



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΑΥΛΑΚΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΑΞΟΝΙΚΗ  
ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΣΩΛΗΝΩΝ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΟ ΥΛΙΚΟ***

ΚΡΟΥΣΤΑΛΛΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΑΘΗΝΑ 2014





## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο του τομέα τεχνολογίας των Κατεργασιών της σχολής των Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) κατά το χρονικό διάστημα Ιανουαρίου του 2013 έως Φεβρουαρίου του 2014, με σκοπό την απόκτηση διπλώματος του Μηχανολόγου Μηχανικού από το ΕΜΠ.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζονται στον Καθηγητή κ. Δημήτριο Ε. Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη και εκτίμηση την οποία επέδειξε προς το πρόσωπό μου με την ανάθεση της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης, στο μέλος ΕΔΙΠ - ΕΤΕΠ κ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο τόσο για την εκμάθηση του κώδικα LS-DYNA και την υποστήριξη επ'αυτού όσο και γιατί υπήρξε πολύτιμος συνεργάτης και αρωγός σε οποιοδήποτε πρόβλημα παρουσιάστηκε κατά το χρονικό διάστημα της σπουδής μου στο παρόν αντικείμενο. Ακόμη, στο Τεχνικό Προσωπικό κ. Νικόλαο Μελισσά και Γεώργιο Μίχα ,οι οποίοι αφιερώνοντας πολύτιμο χρόνο βοήθησαν στην κατασκευή των δοκιμών και την διεξαγωγή των πειραμάτων, όπως και στο μέλος ΕΤΕΠ κ. Κώστα Κερασιώτη ,του οποίου η βοήθεια ήταν μεγάλη.

Τέλος, αφιερώνω την παρούσα εργασία στον πατέρα μου Γιώργο, στην μητέρα μου Μαρία και στην αδερφή μου Φωτεινή για την ηθική συμπαράσταση, βοήθεια και υπομονή τους καθ'όλο το διάστημα των σπουδών μου.

Αθήνα Απρίλιος 2014

Ιωάννης Γ. Κρουσταλάκης



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάγκη για ασφαλή οχήματα σε περίπτωση σύγκρουσης έχει οδηγήσει στην αναθεώρηση των δομών που χρησιμοποιούνται ως συστήματα απορρόφησης ενέργειας σε αυτά. Πλέον οι λεπτότοιχες κατασκευές σχεδιάζονται ώστε να απορροφούν μεγάλο ποσό ενέργειας του υλικού, ακόμα και σε μη φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας ώστε να προστατευτεί η κατασκευή.

Οι κανονισμοί ασφαλείας επιβάλλουν το όχημα κατά τη σύγκρουση να διατηρεί ανέπαφο το μέρος του. Για παράδειγμα η καμπίνα των επιβατών πρέπει να αντέχει τα φορτία, ενώ άλλα στοιχεία της κατασκευής πρέπει να μετατρέψουν την κινητική ενέργεια σε άλλης μορφής ενέργεια, διατηρώντας όμως την παραμόρφωση κάτω από καθορισμένα όρια. Γι' αυτό το λόγο, μελετώνται οι λεπτότοιχες κατασκευές υπό στατικό και δυναμικό φορτίο.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται στην επίδραση των εξωτερικών αυλακώσεων, στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας δοκιμών λεπτότοιχων διατομών κατασκευασμένων από σύνθετα υλικά.

Πραγματοποιήθηκαν πειράματα με συνολικά δεκαεπτά δοκίμια ορθογωνικής, τετραγωνικής και κυκλικής διατομής, από τα οποία τα εννιά ήταν κατασκευασμένα από υαλούφασμα με ίνες τυχαίας διεύθυνσεως (chopped strand glass mat), τα τέσσερα από ανθρακόνημα με στρώσεις ινών σε πλέγμα και τα υπόλοιπα από ανθρακόνημα με ίνες υπό γωνία  $45^{\circ}$ . Τα δοκίμια έφεραν διαφορετικής πυκνότητας εξωτερικές αυλακώσεις και υπέστησαν αξονική στατική κατάρρευση σε υδραυλική και μηχανική πρέσα και ελήφθησαν τα αντίστοιχα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης. Στα κατεστραμένα δοκίμια έγιναν λεπτομερείς μικρογραφικές παρατηρήσεις της ζώνης κατάρρευσης με στόχο τη μελέτη του εμφανιζομένου μηχανισμού κατάρρευσης.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** της παρούσας Διπλωματικής εργασίας γίνεται μια εισαγωγή στην έννοια του Crashworthiness μέσα από ιστορικά δεδομένα και εξηγούνται οι λόγοι στους οποίους οφείλεται η μεγάλη εξέλιξη και διάδοση των σύνθετων υλικών.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** περιγράφονται βασικές έννοιες, που αφορούν τα σύνθετα υλικά και η χρήση τους στις σύγχρονες κατασκευές. Ακόμη, γίνεται επισκόπηση της υπάρχουσας διεθνούς βιβλιογραφίας όσον αφορά τη μελέτη της συμπεριφοράς λεπτότοιχων κατασκευών από σύνθετα υλικά και στην ικανότητά τους να απορροφούν ενέργεια.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** γίνεται θεωρητική ανάλυση των μηχανικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι νόμοι που διέπουν τα σύνθετα και αφορούν το μέτρο ελαστικότητας, το μέτρο διάτμησης, το λόγο Poisson, την αντοχή τους σε θραύση, την ανθεκτικότητα, τη διάδοση ρωγμών και τον ερπυσμό.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται ουσιαστικά το πειραματικό μέρος της διπλωματικής εργασίας. Μελετάται η επίδραση των εξωτερικών αυλακώσεων στην αξονική κατάρρευση κελυφών σύνθετου υλικού, με σκοπό την καταγραφή των μηχανισμών κατάρρευσης και παράλληλα τη διερεύνηση της ικανότητάς τους για απορρόφηση ενέργειας. Γίνεται αναφορά στα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και στις ιδιότητές τους, στην διαδικασία ελέγχου κατάστασης και κατασκευής των δοκιμών, στον χρησιμοποιούμενο πειραματικό εξοπλισμό, καθώς και στη διαδικασία εκτέλεσης των πειραμάτων.



Στη συνέχεια, γίνεται παράθεση των πειραματικών αποτελεσμάτων και ο σχολιασμός αυτών.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** παραντίθεται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία.

Στο **έκτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μικροπαρατηρήσεις στη δομή του σύνθετου υλικού. Ακόμη, παρατίθενται φωτογραφίες για κάθε δοκίμιο, με επισήμανση των ατελειών που παρατηρήθηκαν.

Στο **έβδομο κεφάλαιο** αναφέρονται λεπτομερώς οι βιβλιογραφικές πηγές της εργασίας.

Τέλος, το **όγδοο κεφάλαιο** αποτελεί παράρτημα που συγκεντρώνει την ορολογία που έχει χρησιμοποιηθεί σε όλη την έκταση του κειμένου.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κατάλογος Σχημάτων .....	11
Κατάλογος Πινάκων .....	13
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>15</b>
1.1 Ασφάλεια οχήματος και επιβάτη .....	16
1.2 Ικανότητα απορρόφησης ενέργειας (Crashworthiness) .....	17
1.3 Ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των Σύνθετων Υλικών .....	18
1.4 Ιστορική Εξέλιξη των Σύνθετων υλικών .....	20
<b>2. ΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ .....</b>	<b>23</b>
2.1 Εισαγωγή .....	24
2.2 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών .....	25
2.2.1 Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών(fibrous composites) .....	25
2.2.2 Σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων (particulate composites).....	26
2.2.2.1 Μορφοποίηση σύνθετων υλικών με ενίσχυση σωματιδίων .....	27
2.2.3 Στρωματικά σύνθετα υλικά (laminar composites).....	28
2.2.3.1 Επιστρωμένα Υλικά (coated materials) .....	28
2.2.3.2 Διμεταλλικά επιστρώματα .....	29
2.2.3.3 Πολυστρωματικά και Sandwich υλικά .....	29
2.3 Τύποι ενισχυτικών Ινών.....	32
2.3.1 Ίνες Γυαλιού (Fiber Glass).....	32
2.3.2 Ίνες Πολυμερούς (polymer fibers) .....	36
2.3.3 Ίνες Άνθρακα (carbon fibers).....	37
2.3.4 Μεταλλικές Ίνες.....	39
2.3.5 Κεραμικές Ίνες (ceramic fibers) .....	40
2.3.6 Τριχιτές (Whiskers) .....	41
2.3.7 Ίνες φυσικών ορυκτών .....	42
2.4 Μήτρες (matrix).....	43
2.4.1 Οργανικές Μήτρες.....	43
2.4.2 Μεταλλικές Μήτρες .....	43
2.4.3 Κεραμικές Μήτρες.....	44
2.5 Επιλογή ενισχυτικών ινών και μήτρας .....	45



---

2.5.1 Γεωμετρία ινών .....	45
2.5.2 Ποσοστό ινών .....	45
2.5.3 Προσανατολισμός ινών .....	45
2.5.3.1 Συνεχείς ίνες σε μονοδιάστατη στρώση .....	45
2.5.3.2 Πεπλεγμένες συνεχείς ίνες.....	46
2.5.3.3 Τυχαία διάταξη ινών .....	47
2.6 Διάκενα.....	47
2.7 Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων σύνθετων υλικών .....	47
2.8 Συνάφεια ινών-μήτρας.....	48
2.9 Η φύση και ο ρόλος της διεπιφάνειας (interface) .....	48
2.10 Μηχανισμοί πρόσφυσης .....	48
2.11 Το τασικό πεδίο περί τη διεπιφάνεια .....	49
2.12 Η μεταφορά του φορτίου από την μήτρα στην ίνα .....	49
2.13 Επιλογή υλικών.....	50
2.14 Μορφές αστοχίας σύνθετων υλικών .....	51
2.15.1 Θραύση ινών .....	52
2.15.2 Παραμόρφωση και θραύση της μήτρας .....	52
2.15.3 Αποκόλληση ινών από μήτρα (debonding).....	52
2.15.4 Αποκάλυψη- εκρίζωση ινών από μήτρα (pull out) .....	52
2.15.5 Διαστρωματική αποκόλληση (delamination).....	53
2.16 Χρήση κατασκευών λεπτού πάχους ως συστημάτων απορρόφησης ενέργειας.....	53
<b>3. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....</b>	<b>55</b>
3.1 Μέτρο ελαστικότητας .....	56
3.1.1 Αξονική Τάση.....	56
3.1.2 Εγκάρσιες Τάσεις.....	57
3.2 Μέτρο διάτμησης .....	58
3.3 Λόγος Poisson.....	61
3.4 Θραύση και αντοχές.....	63
3.4.1 Αστοχία σε αξονική φόρτιση .....	63
3.4.2 Αστοχία σε εγκάρσια εφελκυστική παραμόρφωση.....	64
3.4.3 Αστοχία σε γωνία, $\phi$ , ως προς την κατεύθυνση των ινών .....	64
3.5 Ανθεκτικότητα .....	65
3.6 Διεπιφανειακή θραύση και διάδοση ρωγμών στα σύνθετα υλικά .....	66
3.7 Ερπυσμός.....	66

---





---

3.8 Κόπωση.....	67
3.9 Κατάλογος Συμβόλων.....	68
<b>4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....</b>	<b>71</b>
4.1 Αξονική καταπόνηση κελυφών .....	72
4.1.1 Αξιολόγηση συμπεριφοράς των συστημάτων ως προς την απορρόφηση ενέργειας .	72
4.2 Πειραματικό μέρος.....	73
4.2.1 Σκοπός του πειράματος.....	73
4.2.2 Διεξαγωγή του πειράματος.....	73
4.2.2.1 Επιλογή, έλεγχος και ετοιμασία δοκιμών .....	73
4.2.2.2 Αξονική καταπόνηση δοκιμών .....	76
4.2.2.3 Επεξεργασία δοκιμών για μικρογραφική ανάλυση .....	76
4.2.3 Πειραματικός εξοπλισμός .....	77
4.2.3.1 Πρέσα INSTRON 4482.....	77
4.2.3.2 Υδραυλική Πρέσα .....	78
4.2.4 Πειραματικές δοκιμές και μετρήσεις .....	79
4.2.4.1 Δοκίμιο <i>RA</i> .....	79
4.2.4.2 Δοκίμιο <i>RA1</i> .....	82
4.2.4.3 Δοκίμιο <i>RA2</i> .....	86
4.2.4.4 Δοκίμιο <i>RB</i> .....	90
4.2.4.5 Δοκίμιο <i>RB1</i> .....	94
4.2.4.6 Δοκίμιο <i>RB2</i> .....	97
4.2.4.7 Δοκίμιο <i>CA</i> .....	100
4.2.4.8 Δοκίμιο <i>CA1</i> .....	104
4.2.4.9 Δοκίμιο <i>CA2</i> .....	109
4.2.4.10 Δοκίμιο <i>CB</i> .....	114
4.2.4.11 Δοκίμιο <i>CB1</i> .....	117
4.2.4.12 Δοκίμιο <i>CB2</i> .....	120
4.2.4.13 Δοκίμιο <i>CB3</i> .....	124
4.2.4.14 Δοκίμιο <i>CC</i> .....	127
4.2.4.15 Δοκίμιο <i>CC1</i> .....	131
4.2.4.16 Δοκίμιο <i>CC2</i> .....	134
4.2.4.17 Δοκίμιο <i>CC3</i> .....	137
<b>5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>143</b>
5.1 Παρατηρούμενοι Μηχανισμοί κατάρρευσης.....	144

---



---

5.2 Συγκριτική παράθεση των πειραματικών καμπυλών .....	146
5.2.1 Επίδραση της πυκνότητας των αυλακώσεων στην απορροφούμενη ενέργεια. ....	146
5.2.1.1 Κέλυφος $SP1$ ( $RA, RA1, RA2$ ) .....	146
5.2.1.2 Κέλυφος $SP2$ ( $RB, RB1, RB2$ ) .....	147
5.2.1.3 Κέλυφος $SP3$ ( $CA, CA1, CA2$ ) .....	148
5.2.1.4 Κέλυφος $SP4$ ( $CB, CB1, CB2, CB3$ ) .....	149
5.2.1.5 Κέλυφος $SP5$ ( $CC, CC1, CC2, CC3$ ) .....	150
5.2.2 Επίδραση της γεωμετρίας του δοκιμίου στην απορροφούμενη ενέργεια.....	151
5.2.2.1 Σύγκριση $SP1, SP2$ κελυφών. ....	151
5.2.3 Επίδραση του υλικού στην απορροφούμενη ενέργεια. ....	153
5.3 Αρχικό φορτίο $P$ (initial load) .....	154
5.4 Μέσο φορτίο $P_{mean}$ .....	154
<b>6. ΜΙΚΡΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....</b>	<b>155</b>
6.1 Μικρομηχανισμοί απορρόφησης ενέργειας.....	156
6.2 Μικρογραφική ανάλυση δοκιμών.....	156
6.2.1 Δοκίμιο $RA$ .....	156
6.2.2 Δοκίμιο $RB$ .....	157
6.2.3 Δοκίμιο $CA$ .....	158
6.2.4 Δοκίμιο $CB$ .....	159
6.2.5 Δοκίμιο $CC$ .....	160
6.3 Παρατηρήσεις σχετικά με τους μικρομηχανισμούς κατάρρευσης.....	161
<b>7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>163</b>
7.1 Κεφάλαιο 1ο: Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	164
7.2 Κεφάλαιο 2ο: Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	165
7.3 Κεφάλαιο 3ο: Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	166
7.4 Κεφάλαιο 4ο, 5ο και 6ο: Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	166
<b>8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....</b>	<b>169</b>
8.1 Ορολογία .....	170

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Τυπικό αμάξωμα [4] .....	17
Σχήμα 2: Προσομοίωση σύγκρουσης οχήματος σε ακίνητο εμπόδιο .....	18
Σχήμα 3: Τρίπολο εξέλιξης υλικών .....	24
Σχήμα 4: Τέσσερις τύποι διάταξης των ινών: (α) μονοδιευθυντικές ίνες (μονοαξονικό ύφασμα), (β) ίνες άτακτων διευθύνσεων (πίλημα), (γ) πλέξη ύφανσης (ύφασμα), (δ) ίνες σε τρισδιάστατη πλέξη (πεπλεγμένο ύφασμα) .....	26
Σχήμα 5: Σχηματική παράσταση σύνθετου- sandwich t: πάχος sandwich, tε: πάχος επίστρωσης .....	30
Σχήμα 6: Δοκιμή αντοχής σε διάτμηση του κυψελοειδή πυρήνα .....	30
Σχήμα 7: Περιοδικός Πίνακας.....	32
Σχήμα 8: Δομή Γυαλιού .....	32
Σχήμα 9: Αποτύπωμα πλέξης νημάτων 1 επάνω- 1 κάτω.....	33
Σχήμα 10: Αποτύπωμα πλέξης νημάτων 4 επάνω – 1 κάτω. ....	33
Σχήμα 11: Διάφοροι τύποι πλέξης νημάτων υαλουφάσματος: 1) Μονής διεύθυνσης, 2) Διπλής διεύθυνσης με απλή πλέξη 1 επάνω- 1κάτω, 3)τύπου HS1 επάνω-4 κάτω, 4) τύπου CrowFoot 1 επάνω- 3 κάτω, 5)τύπου BMS .....	34
Σχήμα 12: Παραγωγή ενισχυτικών ινών γυαλιού τύπου E .....	34
Σχήμα 13: Τύπος Αραμιδίου(δεξιά), Δομή ίνας Kevlar(αριστερά).....	36
Σχήμα 14: Διάφοροι τύποι πλέξης υφάσματος Kevlar 49: α)Απλή πλέξη, β) Πλέξη Μπάσκετ, γ)Σατέν, δ)Λινό .....	37
Σχήμα 15: Κρύσταλλος γραφίτη(αριστερά), Διάταξη ατόμων C (δεξιά).....	38
Σχήμα 16: Τυπική δομή ανθρακονήματος, όπως έχει ληφθεί από μικροσκόπιο .....	38
Σχήμα 17: Παραγωγή ενισχυτικών ινών άνθρακα .....	38
Σχήμα 18: Παραγωγή ινών βορίου με αναγωγή αλογονιδίου του βορίου.....	40
Σχήμα 20: Διάγραμμα φορτίου- μετατόπισης. ....	54
Σχήμα 21: Μονοαξονικό ινοπλισμένο σύνθετο .....	56
Σχήμα 22: Μονοαξονικό ινοπλισμένο σύνθετο .....	57
Σχήμα 23: Οι διαφορετικές συνιστώσες του μέτρου διάτμησης στα ινοπλισμένα σύνθετα υλικά.....	58
Σχήμα 24: Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου Takayanagi.....	59
Σχήμα 25: Ίνες οπλισμένες σε μια γωνία $\theta$ ως προς το φορτίο, ή προσανατολισμένες τυχαία σε 2D ή 3D στο σύνθετο υλικό. ....	62
Σχήμα 26: : Η αντοχή του συνθέτου όταν η μήτρα έχει χαμηλότερη ολκιμότητα από την ίνα .....	63
Σχήμα 27: Η αντοχή του συνθέτου όταν η μήτρα έχει υψηλότερη ολκιμότητα από την ίνα..	63
Σχήμα 28: Αστοχία Ινοπλισμένου συνθέτου υλικού .....	64
Σχήμα 29: Πρέσα δοκιμών INSTRON 4482, ονομαστικού φορτίου 10kN .....	77
Σχήμα 30: Πίνακας ελέγχου πρέσας INSTRON 4482 .....	78
Σχήμα 31: Σκαρίφημα δοκιμίου RA(αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου RA (δεξιά).....	79
Σχήμα 32: Σκαρίφημα δοκιμίου RA1(αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου RA1 (κέντρο,δεξιά).....	83
Σχήμα 33: Σκαρίφημα δοκιμίου RB(αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου RB (κέντρο,δεξιά).....	90

Σχήμα 34: Σκαρίφημα δοκιμίου <i>RB2</i> (αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου <i>RB2</i> (κέντρο,δεξιά).....	97
Σχήμα 35: Σκαρίφημα δοκιμίου <i>CA</i> (αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου <i>CA</i> (δεξιά).....	101
Σχήμα 36: Σκαρίφημα δοκιμίου <i>CA1</i> (αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου <i>CA1</i> (δεξιά).....	105
Σχήμα 37: Σκαρίφημα δοκιμίου <i>CA2</i> (αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου <i>CA2</i> (δεξιά).....	109
Σχήμα 38: Σκαρίφημα δοκιμίου <i>CB1</i> (αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου <i>CB1</i> (δεξιά).....	117
Σχήμα 39: Σκαρίφημα δοκιμίου <i>CB2</i> (αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου <i>CB2</i> (δεξιά).....	120
Σχήμα 40: Σκαρίφημα δοκιμίου <i>CB3</i> (αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου <i>CB3</i> (δεξιά).....	124
Σχήμα 41: Σκαρίφημα δοκιμίου <i>CC</i> (αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου <i>CC</i> (δεξιά).....	127
Σχήμα 42: Σκαρίφημα δοκιμίου <i>CC2</i> (αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου <i>CC2</i> (δεξιά).....	134
Σχήμα 43: Σκαρίφημα δοκιμίου <i>CC3</i> (αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου <i>CC3</i> (δεξιά).....	137
Σχήμα 44: Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών φορτίου μετατόπισης των δοκιμίων <i>RA, RA1, RA2</i> .....	146
Σχήμα 45: Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών φορτίου μετατόπισης των δοκιμίων <i>RB, RB1, RB2</i> .....	147
Σχήμα 46: Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών φορτίου μετατόπισης των δοκιμίων <i>CA, CA1, CA2</i> .....	148
Σχήμα 47: Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών φορτίου μετατόπισης των δοκιμίων <i>CB, CB1, CB2, CB3</i> .....	149
Σχήμα 48: Διάγραμμα καμπυλών φορτίου μετατόπισης των δοκιμίων <i>CC, CC1, CC2, CC3</i> . 150	
Σχήμα 49: Διάγραμμα καμπυλών φορτίου-μετατόπισης δοκιμίων <i>RA, RB</i> .....	151
Σχήμα 50: Διάγραμμα καμπυλών φορτίου-μετατόπισης δοκιμίων <i>RA1, RB1</i> .....	152
Σχήμα 51: Διάγραμμα καμπυλών φορτίου-μετατόπισης δοκιμίων <i>RA2, RB2</i> .....	152
Σχήμα 52: Συγκετρωτικό διάγραμμα αρχικού αναπτυσσόμενου φορτίου των δοκιμίων.....	154
Σχήμα 53: Συγκετρωτικό διάγραμμα μέσου αναπτυσσόμενου φορτίου των δοκιμίων.....	154
Σχήμα 54: Μικρογράφημα της ζώνης παραμόρφωσης Δοκιμίου <i>RA</i> .....	156
Σχήμα 55: Μικρογράφημα της ζώνης παραμόρφωσης Δοκιμίου <i>RB</i> .....	157
Σχήμα 56: Μικρογράφημα της ζώνης παραμόρφωσης Δοκιμίου <i>CA</i> .....	158
Σχήμα 57: Μικρογράφημα της ζώνης παραμόρφωσης Δοκιμίου <i>CB</i> .....	159
Σχήμα 58: Μικρογράφημα της ζώνης παραμόρφωσης Δοκιμίου <i>CC</i> .....	160
Σχήμα 59: Σχηματισμός σφήνας θρυμματισμένου υλικού .....	162
Σχήμα 60: Μέτωπο κατάρρευσης (crash-front) σωλήνα σύνθετου υλικού σε αξονική συμπίεση. ....	162



## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων.....	27
Πίνακας 2: Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού.....	35
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικές ιδιότητες των Ινών Kevlar .....	36
Πίνακας 4: Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών άνθρακα.....	39
Πίνακας 5: Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων ινών SiC (μέσες τιμές).....	41
Πίνακας 6: Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων και τριχιτών από SiC και Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	42
Πίνακας 7: Σύγκριση μεταλλικών_οργανικών μητρών. Συγκριτικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των πρώτων. ....	44
Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά παραδείγματα σύνθετων υλικών οργανικής μήτρας .....	50
Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά παραδείγματα σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας.....	50
Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά παραδείγματα σύνθετων υλικών κεραμικής μήτρας .....	51
Πίνακας 11: Τυπικές τιμές των παραμέτρων του μοντέλου των Halpin - Tsai για τα μέτρα ελαστικότητας των συνθέτων υλικών.....	60
Πίνακας 12: Ονομασία επιλεγμένων δοκών από σύνθετο υλικό και η διατομή τους .....	73
Πίνακας 13: Αποτελέσματα ελέγχου της δομής των δοκών SP1,SP2,SP3 .....	74
Πίνακας 14: Γεωμετρικές διαστάσεις των δοκιμίων.....	75
Πίνακας 15: Πίνακας πυκνοτήτων των κελυφών.....	76
Πίνακας 16: Συγκριτικός πίνακας SP4, SP5 κελύφων .....	153





# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Ασφάλεια οχήματος και επιβάτη

Το πρώτο θανατηφόρο αυτοκινητιστικό ατύχημα σημειώθηκε το 1889 στην πόλη της Νέας Υόρκης. Το γεγονός αυτό οδήγησε στη γέννηση ενός νέου πεδίου μελέτης, αυτό της αυτοκινητιστικής ασφάλειας. Κατά τη διάρκεια του περασμένου αιώνα, η ασφάλεια των επιβατών έχει καταστεί ένας σημαντικός σχεδιαστικός στόχος ανάμεσα σε όλα τα κριτήρια απόδοσης των μεταφορικών μέσων εδάφους. Οι κατασκευαστές συνειδητοποίησαν από νωρίς την ανάγκη τεκμηρίωσης της προστασίας των επιβατών, πριν το κοινό δεχθεί το αυτοκίνητο ως ένα βιώσιμο μέσο μεταφοράς. Υπάρχουν τρεις διακριτές περιόδους στην ιστορία της ανάπτυξης της ασφάλειας των αυτοκινήτων.

Η πρώτη περίοδος της ασφάλειας των αυτοκινήτων, από την αλλαγή του αιώνα μέχρι το 1935, ήταν μια περίοδος γένεσης, ανάπτυξης, και κατανόησης της εξαιρετικά σύνθετης διαδικασίας κατά την οποία συγκρούεται ένα όχημα. Η σύγκρουση είναι συνέπεια περιστάσεων που προκαλούν μη φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας του οχήματος. Ανεξάρτητα από το αν η σύγκρουση συμβαίνει με άλλο όχημα ή με ένα σταθερό εμπόδιο, η δομή του οχήματος υποβάλλεται σε δυνάμεις και παραμορφώσεις. Εάν οι δυνάμεις που ασκούνται κατά την κρούση, υπερβούν την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας της δομής του οχήματος, είναι πιθανό οι επιβαίνοντες να τραυματιστούν ή να σκοτωθούν.

Αυτή η πρώτη περίοδος επικεντρώθηκε σε βασικές βελτιώσεις, όπως η μείωση της αστοχίας των ελαστικών για την αποφυγή απώλειας ελέγχου του οχήματος, η ενσωμάτωση προβολέων για την ύπαρξη ορατότητας τη νύχτα, η εγκατάσταση πολυστρωματικού γυαλιού για μείωση των ρήξεων, και η υιοθέτηση μιας δομής αμαξώματος πλήρως κατασκευασμένη από χάλυβα, για την καλύτερη προστασία των επιβατών.

Κατά τη δεύτερη περίοδο (1936-1965), οι κατασκευαστές αυτοκινήτων εισήγαγαν πολλές συσκευές αποφυγής σύγκρουσης συμπεριλαμβανομένων των φλας, των υαλοκαθαριστήρων, των βελτιωμένων προβολέων, ενός τεστ προσομοίωσης των επιπτώσεων της σύγκρουσης της κεφαλής με το ταμπλό και παρμπρίζ υψηλά ανθεκτικά στη διείσδυση. Επιπλέον, η General Motors διεξήγαγε το πρώτο crash-test μετωπικής σύγκρουσης με εμπόδιο, οδηγώντας ένα όχημα σε έναν τοίχο αντιστήριξης. Οι πρώτες δοκιμές πρόσκρουσης ήταν αρκετά υποτυπώδης σε σχέση με τα σημερινά πρότυπα καθώς ούτε οι κούκλες ούτε τα ηλεκτρονικά όργανα είχαν αναπτυχθεί επαρκώς. Η εκτίμηση της απόδοσης της δομής του αυτοκινήτου βασίστηκε σε παρατηρήσεις του συγκρουόμενου οχήματος. Το πιο σημαντικό σύστημα ασφαλείας εκείνης της εποχής ήταν η εισαγωγή των ζωνών ασφαλείας το 1956.

Η τρίτη περίοδος ξεκινάει το 1966, όταν ο Πρόεδρος Lyndon Johnson υπέγραψε νόμο που αφορούσε τα μέτρα ασφαλείας στους Αυτοκινητόδρομους, και ενέκρινε τη δημιουργία ενός οργανισμού υπεύθυνου για την οδική ασφάλεια στις Εθνικές οδούς (National Highway Traffic Safety Administration). Η περίοδος που ακολούθησε χαρακτηρίζεται απ' την επιβολή πολλών προτύπων ασφαλείας γνωστά στην ξένη βιβλιογραφία ως Federal Motor Vehicle Safety Standards (FMVSS). Τα πρότυπα αυτά ρυθμίζουν διάφορες πτυχές τόσο της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας των οχημάτων όσο και της αποφυγής ατυχημάτων.

Είναι ενδιαφέρον ότι πολύ πριν το 1966 η ασφάλεια των επιβατών είχε γίνει αναπόσπαστο κομμάτι της διαδικασίας ανάπτυξης ενός οχήματος. Η Βελτίωση της ασφάλειας των οχημάτων τις τελευταίες επτά δεκαετίες έχει επικεντρωθεί κυρίως στην τεχνολογία αποφυγής συγκρούσεων, στην αντοχή των κατασκευών σε αυτές και στην προστασία των



επιβατών. Οι νέες τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν μαζί με τους βελτιωμένους αυτοκινητόδρομους και την καλύτερη εκπαίδευση των οδηγών συνέβαλλαν στην εντυπωσιακή μείωση του ποσοστού των θανατηφόρων ατυχημάτων. [1,2,3]



Σχήμα 1: Τυπικό αμάξωμα [4]

### 1.2 Ικανότητα απορρόφησης ενέργειας (Crashworthiness)

Η αντοχή των οχημάτων σε συγκρούσεις αλλά και η ασφάλεια των επιβατών συνεχίζει να απασχολεί σε μεγάλο βαθμό την αυτοκινητοβιομηχανία. Στην αρχή της εξέλιξης του crashworthiness, κατασκευάζονταν αμαξώματα από ξύλο με σκοπό να αποφευχθούν, όσο το δυνατόν περισσότερο, οι παραμορφώσεις των οχημάτων. Κατά το πέρασμα των χρόνων η δομή του αμαξώματος εξελίχθηκε περιλαμβάνοντας προοδευτικές ζώνες παραμόρφωσης (progressive crush zones), οι οποίες απορροφούν μέρος της κινητικής ενέργειας που εμφανίζεται κατά την πλαστική παραμόρφωση. Σήμερα, τα αμαξώματα κατασκευάζονται κατά κύριο λόγο από πάνελ χάλυβα και συναρμολογούνται χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές. Οι σχεδιαστές δημιουργούν οχήματα έχοντας ως κύριο μέλημα την προστασία των επιβατών. Έτσι όχι μόνο διατηρούν την ακεραιότητα της καμπίνας, αλλά παράλληλα ελέγχουν η στιγμιαία επιβράδυνση κατά τη σύγκρουση να βρίσκεται κάτω απ' το ανώτατο όριο της ανθρώπινης ανοχής. Επομένως, στόχος του crashworthiness είναι η βελτιστοποίηση της δομής του οχήματος ώστε να μπορεί να απορροφά την ενέργεια της σύγκρουσης μέσω της ελεγχόμενης παραμόρφωσης του οχήματος, διατηρώντας παράλληλα αρκετό χώρο ώστε η εναπομένουσα ενέργεια της σύγκρουσης να διαχειρίζεται αποτελεσματικά, ελαχιστοποιώντας τα φορτία που μεταφέρονται στους επιβάτες.

Σε πραγματικές συνθήκες οι συγκρούσεις οχημάτων αποτελούν μοναδικά δυναμικά φαινόμενα, όπου ένα όχημα μπορεί να συγκρουστεί με ένα άλλο ίδιου ή διαφορετικού σχήματος, μάζας και δυσκαμψίας ή να συγκρουστεί με ένα ακίνητο αντικείμενο. Γενικά, για την βελτιστοποίηση του αμαξώματος, οι εμπειρογνώμονες στα θέματα ασφαλείας τις ταξινομούν σε μετωπικές, πλευρικές, οπίσθιες ή ανατροπής. Επιπλέον, παράγοντες όπως το

ότι συμβαίνουν μέσα σε ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων και σε κλάσματα δευτερολέπτων, απεικονίζουν μερικές από τις σύνθετες διεργασίες που εμπλέκονται στο σχεδιασμό ενός οχήματος που ικανοποιεί τους περιορισμούς αντοχής σε σύγκρουση για κάθε πιθανό σενάριο.[4,5]



Σχήμα 2: Προσομοίωση σύγκρουσης οχήματος σε ακίνητο εμπόδιο

### 1.3 Ικανότητα απορρόφηση ενέργειας των Σύνθετων Υλικών

#### Γενικά

Οι περισσότερες από τις εργασίες που έχουν γίνει σχετικά με την μελέτη της ικανότητας προς απορρόφηση ενέργεια των σύνθετων υλικών έχουν επικεντρωθεί στην ανάλυση της αξονικής καταπόνησης λεπτότοιχων δομικών στοιχείων από σύνθετο υλικό, λόγω του ότι η αξονική κρουστική καταπόνηση εξασφαλίζει την πιο αποτελεσματική μελέτη συστημάτων απορρόφησης ενέργειας. Ωστόσο, σε πραγματικές συνθήκες δυναμικής καταπόνησης (για παράδειγμα η περίπτωση σύγκρουσης δύο οχημάτων), οι κατασκευές που συχνά αστοχούν με τέτοιο τρόπο που καταδεικνύεται σαφώς ότι έχουν υποστεί επιπλέον και καμπτική φόρτιση. Συνεπώς, η μελέτη και κατανόηση της συμπεριφοράς των λεπτότοιχων κελυφών από σύνθετα υλικά σε κάμψη είναι επίσης σημαντική και απαραίτητη. Οι δοκιμές στατικής αξονικής καταπόνησης μπορούν να πραγματοποιηθούν σε υδραυλικές πρέσες με πού μικρές ταχύτητες (τα δοκίμια τοποθετούνται μεταξύ των δύο χαλύβδινων εμβόλων) ενώ για τις αντίστοιχες δυναμικές δοκιμές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σφύρες πίπτουσας μάζας ή κρουστικές σφύρες.

#### Στοιχεία θεωρίας

Σε μια δοκιμή αξονικής καταπόνησης η ενέργεια η οποία απορροφάται από το δοκίμιο κατά την διαδικασία αστοχίας και κατάρρευσής του μπορεί να υπολογιστεί μετρώντας το εμβαδό κάτω από την αντίστοιχη καμπύλη φορτίου/βράχυνσης δοκίμιου (μετατόπιση). Αρχικά το αντικείμενο παραμορφώνεται ελαστικά ενώ το φορτίο αυξάνεται με σταθερό ρυθμό, σχεδόν γραμμικά, μέχρι μία μέγιστη τιμή  $P_{max}$ . Το μέγεθος της μέγιστης αυτής τιμής εξαρτάται από

την γεωμετρία του κελύφους και τα χαρακτηριστικά του υλικού. Με την προσέγγιση της τιμής αυτής το φορτίο εμφανίζει απότομη πτώση. Καθώς συνεχίζεται η παραμόρφωση, η μορφή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης εξαρτάται από τον τρόπο κατάρρευσης της κατασκευής και τις συνθήκες φόρτισης.

Γενικώς, για την καταγραφή της ικανότητας προς απορρόφηση ενέργειας ενός αξονικά καταπονούμενου κελύφους λαμβάνεται ως μέγεθος μέτρησης και σύγκρισης η ειδική **ενέργεια απορρόφησης (specific energy),  $W_s$** . Αυτή ορίζεται σαν ο λόγος της ενέργεια που απορροφά το κέλυφος κατά την κατάρρευση του  $W$ , προς τη μάζα του υλικού που έχει αστοχήσει,  $m_c$ , η οποία υπολογίζεται από τον αντίστοιχο όγκο  $V_c$  πολλαπλασιαζόμενο με την πυκνότητα του υλικού  $\rho$ . [6,7]

#### 1.4 Ιστορική Εξέλιξη των Σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ευρύτατα από τον άνθρωπο από αρχαιοτάτων χρόνων. Υλικά που εύκολα βρίσκουμε στη φύση (ξύλο, πέτρα, πηλός, κόκαλα) χρησιμοποιήθηκαν ευρύτατα από τον άνθρωπο, ο οποίος έμαθε σύντομα να βελτιώνει τις ιδιότητές τους με το να τα ενισχύει με πρόσθετα υλικά.

Για παράδειγμα, οι Αιγύπτιοι (5000 π.Χ.) χρησιμοποιούσαν την τεχνική της ενίσχυσης τούβλων πηλού με πλέγμα άχυρων, με αποτέλεσμα τη μείωση των τάσεων συστολής που αναπτύσσονταν κατά την ξήρανση του πηλού. Επίσης, παρατήρησαν ότι οι πλάκες από πολύστρωτες βέργες ξύλου, παρουσίαζαν πολύ μεγαλύτερη αντοχή από το φυσικό ξύλο έναντι στρέβλωσης που οφειλόταν στην απορρόφηση υγρασίας.

Γύρω στο 1100 π.Χ. στη Μεσοποταμία, εφαρμόστηκε το βερνίκωμα των τούβλων και πλακιδίων για περιορισμό της επιφανειακής φθοράς, ενώ, κατά τους Ρωμαϊκούς χρόνους, η οδοποιία στηρίχθηκε στην ενίσχυση του οδοστρώματος με τρίμματα κεραμιδιών.

Η ανάμειξη γύψου με ζωικό τρίχωμα ήταν μία πολύ πρακτική μέθοδος ενίσχυσης εύθραυστων υλικών κατασκευής, σε αναπτυσσόμενους πολιτισμούς. Η χρήση της σιδηρόβεργας για προεντεταμένο σκυρόδεμα της σύγχρονης εποχής δεν είναι παρά η μετεξέλιξη αυτής της τεχνικής.

Το πρώτο σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού εμφανίστηκε γύρω στο 1920. Αποτελείται από ένα μείγμα ινιδίων ξύλου με φαινολική φορμαλδεύδη και έγινε γνωστό με το όνομα βακελίτης, από το Βέλγο επιστήμονα Leo Baekeland. [8]

#### Έναρξη της σύγχρονης βιομηχανίας Σύνθετων Υλικών

Αν και τα σύνθετα υλικά, όπως προαναφέρθηκε, έχουν παρατηρηθεί σε διάφορες μορφές στην ιστορία της ανθρωπότητας, η ιστορία των σύγχρονων σύνθετων πιθανώς να ξεκίνησε το 1937, όταν πωλητές της εταιρίας *Owens Corning Fiberglass* άρχισαν να πουλάνε σύνθετα από *Fiberglass* στις Ηνωμένες Πολιτείες. Τέτοιου είδους υλικά είχαν παρασκευαστεί σχεδόν τυχαία το 1930, όταν ένας μηχανικός παρατήρησε να σχηματίζεται μία ίνα γυαλιού κατά τη διαδικασία τοποθέτησης ετικετών σε γυάλινα μπουκάλια. Η εταιρία *Owens Corning Fiberglass* ιδρύθηκε το 1935 από τους Owens-Illinois και προσπάθησε να επωφεληθεί από αυτή τη νέα μορφή ίνας. Μία Ιαπωνική εταιρία (*Nitto Boseki*) είχε επίσης κατασκευάσει τέτοιου είδους σύνθετα υλικά και έκανε προσπάθεια για είσοδο στην αγορά σε Κίνα και Ηνωμένες Πολιτείες.

Στη συνέχεια παρατηρήθηκε ότι η βιομηχανία αεροσκαφών θα μπορούσε να αποτελέσει πιθανό πελάτη για αυτό το νέο είδος υλικού, καθώς πολλές μικρές και φιλόδοξες αεροπορικές εταιρίες έμοιαζαν να ενδιαφέρονται για τη σχεδίαση νέων αεροσκαφών χρησιμοποιώντας καινοτόμες ιδέες, που απαιτούσαν την ανάπτυξη νέων υλικών.

Η εταιρία *Douglas Aircraft* αγόρασε πρώτη μία ποσότητα fiberglass, καθώς είχαν πιστεί πως θα τους βοηθήσει να λύσουν προβλήματα κατά τη διαδικασία παραγωγής. Μέχρι τότε χρησιμοποιούσαν μεταλλικά καλούπια κατά τη διαμόρφωση σχήματος των μεταλλικών ελασμάτων. Όμως κάθε αλλαγή στο σχεδιασμό αεροσκαφών απαιτούσε νέα μεταλλικά καλούπια, κάτι που ήταν οικονομικά ασύμφορο και χρονοβόρο. Οι μηχανικοί της *Douglas company* προσπάθησαν να χρησιμοποιήσουν πλαστικά καλούπια, τα οποία όμως δεν

μπορούσαν να αντέξουν τις δυνάμεις που αναπτύσσονταν κατά τη διαδικασία της σφυρηλάτησης. Τότε γεννήθηκε η ιδέα να τα εμπλουτίσουν με ίνες γυαλιού. Με αυτόν τον τρόπο κατάφεραν να κατασκευάσουν καλούπια που άντεχαν για τη δημιουργία μικρών ποσοτήτων τεμαχίων, αρκετά όμως για να μπορεί να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα των νέων σχεδίων. Εάν τα μέρη ήταν αποδεκτά, τότε κατασκευαζόταν η μεταλλική μήτρα για την μαζική παραγωγή.

Ακολούθησαν, όπως ήταν φυσικό και άλλες εφαρμογές πάνω σε εξοπλισμό αεροσκαφών. Πολλά απ' τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση και συγκράτηση τμημάτων αεροσκαφών απαιτούν να είναι ισχυρά, λεπτά και συχνά με σύνθετες καμπύλες. Τα μέταλλα δεν ανταποκρίνονται εύκολα σε αυτά τα κριτήρια, κάτι που οδηγεί πολλές βιομηχανίες στην χρήση των σύνθετων.

Λίγο αργότερα, οι ακόρεστες πολυεστερικές ρητίνες έγιναν διαθέσιμες στην αγορά και τελικά οι προτιμώμενες, λόγω της ευκολίας στην παρασκευή τους σε σχέση με τις φαινολικές.

### **Εξέλιξη κατά τον Β' Παγκόσμιο πόλεμο**

Ο ρυθμός ανάπτυξης των σύνθετων υλικών, που ήταν ήδη γρήγορος, επιταχύνθηκε κατά τον Β' Παγκόσμιο πόλεμο. Όχι μόνο αυξήθηκε η χρήση τους με την αύξηση της παραγωγής των αεροσκαφών, αλλά διερευνήθηκαν και αναπτύχθηκαν νέα. Έτσι κατά την περίοδο του πολέμου «βγήκε» η βιομηχανία των Πολυμερών με ινώδη ενίσχυση (Fiber-reinforced plastic) από το εργαστήριο στην παραγωγή. Εναλλακτικά υλικά χρειαζόνταν για ελαφριές εφαρμογές σε στρατιωτικά αεροσκάφη. Οι μηχανικοί συνειδητοποίησαν γρήγορα τα επιπλέον οφέλη των σύνθετων πέραν του μικρού βάρους και της υψηλής αντοχής τους. Ανακαλύφθηκε ότι τα σύνθετα από fiberglass ήταν διάφανα σε ραδιοσυχνότητες και το συγκεκριμένο υλικό υιοθετήθηκε για χρήση στην προστασία εξοπλισμού ηλεκτρικών ραντάρ, στις ατράκτους κινητήρων και σε άλλες εφαρμογές. Για παράδειγμα, ένα απ' τα τελευταία μέρη ενός αεροσκάφους που σχεδιάζεται είναι οι αγωγοί του. Δεδομένου ότι όλα τα άλλα μέρη έχουν ήδη καθοριστεί, οι αγωγοί χρειαζόνταν να τοποθετηθούν γύρω από τα υπόλοιπα συστήματα με αποτέλεσμα την κατασκευή αγωγών περίπλοκης γεωμετρίας. Οι μεταλλικοί δύσκολα κατασκευάζονταν με τέτοιες διαμορφώσεις. Τα σύνθετα ήρθαν για να φέρουν τη λύση.

### **Η εποχή μετά τον Β' Παγκόσμιο πόλεμο**

Με τη λήξη του δεύτερου Παγκοσμίου πολλές εταιρίες που κατασκεύαζαν υλικά πολέμου αντιμετώπισαν σοβαρά προβλήματα καθώς έπρεπε να εισαχθούν σε νέες αγορές, διαφορετικών προϊόντων, χρησιμοποιώντας τις γνώσεις και τις τεχνικές που είχαν ήδη αναπτύξει. Μερικές απ' τις εφαρμογές πολέμου, μετατράπηκαν απευθείας σε εμπορικές, όπως για παράδειγμα η κατασκευή πλοίων από πολυεστέρα, ενισχυμένο με ίνες γυαλιού. Ήδη το 1948 είχαν κατασκευαστεί χιλιάδες εμπορικά πλοία. Το 1947 κατασκευάστηκε η πρώτη άτρακτος αυτοκινήτου κατασκευασμένη ολοκληρωτικά από σύνθετα υλικά. Αυτό το όχημα οδήγησε στη συνέχεια στην κατασκευή της Corvette το 1953.

Αυτή τη περίοδο ο Brandt Goldsworthy, που συχνά αναφέρεται ως «πατέρας των σύνθετων» ανέπτυξε νέες διαδικασίες κατασκευής και νέα προϊόντα. Του αναγνωρίζονται αρκετοί νεωτερισμοί συμπεριλαμβανομένης της πρώτης σανίδας του surf από fiberglass, που έφερε

επανάσταση στο άθλημα. Ο Goldsworthy εφηύρε επίσης μια διαδικασία κατασκευής γνωστή ως pultrusion (μορφοποίηση με εμβάπτιση).

### **Τα σύνθετα στην Αεροναυπηγική Βιομηχανία.**

Η Αεροναυπηγική βιομηχανία είχε ήδη ξεκινήσει να κυριαρχεί το 1950 με αποκορύφωση το 1960 που έδωσε μία νέα ώθηση στην ανάπτυξη των σύνθετων υλικών. Ο Richard Young της εταιρίας *W. M. Kellogg* ξεκίνησε να εφαρμόζει την τεχνική filament winding για την κατασκευή μικρών πυραυλοκινητήρων, ενώ το 1961 ο A. Shindo παρέλαβε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την πειραματική παραγωγή της πρώτης ίνας από άνθρακα (carbon fiber), κάτι που εκμεταλλεύτηκε λίγα χρόνια μετά η *Courtaulds Ltd* παράγοντας τις πρώτες εμπορικά βιώσιμες ίνες άνθρακα.

### **Η πρόοδος συνεχίζεται μέχρι σήμερα**

Περίπου το 1970 η βιομηχανία των σύνθετων άρχισε να «ωριμάζει». Καλύτερες πλαστικές ρητίνες και ενισχυτικές ίνες αναπτύχθηκαν. Η Dupont ανέπτυξε μια ίνα από αραμίδιο, που είναι γνωστή ως Kevlar. Αυτή η ίνα έχει γίνει η πιο συνηθισμένη σε οπλισμούς εξαιτίας της υψηλής αντοχής της σε εφελκυσμό.

Η βιομηχανία σύνθετων εξελίσσεται συνέχεια, με μεγάλο μέρος της ανάπτυξης να επικεντρώνεται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών θέτουν συνέχεια καινούργια όρια σε μέγεθος και απαιτούν προηγμένα υλικά, κατάλληλο σχεδιασμό και κατασκευή.

