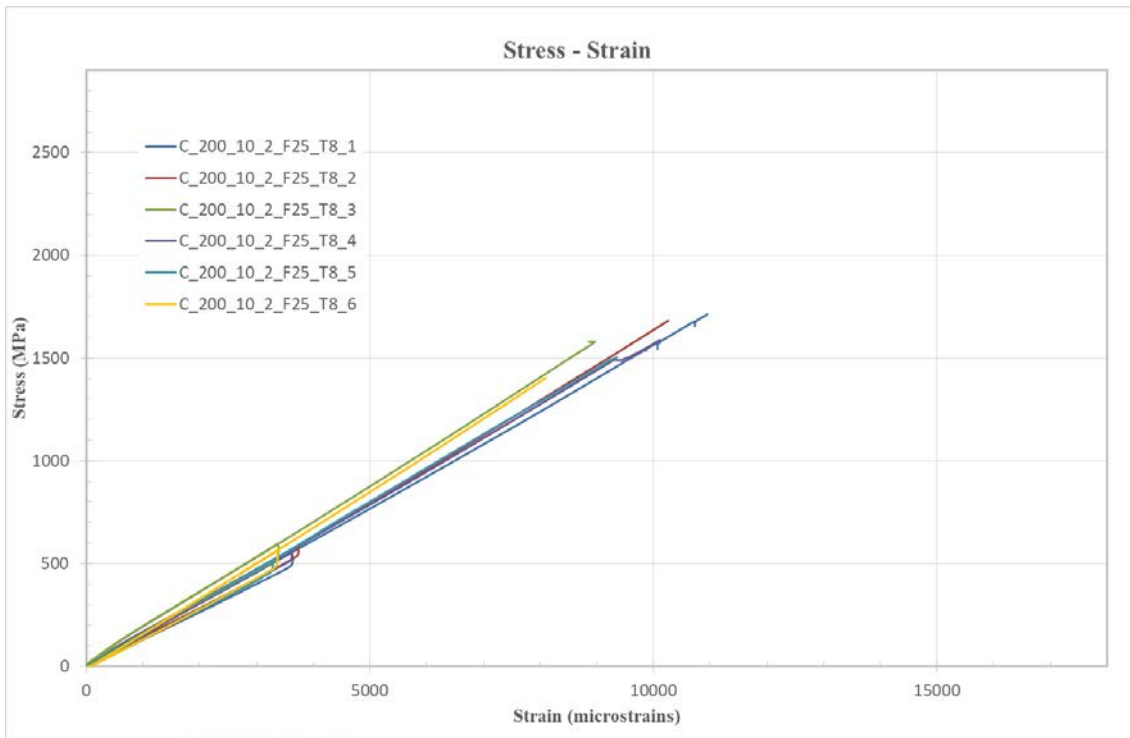
ΣΧΗΜΑ 5.24: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίων C_150_6.35_1.52_F8_T1.



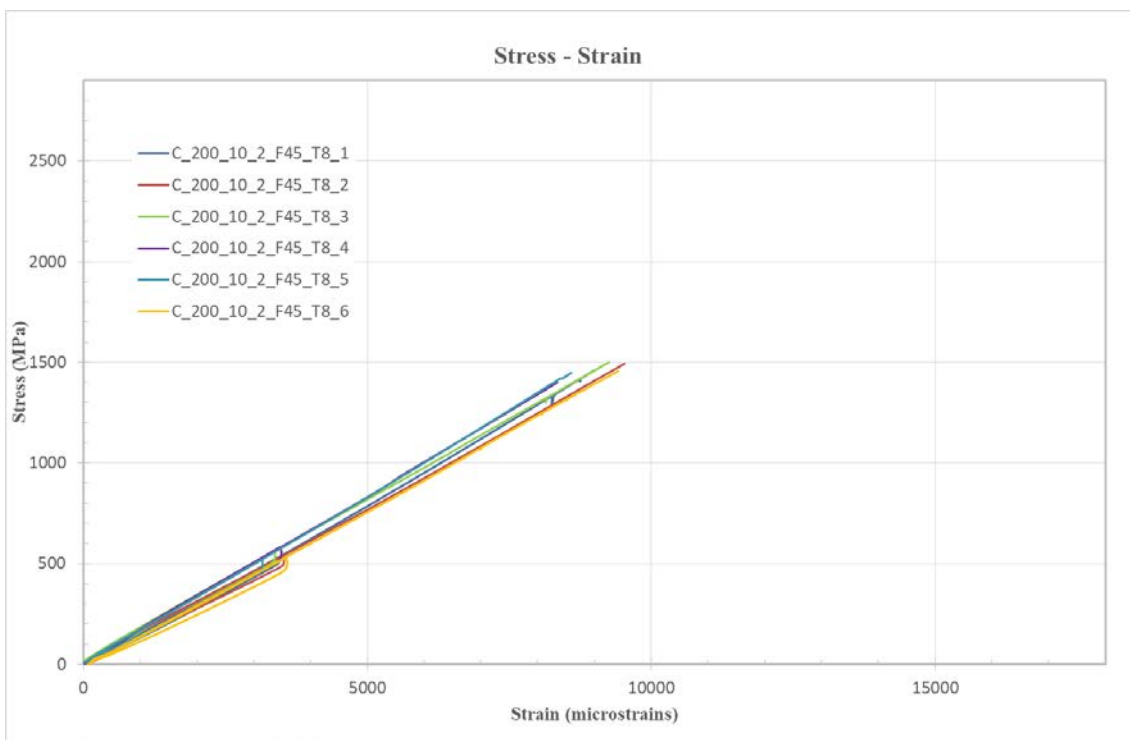
ΣΧΗΜΑ 5.25: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίων C_200_10_2_F8_T1.



ΣΧΗΜΑ 5.26: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίων C_200_10_2_F8_T8.



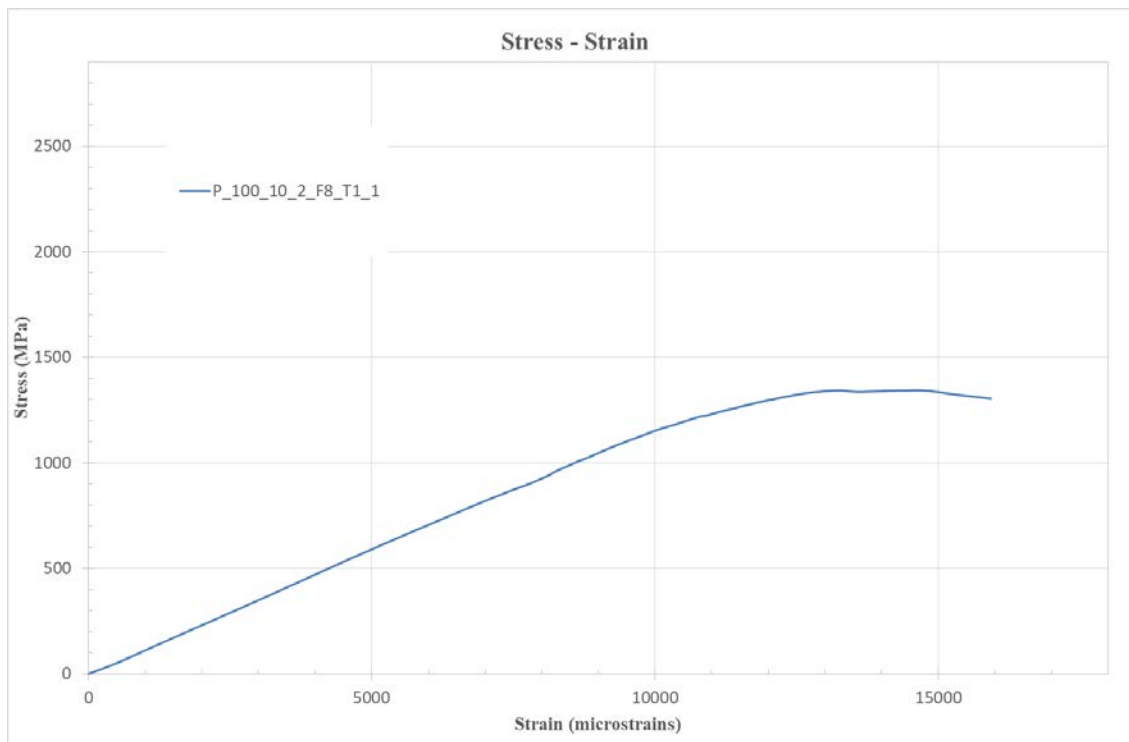
ΣΧΗΜΑ 5.27: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίων C_200_10_2_F25_T8.



ΣΧΗΜΑ 5.28: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίων C_200_10_2_F45_T8.

Κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών των δακτυλίων με εσωτερική διάμετρο 100mm και αύξοντα αριθμό από 1 μέχρι και 4 από όλες τις σειρές δειγμάτων, παρατηρήθηκε απότομη αύξηση της παραμόρφωσης χωρίς να υπάρχει ανάλογη αύξηση του φορτίου στο στάδιο λίγο πριν την αστοχία των δοκιμών σε κάποια από αυτά. Στο ΣΧΗΜΑ 5.29 παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη περιγραφής του φαινομένου αυτού. Σημειώνεται ότι στην παρούσα διπλωματική εργασία οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης στα δοκίμια όπου παρατηρήθηκε αυτό το φαινόμενο απότομης αύξησης της παραμόρφωσης δεν παρουσιάζονται σε όλη τους τη χρονική ιστορία, αφού οι αναγραφόμενες τιμές παραμόρφωσης δεν αντιστοιχούν στις πραγματικές. Πιο συγκεκριμένα το φαινόμενο αυτό εμφανίστηκε εντονότερα στη σειρά δοκιμών, C_100_10_2_F8_T1 στους δακτυλίους με αύξοντα αριθμό 1,3 και 4, στη σειρά C_100_10_2_F25_T1 στα δοκίμια με αύξοντα αριθμό 3, στη σειρά C_100_10_2_F45_T1 στα δοκίμια 3,4 και σε όλα τα δοκίμια με αύξοντα αριθμό από 1 μέχρι και 4 της σειράς P_100_10_2_F8_T1. Προκειμένου να διερευνηθεί το συγκεκριμένο φαινόμενο ελέγχθηκε η επίδραση του συνδετικού υλικού των επιμηκυνσιόμετρων στις μετρούμενες παραμορφώσεις που καταγράφονται. Πιο συγκεκριμένα σε όλα τα δοκίμια με αύξοντα αριθμό 5 και εσωτερική διάμετρο 100mm παράλληλα με τα strain gages τα οποία είχαν εφαρμοστεί με χρήση κόλας KYOWA CC-35 στις 45° τοποθετήθηκαν επιπλέον επιμηκυνσιόμετρα στις -45° με χρήση διαφορετικού συνδετικού υλικού (BISON SUPER GLUE). Τελικά εξήχθη το συμπέρασμα πως η επίδραση του συνδετικού υλικού είναι αμελητέα. Το συγκεκριμένο φαινόμενο των δειγμάτων πιθανότατα να οφείλεται σε κατασκευαστικές ατέλειες των δοκιμών.