Σήμερα, τα σύνθετα υλικά απευθύνονται σε όλες τις βιομηχανίες. Σύμφωνα με τα τελευταία στοιχεία του SPI Composites Institute, το μεγαλύτερο μερίδιο στην αγορά εξακολουθεί να έχει η βιομηχανία των μεταφορών (31%), αν και η κατασκευαστική (19.7%), ηλεκτρικού/ηλεκτρονικού εξοπλισμού (9.9%), των καταναλωτών (5,8%) και του εξοπλισμού επιχειρήσεων έχουν εξίσου μεγάλο. Η Βιομηχανία αεροσκαφών/αεροδιαστημικής κατέχει ένα μικρό μερίδιο της τάξης 0.8%, προκαλώντας έκπληξη μιας και έπαιξε σημαντικό ρόλο για την ανάπτυξή τους. [9,10,11]

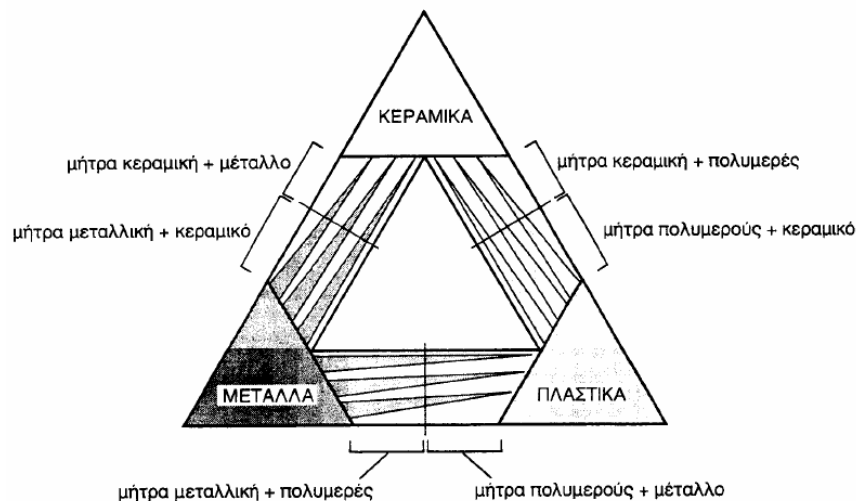


## 2. ΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

## 2.1 Εισαγωγή

Έχουμε συνηθίσει να κατατάσσουμε τα υλικά σε μεταλλικά, κεραμικά και οργανικά. Η διάκριση μεταξύ των τριών αυτών κατηγοριών ομοιογενών υλικών, με βάση τη χημική σύσταση, τη δομή και τις ιδιότητες, φυσικές και μηχανικές, είναι σαφής. Ωστόσο, από αρχαιοτάτων χρόνων γίνεται χρήση υλικών, των οποίων η κατάταξη σε μια από τις τρεις κατηγορίες δεν είναι δυνατή. Θα ήταν άραγε ορθή η εξέταση του σπλισμένου σκυροδέματος, που χρησιμοποιείται ευρέως στην οικοδομική, ως κεραμικού υλικού; Η δομή και οι μηχανικές ιδιότητες του ξύλου περιγράφονται ικανοποιητικά, αν αυτό εξεταστεί ως οργανικό υλικό; Εξετάζοντας τα οστά του ανθρώπινου σώματος, σε ποια από τις τρεις κατηγορίες θα μπορούσαμε να τα κατατάξουμε;

Αν θεωρήσουμε ότι οι τρεις κλασικές κατηγορίες υλικών καταλαμβάνουν τις κορυφές του τριπόλου εξέλιξης των υλικών, ο συνδυασμός ανά δύο των υλικών, οδηγεί σε οικογένειες νέων. (βλ. σχήμα 3)



Σχήμα 3: Τρίπολο εξέλιξης υλικών

Παρά τη πολύχρονη χρήση τέτοιων υλικών, για τα οποία έχει υιοθετηθεί ο όρος σύνθετα υλικά (composites), η εξέτασή τους από την επιστήμη της τεχνολογίας των υλικών, ως ξεχωριστού κεφαλαίου, είναι υπόθεση των τελευταίων χρόνων.

Για ένα σύστημα ο όρος “σύνθετο” σημαίνει ότι αυτό αποτελείται από δύο ή περισσότερα διακριτά μέρη. Από γενική άποψη, λοιπόν, ένα υλικό αποτελούμενο από δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά ή φάσεις, μπορεί να χαρακτηριστεί ως σύνθετο υλικό (composite material).

Πιο ειδικά, σήμερα, ως σύνθετα αναγνωρίζονται εκείνα τα υλικά, τα οποία συντίθενται από επιμέρους υλικά με σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους, ενώ και το ίδιο το σύνθετο υλικό έχει επίσης σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των συστατικών του.

Για να καταταχθεί ένα υλικό στην κατηγορία των σύνθετων, θα πρέπει να ακολουθεί τον εξής κανόνα:



Το υλικό πρέπει να προκύπτει ως συνδυασμός συστατικών μερών, στα οποία οι ιδιότητες του ενός από τα μέρη αυτά να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από του άλλου (τουλάχιστον 5πλάσιες) και η κατ' όγκο περιεκτικότητα του ενός να μην είναι πολύ μικρή (> 10 %).

**ΟΡΙΣΜΟΣ** (Agarwal–1990): *Σύνθετα είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια 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.

Τα σύνθετα υλικά θα πρέπει ακόμη να παρασκευάζονται με φυσική ανάμειξη διακεκριμένων υλικών, έτσι ώστε ο διασκορπισμός του ενός μέσα στο άλλο να είναι ελεγχόμενος προς επίτευξη βέλτιστων ιδιοτήτων.

## 2.2 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών

Ανάλογα με τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

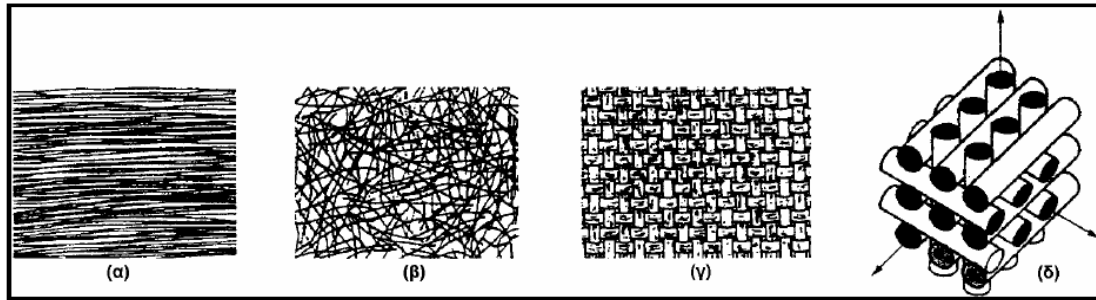
1. Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών (fibrous composites)
2. Σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων (particulate composites)
3. Στρωματικά σύνθετα υλικά (laminated composites)

### 2.2.1 Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών (fibrous composites)

Η μηχανική αντοχή των σύνθετων υλικών, που δεν ισούται πάντοτε με το μέσο όρο των αντοχών των δύο συστατικών, εξαρτάται από το υλικό της ενίσχυσης, το υλικό της μήτρας, τη μηχανική συμπεριφορά των δυο, αλλά και από τη μεταξύ τους «συμβατότητα», αφού η καλή συνάφεια ινών-μήτρας είναι καίριας σημασίας για την αντοχή του σύνθετου. Καθοριστικό, επίσης, παράγοντα για την αντοχή του σύνθετου αποτελεί η κατ' όγκον αναλογία των ινών και ο προσανατολισμός τους ως προς τη διεύθυνση της επιβαλλόμενης τάσης.

Ενδεικτικό της σπουδαιότητας των ινών είναι το γεγονός ότι ο προσανατολισμός και η διάταξη τους στη μάζα της μήτρας, αποτελεί κριτήριο για την ταξινόμηση των σύνθετων αυτής της κατηγορίας (βλ. σχήμα 4):

1. Στα μονοδιευθυντικά σύνθετα οι ίνες προσανατολίζονται προς την ίδια κατεύθυνση, ενώ
2. Στα πολυδιευθυντικά σύνθετα οι ίνες προσανατολίζονται προς διάφορες διευθύνσεις. Τα πολυδιευθυντικά σύνθετα υλικά διακρίνονται με τη σειρά τους, σε υλικά στα οποία:
  - Οι ίνες έχουν τυχαίες διευθύνσεις
  - Οι ίνες έχουν πλέξη ύφανσης
  - Οι ίνες έχουν τρισσορθογώνια ύφανση



Σχήμα 4: Τέσσερις τύποι διάταξης των ινών: (α) μονοδιευθυντικές ίνες (μονοαξονικό ύφασμα), (β) ίνες άτακτων διευθύνσεων (πίλημα), (γ) πλέξη ύφανσης (ύφασμα), (δ) ίνες σε τρισδιάστατη πλέξη (πεπλεγμένο ύφασμα)

Οι ίνες αποτελούν τον οπλισμό (ενίσχυση) του υλικού μήτρας και μπορεί να είναι μεγάλου ή μικρού μήκους σε σχέση με τη διάμετρό τους. Φυσικά, οι μεγάλοι μήκους ίνες μπορούν να ευθυγραμμιστούν πολύ πιο εύκολα εντός του υλικού της μήτρας, παρά οι μικρού μήκους. Οι ενισχυτικές ίνες μπορεί να είναι μεταλλικές (αλουμινίου, τιτανίου, χάλυβα), κεραμικές (γυαλιού, πυριτικές, ανθρακικές), ή και πολυμερικές (Kevlar, πολυδιακετυλενίου κ.α.). Κάθε υλικό σε ινώδη μορφή παρουσιάζει υψηλότερες τιμές αντοχής και δυσκαμψίας παρά σε οποιαδήποτε άλλη μορφή. Τούτο οφείλεται στο γεγονός της τελειότερης κρυσταλλικής δομής που εμφανίζεται σε μία ίνα. Η μείωση του μεγέθους συντελεί στατιστικά στην ελαχιστοποίηση των κρυσταλλικών ατελειών και κατά συνέπεια στην βελτίωση των ιδιοτήτων του υλικού.

Το υλικό μήτρας μπορεί να είναι μεταλλικό, κεραμικό ή οργανικό.

Πρόσφατα τεχνικές ανθρακοποίησης ή γραφίτοποίησης πολυμερών μητρών παράγουν σύνθετα μήτρας και οπλισμού από άνθρακα, με τη μοναδική ιδιότητα να αυξάνουν το μέτρο ελαστικότητας με αύξηση της θερμοκρασίας. Μοναδικός εχθρός τους το οξυγόνο και η χημική του δραστηριότητα, όταν το υλικό θερμαίνεται σε ατμόσφαιρα οξυγόνου.

### 2.2.2 Σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων (particulate composites)

Τα σύνθετα υλικά στα οποία το υλικό ενίσχυσης έχει μορφή σωματιδίων, σφαιρικού συνήθως σχήματος, μπορούν να καταταγούν σε δύο κατηγορίες με βάση το μέγεθος αυτών:

- Σύνθετα με ενίσχυση σωματιδίων μεγάλου μεγέθους (particulate composites). Τα σωματίδια έχουν διάμετρο λίγων  $\mu m$  και περιέχονται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 25% και συνήθως η κατ' όγκο συγκέντρωσή τους είναι 60-90%.
- Σύνθετα με ενίσχυση μικρών σωματιδίων σε διασπορά (dispersion strengthened metals). Η ενισχυτική φάση (συνήθως πρόκειται για οξειδία) περιέχεται στο σύνθετο σε συγκεντρώσεις μικρότερες από 15% κ.ο. Η διάμετρος των σωματιδίων ποικίλει μεταξύ 0.01 και 0.1  $\mu m$ . Η ισχυροποίηση της μήτρας επιτυγχάνεται με την παρεμπόδιση της κίνησης των διαταραχών, λόγω της παρουσίας των σωματιδίων ενίσχυσης.

Γενικά, τα σύνθετα με ενίσχυση σωματιδίων είναι λιγότερο ανθεκτικά από τα σύνθετα με ενίσχυση ινών, διότι η συμβολή των σωματιδίων στην αντοχή του σύνθετου υλικού είναι μικρότερη αυτής των ινών. Είναι χαμηλότερου κόστους σε σχέση με τα σύνθετα με ίνες και

έχουν καλύτερη αντοχή σε φθορά-τριβή λόγω της παρουσίας σκληρών σωματιδίων. Στον Πίνακα 2.2-2 φαίνονται χαρακτηριστικοί αντιπρόσωποι σύνθετων με ενίσχυση σωματιδίων και οι κυριότερες εφαρμογές τους.

ΜΗΤΡΑ	ΕΝΙΣΧΥΣΗ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Ag	CdO	Ηλεκτρικές επαφές υλικών
Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Πυρηνικοί αντιδραστήρες
Be	BeO	Αεροπορικές και πυρηνικές εφαρμογές
Co	ThO <sub>2</sub> , Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Μαγνητικό υλικό αντοχής σε ερπυσμό
Ni – 20% Cr	ThO <sub>2</sub>	Μέρη κινητικών μηχανών
Pb	PbO	Πλέγμα μπαταριών
Pt	ThO <sub>2</sub>	Νήματα, μέρη ηλεκτρικών συσκευών
W	ThO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub>	Νήματα, θερμαντικά σώματα
Co	WC	Αντιτριβικές εφαρμογές, κοπτικά εργαλεία

Πίνακας 1: Σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων

### 2.2.2.1 Μορφοποίηση σύνθετων υλικών με ενίσχυση σωματιδίων

Τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων παρασκευάζονται με μεθόδους κονιομεταλλουργίας: σκόνη από το υλικό της μήτρας αναμειγνύεται με ποσότητα σωματιδίων ενίσχυσης και το μείγμα υποβάλλεται σε έψηση.

Ευρεία είναι η χρήση της τεχνικής Laser με ταυτόχρονο ψεκασμό κεραμικής σκόνης σε μεταλλική επιφάνεια. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η δημιουργία επιφανειακού στρώματος σύνθετου υλικού με εξαιρετική αντοχή σε τριβή.

Από τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων, αυτά που βρίσκουν τις περισσότερες εφαρμογές είναι τα κεραμομεταλλικά (cermet).

Με το γενικό όρο cermet (cer- απ' το ceramic και met- από το metal) αναφερόμαστε σε σύνθετα υλικά, μεταλλικής μήτρας με ενίσχυση κεραμικών σωματιδίων (π.χ. WC, SiC). Τα υλικά αυτά βρίσκουν εφαρμογές κυρίως σε υλικά κοπής.

Η παραγωγή των cermet παρουσιάζει ορισμένες ιδιαιτερότητες. Πιο συγκεκριμένα, θα περιγραφεί η διαδικασία παραγωγής WC με 3-20% Co, που αποτελεί την κύριο αντιπρόσωπο της οικογένειας των cermet. Η έψηση του μείγματος σκόνης κοβαλτίου και σωματιδίων καρβιδίου του βολφραμίου γίνεται σε θερμοκρασία 1350-1500 C, ώστε να έχουμε τήξη του κοβαλτίου ( $T_{m,Co} = 1128 C$ ). Η μεταλλική υγρή φάση αντιδρά με τα σωματίδια του WC και λαμβάνεται κράμα, οι φάσεις του οποίου προβλέπονται από το αντίστοιχο διάγραμμα ισορροπίας.

Με τον τρόπο αυτό σχηματίζεται ευτηκτικό συστατικό Co-WC, στο οποίο διαλύονται τα καρβίδια του βολφραμίου. Κατά την απόψυξη που ακολουθεί, τα καρβίδια (WC), σε λεπτομερή διασπορά, κατακρημνίζονται στη μάζα της πλαστικής μήτρας (Co).

Κατά συνέπεια, ρωγμή που ξεκινά από σωματίδιο WC, αφού το διαπεράσει ταχύτητα μεταδίδεται προς τη μεταλλική μήτρα, η οποία απορροφά ενέργεια και παραμορφώνεται πλαστικά, καθυστερώντας, έτσι, την περαιτέρω διάδοση της ρωγμής. Το cermet αυτό έχει αντοχή σε θραύση περίπου  $15 \text{ MPa m}^{1/2}$ , ενώ αυτή του καρβιδίου του βολφραμίου είναι μόνον  $1 \text{ MPa m}^{1/2}$ .

### 2.2.3 Στρωματικά σύνθετα υλικά (laminar composites)

Τα στρωματικά σύνθετα υλικά περιλαμβάνουν μια μεγάλη ποικιλία συνδυασμού υλικών, τα οποία διατάσσονται σε διαδοχικές στρώσεις προκειμένου να συνθέσουν το τελικό προϊόν. Στα στρωματικά σύνθετα περιλαμβάνονται τα υλικά με μικρού και μεγάλου πάχους επιστρώματα (thin και thick coatings), τα διμεταλλικά (bimetallics) και τα πολυστρωματικά (multilayers) και sandwich υλικά.

#### 2.2.3.1 Επιστρωμένα Υλικά (coated materials)

Η δημιουργία επιστρωμάτων συνίσταται σε περιπτώσεις κατά τις οποίες είτε η κατασκευή ολόκληρου του αντικειμένου από το υλικό ενίσχυσης είναι οικονομικά ασύμφορη, είτε απαιτείται η «καρδιά» της κατασκευής να έχει διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες από την επιφάνεια.

Τα υλικά που φέρουν επιστρώσεις αποτελούν μια ιδιόμορφη κατηγορία σύνθετων υλικών. Η ενίσχυση που προσφέρει το επίστρωμα αφορά την επιφανειακή ενίσχυση του υλικού και πρόκειται, κυρίως, για βελτίωση της αντοχής του υποστρώματος σε διάβρωση και τριβή-φθορά.

Οι τεχνικές δημιουργίας επιστρωμάτων ποικίλουν σε ένα ευρύτατο φάσμα, ανάλογα με το υλικό ενίσχυσης. Για παράδειγμα, το χρώμιο, το νικέλιο και το κάδμιο αποτίθενται ηλεκτρολυτικά από υδατικά διαλύματα, επιψευδαργύρωση και επικασσιτέρωση πραγματοποιούνται με εμβάπτιση του αντικειμένου σε λουτρό τήγματος, κεραμικά επιστρώματα δημιουργούνται, κυρίως, με τεχνικές θερμού ψεκασμού κ.τ.λ.

Η δημιουργία των επιστρωμάτων πραγματοποιείται μετά από κατάλληλη προετοιμασία του υποστρώματος (π.χ. χημικός καθαρισμός, αμμοβολή, κ.λ.π.)

Τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει η τεχνολογία των επιστρωμάτων σχετίζονται με τη «συμβατότητα» των δύο υλικών:

(α) Τις περισσότερες φορές η αναποτελεσματική ενίσχυση του υποστρώματος οφείλεται σε ατέλειες της διεπιφάνειας επιστρώματος-υποστρώματος (οργανικές ακαθαρσίες, οξείδια και κακή συνάφεια). Τα προβλήματα αυτά αντιμετωπίζονται με τον καλό καθαρισμό της επιφάνειας πριν από την επίστρωσή της και με τη δημιουργία συνδετικού επιστρώματος, μικρού πάχους, το οποίο έχει πολύ καλή συνάφεια τόσο με το υπόστρωμα, όσο και με το επίστρωμα.

(β) Τα επιστρώματα που καλύπτουν υλικά τα οποία λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, υφίστανται αποφλοίωση, μικρορωγμάτωση και τελικά αστοχούν, όταν οι διαστασιακές μεταβολές των δύο μερών (επιστρώματος και υποστρώματος) δεν είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, στη θερμοκρασία λειτουργίας του σύνθετου.

(γ) Τέλος, μεγάλες διαφορές στις μηχανικές ιδιότητες των δύο μερών μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία του σύνθετου υλικού, κατά την καταπόνησή του.

### 2.2.3.2 Διμεταλλικά επιστρώματα

Σε αντίθεση με τα σύνθετα της προηγούμενης κατηγορίας, στα οποία το πάχος του επιστρώματος είναι πολύ μικρότερο αυτού του υποστρώματος, στα διμεταλλικά υλικά το πάχος των δύο μεταλλικών στρώσεων είναι της ίδιας τάξης μεγέθους.

Η συνένωση των δύο στρώσεων για την παραγωγή του διμεταλλικού γίνεται με συνέλαση, εκρηκτική συγκόλληση και συνδιέλαση. Στη διεπιφάνεια του παραγόμενου σύνθετου, η ανακατάταξη και η αναδιευθέτηση των ατόμων των δύο κρυσταλλικών πλεγμάτων τα οποία έρχονται σε επαφή, λόγω θέρμανσης ή πίεσης, εξασφαλίζει την καλή πρόσφυση των δύο στρώσεων.

Τα διμεταλλικά υλικά βρίσκουν τη σημαντικότερη εφαρμογή τους στη μέτρηση και τον έλεγχο της θερμοκρασίας. Η μεγάλη διαφορά στις τιμές του συντελεστή θερμικής διαστολής των δύο στρώσεων, η οποία στην περίπτωση των επιστρωμάτων ήταν αρνητικός παράγοντας, στην περίπτωση των διμεταλλικών υλικών είναι απαραίτητη προϋπόθεση.

### 2.2.3.3 Πολυστρωματικά και Sandwich υλικά

Τα πολυστρωματικά είναι υλικά πολλών διαδοχικών στρώσεων. Σχηματίζονται από την επανάληψη ενός στοιχειωδούς διαστρωματικού υλικού A/B, του οποίου το πάχος είναι καθορισμένο και ονομάζεται περίοδος. Η περίοδος των πολυστρωματικών μπορεί να ποικίλει από μερικά νανόμετρα ως δέκατα του χιλιοστού.

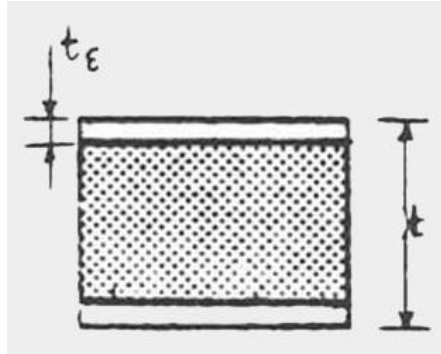
Όπως συμβαίνει και με τα σύνθετα με ενίσχυση ινών ή σωματιδίων, τα πολυστρωματικά σύνθετα προκύπτουν από το συνδυασμό μετάλλου-κεραμικού, μετάλλου-γυαλιού. Μετάλλου-πολυμερούς, αλλά και με το συνδυασμό μετάλλων διαφορετικών μηχανικών ιδιοτήτων. Πολύ γνωστά παραδείγματα πολυστρωματικών είναι η φορμάικα, υλικό που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην επιπλοποιία και το γυαλί ασφαλείας από το οποίο είναι κατασκευασμένα τα τζάμια των σύγχρονων αυτοκινήτων.

Τα πολυστρωματικά σύνθετα παρουσιάζουν έναν εξαιρετικό συνδυασμό ιδιοτήτων, που αποδίδεται στις πολλές διεπιφάνειες στο εσωτερικό του συνθέτου οι οποίες εμποδίζουν τόσο την κίνηση των διαταραχών όσο και καθαρά μέταλλα A και B.

Στην κατηγορία των πολυστρωματικών σύνθετων μπορούμε επίσης να κατατάξουμε επιστρωμένα υλικά, στα οποία το επίστρωμα έχει ομαλά μεταβαλλόμενη σύσταση, συναρτήσει της απόστασης από τη διεπιφάνεια υποστρώματος-επιστρώματος. Τα επιστρώματα με βάρθρωση σύστασης εμφανίζουν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με το αντίστοιχο επίστρωμα σταθερής σύστασης. Γενικά, πρόκειται για νέα υλικά, των

οποίων η μηχανική συμπεριφορά δεν έχει πλήρως διασαφηνιστεί και θεωρητικά τεκμηριωθεί.

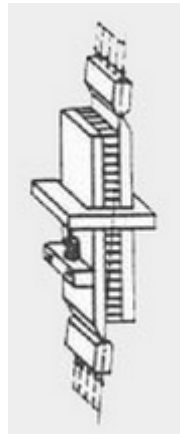
Δομικό στοιχείο από **sandwich** υλικό προκύπτει από τη σύνδεση, κόλληση ή συγκόλληση, δύο λεπτών επιδερμίδων (skin) υλικού υψηλών μηχανικών ιδιοτήτων, πάνω σε μία «καρδιά» ή «ψίχα» ελαφρού υλικού χαμηλών μηχανικών ιδιοτήτων, που καλείται υλικό πλήρωσης (filler material) και εξασφαλίζει τη διατήρηση της απόστασης μεταξύ των επιδερμίδων.



Σχήμα 5: Σχηματική παράσταση σύνθετου- sandwich t: πάχος sandwich,  $t_ε$ : πάχος επίστρωσης

Ο πυρήνας είναι από ελαφρό υλικό (συνήθετα Al, το οποίο είναι διαμορφωμένο σε κυψελοειδή γεωμετρία) που κύριο σκοπό έχει τη μεταφορά των διατμητικών τάσεων μεταξύ των δύο επιστρώσεων, οι οποίες με τη σειρά τους είναι από ισχυρότερο υλικό ανθεκτικό στις τάσεις εφελκυσμού και θλίψης εφαρμοσμένες στο επίπεδο τους.

Οι επιστρώσεις είναι κολλημένες στις κύριες επιφάνειες του πυρήνα με κατάλληλο τρόπο που εξαρτάται από τον τύπο του στρωματοειδούς.



Σχήμα 6: Δοκιμή αντοχής σε διάτμηση του κυψελοειδή πυρήνα

Το υλικό και το πάχος των επιστρώσεων, το υλικό του πυρήνα, το πάχος του πυρήνα, δηλ. η απόσταση μεταξύ των δύο επιστρώσεων και το επικολητικό μέσο, επιστρώσεων - πυρήνα, είναι οι παράμετροι που καθορίζουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σύνθετου αυτού.

Εάν η επικόλληση δεν είναι ιδανική, τότε υπάρχει περίπτωση να παύσει η συνεργασία των επί μέρους υλικών και επομένως να απολεσθούν τα αναμενόμενα μηχανικά χαρακτηριστικά του σύνθετου στρωματοειδούς.

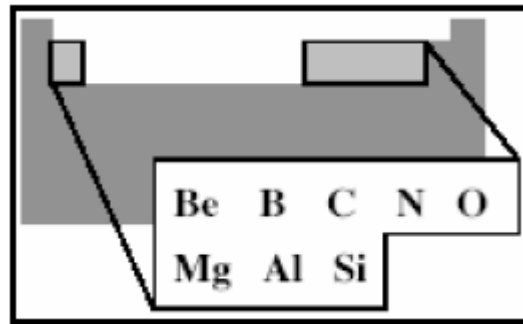
Σκοπός της επικόλλησης είναι να μην επιτρέπει σχετικές κινήσεις μεταξύ επιστρώσεων και πυρήνα καθώς και την παρεμπόδιση δημιουργίας ρυτιδώσεων στην επίστρωση κατά την εφαρμογή θλιπτικού φορτίου.

Οι επιστρώσεις γενικώς είναι πολύ λεπτές επιφάνειες (μεταλλικού ελάσματος, κοντραπλακέ, υαλοϋφάσματος κτλ.) και φυσικό είναι να παρουσιάζουν εξαιρετικά χαμηλή αντοχή σε όλα τα φορτία που δεν εφαρμόζονται στο επίπεδο τους και υψηλή αντοχή στα φορτία που εφαρμόζονται στο επίπεδο τους.

### 2.3 Τύποι ενισχυτικών Ινών

Προκειμένου οι ίνες να προσφέρουν ικανοποιητική ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας, το υλικό κατασκευής τους επιλέγεται, έτσι ώστε να παρουσιάζει υψηλό μέτρο ελαστικότητας ( $E$ ), υψηλή τάση θραύσης σε εφελκυσμό (UTS), μεγάλη ακαμψία (stiffness), χαμηλή δυσθραυστότητα (toughness) και επιπλέον να έχει μικρή πυκνότητα ( $\rho$ ).

Τα περισσότερα ενισχυτικά υλικά βασίζονται κυρίως σε στοιχεία που βρίσκονται στη 2<sup>η</sup> και 3<sup>η</sup> περίοδο του Περιοδικού Συστήματος (Βλ. Σχήμα 7).

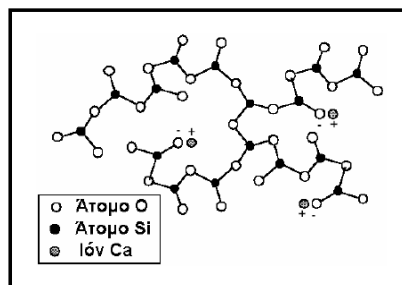


Σχήμα 7: Περιοδικός Πίνακας

#### 2.3.1 Ίνες Γυαλιού (Fiber Glass)

Στα σύνθετα υλικά πρώτης γενιάς (1940), ως ενισχυτικά χρησιμοποιήθηκαν ίνες γυαλιού. Η χρήση τους συνεχίζεται επιτυχώς μέχρι και σήμερα και, γενικά, θεωρούνται από τα πιο φθηνά ενισχυτικά υλικά. Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση, οι ίνες γυαλιού χαρακτηρίζονται ως τύπου E, R και S.

Χαρακτηριστική δομή του γυαλιού παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.

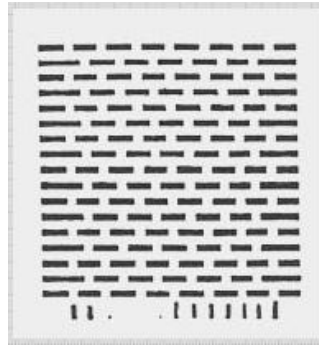


Σχήμα 8: Δομή Γυαλιού

**E-glass (E=electrical):** Πρόκειται για τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα υαλοήματα με καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, αντοχή και δυσκαμψία, καθώς και πολύ καλή συμπεριφορά στην αλλαγή των καιρικών συνθηκών, αλλά με μέτρια αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια. Ακόμη, έχουν γραμμική συμπεριφορά ελαστικότητας, η καμπύλη ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) είναι ευθεία γραμμή έως το σημείο θραύσης. Ευρίσκεται στο εμπόριο σε μεγάλη ποικιλία πλέξεων και είναι σχετικά το φθηνότερο ύφασμα για σύνθετες κατασκευές.

Χρησιμοποιείται στις αεροπορικές κατασκευές ως υλικό επικάλυψης, στην κατασκευή κύριων και δευτερευόντων δομικών στοιχείων, στην κατασκευή του ριναίου κώνου, κτλ.





Σχήμα 9: Αποτύπωμα πλέξης νημάτων 1 επάνω- 1 κάτω.

**C-glass (C=corrosion):** Υαλονήματα με υψηλή αντίσταση στη χημική διάβρωση, αλλά και με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις ίνες τύπου E, από τις οποίες όμως είναι ακριβότερες.

**S-glass (S=stiffness):** Έχει τις ίδιες περίπου ιδιότητες με το E-Υαλούφασμα αλλά υπερέρχει αυτού κατά 20% περίπου στην αντοχή και 15% στο μέτρο ελαστικότητας. Ο τύπος S-ΥΥ (ΥαλοΥφασμα) είναι ελαφρότερος από τον E-ΥΥ, παρουσιάζει μεγάλη αντοχή στην κρούση και κοστίζει περίπου τρεις φορές περισσότερο από τον E-ΥΥ.

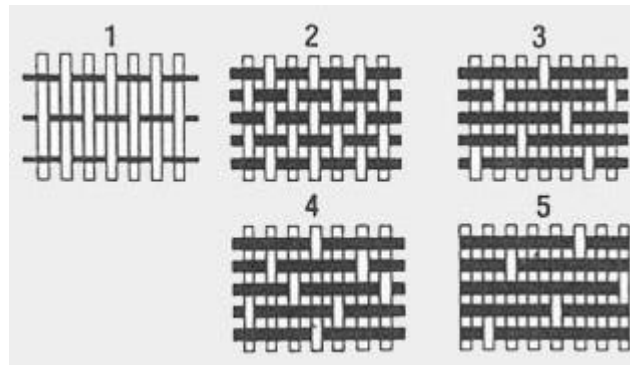
Στις αεροπορικές κατασκευές χρησιμοποιείται για κρίσιμα δομικά στοιχεία και σε συνδυασμό με το E-ΥΥ για εξωτερικές δεξαμενές, για δοχεία καυσίμων, για δοχεία υψηλής πίεσης, για ριναίους κώνους κτλ.



Σχήμα 10: Αποτύπωμα πλέξης νημάτων 4 επάνω – 1 κάτω.

**S2- glass:** Είναι παραλογή του S-ΥΥ με τα ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά αλλά είναι ποιοτικώς περισσότερο ευέλικτο και δεν ανταποκρίνεται ακριβώς στις προδιαγραφές MIL-SPEC. (United States Military Standard), όπως αντιθέτως συμβαίνει με τον τύπο S-ΥΥ.

Χρησιμοποιείται σε υβριδικές σύνθετες κατασκευές (συνδυασμός δύο ή περισσότερων διαφορετικών υφασμάτων, π.χ. (E-ΥΥ + S2-ΥΥ + Kevlar) / Εποξειδική, για δομικά στοιχεία που απαιτούν υψηλό μέτρο ελαστικότητας, για δοχεία υψηλής πίεσης και για τμήματα που καταπονούνται σε υψηλές θερμοκρασίες, διότι το S2-ΥΥ διατηρεί τις μηχανικές του ιδιότητες και άνω των 800 C.

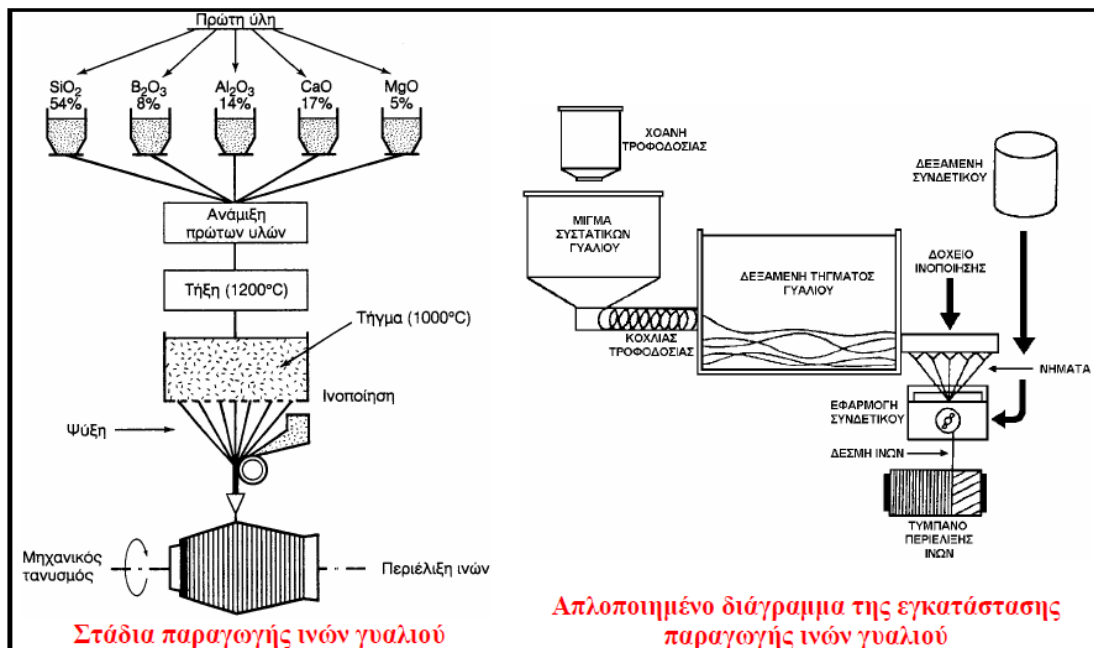


Σχήμα 11: Διάφοροι τύποι πλέξης νημάτων υαλοφάσματος: 1) Μονής διεύθυνσης, 2) Διπλής διεύθυνσης με απλή πλέξη 1 επάνω- 1κάτω, 3)τύπου HS1 επάνω-4 κάτω, 4) τύπου CrowFoot 1 επάνω- 3 κάτω, 5)τύπου BMS

Όταν περιέχονται μεγάλα ποσοστά  $SiO_2$  ( $> 99,5\%$ ) παρατηρούνται αυξημένες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων της ίνας και της μέγιστης θερμοκρασίας χρήσης του συνθέτου. Γι' αυτό το λόγο, σε ειδικές εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλές μηχανικές ιδιότητες κάτω από υψηλή θερμοκρασία, χρησιμοποιούνται ίνες από 100% καθαρή πυριτία.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των υαλονημάτων είναι το χαμηλό κόστος και η υψηλή αντοχή, ενώ στα κύρια μειονεκτήματα τους εντάσσονται το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας και η μικρή αντοχή τους έναντι φθοράς εκτριβής (λύση της συνέχειας της επιφάνειάς τους). Εγχαράξεις και εκδορές δημιουργούν περιοχές συγκέντρωσης τάσεων στην επιφάνεια της ίνας, με αποτέλεσμα την ταχεία υποβάθμιση των μηχανικών τους ιδιοτήτων και της ικανότητας πρόσφυσης τους στην πολυμερική μήτρα.

Η παραγωγή των ινών γυαλιού γίνεται με εκβολή τήγματος γυαλιού διαμέσου μήτρας με διάτρητο πυθμένα (βλ. Σχήμα 12) και περιλαμβάνει τις ακόλουθες φάσεις:



Σχήμα 12: Παραγωγή ενισχυτικών ινών γυαλιού τύπου E

- Η πρώτη ύλη τοποθετείται σε δεξαμενή, όπου τήκεται.
- Το τήγμα τροφοδοτείται σε σειρά κυλινδρικών δοχείων με διάτρητο πυθμένα (διάμετρος οπών 1 – 2 mm).
- Το γυαλί ρέει μέσα από τις οπές του πυθμένα υπό την επίδραση της βαρύτητας.
- Οι παραγόμενες ίνες συγκεντρώνονται σε ένα σύνολο και τανύονται μηχανικά μέχρις ότου αποκτήσουν την κατάλληλη διάμετρο ( $1 \div 15 \mu m$ ) και ακολουθεί ελαφρός ψεκασμός τους με νερό (ψύξη).
- Ακολούθως οι ίνες διέρχονται από ιμάντα που επιβάλλει σ' αυτές προστατευτικό λιπαντικό συνδετικό υλικό (binder) ή ειδικά κολλοειδή πρόσθετα (sizers) που δρουν ως προστατευτικές επικαλύψεις και συνεισφέρουν στην καλλίτερη πρόσφυση ινών-μήτρας.
- Τέλος, οι ίνες περιτυλίσσονται ανά δέσμες (strand ή end) των 204 νηματίων (τυπική τιμή) γύρω από τύμπανο, που περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα (της τάξης των 50 m/s).
- Οι ρόλοι υαλονήματος υφίστανται ξήρανση πριν υποβληθούν σε οποιαδήποτε περαιτέρω διεργασία μορφή

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΥΠΟΣ			
	E	C	S	SiO <sub>2</sub> Καθαρή
Χημική σύσταση (%)				
SiO <sub>2</sub>	54	60	65	> 99.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16	25	25	–
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8	–	–	–
CaO	17	9	10	–
MgO	5	6	10	–
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	75	80	84	72
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2100 – 3400	2500 – 4400	2800 – 4800	3500 – 8800
Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	2.54	2.50	2.48	2.20
Θερμοκρασία τήξης (C)	900 – 1200	1400 – 1600	1400 – 1600	1720
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (C)	550	650	650	750

Πίνακας 2: Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού

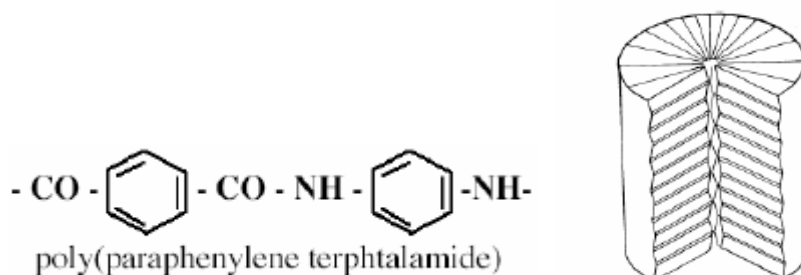
### 2.3.2 Ίνες Πολυμερούς (polymer fibers)

Οι πιο διαδεδομένες ίνες πολυμερούς είναι οι ίνες από Νυλον, πολυαιθυλένιο και Κevlar.

Δεν είναι παρά υπόθεση των τελευταίων χρόνων η Παρασκευή ινών αρωματικών πολυαμιδίων (αραμιδίων/aramide), οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ικανοποιητικά ως υλικό ενίσχυσης, υπερβαίνοντας το πρόβλημα της χαμηλής στιβαρότητας των συνθετικών πολυμερών. Το μέτρο ελαστικότητας των ινών αυτών είναι ίσο ή και υψηλότερο αυτού των ινών γυαλιού.

Η πρώτη υψηλής απόδοσης οργανική ίνα αραμιδίου παρασκευάστηκε από την DuPont και έγινε γνωστή με την εμπορική ονομασία Kevlar και παράγεται σε τρεις τύπους:

- Kevlar-29: Με μέτρο ελαστικότητας 60 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 3.6 GPa.
- Kevlar-49: Με μέτρο ελαστικότητας 120 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 3.6 GPa.
- Kevlar-149: Με μέτρο ελαστικότητας 180 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 3.4 GPa.



Σχήμα 13: Τύπος Αραμιδίου(δεξιά), Δομή ίνας Κevlar(αριστερά)

Η πυκνότητα και των τριών τύπων είναι ίδια ( $1.45 \text{ g/cm}^3$ ), ενώ η διαφορετική ελαστικότητα οφείλεται στο γεγονός της βελτιωμένης ευθυγράμμισης των μοριακών αλυσίδων, που αυξάνει την δυσκαμψία στη διεύθυνση του άξονα της ίνας. Στον Πίν. 2 παρατίθενται οι βασικές ιδιότητες των ινών Κevlar.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	Kevlar 29	Kevlar 49
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	60	130
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2700	3600
Πυκνότητα ( $\text{g/cm}^3$ )	4.5	2
Θερμοκρασία τήξης (C)	1.45	1.45
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (C)	200	200
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	400	425

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικές ιδιότητες των Ινών Κevlar

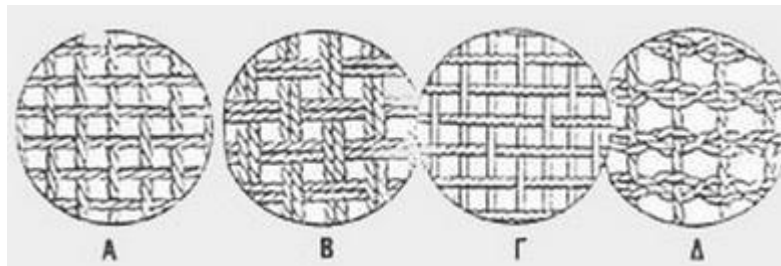
Οι ιδιότητες των ινών Kevlar και τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους δεν μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου και έχει κατά δέκα φορές περίπου μεγαλύτερη ειδική τάση από το αλουμίνιο.

Το Kevlar εμποτίζεται όπως και το υαλοϋφασμα με εποξειδικές ρητίνες αλλά το σύνθετο υλικό που αποκτάται είναι κατά 20% περίπου ελαφρύτερο από το αντίστοιχο με υαλοϋφασμα. Όλες οι μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου με Kevlar είναι πολύ καλές εκτός από την αντοχή του σε φορτία θλίψης όπου παρουσιάζει μικρές τιμές.

Για τέτοιου είδους φορτία γίνονται υβριδικές συνθέσεις υφασμάτων Kevlar και γραφίτη, ή υαλοϋφάσματος, με τις οποίες αποκτώνται οι επιθυμητές αντοχές.

Ακόμη έχει μεγαλύτερη αντοχή στην κρούση από το υαλοϋφασμα, μεγάλη αντοχή στην κόπωση, καλή αντίσταση στην ανάπτυξη ρωγμών και καλή απόσβεση των κραδασμών.

Χρησιμοποιείται στις αεροπορικές κατασκευές για την κατασκευή δομικών στοιχείων, για την κατασκευή ελίκων οι οποίες γίνονται ελαφρύτερες από τις αντίστοιχες του αλουμινίου και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στην κόπωση, όπως και στην κατασκευή πυραυλοκινητήρων με σημαντική μείωση του βάρους.



Σχήμα 14: Διάφοροι τύποι πλέξης υφάσματος Kevlar 49: α) Απλή πλέξη, β) Πλέξη Μπάσκετ, γ) Σατέν, δ) Λινό

### 2.3.3 Ίνες Άνθρακα (carbon fibers)

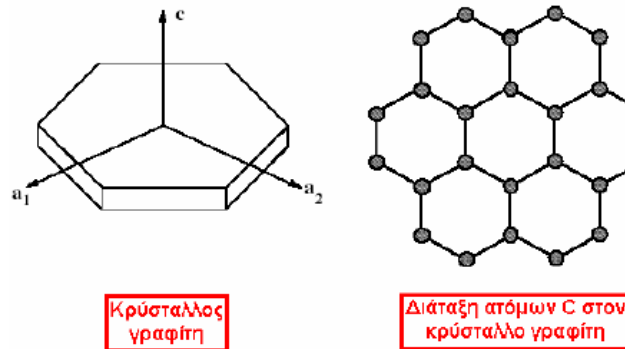
Οι ίνες άνθρακα ή γραφίτη καθώς και τα υφάσματά τους είναι υλικά (οργανικά) τα οποία χρησιμοποιούνται στις κατασκευές όπου απαιτείται υψηλή αντίσταση στην παραμόρφωση, δηλαδή υψηλή τιμή του ειδικού μέτρου ελαστικότητας .

Τα ανθρακονήματα έχουν περισσότερο από το διπλάσιο ειδικό μέτρο ελαστικότητας από εκείνο του Kevlar 49 και πάνω από τέσσερις φορές των υαλοϋφασμάτων.

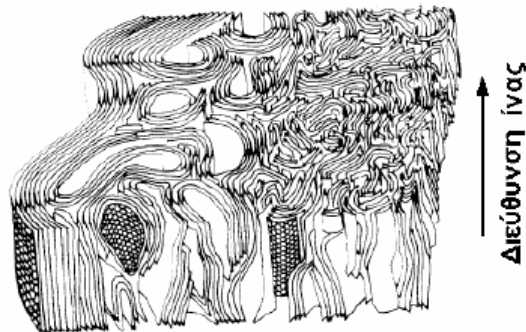
Η υπεροχή αυτή των ανθρακονημάτων οφείλεται στη φύση του άνθρακα (ως στοιχείου) και τους ενδοατομικούς δεσμούς που σχηματίζει με άλλα άτομα άνθρακα. Ο γραφίτης αποτελείται από ανισότροπους πολυκρυσταλλίτες, των οποίων η ανισοτροπία εξαρτάται από τις συνθήκες παρασκευής τους.

Αποτέλεσμα του ισχυρού προσανατολισμού των κρυσταλλιτών παράλληλα στο διαμήκη άξονα των ανθρακονημάτων είναι η υψηλή σιβαρότητα και αντοχή σε θραύση και ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής κατά τη διεύθυνση αυτή. Στη γραφιτική δομή τα άτομα C διατάσσονται πολύ πυκνά με τη μορφή εξαγωνικών επιπέδων (βλ. Σχήμα 15). Ο ισχυρός δεσμός μεταξύ των ατόμων C στις επίπεδες αυτές εξαγωνικές στρώσεις οδηγεί σε εξαιρετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Αντίθετα, ο ασθενής τύπου Van der Waals δεσμός

που υφίσταται μεταξύ γειτονικών στρώσεων, έχει ως αποτέλεσμα ένα χαμηλότερης τιμής μέτρο ελαστικότητας σε αυτή τη διεύθυνση.

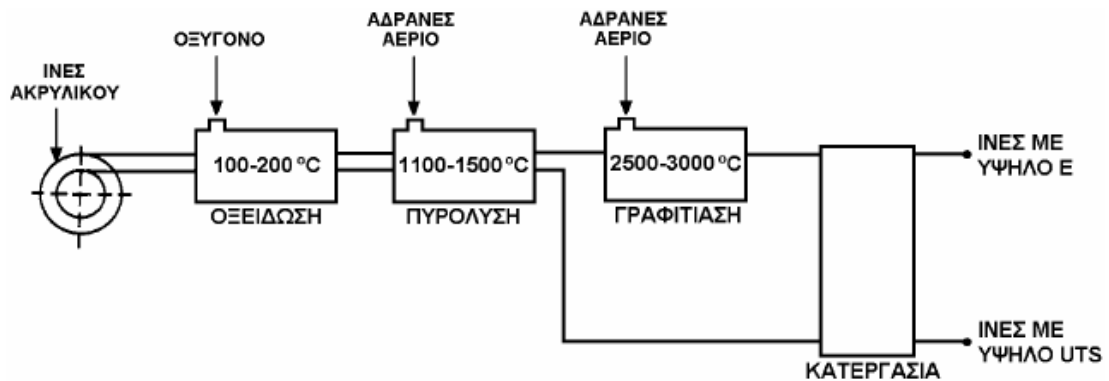


Σχήμα 15: Κρύσταλλος γραφίτη(αριστερά), Διάταξη ατόμων C (δεξιά)



Σχήμα 16: Τυπική δομή ανθρακονήματος, όπως έχει ληφθεί από μικροσκόπιο

Στην παραγωγή ανθρακονημάτων, ως πρώτη ύλη χρησιμοποιούνται πολυμερικές ίνες πολυακρυλονιτρίλιου (PAN), ίνες τεχνητής μέταξας (rayon) και πίσσα. Η παραγωγή ινών φραφίτη από ίνες (PAN) πραγματοποιείται σε τρία στάδια (Βλ. 17).



Σχήμα 17: Παραγωγή ενισχυτικών ινών άνθρακα

Συγκεκριμένα ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- Οξείδωση των ινών PAN στον αέρα και σε χαμηλή θερμοκρασία (100-200C), με ταυτόχρονη εφαρμογή τάσης, η οποία είναι απαραίτητη για την ευθυγράμμιση των αλυσίδων του πολυμερούς.
- Πυρόλυση, υπό τάση, σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα και σε θερμοκρασία 1100-1500 C. Οι παραγόμενες ίνες στο στάδιο χαρακτηρίζονται ως ίνες άνθρακα υψηλής αντοχής (high strength carbon fibers) και η αντοχή τους φτάνει τα 3000 MPa.
- Η θέρμανση σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα συνεχίζεται σε υψηλές θερμοκρασίες (2500-3000C), οπότε πραγματοποιείται γραφίτιωση, με ταυτόχρονη ανακρυστάλλωση, που οδηγεί σε ισχυρό προσανατολισμό των κρυσταλλιτών. Οι παραγόμενες ίνες σε αυτό το στάδιο χαρακτηρίζονται ως ίνες άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας (high module carbon fibers) και έχουν μέτρο ελαστικότητας περίπου 400 GPa, η δε διάμετρός τους είναι περίπου 10 μm.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	ΙΝΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	ΙΝΕΣ ΥΨΗΛΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	180-230	350-420
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2500-3400	1900-2300
% περιεκτικότητα σε άνθρακα	95-98	99
Πυκνότητα ( $g/cm^3$ )	1.8	1.9
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (C)	2000	2500

Πίνακας 4: Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών άνθρακα.

Είναι το ακριβότερο υλικό για σύνθετα, εφ' όσον κοστίζει περίπου πέντε φορές περισσότερο από το Kevlar, το οποίο με τη σειρά του κοστίζει περίπου τρεις φορές περισσότερο από το υαλοϋφασμα.