Σημειώνεται επιπλέον πως στα δοκίμια με αύξοντα αριθμό 1 και 2 και εσωτερική διάμετρο 100mm δεν ακολουθήθηκε η διαδικασία δημιουργίας βρόγχου υστέρησης για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας όπως ορίζεται από τους Yoon et al. και έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Αντιθέτως πραγματοποιήθηκε φόρτιση μέχρι τη θραύση των δοκιμών. Ακόμη για το δοκίμιο C_150_6.35_1.52_F8_T1_6 λόγω τεχνικού προβλήματος δεν έγινε καταγραφή δεδομένων.



ΣΧΗΜΑ 5.29: Τυπική καμπύλη φαινομένου απότομης αύξησης της παραμόρφωσης χωρίς ανάλογη αύξηση της τάσης.

Εκ των αποτελεσμάτων των πειραματικών δοκιμών μπορούμε να εξαγάγουμε κάποια συμπεράσματα σχετικά με τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας στην περιφερειακή διεύθυνση. Η σημασία της τροποποιημένης μεθόδου υπολογισμού των Young et al. που υιοθετείται στην παρούσα μελέτη απεικονίζεται από τα αποτελέσματα του ΠΙΝΑΚΑ 5.3. Στον πίνακα αυτό, η πρώτη στήλη παρουσιάζει το είδος των δοκιμών ενώ οι επόμενες δύο στήλες δείχνουν τις μέσες τιμές του μέσου όρου του Young's Modulus που λαμβάνεται από τις καμπύλες φόρτισης-αποφόρτισης (E) και τον αντίστοιχο συντελεστή που λαμβάνεται μόνο από την καμπύλη φόρτισης (E_1). Στην τελευταία στήλη, εμφανίζεται το ποσοστό διαφοράς μεταξύ αυτών των δύο τιμών. Παρατηρείται ότι η απόκλιση μεταξύ των δύο μεγεθών κυμαίνεται μεταξύ περίπου 2-8%. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει τη σημασία της εξάλειψης της επίδρασης της τριβής, προκειμένου να αποφευχθεί η υπερεκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας. Γι αυτό το λόγο στα δοκίμια με εσωτερική διάμετρο 100mm και αύξοντα αριθμό 1, 2 το μέτρο ελαστικότητας πολλαπλασιάστηκε με τη ποσοστιαία μεταβολή της συγκεκριμένης σειράς προκειμένου να προκύψουν περισσότερα αξιόπιστα αποτελέσματα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3: Σύγκριση μέτρου ελαστικότητας που προκύπτει ως μέσος όρος από τις καμπύλες φόρτισης-αποφόρτισης και εκείνου που προκύπτει από τη καμπύλη φόρτισης.

SPECIMEN	E_1	E	Percentage of change
	GPa	GPa	
B_100_20_5_F8_T1	62.165	59.259	4.7
P_100_10_2_F8_T1	114.309	105.787	7.5
C_100_10_2_F8_T1	153.223	148.625	3.0
C_100_10_2_F25_T1	158.162	153.029	3.2
C_100_10_2_F45_T1	162.235	157.333	3.0
C_100_10_2_F8_T8	136.920	131.921	3.7
C_150_10_2_F8_T1	156.033	147.808	5.3
C_150_6.35_1.52_F8_T1	159.420	150.830	5.4
C_200_10_2_F8_T1	163.467	155.092	5.1
C_200_10_2_F8_T8	137.167	131.125	4.4
C_200_10_2_F25_T8	158.683	151.042	4.8
C_200_10_2_F45_T8	157.383	150.717	4.2

Στη συνέχεια παρατίθενται οι ΠΙΝΑΚΕΣ 5.4-5.15 με τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων. Σε αυτούς παρουσιάζονται η αντοχή θραύσης των δοκιμίων (σ_u) που υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης (4.1) και το μέτρο ελαστικότητας (E) μέσω της εξίσωσης (4.2) όπως έχει αναλυθεί στο ΕΔΑΦΙΟ 4.1. Επιπλέον παρουσιάζονται το φορτίο θραύσης των δοκιμίων (F_u) και η μετατόπιση της κεφαλής της υδραυλικής μηχανής μέχρι την αστοχία ($Disp_u$). Τέλος για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των δοκιμών υπολογίζονται η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής διακύμανσης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4: Αποτελέσματα δοκιμών για τη σειρά δειγμάτων B_100_20_5_F8_T1.

SPECIMEN	F_u	$Disp_u$	σ_u	E
	kN	mm	MPa	GPa
B_100_20_5_F8_T1_1	186.96	4.930	898	58.149
B_100_20_5_F8_T1_2	183.12	5.205	887	59.345
B_100_20_5_F8_T1_3	196.52	5.445	946	58.842
B_100_20_5_F8_T1_4	196.01	5.180	950	59.990
B_100_20_5_F8_T1_5	178.40	5.460	869	59.375
B_100_20_5_F8_T1_6	175.91	4.815	837	59.850
Average Value	186.15	5.173	898	59.259
St. Deviation	8.7122	0.2625	44.2388	0.6798
Coef. of Variance	4.7%	5.1%	4.9%	1.1%

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5: Αποτελέσματα δοκιμών για τη σειρά δειγμάτων P_100_10_2_F8_T1.

SPECIMEN	F_u	$Disp_u$	σ_u	E
	kN	mm	MPa	GPa
P_100_10_2_F8_T1_1	67.53	2.925	1343	108.316
P_100_10_2_F8_T1_2	74.41	3.440	1477	108.869
P_100_10_2_F8_T1_3	68.90	3.865	1398	95.3475
P_100_10_2_F8_T1_4	70.37	3.440	1361	100.613
P_100_10_2_F8_T1_5	69.91	3.750	1377	117.125
P_100_10_2_F8_T1_6	75.10	3.450	1431	104.450
Average Value	71.04	3.478	1398	105.787
St. Deviation	3.0485	0.3266	49.3763	7.5098
Coef. Of Variance	4.3%	9.4%	3.5%	7.1%

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.6: Αποτελέσματα δοκιμών για τη σειρά δειγμάτων C_100_10_2_F8_T1.

SPECIMEN	F_u	$Disp_u$	σ_u	E
	kN	mm	MPa	GPa
C_100_10_2_F8_T1_1	103.42	3.870	2317	147.663
C_100_10_2_F8_T1_2	101.41	3.815	2280	145.142
C_100_10_2_F8_T1_3	109.13	4.435	2427	145.085
C_100_10_2_F8_T1_4	109.53	4.500	2501	150.387
C_100_10_2_F8_T1_5	98.62	3.925	2299	153.125
C_100_10_2_F8_T1_6	110.43	3.945	2527	150.350
Average Value	105.42	4.082	2392	148.625
St. Deviation	4.9412	0.3030	107.8537	3.2225
Coef. Of Variance	4.7%	7.4%	4.5%	2.2%

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.7: Αποτελέσματα δοκιμών για τη σειρά δειγμάτων C_100_10_2_F25_T1.

SPECIMEN	F_u	$Disp_u$	σ_u	E
	kN	mm	MPa	GPa
C_100_10_2_F25_T1_1	100.06	3.740	2297	151.310
C_100_10_2_F25_T1_2	107.10	3.840	2487	151.263
C_100_10_2_F25_T1_3	90.17	3.750	2142	152.407
C_100_10_2_F25_T1_4	92.29	3.500	2191	147.894
C_100_10_2_F25_T1_5	87.89	4.010	2108	156.050
C_100_10_2_F25_T1_6	102.36	3.950	2531	159.250
Average Value	96.65	3.798	2293	153.029
St. Deviation	7.6311	0.1813	179.8913	4.0164
Coef. Of Variance	7.9%	4.8%	7.8%	2.6%

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.8: Αποτελέσματα δοκιμών για τη σειρά δειγμάτων C_100_10_2_F45_T1.

SPECIMEN	F_u	$Disp_u$	σ_u	E
	kN	mm	MPa	GPa
C_100_10_2_F45_T1_1	99.26	3.445	2359	161.296
C_100_10_2_F45_T1_2	96.52	3.615	2269	154.133
C_100_10_2_F45_T1_3	106.22	3.640	2514	156.702
C_100_10_2_F45_T1_4	98.04	3.630	2375	157.992
C_100_10_2_F45_T1_5	92.69	3.945	2230	154.675
C_100_10_2_F45_T1_6	93.89	3.480	2248	159.200
Average Value	97.77	3.625833	2332	157.333
St. Deviation	4.8191	0.1767	106.9142	2.7323
Coef. Of Variance	4.9%	4.9%	4.6%	1.7%

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.9: Αποτελέσματα δοκιμών για τη σειρά δειγμάτων C_100_10_2_F8_T8.

SPECIMEN	F_u	$Disp_u$	σ_u	E
	kN	mm	MPa	GPa
C_100_10_2_F8_T8_1	69.04	2.805	1491	134.044
C_100_10_2_F8_T8_2	67.88	2.630	1508	130.087
C_100_10_2_F8_T8_3	74.09	2.835	1574	133.147
C_100_10_2_F8_T8_4	71.44	2.915	1493	133.097
C_100_10_2_F8_T8_5	66.08	3.135	1409	126.850
C_100_10_2_F8_T8_6	66.68	2.770	1433	134.300
Average Value	69.20	2.848	1485	131.921
St. Deviation	3.0588	0.1688	58.4479	2.9028
Coef. Of Variance	4.4%	5.9%	3.9%	2.2%

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.10: Αποτελέσματα δοκιμών για τη σειρά δειγμάτων C_150_10_2_F8_T1.

SPECIMEN	F_u	$Disp_u$	σ_u	E
	kN	mm	MPa	GPa
C_150_10_2_F8_T1_1	113.98	5.300	2575	145.450
C_150_10_2_F8_T1_2	113.38	5.355	2585	146.650
C_150_10_2_F8_T1_3	106.36	5.100	2427	148.200
C_150_10_2_F8_T1_4	101.62	5.070	2300	149.900
C_150_10_2_F8_T1_5	108.12	5.045	2449	145.500
C_150_10_2_F8_T1_6	105.09	4.945	2384	151.150
Average Value	108.09	5.136	2453	147.808
St. Deviation	4.8276	0.1583	110.5616	2.3633
Coef. Of Variance	4.5%	3.1%	4.5%	1.6%

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.11: Αποτελέσματα δοκιμών για τη σειρά δειγμάτων C_150_6.35_1.52_F8_T1.