Η χρησιμοποίηση των ανθρακονημάτων και των υφασμάτων τους είναι πολύ δυσκολότερη από εκείνη των άλλων υφασμάτων, απαιτεί ειδικές μεθόδους εφαρμογής, μεγάλη εμπειρία, ειδικό τρόπο σχεδίασης ώστε να αποφεύγονται περιοχές συγκέντρωσης τάσεων και γνώσεις για υβριδικές συνθέσεις εφ' όσον θα χρειαστεί να συνδυαστούν οι ιδιότητες και τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά μετά αντίστοιχα άλλων υφασμάτων.

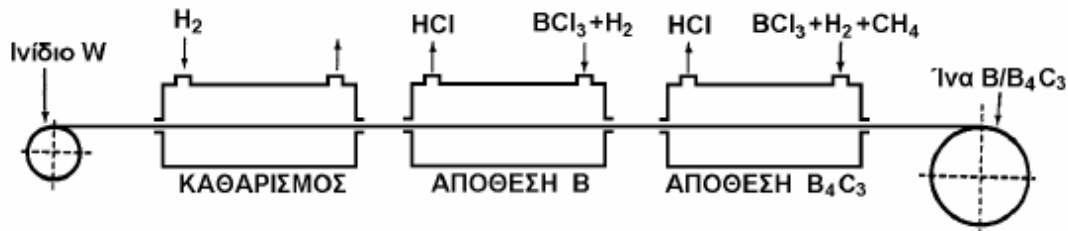
### 2.3.4 Μεταλλικές ίνες

Διάφορα μέταλλα όπως το βόριο (B), το βηρύλλιο (Be) και το βολφράμιο (W) θα μπορούσαν να αποτελέσουν εξαιρετικά ενισχυτικά συνθέτων υλικών, αφού παρουσιάζουν υψηλή τιμή ακαμψίας σε σχέση με το ειδικό βάρος τους (ειδική ακαμψία). Το βόριο είναι το περισσότερο υποσχόμενο υλικό για την κατασκευή ινών ενίσχυσης, ωστόσο οι τεχνικές παραγωγής μεταλλικών ινών ενίσχυσης εξακολουθούν να παραμένουν πολύ δαπανηρές.

Σήμερα χρησιμοποιούνται δύο τεχνικές για την παραγωγή ινών βορίου:

### Αναγωγή από αλογόνο του Βορίου

Αλογονίδιο του βορίου (συνήθως  $BCl_3$ ) ανάγεται από υδρογόνο σε έναν κλειστό θάλαμο υψηλής θερμοκρασίας (1100C) και αποτίθεται σε πολύ λεπτό νήμα βολφραμίου, διαμέτρου 10 – 15  $\mu m$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 18. Η διάμετρος των παραγόμενων ινών με αυτήν την τεχνική κυμαίνεται μεταξύ 100 ÷ 200  $\mu m$ , ενώ οι ίνες παρουσιάζουν εξαιρετική δυσκαμψία και μηχανική αντοχή.



Σχήμα 18: Παραγωγή ινών βορίου με αναγωγή αλογονιδίου του βορίου

### Απόθεση με τεχνική CVD

Το βόριο αποτίθεται σε νήμα άνθρακα ή βολφραμίου με την τεχνική της χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD). Η τεχνική αυτή είναι οικονομικότερη από την προηγούμενη, αλλά το προϊόν έχει χαμηλότερη μηχανική αντοχή.

Οι ίνες βορίου έχουν υψηλή μηχανική αντοχή ( $E = 300 \div 420 \text{ GPa}$ ,  $UTS = 3000 \div 3700 \text{ MPa}$ ), ενώ οι τιμές των ιδιοτήτων τους διατηρούνται σταθερές ως τους 500 οC. Για τη χρήση τους σε υψηλότερες θερμοκρασίες, θα πρέπει να χρησιμοποιείται προστατευτικό επίστρωμα καρβιδίου του πυριτίου (ίνες Borsic) ή νιτριδίου του βορίου. Τα επιστρώματα αυτά αποτρέπουν την αντίδραση του υλικού ενίσχυσης με αυτό της μήτρας, δεδομένου ότι σε υψηλές θερμοκρασίες, κυρίως σε σύνθετα με μεταλλική μήτρα τιτανίου ή αλουμινίου, ευνοούνται η διάχυση μέσω της διεπιφάνειας ίνας-μήτρας και οι αντιδράσεις σε στερεά κατάσταση που οδηγούν στο σχηματισμό εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων και αστοχία του συνθέτου.

### **2.3.5 Κεραμικές ίνες (ceramic fibers)**

Οι κεραμικές ίνες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή, στιβαρότητα και θερμική ευστάθεια. Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες κεραμικές ίνες είναι οι ίνες καρβιδίου του πυριτίου ( $SiC$ ) και αλούμινας ( $Al_2O_3$ ), ενώ σπανιότερα συναντώνται και ίνες  $Si_3N_4$ ,  $BeO$ ,  $B_4C$  και  $ZrO_2$ .

Το καρβίδιο του πυριτίου ( $SiC$ ) είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ως ενισχυτικό υλικό είτε με τη μορφή ινών είτε με τη μορφή φυλλιδίων. Οι ίνες  $SiC$  παρουσιάζουν υψηλές τιμές αντοχής και ανώτερες μηχανικές ιδιότητες από τα φυλλίδια.

### Μέθοδοι παραγωγής

- I. Με χημική εναπόθεση ατμών (CVD) χλωριούχου σιλανίου σε ίνες άνθρακα.  
Οι παραγόμενες ίνες έχουν πυρήνα διαμέτρου 10 ÷ 25  $\mu m$  και εξωτερική διάμετρο 100 ÷ 150  $\mu m$ .
- II. Από πολυμερικές ίνες (Nicalon).



Θέρμανση σε κενό σε θερμοκρασία 850 C μετατρέπει την πολυμερική ίνα σε ανόργανο  $SiC$ , ενώ θέρμανση σε υψηλότερη θερμοκρασία (>1000 C) προκαλεί κρυστάλλωση σε  $\beta - SiC$ . Οι παραγόμενες ίνες έχουν διάμετρο  $10 \div 15 \mu m$ .

III. Τριχιτές  $SiC$  από φλοιό ρυζιού.

Ο φλοιός του ρυζιού περιέχει ~15% κ.β.  $SiO_2$ .

Η Θέρμανση σε θερμοκρασία  $700 \div 900 C$  οδηγεί σε υπόλειμμα  $SiO_2$  και ελεύθερο άνθρακα, ενώ η Θέρμανση του υπολείμματος σε θερμοκρασία ~1500 C και σε περιβάλλον αζώτου ή αμμωνίας οδηγεί στο σχηματισμό  $SiC$ . Οι παραγόμενοι τριχιτές έχουν διάμετρο  $\sim 0.1 \div 1 \mu m$  και μήκος  $\sim 50 \mu m$ .

Μέθοδος \ Ιδιότητα	CVD	Nicalon	Τριχιτές
Πυκνότητα, $\rho$ ( $g/cm^3$ )	3.3	2.6	-
Αντοχή, UTS (MPa)	3500	2000	7000
Μέτρο ελαστικότητας, E (GPa)	430	180	480
Διάμετρος ίνας, d ( $\mu m$ )	140	15	<1

Πίνακας 5: Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων ινών  $SiC$  (μέσες τιμές)

Το  $SiC$  παρουσιάζει σταθερή μηχανική αντοχή ως τους 1400 C, ωστόσο η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρήσης του, περιορίζεται στους 900 C, λόγω της σημαντικής δραστηριότητας του πάνω από τη θερμοκρασία αυτή.

Οι μονοκρυσταλλικές ίνες αλούμινας ( $Al_2O_3$ ) διαμέτρου  $250 \mu m$  έχουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Λόγω της ισχυρής φύσεως των χημικών δεσμών, η σταθερότητα των μηχανικών τους ιδιοτήτων διατηρείται ως τους 800 C. Οι μονοκρυσταλλικές ίνες αλούμινας είναι εξαιρετικά ευαίσθητες έναντι επιφανειακής φθοράς που οδηγεί ταχύτατα σε αστοχία.

**2.3.6 Τριχιτές (Whiskers)**

Οι τριχιτές είναι νηματικοί μονοκρύσταλλοι που παράγονται με αποσύνθεση άλατος μετάλλου σε αναγωγική ατμόσφαιρα, κάτω από αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Η διάμετρος τους είναι της τάξης του  $1 \mu m$ , ενώ το μήκος τους μπορεί να φτάσει τα μερικά χιλιοστά και παρουσιάζουν τις μηχανικές ιδιότητες ενός τέλειου κρυστάλλου. Οι εξωτερικές τους επιφάνειες είναι λείες και δεν παρουσιάζουν ζώνες συγκέντρωσης τάσεων.

Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι τριχιτές είναι από αλουμίνα, γραφίτη, καρβίδιο του πυριτίου, βηρυλλία και νιτρίδιο του πυριτίου. Η παραγωγή τριχιτών σε βιομηχανική κλίμακα είναι δύσκολη.

Στον Πίνακα 6 γίνεται σύγκριση των ιδιοτήτων ινών και τριχιτών από  $SiC$  και  $Al_2O_3$ .

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	$SiC_{INA}$	$SiC_{ΤΡΙΧΙΤΗΣ}$	$Al_2O_3_{INA}$	$Al_2O_3_{ΤΡΙΧΙΤΗΣ}$
Μέτρο Ελαστικότητας ( $GPa$ )	480	840	500	755
Αντοχή σε εφελκυσμό ( $MPa$ )	2300	21000	2000	19500
Πυκνότητα ( $g/cm^3$ )	3.2	3.2	4.0	4.0
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης ( $C$ )	900	1600	800	1300

Πίνακας 6: Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων και τριχιτών από  $SiC$  και  $Al_2O_3$ 

### 2.3.7 Ίνες φυσικών ορυκτών

Αρκετά ορυκτά που βρίσκονται σε ινώδη ή φυλλώδη μορφή, μπορούν να αποτελέσουν φθηνό ενισχυτικό υλικό, αλλά χαμηλών προδιαγραφών. Ευρύτερα χρησιμοποιούμενα τέτοια ορυκτά είναι ο αμιάντος και η μαρμαρυγία (mica).

Οι ίνες αμιάντου αποτελούνται από 500 περίπου στοιχειώδη ινίδια, διαμέτρου  $\sim 20\text{ nm}$ , και έχουν διάμετρο  $\sim 10\text{ }\mu\text{m}$  και μήκος αρκετά  $cm$ . Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέχρι θερμοκρασία  $500\text{ }C$ , οπότε η μηχανική αντοχή του υλικού μειώνεται σημαντικά. Το μέτρο ελαστικότητας της ίνας είναι της τάξης των  $160\text{ GPa}$ , ενώ η μηχανική αντοχή μπορεί να φτάσει μέχρι  $5500\text{ GPa}$ . Ο αμιάντος λόγω του χαμηλού του κόστους χρησιμοποιείται ευρύτατα.

Οι μαρμαρυγίες ανήκουν στην κατηγορία των φυλλοπυριτικών ορυκτών, χαρακτηρίζονται από τέλειο σχισμό και αποχωρίζονται εύκολα από το πέτρωμα με μορφή φυλλιδίων, τα οποία χρησιμοποιούνται ως συστατικό ενίσχυσης του συνθέτου υλικού. Η αντοχή σε εφελκυσμό μπορεί να φτάσει μέχρι  $2500\text{ MPa}$  (τέλεια φυλλίδια), ενώ, λόγω ατελειών στις άκρες των φυλλιδίων, οι συνήθεις τιμές της αντοχής κυμαίνονται στην περιοχή  $700 \div 900\text{ MPa}$ . Το μέτρο ελαστικότητας των μαρμαρυγιών είναι περίπου  $220\text{ GPa}$  και η πυκνότητα τους  $2.8\text{ g/cm}^3$ .

## 2.4 Μήτρες (matrix)

Αν οι ίνες συνεισφέρουν στην υψηλή μηχανική αντοχή του σύνθετου, η μήτρα την εξασφαλίζει. Οι μηχανικές τάσεις που ασκούνται στο σύνθετο υλικό μεταφέρονται μέσω της μήτρας προς τις ίνες. Επιπλέον, η διάδοση των ρωγμών, που ξεκινούν από σπασμένες ίνες, ανακόπτεται από το υλικό της μήτρας.

Για να ικανοποιεί το ρόλο με τον οποίο είναι επιφορτισμένη, η μήτρα θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ολκιμότητα, ανθεκτικότητα, σχετική ευκαμψία και, φυσικά, θα πρέπει το σημείο τήξης της να είναι υψηλότερο της μέγιστης θερμοκρασίας λειτουργίας σύνθετου υλικού. Οι πιο πάνω ιδιότητες θα πρέπει να παρουσιάζουν «συμβατότητα» με αυτές των ενισχυτικών ινών. Τέλος, για τη σωστή λειτουργία του σύνθετου υλικού, καθοριστικός παράγοντας είναι η καλή πρόσφυση ίνας-μήτρας. Στα προηγμένα υλικά οι μήτρες μπορεί να είναι οργανικές, μεταλλικές ή κεραμικές.

### 2.4.1 Οργανικές Μήτρες

Οι οργανικές μήτρες διακρίνονται σε:

α. Θερμοπλαστικές: πρόκειται για πολυμερή με γραμμικές αλυσίδες. Λόγω του χαμηλού κόστους, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ευρείας κατανάλωσης. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αποτελούν οι μήτρες πολυαιθυλενίου (PE) και πολυστυρενίου (PS). Ως ενισχυτικά θερμοπλαστικών μητρών, χρησιμοποιούνται φθηνά υλικά (αμίαντος, μαρμαρυγίες, κ.λ.π.), ώστε και το τελικό προϊόν να είναι χαμηλής τιμής.

β. Θερμοσκληρυνόμενες: Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Τέτοιες μήτρες είναι:

- Πολυεστερικές ρητίνες, που ενισχύονται με ίνες γυαλιού.
- Εποξειδικές ρητίνες, με καλύτερες ιδιότητες από τις προηγούμενες και με χρήση στην αεροναυπηγική. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους είναι 200 C.
- Φαινολικές ρητίνες. Αυτές έχουν χαμηλή πλαστικότητα και μέτριες μηχανικές ιδιότητες, ωστόσο η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους φτάνει τους 400 C.

### 2.4.2 Μεταλλικές Μήτρες

Η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρησιμοποίησης οργανικών μητρών είναι περίπου 300 C, ενώ οι ανθρακούχες μήτρες οξειδώνονται σε θερμοκρασία υψηλότερη των 500 C. επομένως, για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών επιβάλλεται η χρήση μεταλλικών μητρών.

Σε σχέση με τις οργανικές μήτρες, οι μεταλλικές παρουσιάζουν πλεονεκτήματα, αλλά και μειονεκτήματα, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Μεγαλύτερη ολκιμότητα και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες	Δημιουργία εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων στη διεπιφάνεια μετάλλου-ίνας συμβάλουν στην αποκόλληση ινών από τη μήτρα που οδηγεί στη μικρορωγμάτωση και τη θραύση των ινών
Βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων του συνθέτου σε καταπονήσεις ασκούμενες σε διευθύνσεις διαφορετικές από αυτές του προσανατολισμού των ινών.	Μεγαλύτερη πυκνότητα και επομένως μεγαλύτερο βάρος της συνολικής κατασκευής.
Βελτίωση της ακαμψίας και αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του συνθέτου.	Φαινόμενα διάλυσης ινών στη μήτρα, σε υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. διάλυση ινών $SiO_2$ σε μήτρα Al)
Μείωση της ευαισθησίας του συνθέτου στην παρουσία διαλυτών και διερεύνηση των θερμοκρασιών ορίων χρήσης του συνθέτου.	Ασυνέχεια της καμπύλης εφελκυσμού των συνθέτων υλικών στο όριο διαρροής της μήτρας.
Βελτίωση της θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας του συνθέτου για ειδικές εφαρμογές.	Δύσκολη παραγωγή συνθέτου υλικού και μεγαλύτερο κόστος.
Ευκολότερη σύνδεση τεμαχίων του σύνθετου υλικού (συγκόλληση, κόλληση).	

Πίνακας 7: Σύγκριση μεταλλικών\_οργανικών μητρών. Συγκριτικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των πρώτων.

### 2.4.3 Κεραμικές Μήτρες

Τα κεραμικά υλικά είναι σκληρά, δύστηκτα, μεγάλης στιβαρότητας και μεγάλης αντοχής στη διάβρωση και την χημική προσβολή.

Στην περίπτωση της κεραμικής μήτρας, οι ίνες αποβλέπουν αφενός στη βελτίωση της αντοχής του κεραμικού στους θερμικούς αιφνιδιασμούς και αφετέρου στην αύξηση της μηχανικής του αντοχής. Η ολκιμότητα και το ποσοστό των ινών επιδρούν ευνοϊκά στη βελτίωση της αντοχής της μήτρας.

Το σημαντικότερο πρόβλημα στη χρήση κεραμικών μητρών εντοπίζεται στη συνάφεια ινών-μήτρας και οφείλεται στη μεγάλη διαφορά μεταξύ των συντελεστών γραμμικής διαστολής της κεραμικής μήτρας και των συνήθων ενισχυτικών ινών.

Μεγάλη εφαρμογή βρίσκουν, επίσης, οι μήτρες άνθρακα, ενώ ειδική περίπτωση κεραμικής μήτρας αποτελεί το τσιμέντο. Είναι γνωστές οι οικοδομικές κατασκευές τσιμέντου με ενίσχυση χάλυβα (οπλισμένο σκυρόδεμα), ινών αμιάντου (ελενίτ), ινών γυαλιού, καθώς επίσης και οι κατασκευές από γύψο με ενίσχυση ινών γυαλιού ή αμιάντου.

## 2.5 Επιλογή ενισχυτικών ινών και μήτρας

Για τον ορθό σχεδιασμό του σύνθετου υλικού, εκτός από την επιλογή των υλικών ενίσχυσης και μήτρας, θα πρέπει να λαμβάνονται επίσης υπόψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ινών, ο προσανατολισμός τους, η επί τοις εκατό κατ' όγκο αναλογία τους στο σύνθετο υλικό, καθώς επίσης και η ποιότητα της διεπιφάνειας ινών-μήτρας.

### 2.5.1 Γεωμετρία ινών

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο λόγος ( $s$ ) (aspect ratio) του μήκους ( $l$ ) προς την ακτίνα ( $r$ ) των ινών είναι ο συντελεστής σχήματος της ίνας και αποτελεί το κριτήριο για το χαρακτηρισμό τους ως μακριές-συνεχείς ή κοντές-ασυνεχείς. Οι πρώτες προσδίδουν στο σύνθετο μεγαλύτερη αντοχή από τις δεύτερες.

Γενικά, η αντοχή των ινών αυξάνεται με το μήκος τους και τη μείωση της διαμέτρου τους. Για ασυνεχή ίνα, υπάρχει ένα κρίσιμο μήκος ( $l_c$ ), για δεδομένη διάμετρο ίνας ( $d$ ), το οποίο ορίζεται από την σχέση:  $l_c = \frac{(\sigma_{TS})_f d}{2\tau_i}$

όπου  $(\sigma_{TS})_f$  η αντοχή της ίνας σε εφελκυσμό και  $\tau_i$  η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας.

Αν το μήκος της ίνας είναι μικρότερο του κρίσιμου μήκους ( $l_c$ ), η ενίσχυση που προσφέρει στο σύνθετο είναι πολύ μικρή. Αν είναι μεγαλύτερο ( $> 15l_c$ ), η ίνα συμπεριφέρεται ως συνεχείς.

### 2.5.2 Ποσοστό ινών

Αύξηση της κατ' όγκο αναλογίας των περιεχόμενων ινών προκαλεί αύξηση της αντοχής και της στιβαρότητας του σύνθετου. Για ποσοστά υψηλότερα του 80%, τίθενται προβλήματα κατασκευής του σύνθετου, αφού οι ίνες δεν μπορούν να καλυφθούν πλήρως από το υλικό της μήτρας.

Πολλές φορές, για την καλύτερη ενίσχυση της μήτρας δε χρησιμοποιείται ένας, μόνο, τύπος ινών, αλλά μείγμα δύο ή περισσότερων τύπων. Τα παραγόμενα ονομάζονται υβριδικά σύνθετα (hybrid composites). Ίνες Kevlar αναμειγνυόμενες με ανθρακονήματα βελτιώνουν τη στιβαρότητα ενός εύκαμπτου σύνθετου, ενώ αναμειγνυόμενες με υαλονήματα βελτιώνουν τη δυσκαμπτότητά του. Υβριδικά σύνθετα ειδικών χρήσεων μπορούν να παραχθούν με τον έλεγχο του ποσοστού και του προσανατολισμού κάθε τύπου ινών.

### 2.5.3 Προσανατολισμός ινών

Ίνες διαφόρων προσανατολισμών είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν, ώστε η προσφερόμενη ενίσχυση του σύνθετου να είναι όσον το δυνατόν ισότροπη.

#### 2.5.3.1 Συνεχείς ίνες σε μονοδιάστατη στρώση

Σε μια μονοδιάστατη στρώση οι ίνες θεωρούνται διατεταγμένες παράλληλα η μία δίπλα στην άλλη σχηματίζοντας τετραγωνικό ή εξαγωνικό πλέγμα. Η περιεκτικότητα κατ' όγκο των ινών,  $V_f$  (volume fraction), προκύπτει αναλυτικά για κάθε μια ιδανική διάταξη συναρτήσεως της διαμέτρου των ινών και της μεταξύ τους απόστασης. Η περιεκτικότητα κατ' όγκο μεγιστοποιείται όταν οι ίνες εφάπτονται η μία στην άλλη. Πρέπει να σημειωθεί ότι ακόμα και για τιμές  $V_f = 0.3$  η απόσταση μεταξύ των περιμέτρων των ινών είναι μικρότερη της διαμέτρου των. Πρακτικά, περιεκτικότητα 0.7 είναι από τις μεγαλύτερες που επιτυγχάνεται.

Όσο μικρότερη η περιεκτικότητα  $V_f$  τόσο χειρότερη η ευθυγράμμιση των ινών εντός της στρώσης. Η περιεκτικότητα των ινών κατά βάρος  $W_f$ , εκφράζεται ως συνάρτηση της περιεκτικότητας κατ' όγκο και της πυκνότητας  $\rho$  των συστατικών υλικών:

$$W_f = \frac{\rho_f V_f}{\rho_f V_f + \rho_m V_m}$$

Όπου  $V_m = 1 - V_f$ .

Οι συνεχείς, μονοδιευθυντικές ίνες ισχυρή ανισοτροπία. Η μηχανική τους αντοχή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διεύθυνση επιβολής του φορτίου. Σε μια δοκιμή εφελκυσμού, όταν οι ίνες είναι παράλληλες της φόρτισης, η παραμόρφωση των ινών  $\varepsilon_f$  ισούται με αυτήν της μήτρας  $\varepsilon_m$  και του σύνθετου υλικού  $\varepsilon_c$ . Πρόκειται για περίπτωση προσανατολισμού υψηλού μέτρου ελαστικότητας, για την οποία ισχύει η ισότητα:  $\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_c$  (ίσες παραμορφώσεις)

Όταν οι ίνες είναι κάθετες στη διεύθυνση φόρτισης, τότε το φορτίο που προσλαμβάνει η ενίσχυση ( $\sigma_f$ ) ισούται με αυτό που παίρνει η μήτρα ( $\sigma_m$ ) και το σύνθετο υλικό ( $\sigma_c$ ). Πρόκειται για περίπτωση προσανατολισμού χαμηλού μέτρου ελαστικότητας, για την οποία ισχύει η ισότητα:  $\sigma_f = \sigma_m = \sigma_c$  (ίσα φορτία)

Γενικά, για το σύνθετο υλικό με μονοδιευθυντικές ίνες, η βέλτιστη στιβαρότητα (μέτρο της είναι το  $E$ ) και αντοχή (μέτρο της το  $\sigma_{TS}$ ) επιτυγχάνεται εάν η εφαρμοζόμενη τάση είναι πάντοτε παράλληλη προς τον προσανατολισμό των ινών.

Συνήθως, ένα σύνθετο υλικό δεν είναι μονοστρωματικό, αλλά πολυστρωματικό. Αν οι ίνες κάθε στρώσης έχουν τον ίδιο προσανατολισμό, το σύνθετο είναι ανισότροπο. Ισότροπο σύνθετο λαμβάνεται στην περίπτωση κατά την οποία η ενίσχυση μονοδιευθυντικών ινών βρίσκεται υπό τη μορφή διαδοχικών στρώσεων διαφορετικού προσανατολισμού.

Στην ονομασία του πολυστρωματικού σύνθετου θα πρέπει να αναφέρεται η διαδοχή προσανατολισμών. Για παράδειγμα, ένα σύνθετο  $[30/90_2/0/-45]_T$  αποτελείται από 5 στρώσεις. Μετρούμενες από την κάτω επιφάνεια του σύνθετου, η ενίσχυση της πρώτης στρώσης σχηματίζει γωνία  $30^\circ$  με τον διαμήκη άξονα του σύνθετου, η ενίσχυση της δεύτερης και της τρίτης, γωνία  $90^\circ$ , οι μονοδιευθυντικές ίνες της τέταρτης έχουν τη διεύθυνση του διαμήκη άξονα και, τέλος, αυτές της πέμπτης στρώσης σχηματίζουν γωνία  $-45^\circ$  (ή  $315^\circ$ ).

### 2.5.3.2 Πεπλεγμένες συνεχείς ίνες

Σε μερικές εφαρμογές η επιλογή υφάσματος πεπλεγμένων ινών εξυπηρετεί καλύτερα τις προδιαγραφές του προϊόντος από τη μονοδιάστατη στρώση. Στις γεωμετρικές μικρομηχανικές παραμέτρους, όπως η διάμετρος, μήκος και διάταξη ινών, πρέπει εδώ να προστεθούν το μήκος του κυματισμού του πλέγματος, το πλήθος των ινών ανά δεσμίδα και η γωνία μεταξύ των πεπλεγμένων δεσμίδων (συνήθως  $90^\circ$ ). Ένα τέτοιο σύνθετο υλικό είναι ακόμα περισσότερο ανομοιογενές μιας και θύλακες ρητίνης δημιουργούνται στα σύνορα της πλέξης με αποτέλεσμα η μέγιστη δυνατή περιεκτικότητα κατ' όγκο για πεπλεγμένα σύνθετα υλικά να είναι μικρότερης αυτής για μονοδιάστατα σύνθετα υλικά.

### 2.5.3.3 Τυχαία διάταξη ινών

Επίπεδες στρώσεις σύνθετων υλικών μπορούν να παραχθούν και από τυχαία διατεταγμένες ίνες μεγάλου μήκους είτε σε δέσμες είτε μεμονωμένες. Οι εμπορικά διατεταγμένες στρώσεις αυτού του υλικού έχουν τιμές  $V_f$  μεταξύ 0.1 και 0.3. Για στρώσεις με μικρού μήκους ίνες, δέσμες μεγάλου μήκους κόβονται και αναμιγνύονται με τη ρητίνη ή το θερμοπλαστικό. Κατά την ανάμειξή τους όμως, η ροή της υγρής φάσης μέσω των νηματιδίων δημιουργεί ισχυρά διατμηματικά πεδία που συντελούν στην παραπέρα θραύση των νηματιδίων, λόγω υψηλών εφελκυστικών και καμπτικών τάσεων που αναπτύσσονται. Έτσι λοιπόν, η αρχική τιμή του μήκους δεν είναι η ίδια στο τελικό προϊόν.

### 2.6 Διάκενα

Η επίδραση των διακένων στην διατμηματική και διαστρωματική αντοχή ενός σύνθετου υλικού είναι σημαντικότερη. Ανεξαρτήτως του τύπου των ινών ή της ρητίνης έχει διαπιστωθεί ότι διάκενα της τάξεως 4% επιφέρουν ελάττωση της διατμητικής αντοχής μέχρι 30%. Τα διάκενα δημιουργούνται κατά την Παρασκευή του σύνθετου υλικού. Εμφανίζονται είτε εντός μιας στρώσης, παράλληλα των ινών, με ελλειψοειδή ή σφαιρική μορφή, είτε μεταξύ των στρώσεων ενός πολύστρωτου. Η δημιουργία τους οφείλεται σε δυο κυρίως λόγους: (α) στην παγίδευση φυσαλίδων αέρα ανάμεσα στη ρητίνη και τις ίνες και (β) στην παρουσία πτητικών ουσιών που παράγονται κατά τη θερμική κατεργασία των θερμοσκληρυνόμενων ρητινών ή κατά την τήξη των θερμοπλαστικών. Πρακτικά, η περιεκτικότητα κατ' όγκο των διακένων εντός ενός σύνθετου υλικού προσδιορίζεται με ποσοτική ανάλυση βασισμένη σε μικροφωτογραφική πλήθους τομών, καθώς και με τεχνικές υπερηχητικής σάρωσης (C-scan), οι οποίες είναι μη καταστροφικές και βασίζονται στη μέτρηση της απόσβεσης ενός υπερηχητικού παλμού μετά τη διαπέραση του δοκιμίου.

### 2.7 Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων σύνθετων υλικών

Για τη σύγκριση διαφόρων ινών ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες, συνήθως χρησιμοποιούνται και τα ανηγμένα μεγέθη του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής. Η αναγωγή γίνεται ως προς την πυκνότητα των ινών και τα προκύπτοντα μεγέθη καλούνται ειδική αντοχή (specific strength) και ειδικό μέτρο ελαστικότητας (specific modulus).

Τη μέγιστη ειδική αντοχή  $\sigma_{TS}/\rho$  παρουσιάζουν οι ίνες πολυαιθυλενίου και Kevlar, ενώ το μέγιστο ειδικό μέτρο ελαστικότητας  $E/\rho$  παρουσιάζουν οι ίνες C και B, λόγω του μικρού ατομικού αριθμού και της ύπαρξης ομοιοπολικών δεσμών.

Το πολυαιθυλένιο παρουσιάζει μεγαλύτερο λόγο  $\sigma/\rho$  σε σχέση με το Kevlar, λόγω της μικρότερης πυκνότητας του, αλλά υπάρχει πρόβλημα για τη χρήση του σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 300 C.

Τα γυαλιά παρουσιάζουν καλή αντοχή και υψηλό μέτρο ελαστικότητας, αλλά έχουν συγκριτικά μεγάλη πυκνότητα, με αποτέλεσμα οι ίνες γυαλιού να εμφανίζουν χαμηλότερη ειδική αντοχή από άλλες ίνες.

## 2.8 Συνάφεια ινών-μήτρας

Η καλή συνάφεια ινών μήτρας είναι τεράστιας σημασίας για την καλή λειτουργία του σύνθετου. Οι αναπτυσσόμενοι δεσμοί στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας, ια πρέπει να είναι αρκετά ισχυροί, ώστε να εξασφαλίζεται η μεταφορά τάσεων μεταξύ των δύο συστατικών του σύνθετου. Κακή συνάφεια έχει, εξάλλου, αποτέλεσμα την εκρίζωση (pull-out) των ινών από τη μήτρα, που οδηγεί σε ταχύτερη αστοχία υλικού.

Κατά το σχεδιασμό του σύνθετου θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι συντελεστές θερμικής διαστολής μήτρας-ίνας και η αναγκαιότητα επικάλυψης των ινών με κάποιο συνδετικό υλικό:

- Οι ίνες γυαλιού επενδύονται με ουσίες που εξασφαλίζουν, αφενός με, τη συνάφεια με τη μήτρα, αφετέρου δε, την αντίσταση του σύνθετου στην υγρασία.
- Οι ίνες άνθρακα επικαλύπτονται με οργανικές ουσίες, για αύξηση της συνάφειάς τους με τη μήτρα ή με  $Ni$ , όταν χρησιμοποιούνται σε μεταλλικές μήτρες ( $Ag, Al$ ).
- Οι ίνες  $B$ , όταν ενισχύουν μήτρες αλουμινίου, θα πρέπει να επικαλύπτονται με  $BN$  ή  $SiC$ . ίνες βορίου επικαλυμμένες με καρβίδιο του πυριτίου καλούνται Borsic.

## 2.9 Η φύση και ο ρόλος της διεπιφάνειας (interface)

Η διεπιφάνεια ίνας-μήτρας (fibre-matrix interface) ορίζεται ως κοινή επιφάνεια μεταξύ των δύο συστατικών υλικών, καθώς και η περιοχή στα σύνορα αυτής της επιφάνειας. Οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες της διεπιφάνειας διαφέρουν και από αυτές της μήτρας και από αυτές της ίνας. Για λόγους θεωρητικής ανάλυσης και μόνο, θεωρείται ως έχουσα μηδενικό πάχος. Στην πραγματικότητα όμως, και κατά τη διάρκεια των διεργασιών πρόσφυσης ίνας-μήτρας, διάφοροι παράγοντες επενεργούν στη διαφοροποίηση, τοπικά, των ιδιοτήτων και στις δύο πλευρές της διεπιφάνειας λόγω διάχυσης, χημικών αντιδράσεων και διαφορικών θερμικών φαινομένων. Αυτές οι δραστηριότητες επεκτείνονται από μερικά νανόμετρα ως μερικές εκατοντάδες νανόμετρα πάχους, έτσι ώστε να έχει περισσότερη σημασία να μιλούμε για ενδιάμεση φάση (interphase) παρά για διεπιφάνεια (interface).

## 2.10 Μηχανισμοί πρόσφυσης

Υπάρχουν διάφορα μοντέλα προσομοίωσης του δεσμού μεταξύ ίνας και μήτρας βασιζόμενα στις θεωρίες μηχανικής, φυσικής και ηλεκτροχημικής πρόσφυσης. Ο μηχανικός δεσμός προκύπτει με την προώθηση της υγρής φάσης εντός των πόρων και ρωγμών της στερεάς. Η τραχύτητα της στερεάς επιφάνειας αυξάνει την αποτελεσματικότητα αυτού του δεσμού. Ο μηχανικός δεσμός εκδηλώνεται μέσω της αντίστασης τριβής κατά τη σχετική ολίσθηση των δύο επιφανειών και ενισχύεται από την ύπαρξη θερμικών τάσεων που δρουν εγκάρσια στην επιφάνεια επαφής.

Ο φυσικός δεσμός εξαρτάται από τη θερμοδυναμική συμβατότητα της υγρής και στερεάς φάσης. Αυτή προσδιορίζεται από τη γωνία επαφής της επιφάνειας της ίνας και μιας σταγόνας της υγρής φάσης. Η υψηλή θερμοδυναμική συμβατότητα χαρακτηρίζεται από μικρή γωνία επαφής. Ο χημικός δεσμός μπορεί να οφείλεται είτε στην ηλεκτροστατική έλξη μεταξύ δύο αντιθέτως φορτισμένων ατόμων (ιονικός δεσμός), είτε σε ομοιοπολική αλληλεπίδραση. Δευτερογενείς δεσμοί γεννώνται από τις ασθενείς δυνάμεις Van der Waals. Δεσμός μεταξύ δύο φάσεων μπορεί ακόμα να αναπτυχθεί όταν μόρια του πολυμερούς διαχέονται στο μοριακό δίκτυο της άλλης φάσης.



Από τη στιγμή που η πρόσφυση μεταξύ των δύο φάσεων έχει επιτευχθεί με τους παραπάνω μηχανισμούς η μεταβίβαση των τάσεων (μεταφορά του φορτίου) από τη μια φάση στην άλλη, μπορεί να αναλυθεί ως καθαρά μηχανική διαδικασία.

### **2.11 Το τασικό πεδίο περί τη διεπιφάνεια**

Όταν ένα εξωτερικό φορτίο εφαρμόζεται σε ένα σύνθετο υλικό με ευθυγραμμισμένες ίνες, οι τάσεις μεταδίδονται από τη μαλακή φάση (μήτρα) στην ισχυρή (ίνα) της κοινής τους περιοχής, της διεπιφάνειας. Αφού οι δύο φάσεις έχουν διαφορετικές ελαστομηχανικές ιδιότητες, η δομική ακεραιότητα του συνθέτου εξαρτάται από την ικανότητα της διεπιφάνειας να υποφέρει τις μετατοπίσεις που αναγκαστικά αναπτύσσονται στην περιοχή. Συνεπώς, το μακροσκοπικά ομοιόμορφο τασικό πεδίο ανατρέπεται στην περιοχή της διεπιφάνειας.

Εφόσον το μέτρο ελαστικότητας (η δυσκαμψία) των ινών είναι πολύ υψηλότερο από της μήτρας, εκτιμάται ότι οι ίνες φέρουν σχεδόν όλο το αξονικό φορτίο, ενώ η μήτρα υποβάλλεται αποκλειστικά σε διάτμηση. Η παραπάνω υπόθεση αποτελεί τη βάση της θεωρίας “shear-lag”, ή διατμητικής υστέρησης, που αναπτύχθηκε σαν πρώτη προσπάθεια ανάλυσης του πολύπλοκου τασικού πεδίου της διεπιφάνειας.

### **2.12 Η μεταφορά του φορτίου από την μήτρα στην ίνα**

Ο μηχανισμός μεταβίβασης των τάσεων (ή μεταφοράς του φορτίου) από τη μήτρα στην ίνα μέσω της διεπιφάνειας ενεργοποιείται στα σημεία ασυνέχειας του σύνθετου υλικού, όπως τα άκρα των ινών, τα σημεία θραύσης, εγκοπές και ρωγμές. Το τασικό πεδίο στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας δημιουργείται υπό την επίδραση εξωτερικών φορτίων και των θερμικών τάσεων. Η ένταση αυτού του πεδίου εξαρτάται από τη διάταξη των ινών.

Όταν ένα ινώδες σύνθετο υλικό καταπονείται στη διεύθυνση των ευθυγραμμισμένων ινών, η ακεραιότητα του σύνθετου εξαρτάται από την ικανότητα της διεπιφάνειας να αντέξει στις μετατοπίσεις που αναπτύσσονται στην περιοχή. Με την προϋπόθεση ότι η δυσκαμψία των ινών είναι πολύ μεγαλύτερη από της μήτρας, η ελαστική ανάλυση του τασικού πεδίου της διεπιφάνειας βασίζεται στην παραδοχή ότι οι ίνες μεταφέρουν όλο το αξονικό φορτίο, ενώ η μήτρα φέρει τις διατμητικές τάσεις.

### 2.13 Επιλογή υλικών

Βασικό στοιχείο του ορθού σχεδιασμού του σύνθετου αποτελεί η επιλογή του κατάλληλου τύπου ινών για την ενίσχυση δεδομένου τύπου μήτρας. Οι τιμές  $E/\rho$  και  $\sigma_{TS}/\rho$  συγκρινόμενες με αυτές των πολυμερών και των μετάλλων υποδεικνύουν τις βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών.

Τόσο η τιμή του ειδικού μέτρου ελαστικότητας, όσο και αυτή της ειδικής αντοχής των σύνθετων, μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η εξάρτηση των μεγεθών αυτών από τη θερμοκρασία θέτει περιορισμούς στη χρήση των σύνθετων υλικών.

Στους πίνακες που ακολουθούν, δίνονται παραδείγματα των συνηθέστερων σύνθετων υλικών, οργανικής, μεταλλικής και κεραμικής μήτρας με ενίσχυση διαφόρων τύπων ινών και οι εφαρμογές που βρίσκουν στην κατασκευαστική βιομηχανία.

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Εποξειδική	Kevlar	-Αεροναυπηγική και ναυπηγική βιομηχανία. -Βιομηχανία αθλητικών ειδών(ρεκέτες tennis, μπαστούνια golf, είδη τοξοβολίας, καλάμια ψαρέματος.
Πολυστερική	Γραφίτη	-Αεροναυπηγική και αυτοκινητοβιομηχανία
Πολυμερική	Γυαλιού	-Μέρη αεροσκαφών, πλοιαρίων και αυτοκινήτων, μικρού βάρους και υψηλής αντοχής σε διάβρωση -Αθλητικός εξοπλισμός

Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά παραδείγματα σύνθετων υλικών οργανικής μήτρας

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
<i>Al</i>	Borsic	Πτερύγια στροβιλοκινητήρων αεροσκαφών.
	$Al_2O_3$	Έμβολα μηχανών Diesel.
	<i>SiC</i>	Πτερύγια εκτόξευσης βλημάτων.
	Γραφίτη	Ιστοί κεραιών τηλεσκοπίου Hubble.
Κραμάτων <i>Cu</i>	<i>SiC</i>	Υψηλής αντοχής προπέλες σκαφών.
Κράματα <i>Ti</i> και <i>W</i>	<i>SiC</i>	Πτερύγια και δίσκοι στροβίλων
	$B_4N$	

Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά παραδείγματα σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Άνθρακα	Άνθρακα	-Μέρη αεροσκαφών και διαστημοπλοίων υψηλών προδιαγραφών (επιτρεπτή λειτουργία ως τους 300 C). -Δισκόφρενα σε αγωνιστικά αυτοκίνητα.
$Al_2O_3, SiC,$ $ZrO_2, Si_3N_4$ και κεραμικά υλικά	$Al_2O_3$ $SiC$	-Αγωγοί εναλλακτών θερμότητας. -συστήματα θερμομόνωσης.

Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά παραδείγματα σύνθετων υλικών κεραμικής μήτρας

### 2.14 Μορφές αστοχίας σύνθετων υλικών

Ο καθορισμός της αστοχίας μιας κατασκευής διαφέρει από εφαρμογή σε εφαρμογή. Σε μερικές περιπτώσεις μια πολύ μικρή παραμόρφωση μπορεί να θεωρηθεί ως αστοχία, ενώ συχνά για να θεωρηθεί ότι κάποια κατασκευή έχει αστοχήσει θα πρέπει να παρουσιάζει συνολική θραύση ή αποκόλληση/ διαχωρισμό των δομικών μερών της. Σε γενικές γραμμές, μπορούμε να πούμε ότι έχει λάβει χώρα αστοχία δομικού στοιχείου, όταν αυτό αδυνατεί να ανταποκριθεί λειτουργικά με επιτυχία.

Στην περίπτωση των σύνθετων υλικών η αστοχία συνήθως αρχίζει να αναπτύσσεται εσωτερικά πριν εκδηλωθεί οποιαδήποτε μακροσκοπική μεταβολή στην συμπεριφορά τους. Η εξωτερική αστοχία μπορεί να παρατηρηθεί σε διάφορες μορφές είτε ξεχωριστά είτε με ταυτόχρονη εμφάνιση δύο ή και περισσότερων από αυτές. Σαν πιο βασικές μορφές αστοχίας των σύνθετων υλικών θα μπορούσαν να αναφερθούν οι παρακάτω:

- I. Θραύση/σπάσιμο των ινών (fibre breakage).
- II. Παραμόρφωση και θραύση της μήτρας (matrix deformation and cracking).
- III. Αποχωρισμός των ινών από τη μήτρα είτε:
  - Λόγω εμφάνισης και διάδοσης ρωγμών στην διεπιφάνεια ίνας μήτρας (debonding),
  - Λόγω θραύσης, των ινών και εκρίζωσης τους από τη μήτρα (pull-out).
- IV. Διαχωρισμός μιας στρώσης από την άλλη σένα πολύστρωτο σύνθετο υλικό που καλείται διαστρωματική αποκόλληση (delamination).

Η επίδραση της εσωτερικής αστοχίας στην μακροσκοπική συμπεριφορά του υλικού παρατηρείται μόνο όταν η συχνότητα των εσωτερικών αστοχιών είναι εξαιρετικά μεγάλη.

## 2.15 Επίδραση των μηχανισμών αστοχίας στην απορροφούμενη ενέργεια

### 2.15.1 Θραύση ινών

Όταν μια ρωγμή διαδίδεται σε κάθετη διεύθυνση προς τις ίνες, προκαλείται βαθμιαία θραύση των ινών μέχρι τον πλήρη διαχωρισμό, κατά την έννοια του πάχους, του σύνθετου ελάσματος. Οι ίνες θραύονται όταν η παραμόρφωση τους προσεγγίζει την παραμόρφωση θραύσης τους. Αν και οι ίνες συμμετέχουν ουσιαστικά στην υψηλή αντοχή των σύνθετων υλικών, η απαιτούμενη ενέργεια για τη θραύση των ινών, αντιστοιχεί σ' ένα πολύ μικρό μόνο ποσοστό της συνολικής απορροφούμενης ενέργειας που αναφέρεται στην υπέρθεση των μηχανισμών αστοχίας του υλικού.

### 2.15.2 Παραμόρφωση και θραύση της μήτρας

Το υλικό της μήτρας που περιβάλλει τις ίνες πρέπει να θραυστεί για να ολοκληρωθεί η θραύση του σύνθετου υλικού. Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες, όπως εποξειδικές και πολυεστερικές, ανήκουν στα ψαθυρά υλικά και επιδέχονται περιορισμένη συνολική παραμόρφωση μέχρι την θραύση τους, ενώ αντίθετα οι μεταλλικές μήτρες μπορούν να υποστούν εκτεταμένη πλαστική παραμόρφωση. Ο μηχανισμός απορρόφησης ενέργειας στην περίπτωση μητρών από τπολυμερές υλικό χαρακτηρίζεται από θραύση και μικρή παραμόρφωση της μήτρας και συνεπώς, η συνεισφορά του στην συνολική απορροφούμενη ενέργεια είναι σχετικά πολύ μικρή σε σύγκριση με αυτή των σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας.

### 2.15.3 Αποκόλληση ινών από μήτρα (debonding)

Κατά την διαδικασία θραύσης οι ίνες μπορούν να αποκολληθούν από το υλικό της μήτρας λόγω εμφάνισης και διάδοσης ρωγμών παράλληλα προς τις ίνες (debonding cracks). Σε αυτή τη διαδικασία οι χημικοί ή δευτερεύοντες δεσμοί μεταξύ των ινών και του υλικού μήτρας σπάνε. Μια τέτοια ρωγμή (debonding crack) μπορεί να διαδίδεται στην διεπιφάνεια ίνας-μήτρας ή μέσα στην μήτρα, ανάλογα με τη σχετική τους αντοχή. Με μείωση της αντοχής της διεπιφάνειας μπορεί να συμβεί εκτεταμένη αποκόλληση οδηγώντας συνεπώς σε μία σημαντική αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας.

### 2.15.4 Αποκάλυψη- εκρίζωση ινών από μήτρα (pull out)

Η εκρίζωση των ινών από την μήτρα συμβαίνει όταν ψαθυρές ή ασυνεχείς ίνες εμποτίζονται σε δύσκαμπτη μήτρα. Οι ίνες θραύονται κατά τις αδύνατες τους διατομές, οι οποίες δε συμπίπτουν απαραίτητα με το επίπεδο θραύσης του σύνθετου υλικού. Η συγκέντρωση των τάσεων στην μήτρα που δημιουργείται λόγω θραύσεως των ινών, ανακουφίζεται από την διαρροή του υλικού της μήτρας με αποτέλεσμα την αποφυγή ρηγμάτωσής της. Αποφεύγεται έτσι και η πρόκληση θραύσης των ινών σε άλλα σημεία. Στην περίπτωση αυτή, λοιπόν, η θραύση συνεχίζεται μάλλον με την αποκάλυψη και εκρίζωση των ινών από την μήτρα παρά με τη παραπέρα θραύση τους κατά την διεύθυνση θραύσης του ελάσματος. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα στην περίπτωση των ινών που τα άκρα τους απέχουν ελάχιστα από την διατομή που συμβαίνει η θραύση (λιγότερο από το μισό του κρίσιμου μήκους την ίνας).

Η διαφορά μεταξύ της αποκόλλησης των ινών από τη μήτρα λόγω διάσπασης του μεταξύ τους δεσμού (debonding) και της αποκόλλησης των ινών λόγω θραύσης και εκρίζωσης τους από την μήτρα (pull out), μπορεί να εντοπισθεί στο εξής σημείο: στην μεν πρώτη περίπτωση η αποκόλληση δημιουργείται όταν μία ρωγμή που διαδίδεται στην μήτρα εμποδίζεται να διαδοθεί εγκάρσια προς την ίνα, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η αποκόλληση λαμβάνει χώρα

όταν μια ρωγμή που ξεκινάει από τη θραύση μιας ίνας αδυνατεί να διαδοθεί μέσω μιας δύσκαμπτης μήτρας. Στην δεύτερη αυτή περίπτωση η αποκάλυψη των ινών συνοδεύεται από εκτεταμένη παραμόρφωση της μήτρας, κάτι που απουσιάζει στην πρώτη περίπτωση. Έτσι λοιπόν, μπορεί τα δύο φαινόμενα να μοιάζουν μεταξύ τους λόγω της αστοχίας που παρατηρείται στην διεπιφάνεια ίνας-μήτρας, όμως τα αίτια που προκαλούν την αστοχία αυτή είναι τελείως διαφορετικά μεταξύ τους.

#### 2.15.5 Διαστρωματική αποκόλληση (delamination)

Μια ρωγμή που διαδίδεται σε μια στρώση ενός πολύστρωτου ελάσματος από σύνθετο υλικό, μπορεί να αποτελέσει την κορυφή ρωγμής που θα προσεγγίζει τις ίνες της γειτονικής στρώσης. Αυτή η διαδικασία προσέλκυσης ρωγμών είναι όμοια με την περίπτωση ρωγμής που διαδίδεται στη μήτρα και προσελκύεται στην διεπιφάνεια ίνας-μήτρας. Λόγω όμως μεγάλων διατμητικών τάσεων στη μήτρα που γειτονεύει με την κορυφή της ρωγμής, η ρωγμή μπορεί να διακλαδωθεί και να αρχίσει να διατρέχει την διεπιφάνεια παράλληλα προς το επίπεδο των στρώσεων. Αυτές οι ρωγμές λέγονται ρωγμές διαστρωματικής αποκόλλησης και όπου εμφανίζονται είναι υπεύθυνες για την απορρόφηση ενός πολύ σημαντικού ποσού ενέργειας θραύσεως. Συνήθως εμφανίζονται με μεγάλη συχνότητα, όταν πολύστρωτα σύνθετα υλικά υπόκεινται σε καμπτικές καταπονήσεις.