SPECIMEN	F_u	$Disp_u$	σ_u	E
	kN	mm	MPa	GPa
C_150_6,35_1,52_F8_T1_1	57.93	5.190	2673	145.600
C_150_6,35_1,52_F8_T1_2	55.88	4.730	2669	148.150
C_150_6,35_1,52_F8_T1_3	54.82	4.570	2640	144.750
C_150_6,35_1,52_F8_T1_4	58.13	4.895	2805	152.800
C_150_6,35_1,52_F8_T1_5	54.82	4.950	2823	162.850
Average Value	56.32	4.867	2722	150.830
St. Deviation	1.6249	0.2340	85.1751	7.4139
Coef. Of Variance	2.9%	4.8%	3.1%	4.9%

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.12: Αποτελέσματα δοκιμών για τη σειρά δειγμάτων C_200_10_2_F8_T1.

SPECIMEN	F_u	$Disp_u$	σ_u	E
	kN	mm	MPa	GPa
C_200_10_2_F8_T1_1	114.68	6.530	2606	154.300
C_200_10_2_F8_T1_2	118.56	6.840	2739	160.100
C_200_10_2_F8_T1_3	112.82	6.560	2611	155.750
C_200_10_2_F8_T1_4	120.51	6.800	2675	154.750
C_200_10_2_F8_T1_5	120.54	7.005	2829	150.500
C_200_10_2_F8_T1_6	109.57	6.955	2510	155.150
Average Value	116.11	6.782	2662	155.092
St. Deviation	4.4862	0.1981	112.2607	3.0772
Coef. Of Variance	3.9%	2.9%	4.2%	2.0%

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.13: Αποτελέσματα δοκιμών για τη σειρά δειγμάτων C_200_10_2_F8_T8.

SPECIMEN	F_u	$Disp_u$	σ_u	E
	kN	mm	MPa	GPa
C_200_10_2_F8_T8_1	76.16	4.890	1662	134.600
C_200_10_2_F8_T8_2	74.56	4.725	1699	132.150
C_200_10_2_F8_T8_3	70.95	4.965	1650	125.500
C_200_10_2_F8_T8_4	60.93	4.280	1442	130.550
C_200_10_2_F8_T8_5	70.17	4.760	1635	129.700
C_200_10_2_F8_T8_6	72.83	4.830	1688	134.250
Average Value	70.93	4.742	1629	131.125
St. Deviation	5.3799	0.2423	94.6075	3.3732
Coef. Of Variance	7.6%	5.1%	5.8%	2.6%

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.14: Αποτελέσματα δοκιμών για τη σειρά δειγμάτων C_200_10_2_F25_T8.

SPECIMEN	F_u	$Disp_u$	σ_u	E
	kN	mm	MPa	GPa
C_200_10_2_F25_T8_1	73.73	4.570	1713	142.500
C_200_10_2_F25_T8_2	69.43	4.240	1682	152.400
C_200_10_2_F25_T8_3	67.91	4.205	1630	158.950
C_200_10_2_F25_T8_4	67.6	4.135	1589	146.200
C_200_10_2_F25_T8_5	65.53	3.975	1505	146.350
C_200_10_2_F25_T8_6	69.64	4.230	1637	159.850
Average Value	68.97	4.226	1626	151.042
St. Deviation	2.7623	0.1951	73.3508	7.2165
Coef. Of Variance	4.0%	4.6%	4.5%	4.8%

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.15: Αποτελέσματα δοκιμών για τη σειρά δειγμάτων C_200_10_2_F45_T8.

SPECIMEN	F_u	$Disp_u$	σ_u	E
	kN	mm	MPa	GPa
C_200_10_2_F45_T8_1	64.06	3.940	1457	153.250
C_200_10_2_F45_T8_2	62.85	3.825	1493	140.950
C_200_10_2_F45_T8_3	63.18	3.970	1500	154.700
C_200_10_2_F45_T8_4	62.77	3.930	1480	154.750
C_200_10_2_F45_T8_5	59.62	3.800	1448	156.150
C_200_10_2_F45_T8_6	64.58	4.375	1529	144.500
Average Value	62.84	3.973	1484	150.717
St. Deviation	1.7323	0.2080	29.7932	6.3578
Coef. Of Variance	2.8%	5.2%	2.0%	4.2%

Τα αποτελέσματα εμφανίζουν αρκετά καλή επαναληψιμότητα καθώς ο συντελεστής διακύμανσης είναι στις περισσότερες των περιπτώσεων μικρότερος του 5%. Εξαιρέση αποτελούν τα αποτελέσματα για τα δοκίμια της σειράς C_200_10_2_F8_T8 όπου ο συντελεστής διακύμανσης για την τάση αστοχίας υπολογίστηκε 5.8%. Ομοίως για τη σειρά δειγμάτων C_100_10_2_F25_T1 τα αποτελέσματα αντοχής σε θραύση εμφάνισαν συντελεστή διακύμανσης 7.8% και τέλος τα δοκίμια από προεμποτισμένες ίνες άνθρακα εμφάνισαν συντελεστή διακύμανσης 7.1% για τα αποτελέσματα του μέτρου ελαστικότητας τους. Επιπλέον σημειώνεται ότι στους ΠΙΝΑΚΕΣ 5.4-5.9 για τα δοκίμια με αύξοντα αριθμό 5 από όλες τις σειρές δειγμάτων υπολογίστηκαν δύο μέτρα ελαστικότητας και σαν τελική τιμή παρουσιάζεται ο μέσος όρος αυτών αφού όπως έχει εξηγηθεί ανωτέρω στα δοκίμια αυτά εφαρμόστηκαν δύο επιμηκυνσιόμετρα.

Προκειμένου να γίνει ανάλυση των αποτελεσμάτων σχετικά με την επίδραση των γεωμετρικών και κατασκευαστικών χαρακτηριστικών των δοκιμών στις μηχανικές τους ιδιότητες πραγματοποιήθηκαν κατάλληλες συγκρίσεις μεταξύ των δειγμάτων οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια στους ΠΙΝΑΚΕΣ 5.16-5.5.21

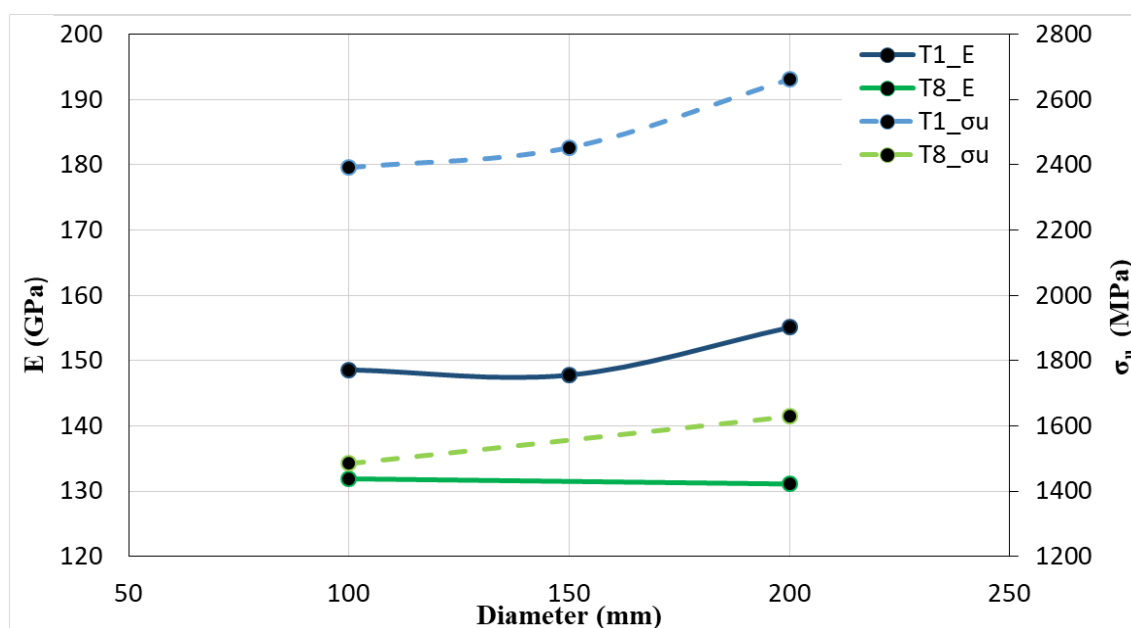
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.16: Επίδραση της διαμέτρου σε δοκίμια με πλάτος και πάχος 10mm και 2mm αντίστοιχα, δύναμη τάνυσης περιέλιξης 8N και 1 δέσμη περιέλιξης.

SPECIMEN	σ_u	CV	E	CV	W_f
	MPa		GPa		
C_100_10_2_F8_T1	2392	4.5%	148.625	2.2%	77.3%
C_150_10_2_F8_T1	2453	4.5%	147.808	1.6%	84.7%
C_200_10_2_F8_T1	2662	4.2%	155.092	2.0%	82.3%

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.17: Επίδραση της διαμέτρου σε δοκίμια με πλάτος και πάχος 10mm και 2mm αντίστοιχα, δύναμη τάνυσης περιέλιξης 8N και 8 δέσμες περιέλιξης.

SPECIMEN	σ_u	CV	E	CV	W_f
	MPa		GPa		
C_100_10_2_F8_T8	1485	3.9%	131.921	2.2%	82.0%
C_200_10_2_F8_T8	1629	5.8%	131.125	2.6%	79.3%

Παρατηρείται ότι η αύξηση της διαμέτρου των δακτυλίων οδηγεί σε μια επακόλουθη αύξηση της αντοχής στις περιπτώσεις της 1 και των 8 δεσμών περιέλιξης. Πιο συγκεκριμένα, μια αύξηση της εσωτερικής διαμέτρου από 100mm σε 200mm προκαλεί την αύξηση της τιμής της αντοχής του δοκιμίου κατά 11% όταν διεξάγεται η διαδικασία περιέλιξης με τη χρήση 1 δέσμης περιέλιξης και κατά 11% όταν χρησιμοποιούνται 8 δέσμες περιέλιξης. Από την άλλη πλευρά, αύξηση της εσωτερικής διαμέτρου σε 200mm στην περίπτωση της 1 δέσμης περιέλιξης οδηγεί σε αύξηση του μέτρου ελαστικότητας κατά 5%. Τα προαναφερθέντα συμπεράσματα παρουσιάζονται σχηματικά στο ΣΧΗΜΑ 5.30.



ΣΧΗΜΑ 5.30: Γραφική απεικόνιση της επίδρασης της εσωτερικής διαμέτρου των δακτυλίων στο μέτρο ελαστικότητας και της φαινομενικής αντοχής των δειγμάτων για 1 και 8 δέσμες περιέλιξης αντίστοιχα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.18: Επίδραση του πλάτους και του πάχους σε δοκίμια με εσωτερική διάμετρο 150mm, δύναμη τάνυσης περιέλιξης 8N και 1 δέσμη περιέλιξης.