#### 2.16 Χρήση κατασκευών λεπτού πάχους ως συστημάτων απορρόφησης ενέργειας

Ο σχεδιασμός δομικών στοιχείων ενός συστήματος απορρόφησης ενέργειας στοχεύει, εκτός των άλλων, και στη ελαχιστοποίηση του βάρους του, κάτι το οποίο έχει άμεση σχέση με το κόστος ή/και τις λειτουργικές απαιτήσεις της κατασκευής π.χ. αεροπορικές κατασκευές.

Η προφανής λύση στο παραπάνω πρόβλημα όπως τέθηκε, οδηγεί στην κατασκευή λεπτότοιχων κελύφων, π.χ. σωλήνων, από τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων ενός υλικού. Οι σωλήνες αυτοί σε αξονική καταπόνηση δίνουν διάφορες μορφές κατάρρευσης, οι οποίες είναι κυρίως συναρτήσες του υλικού.

Στα πλαίσια της προσπάθειας ελέγχου του μηχανισμού κατάρρευσης και φυσικά για να μπορεί να υπάρξει άμεση πρόβλεψη του μηχανισμού αυτού, χρησιμοποιούνται μηχανισμοί σκανδάλης (triggering mechanisms). Ειδικά σε κελύφη από σύνθετα υλικά τα οποία δεν παρουσιάζουν συγκεκριμένο τρόπο κατάρρευσης, η χρήση τέτοιων μηχανισμών κρίνεται απαραίτητη.

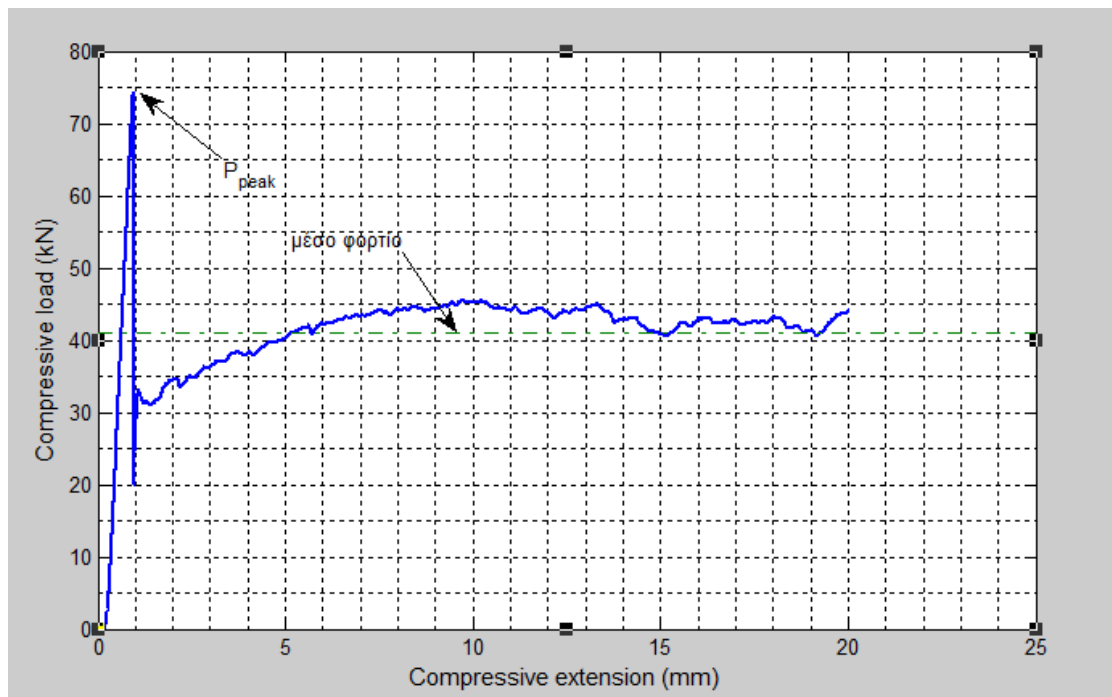
Με κριτήριο τη μέγιστη απορρόφηση ενέργειας έχουν αναπτυχθεί και πολυπλοκότερες μορφές που κυρίως χρησιμοποιούνται σε αεροπορικές κατασκευές και στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Η μελέτη της συμπεριφοράς των κατασκευών έχει οδηγήσει σε μια καταρχή εκτίμηση της γενικής μορφής της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης με βάση κυρίως την εμπειρία και κάποιες υποθέσεις. Το σκεπτικό για αυτή τη θεώρηση στηρίχθηκε πάνω στο γεγονός ότι οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης εμφανίζουν κάποια παρόμοια χαρακτηριστικά, ανεξάρτητα από το είδος του υλικού ή της κατασκευής.

Η αρχική φάση περιλαμβάνει την ελαστική περιοχή μέχρι το φορτίο  $P_{peak}$  όπου αρχίζει η κατάρρευση. Κατά κανόνα το φορτίο αυτό βρίσκεται ψηλότερα από το κρίσιμο φορτίο λυγισμού  $P_{cr}$ , αλλά χαμηλότερα από την τιμή του φορτίου που αντιστοιχεί στο όριο

διαρροής ή στο όριο θραύσης, αντίστοιχα. Ακολουθεί η μεταβατική φάση όπου παρουσιάζεται ελαστοπλαστική συμπεριφορά είτε με ελαστικές και πλαστικές παραμορφώσεις σε στοιχεία της κατασκευής, είτε με μερική καταστροφή του υλικού όταν αυτό είναι ψαθυρό. Η κατάρρευση χαρακτηρίζεται από διπλώσεις με δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων ή από θρυματισμό και ανάπτυξη φαινομένων τριβής μεταξύ θρυματισμένων μερών της κατασκευής.

Έτσι η απλοποιημένη μορφή της αληθινής καμπύλης περιλαμβάνει: (α) μια γραμμική αύξηση του φορτίου μέχρι το  $P_{peak}$  που αρχίζει η κατάρρευση, (β) μια μεταβατική περιοχή όπου συμβαίνουν περίπλοκες διεργασίες και (γ) την περιοχή κατάρρευσης, βλ. Σχήμα 20.



Σχήμα 19: Διάγραμμα φορτίου- μετατόπισης.

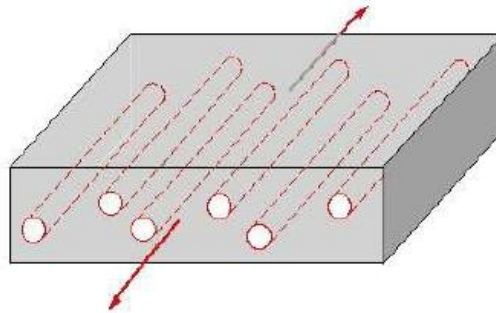


### **3. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

### 3.1 Μέτρο ελαστικότητας

Οι συνήθεις παραδοχές της θεωρίας ελαστικότητας των συνθέτων υλικών είναι οι ακόλουθες:

- Η ίνα και η μήτρα συμπεριφέρονται σαν ιδανικά ελαστικά υλικά
- Η διεπιφάνεια ανάμεσα στη μήτρα και στην ίνα είναι απειροστικά λεπτή
- Υπάρχει τέλεια συμβατότητα στις παραμορφώσεις των ινών και της μήτρας
- Ομοιογενής μήτρα
- Οι ίνες είναι διανεμημένες σε κανονική διάταξη



Σχήμα 20: Μονοαξονικό ινοπλισμένο σύνθετο

Θεωρούμε μονοαξονικό ινοπλισμένο σύνθετο όπως στο Σχήμα 20. Οι τάσεις στην ίνα και στη μήτρα είναι:

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f \quad \text{και} \quad \sigma_m = E_m \varepsilon_m$$

Εάν το μέτρο ελαστικότητας της ίνας είναι πολύ μεγαλύτερο από το μέτρο της μήτρας, τότε η τάση στην ίνα θα είναι πολύ μεγαλύτερη από την τάση στη μήτρα.

#### 3.1.1 Αξονική Τάση

Το συνολικό φορτίο,  $P$ , που φέρει το σύνθετο είναι το άθροισμα των φορτίων που φέρουν οι ίνες και η μήτρα ( $A$  είναι η επιφάνεια διατομής):

$$P = \sigma_1 A, \quad P_f = \sigma_f A_f, \quad P_m = \sigma_m A_m$$

$$P = P_m + P_f = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f = \sigma_1 A$$

Όταν υπάρχει τέλεια επαφή ανάμεσα στην ίνα και στη μήτρα, τότε:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_1$$

Εισάγοντας τα μέτρα ελαστικότητας της ίνας και της μήτρας:

$$\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1, \quad \sigma_f = E_f \varepsilon_1, \quad \sigma_m = E_m \varepsilon_1$$

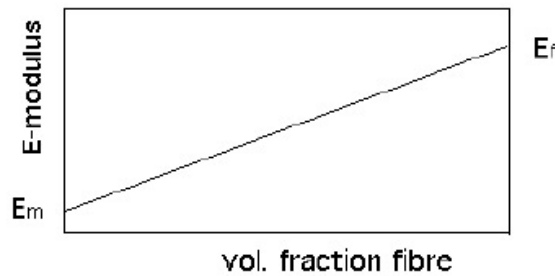
Αντικαθιστώντας στις παραπάνω έχουμε:

$$P = P_m + P_f \rightarrow E_1 \varepsilon_1 A = E_m \varepsilon_m A_m + E_f \varepsilon_f A_f$$

$$\rightarrow E_1 = E_f \frac{A_f}{A} + E_m \frac{A_m}{A} = E_1 = E_m (1 - \varphi) E_f,$$



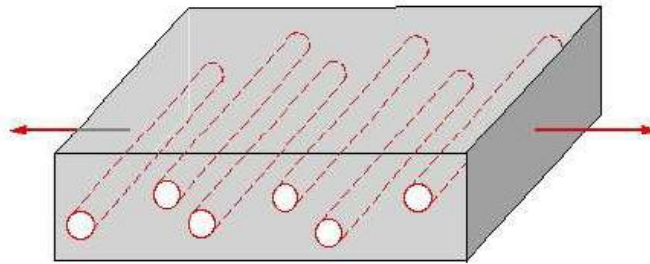
Όπου  $\phi$  είναι το κλάσμα όγκου των ινών.



Το ποσοστό του αξονικού φορτίου που φέρεται από τις ίνες είναι:

$$\frac{P_f}{P} = \frac{\frac{E_f}{E_m}}{\frac{E_f}{E_m} - \frac{1-\phi}{\phi}} \quad \text{ή} \quad \frac{P_f}{P} = \left(1 + \frac{1-\phi}{\alpha\phi}\right)^{-1} \quad \text{με} \quad \alpha = \frac{E_f}{E_m}$$

### 3.1.2 Εγκάρσιες Τάσεις



Σχήμα 21: Μονοαξονικό ινοπλισμένο σύνθετο

Η τάση δρα εγκάρσια στη διατομή και φέρεται εξ ίσου από τις ίνες και τη μήτρα:

$$\sigma_f = \sigma_m = \sigma_2 \quad \text{αλλά} \quad \varepsilon_f \neq \varepsilon_m \neq \varepsilon_1$$

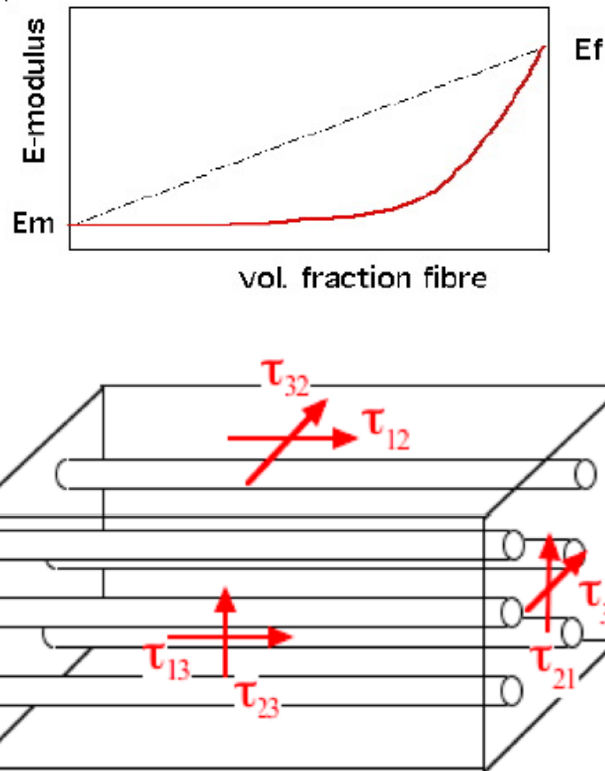
$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_2}{E_f}, \quad \varepsilon_m = \frac{\sigma_2}{E_m}$$

Η συνολική παραμόρφωση είναι ίση με τον μέσο όρο των παραμορφώσεων της μήτρας και της ίνας ζυγισμένες με τα κλάσματα όγκου τους:

$$\varepsilon_2 = (1 - \phi)\varepsilon_m + \phi\varepsilon_f$$

Με άλλα λόγια:

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2} = \frac{\sigma_2\phi}{E_f} + \frac{\sigma_2(1-\phi)}{E_m} \quad \rightarrow \quad E_2 = \left[ \frac{\phi}{E_f} + \frac{1-\phi}{E_m} \right]^{-1}$$



Σχήμα 22: Οι διαφορετικές συνιστώσες του μέτρου διάτμησης στα ινοπλισμένα σύνθετα υλικά

### 3.2 Μέτρο διάτμησης

Όλες οι συνιστώσες του μέτρου διάτμησης στα ινοπλισμένα σύνθετα υλικά με ομοαξονικά προσανατολισμένες συνεχείς ίνες έχουν μόνο δύο διαφορετικές τιμές:

$$G_{12} = G_{21} = G_{13} = G_{31} \quad \text{και} \quad G_{23} = G_{32}.$$

Για τα  $G_{12} = G_{21} = G_{13} = G_{31}$  θεωρώντας τις ίσες δυνάμεις στο σύνθετο έχουμε:

$$\tau_{12} = \tau_{12f} = \gamma_{12f} G_f = \gamma_{12m} G_m$$

Αθροίζουμε τις παραμορφώσεις:  $\gamma_{12} = \varphi \gamma_{12f} + (1 - \varphi) \gamma_{12m}$

$$\rightarrow G_{12} = \left[ \frac{\varphi}{G_f} + \frac{1 - \varphi}{G_m} \right]^{-1}$$

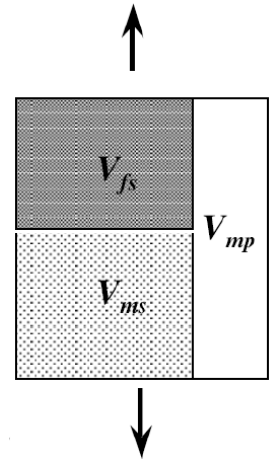
Το μοντέλο σειράς για τα  $G_{23} = G_{32}$  δίνει:

Από τις ίσες παραμορφώσεις:  $\gamma_{23} = \gamma_{23f} = \tau_{23f} / G_f = \tau_{23m} / G_m$

Αθροίζουμε τις τάσεις και:  $G_{23} = \varphi G_f + (1 - \varphi) G_m$

Το μοντέλο σειράς συνήθως υποεκτιμά τις ιδιότητες. Άλλα μοντέλα που μερικές φορές δίνουν καλύτερα αποτελέσματα είναι τα μοντέλα του Takayanagi που παρουσιάζονται στο Σχήμα 24.

Ο υπολογισμός των παραμέτρων του μοντέλου του Takayanagi μπορεί να γίνει αν είναι γνωστή η διάταξη των ινών στον χώρο. Π.χ. για εξαγωνική ή τετραγωνική διάταξη το μοντέλο αυτό γίνεται:



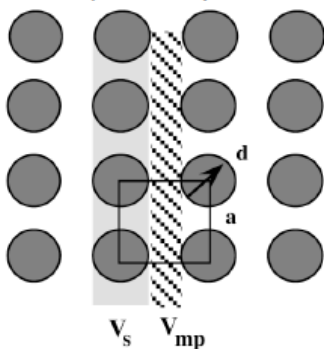
Σχήμα 23: Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου Takayanagi

$$E = V_s E_s + V_m E_m$$

$$\frac{1}{E_s} = \frac{V_{fs}}{E_f} + \frac{V_{ms}}{E_m}$$

$$E = \frac{E_m E_f (1 - V_{mp} - V_{mp} V_f) + V_{mp} V_f E_m^2}{E_f (1 - V_{mp} - V_f (E_f - E_m))}$$

### Τετραγωνική διάταξη

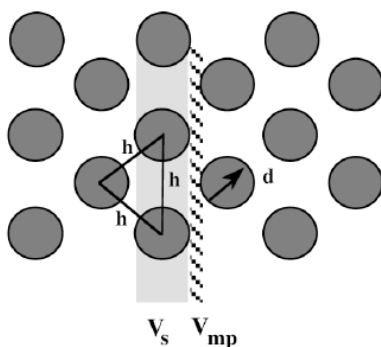


$$V_f = \frac{\pi d^2}{4a^2} \quad V_{fs} = \frac{\pi d}{4a}$$

$$V_{mp} = \frac{(a-d)d}{ad} = 1 - \frac{d}{a}, \quad a \geq d$$

Κανονική διάταξη:  $\frac{d}{a} = 2\sqrt{\frac{\phi}{\pi}}$

### Εξαγωνική διάταξη



$$V_f = \frac{\pi d^2}{2\sqrt{3}h^2} \quad V_{fs} = \frac{\pi d}{4h}$$

$$V_{mp} = 1 - \frac{2d}{\sqrt{3}h}, \quad h \geq \frac{2}{\sqrt{3}}d$$

Κανονική διάταξη:  $\frac{2d}{\sqrt{3}h} = \sqrt{\frac{8\phi}{3\pi}}$

Η εφαρμογή του μοντέλου Takayanagi σε εγκάρσιο φορτίο για αυτές τις διατάξεις δίνει το μοντέλο των Halpin-Tsai. Για το εγκάρσιο φορτίο αυτό είναι:

$$E = \frac{E_m E_f (1 - V_{mp}) - V_{mp} V_f + V_{mp} V_f E_m^2}{E_f (1 - V_{mp}) - V_f (E_f - E_m)} \rightarrow E_2 = E_m \frac{1 + \xi \eta \varphi}{1 - \eta \varphi}$$

Όπου:  $\eta = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + \xi}$  και  $\xi = \frac{V_{mp} V_f}{1 - V_f - V_{mp}} = \frac{V_{mp} V_f}{1 - V_{fs}}$

Για τετραγωνική διάταξη ινών στον χώρο έχουμε:  $\xi = \frac{\pi d(a-d)}{a(4a-\pi d)}$ , όπου  $\frac{d}{a} = 2\sqrt{\varphi/\pi}$

Για το μέτρο διάτμησης το μοντέλο των Halpin-Tsai δίνει:

$$G_{12} = G_m \frac{1 + \xi \eta \varphi}{1 - \eta \varphi}$$

Όπου:  $\eta = \frac{\frac{G_f}{G_m} - 1}{\frac{G_f}{G_m} + \xi}$  και  $\xi$  όπως προηγουμένως. Αν δεν είναι γνωστή η διάταξη των ινών, τότε χρησιμοποιούμε  $\xi \approx 1$ .

Στο μοντέλο των Halpin - Tsai η παράμετρος  $\xi$  μπορεί να θεωρηθεί ως ελεύθερη παράμετρος (fit parameter). Όταν το  $\xi$  παίρνει συγκεκριμένες τιμές, τότε:

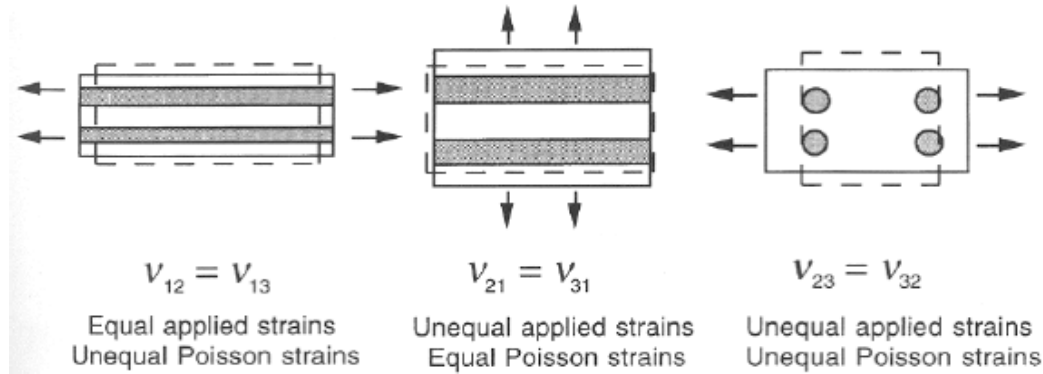
Ιδιότητα	$\xi$	→Μοντέλο
$E_1$	$\infty$	παράλληλο
$E_2$	2	----
$G_{12}$	1	----
	0	σειράς

Πίνακας 11: Τυπικές τιμές των παραμέτρων του μοντέλου των Halpin - Tsai για τα μέτρα ελαστικότητας των συνθέτων υλικών

### 3.3 Λόγος Poisson

Ο λόγος του Poisson ορίζεται ως:  $\nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i}$ . Για τα ισοπλισμένα σύνθετα υλικά υπάρχουν 3 ανεξάρτητα στοιχεία του  $\nu_{ij}$ , και ισχύει

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2} \quad \text{και} \quad G_{23} = \frac{E_3}{2(1 + \nu_{23})}$$



Για ισότροπα συστατικά μπορούμε να υπολογίσουμε τις τιμές των στοιχείων του λόγου του Poisson. Θεωρώντας το παράλληλο μοντέλο (ίσες παραμορφώσεις) έχουμε  $\varepsilon_{1f} = \varepsilon_{1m} = \varepsilon_1$ .

Τότε:  $\varepsilon_{2f} = \nu_f \varepsilon_{1f} = -\nu_f \sigma_{1f} / E_f$  και  $\varepsilon_{2m} = \nu_m \varepsilon_{1m} = -\nu_m \sigma_{1m} / E_m$

$$\rightarrow \varepsilon_2 = -\left[ \frac{\varphi \omega_f \sigma_{1f}}{E_f} + \frac{(1 - \varphi) \nu_m \sigma_{1m}}{E_m} \right] = \varphi \nu_f \varepsilon_1 - (1 - \varphi) \nu_m \varepsilon_1$$

$$\rightarrow \nu_{12} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \varphi \nu_f + (1 - \varphi) \nu_m$$

$$\text{και} \quad \nu_{21} = [\varphi \nu_f + (1 - \varphi) \nu_m] \frac{E_2}{E_1}$$

Για το  $\nu_{23}$  εξετάζουμε τη μεταβολή του όγκου:  $\Delta V / V_0 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \sigma_H / K$ .

Υπό υδροστατική τάση (πίεση) έχουμε:  $\sigma_H = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{\sigma_2}{3}$  και  $\varepsilon_3 = \frac{\sigma_3}{3K} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$

$$\rightarrow \nu_{23} = -\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_2} = -\frac{\sigma_2}{3K\varepsilon_2} + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} + 1 = 1 - \nu_{21} - \frac{E_2}{3K}$$

Με τον ίδιο τρόπο βρίσκουμε το  $K$  (bulk modulus). Ίσες τάσεις:

$$K = \frac{\sigma_H}{\Delta V / V_0} = \left[ \frac{\varphi}{K_f} + \frac{1 - \varphi}{K_m} \right]^{-1}$$

Για ισότροπο υλικό:  $K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$

**Ιδιότητες σε ενδιάμεσες γωνίες μεταξύ 0° και 90°**

Μπορούμε να «διορθώσουμε» τις προηγούμενες εξισώσεις που δίδουν το μέτρο ελαστικότητας κατά μήκος και εγκάρσια στις ίνες για να υπολογίσουμε τις ιδιότητες σε μια τυχαία γωνία ως προς την κατεύθυνση των ινών. Επειδή  $E_1 \gg E_2$ , εισάγουμε, λοιπόν, ένα δείκτη αποτελεσματικότητας προσανατολισμού (orientation efficiency factor),  $\eta_0$ , στη συνεισφορά της ίνας:

$$E_1 = \eta_0 E_f \varphi + E_m(1 - \varphi)$$

Το  $\eta_0$  είναι μία συνάρτηση της γωνίας (ως προς την ίνα) που δρα το φορτίο:  $\eta_0 = 1$  για καλά προσανατολισμένες ίνες. Γενικά:

$$\eta_0 = \sum_{i=1}^{j=n} a_i \cos^4 \theta_i$$

Όπου  $a_i$  είναι το ποσοστό ινών προσανατολισμένων σε μία γωνία  $\theta_i$  ως προς το φορτίο. Η σχέση αυτή ισχύει για μικρές σχετικά γωνίες  $\theta$ .

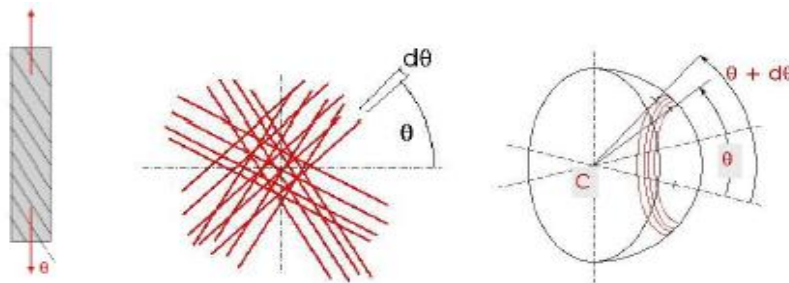
Μια ειδική περίπτωση είναι για 2D τυχαίο προσανατολισμό, π.χ. ανάκατες τεμαχισμένες, αλλά μακριές ίνες (βλέπε Σχήμα 25). Θεωρούμε, τότε ένα σημείο μέσα από το οποίο περνούν ίνες προσανατολισμένες με τυχαία κατανομή (συνάρτηση κατανομής  $\Psi(\theta) = 1$  ή  $a_i = 1/n$ ) σε δύο διαστάσεις. Το κλάσμα των ινών με γωνία προσανατολισμού μεταξύ  $\theta$  και  $\theta + d\theta$  είναι  $d\theta/\pi$ . Ο δείκτης αποτελεσματικότητας,  $\eta_0$ , δίνεται από:

$$\eta_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^4 \theta d\theta = \frac{3}{8}$$

Μια άλλη περίπτωση είναι ο 3D τυχαίος προσανατολισμός. Θεωρούμε ένα σημείο μέσα από το οποίο περνούν ίνες προσανατολισμένες με τυχαία κατανομή σε 3 διαστάσεις. Το κλάσμα των ινών,  $\alpha_\theta$ , με γωνία προσανατολισμού μεταξύ  $\theta$  και  $\theta + d\theta$  είναι ίσο με το κλάσμα του εμβαδού της επιφάνειας του σφαιρικού τμήματος.

$$A_{sphere} = 4\pi r^2 \quad A_{strip} = 2\pi r \sin \theta r d\theta$$

$$\alpha_\theta = \frac{A_{strip}}{A_{sphere}} = \frac{\sin \theta}{2} d\theta \rightarrow \eta_0 = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{\sin \theta}{2} \cos^4 \theta d\theta = \frac{1}{5}$$



Σχήμα 24: Ίνες οπλισμένες σε μια γωνία  $\theta$  ως προς το φορτίο, ή προσανατολισμένες τυχαία σε 2D ή 3D στο σύνθετο υλικό.

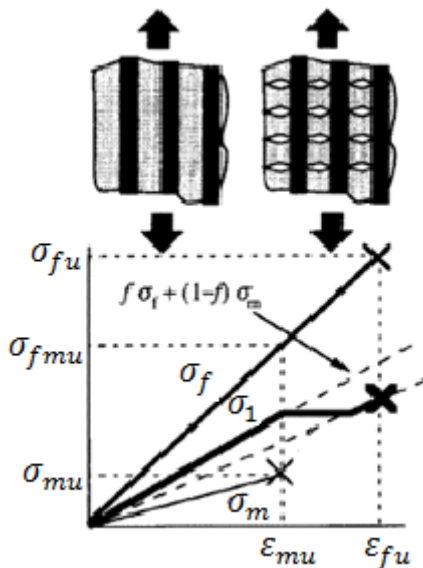
### 3.4 Θραύση και αντοχές

Για την εξέταση της αντοχής του συνθέτου υλικού σε αξονικό φορτίο, θεωρούμε ένα μονοαξονικό στρώμα με συνεχείς ίνες. Η μήτρα και οι ίνες είναι τελείως ελαστικές μέχρι τη θραύση τους.

#### 3.4.1 Αστοχία σε αξονική φόρτιση

Εδώ διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

- a) Όταν η μήτρα έχει χαμηλότερη ολκιμότητα (βλ. Σχήμα 26)
- b) Όταν η ίνα έχει χαμηλότερη ολκιμότητα (βλ. Σχήμα 27)



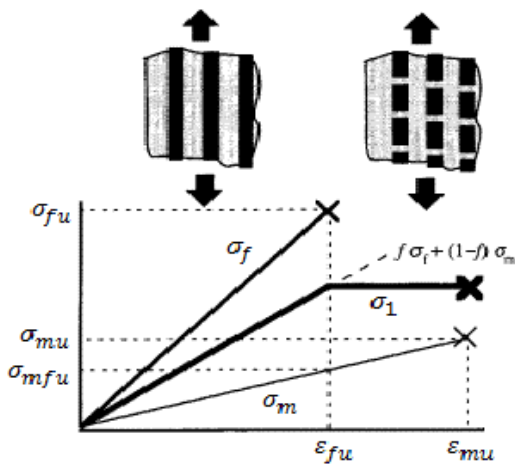
Σχήμα 25: Η αντοχή του συνθέτου όταν η μήτρα έχει χαμηλότερη ολκιμότητα από την ίνα

$$\sigma_1^* = \varphi \sigma_f^* \quad \text{ή}$$

$$\sigma_1^* = \varphi \sigma_{fm}^* + (1 - \varphi) \sigma_m^*$$

Η κρίσιμη τιμή του κλάσματος όγκου είναι:

$$\varphi' = \frac{\sigma_m^*}{\sigma_f^* - \sigma_{fm}^* + \sigma_m^*}$$



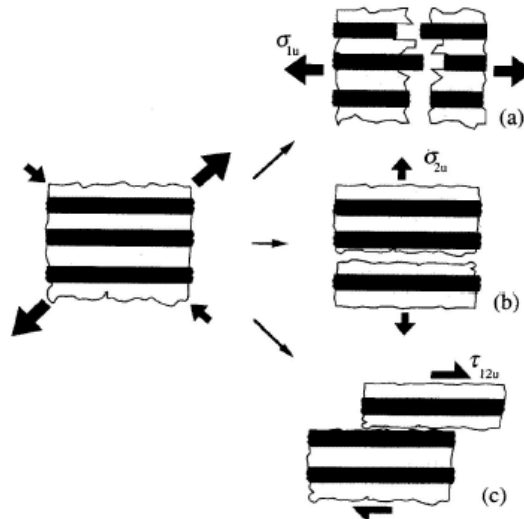
Σχήμα 26: Η αντοχή του συνθέτου όταν η μήτρα έχει υψηλότερη ολκιμότητα από την ίνα.

$$\sigma_1^* = (1 - \varphi) \sigma_m^* \quad \text{ή}$$

$$\sigma_1^* = \varphi \sigma_f^* + (1 - \varphi) \sigma_{mf}^*$$

Η κρίσιμη τιμή του κλάσματος όγκου είναι:

$$\varphi' = \frac{\sigma_m^* - \sigma_{mf}^*}{\sigma_f^* - \sigma_{mf}^* + \sigma_m^*}$$



Σχήμα 27: Αστοχία Ινοπλισμένου συνθέτου υλικού

### 3.4.2 Αστοχία σε εγκάρσια εφελκυστική παραμόρφωση

Οι ίνες εμποδίζουν την παραμόρφωση της μήτρας και δημιουργούν συγκέντρωση τάσεων στις διεπιφάνειες. Η αστοχία επέρχεται τότε σε παραμόρφωση μικρότερη από την ολκιμότητα της μήτρας. Οι τάσεις  $\sigma_r$  δίπλα στην ίνα είναι πολύ μεγαλύτερες από την ονομαστική και επεκτείνονται σε μήκος 5 διαμέτρων. Σε αυτή την περίπτωση θεωρούμε τις ίνες σαν κενά και η αντοχή γίνεται:

$$\sigma_2^* = \sigma_m^* \left[ 1 - 2 \left( \frac{\varphi}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

### 3.4.3 Αστοχία σε γωνία, $\phi$ , ως προς την κατεύθυνση των ινών

Αν το φορτίο δεν είναι αξονικό ή εγκάρσιο, τότε η αστοχία θα συμβεί όταν:  $\sigma_1 \geq \sigma_1^*$  ή  $\sigma_2 \geq \sigma_2^*$  ή  $\tau_{12} \geq \tau_{12}^*$ .

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$

Τότε για μονοαξονική φόρτιση  $\sigma_x$  η αστοχία θα επέλθει όταν:

$$\sigma_x^* = \frac{\sigma_1^*}{\cos^2 \varphi} \quad \text{ή} \quad \sigma_x^* = \frac{\sigma_2^*}{\sin^2 \varphi} \quad \text{ή} \quad \sigma_x^* = \frac{\tau_{12}^*}{\cos \varphi \sin \varphi}$$

Για σύνθετες τάσεις χρησιμοποιείται το κριτήριο του von Mises για τη διαρροή, προσαρμοσμένο για την αστοχία των σύνθετων υλικών. Αν  $p, q, r$  είναι οι κύριοι άξονες, τότε το κριτήριο αυτό είναι:

$$(\sigma_p - \sigma_q)^2 + (\sigma_q + \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_p)^2 = 2\sigma_Y^2$$

Σύμφωνα με τους Tsai - Hill, αστοχία σε μονοαξονικά σύνθετα υλικά επέρχεται όταν:

$$\left( \frac{\sigma_1}{\sigma_1^*} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_2}{\sigma_2^*} \right)^2 - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_1^{*2}} + \left( \frac{\tau_{12}}{\tau_{12}^*} \right)^2 = 1$$



Οι τιμές αυτών των τάσεων για μία δεδομένη γωνία  $\varphi$  μπορούν να βρεθούν από την καθολική μέθοδο μετασχηματισμού συντεταγμένων, π.χ.

$$\sigma_{\varphi} = \left[ \frac{\cos^2 \varphi (\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi)}{\sigma_1^{*2}} + \frac{\sin^4 \varphi}{\sigma_2^{*2}} + \frac{\cos^2 \varphi \sin^2 \varphi}{\tau_{12}^{*2}} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

### 3.5 Ανθεκτικότητα

#### Γενική θεωρία

Ο Inglis (1913) και ο Griffith (1920) έβαλαν τις βάσεις για την θεωρία της διάδοσης ρωγμής και τελικής θραύσης των υλικών. Η τάση στο άκρο μιας ρωγμής είναι  $\sigma = \sigma_{\infty} \left( 1 + 2 \sqrt{\frac{c}{r}} \right)$ . Η ρωγή διαδίδεται μόνο αν η ενέργεια του συστήματος μειώνεται. Δηλαδή, το άθροισμα της συσσωρευμένης ελαστικής ενέργειας,  $\frac{\sigma_{\infty}^2 \pi c^2}{E}$ , συν την ενέργεια λόγω αύξησης της επιφάνειας  $4\gamma c$ , συν την αλλαγή της εσωτερικής ενέργειας των κρυστάλλων, συν το εξωτερικό έργο, πρέπει να είναι αρνητικό.

$$\Delta U = -\Delta \frac{\sigma_{\infty}^2 \pi c^2}{E} + 4c\gamma + \dots < 0,$$

Όπου  $\gamma$ : επιφανειακή ενέργεια,  $c$ : μήκος,  $r$ : ακτίνα ρωγμής.

Από την παραπάνω εξίσωση, αγνοώντας τους υπόλοιπους όρους βρίσκουμε το κρίσιμο μήκος ρωγμής,  $c_* = \frac{2\gamma E}{\sigma_2^2 \pi}$ . Μόνο ρωγμές μεγαλύτερες από  $c_*$  μπορούν να διαδοθούν. Ο ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας τότε είναι:  $G = \frac{\sigma^2 \pi c}{E}$ .

Για να υπάρξει αστοχία πρέπει  $G > G_c$ , όπου  $G_c$  είναι ο κρίσιμος ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας, ή ενέργεια θραύσης (ανθεκτικότητα), μια ιδιότητα του υλικού ( $kJ m^{-2}$ ), που υπολογίζεται από την επιφάνεια κάτω από την καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης σε ένα πείραμα εφελκυσμού.

Η κρίσιμη τάση υπολογίζεται από την εξίσωση:  $\sigma_* = \sqrt{\frac{G_c E}{\pi c}}$ . Από αυτό υπολογίζεται ο παράγοντας έντασης τάσης:  $K' = \sigma \sqrt{\pi c}$  ( $Pa m^{1/2}$ ), ο οποίος χαρακτηρίζει την ένταση του πεδίου των τάσεων γύρω από την άκρη της ρωγμής. Η κρίσιμη τιμή του  $K'$  είναι ο κρίσιμος παράγοντας έντασης τάσης, ή δυσθραυστότητα,  $K_c = \sigma_* \sqrt{\pi c} = \sqrt{E G_c}$ , και χρησιμοποιείται για χαρακτηρισμό του υι γίνεται γύρω από το άκρο μιας ρωγμής στο υλικό. Για ένα ανθεκτικό υλικό  $K_c \sim 100 MPa m^{1/2}$ . Για ένα ψαθυρό υλικό:  $K_c \sim 1 MPa m^{1/2}$ .

Η ακτίνα της περιοχής πλαστικής παραμόρφωσης γύρω από το άκρο της ρωγμής είναι  $r_{\gamma} \approx \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K'}{\sigma_{\gamma}} \right)^2$ . Το άνοιγμα της ρωγμής είναι  $\delta \approx \left( \frac{K^2}{\sigma_{\gamma} E} \right)$ .

### 3.6 Διεπιφανειακή θραύση και διάδοση ρωγμών στα σύνθετα υλικά

Παρόλο που η μήτρα και οι ίνες είναι από μόνα τους ψαθυρά υλικά, η ενέργεια θραύσης των συνθέτων υλικών είναι συγκρίσιμη με αυτή των μετάλλων. Η επιπλέον ενέργεια προ-έρχεται από την αποκόλληση των επιφανειών ( $G_{ic}$ ) και την αλλαγή της κατεύθυνσης της διάδοσης της ρωγμής. Οι τρόποι διάδοσης της ρωγμής στην διεπιφάνεια είναι:

- Με εφελκυσμό
- Με διάτμηση (απορροφά περισσότερη ενέργεια!)
- Μικτός:  $\psi = \tan^{-1} \left( \frac{K'_{shear}}{K'_{tensile}} \right)$

Η κατεύθυνση διάδοσης της ρωγμής αλλάζει όταν η ρωγμή συναντάει διεπιφάνειες. Για μία ρωγμή που διαδίδεται και προσκρούει εγκάρσια σε μία ίνα η ύπαρξη της τάσης  $\sigma_2$  την κάνει να αλλάζει κατεύθυνση. Η  $\sigma_2$  είναι περίπου το 20% της  $\sigma_1$  και η ίνα αποκολλάται όταν η αντοχή του δεσμού της με τη μήτρα είναι λιγότερο από το 1/5 της αντοχής της μήτρας. Αυτό καταναλώνει ενέργεια. Όσο πιο πολλές διεπιφάνειες τόσο πιο πολλή ενέργεια απορροφάται.

Θεωρούμε την ίνα κολλημένη στη μήτρα. Η τάση είναι παράλληλη στην διεπιφάνεια. Η ρωγμή διαδίδεται κάθετα. Αν η ανάκλαση της ρωγμής στη διεπιφάνεια χρειάζεται λιγότερη ενέργεια από ότι η διάδοση της στο άλλο υλικό η ρωγμή θα εκτραπεί. Ο κρίσιμος λόγος των ενεργειών θραύσης,  $\frac{G_{ic}}{G_{fc}}$  για να εκτραπεί η ρωγμή είναι:

$$\frac{G_{ic}}{G_{fc}} \leq \left( \frac{h_m E_m + h_f E_f}{h_f E_f} \right) \left[ \frac{1}{4\pi(1 - \nu^2)} \right],$$

όπου  $G_{ic}$  : ενέργεια αποκόλλησης (διεπιφάνειας) και  $G_{fc}$  : ενέργεια θραύσης ίνας. Γενικά, για να αλλάξει φορά η ρωγμή πρέπει ο λόγος αυτός να είναι πολύ μικρότερος του 0.1.

Η ενέργεια θραύσης εξαρτάται και από την γωνία διάδοσης της ρωγμής σε σχέση με τον προσανατολισμό των ινών. Γίνεται μέγιστη όταν η διάδοση της ρωγμής είναι κάθετη στις ίνες.

### 3.7 Ερπυσμός

Ερπυσμός είναι η μακροχρόνια (αργή) παραμόρφωση ενός υλικού που υπόκειται σε σταθερή φόρτιση. Μερικά υλικά παρουσιάζουν σοβαρό πρόβλημα ερπυσμού, ενώ άλλα όχι. Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες υφίστανται πολύ λίγο ερπυσμό, ενώ τα θερμοπλαστικά πολυμερή πολύ περισσότερο, ιδίως σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι ίνες δεν παρουσιάζουν αξιόλογο ερπυσμό. Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν λιγότερο ερπυσμό από τη μήτρα τους, καθώς οι ίνες την συγκρατούν.

Κατά τον ερπυσμό ενός συνθέτου υλικού που υφίσταται αξονική φόρτιση η αρχική (ελαστική) παραμόρφωση αμέσως μετά από την εφαρμογή της τάσης είναι:

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma}{\varphi E_f + (1 - \varphi) E_m}$$

Μόνο το υλικό της μήτρας μπορεί να παρουσιάσει αξιόλογο ερπυσμό· έτσι η τάση μεταφέρεται σιγά σιγά στις ίνες. Όταν φθάσουν οι ίνες να φέρουν όλο το φορτίο η παραμόρφωση τους γίνεται:  $\varepsilon_{\infty} = \frac{\sigma}{\varphi E_f}$ . Τότε ο ερπυσμός σταματάει.

Ο ερπυσμός σε σύνθετα υλικά με κοντές ίνες είναι πιο συνηθισμένος. Η συμπεριφορά της μήτρας είναι καθοριστική για αυτό. Καθώς οι τάσεις στη μήτρα και στις ίνες εξαρτώνται από το λόγο των διαστάσεων των ινών, ο ερπυσμός του συνθέτου εξαρτάται από το μήκος των ινών.

### 3.8 Κόπωση

Κόπωση είναι η αστοχία του υλικού μετά από επαναλαμβανόμενη κυκλική φόρτιση με τάσεις χαμηλότερες από την αντοχή. Συνήθως χρειάζεται ένας μεγάλος αριθμός κύκλων ( $N \sim 10^6 - 10^7$ ) μέχρι να επέλθει η αστοχία. Για τον χαρακτηρισμό της κόπωσης χρησιμοποιούμε τη διαφορά των παραγόντων πυκνότητας τάσης,  $K = \sigma\sqrt{\pi c}$ , ανάμεσα στο μέγιστο και στο ελάχιστο του κύκλου,  $\Delta K' = K'_{max} - K'_{min}$  και το λόγο  $R = \frac{K'_{min}}{K'_{max}}$ . Η αναρροφούμενη ενέργεια ανά κύκλο εξαρτάται από το  $\Delta K'$ .

Η αντίσταση του υλικού σε κόπωση δίνεται από τον ταχύτητα επέκτασης της ρωγμής ανά κύκλο φόρτισης:  $\frac{dc}{dN}$ . Σε μέσες τιμές του  $\Delta K$  η ταχύτητα επέκτασης της ρωγμής ανά κύκλο φόρτισης είναι  $\frac{dc}{dN} = \beta(\Delta K)^n$ . Το  $n$  δίνει τη (λογαριθμική) κλίση στο διάγραμμα (αυξάνει με τις ίνες). Για μικρές τιμές του  $\Delta K$  οι ρωγμές δεν αναπτύσσονται. Οι ίνες αυξάνουν την ελάχιστη τιμή του  $\Delta K$  για κόπωση γιατί προκαλούν ανάκλαση των ρωγμών και εμποδίζουν τις μπάντες ολίσθησης.

Σε ένα υλικό που υφίσταται κόπωση η αστοχία επέρχεται με τη δημιουργία και επέκταση μεμονωμένων ρωγμών. Η κατάσταση της επιφάνειας του υλικού είναι πολύ σημαντική για την αρχική δημιουργία των ρωγμών. Τα σύνθετα υλικά είναι πιο ανθεκτικά σε κόπωση από τα μέταλλα, τουλάχιστον σε εφελκυστική καταπόνηση. Εδώ οι ρωγμές που οδηγούν σε κόπωση δημιουργούνται μέσα στη μήτρα. Αστοχία επέρχεται όταν υπάρξει θραύση ινών.

### 3.9 Κατάλογος Συμβόλων

$A$	επιφάνεια διατομής
$E_1$	μέτρο ελαστικότητας κατά μήκος του άξονα της ίνας
$E_2$	μέτρο ελαστικότητας εγκάρσια του άξονα της ίνας
$E_f$	μέτρο ελαστικότητας υλικού ίνας
$E_m$	μέτρο ελαστικότητας υλικού μήτρας
$G$	ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας (κατά τη θραύση)
$G_c$	ενέργεια θραύσης
$G_f$	μέτρο διάτμησης ίνας
$G_m$	μέτρο διάτμησης μήτρας
$G_{ij}$	μέτρο διάτμησης
$K$	bulk modulus
$K'$	παράγοντας έντασης τάσης
$K_c$	δυσθραυστότητα
$P$	δύναμη (φορτίο)
$P_f$	φορτίο (δύναμη) στην ίνα
$P_m$	φορτίο (δύναμη) στη μήτρα
$V$	όγκος
$V_f$	κλάσμα όγκου ίνας (= $\varphi$ )
$V_m$	κλάσμα όγκου μήτρας
$\Psi(\theta)$	συνάρτηση κατανομής πιθανότητας για τη γωνία $\theta$
$\alpha$	λόγος των μέτρων ελαστικότητας ινών/μήτρας
$\varepsilon$	παραμόρφωση
$\varepsilon_f$	εφελκυστική παραμόρφωση στην ίνα
$\varepsilon_m$	εφελκυστική παραμόρφωση στη μήτρα
$\varepsilon_1$	εφελκυστική παραμόρφωση σύνθετου
$\eta$	παράμετρος του μοντέλου Halpin-Tsai
$\eta_0$	δείκτης αποτελεσματικότητας προσανατολισμού

---

$\gamma$	επιφανειακή ενέργεια
$\nu_f$	λόγος του Poisson της ίνας
$\nu_m$	λόγος Poisson της μήτρας
$\nu_{ij}$	λόγος του Poisson
$\varphi$	κλάσμα όγκου ινών
$\sigma$	τάση
$\sigma^*$	αντοχή σε εφελκυσμό
$\sigma_1^*$	αντοχή του συνθέτου σε εφελκυσμό στην κατεύθυνση της ίνας
$\sigma_f$	εφελκυστική τάση στην ίνα
$\sigma_f^*$	αντοχή της ίνας
$\sigma_m$	εφελκυστική τάση στη μήτρα
$\sigma_m^*$	αντοχή της μήτρας
$\sigma_2^*$	αντοχή του συνθέτου εγκάρσια στις ίνες
$\sigma_{fm}^*$	τάση στην ίνα στο σημείο αστοχίας της μήτρας
$\tau_{12}^*$	αντοχή σε διάτμηση
$\tau_{ijf}$	διατμητική τάση στην ίνα
$\tau_{ij}$	διατμητική τάση στην ίνα
$\theta(x)$	γωνία των ινών (του στημονιού)
$\varepsilon^*$	ολκιμότητα
$\xi$	παράμετρος του μοντέλου Halpin-Tsai
$c$	μήκος ρωγμής
$c_*$	κρίσιμο μήκος ρωγμής
$r$	μικρή ακτίνα ρωγμής
$r_\gamma$	ακτίνα της περιοχής πλαστικής παραμόρφωσης γύρω από το άκρο της ρωγμής





## 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

## 4.1 Αξονική καταπόνηση κελυφών

### 4.1.1 Αξιολόγηση συμπεριφοράς των συστημάτων ως προς την απορρόφηση ενέργειας

Η αξιολόγηση της συμπεριφοράς των συστημάτων απορρόφησης ενέργειας έχει πρωτεύουσα σημασία. Ο πρωταρχικός μηχανισμός απορρόφησης ενέργειας είναι η εφαρμογή ενός φορτίου για μια δεδομένη μετατόπιση. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η μετατόπιση για δεδομένη απορροφούμενη ενέργεια, τόσο μικρότερο είναι το μέσο φορτίο  $\bar{P}$ . ο σχεδιαστικός στόχος είναι η μέγιστη δυνατή διάχυση ενέργειας κατά τρόπο μη αντιστρεπτό. Με αυτό το σκεπτικό, η βέλτιστη συμπεριφορά που αναμένεται από κάποιο υλικό είναι αυτή του απόλυτα πλαστικού υλικού, όπου το διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης προσδιορίζεται από μια τετραγωνική επιφάνεια.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την συλλογή δεδομένων για ένα υλικό σχετικά με την ικανότητα του προς απορρόφηση ενέργειας, είναι η ανάπτυξη κριτηρίων που θα μπορούσαν να ελεγχθούν και να αποτελούν συγκρίσιμα μεγέθη για περαιτέρω επεξεργασία.

Μερικά από τα βασικά κριτήρια που έχουν ήδη αναπτυχθεί είναι τα ακόλουθα:

- I. Συνολική απορροφούμενη ενέργεια  $W$ , η οποία προκύπτει από το διάγραμμα φορτίου μετατόπισης  $P - s$  με ολοκλήρωση

$$W = \int P ds$$

- II. Μέσο μεταελαστικό φορτίο  $\bar{P}$ , το οποίο προκύπτει από τη σχέση,

$$\bar{P} = \frac{W}{s}$$

- III. Ειδική ενέργεια απορρόφησης  $W_s$  (**Specific Energy Absorption**), η οποία προκύπτει από τη σχέση,

$$E_s = \frac{W}{m_c}$$

Όπου,  $m_c$ , η μάζα του υλικού που έχει διαρρεύσει

- IV. Ομοιομορφία φορτίου (**Load Uniformity**)

$$LU = \frac{P_{max}}{\bar{P}}$$

Όπου  $P_{max}$ , η μέγιστη τιμή του φορτίου που επιτυγχάνεται κατά την ελαστική του παραμόρφωση πριν κατά παραδοχή, αρχίσει η κατάρρευση του υλικού.

- V. Πυκνότητα διάχυσης ενέργειας (**Energy Dissipation Density**)  $E_v$ , η οποία προκύπτει από τη σχέση

$$E_v = \frac{W}{V}$$

Όπου  $V$  ο όγκος του κατεστραμμένου υλικού.



- VI. Λόγος  $b$ , ο οποίος ορίζεται ως το πηλίκο του φορτίου σε δυναμική καταπόνηση,  $P_{dyn}$  προς το φορτίο σε στατική καταπόνηση,  $P_{stat}$ .

$$b = \frac{P_{dyn}}{P_{stat}}$$

## 4.2 Πειραματικό μέρος

### 4.2.1 Σκοπός του πειράματος

Σκοπός της διεξαγωγής των πειραμάτων που εντάσσονται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη της επίδρασης εγκάρσιων και διαμηκών επιφανειακών διαμορφώσεων (αυλακώσεις), στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, δοκιμών κυλινδρικής, τετραγωνικής και ορθογωνικής διατομής, κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά.

### 4.2.2 Διεξαγωγή του πειράματος

#### 4.2.2.1 Επιλογή, έλεγχος και ετοιμασία δοκιμών

Αρχικά επιλέξαμε τα πιθανά δοκίμια για την διεξαγωγή των πειραμάτων από τα διαθέσιμα που υπάρχουν στο χώρο του εργαστηρίου του τομέα κατεργασιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Κάποια απ' τα δοκίμια έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί σε προηγούμενες διπλωματικές εργασίες και διδακτορικές διατριβές. Έχουμε στη διάθεσή μας 5 λεπτότοιχες δοκούς από σύνθετο υλικό. Στον 12 παρουσιάζεται η ονομασία που δώσαμε σε κάθε υλικό καθώς και το είδος της διατομής του.

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ
SP1	Τετραγωνική
SP2	Ορθογωνική
SP3	Κυλινδρική
SP4	Κυλινδρική
SP5	Κυλινδρική

Πίνακας 12: Ονομασία επιλεγμένων δοκών από σύνθετο υλικό και η διατομή τους

Χάριν ευκολίας ονομάσαμε τις δοκούς SP (Specimens) SP1,2,3,4 και 5

Λόγω έλλειψης πληροφοριών για την δομή των δοκών SP1, SP2, SP3, έπρεπε να ελέγξουμε κατά πόσο το υλικό είναι εμπλουτισμένο με ίνες, πόσες στρώσεις υπάρχουν και ποια είναι η φορά αυτών. Έτσι ακολουθήσαμε την εξής διαδικασία.

Αρχικά κόψαμε δείγματα από τις δοκούς με τη βοήθεια τροχού κοπής με διαμάντι. Τα πακτώσαμε σε μέγγενη και με πριόνι μικρού μεγέθους αποκόψαμε ένα μέρος (~1/4) της συνολικής διατομής. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας κοπίδι ξύσαμε αρχικά την εξωτερική και έπειτα την εσωτερική επιφάνεια για να βγάλουμε συμπεράσματα για τη διαστρωμάτωση του υλικού. Στον πίνακα 13 φαίνονται τα εξής αποτελέσματα.

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΙΝΩΝ		ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΙΝΩΝ
	Εσωτερικά	Εξωτερικά	
SP1	1	2	Τυχαία
SP2	1	4	Τυχαία
SP3	1	6	Τυχαία
SP4	32		Μοδοδιευθυντικές στρώσεις
SP5	14		Πλέγμα

Πίνακας 13: Αποτελέσματα ελέγχου της δομής των δοκών SP1,SP2,SP3

Από τα κελύφη σύνθετου υλικού που αναφέρθηκαν, κόπηκαν δεκαεπτά(17) δοκίμια με τη βοήθεια τροχού κοπής με διαμάντι. Από απ' την κάθε μια δοκό SP1,SP2,SP3 κόπηκαν 3 δοκίμια, ορίζοντας ως ονομαστικό μήκος τα  $H = 80mm$ , ενώ από το κάθε κυλινδρικό κέλυφος SP4,SP5 κόπηκαν 4 δοκίμια με ονομαστικό μήκος  $H = 30mm$ .

Στη συνέχεια με τη χρήση παχυμέτρου μετρήθηκαν η εξωτερική και εσωτερική διάμετρος των κυλινδρικών δοκιμίων σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις,  $d_{out1}$  και  $d_{out2}$  αντίστοιχα και από το ημίθροισμα των δυο αυτών μετρήσεων προέκυψε η εξωτερική διάμετρος  $d_{out}$ , ενώ ομοίως για τα δοκίμια τετραγωνικής διαμέτρου, μετρήθηκε το μήκος των πλευρών τους  $a$  και  $b$  σε πέντε διαφορετικά σημεία και από το μέσο όρο των μετρούμενων τιμών, υπολογίσαμε το αντίστοιχο μήκος. Ακόμη μετρήθηκαν το μέγιστο ( $t_{max}$ ) και ελάχιστο ( $t_{min}$ ) πάχος των τοιχωμάτων των δοκιμίων που προήλθαν απ' τα SP1 και SP2 και από το ημίθροισμα αυτών υπολογίστηκε το πάχος  $t$  του τοιχώματος δοκιμίων. Για τα δοκίμια που προήλθαν απ' τα SP3,SP4,SP5 υπολογίσαμε το πάχος με βάση τη σχέση  $\frac{(d_{out}-d_{in})}{2}$ . Τέλος μετρήθηκε το ύψος  $H$  του κάθε δοκιμίου. Όλες οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

SP1							
ΟΝΟΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	$a$ (mm)	$b$ (mm)	$t_{min}$ (mm)	$t_{max}$ (mm)	$t$ (mm)	$H_{ov}$ (mm)	$H$ (mm)
$R_A$	51.75	48.5	4	5	4.5	80	80.5
$R_{A1}$	52.25	49.75	4.5	6	5.25	80	78.5
$R_{A2}$	52.5	48.65	4	5.5	4.75	80	80.5

SP2							
ΟΝΟΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	$a$ (mm)	$b$ (mm)	$t_{min}$ (mm)	$t_{max}$ (mm)	$t$ (mm)	$H_{ov}$ (mm)	$H$ (mm)
$R_B$	59.5	51.75	4	5	4.5	80	80.5
$R_{B1}$	60	52.5	4	5.5	4.75	80	80.5
$R_{B2}$	58	51	4	5	4.5	80	80.5

SP3					
ΟΝΟΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	$d_{out}$ (mm)	$d_{in}$ (mm)	$t$ (mm)	$H_{ov}$ (mm)	$H$ (mm)
$C_A$	50.20	44.08	3	80	80.15
$C_{A1}$	49.78	44.4	2.7	80	80
$C_{A2}$	49.5	44.5	2.5	80	80

SP4					
ΟΝΟΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	$d_{out}$ (mm)	$d_{in}$ (mm)	$t$ (mm)	$H_{ov}$ (mm)	$H$ (mm)
$C_B$	28.5	24	2.25	30	30.2
$C_{B1}$	28.5	24	2.25	30	30.1
$C_{B2}$	28.5	24	2.25	30	30.1
$C_{B3}$	28.5	24	2.25	30	30.3

SP5					
ΟΝΟΜΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	$d_{out}$ (mm)	$d_{in}$ (mm)	$t$ (mm)	$H_{ov}$ (mm)	$H$ (mm)
$C_C$	28.6	23.6	2.5	30	30
$C_{C1}$	28.6	23.6	2.5	30	30.4
$C_{C2}$	28.6	23.6	2.5	30	30.2
$C_{C3}$	28.6	23.6	2.5	30	30.1

Πίνακας 14: Γεωμετρικές διαστάσεις των δοκιμών

Χάρη ευκολίας ονομάσαμε τα δοκίμια με τα γράμματα  $R$ (rectangular) και  $C$ (cylindrical)

Παρατηρούμε ότι τα πολλά δοκίμια, αν και προέρχονται απ την ίδια δοκό δεν έχουν σταθερό πάχος (π.χ. τα  $R_A, R_{A1}, R_{A2}$ ). Αυτές οι διαφορές στην γεωμετρία τους οφείλονται στον τρόπο κατασκευής τους.

Στη συνέχεια ακολούθησε η διαμόρφωση των αυλακώσεων στα κατάλληλα δοκίμια. Συγκεκριμένα στα δοκίμια κυκλικής διατομής χρησιμοποιήθηκε τόννος για την χάραξη επιφανειακών εγκάρσιων αυλακώσεων, ενώ για τα δοκίμια τετραγωνικής και ορθογωνικής διατομής με τη χρήση φρέζας διαμορφώσαμε την επιφάνεια κατά τον διαμήκη άξονα. Όλες οι κατεργασίες πραγματοποιήθηκαν στο χώρο του εργαστηρίου του τομέα κατεργασιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη και καθοδήγηση του ειδικευμένου τεχνικού προσωπικού.

Περισσότερες πληροφορίες για την γεωμετρία των δοκιμών θα παρουσιαστούν στη συνέχεια.

Για τον υπολογισμό των πυκνοτήτων τους ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία. Αρχικά, κόπηκαν δείγματα από κάθε σωλήνα κ μετρήθηκαν οι διαστάσεις και η μάζα τους. Υπολογίζοντας τον όγκο του κάθενός και με χρήση του τύπου της  $d = m/V$  υπολογίστηκε η πυκνότητα του κάθε υλικού. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 15.

	<b>SP1</b>	<b>SP2</b>	<b>SP3</b>	<b>SP4</b>	<b>SP5</b>
<b>H (mm)</b>	217	54.45	16.07	18.27	30.24
<b>m (gr)</b>	229.9	64.9	13.5	4.5	9.1
<b>V(mm<sup>3</sup>)</b>	93310	26199.25	98095.46	3745.14	52912.18
<b>d(gr/mm<sup>3</sup>)</b>	0.002463	0.002477	0.001367	0.001201	0.001715

Πίνακας 15: Πίνακας πυκνοτήτων των κελυφών

#### 4.2.2.2 Αξονική καταπόνηση δοκιμών

Ακολούθως τα δοκίμια που προήλθαν απ' τα κελύφη  $SP3, SP4, SP5$  τοποθετήθηκαν στη πρέσα δοκιμών «INSTRON 4482» του εργαστηρίου. Η ταχύτητα καθόδου ρυθμίστηκε στα  $10mm \cdot min^{-1}$ . Κατά τη διάρκεια της καταπόνησης των δοκιμών στην πρέσα ελήφθησαν φωτογραφίες σε διάφορες φάσεις της καθόδου του και εμβόλου μαγνητοσκοπήθηκε ολόκληρη η διαδικασία για την ακριβή ανάλυση των αποτελεσμάτων. Μετά το πέρας των δοκιμών τα δοκίμια φωτογραφήθηκαν έτσι ώστε να αποτυπωθούν τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά τους.

#### 4.2.2.3 Επεξεργασία δοκιμών για μικρογραφική ανάλυση

Για μικροσκοπική ανάλυση επιλέχτηκαν τα δοκίμια που δε φέρουν αυλακώσεις, δηλαδή τα  $R_A, R_B, C_A, C_B, C_C$ . Αρχικά τοποθετήθηκαν στον δισκοτόμο, συγκρατήθηκαν με τον κατάλληλο εξοπλισμό για να γίνει ακριβής κοπή και κατεβάζοντας έναν μοχλό, ο δίσκος έκοψε τα δοκίμια στα επιθυμητά σημεία.

Συγκεκριμένα, τα δοκίμια  $C_A, C_B, C_C$  κόπηκαν υπό γωνία  $90^0$ . Το  $R_A$  υπό γωνία  $45^0$ , ενώ στο  $R_B$  έγιναν δύο τομές για ακριβέστερη ανάλυση. Ακολούθως πάρθηκαν φωτογραφίες και αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα, τα οποία παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 6.

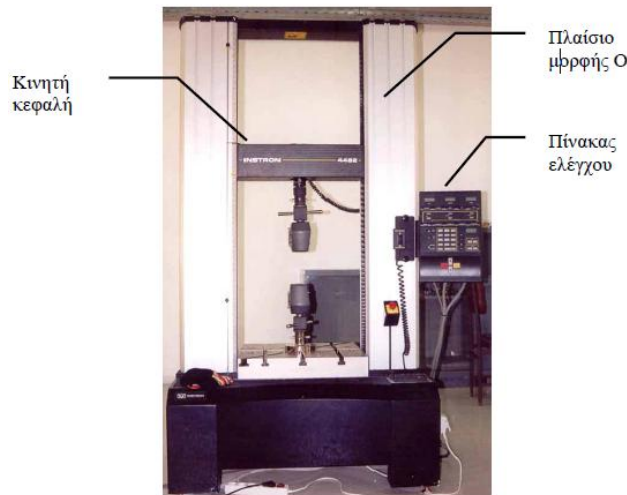
### 4.2.3 Πειραματικός εξοπλισμός

#### 4.2.3.1 Πρέσα INSTRON 4482

Για την αξονική καταπόνηση των δοκιμών  $C_{A,1,2}, C_{B,1,2,3}, C_{C,1,2,3}$  χρησιμοποιήθηκε η πρέσα δοκιμών INSTRON 4482 του εργαστηρίου. Πρόκειται για μηχανική πρέσα (μηχανισμού κοχλία-περικοχλίου) ονομαστικού φορτίου  $10kN$ .

Τα βασικά μέρη αυτής, είναι,

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



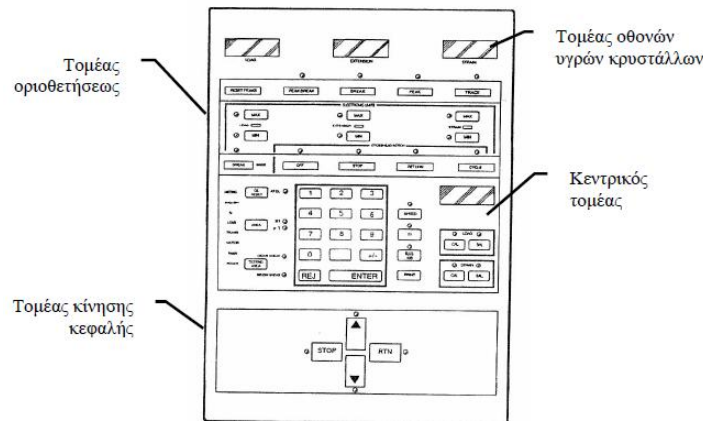
Σχήμα 28: Πρέσα δοκιμών INSTRON 4482, ονομαστικού φορτίου  $10kN$

Τα βασικά χαρακτηριστικά της πρέσας αυτής είναι:

- Ονομαστική δύναμη :  $10 kN$
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής :  $500 mm/min$
- Ταχύτητα επιστροφής της κεφαλής :  $600 mm/min$
- Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο στη μέγιστη ταχύτητα :  $7.5 kN$
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής σε μέγιστο φορτίο :  $250 mm/min$
- Ευαισθησία κεφαλής πρέσας:  $2 mV \cdot V^{-1}$

Ο πίνακας ελέγχου έχει ενσωματωμένο μικροεπεξεργαστή που αναλαμβάνει τη ρύθμιση όλων των παραμέτρων κατεργασίας και την επεξεργασία των απαραίτητων υπολογισμών. Όπως φαίνεται στο σχήμα 30 ο πίνακας ελέγχου απαρτίζεται από τέσσερις κυρίους τομείς.

- Τον κεντρικό τομέα.
- Τον τομέα οθονών υγρών κρυστάλλων.
- Τον τομέα οριοθετήσεως.
- Τον τομέα κίνησης κεφαλής.



Σχήμα 29: Πίνακας ελέγχου πρέσας INSTRON 4482

Ιδιαίτερη σημασία έχει η σωστή τοποθέτηση του δοκιμίου στην κάτω πλάκα της πρέσας, ώστε να αποφευχθεί τυχόν μετακίνησή του, και οι δύο πλάκες να μείνουν παράλληλες μεταξύ τους, κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Με τον τρόπο αυτόν αποφεύγεται η επιβολή μεγάλων φορτίων και εφαρμογή στρεπτικής δύναμης στην πλάκα βάσης.

Τέλος, με το κατάλληλο λογισμικό - στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το Instron Series IX Automated Material Tester Version 7.00 - μας δίνεται η δυνατότητα να επεξεργαστούμε τα λαμβανόμενα αρχεία και να δημιουργήσουμε τα απαραίτητα γραφήματα και τους υπολογισμούς.

#### 4.2.3.2 Υδραυλική Πρέσα

Για την αξονική στατική καταπόνηση των δοκιμών  $R_{A,1,2}, R_{B,1,2}$  χρησιμοποιήθηκε η υδραυλική πρέσα του εργαστηρίου. Πρόκειται για πρέσα διπλής ενέργειας και ονομαστικού φορτίου 100 tn. Κατασκευάστηκε από την εταιρεία SMG στην Γερμανία. Είναι πρέσα ορθού πλαισίου (ή τύπου O). Το κύριο έμβολο στηρίζεται στην κεφαλή της εργαλειομηχανής (κινείται από πάνω προς τα κάτω) και έχει μέγιστη διαδρομή 600 mm. Το σεπόρτι της εργαλειομηχανής οδηγείται από ειδικές πρισματικές γλίστρες και διαθέτει μηχανικό εξολκέα.

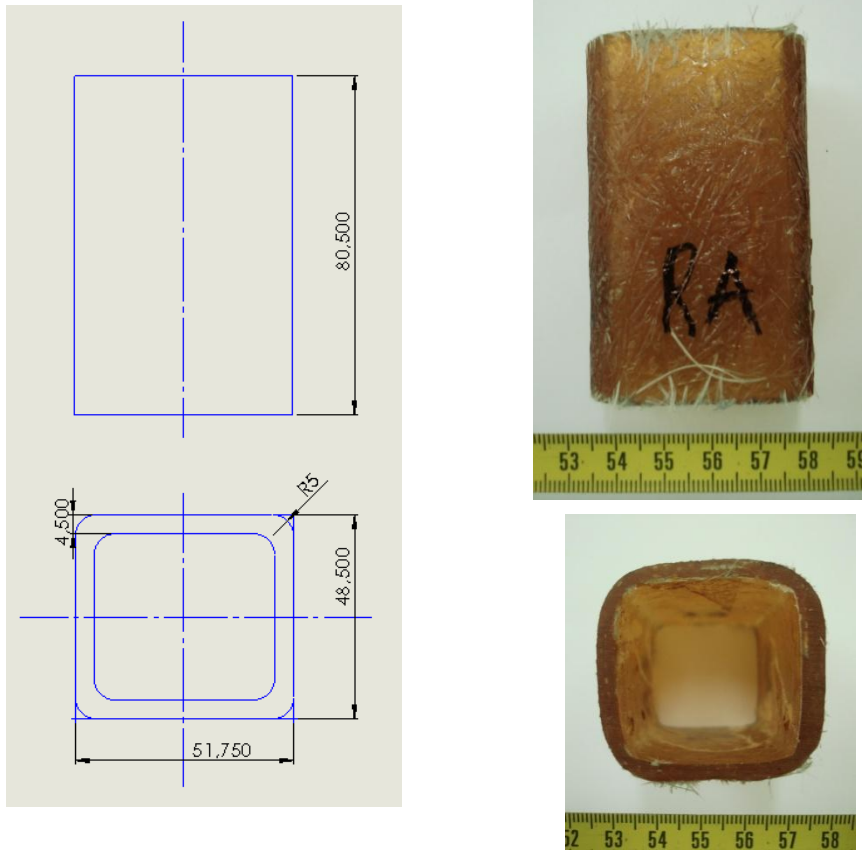
Επίσης συνδέθηκε και ελέγχεται από Η/Υ ενώ τοποθετήθηκαν μετρητικά όργανα οι ενδείξεις των οποίων καταγράφονται από τον υπολογιστή.

Η πρέσα είναι εξοπλισμένη με χειροκίνητο και ηλεκτρικό έλεγχο. Επίσης έχει τρεις διαμορφώσεις λειτουργίας την απλή, την ημιαυτόματη, και την αυτόματη. Η επιλογή του τρόπου και της διαμόρφωσης λειτουργίας γίνεται από διακόπτες. Ο χειροκίνητος έλεγχος επιτρέπει την πολύ προσεκτική λειτουργία της πρέσας. Ενδείκνυται λοιπόν για τη ρύθμισή της και την τοποθέτηση των εργαλείων. Ο ηλεκτρονικός έλεγχος ενδείκνυται για τη συνεχή λειτουργία της πρέσας.

#### 4.2.4 Πειραματικές δοκιμές και μετρήσεις

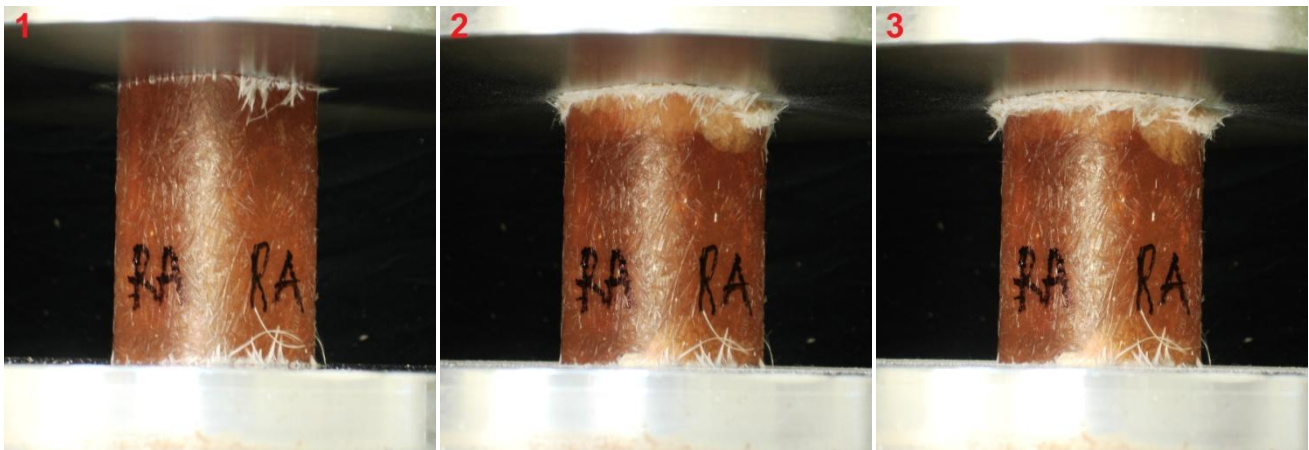
##### 4.2.4.1 Δοκίμιο $R_A$

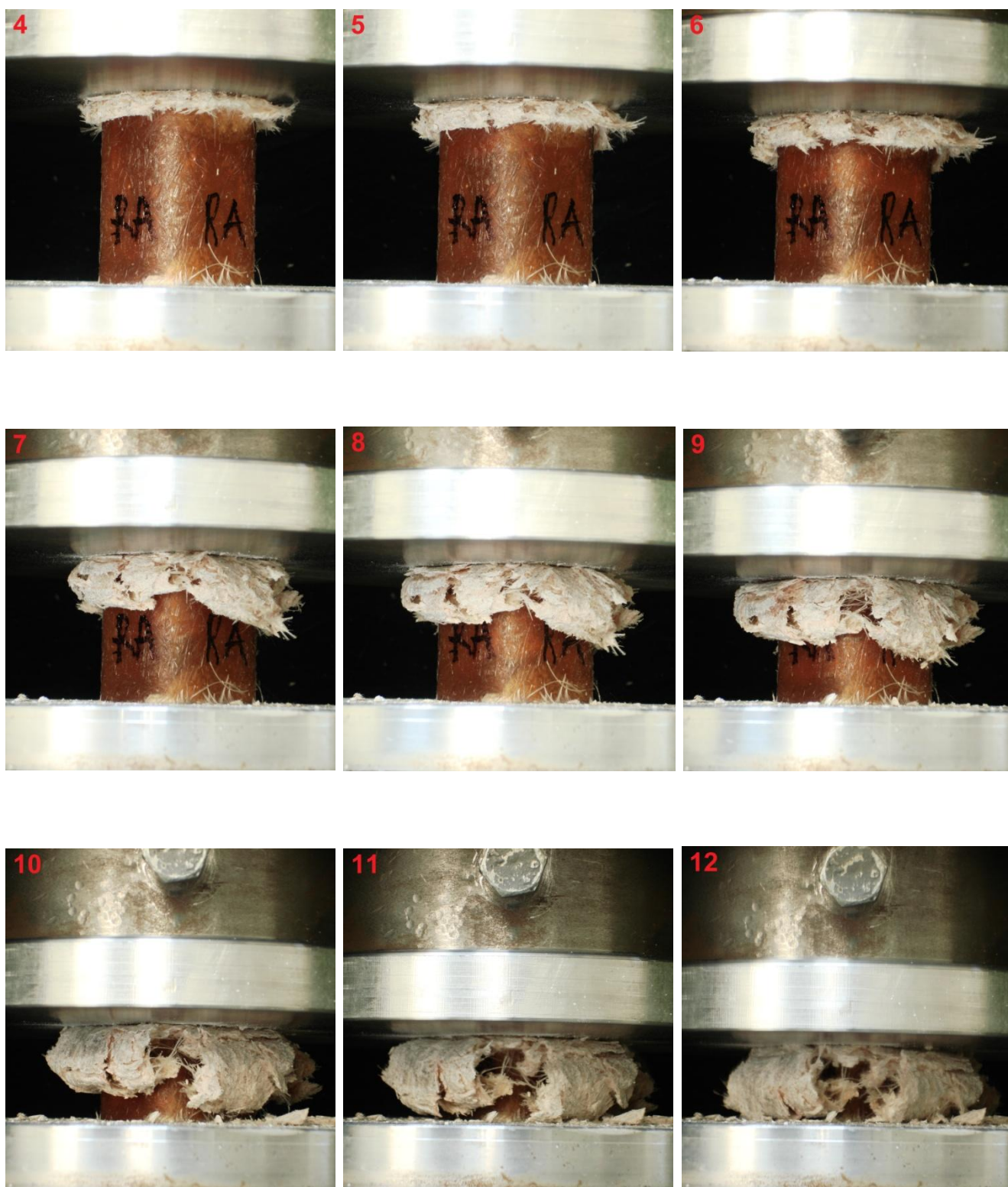
Παρακάτω παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου  $R_A$ . Το εν λόγω δοκίμιο είναι τετραγωνικής διατομής και δεν φέρει αυλακώσεις στην εξωτερική του επιφάνεια.



Σχήμα 30: Σκαρίφημα δοκιμίου  $R_A$  (αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου  $R_A$  (δεξιά).

Στη συνέχεια απεικονίζονται οι διαδοχικές φάσεις από την κατάρρευση των δοκιμίων.

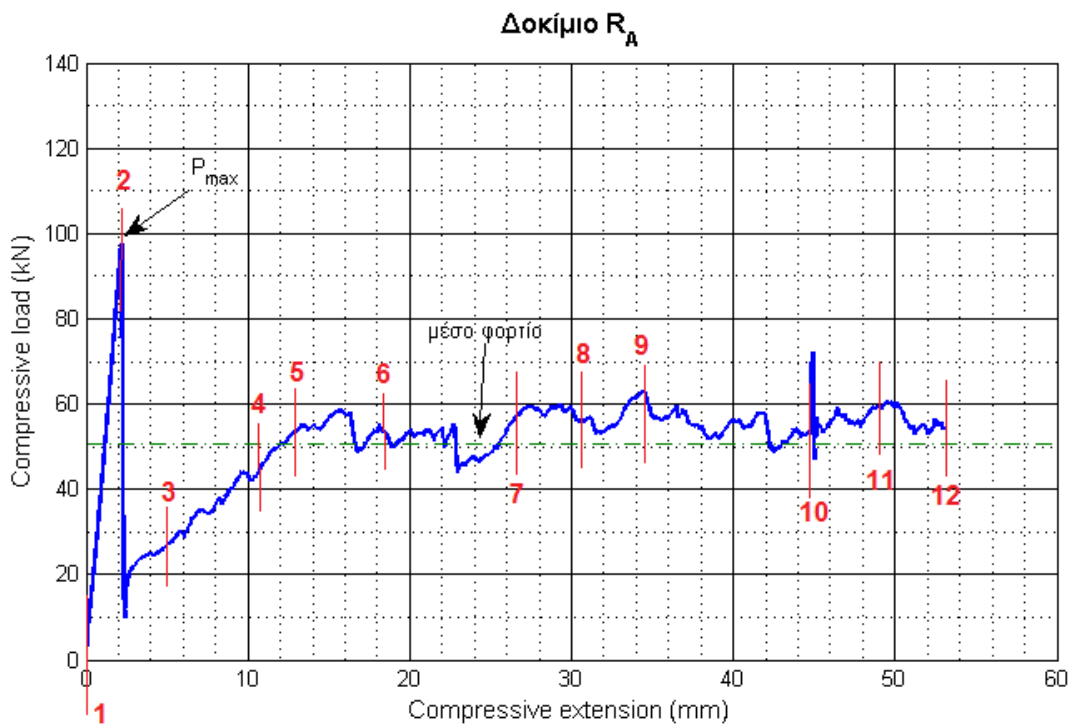








Στη συνέχεια απεικονίζεται το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης που λάβαμε με τη βοήθεια του ειδικού εξοπλισμού κατά την εκτέλεση του πειράματος θλίψης, καθώς και τα ύψη κατά τα οποία ελήφθησαν οι αντίστοιχες φωτογραφίες. Ακόμη στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται οι ποσότητες που απαιτούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης του συγκεκριμένου δοκιμίου.



αρ. φωτογρ.	1	2	3	4	5	6	7
Displacement (mm)	0	2.05	4.83	10.39	13.31	18.56	26.68
	8	9	10	11	12	13	14
	30.65	34.72	45.01	49.05	53.034	-	-

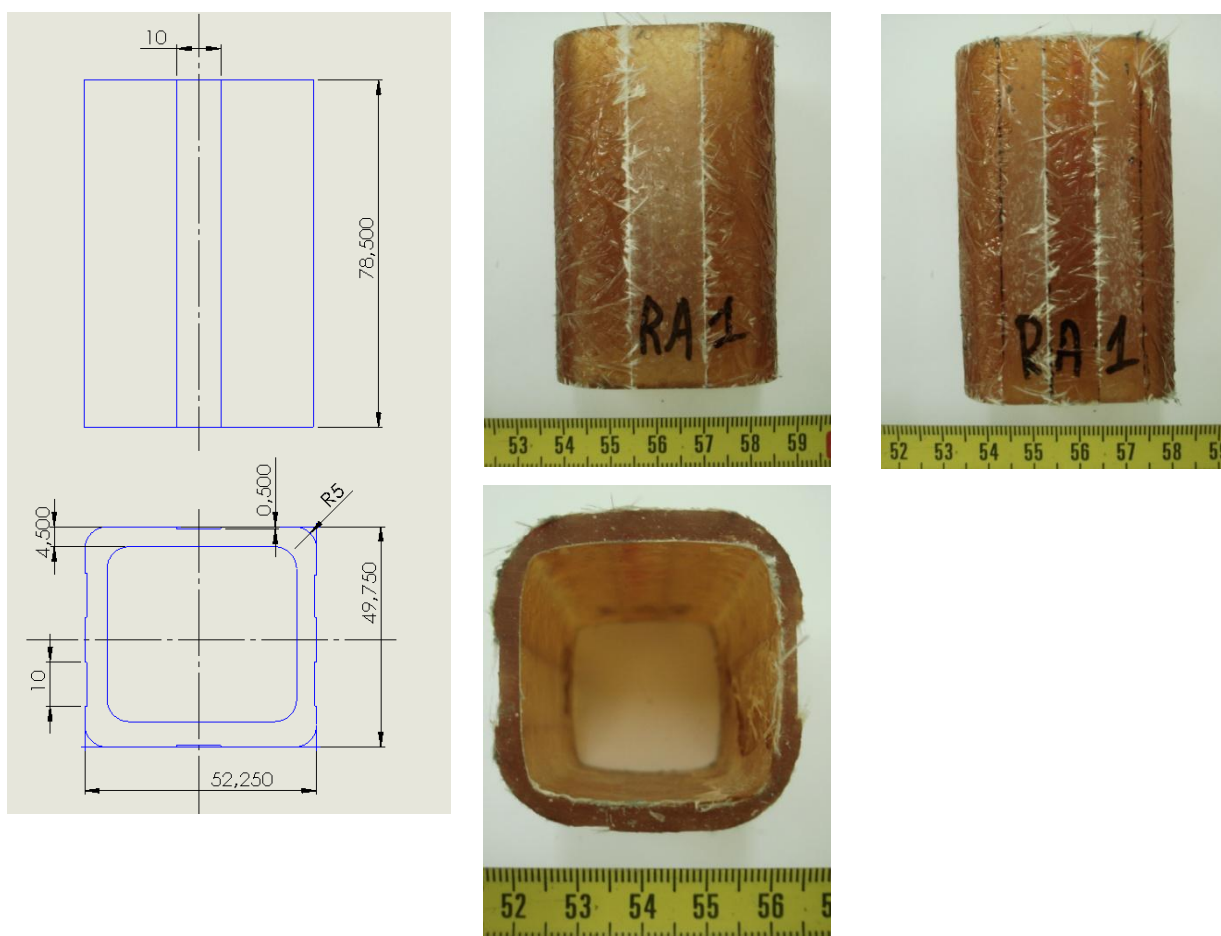
Αρχικό φορτίο $P = P_{max}$ (KN)	97.5639
Μέσο μεταελαστικό φορτίο $P$ (KN)	50.7752
Μήκος σύνθλιψης (mm)	53.034
Ολική απορροφούμενη ενέργεια (Joule)	2689.3712

#### Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

- Κατά την πρώτη φάση της συμπίεσης, το φορτίο αυξάνεται ραγδαία λαμβάνοντας μέγιστη τιμή 97.5639kN. Στη συνέχεια πέφτει απότομα δημιουργώντας τοπικό ελάχιστο και ξεκινάει η κατάρρευση του δοκιμίου από το άνωθεν μέτωπο.
- Χαρακτηριστικός είναι ο κρότος κατά την έναρξη της κατάρρευσης, ο οποίος «μαρτυρά» την ψαθυρότητα του υλικού. Ακόμη από την αλλαγή χρώματος του υλικού, στο σημείο που βρίσκεται ελάχιστα κάτω από το άνω μέτωπο(φωτογρ. 2), συμπεραίνουμε την ανάπτυξη εσωτερικών θραύσεων στο δοκίμιο.
- Αυτές οι θραύσεις δικαιολογούν τον σχετικά αργό ρυθμό αύξησης του φορτίου, καθώς η βάση της πρέσας ότι αργεί να βρει υψηλή αντίσταση από το υλικό.
- Παρατηρούμε στις φωτογραφίες 2-3 ότι η κάτω γωνία κατά την έναρξη της κατάρρευσης αλλάζει χρώμα. Αυτό συμβαίνει διότι αρχικά αναπτύχθηκαν υψηλές τάσεις και η κατάρρευση πήγε να ξεκινήσει από εκεί. Τελικώς όμως αστόχησε το άνωθεν μέτωπο και το κάτωθεν παρέμεινε αλώβητο.
- Εν συνεχεία η κατάρρευση μεταφέρεται και στο υπόλοιπο δοκίμιο, με το φορτίο από τα 12mm περίπου να ταλαντεύεται γύρο από μία μέση τιμή τάξης 55kN.
- Παρατηρούμε ότι το αρχικό φορτίο λαμβάνει υψηλή τιμή στην ελαστική περιοχή.
- Από τις φωτογραφίες κατά την εξέλιξη του πειράματος αλλά και από αυτές της τελικής κατάστασης του δοκιμίου, συμπεραίνουμε ότι το δοκίμιο δεν διέλυσε, αλλά παρέμεινε ως ένα ενιαίο φύλλο. Τα συνεχή σχηματιζόμενα μέτωπα εκτείνονται εσωτερικά και εξωτερικά αυτού.

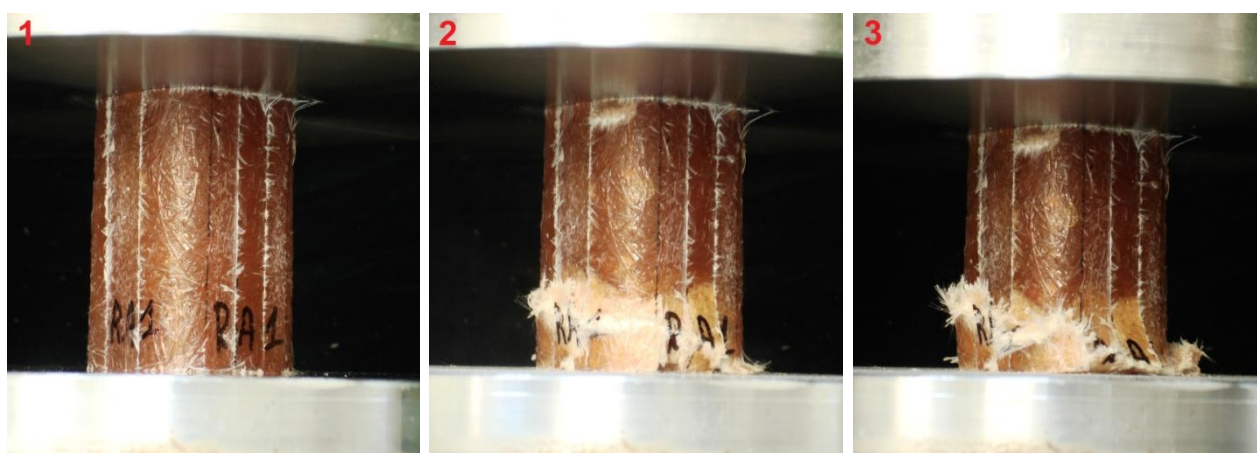
#### **4.2.4.2 Δοκίμιο $R_{A1}$**

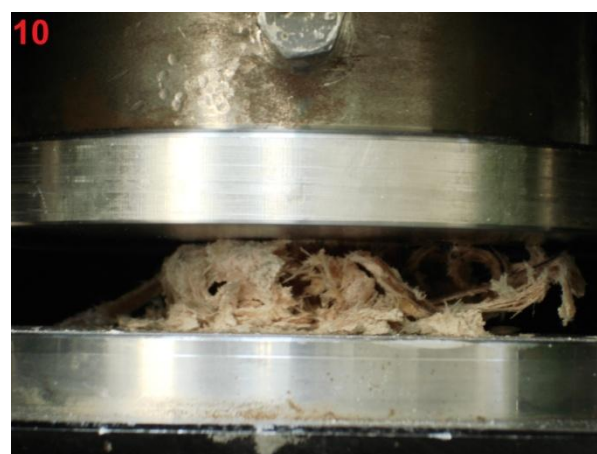
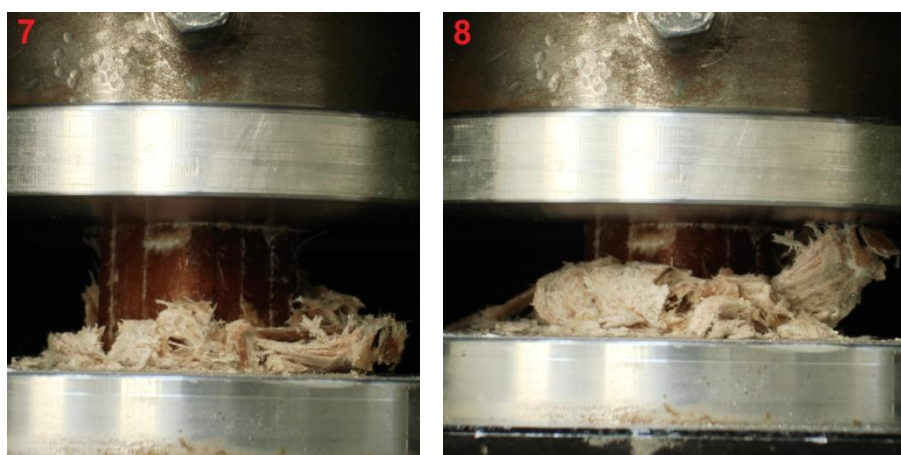
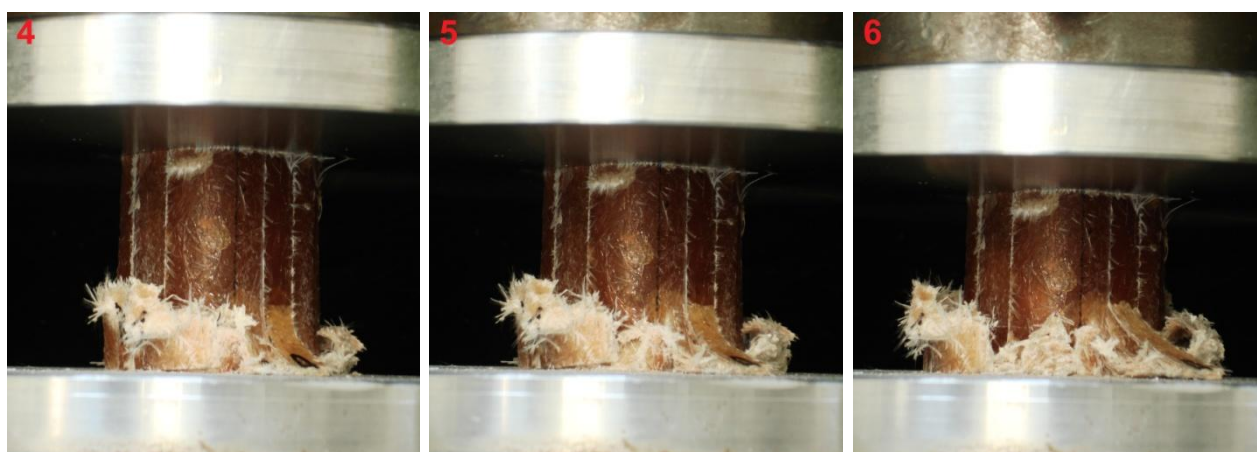
Παρακάτω παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου  $R_{A1}$ . Το εν λόγω δοκίμιο είναι τετραγωνικής διατομής και φέρει διαμήκεις αυλακώσεις στην εξωτερική του επιφάνεια. Συγκεκριμένα στην πλευρά  $a$  φέρει 2 αυλακώσεις 10mm ανά 10mm, βάθους 5mm και στην πλευρά  $b$  μία αυλάκωση 10mm στο μέσο της, βάθους 5mm.



Σχήμα 31: Σκαρίφημα δοκιμίου  $R_{A1}$  (αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου  $R_{A1}$  (κέντρο, δεξιά).

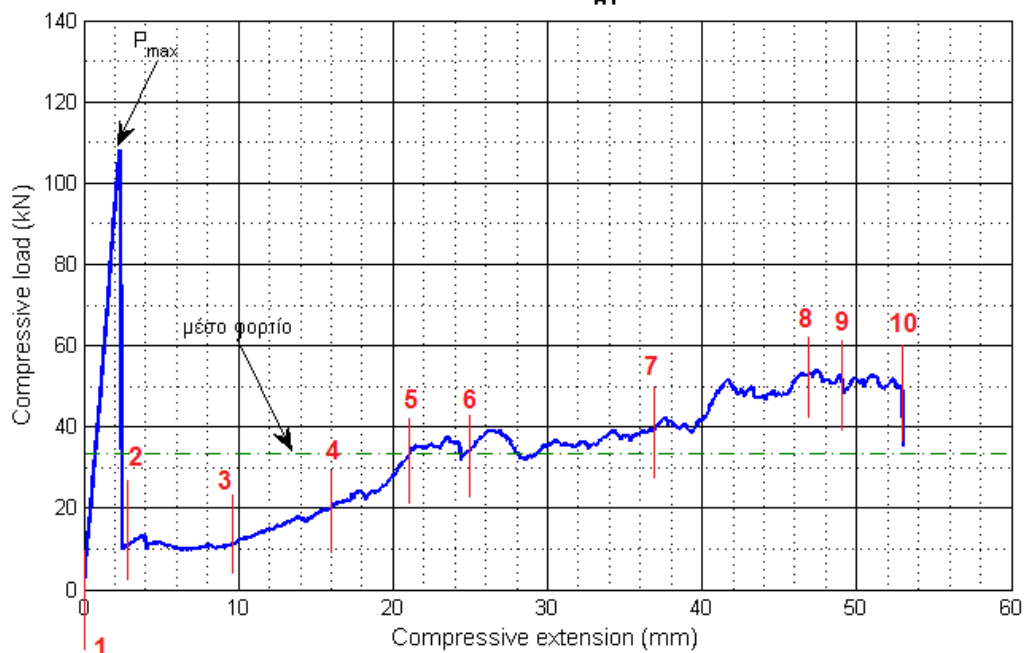
Στη συνέχεια απεικονίζονται οι διαδοχικές φάσεις από την κατάρρευση των δοκιμίων.







Δοκίμιο R<sub>A1</sub>



αρ. φωτογρ.	1	2	3	4	5	6
Displacement (mm)	0	2.75	9.73	16.03	20.83	27.43
	7	8	9	10	11	12
	37.05	47.14	49.78	53.012	-	-

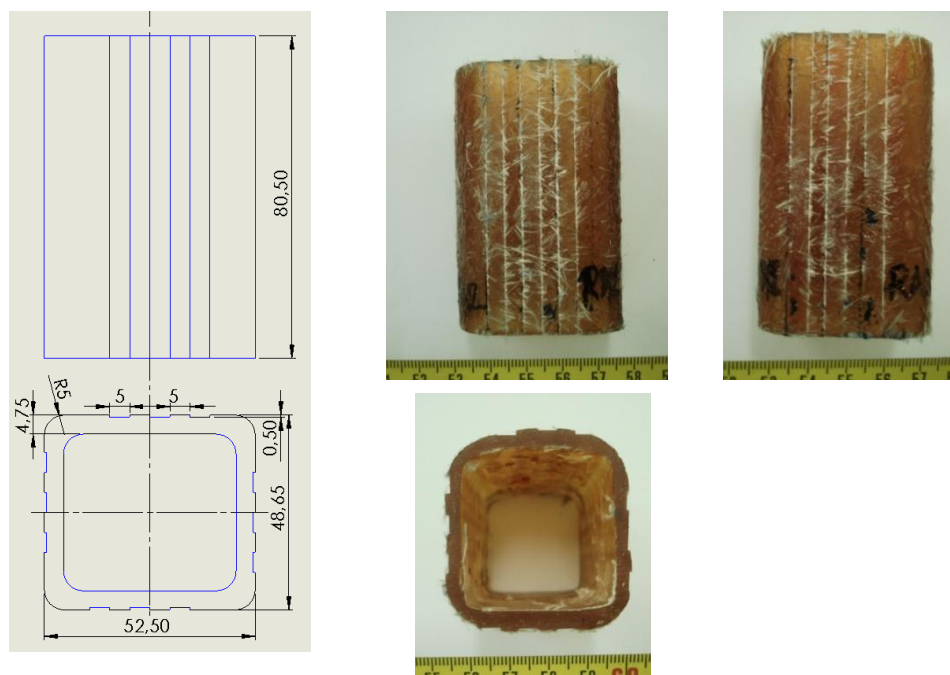
Αρχικό φορτίο $P = P_{max}$ (KN)	107.9560
Μέσο μεταελαστικό φορτίο $P$ (KN)	33.5705
Μήκος σύνθλιψης (mm)	53.012
Ολική απορροφούμενη ενέργεια (Joule)	1778.1550

### Σχολιασμός διαδικασίας κατάρρευσης

- Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, η καμπύλη του φορτίου ανεβαίνει απότομα λόγω της αντίστασης του σύνθετου υλικού στην παραμόρφωση. Λαμβάνει μέγιστη τιμή  $107.956 \text{ kN}$  στα  $2.2 \text{ mm}$
- Στα  $2.2 \text{ mm}$  επέρχεται περιφερειακή θραύση του δοκιμίου η οποία προκαλεί τον διαχωρισμό του σε ακανόνιστα σχήματα (φωτογρ. 2). Πολύ ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι η οριζόντια περιφερειακή ρωγμή δεν λαμβάνει μέρος στο μέσο του υλικού αλλά  $20 \text{ mm}$  πιο χαμηλά, προφανώς λόγω ατελειών στη συγκεκριμένη περιφέρεια.  
Εν συνεχεία ακολουθεί η εισχώρηση του άνωθεν τμήματος του θραυσμένου δοκιμίου στο κάτωθεν (φωτογρ.2-5). Η αναπτυσσόμενη τριβή στη διεπιφάνεια των τμημάτων στο στάδιο αυτό διατηρεί το φορτίο σταθερό στα  $10 \text{ kN}$  για τα επόμενα  $8 \text{ mm}$ .
- Λόγω της μεγάλης περιφερειακής ρωγμής, το άνωθεν τμήμα αργεί να βρει υλικό, με αποτέλεσμα το φορτίο να παίρνει χαμηλές τιμές.
- Στην φωτογραφία 5 (περίπου στα  $21 \text{ mm}$ ), παρατηρούμε ότι το κάτω τμήμα του θραυσμένου δοκιμίου έχει καταστραφεί εντελώς και το κάτω μέτωπο του άνωθεν τμήματος να έρχεται σε επαφή με τη βάση της πρέσας, αυξάνοντας έτσι το φορτίο που απαιτείται για την απόσχιση (delamination) του εξωτερικού τμήματος του υλικού.
- Η κατάρρευση μεταφέρεται προοδευτικά από κάτω προς τα πάνω με το φορτίο να ταλαντεύεται γύρο από μία μέση τιμή τάξης  $40 \text{ kN}$ .
- Στην φωτογραφία 12 γίνεται εμφανές ότι το άνω μέτωπο παρέμεινε αλώβητο. Ακόμη, παρατηρούμε ότι ξεκολλήθηκαν ολόκληρα τμήματα υλικού τα οποία βρισκόντουσαν ανάμεσα σε δύο διαμήκη αυλάκια και προεξείχαν.