SPECIMEN	σ_u	CV	E	CV	W_f
	MPa		GPa		
C_150_10_2_F8_T1	2453	4.5%	147.808	1.6%	84.7%
C_150_6,35_1,52_F8_T1	2722	3.1%	150.83	4.9%	83.7%

Όσον αφορά στην επίδραση της αλλαγής στο πλάτος και το πάχος των δακτυλίων με την ίδια διάμετρο και τις ίδιες κατασκευαστικές παραμέτρους (ΠΙΝΑΚΑΣ 5.18), φαίνεται ότι μειώνοντας αυτές τις διαστάσεις, η αντοχή του δακτυλίου αυξάνεται κατά 11% ενώ η επίδραση επί του μέτρου ελαστικότητας δεν είναι σημαντική.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.19: Επίδραση του πλάτους και του πάχους σε δοκίμια με εσωτερική διάμετρο 100mm δύναμη τάνυσης περιέλιξης 8N και 1 δέσμη περιέλιξης.

SPECIMEN	σ_u	CV	E	CV	W_f
	MPa		GPa		
C_100_10_2_F8_T1	2392	4.5%	149.837	2.2%	77.3%
C_100_25_5_F8_T1	-	-	179.04	3.1%	82.0%

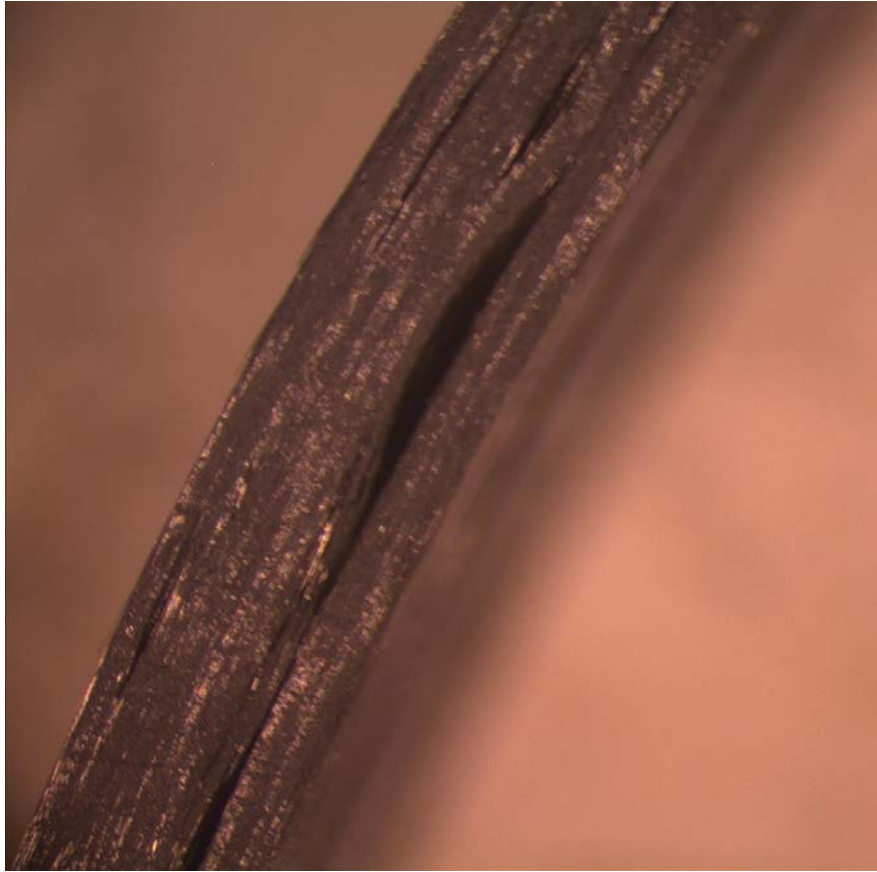
Για λόγους πληρότητας για τον προσδιορισμό της επίδρασης της αλλαγής του πλάτους και του πάχους στις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων παρουσιάζεται σύγκριση με δοκίμια της σειράς C_100_25_5_F8_T1 από προηγούμενη διπλωματική εργασία (Κωνσταντινίδης 2016). Πιο συγκεκριμένα στον ΠΙΝΑΚΑ 5.20 παρατηρείται ότι τα δοκίμια με πλάτος και πάχος 25mm και 5mm αντίστοιχα εμφανίζουν μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας κατά 19% από εκείνα με διαστάσεις 10×2mm. Για την πιο αξιόπιστη σύγκριση των αποτελεσμάτων στη συγκεκριμένη μελέτη το μέτρο ελαστικότητας των δοκιμίων της παρούσας εργασίας υπολογίστηκε ως ο μέσος όρος των μέτρων ελαστικότητας που προκύπτουν από τη καμπύλη φόρτισης των δειγμάτων (ASTM D3039). Για την αντοχή των δοκιμίων δεν εξήχθη κάποιο συμπέρασμα, καθώς οι κύλινδροι με διαστάσεις 25×5 δεν φορτίστηκαν μέχρι τη θραύση τους.

Σε κάθε περίπτωση, ωστόσο, τα αποτελέσματα των ΠΙΝΑΚΩΝ 5.19-5.20 μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο ως ενδείξεις δεδομένου ότι ένα μεγαλύτερο δείγμα συνδυασμών διαστάσεων πρέπει να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.21: Επίδραση του υλικού των ενισχυτικών ινών των δειγμάτων.

SPECIMEN	σ_u	CV	E	CV	W_f
	MPa		GPa		
C_100_10_2_F8_T1	2392	4.5%	148.625	2.2%	77.3%
P_100_10_2_F8_T1	1398	3.5%	105.787	7.1%	86.0%
B_100_20_5_F8_T1	898	4.9%	59.259	1.1%	85.3%
G_100_25_5_F8_T1	631	2.6%	55.070	5.7%	77.5%

Στη συνέχεια, εξετάζεται η επίδραση του υλικού κατασκευής στις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων. Όπως φαίνεται, τα δοκίμια από ίνες άνθρακα έχουν τις μεγαλύτερες τιμές μηχανικών ιδιοτήτων. Συγκρίνοντάς τα με εκείνα που κατασκευάστηκαν με χρήση προεμποτισμένων ινών άνθρακα, παρατηρούμε ότι τα δοκίμια με συμβατικές ίνες άνθρακα εμφανίζουν υψηλότερη τάση θραύσης και υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας κατά 41.6% και 26.6% αντίστοιχα. Αυτή η μεγάλη διαφορά, πιθανόν να οφείλεται εν μέρει στην κακή κατασκευαστική ποιότητα των τελευταίων. Ο ισχυρισμός αυτός αποδεικνύεται μέσω του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 5.31 στο οποίο παρατηρούνται σημαντικές αποκολλήσεις στρώσεων (delamination) σε δακτύλιο κατασκευασμένο με προεμποτισμένες ίνες άνθρακα. Η εν λόγω εικόνα αποτελεί τυπική περίπτωση των συγκεκριμένων δακτυλίων. Όσον αφορά στα υπόλοιπα υλικά, τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν από ίνες βασάλτη εμφανίζουν μεγαλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τα δοκίμια από ίνες γυαλιού (G_100_25_5_F8_T1). Αναλυτικότερα, παρουσιάζουν μεγαλύτερη τάση θραύσης κατά 29.7% και μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας κατά 8.3%. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα για τα δοκίμια από ίνες γυαλιού αντλήθηκαν από προηγούμενη διπλωματική εργασία (Κωνσταντινίδης 2016). Τα αποτελέσματα σε κάθε περίπτωση είναι πλήρως αναμενόμενα σύμφωνα και με τη βιβλιογραφία.



ΣΧΗΜΑ 5.31: Κατασκευαστικές ατέλειες δοκιμίων από προεμποτισμένες ίνες άνθρακα.

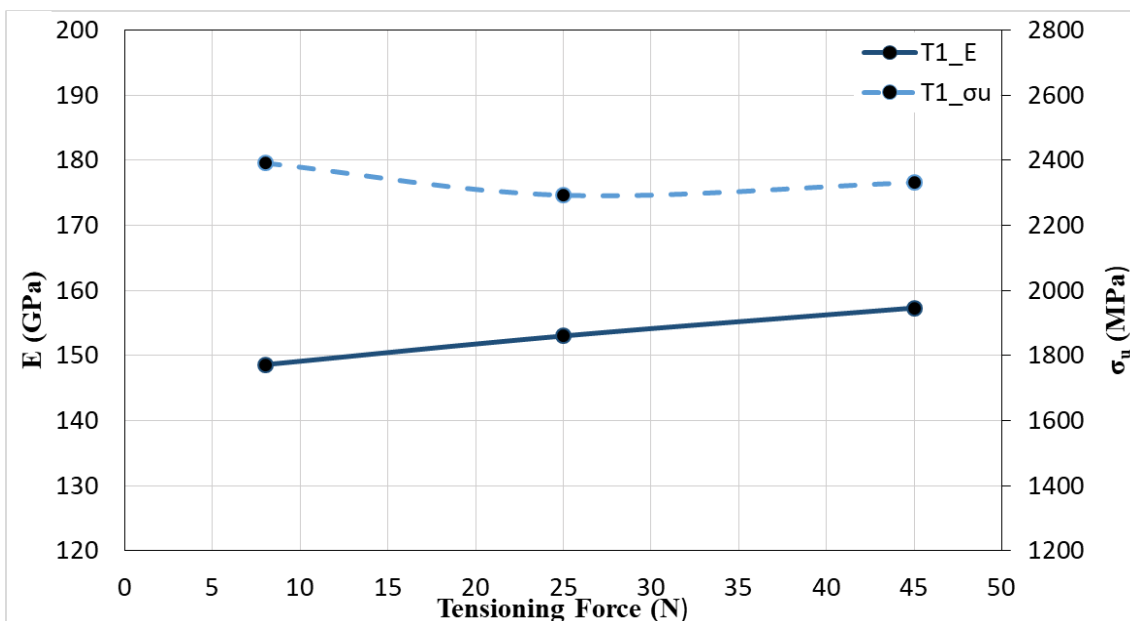
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.22: Επίδραση της δύναμης τάνσης περιέλιξης σε δοκίμια με εσωτερική διάμετρο 100mm, πλάτος και πάχος 10mm, 2mm αντίστοιχα και 1 δέσμη περιέλιξης.