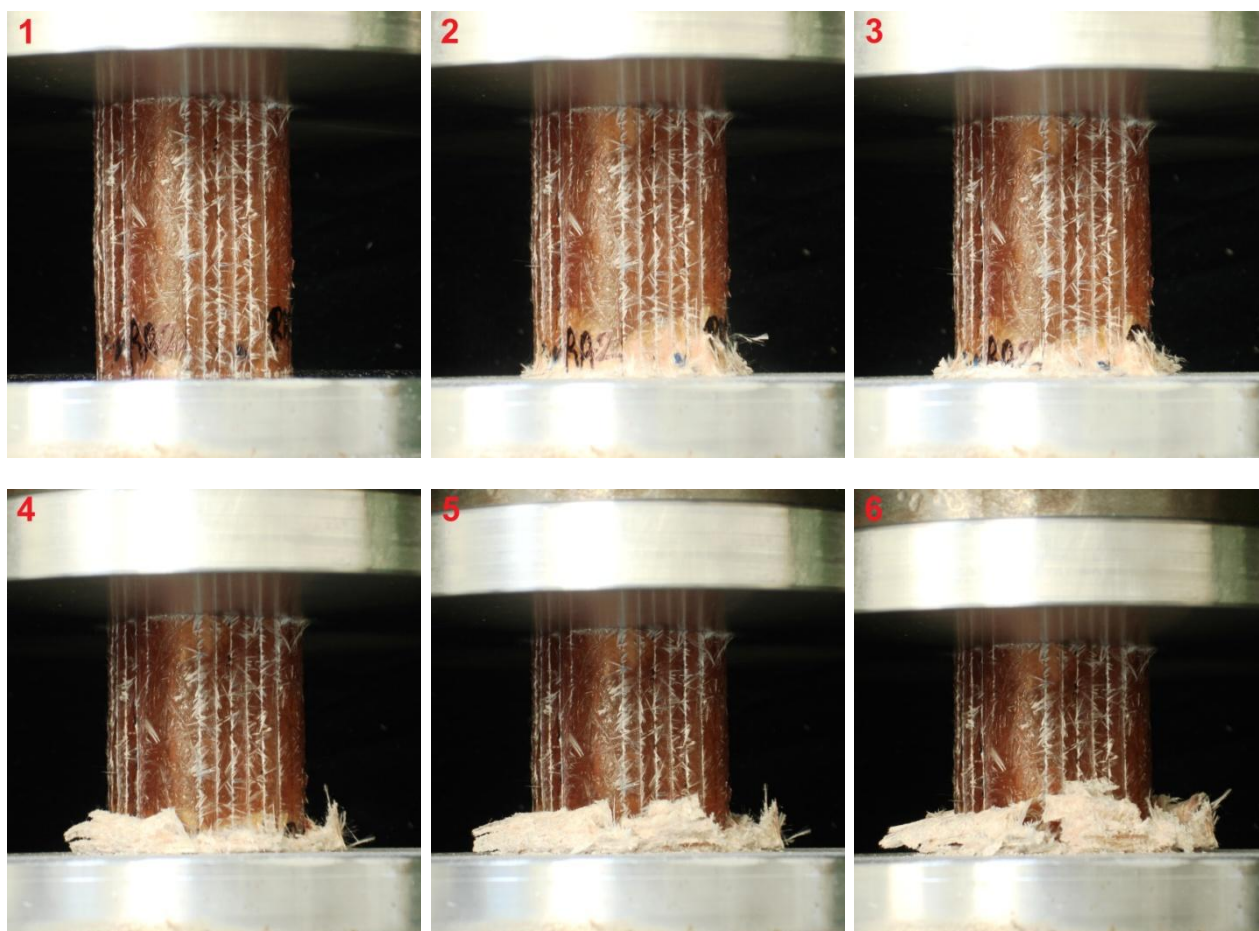
#### **4.2.4.3 Δοκίμιο $R_{A2}$**

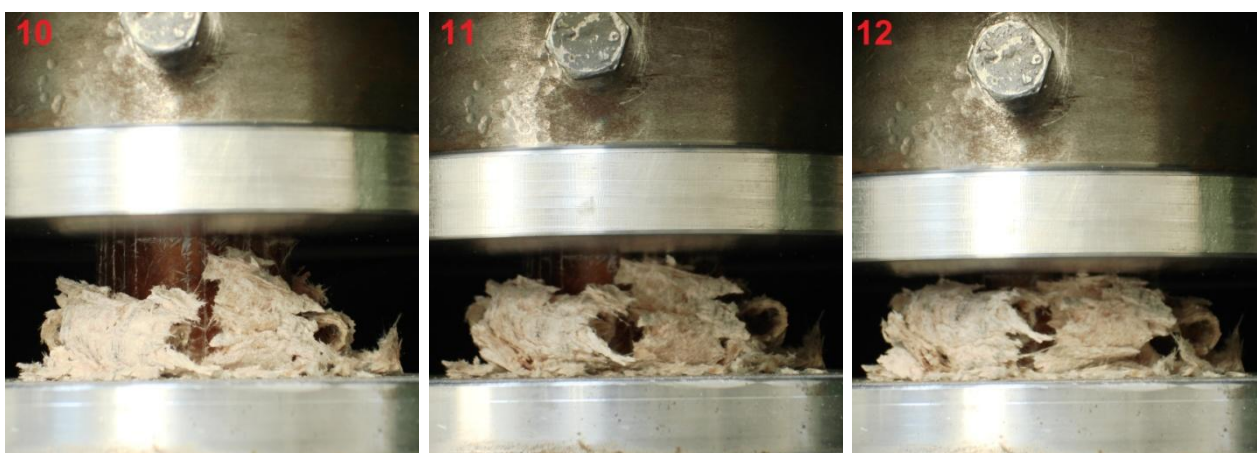
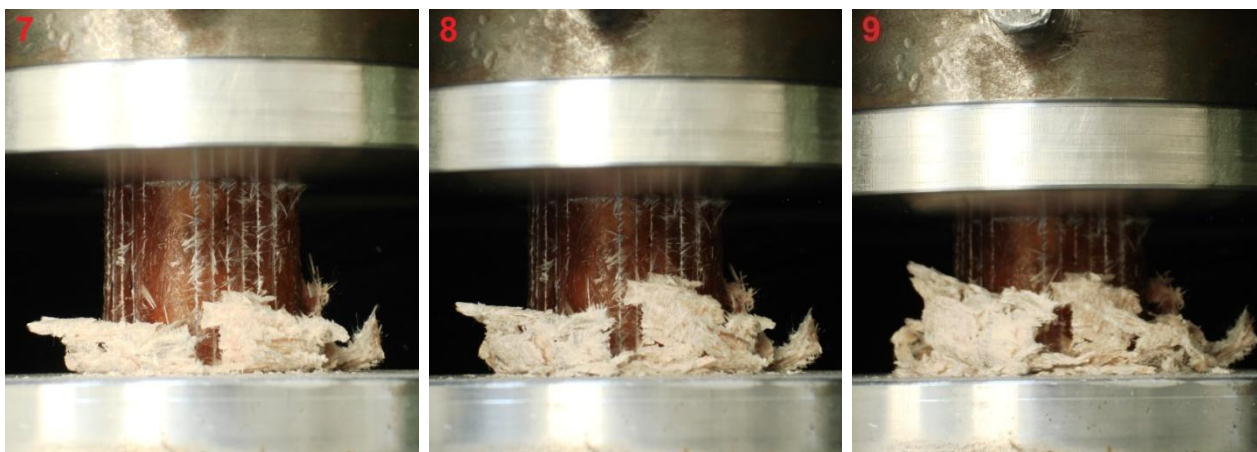
Παρακάτω παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου  $R_{A2}$ . Το εν λόγω δοκίμιο είναι τετραγωνικής διατομής και φέρει διαμήκεις αυλακώσεις στην εξωτερική του επιφάνεια. Συγκεκριμένα, σε κάθε του πλευρά φέρει 3 αυλάκια  $5 \text{ mm}$ , ανά  $5 \text{ mm}$ , βάθους  $0.5 \text{ mm}$ .



Σχήμα 4.2- 8: Σκαρίφημα δοκιμίου  $R_{A2}$  (αριστερά), φωτογ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου  $R_{A2}$  (κέντρο, δεξιά).

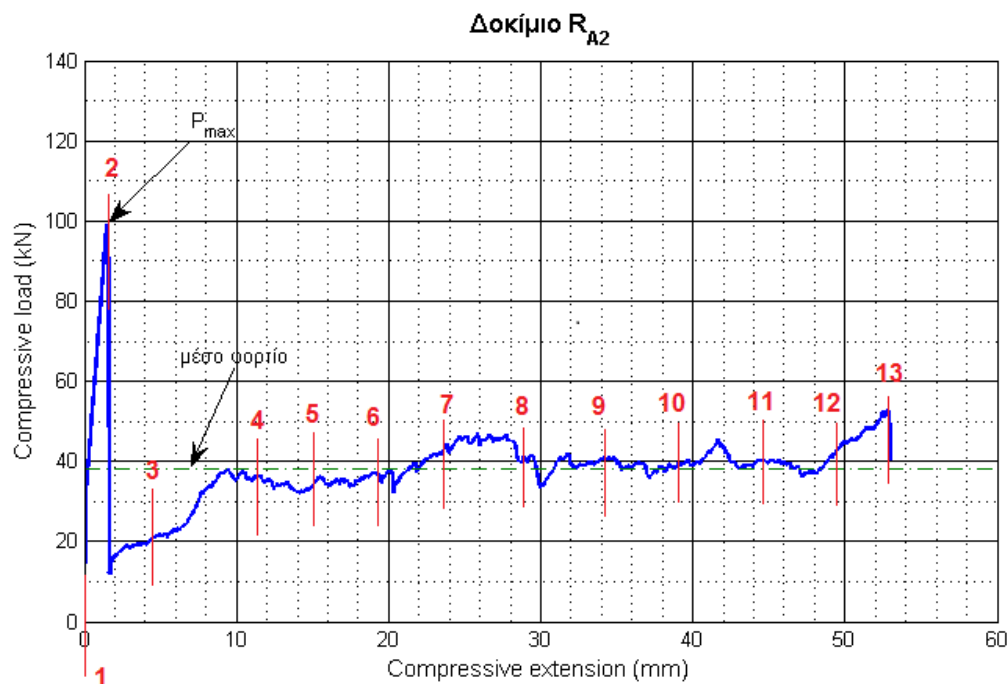
Στη συνέχεια απεικονίζονται οι διαδοχικές φάσεις από την κατάρρευση των δοκιμίων.





Παρακάτω εικονίζεται το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης που λάβαμε με τη βοήθεια του ειδικού εξοπλισμού κατά την εκτέλεση του πειράματος θλίψης, καθώς και τα ύψη κατά τα οποία ελήφθησαν οι αντίστοιχες φωτογραφίες. Ακόμη στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται οι ποσότητες που απαιτούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης του συγκεκριμένου δοκιμίου.





<b>αρ. φωτογρ.</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>Displacement (mm)</b>	0	1.65	4.45	11.15	15.23	19.21	23.95
	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>
	28.75	34.08	39.28	44.73	49.68	53.02	-

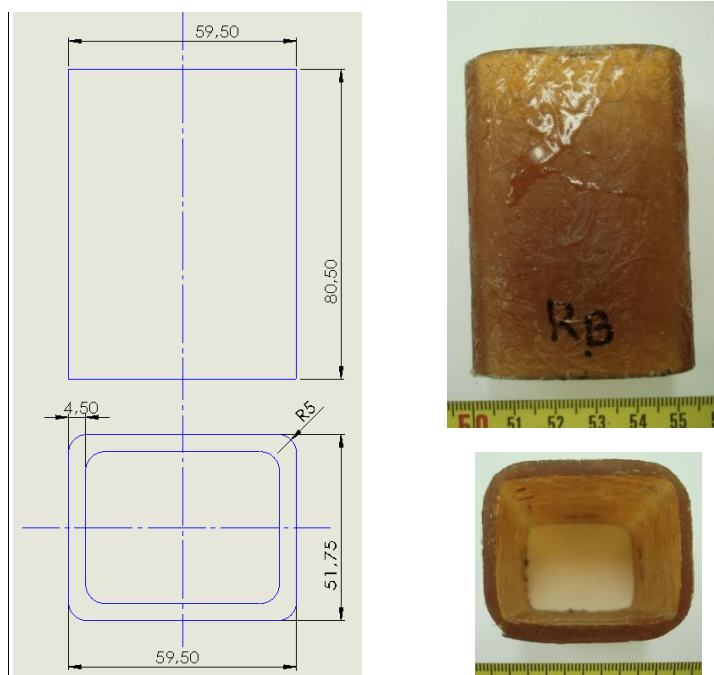
<b>Αρχικό φορτίο <math>P = P_{max}</math> (KN)</b>	99.2319
<b>Μέσο μεταελαστικό φορτίο <math>P</math> (KN)</b>	37.9992
<b>Μήκος σύνθλιψης (mm)</b>	53.02
<b>Ολική απορροφούμενη ενέργεια (Joule)</b>	2013.9612

### Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

- Στο παρών δοκίμιο δεν εμφανίζεται ο μηχανισμός κατάρρευσης που παρακολουθήσαμε στο δοκίμιο R<sub>A1</sub>. Αντίθετα με πριν, δεν αναπτύσσεται περιφερειακή ρωγμή στο δοκίμιο αλλά ξεκινάει προοδευτική κατάρρευση.
- Συγκεκριμένα, κατά την πρώτη φάση της συμπίεσης, το φορτίο αυξάνει ραγδαία, λαμβάνοντας μέγιστη τιμή 99.2319kN και στη συνέχεια ξεκινάει η κατάρρευση από το πάνω μέτωπο.
- Παρατηρούμε ότι οι διαμορφώσεις δεν επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την εξέλιξη της κατάρρευσης παρά μόνο βοηθούν στην αποκόλληση του υλικού που προεξέχει, ανάμεσα σε αυτές.
- Από τα 9mm παραμόρφωσης η κατάρρευση θεωρείται ομαλή με το φορτίο να ταλαντεύεται γύρω από μία μέση τιμή τάξης 37kN.
- Η μορφή αστοχίας χαρακτηρίζεται κυρίως από τη σταδιακή κατάρρευση του κελύφους μέσω του σχηματισμού συνεχών μετώπων τα οποία εκτείνονται εσωτερικά και εξωτερικά του δοκιμίου (φωτογρ. 14) και με την ανάπτυξη ενός αριθμού αξονικών διαρηγματώσεων στο εξωτερικό μέτωπο.

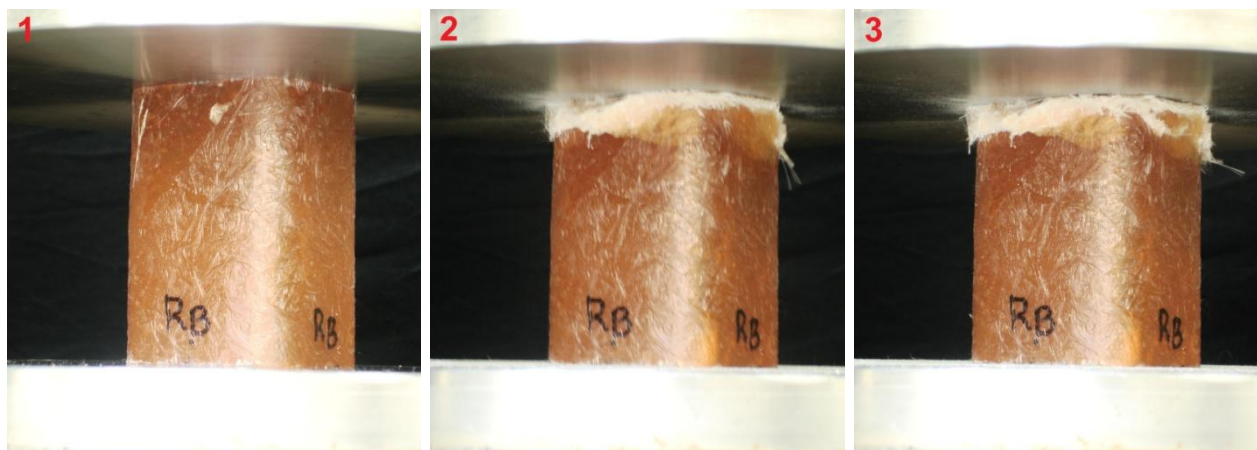
#### 4.2.4.4 Δοκίμιο $R_B$

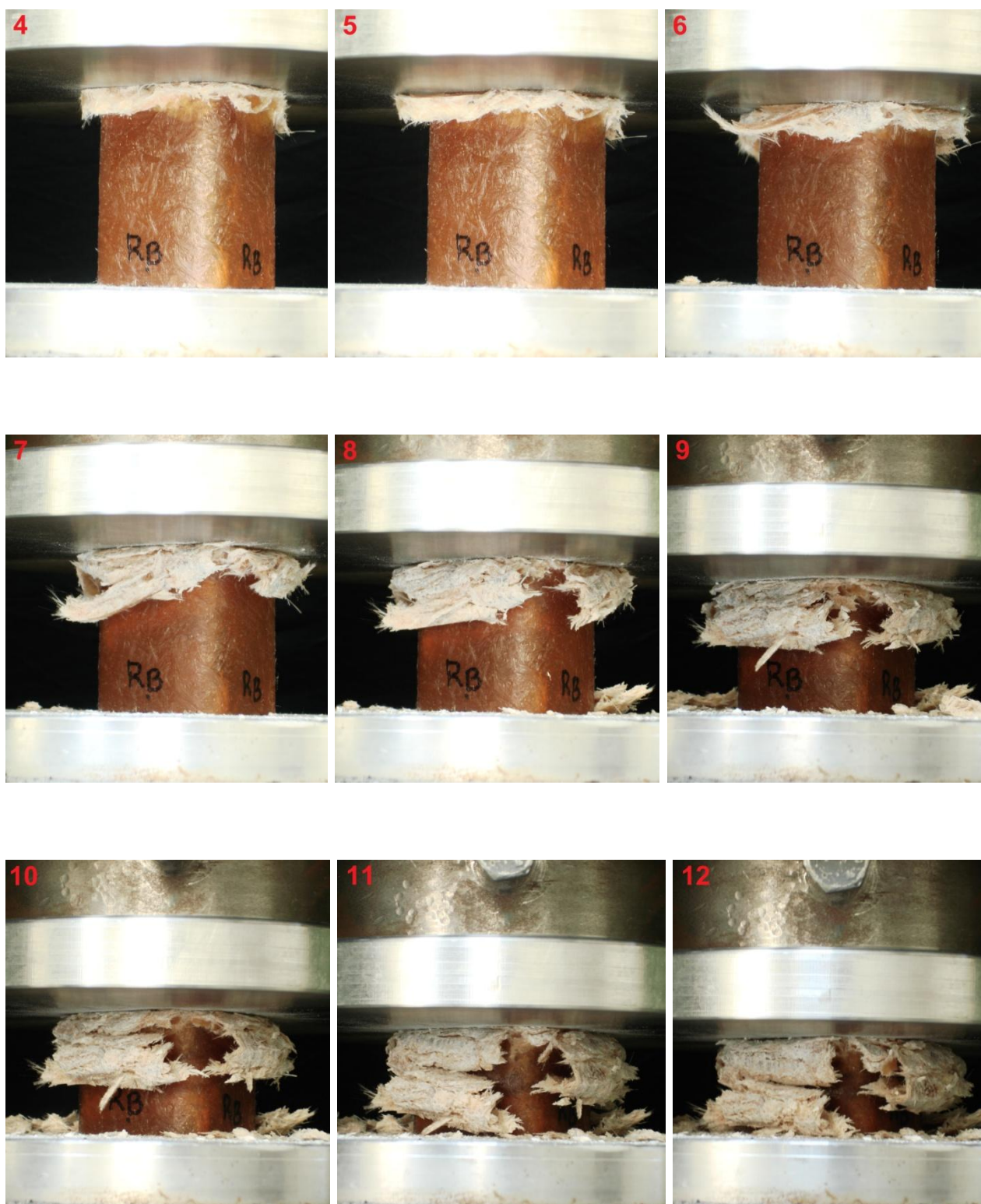
Παρακάτω παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου  $R_B$ . Το εν λόγω δοκίμιο είναι ορθογωνικής διατομής και δεν φέρει αυλακώσεις στην εξωτερική του επιφάνεια.

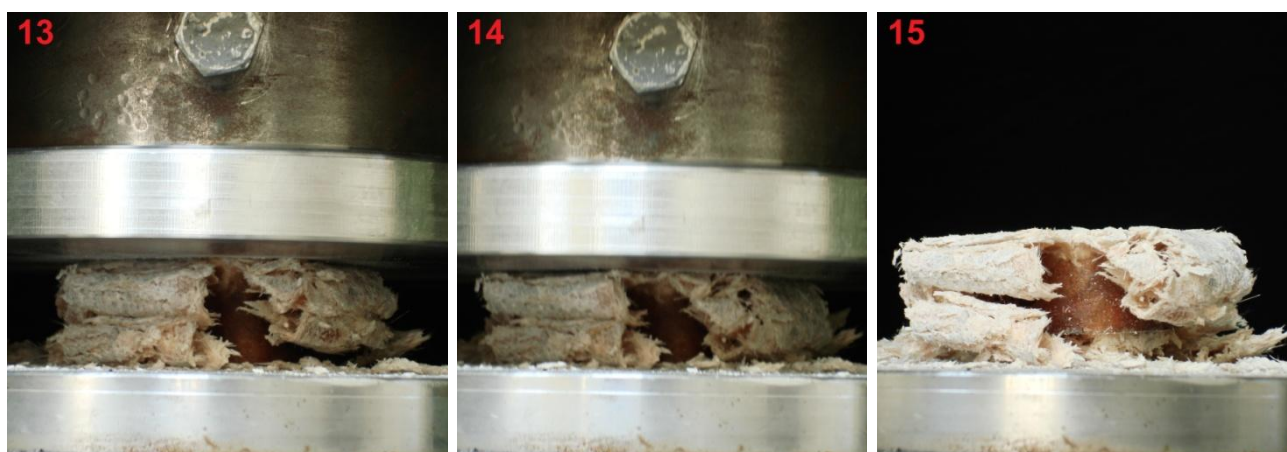


Σχήμα 32: Σκαρίφημα δοκιμίου  $R_B$  (αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου  $R_B$  (κέντρο, δεξιά).

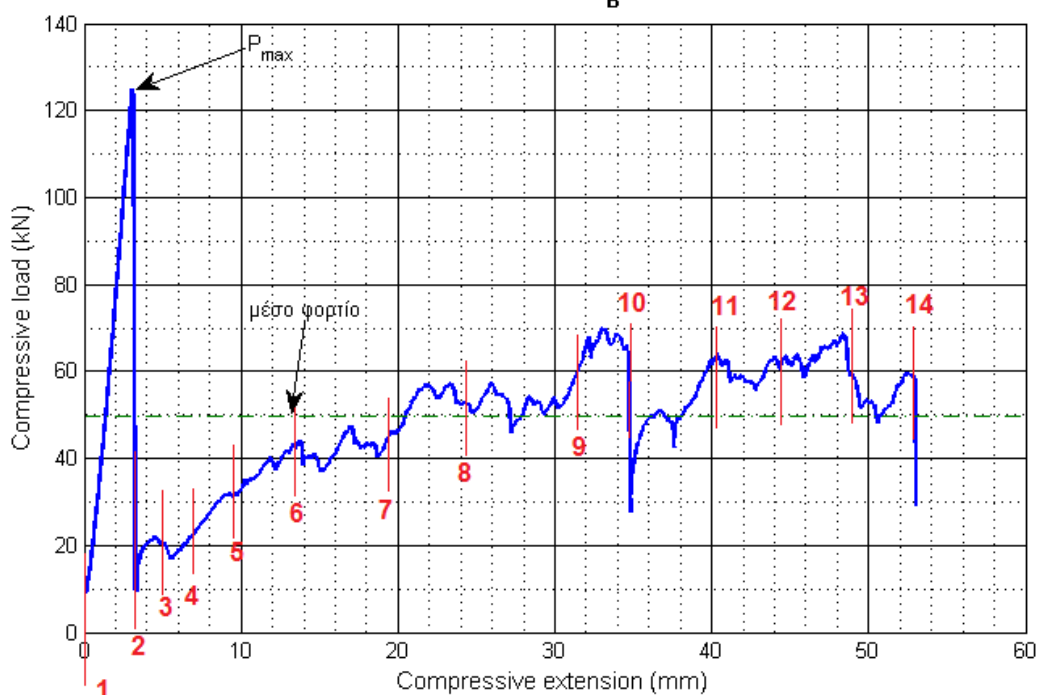
Στη συνέχεια απεικονίζονται οι διαδοχικές φάσεις από την κατάρρευση των δοκιμίων.







Δοκίμιο R<sub>B</sub>



αρ. φωτογρ.	1	2	3	4	5	6	7	8
Displacement (mm)	0	3.95	5.27	6.95	9.65	13.78	19.25	24.75
	9	10	11	12	13	14	15	16
	31.65	34.65	40.30	44.10	48.93	53.01	-	-

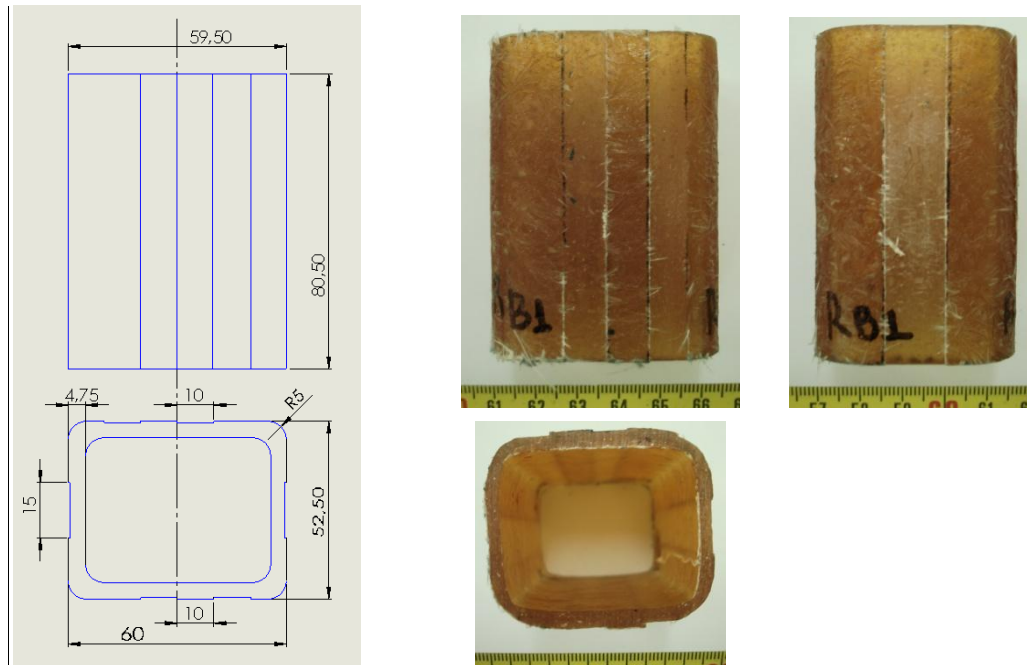
Αρχικό φορτίο $P = P_{max}$ (KN)	124.7790
Μέσο μεταελαστικό φορτίο $P$ (KN)	49.54973
Μήκος σύνθλιψης (mm)	53.01
Ολική απορροφούμενη ενέργεια (Joule)	2626.1357

### Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

- Κατά την πρώτη φάση συμπίεσης και σε αυτό το δοκίμιο, το φορτίο αυξάνει ραγδαία λαμβάνοντας μέγιστη τιμή 124.779 kN στα 3.1mm παραμόρφωσης. Μετά το πέρας της ελαστικής περιοχής, έχουμε απότομη κάθοδο του φορτίου και την έναρξη της κατάρρευσης από το πάνω μέτωπο.
- Η κατάρρευση διαδίδεται στο υπόλοιπο δοκίμιο με το φορτίο αρχικά να αυξάνει, λόγω συσσώρευσης του υλικού που συμπιέζεται στο μέτωπο, και στη συνέχεια να σταθεροποιείται γύρο από μία τιμή για περίπου 10mm (από τα 20 έως τα 30mm παραμόρφωσης).
- Στη συνέχεια εμφανίζεται μία σημαντική πτώση του φορτίου (στα 34.65 mm), η οποία οφείλεται στη δημιουργία ρωγμής του υλικού. Χαρακτηριστικός ήταν ο κρότος κατά τη διεξαγωγή του πειράματος και η εκσφενδόνιση υλικού(φωτογρ. 10). Το φορτίο συνεχίζει να αυξομειώνει γύρο από μία σταθερή τιμή τάξης 58mm.
- Με τη λήξη του πειράματος και ενώ η πρέσα χάνει την επαφή με το δοκίμιο, παρατηρήθηκε ένα μικρό spring back, κατά το οποίο οι φυλλώσεις που έχουν κατέβει σπρώχνουν το δοκίμιο προς τα πάνω.
- Από τις φωτογραφίες της τελικής κατάστασης του δοκιμίου (φωτογρ. 15,16) μπορούμε να παρατηρήσουμε την μορφή αστοχίας του, κατά την οποία η κατάρρευση διαδόθηκε μόνο στο πάνω μέτωπο αφήνοντας το κάτω αναλλοίωτο, με τις αποκολλημένες στρωματώσεις του σύνθετου υλικού να εκτείνονται είτε εσωτερικά είτε εξωτερικά απ' αυτό.
- Κοιτώντας το διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης συμπεραίνουμε ότι το παρών δοκίμιο δε θεωρείται αποδοτικό ως προς την ικανότητά του να απορροφάει ενέργεια καθώς λόγω των θραύσεων του υλικού παρουσιάζονται απότομες καθιζήσεις του φορτίου.

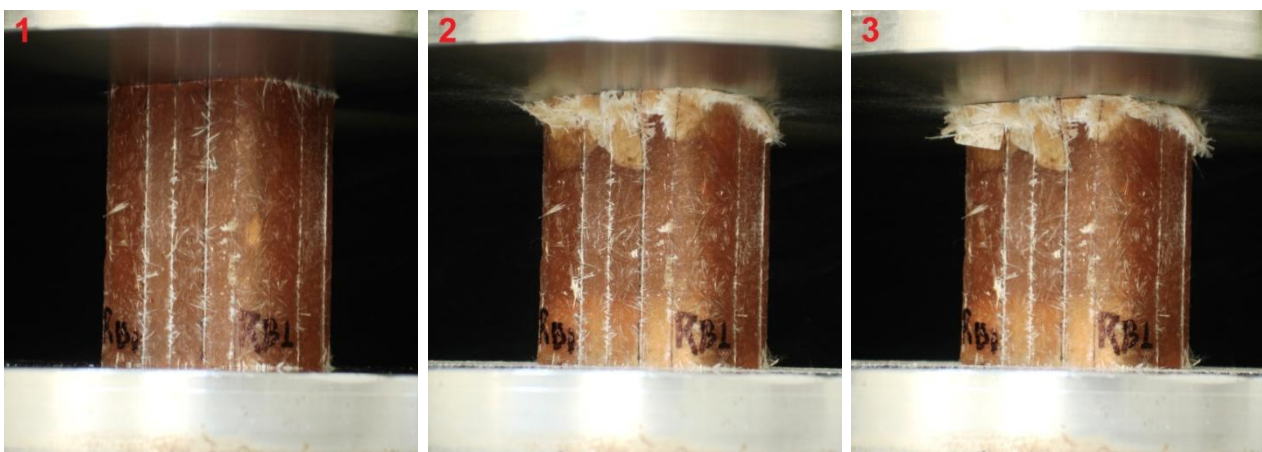
#### 4.2.4.5 Δοκίμιο $R_{B1}$

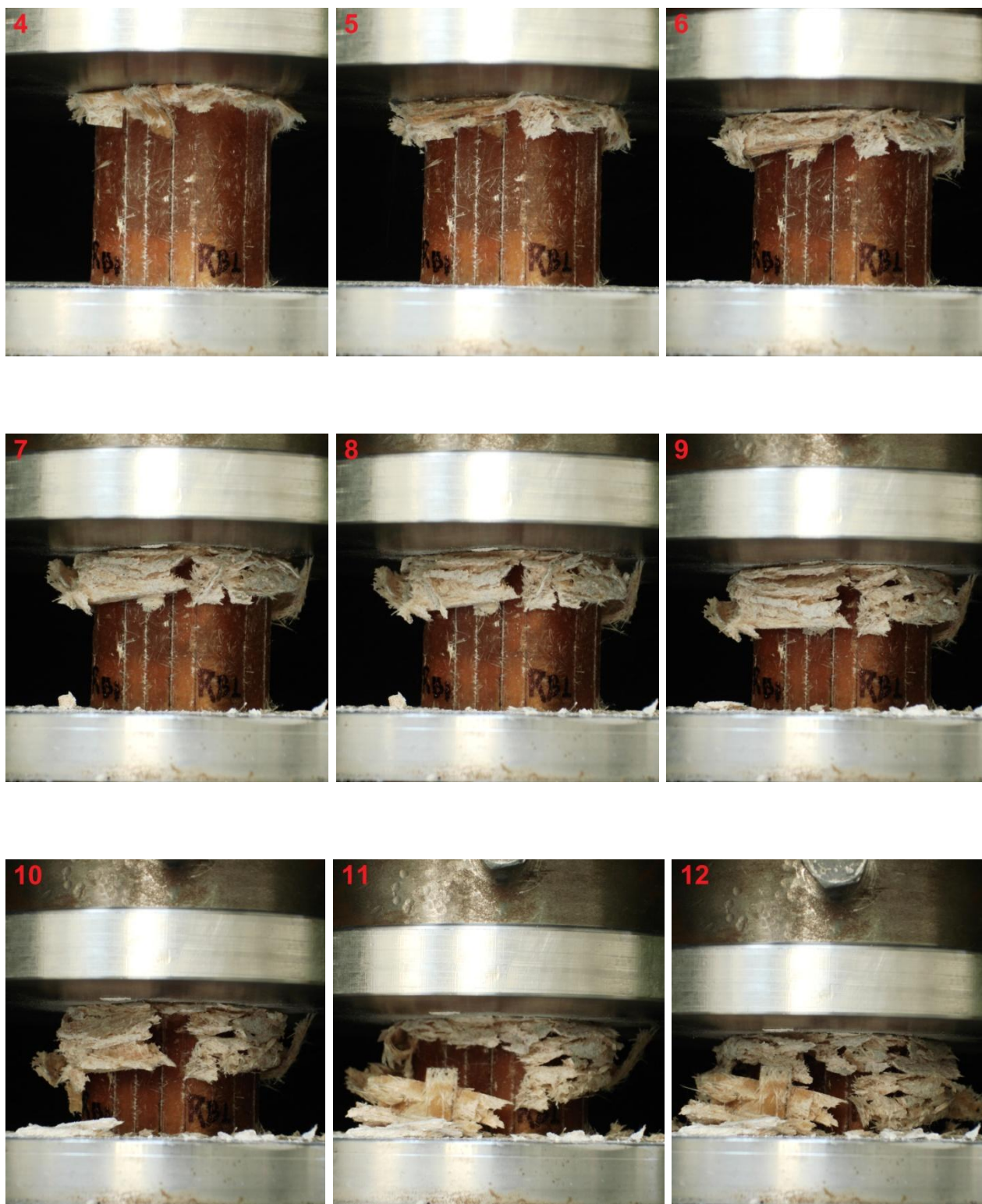
Παρακάτω παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου  $R_{B1}$ . Το εν λόγω δοκίμιο είναι ορθογωνικής διατομής και φέρει διαμήκεις αυλακώσεις στην εξωτερική του επιφάνεια. Συγκεκριμένα, στην πλευρά  $a$  ( $= 60\text{mm}$ ) φέρει 2 αυλάκια  $10\text{mm}$ , ανά  $10\text{mm}$ , ενώ στην πλευρά  $b$  ( $= 52.5\text{mm}$ ) φέρει στο μέσο της ένα αυλάκι  $15\text{mm}$  πάχους  $0.5\text{mm}$ .

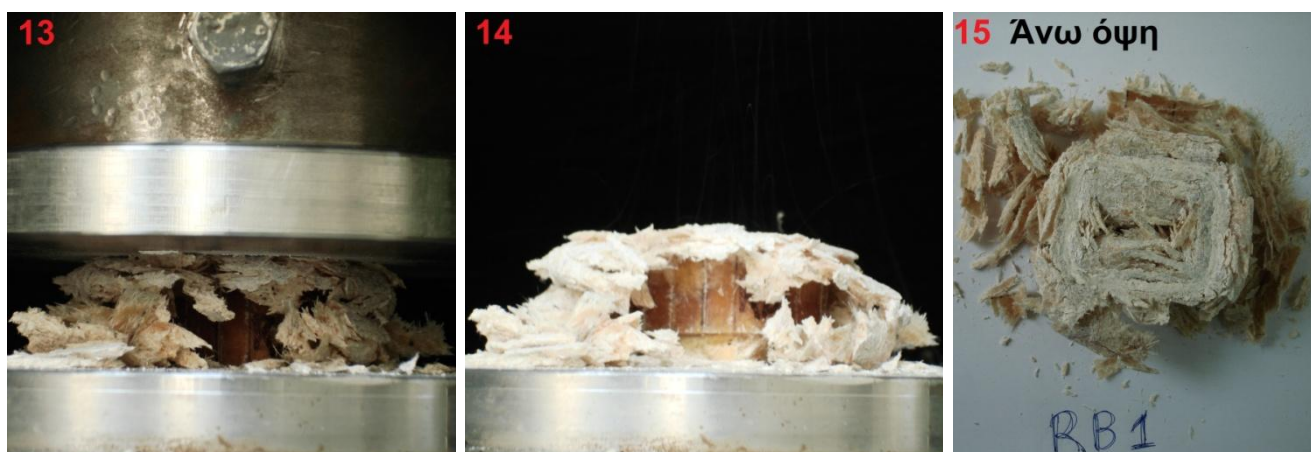


Σχήμα 4.2- 10: Σκαρίφημα δοκιμίου  $R_{B1}$  (αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου  $R_{B1}$  (κέντρο, δεξιά).

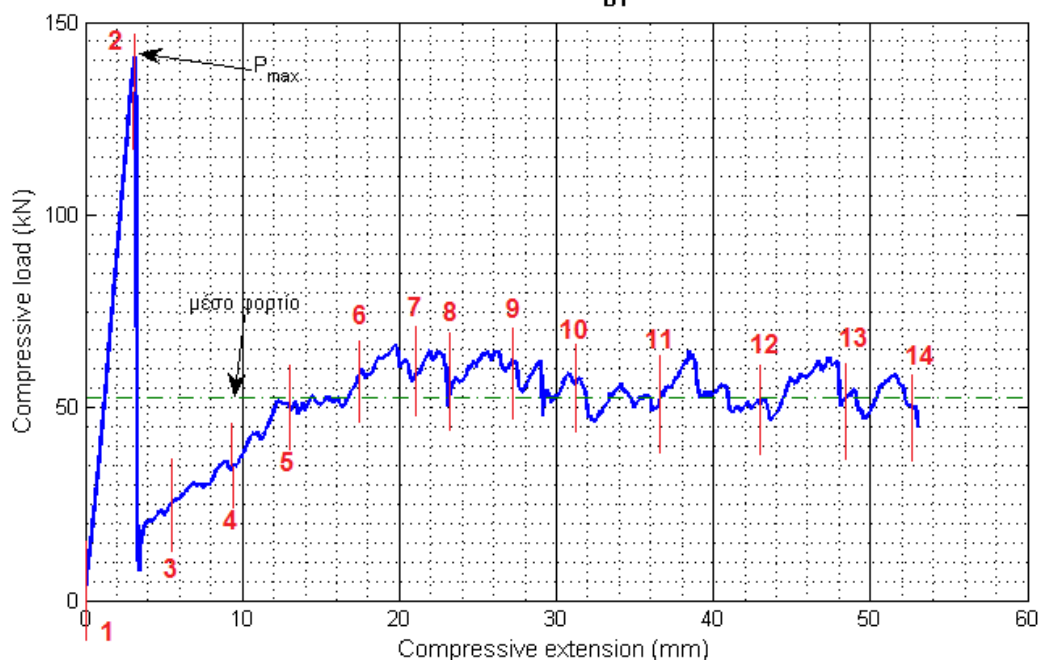
Στη συνέχεια απεικονίζονται οι διαδοχικές φάσεις από την κατάρρευση των δοκιμίων.







Δοκίμιο  $R_{B1}$



αρ. φωτογρ.	1	2	3	4	5	6	7
Displacement (mm)	0	3.24	5.64	9.23	13.14	17.65	21.78
	8	9	10	11	12	13	14
	22.99	27.71	31.95	36.65	43.25	48.56	53

Αρχικό φορτίο $P = P_{max}$ (KN)	140.7900
Μέσο μεταελαστικό φορτίο $P$ (KN)	52.4881
Μήκος σύνθλιψης (mm)	53
Ολική απορροφούμενη ενέργεια (Joule)	2781.8702

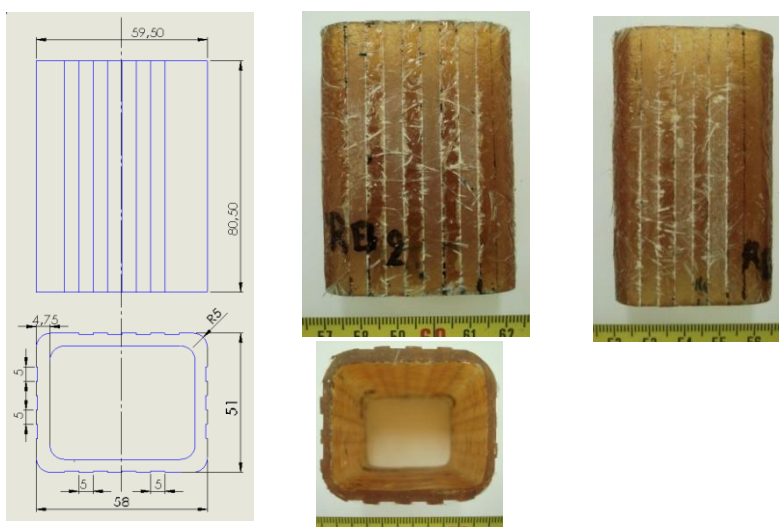


### Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

- Κατά την πρώτη φάση της συμπίεσης, εμφανίζεται απότομη άνοδος του φορτίου λαμβάνοντας πολύ υψηλή τιμή στην ελαστική περιοχή. Συγκεκριμένα φτάνει τα  $140.7900\text{ kN}$  στα  $3.2\text{ mm}$  παραμόρφωσης.
- Χαρακτηριστική είναι η αλλαγή του χρώματος του υλικού στα σημεία που δέχεται το μεγαλύτερο φορτίο και είναι έτοιμα να αστοχήσουν. Αυτή η αλλαγή παρατηρείται στο άνω και κάτω μέτωπο καθώς και στο μέσο του δοκιμίου με τελικό αποτέλεσμα να καταρρέει η άνω πλευρά.
- Η πολύ υψηλή τιμή του φορτίου, δικαιολογεί τον εκκωφαντικό κρότο κατά την έναρξη της κατάρρευσης όπου το δοκίμιο παύει να αντιστέκεται και αρχίζει να παραμορφώνεται. Η δημιουργία ρωγμής στο άνω μέτωπο του δοκιμίου έχει ως αποτέλεσμα το φορτίο να αυξάνει με αργό ρυθμό καθώς η πρέσα δε βρίσκει υψηλό φορτίο αντίστασης.
- Το φορτίο από τα  $17\text{ mm}$  περίπου ομαλοποιείται και ξεκινάει να ταλαντεύεται γύρο από μία σταθερή τιμή τάξης  $52\text{ kN}$ . Οι μικροθραύσεις, χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών, ευθύνονται για την πριονωτή μορφή του διαγράμματος.
- Παρατηρούμε ότι το υλικό αποκολλάται σε τμήματα λόγω της ψαθυρότητας του υλικού. Οι στρωματώσεις του υλικού που αποσχίσθηκαν κατευθύνθηκαν προς το εσωτερικό και εξωτερικό του δοκιμίου (φωτογρ. 15).
- Η ομαλή και προοδευτική κατάρρευση του φορτίου βελτιώνει την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του δοκιμίου, με μόνο μειονέκτημα το peak του αρχικού φορτίου που μπορεί να αντιμετωπιστεί με μεθόδους triggering.

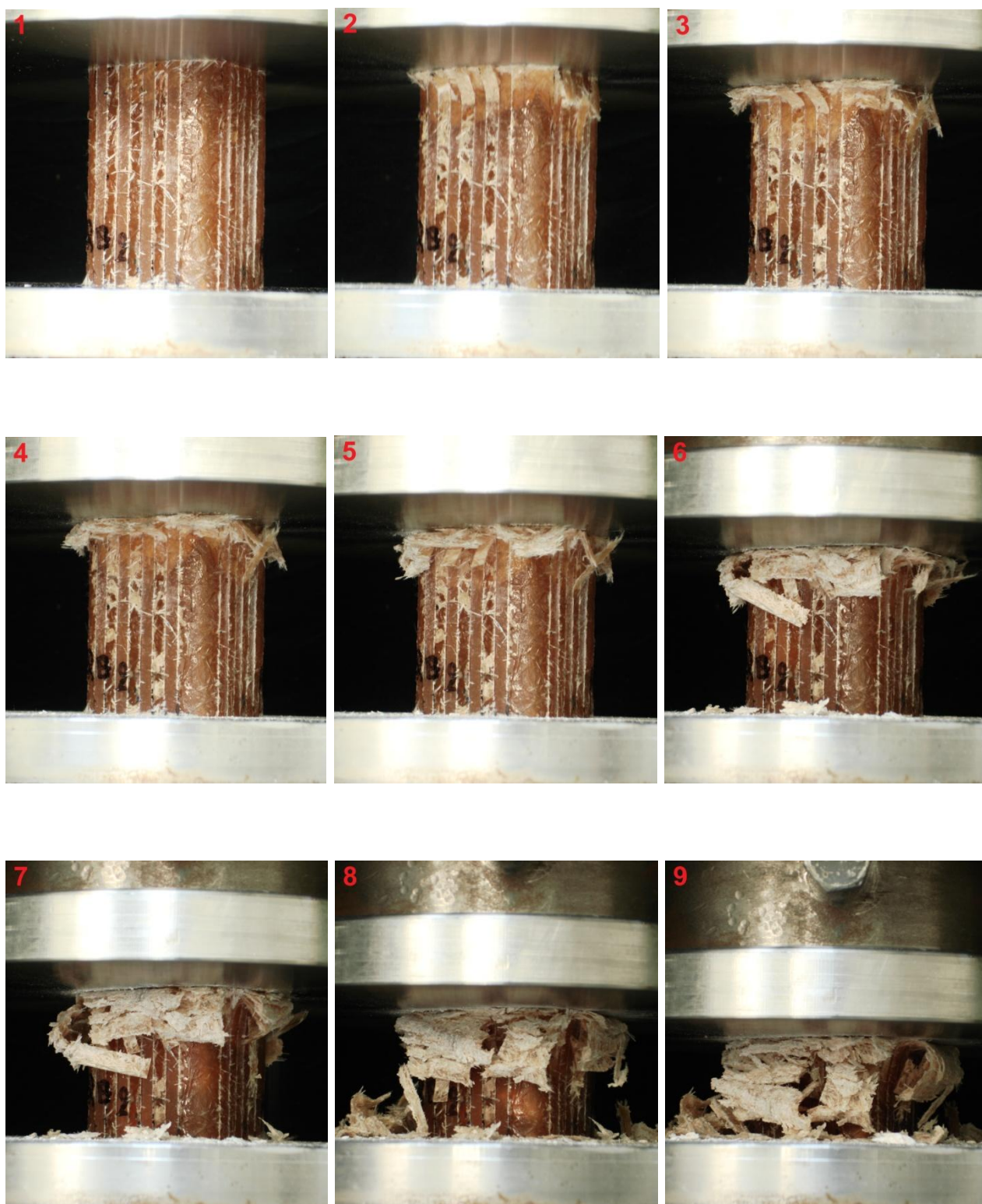
#### 4.2.4.6 Δοκίμιο $R_{B2}$

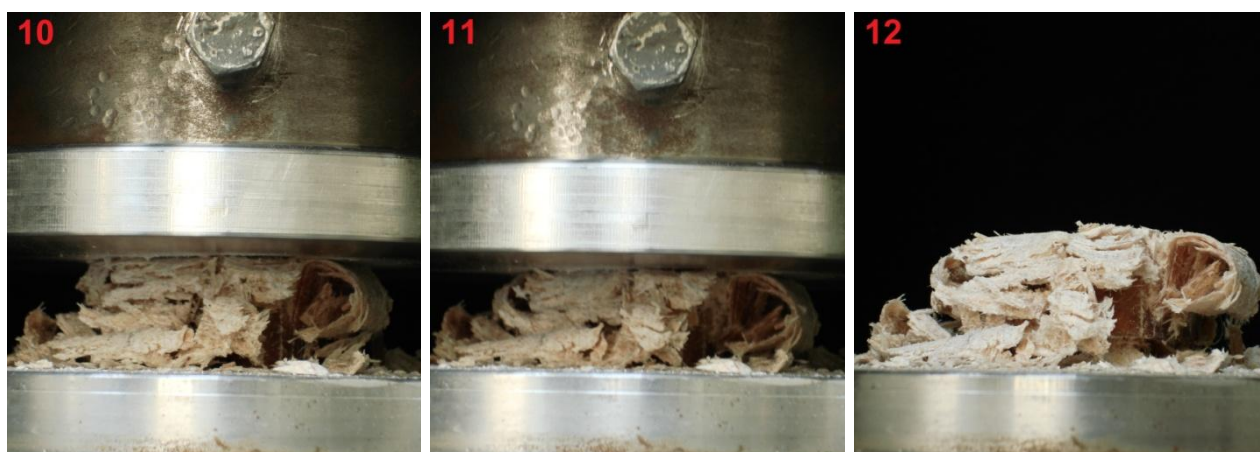
Παρακάτω παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου  $R_{B2}$ . Το εν λόγω δοκίμιο είναι ορθογωνικής διατομής και φέρει διαμήκεις αυλακώσεις στην εξωτερική του επιφάνεια. Συγκεκριμένα, στην πλευρά  $a$  ( $= 58\text{ mm}$ ) φέρει 4 αυλάκια  $5\text{ mm}$ , ανά  $5\text{ mm}$ , ενώ στην πλευρά  $b$  ( $= 51\text{ mm}$ ) φέρει 3 αυλάκια  $5\text{ mm}$ , ανά  $5\text{ mm}$  πάχους  $0.5\text{ mm}$ .