SPECIMEN	σ_u	CV	E	CV	W_f
	MPa		GPa		
C_100_10_2_F8_T1	2392	4.5%	148.625	2.2%	77.3%
C_100_10_2_F25_T1	2293	7.8%	153.029	2.6%	77.7%
C_100_10_2_F45_T1	2332	4.6%	157.333	1.7%	83.0%

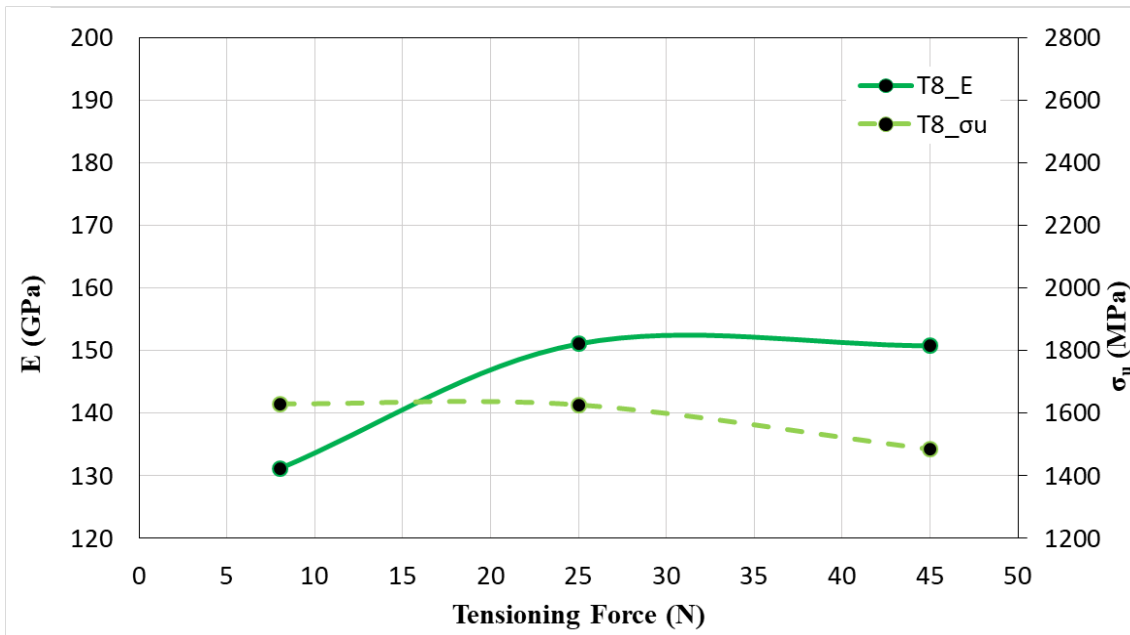
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.23: Επίδραση της δύναμης τάνσης περιέλιξης σε δοκίμια με εσωτερική διάμετρο 200mm, πλάτος και πάχος 10mm, 2mm αντίστοιχα και 8 δέσμες περιέλιξης.

SPECIMEN	σ_u	CV	E	CV	W_f
	MPa		GPa		
C_200_10_2_F8_T8	1629	5.8%	131.125	2.6%	79.3%
C_200_10_2_F25_T8	1626	4.5%	151.042	4.8%	85.7%
C_200_10_2_F45_T8	1484	2.0%	150.717	4.2%	84.7%

Η επίδραση της δύναμης τάνυσης περιέλιξης των δειγμάτων παρουσιάζεται στους ΠΙΝΑΚΕΣ 5.22, 5.23. Στην περίπτωση των δακτυλίων διαμέτρου 100mm, και 1 δέσμης περιέλιξης η αύξηση της δύναμης τάνυσης δεν έχει αποτέλεσμα επί της αντοχής του δοκιμίου. Ωστόσο, αυξάνοντας την δύναμη τάνυσης, παρατηρείται αντίστοιχη ελαφρά αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, περίπου κατά 3% μεταξύ των διαδοχικών σταδίων της αύξησης της δύναμης. Από την άλλη πλευρά, στον ΠΙΝΑΚΑ 5.23, ο οποίος αντιστοιχεί σε δακτυλίους διαμέτρου 200mm και 8 δεσμών περιέλιξης, υπάρχουν αρκετά αποτελέσματα που βρίσκονται σε διαφωνία με τις γενικές παρατηρήσεις. Πιο συγκεκριμένα, αν και η αύξηση της δύναμης τάνυσης από 8N σε 25N δεν έχει καμία επίδραση επί της αντοχής των δειγμάτων, όπως αναμενόταν, η εφαρμογή της δύναμης εφελκυσμού 45N οδηγεί σε μια σημαντικά χαμηλότερη τιμή αντοχής κατά περίπου 9%. Επιπρόσθετα, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας των δειγμάτων με δύναμη τάνυσης 8 N είναι σημαντικά χαμηλότερη από τις επαναλαμβανόμενες τιμές των περιπτώσεων δύναμης τάνυσης 25 N και 45N. Η χαμηλότερη τιμή κατά βάρος περιεκτικότητας σε ίνες (79,3% έναντι 85,7% και 84,7%) θα μπορούσε να είναι μια πιθανή δικαιολογία για ελαφρά πτώση των τιμών του Young's Modulus, αλλά όχι για μια τόσο σημαντική μείωση (περίπου 15%). Μια πιο λεπτομερής αναπαράσταση αυτών των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στα ΣΧΗΜΑΤΑ 5.32 και 5.33.



ΣΧΗΜΑ 5.32: Γραφική αναπαράσταση της επίδρασης της δύναμης τάνυσης περιέλιξης στο μέτρο ελαστικότητας και στην αντοχή των δειγμάτων 1 δέσμης περιέλιξης.



ΣΧΗΜΑ 5.33: Γραφική αναπαράσταση της επίδρασης της δύναμης τάνσης περιέλιξης στο μέτρο ελαστικότητας και στη αντοχή των δειγμάτων με 8 δέσμες περιέλιξης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.24: Επίδραση αριθμού δέσμης περιέλιξης σε δοκίμια με εσωτερική διάμετρο 100mm, πλάτος και πάχος 10mm και 2mm αντίστοιχα και δύναμη τάνσης περιέλιξης 8N.

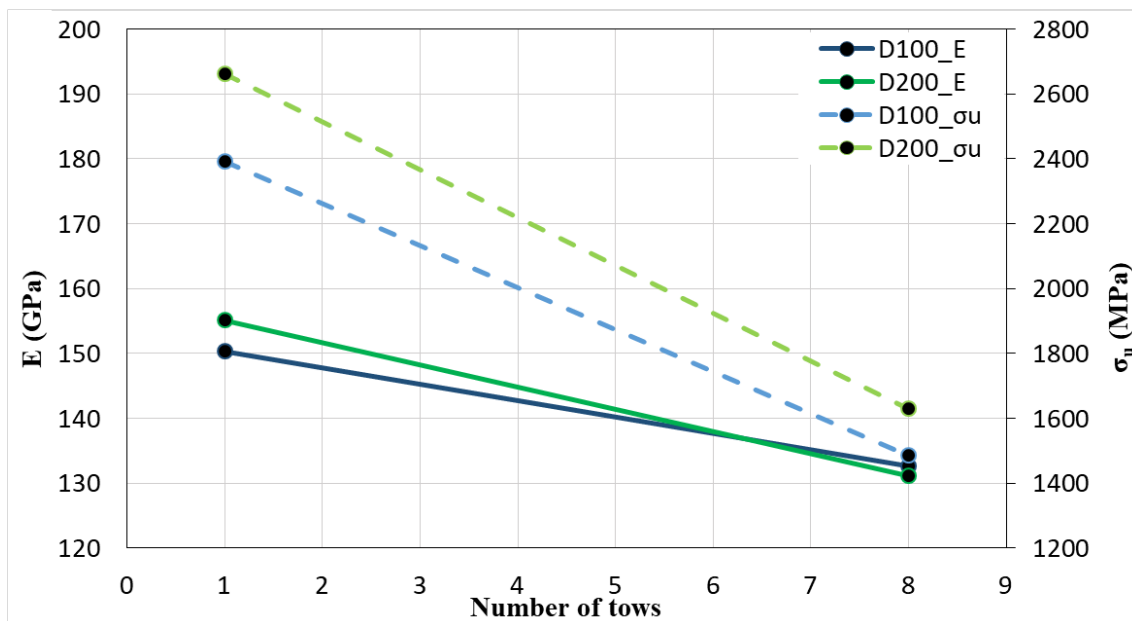
SPECIMEN	σ _u	CV	E	CV	W _f
	MPa		GPa		
C_100_10_2_F8_T1	2392	4.5%	150.323	2.1%	77.3%
C_100_10_2_F8_T8	1485	3.9%	132.646	3.4%	82.0%

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.25: Επίδραση αριθμού δέσης περιέλιξης σε δοκίμια με εσωτερική διάμετρο 200mm, πλάτος και πάχος 10mm και 2mm αντίστοιχα και δύναμη τάνσης περιέλιξης 8N.

SPECIMEN	σ _u	CV	E	CV	W _f
	MPa		GPa		
C_200_10_2_F8_T1	2662	4.2%	155.092	2.0%	82.3%
C_200_10_2_F8_T8	1629	5.8%	131.125	2.6%	79.3%

Τέλος από τους ΠΙΝΑΚΕΣ 5.24 και 5.25, παρουσιάζεται μια σημαντική μείωση των τιμών της αντοχής στην περιφερειακή διεύθυνση και του συντελεστή Young, όταν χρησιμοποιούνται 8 δέσμες περιέλιξης, όπως απεικονίζεται γραφικά και στο ΣΧΗΜΑ 5.34. Ειδικότερα, για τα δοκίμια διαμέτρου 100 mm, η αντοχή του δοκιμίου μειώνεται κατά 38% και το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται κατά 12%, ενώ οι αντίστοιχες μειώσεις για την περίπτωση των δακτυλίων εσωτερικής διαμέτρου 200mm είναι 39% και 12% αντίστοιχα. Η σημαντική μείωση που παρατηρείται, ιδιαίτερα όσον αφορά στην αντοχή των δοκιμίων, είναι αποτέλεσμα της αλλαγής της γωνίας προσανατολισμού των ινών. Είναι σαφές ότι,

χρησιμοποιώντας μόνο μία δέσμη περιέλιξης, οι μηχανικές ιδιότητες που μετρώνται αντιστοιχούν, σχεδόν, σε αυτές στην κατεύθυνση των ινών. Από την άλλη πλευρά, η χρήση 8 δεσμών περιέλιξης οδηγούν σε απόκλιση των ινών από την περιφερειακή κατεύθυνση των δακτυλίων κατά 4°-8°, ανάλογα με τη διάμετρο των δειγμάτων. Με αυτό τον τρόπο, οι ιδιότητες στην περιφερειακή διεύθυνση μειώνονται σημαντικά, αφού η επίδραση των ινών σε αυτές έχει μειωθεί. Παρά αυτό το σαφές μειονέκτημα της ταυτόχρονης χρήσης πολλαπλών δεσμών περιέλιξης, οι κατασκευαστές σύνθετων υλικών την προτιμούν σε αντίθεση με τη χρήση μόνο 1 δέσμης περιέλιξης, λόγω της μείωσης του χρόνου κατασκευής και του κόστους που μπορεί να επιτευχθεί με αυτόν τον τρόπο.



ΣΧΗΜΑ 5.34: Γραφική αναπαράσταση της επίδρασης του αριθμού των δεσμών περιέλιξης στο μέτρο ελαστικότητας και στη αντοχή των δειγμάτων με εσωτερική διάμετρο 100mm και 200mm αντίστοιχα.

Μια άλλη σημαντική παρατήρηση της πειραματικής διαδικασίας που διεξήχθη στην παρούσα μελέτη είναι ο τρόπος αστοχίας των δοκιμίων. Τυπικές εικόνες των δοκιμίων μετά την αποτυχία παρουσιάζονται στα ΣΧΗΜΑΤΑ 5.35-5.37. Διαπιστώνεται ότι ο κυρίαρχος τρόπος αστοχίας είναι η θραύση των ινών λόγω τάσης (ΣΧΗΜΑ 5.35). Σε όλα σχεδόν τα δοκίμια από κάθε σειρά, η θραύση των ινών οδήγησε στην ανάπτυξη ρωγμών στις στρώσεις του σύνθετου υλικού (delamination) όπως φαίνεται στο ΣΧΗΜΑ 5.36. Από την άλλη πλευρά, σε περίπου 20% των δοκιμίων, παρατηρήθηκε αστοχία τύπου αποσύνθεσης (ΣΧΗΜΑ 5.37). Ωστόσο, αυτή η συγκεκριμένη συμπεριφορά δεν είναι επαναλαμβανόμενη και δεν μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με το συσχετισμό αυτού του φαινομένου με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των δειγμάτων. Οι προαναφερθείσες παρατηρήσεις αποτελούν

ισχυρές ενδείξεις ότι η παρούσα διαδικασία δοκιμής οδηγεί στην ανάπτυξη εφελκυστικής τάσης στην περιφερειακή διεύθυνση.



ΣΧΗΜΑ 5.35: Τυπικός τρόπος αστοχίας δοκιμίου στο οποίο η θραύση των ινών είναι ο κυρίαρχος τρόπος αστοχίας.



ΣΧΗΜΑ 5.36: Τυπικός τρόπος αστοχίας δοκιμίου στο οποίο η θραύση ινών ακολουθείται από delamination.



ΣΧΗΜΑ 5.37: Τυπική αποσύνθεση δοκιμίου.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε μια σειρά δοκιμών με τη μέθοδο του διαιρούμενου δίσκου με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης των διάφορων γεωμετρικών και κατασκευαστικών παραμέτρων των δοκιμών στις μηχανικές τους ιδιότητες. Τα δοκίμια που μελετήθηκαν προέκυψαν από διάφορους κυλίνδρους οι οποίοι κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο περιέλιξης ινών, προκύπτοντας τελικά σειρές δοκιμών με διαφορετικές εσωτερικές διαμέτρους, πάχη, πλάτη αλλά και διαφορετικά υλικά ενισχυτικών ινών όπως ο άνθρακας και ο βασάλτης. Η δύναμη τάνυσης περιέλιξης όπως και ο αριθμός δεσμών περιέλιξης ήταν κάποιες ακόμα κατασκευαστικές παράμετροι δοκιμών που εξετάστηκαν.

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε παρουσίασε κάποιες διαφορές σε σχέση με το πρότυπο ASTM D2290. Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκε διαφορετικό μέγεθος διάκενου σε σχέση με αυτή που ορίζει το πρότυπο καθώς και διαφορετική γεωμετρία δοκιμών. Επιπρόσθετα, όσον αφορά τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας υιοθετήθηκε η διαδικασία που παρουσίασαν οι Yoon et al. Όπου το μέτρο ελαστικότητας των δοκιμών λαμβάνεται ως ο μέσος όρος των μέτρων ελαστικότητας για τις καμπύλες φόρτισης και αποφόρτισης. Με αυτό τον τρόπο λαμβάνονται περισσότερο αξιόπιστα αποτελέσματα εξαλείφοντας το φαινόμενο της τριβής σε αυτά. Εκ των αποτελεσμάτων επιβεβαιώθηκε η σημασία υπολογισμού του Young's Modulus με τη συγκεκριμένη διαδικασία, αφού αλλιώς υπήρχε υπερεκτίμηση αυτού έως και κατά 9%. Γενικά η πλειοψηφία των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν παρουσίασαν πολύ καλή επαναληψιμότητα και αξιοπιστία, οι οποίες απεικονίζονται από τις πολύ χαμηλές τιμές των αντίστοιχων συντελεστών μεταβολής (<5% στις περισσότερες περιπτώσεις). Εξαιρετική αποτελεί η σειρά δοκιμών με προεμποτισμένες ίνες άνθρακα γεγονός που οφείλεται σε κατασκευαστικές ατέλειες των συγκεκριμένων δειγμάτων. Όσον αφορά στα αποτελέσματα των δοκιμών προσδιορισμού των φυσικών ιδιοτήτων των δοκιμών υπήρξε πολύ καλή επαναληψιμότητα των μετρήσεων χωρίς ωστόσο να εξαχθεί κάποιο αξιόπιστο συμπέρασμα.

Η διερεύνηση της επίδρασης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δειγμάτων έδειξε ότι αυξάνοντας την εσωτερική διάμετρο των δακτυλίων, παρατηρείται μικρή αύξηση των τιμών της αντοχής των δειγμάτων, ενώ το μέτρο ελαστικότητας παραμένει σχεδόν ανεπηρέαστο. Επιπλέον, υπάρχουν ενδείξεις ότι μειώνοντας το πλάτος και το πάχος των δακτυλίων, επιτυγχάνεται μια ελαφρά αύξηση στην τιμή της αντοχής των δοκιμών.

Όσον αφορά στις παραμέτρους κατασκευής, παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της δύναμης τάνυσης περιέλιξης οδηγεί σε αύξηση του μέτρου ελαστικότητας στην περιφερειακή διεύθυνση, ενώ η αντοχή του δακτυλίου δεν αλλάζει. Επιπλέον, απεικονίζεται η σημασία του αριθμού των δεσμών που χρησιμοποιούνται για τη διαδικασία περιέλιξης, συμπεραίνοντας ότι με την αύξηση του αριθμού των tows που χρησιμοποιούνται, οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών στην περιφερειακή διεύθυνση παρουσιάζουν σημαντική πτώση.

Αποδεικνύεται επίσης ότι η συγκεκριμένη διαδικασία δοκιμής που ακολουθείται εδώ με τη χρήση της τροποποιημένης πειραματικής διάταξης οδηγεί σε αστοχίες που οφείλονται σε θραύση ινών υπό τάση, επιβεβαιώνοντας έτσι την αξιοπιστία και την ακρίβεια της μεθόδου δοκιμής διαιρούμενου δίσκου

Ακόμα πραγματοποιήθηκε μελέτη ανάλυσης τάσεων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων της διάταξης δοκιμών, προκειμένου να περιοριστούν οι περιοχές πλαστικής παραμόρφωσης στα στοιχεία της πειραματικής διάταξης. Από τα αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι οι περιοχές πλαστικής διαρροής μειώνονται για χρήση πείρου μεγαλύτερης διαμέτρου και αύξηση του πάχους και του πλάτους της φλάντζας.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΛΙΘΩΝΗΣ

Agarwal, B. D., & Broutman, L. J. (1990). *Composites, Analysis and Performance of Fiber*. John Wiley & Sons, Inc.

A. F. Hamed, M. M. Hamdan, B. B. Sahari and S. M. Sapuan. 2008. EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF FILAMENT WOUND GLASS/EPOXY AND CARBON/EPOXY COMPOSITE MATERIALS. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*.

American Society for Testing and Materials. (2012). *ASTM D5379 Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched*. Philadelphia: Annual Book of ASTM Standards.

American Society for Testing and Materials. (2013a). *ASTM D3518, Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate*. Philadelphia: Annual Book of ASTM Standards.

American Society for Testing and Materials. (2013b). *ASTM D792, Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*. Philadelphia: Annual Book of ASTM Standards.

American Society for Testing and Materials. (2014a). *ASTM D2290, Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced*. Philadelphia: Annual Book of ASTM Standards.

American Society for Testing and Materials. (2014b). *ASTM D3039, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials (Vol. 15)*. Philadelphia: Annual Book of ASTM Standards.

American Society for Testing and Materials. (2015a). *ASTM D3171, Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials*. Philadelphia: Annual Book of ASTM Standards.

American Society for Testing and Materials. (2015b). *ASTM D3846, Standard Test Method for In-Plane Shear Strength of Reinforced Plastics 1 (Vol. 03)*. Philadelphia: Annual Book of ASTM Standards.

American Society for Testing and Materials. (2015c). *ASTM D7264, Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. Philadelphia: Annual Book of ASTM Standards.

American Society for Testing and Materials. (2016b). *ASTM D3410, Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading*. Annual Book of ASTM Standards

- Papadakis, A.Z, Themelakis, J.G, Tsouvalis, N.G. The effect of geometric and manufacturing parameters on filament wound composites split disk test results. National Technical University of Athens, Attica, Greece
- Papadakis, A.Z. & Tsouvalis, N.G. 2016. Use of Different Geometries Specimens for the Material Characterization of CFRP Filament Wound Cylinders. 17th International Conference of Experimental Mechanics, Rhodes, Greece.
- Cain, J., Case, S. & Lesko, J. 2009. Testing of hygrothermally aged e-glass/epoxy cylindrical laminates using a novel fixture for simulating internal pressure. *Journal of Composites for Construction*, 13, 325-331.
- Cevdet Kaynak, E. Salim Erdiller, Levend Parnas, Fikret Senel. 2005. Use of split-disk tests for the process parameters of filament wound epoxy composite tubes.
- Jones, I.A., Middleton, V. & Owen, M.J. 1996. Roller-assisted variant of the split disc test for filament-wound composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 27, 287-294.
- Peters, S. T. (2011). COMPOSITE FILAMENT WINDING.
- Philippidis, P., & Roukis, G. (2015). Static Tests on Ring Specimens for Mechanical Property Characterization of Filament Wound Composite Materials.
- United States Naval Ordnance Laboratoty. (1964). NOL RING TEST METHODS. Office of Technical Services.
- Walsh, E.J. & Adams, D.O. 2008. Development and evaluation of the quadrant ring test method. *Experimental Mechanics*, 48, 319-326.
- Yoon, S.-H., Kim, C.-G. & Cho, W.-M. 1997. Measurement of Tensile Properties using Filament Wound Ring Specimens. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

- Γεώργιος Αλέξανδρος Κωνσταντινίδης (2016). Χαρακτηρισμός σύνθετου υλικού κατασκευασμένου με τη μέθοδο περιέλιξης ινών. Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Παπαδάκης, Α., & Τσούβαλης, Ν. (2014). Σχεδιασμός, Κατασκευή και Πειραματική Δοκιμή Δοχείων Πίεσης από Σύνθετα Υλικά για Μεγάλα Θαλάσσια Βάθη (DEEP-CO-HOUS), Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών χαρακτηρισμού υλικού.
- Τσούβαλης, Ν. (1998). Ανάλυση και Σχεδίαση Σκαφών από Σύνθετα Υλικά, Σημειώσεις Μαθήματος. Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

TECHNICAL
DATA SHEET
No. CFA-005

TORAYCA® T700S DATA SHEET

Highest strength, standard modulus fiber available with excellent processing characteristics for filament winding and prepreg. This never twisted fiber is used in high tensile applications like pressure vessels, recreational, and industrial.