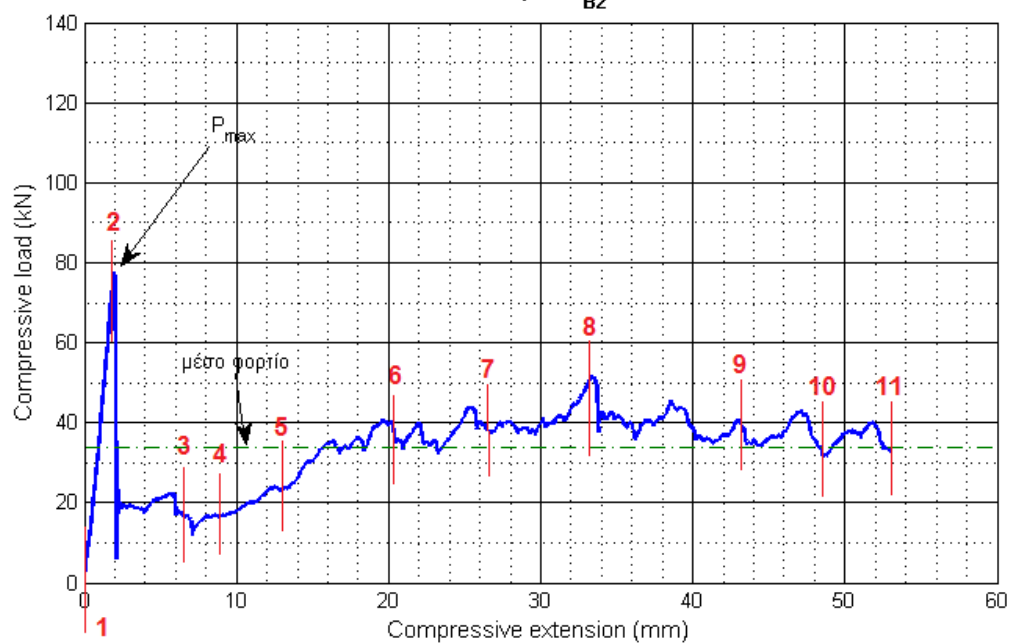
Σχήμα 33: Σκαρίφημα δοκιμίου  $R_{B2}$  (αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου  $R_{B2}$  (κέντρο, δεξιά).

Στη συνέχεια απεικονίζονται οι διαδοχικές φάσεις από την κατάρρευση των δοκιμίων.





Δοκίμιο R<sub>B2</sub>



αρ. φωτογρ.	1	2	3	4	5	6
Displacement (mm)	0	1.85	6.75	9.04	13.14	20.23
	7	8	9	10	11	12
	26.71	33.78	43.35	48.65	53.04	-

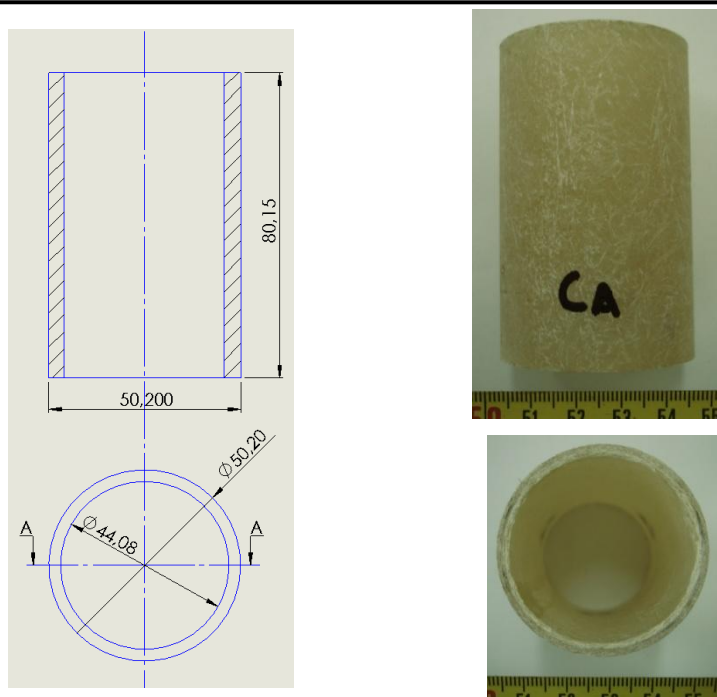
Αρχικό αναπτυσσόμενο φορτίο $P = P_{max}$ (KN)	77.4830
Μέσο μεταελαστικό αναπτυσσόμενο φορτίο $P$ (KN)	33.8747
Μήκος σύνθλιψης (mm)	53.04
Ολική απορροφούμενη ενέργεια (Joule)	1794.2697

#### Σχολιασμός διαδικασίας κατάρρευσης

- Κατά την έναρξη της συμπίεσης το φορτίο αυξάνει ραγδαία λαμβάνοντας μέγιστη τιμή 77.4830 kN στα 1.98 mm. Παρατηρούμε ότι συγκριτικά με τα δοκίμια  $R_B, R_{B1}$  παίρνει χαμηλότερη τιμή κάτι που οφείλεται στο ότι η κατάρρευση ξεκινάει καθαρά από το άνω μέτωπο. Αξιοσημείωτη είναι η αποκόλληση του υλικού που προεξέχει ανάμεσα από δύο αυλακώσεις ακολουθούμενη από χαρακτηριστικούς κρότους.
- Το φορτίο μετά από μία απότομη κάθοδο ξεκινάει να αυξάνει σταδιακά μέχρι τα ~16mm όπου και ομαλοποιείται, πραγματοποιώντας ταλαντώσεις γύρω από μία σταθερή τιμή τάξης 35kN.
- Από την αλλαγή χρώματος του δοκιμίου κατά τη διεξαγωγή του πειράματος, παρατηρούμε την εσωτερική εξάπλωση της κατάρρευσης πρώτου επέλθει η αναδίπλωση των στρωματώσεων εξωτερικά και εσωτερικά αυτού.
- Είναι λογικό να έχουμε αρχικό φορτίου (initial load) μικρότερου μεγέθους συγκριτικά με τα δοκίμια αντίστοιχου υλικού, καθώς η διατομή λόγω των αυλακώσεων είναι αδυνατισμένη και φέρει μικρότερη αντίσταση.
- Η κατάρρευση θεωρείται ομαλή και προοδευτική καθώς το φορτίο δεν παρουσιάζει αυξομειώσεις μεγάλου μεγέθους.

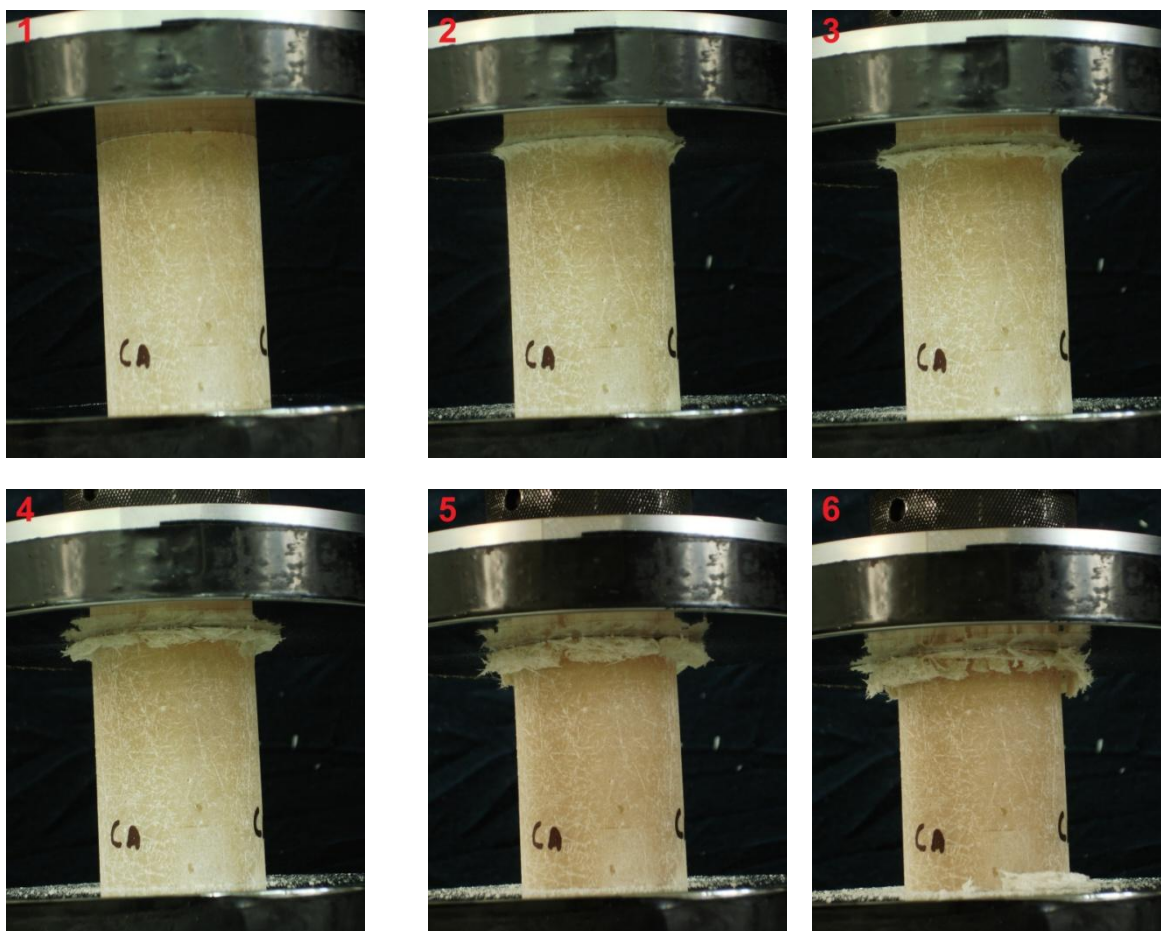
#### 4.2.4.7 Δοκίμιο $C_A$

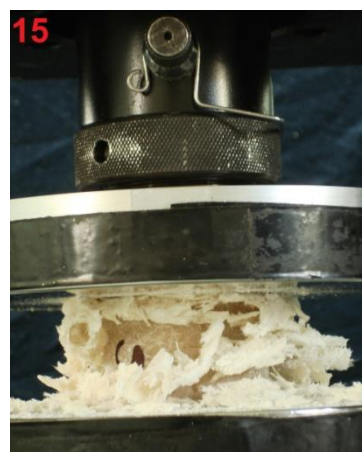
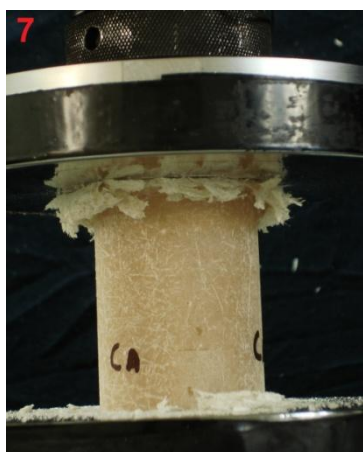
Παρακάτω παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου  $C_A$ . Το εν λόγω δοκίμιο είναι κυκλικής διατομής και δεν φέρει αυλάκια στην εξωτερική του επιφάνεια.

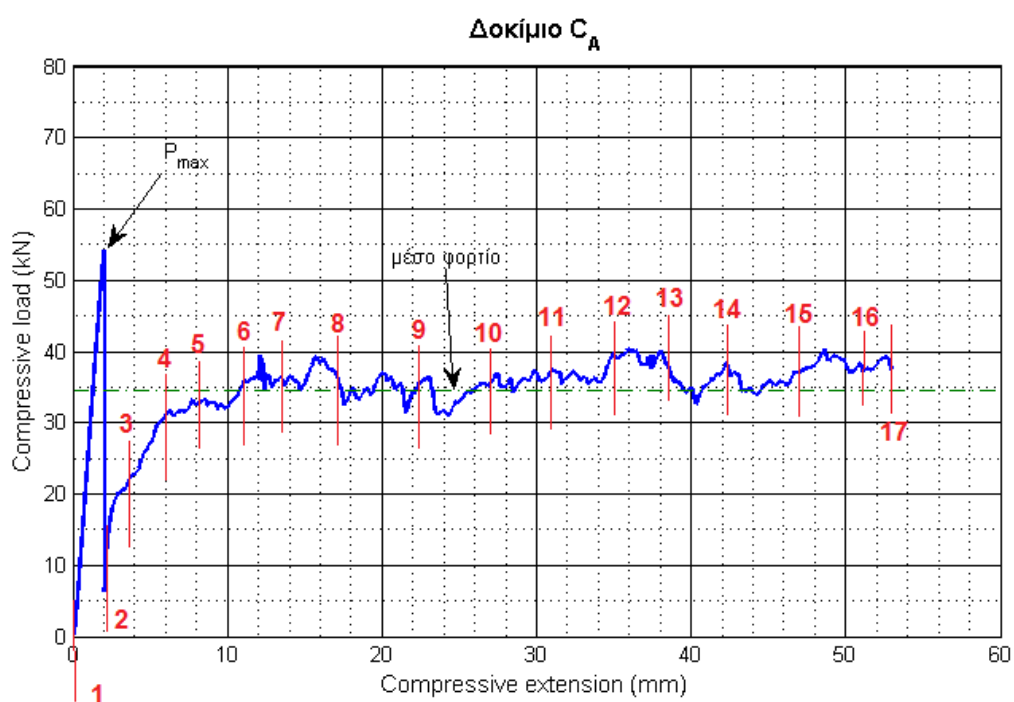
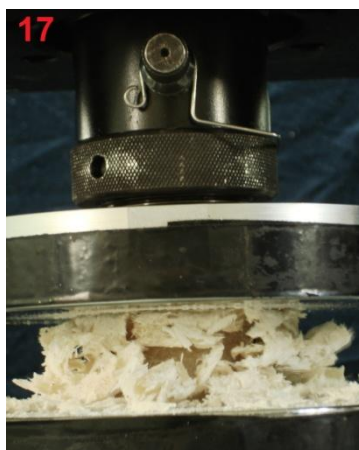
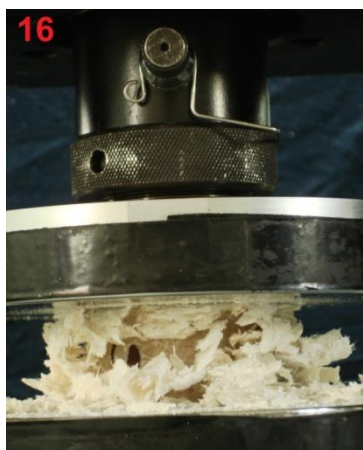


Σχήμα 34: Σκαρίφημα δοκιμίου  $C_A$  (αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου  $C_A$  (δεξιά).

Στη συνέχεια απεικονίζονται οι διαδοχικές φάσεις από την κατάρρευση των δοκιμίων.







αρ. φωτογρ.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Displacement (mm)	0	2.07	3.822	5.98	8.23	11.07	13.66	17.58	22.16
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	27.41	31.16	35.35	38.59	42.16	47.92	51.01	53.082	-

Αρχικό φορτίο $P = P_{max}$ (KN)	54.0932
Μέσο μεταελαστικό φορτίο $P$ (KN)	34.5083
Μήκος σύνθλιψης (mm)	53.082
Ολική απορροφούμενη ενέργεια (Joule)	1831.1773

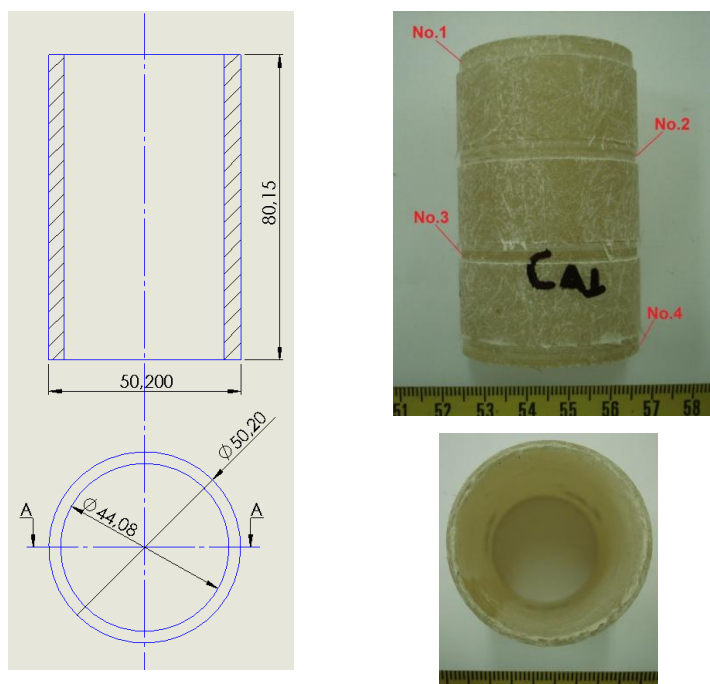
### Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

- Στο πρώτο στάδιο της συμπίεσης του σύνθετου υλικού παρατηρούμε ταχεία αύξηση του φορτίου. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς το υλικό είναι ακόμη ακέραιο και ανθίσταται στη δύναμη της πρέσας με πολύ μικρή παραμόρφωση. Το φορτίο λαμβάνει μέγιστη τιμή 54.0932 kN και στη συνέχεια μειώνεται ραγδαία δημιουργώντας τοπικό ελάχιστο, ενώ ταυτόχρονα ξεκινάει η κατάρρευση από το πάνω μέτωπο.
- Η αρχική αύξηση φορτίου (initial load) λαμβάνει τιμές πολύ ψηλά στην ελαστική περιοχή, κάτι που μπορεί να διορθωθεί με την μέθοδο triggering.
- Η κατάρρευση συνεχίζει να διαδίδεται στο υπόλοιπο δοκίμιο με το φορτίο να ταλαντεύεται γύρω από μία μέση τιμή τάξης 35kN.
- Το δοκίμιο παραμορφώνεται προοδευτικά και ομαλά, κάτι που φαίνεται στο διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης, καθώς δεν εμφανίζονται πολλές αυξομειώσεις.
- Χαρακτηριστικό του σύνθετου υλικού είναι οι παράλληλες επανειλημμένες μικροθραύσεις που λαμβάνουν χώρα και ακολουθούνται από κρότους (πχ. Στα 11mm παραμόρφωσης).
- Η μορφή αστοχίας χαρακτηρίζεται ως μορφή «μανιτάρι» («mushrooming failure»), καθώς από τη σταδιακή κατάρρευση του κελύφους σχηματίζονται συνεχή μέτωπα τα οποία εκτείνονται εσωτερικά και εξωτερικά, ενώ παράλληλα αναπτύσσονται αξονικές διαρηγματώσεις (axial splits) στο εξωτερικό μέτωπο (φωτογρ. 19-20).

#### 4.2.4.8 Δοκίμιο $C_{A1}$

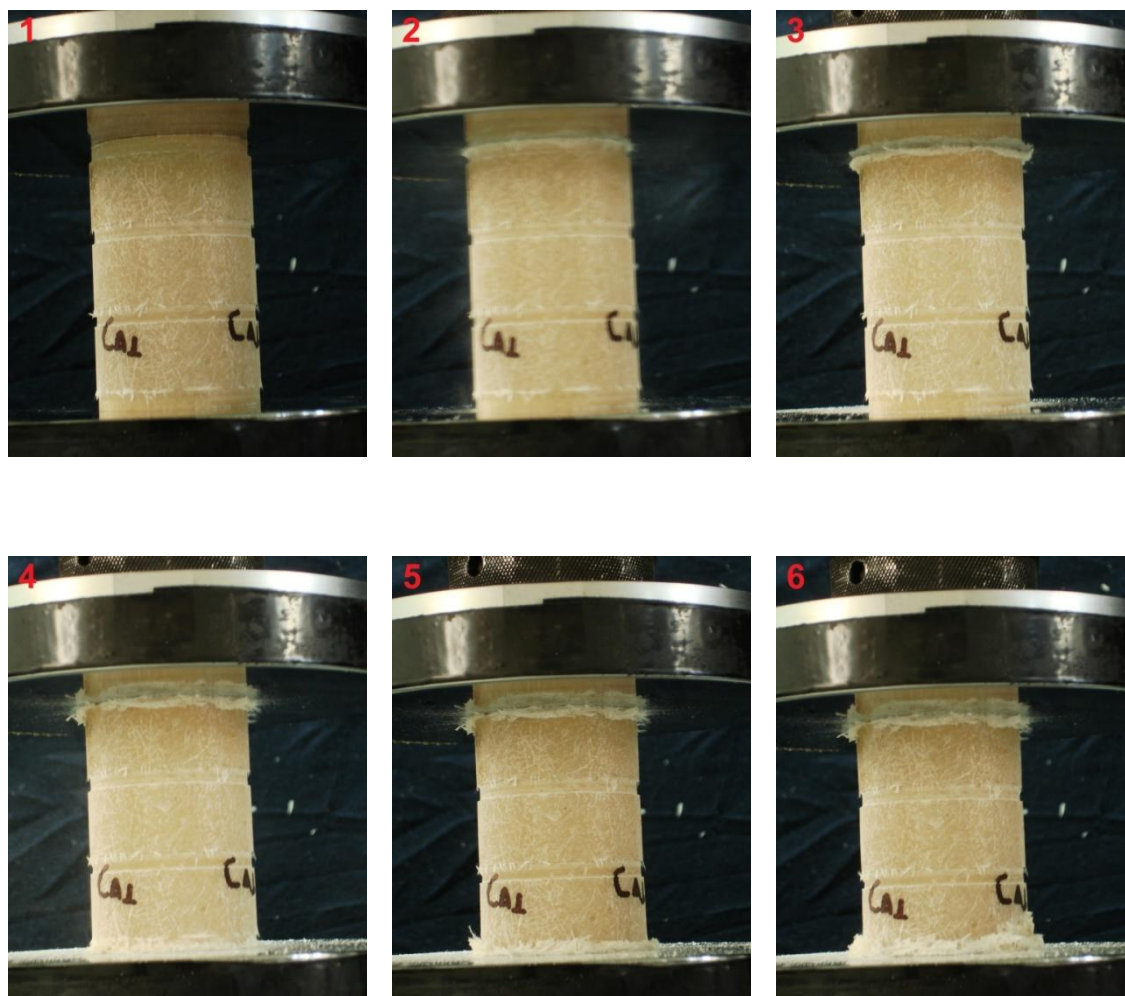
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκίμιου  $C_{A1}$ . Το εν λόγω δοκίμιο είναι κυκλικής διατομής και φέρει εγκάρσια αυλάκια στην εξωτερική του επιφάνεια. Συγκεκριμένα, έχουν χαραχθεί 4 αυλάκια 5mm ,ανά 20mm, πάχους 0.5 mm.

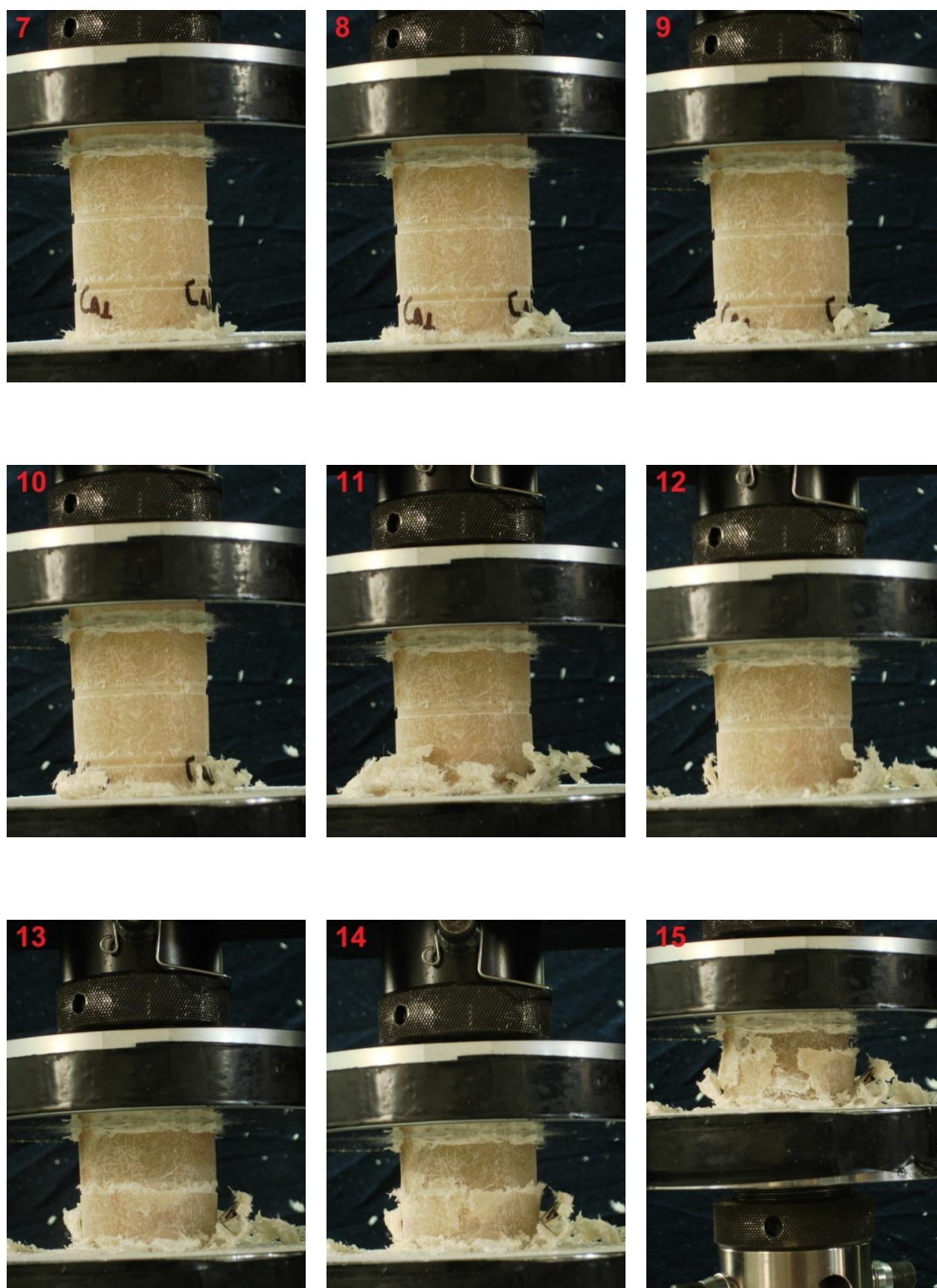


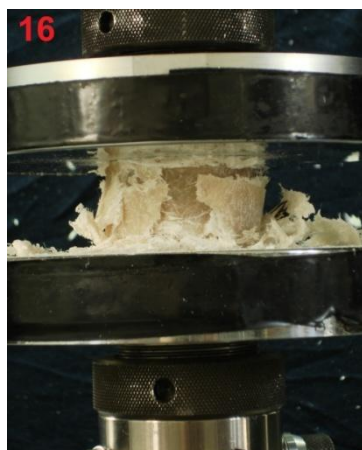


Σχήμα 35: Σκαρίφημα δοκιμίου  $C_{A1}$  (αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου  $C_{A1}$  (δεξιά).

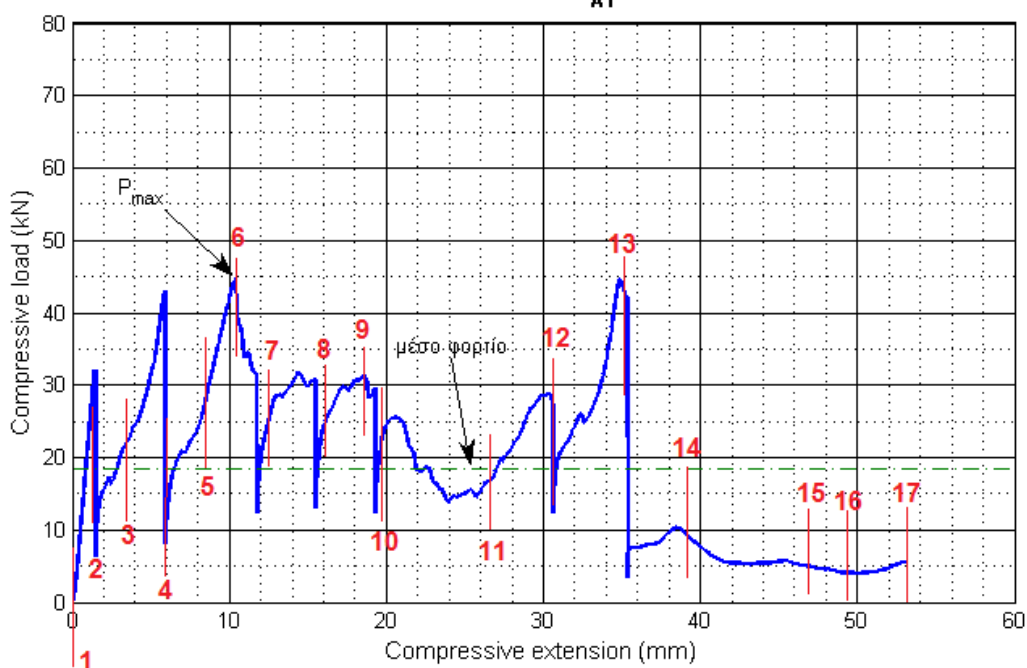
Στη συνέχεια απεικονίζονται οι διαδοχικές φάσεις από την κατάρρευση των δοκιμίων.







Δοκίμιο C<sub>A1</sub>



αρ. φωτογρ.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Displacement (mm)	0	1.552	3.88	6.05	8.55	10.45	12.22	16.06	18.39
	10	11	12	13	14	15	16	17	
	19.64	27.72	30.97	35.55	39.40	47.16	49.91	53.073	

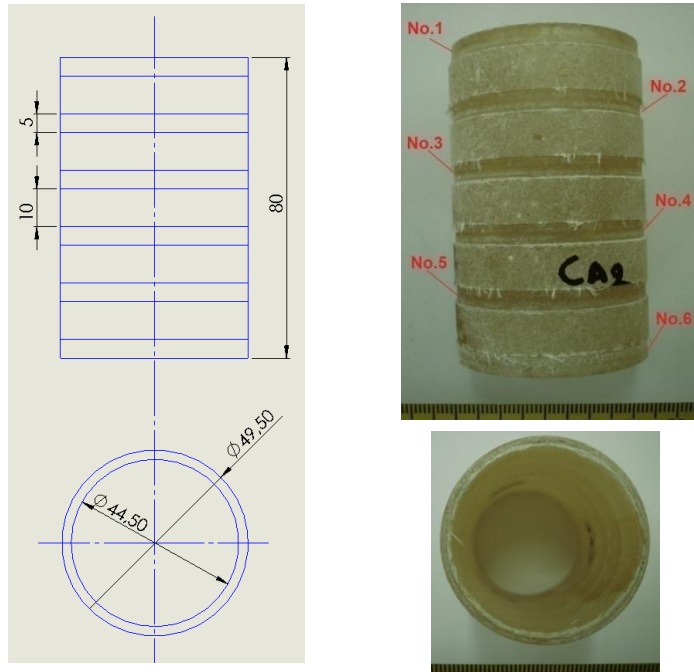
<b>Αρχικό φορτίο <math>P</math> (KN)</b>	32.1607
<b>Μέγιστο φορτίο <math>P_{max}</math> (KN)</b>	44.6705
<b>Μέσο μεταελαστικό φορτίο <math>P</math> (KN)</b>	18.5403
<b>Μήκος σύνθλιψης (mm)</b>	53.073
<b>Ολική απορροφούμενη ενέργεια (Joule)</b>	984.0012

### Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

- Χαρακτηριστικό αυτού του δοκιμίου είναι ότι έχει διαμόρφωση triggering και στις δύο πλευρές του.
- Κατά την πρώτη φάση της συμπίεσης, το φορτίο αυξάνει ραγδαία λαμβάνοντας τιμή 32.1607kN στα 1.44mm.  
Στη συνέχεια μειώνεται και ξεκινάει η κατάρρευση από το πάνω μέτωπο (αυλάκι No.1). Όταν εξαντληθεί η πρώτη αδύνατη περιοχή(φωτογρ. 2-3) και η πρέσα έρθει σε επαφή με το υλικό πλήρους διατομής, το φορτίο αυξάνει ραγδαία(σημείο 4) και η κατάρρευση μεταφέρεται στην κάτω πλευρά (αυλάκι No.4)(φωτογρ. 4-6).
- Η κατάρρευση τώρα μεταφέρεται μόνο από το κάτω μέτωπο προς τα πάνω.
- Η βλαμμένη περιοχή του κάτω άκρου έχει επεκταθεί στο μεγαλύτερο πάχος, χωρίς να έχουμε κατάρρευση των ενδιάμεσων δακτυλίων.
- Μπαίνουμε στο δεύτερο αυλάκι από κάτω (No.3)με το φορτίο να ατονίζει. Έτσι δημιουργείται μία κοιλάδα στο διάγραμμα ανάμεσα στα 22mm και 28mm.
- Μόλις εξαντληθεί και το αυλάκι No.3, η πρέσα έρχεται σε επαφή με υλικό πλήρους διατομής με αποτέλεσμα να αυξηθεί ραγδαία το φορτίο (φωτογρ. 12) στα 44kN.
- Εν συνεχεία, καθώς η πρέσα και από τις δύο πλευρές έρχεται σε επαφή με διατομή πλήρους υλικού, αναπτύσσει υψηλά φορτία με αποτέλεσμα να εμφανίζεται περιφερειακή θραύση στο ενδιάμεσο αυλάκι του τρέχοντος δοκιμίου(No.2). (φωτογρ.13)
- Η κατάρρευση συνεχίζεται με του δύο αλώβητους δακτυλίου να συναντιούνται (φωτογρ. 14)
- Ακολουθεί η εισχώρηση του άνωθεν τμήματος του θραυσμένου δοκιμίου στο κάτωθεν (φωτογρ. 15-16).
- Η εμφάνιση μιας μεγάλης ρωγμής περίπου ~45 μοιρών στο κάτω δακτυλίδι μας δείχνει ότι το υλικό έχει απαξιωθεί εντελώς και δεν φέρνει αντίσταση, κάτι που συμπεραίνουμε και από το διάγραμμα όπου το φορτίο κρατιέται πολύ χαμηλά.
- Η ενεργός διαδρομή είναι περίπου 35mm.
- Η συμπεριφορά του δοκιμίου δε θεωρείται αποδοτική καθώς η κατάρρευση δεν έγινε προοδευτικά και ομαλά, αλλά παρουσιάστηκαν πολλές βυθίσεις του φορτίου με τελικώς να έρχεται η πλήρης αστοχία του.
- Στις φωτογραφίες 18-19 γίνεται εμφανής τόσο η εισχώρηση του ενός δακτυλίου στον άλλον, όσο και η κατάρρευση του κελύφους η οποία σχηματίζει μέτωπα που εκτείνονται εσωτερικά και εξωτερικά του δοκιμίου.

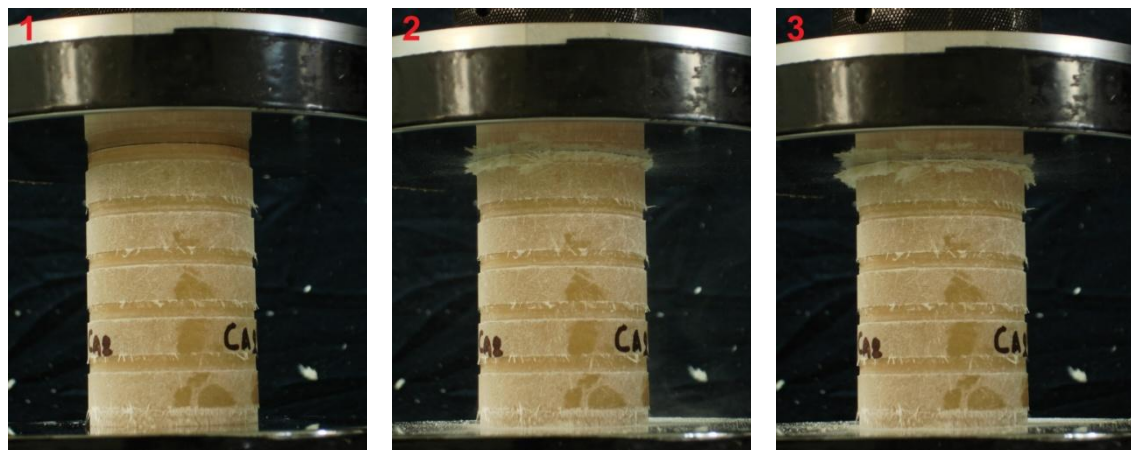
#### 4.2.4.9 Δοκίμιο $C_{A2}$

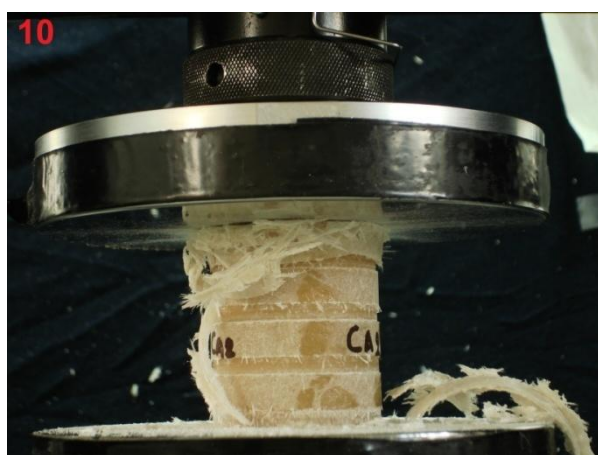
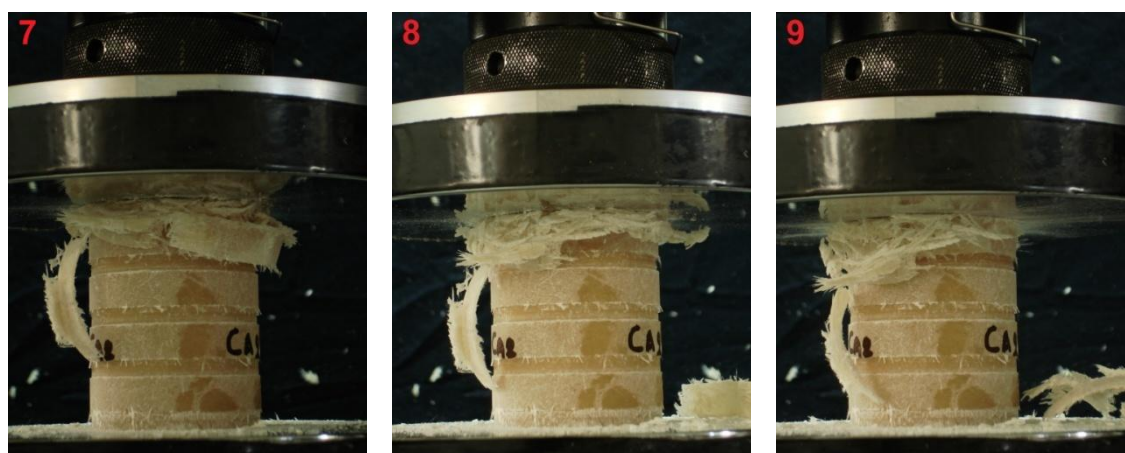
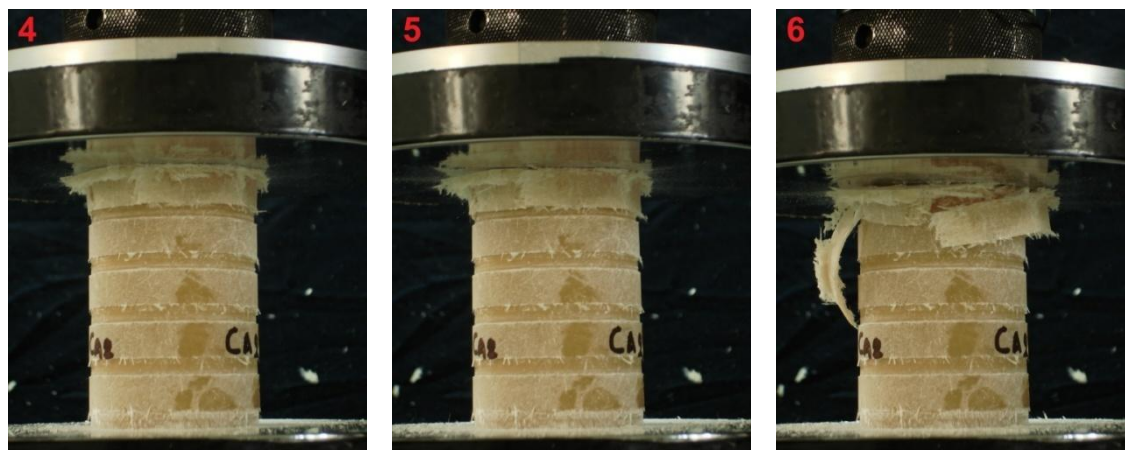
Παρακάτω παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου  $C_{A2}$ . Το εν λόγω δοκίμιο είναι κυκλικής διατομής και φέρει εγκάρσια αυλάκια στην εξωτερική του επιφάνεια. Συγκεκριμένα, έχουν χαραχθεί 6 αυλάκια  $5\text{mm}$ , ανά  $10\text{mm}$ , πάχους  $0.5\text{mm}$ .

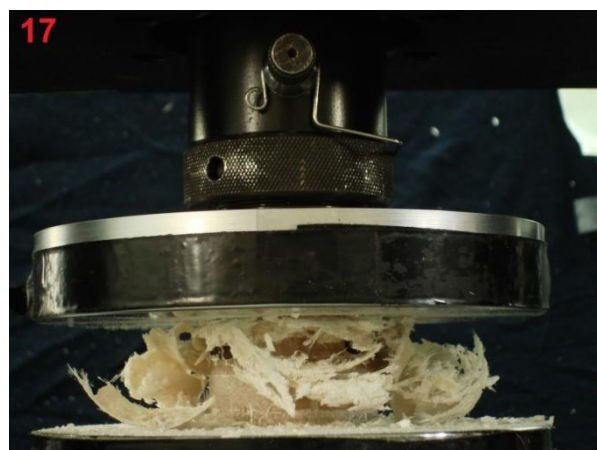
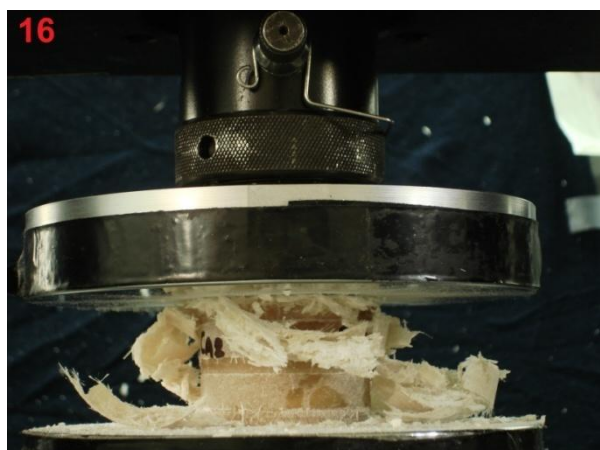
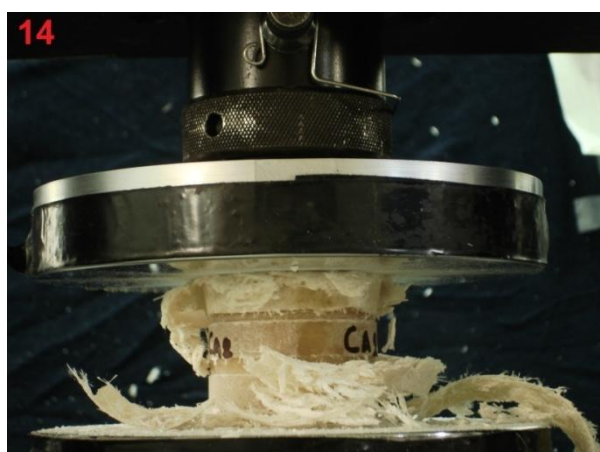
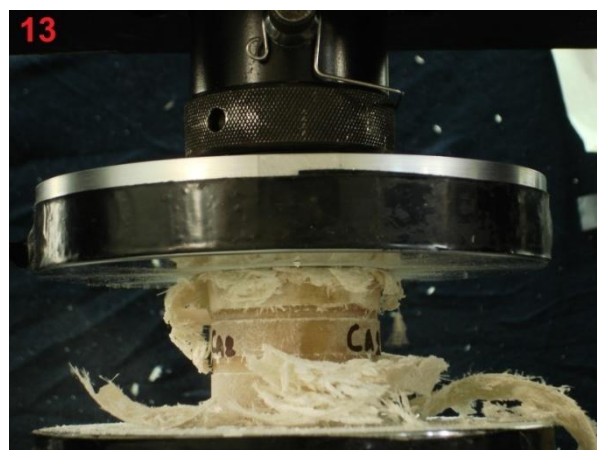
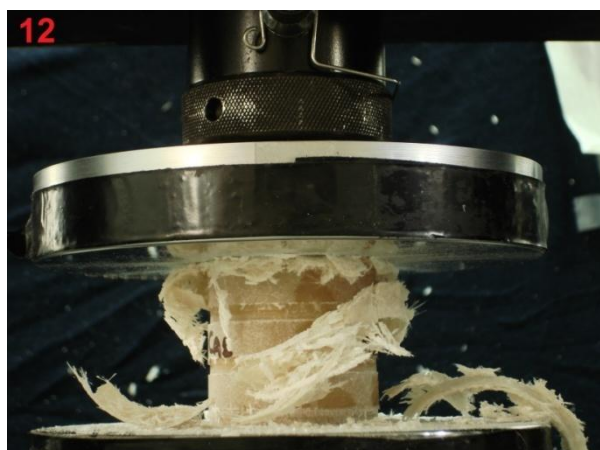


Σχήμα 36: Σκαρίφημα δοκιμίου  $C_{A2}$  (αριστερά), φωτογ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου  $C_{A2}$  (δεξιά).

Στη συνέχεια απεικονίζονται οι διαδοχικές φάσεις από την κατάρρευση των δοκιμίων.