FIBER PROPERTIES

		English	Metric	Test Method
Tensile Strength		711 ksi	4,900 MPa	TY-030B-01
Tensile Modulus		33.4 Msi	230 GPa	TY-030B-01
Strain		2.1 %	2.1 %	TY-030B-01
Density		0.065 lbs/in ³	1.80 g/cm ³	TY-030B-02
Filament Diameter		2.8E-04 in.	7 μm	
Yield	6K	3,724 ft/lbs	400 g/1000m	TY-030B-03
	12K	1,862 ft/lbs	800 g/1000m	TY-030B-03
	24K	903 ft/lbs	1,650 g/1000m	TY-030B-03
Sizing Type	50C		1.0 %	TY-030B-05
& Amount	60E		0.3 %	TY-030B-05
	FOE		0.7 %	TY-030B-05
Twist		Never twisted		

FUNCTIONAL PROPERTIES

CTE	-0.38 α·10 ⁻⁶ /°C
Specific Heat	0.18 Cal/g·°C
Thermal Conductivity	0.0224 Cal/cm·s·°C
Electric Resistivity	1.6 x 10 ⁻³ Ω·cm
Chemical Composition: Carbon	93 %
Na + K	<50 ppm

COMPOSITE PROPERTIES *

Tensile Strength	370 ksi	2,550 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	20.0 Msi	135 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.7 %	1.7 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	215 ksi	1,470 MPa	ASTM D-695
Flexural Strength	245 ksi	1,670 MPa	ASTM D-790
Flexural Modulus	17.5 Msi	120 GPa	ASTM D-790
ILSS	13 ksi	9 kgf/mm ²	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	10.0 ksi	69 MPa	ASTM D-3039

* Toray 250°F Epoxy Resin. Normalized to 60% fiber volume.

TORAY CARBON FIBERS AMERICA, INC.

T700S

COMPOSITE PROPERTIES**

Tensile Strength	355 ksi	2,450 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	18.0 Msi	125 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.7 %	1.7 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	230 ksi	1,570 MPa	ASTM D-695
Compressive Modulus	--- Msi	--- GPa	ASTM D-695
In-Plane Shear Strength	14 ksi	98 MPa	ASTM D-3518
ILSS	15.5 ksi	11 kgf/mm ²	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	10.0 ksi	70 MPa	ASTM D-3039

** Toray Semi-Toughened 350°F Epoxy Resin. Normalized to 60% fiber volume.

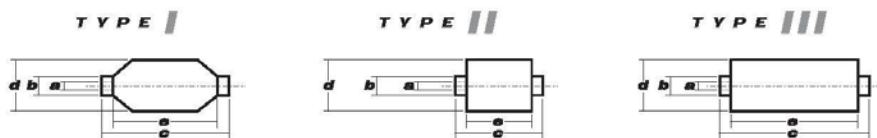
See Section 4 for Safety & Handling information. The above properties do not constitute any warranty or guarantee of values. These values are for material selection purposes only. For applications requiring guaranteed values, contact our sales and technical team to establish a material specification document.

PACKAGING

The table below summarizes the tow sizes, twists, sizing types, and packaging available for standard material. Other bobbin sizes may be available on a limited basis.

Tow Sizes	Twist ¹	Sizing	Bobbin Net Weight (kg)	Bobbin Type ²	Bobbin Size (mm)					Spools per Case	Case Net Weight (kg)
					a	b	c	d	e		
6K	C	50C	2.0	III	76.5	82.5	280	140	252	12	24
	C	50C	6.0	III	76.5	82.5	280	200	252	4	24
12K	C	60E	6.0	III	76.5	82.5	280	200	252	4	24
	C	FOE	6.0	III	76.5	82.5	280	200	252	4	24
24K	C	50C	6.0	III	76.5	82.5	280	200	252	4	24
	C	60E	6.0	III	76.5	82.5	280	200	252	4	24
	C	FOE	6.0	III	76.5	82.5	280	200	252	4	24
	C	FOE	6.0	III	76.5	82.5	280	200	252	4	24

¹ Twist A: Twisted yarn B: Untwisted yarn made from a twisted yarn through an untwisting process C: Never twisted yarn
² Bobbin Type See Diagram below



TORAY CARBON FIBERS AMERICA, INC.

6 Hutton Centre Drive, Suite #1270, Santa Ana, CA 92707 TEL: (714) 431-2320 FAX: (714) 424-0750
 Sales@Toraycfa.com Technical@Toraycfa.com www.torayusa.com



VORAFORCE™ Filament Winding System

VORAFORCE™ TW 100 Epoxy Resin

VORAFORCE™ TW 150 Hardener

VORAFORCE™ TC 3000 Catalyst

Description

The VORAFORCE™ Filament Winding System consists of an epoxy resin, hardener and catalyst designed for the filament winding process. The low viscosity of the VORAFORCE Filament Winding System results in excellent flow properties and fiber wetting and is especially suitable for production by the filament winding process where low viscosity and long pot-life are required. This system combines good mechanical and electrical properties, as well as high temperature resistance and low moisture take-up.

Applications

The VORAFORCE TW Filament Winding System is suitable for the manufacturing of structural composites for diverse applications including Construction, Marine and Infrastructure.

Typical Properties

Property ⁽¹⁾	VORAFORCE™ TW 100 Epoxy Resin (EEW ⁽²⁾ : 176-185)	VORAFORCE™ TW 150 Hardener (AnhEW ⁽³⁾ : 160-170)	VORAFORCE™ TC 3000 Catalyst
Viscosity @ 25°C (mPa·s) ASTM D-445	7000-10000	60-100	---
Density @ 25°C (g/cc) ASTM D-4052	1.1-1.2	1.1-1.2	1.21 ⁽⁵⁾
Shelf Life (Months) ⁽⁴⁾	24	12	12

1) These are typical values and should not be construed as specifications.

2) EEW - Epoxide equivalent weight

3) AnhEW - Anhydride equivalent weight

4) See Packaging, Storage and Shelf Life section for details.

5) @ 20 °C

Typical Formulation

	VORAFORCE™ TW 100 Epoxy Resin	VORAFORCE™ TW 150 Hardener	VORAFORCE™ TC 3000 Catalyst
Parts by Weight	100	83	0.5-2.0

Typical Properties Of Mixed System

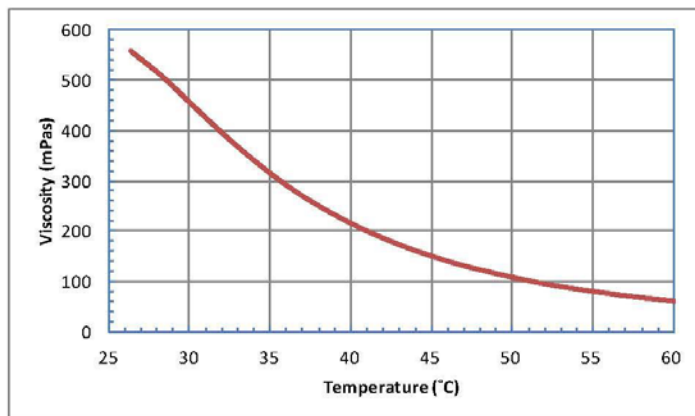
Property ⁽¹⁾	VORAFORCE™ TW 100 VORAFORCE™ TW 150 VORAFORCE™ TC 3000 (at 1.4 phr)
-------------------------	---

Viscosity @ 25°C (mPa·s) ASTM D-2983	450-750
Gel Time @ 25°C, (hrs) Gardner instrument	>8
Gel Time @ 80°C, (min) Gardner instrument	58-60

1) These are typical values and should not be construed as specifications.

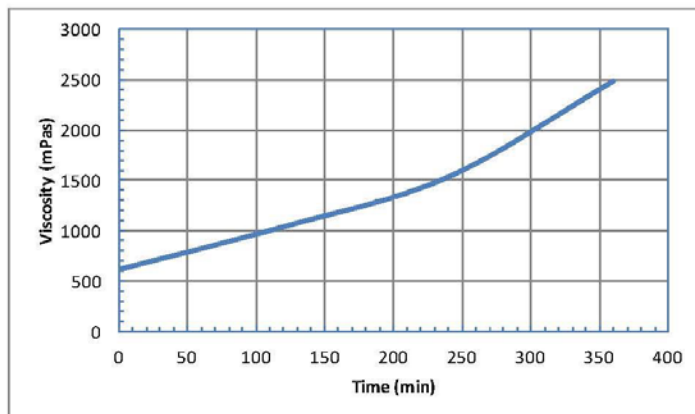
Viscosity of Mixed System vs. Temperature
(Catalyst at 1.4 phr)

ARES Rheometer from TA instruments, parallel plate geometry using the formulation prescribed in table above.



Viscosity of Mixed System vs. Time at 25°C
(Catalyst at 1.4 phr)

ARES Rheometer from TA instruments, parallel plate geometry using the formulation prescribed in table above.



Typical Curing Conditions

The recommended pot conditions are between 20°C and 25°C with a maximum relative humidity (RH) of 70%. Higher temperatures will shorten the pot life and lower temperatures will increase viscosity, significantly affecting fiber wetting. The following cure schedule is a typical starting point for most filament winding applications:

- Step 1: Cured 2 hr at 90°C
- Step 2: Post Cured 4 hr at 150°C.

Cure schedules can be tailored to each application. Accordingly, times, temperatures and ramp rates should be adjusted such that the entire composites part receives sufficient heat history to attain desired properties.

Mechanical Properties of Cured System

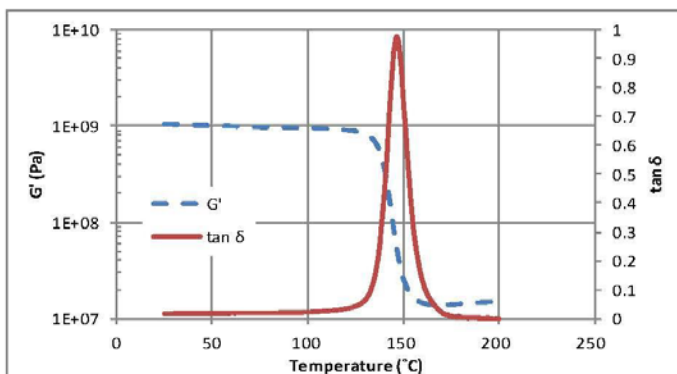
Cured at 90 °C for 2 hrs and at 150 °C for 4 hrs

Property ¹⁾ measured at 25°C	VORAFORCE™ TW 100 VORAFORCE™ TW 150 VORAFORCE™ TC 3000 (at 1.4 phr)
Tg (as cured) (°C) ²⁾	140-150
Ultimate Tensile Strength (MPa) ASTM D-638	80-90
Elongation at Ultimate Tensile Strength (%) ASTM D-638	5.5-6.5
Tensile Modulus (GPa) ASTM D-638	2.7-2.9
Flexural Strength (MPa) ASTM D-790	135-145
Flexural Modulus (GPa) ASTM D-790	2.9-3.1
Fracture Toughness K _{1c} (MPa √m) ASTM D-5045	0.56

- 1) These are typical values and should not be construed as specifications.
- 2) ARES DMTA from TA Instruments, (peak in tan δ).

Dynamic Thermal Analysis

Cured casting tested in torsion on ARES DMTA at 5 °C/min.



Mechanical Properties in Glass Fiber Composite⁽⁴⁾

Property ⁽¹⁾ measured at 25°C	VORAFORCE™ TW 100 VORAFORCE™ TW 150 VORAFORCE™ TC 3000 (at 1.4 phr)
Tg (as cured) (°C) ⁽²⁾	140-145
Shear Strength at 5% Shear Strain (MPa) ⁽³⁾ ASTM D-3518	48-52
Shear Modulus (GPa) ⁽³⁾ ASTM D-3518	2.9-3.0

- 1) These are typical values and should not be construed as specifications.
- 2) ARES DMTA from TA Instruments, (peak in tan δ).
- 3) 8 plies of E-Glass fabric (VECTORPLY ELT 2400), tested as a ± 45° in tension.
- 4) 0.47 glass fiber volume fraction.

Packaging, Storage and Shelf Life

VORAFORCE™ TW 100 resin should retain its chemical properties for at least 24 months when stored in a dry place in its original closed packaging between 25°C and 35°C. For further storage information on liquid epoxy resins consult the Dow technical bulletin Product Coding, Shelf-life and Storage Stability, Form No. 296-01657.

As with many liquid epoxy resins, VORAFORCE™ TW 100 Epoxy Resin may crystallize during storage. The potential for crystallization can be minimized by storing the resin in a controlled temperature environment between 25°C and 35°C. Crystallized resin can be reconstituted by heating to 60°C. For further details see the technical bulletin, Crystallization of Liquid Epoxy Resins, Form No. 296-01652.

VORAFORCE™ TW 150 liquid anhydride hardener should retain its chemical properties for at least 12 months when stored in a dry place in its original closed packaging in a cool, dry environment, away from direct sun light. If possible, provide nitrogen padding in the headspace of opened containers and bulk storage facilities. VORAFORCE™ TW 150 is sensitive to moisture. Higher level of moisture could significantly change the reactivity of the system and alter the final properties.

Product Stewardship

The Dow Chemical Company and its subsidiaries ("Dow") has a fundamental concern for all who make, distribute, and use its products, and for the environment in which we live. This concern is the basis for our Product Stewardship philosophy by which we assess the safety, health, and environmental information on our products and then take appropriate steps to protect employee and public health and our environment. The success of our Product Stewardship program rests with each and every individual involved with Dow products – from the initial concept and research, to manufacture, use, sale, disposal, and recycle of each product.

Customer Notice

This VORAFORCE™ System is intended for use in the manufacture of composite articles. The information provided in this data sheet is intended to

help the user achieve positive results. It is the user's responsibility to fully test and qualify the resin system, along with ingredients, methods, applications or equipment identified herein, by the user's knowledgeable formulator or scientist, and to determine the appropriate use conditions and legal restrictions, prior to use of any information given in this data sheet.

Dow strongly encourages its customers to review both their manufacturing processes and their applications of Dow products from the standpoint of human health and environmental quality to help ensure that Dow products are not used in ways for which they were not intended or tested. Dow personnel are available to answer your questions and to provide reasonable technical support. Dow product literature, including safety data sheets, should be consulted prior to use of Dow products. Current safety data sheets are available from Dow.

Medical Application Policy

Dow will not knowingly sell or sample any product or service ("Product") into any commercial or developmental application that is intended for:

- (a) permanent (long term) contact with internal body fluids or internal body tissues. Long term is a use which exceeds 72 continuous hours (except 30 days for PELLETHANE™ Polyurethane Elastomers);
- (b) use in cardiac prosthetic devices regardless of the length of time involved (cardiac prosthetic devices include, but are not limited to, pacemaker leads and devices, artificial hearts, heart valves, intra-aortic balloons and control systems and ventricular bypass assisted devices);
- (c) use as a critical component in medical devices that support or sustain human life; or
- (d) use specifically by pregnant women or in applications designed specifically to promote or interfere with human reproduction.

Additionally, all Products intended for use in pharmaceutical applications must pass the then current Pharmaceutical Liability Guidelines. For additional information please contact your regular Dow representative.

Food Contact Applications

This epoxy resin is not intended for food or potable water contact applications. If your applications include food contact requirements, please contact your Dow representative for further information and forthcoming EC regulations.

Contact information:
For more information about this product please call The Dow Chemical Company.

North America: 1-800-441-4369
Latin America: (+55) 11-5188-9000
Europe: (+31) 11-567-2626
Asia/Pacific: (+60) 3-7968-5392
<http://www.dowepoxysystems.com>

NOTICE: No freedom from infringement of any patent owned by Dow or others is to be inferred. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other government enactments. The product shown in this literature may not be available for sale and/or available in all geographies where Dow is represented. The claims made may not have been approved for use in all countries. Dow assumes no obligation or liability for the information in this document. References to "Dow" or the "Company" mean the Dow legal entity selling the products to Customer unless otherwise expressly noted. **NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.**



Certificate of Conformance

Ship date: 07.07.2016

**Production no. 3569/1-251/16
Lot 1111**

Basalt assembled roving BCF13-1200-KV42 external

Actual/measured numbers for the material sent:

Filament diameter	- 12.97 μm
Linear density (tex)	- 1187 g/km
Tenacity	- 736 mN/tex
LOI	- 0.57 %
Moisture	- 0 %

Production date: 30.06.2016



KV42

Roving series

Roving nomenclature

Product description

BCF 13-1200-KV42 ext.

BCF- basalt continuous fiber.

13 - monofilament diameter [μm].

1200 - linear density [tex].

KV42 – type of sizing.

Int./ext. – type of bobbins.

Int. – for internal unwinding (tubeless)

Ext. – for external unwinding

Processing.

Basalt roving of this series is mainly recommended for filament winding, pultrusion, processing into UD and multiaxial fabrics, prepregs and other products based on epoxy and phenolic resins.

Property Description

Type of fiber Basalt

Monofilament diameter [μm] – 13 ± 0.5

Linear density [tex] – $1200 \pm 5 \%$

Tenacity (mN/tex) - ≥ 650

Type of sizing - silane

Sizing content (% wt) ≥ 0.4

Resin compatibility - Epoxy

Moisture content (% wt) ≤ 0.1

PV-GRADE Towpreg matrix RCX0125

Red Composite PV-grade Towpregs are a family of pre-impregnated fibre tow materials suitable for use in applications that demand a high performance, fatigue resistant resin matrix.

Typical applications include:

- Pressure Vessels
- Composite flywheels
- Defence components

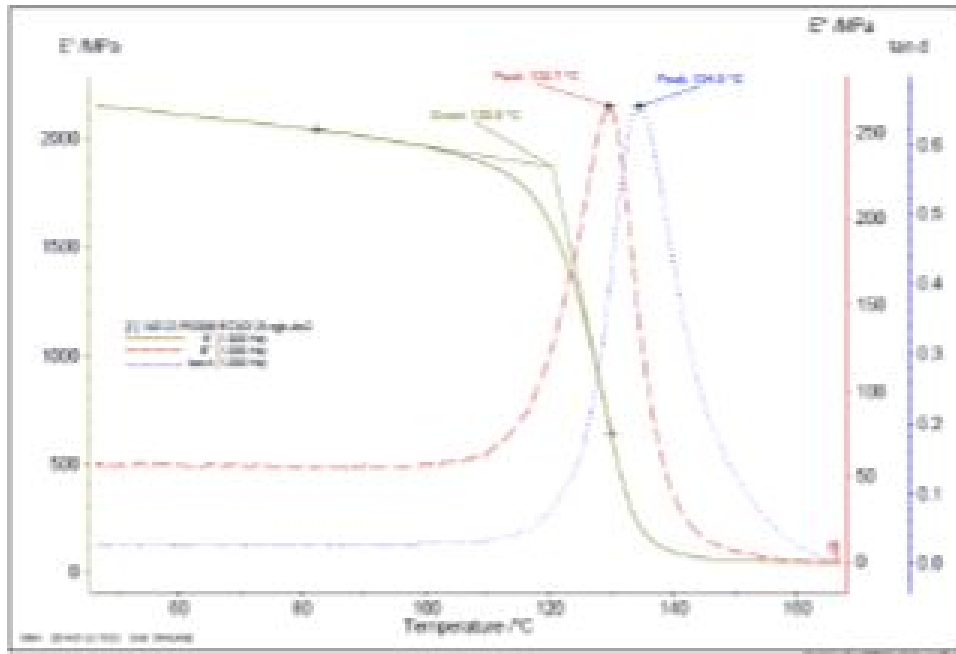
RCX0125 is an epoxy resin matrix offers high flow characteristics and robust fatigue performance. Incorporating the latest generation curing technology, the system provides highly dependable mechanical and thermal properties.

Mechanical properties

Parameter	Method	Value	Unit
Tensile strength	ISO 527-2	87.1	MPa
Tensile modulus	ISO 527-2	3.0	GPa
Tensile strain	ISO 527-2	7.2	%
Flexural strength	ISO 178	121.2	MPa
Flexural modulus	ISO 178	3.0	GPa
Flexural strain	ISO 178	12.7	%

Physical properties

Parameter	Method	Value	Unit
Density	ISO 1183	1.20	g/cc
Tg (onset)	DMA	120.5	°C
Tg (E'' peak)	DMA	129.7	°C
Water absorption	ISO 62	2.4	%
Tg (E'' peak) after 24 hr water boil	DMA	97.6	°C



Suggested cure cycle

Red Composites suggest a cure cycle consisting of:

- Ramp to 90°C @ 1°C/min
- Hold @ 90°C for 60 min
- Ramp to 150°C @ 1°C/min
- Hold @ 150°C for 90 min
- Cool down



Other curing cycles may be used and it is recommended to contact Red Composites for advice, or perform state of cure testing before component manufacture begins.

Storage requirements

Red Composites PV-grade Towpreg should be stored in its original packaging in clean, dry conditions. It should be stored indoors and out of direct sunlight. Under these conditions the shelf life will be;

At ambient temperature (22°C) minimum 3 months

In refrigerated conditions (-18°C) minimum 12 months

If frozen, care should be taken to avoid condensation forming on the product. This is achieved by allowing to thaw thoroughly before removing the outer polythene packaging.

Product availability

Red Composites PV-grade Towpreg is offered in a wide variety of flat tow carbon, glass, aramid and other fibre types. Please contact below for details.

Contact details

Please contact Red Composites for any further details

info@redcomposites.com

www.redcomposites.com

+44 (0) 1983 241930

Values in this datasheet are typical and indicative only. They should not be used for design calculations without further validation. The data is presented in good faith, but is dependent on processing methods and conditions.

It is the responsibility of the end-user to ensure suitability of the product in final application. Red Composites take no responsibility for incorrect material selection or processing errors. Please contact Red Composites Technical Service team to discuss any application, or for assistance in identifying if this material is suitable.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