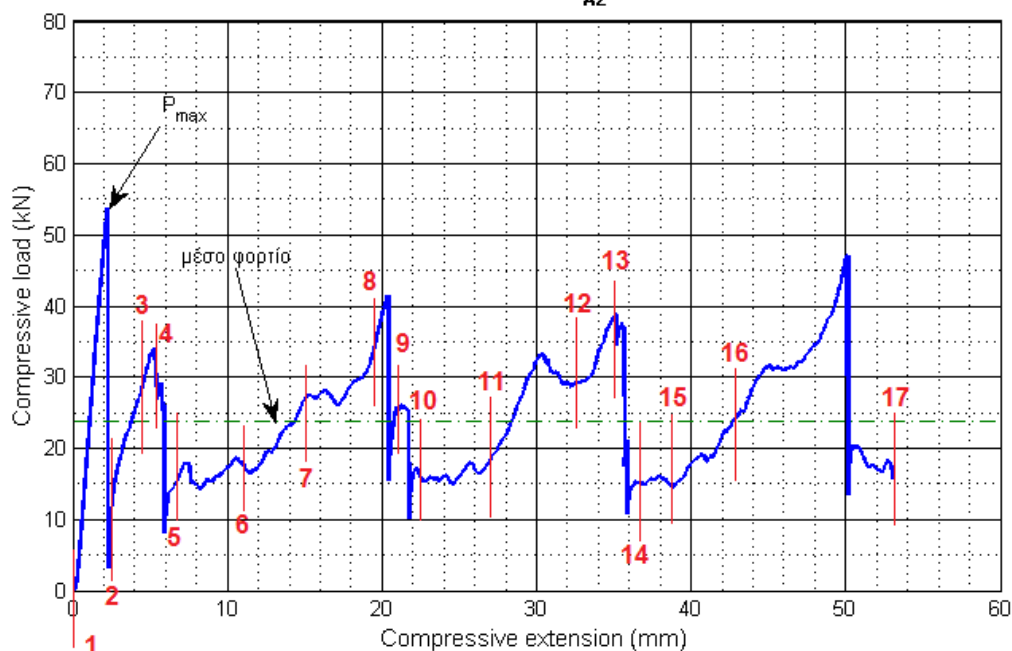








Δοκίμιο C<sub>A2</sub>



αρ. φωτογ.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Displacement (mm)	0	2.28	4.61	5.78	6.86	11.20	15.04	19.37	21.04
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	22.46	26.96	32.54	35.79	36.62	38.87	43.37	53.039	-

Αρχικό φορτίο $P = P_{max}$ (KN)	53.6637
Μέσο μεταελαστικό φορτίο $P$ (KN)	23.7658
Μήκος σύνθλιψης (mm)	53.039
Ολική απορροφούμενη ενέργεια (Joule)	1260.5415

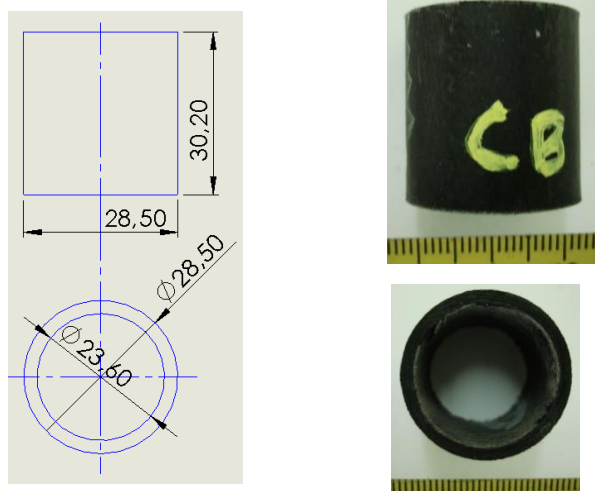


### Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

- Κατά την πρώτη φάση της συμπίεσης παρατηρείται απότομη αύξηση του φορτίου και σχηματίζεται η πρώτη κορυφή, που αποτελεί και την μέγιστη τιμή του, στα 53.6637 kN.
- Το δοκίμιο αρχίζει να καταρρέει από το άνω μέτωπο. Η κατάρρευση καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος μεταφέρεται από πάνω προς τα κάτω.
- Όταν η άνω βάση της πρέσας συναντάει υλικό πλήρους διατομής, αρχικά το φορτίο ανέρχεται βαθμιαία με μέχρι ένα τοπικό μέγιστο, εν συνεχεία πέφτει ραγδαία και ακολουθεί μια πριονωτή διακύμανση του φορτίου γύρω από μία μέση τιμή.
- Στο διάγραμμα εμφανίζονται 5 κορυφές φορτίου, απ τις οποίες η πρώτη οφείλεται στην έναρξη της κατάρρευσης και οι άλλες 4 στην επαφή της πρέσας με την πλήρη διατομή, αφού έχει εξαντλήσει το αυλάκι που προηγείται.
- Χαρακτηριστικό είναι η αποκόλληση των εξωτερικών φλοιών από της πλήρες διαμέτρους, που προεξέχουν από τις αδύνατες περιοχές (φωτογρ. 4-19)
- Οι πολλές εκρήξεις και εκσφενδονίσεις του υλικού οφείλονται στην ψαθυρότητά του.
- Η κατάρρευση δεν μεταφέρθηκε στο κάτω μέτωπο, το οποίο έμεινε αλώβητο.
- Από την άνω όψη της τελικής κατάστασης του δοκιμίου βλέπουμε την αποκόλληση των ινών και τον σχηματισμό των διαδοχικών μετώπων. Περιμετρικά από το δοκίμιο έχουν τοποθετηθεί τμήματα, τα οποία έχουν αποκολληθεί απ' την εξωτερική επιφάνειά του.
- Η κατάρρευση μεταφέρθηκε στις πολλές διαμορφώσεις με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται πολλές βυθίσεις φορτίου. Με βάση τη μορφή του διαγράμματος, το δοκίμιο δε θεωρείται αποδοτικό ως προς την ικανότητά του να απορροφάει ενέργεια.

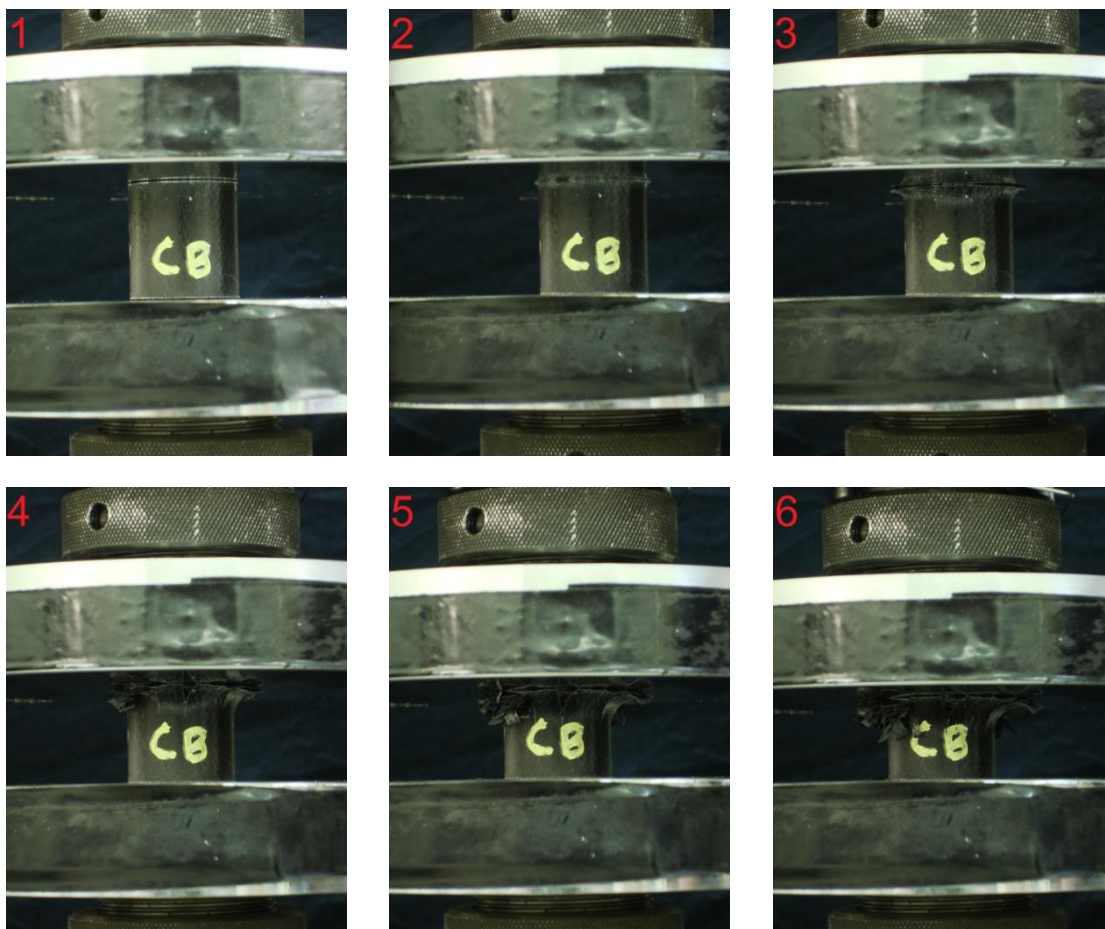
#### 4.2.4.10 Δοκίμιο $C_B$

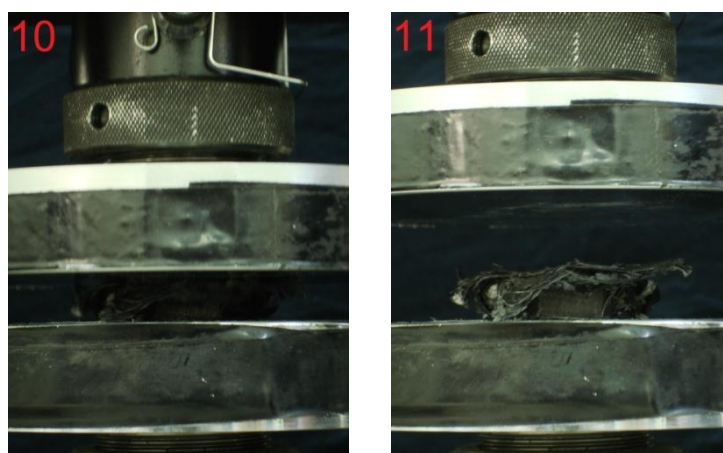
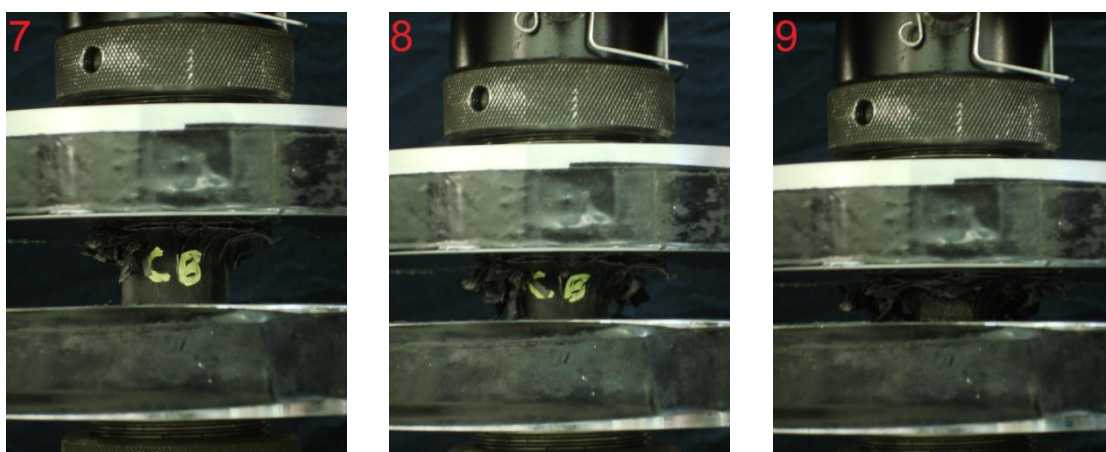
Παρακάτω παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου  $C_B$ . Το εν λόγω δοκίμιο είναι κυκλικής διατομής και δε φέρει αυλάκια στην εξωτερική του επιφάνεια.



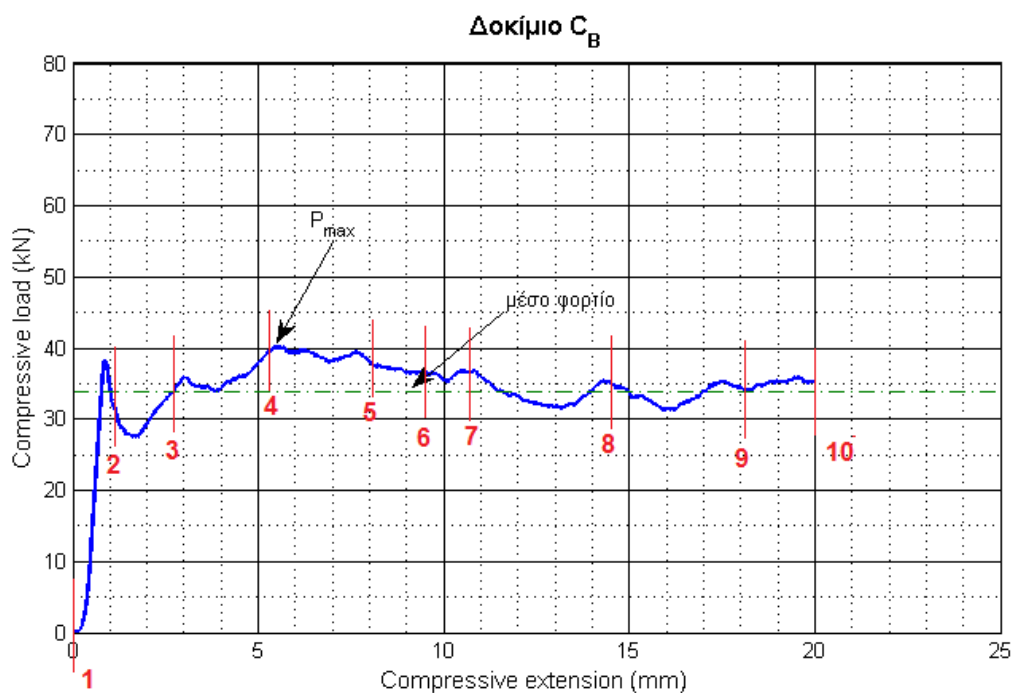
Σχήμα 4.2- 15: Σκαρίφημα δοκιμίου  $C_B$  (αριστερά), φωτογ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου  $C_B$  (δεξιά).

Στη συνέχεια απεικονίζονται οι διαδοχικές φάσεις από την κατάρρευση των δοκιμίων.





Παρακάτω εικονίζεται το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης που λάβαμε με τη βοήθεια του ειδικού εξοπλισμού κατά την εκτέλεση του πειράματος θλίψης, καθώς και τα ύψη κατά τα οποία ελήφθησαν οι αντίστοιχες φωτογραφίες. Ακόμη στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται οι ποσότητες που απαιτούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης του συγκεκριμένου δοκιμίου.



<b>αρ. φωτογρ.</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Displacement (mm)</b>	0	1.09	2.76	5.347	8.097	9.43
	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	
	10.76	14.43	18.18	20.013	-	

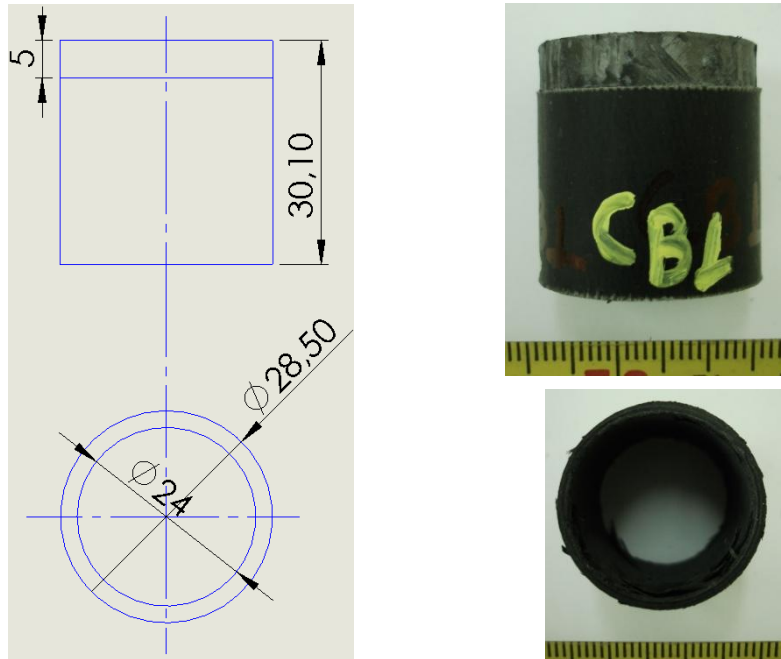
<b>Αρχικό φορτίο <math>P</math> (KN)</b>	37.9872
<b>Μέγιστο φορτίο <math>P_{max}</math> (KN)</b>	40.2276
<b>Μέσο μεταελαστικό φορτίο <math>P</math> (KN)</b>	33.9095
<b>Μήκος σύνθλιψης (mm)</b>	20.013
<b>Ολική απορροφούμενη ενέργεια (Joule)</b>	678.6620

**Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης**

- Παρατηρούμε ότι κατά την πρώτη φάση της συμπίεσης παρουσιάζεται σταδιακή αύξηση του φορτίου, που λαμβάνει μέγιστη τιμή 37.9872 kN για μετατόπιση 0.98 mm.
- Στη συνέχεια υπάρχει απότομη πτώση του φορτίου, παρουσιάζεται τοπικό ελάχιστο και ξεκινάει η προοδευτική κατάρρευση του δοκιμίου από το πάνω μέτωπο.
- Εν συνεχεία το φορτίο παρουσιάζει μια αύξηση και ακολούθως ομαλοποιείται πραγματοποιώντας ταλαντώσεις γύρω από μια σταθερή τιμή 35 kN μέχρι τα 20.013 mm παραμόρφωσης.
- Η κατάρρευση είναι ελεγχόμενη και ομαλή.
- Παρατηρούμε ότι το δοκίμιο παρουσιάζει ιδανική συμπεριφορά καθώς δεν εμφανίζεται υψηλό αρχικό φορτίο. Αυτό οφείλεται στον τρόπο πλέξης του σύνθετου υλικού.
- Παρατηρώντας την άνω και κάτω όψη συμπεραίνουμε ότι η πάνω πλευρά δέχτηκε όλη την παραμόρφωση και το δοκίμιο υπέστη διαστρωματική αποκόλληση με τις μισές στρωματώσεις να διέφυγαν προς το εξωτερικό του υλικού, ενώ οι υπόλοιπες συμπιέστηκαν στο εσωτερικό του σωλήνα.

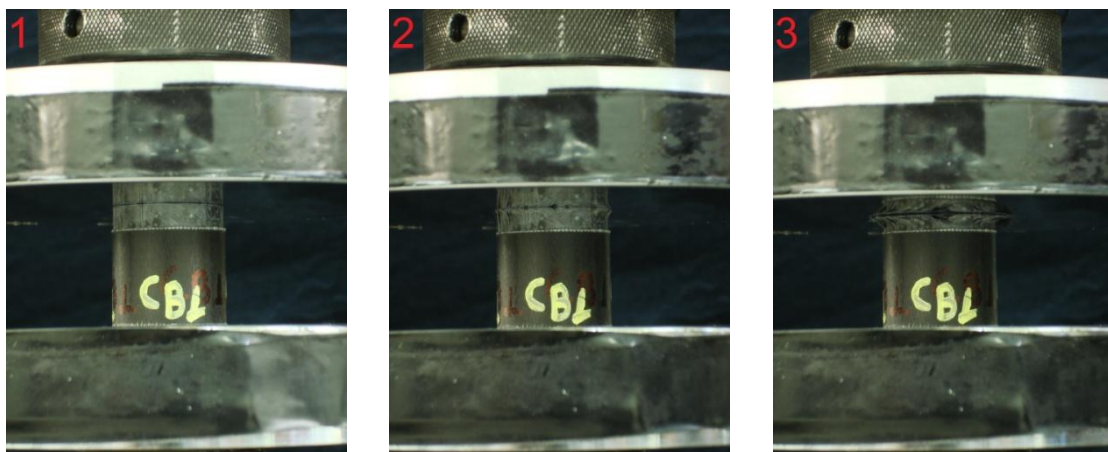
#### 4.2.4.11 Δοκίμιο $C_{B1}$

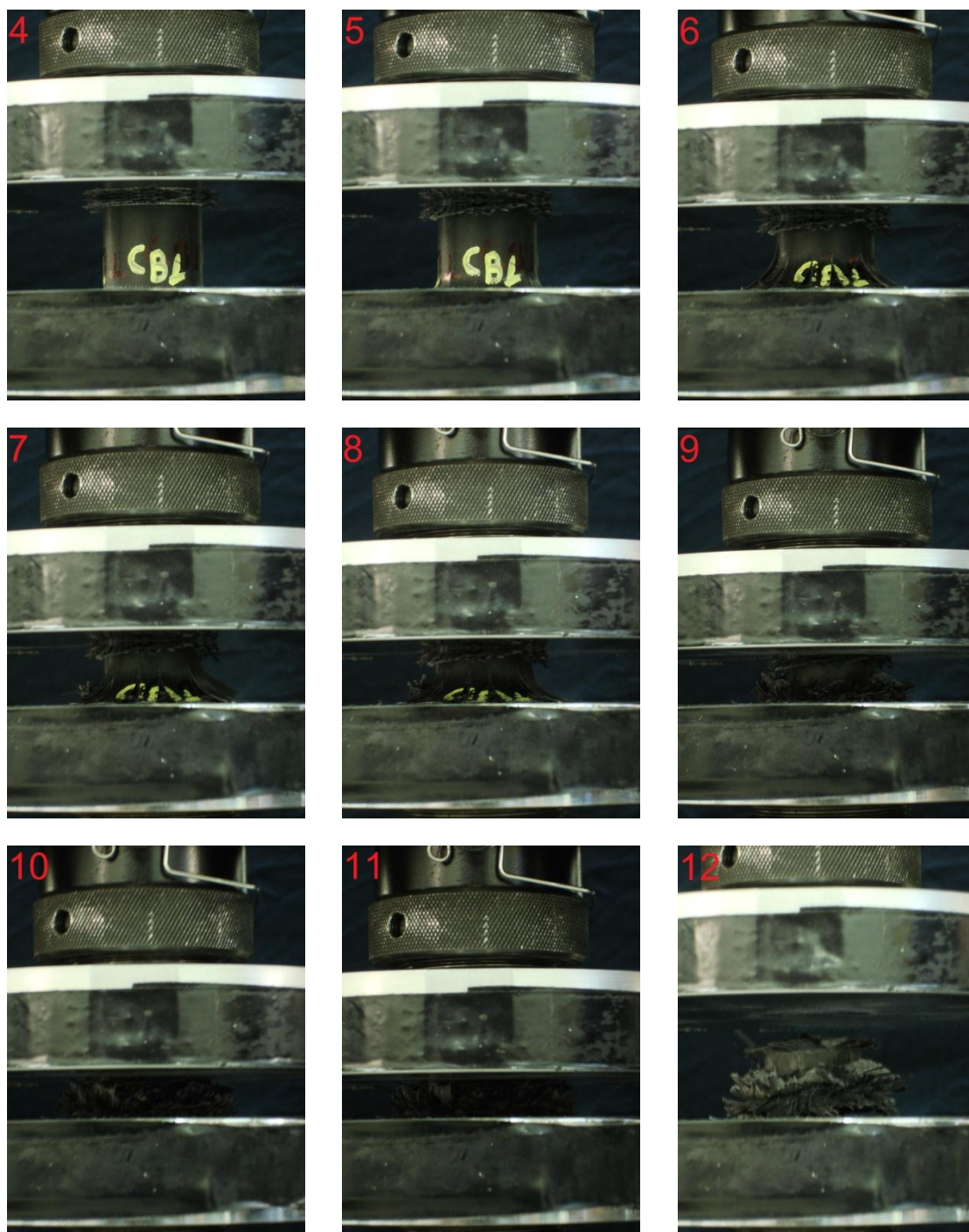
Παρακάτω παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου  $C_{B1}$ . Το εν λόγω δοκίμιο είναι κυκλικής διατομής φέρει ένα εγκάρσιο αυλάκι 5mm και βάθους 0.5mm στο άνω μέτωπό του.

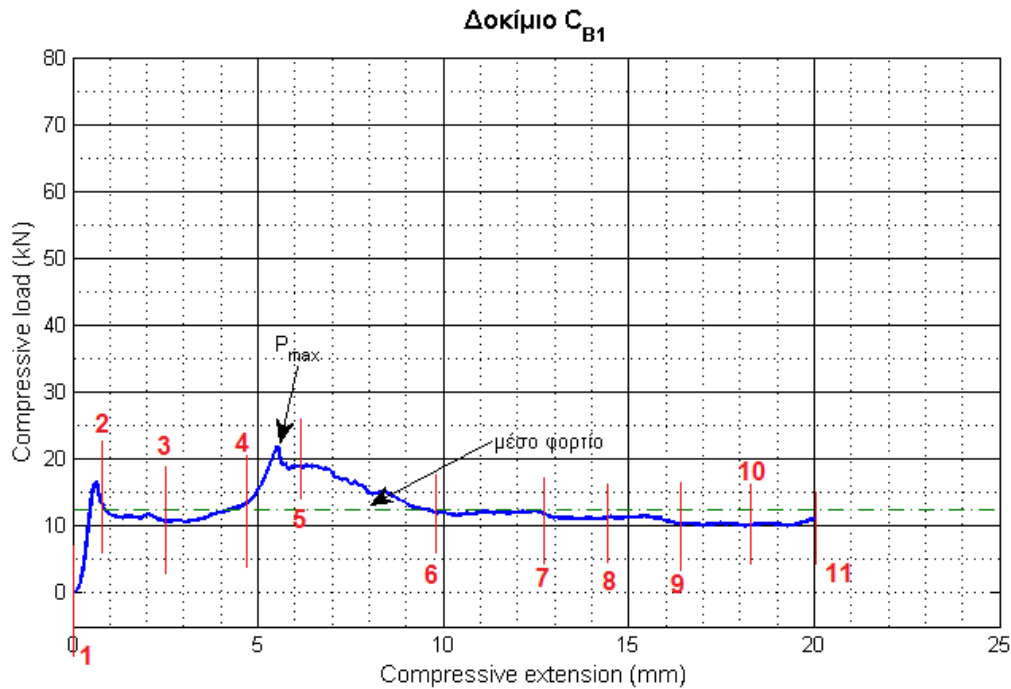


Σχήμα 37: Σκαρίφημα δοκιμίου  $C_{B1}$  (αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου  $C_{B1}$  (δεξιά)

Στη συνέχεια απεικονίζονται οι διαδοχικές φάσεις από την κατάρρευση των δοκιμίων.







<b>αρ. φωτογ.</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Displacement (mm)</b>	0	0.7838	2.564	4.622	6.039	9.986
	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
	12.79	14.46	16.35	18.37	20.013	-

<b>Αρχικό φορτίο <math>P</math> (kN)</b>	16.6763
<b>Μέγιστο φορτίο <math>P_{max}</math> (kN)</b>	21.8520
<b>Μέσο μεταελαστικό φορτίο <math>P</math> (kN)</b>	12.4084
<b>Μήκος σύνθλιψης (mm)</b>	20.013
<b>Ολική απορροφούμενη ενέργεια (Joule)</b>	248.3424

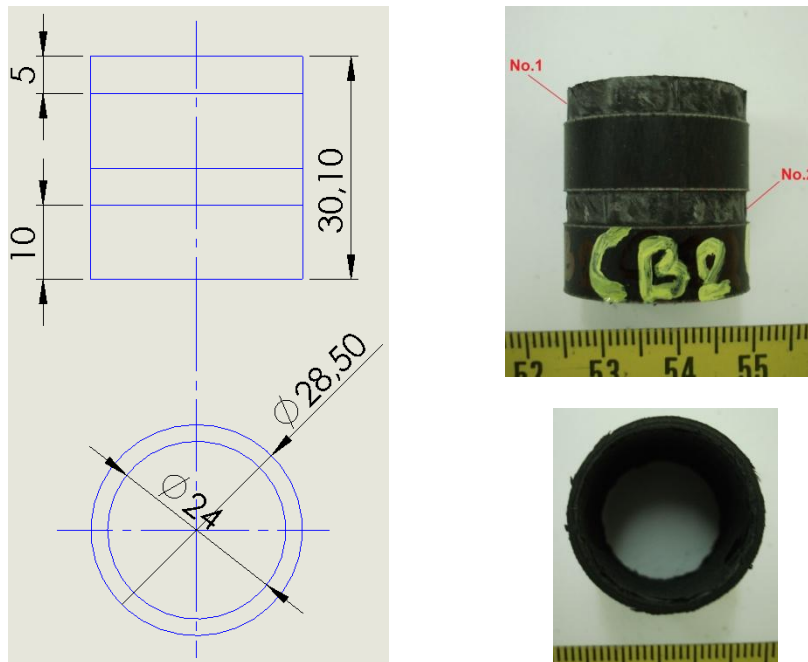
### Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

- Κατά την πρώτη φάση της συμπίεσης παρουσιάζεται ραγδαία αύξηση του φορτίου, λαμβάνοντας τιμή της τάξης  $16.6763\text{kN}$  στα  $0.63\text{mm}$ .
- Η παραμόρφωση ξεκινά από το πάνω μέτωπο (πλευρά triggering). Το φορτίο αρχίζει να ταλαντεύεται γύρω από μία μέση τιμή ( $12.5\text{ kN}$ ) μέχρι τα  $5.5\text{mm}$  παραμόρφωσης.
- Η πρέσα εξαντλεί την αδύνατη περιοχή και έρχεται σε επαφή με το υλικό πλήρους διατομής με αποτέλεσμα να αυξάνεται το φορτίο, αποκτώντας μέγιστη τιμή της τάξης  $21.8520\text{ kN}$  (peak load).
- Παρατηρούμε ότι στη συνέχεια σταματάει η παραμόρφωση στο πάνω μέτωπο και ξεκινάει στο κάτω. Ακολουθεί μία πριονωτή διακύμανση του φορτίου περί μια μέση τιμή στην περιοχή κατάρρευσης.
- Χαρακτηριστικοί κρότοι κατά την διεξαγωγή του πειράματος, δικαιολογούν την αποκόλληση υλικού απ' τις εξωτερικές στρώσεις του δοκιμίου.

- Όπως φαίνεται από την άνω και κάτω όψη της τελικής κατάστασης του δοκιμίου, οι διαστρωματώσεις του υλικού αποκολλήθηκαν (delamination) με αποτέλεσμα κάποιες να καμφθούν προς τα μέσα και κάποιες προς τα έξω. Ακόμη λόγω της αποκόλλησης των ινών του σύνθετου υλικού, γίνεται εμφανής η κλίση τους ( $\sim 30^\circ$ ).

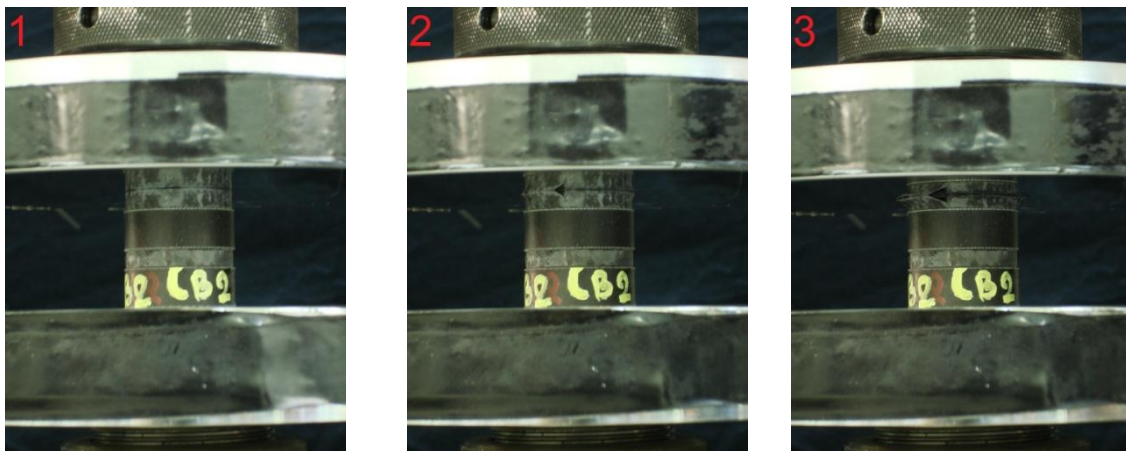
#### 4.2.4.12 Δοκίμιο $C_{B2}$

Παρακάτω παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου  $C_{B2}$ . Το εν λόγω δοκίμιο είναι κυκλικής διατομής και φέρει δύο εγκάρσια αυλάκια  $5mm$ , βάθους  $0.5mm$  σε απόσταση  $10mm$ .

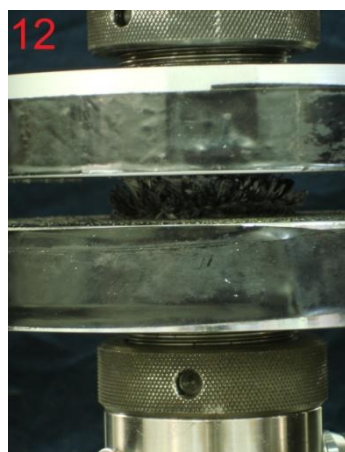
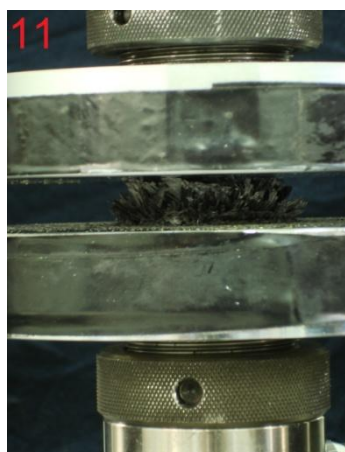
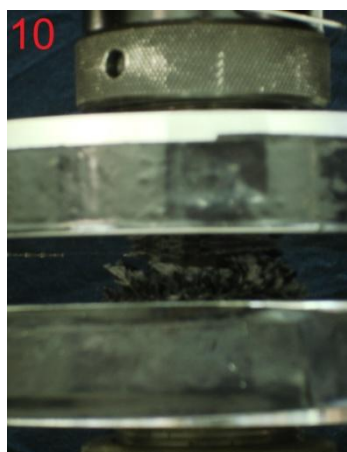
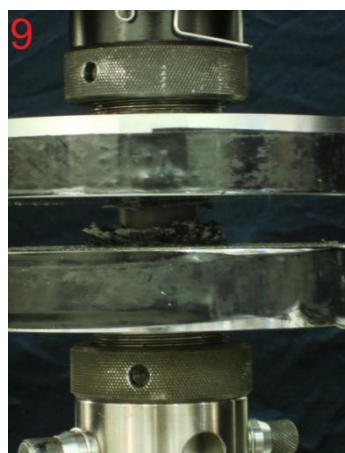
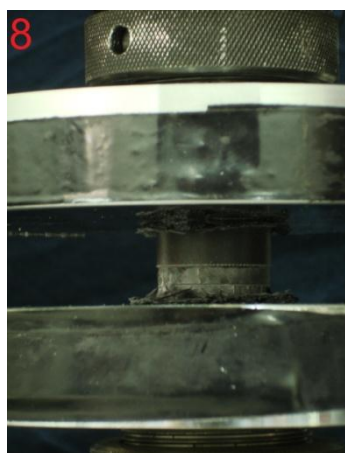
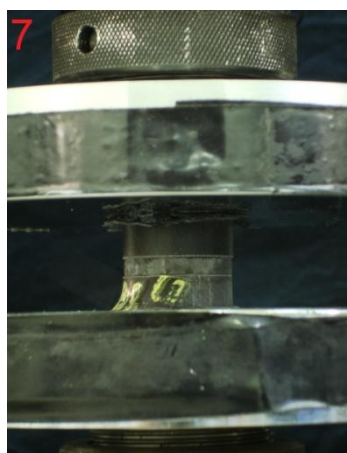
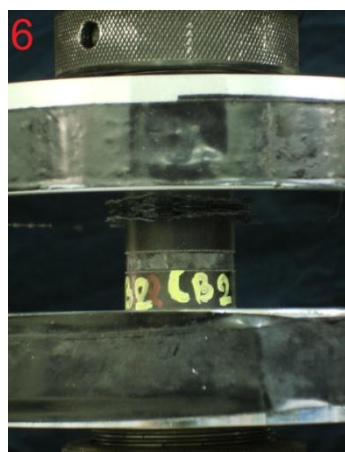
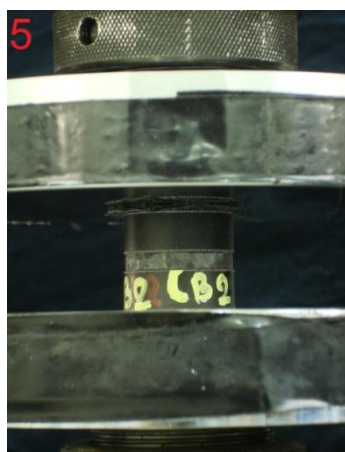
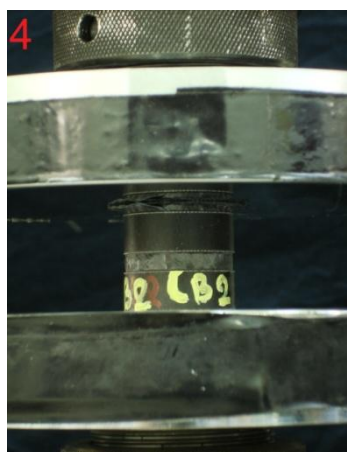


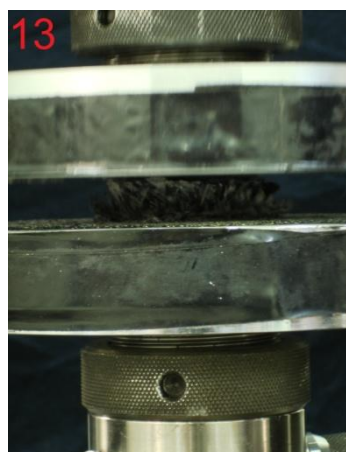
Σχήμα 38: Σκαρίφημα δοκιμίου  $C_{B2}$  (αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου  $C_{B2}$  (δεξιά)

Στη συνέχεια απεικονίζονται οι διαδοχικές φάσεις από την κατάρρευση των δοκιμών.









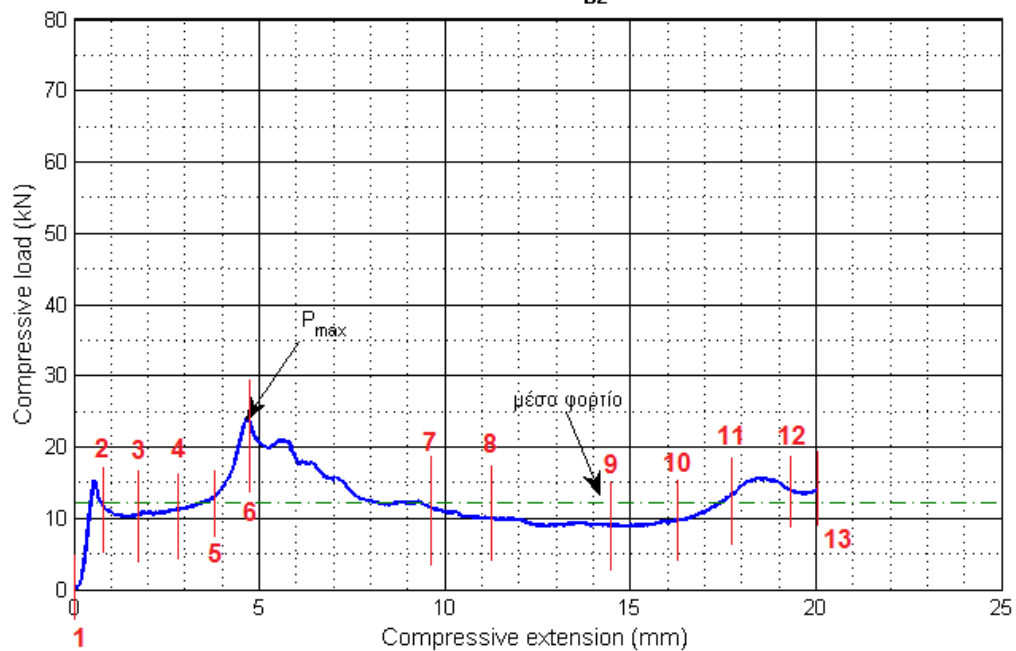
Άνω όψη



Κάτω όψη



Δοκίμιο C<sub>B2</sub>



αρ. φωτογρ.	1	2	3	4	5	6	7
Displacement (mm)	0	0.79	1.88	2.88	3.87	4.63	9.88
	8	9	10	11	12	13	14
	11.3	14.46	16.21	17.89	19.22	20.0139	-

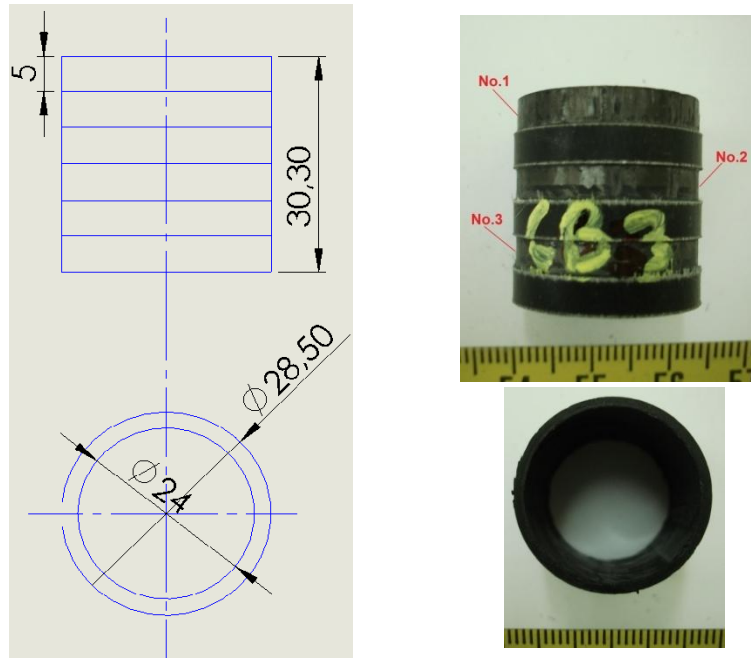
Αρχικό φορτίο $P$ (KN)	15.2642
Μέγιστο φορτίο $P_{max}$ (KN)	23.9460
Μέσο μεταελαστικό φορτίο $P$ (KN)	12.2952
Μήκος σύνθλιψης (mm)	20.0139
Ολική απορροφούμενη ενέργεια (Joule)	246.0749

### Παρατηρήσεις

- Κατά την πρώτη φάση της συμπίεσης παρατηρούμε μία ραγδαία άνοδο του φορτίου της τάξης  $15.2642kN$  στα  $0.55mm$ . Η πρώτη κορυφή εμφανίζεται περίπου στα  $0.65mm$  παραμόρφωσης.
- Το δοκίμιο αρχίζει να καταρρέει από την πλευρά του triggering (άνω μέτωπο). Στις φωτογραφίες 2-5 βλέπουμε την πρέσα να συμπιέζει το πρώτο αυλάκι του δοκιμίου, ενώ όταν έρχεται σε επαφή με το υλικό πλήρους διατομής (φωτογρ. 6), εμφανίζεται μία άνοδος του φορτίου, λαμβάνοντας μέγιστη τιμή  $23.9460 kN$ .
- Ενώ το αυλάκι έχει πλάτος  $5mm$  χιλιοστά παρατηρούμε ότι η άνοδος του φορτίου ξεκινάει νωρίτερα. Αυτό οφείλεται στο ότι η πρέσα έρχεται σε επαφή με στρωματώσεις που έχουν ήδη αποκολληθεί από το δοκίμιο.
- Στη συνέχεια και καθώς η άνω πλευρά της πρέσας συναντάει την πλήρη διατομή, δημιουργούνται ίσες τάσεις στις δύο πλευρές του δοκιμίου, με αποτέλεσμα να μεταφέρεται η κατάρρευση στο κάτω μέτωπο.
- Αξιοσημείωτη είναι η αποκόλληση τεμαχίων από την κάτω πλήρη διατομή. Το υλικό που φεύγει, δεν υποστηρίζεται από κάποιου είδους δυνάμεις καθώς βρίσκεται κάτω από το αυλάκι No.2.
- Η κατάρρευση συνεχίζει έως ότου εξαντληθεί και η δεύτερη αδύνατη περιοχή (No.2) (φωτογρ. 7-10), δημιουργώντας μία πριονωτή καμπύλη στο διάγραμμα γύρο από μία μέση τιμή τάξης  $12kN$ , για να συναντήσει ξανά το πλήρες υλικό και η το φορτίο να παρουσιάσει μία αύξηση.
- Από την άνω και κάτω όψη της τελικής κατάστασης του δοκιμίου, παρατηρούμε τη αποκόλληση των στρωμάτων του σύνθετου υλικού καθώς και το ότι η κατάρρευση εξαπλώθηκε και στις δύο πλευρές του σωλήνα.
- Η διαστρωμάτωση ευνοεί την αποκόλληση υλικού καθώς έχουμε μονοδιευθυντικές στρώσεις, αντίθετα με το δοκίμιο  $C_c$  που έχουμε πλέγμα.

#### 4.2.4.13 Δοκίμιο $C_{B3}$

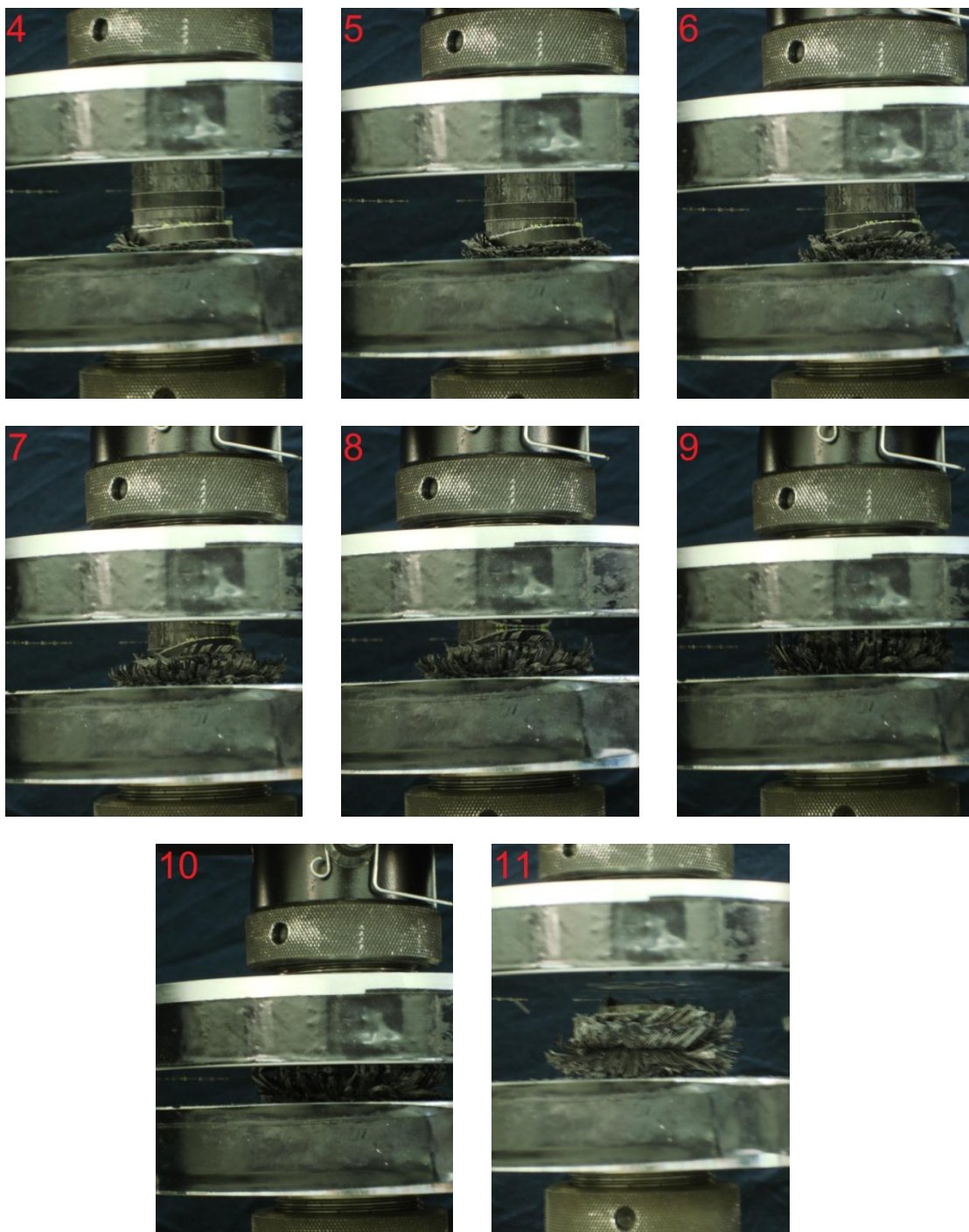
Παρακάτω παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου  $C_{B3}$ . Το εν λόγω δοκίμιο είναι κυκλικής διατομής και φέρει τρία εγκάρσια αυλάκια  $5mm$ , βάθους  $0.5mm$  ανά  $5mm$ .



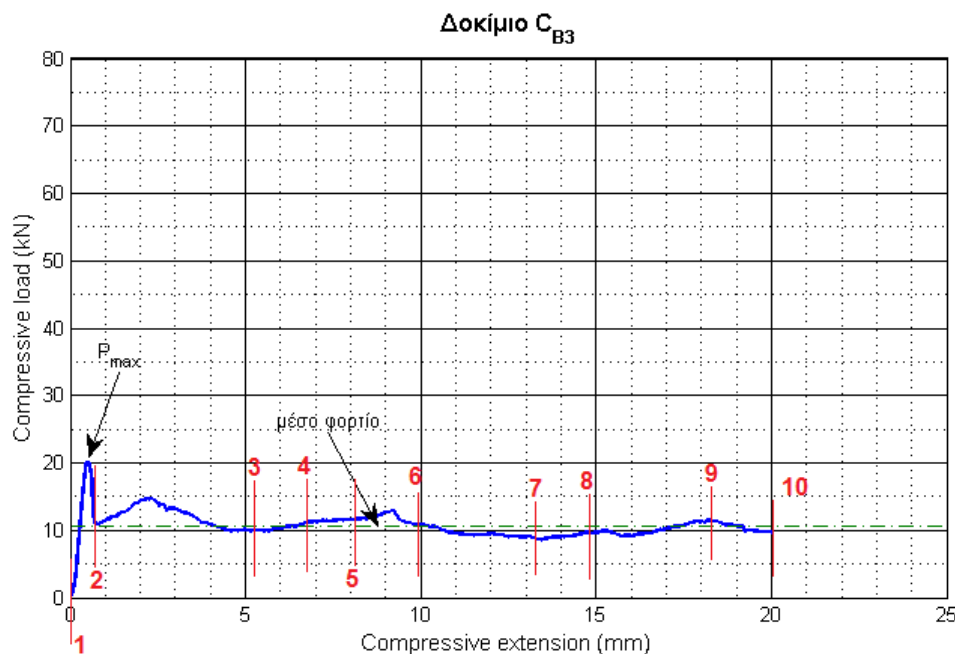
Σχήμα 39: Σκαρίφημα δοκιμίου  $C_{B3}$  (αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου  $C_{B3}$  (δεξιά)

Στη συνέχεια απεικονίζονται οι διαδοχικές φάσεις από την κατάρρευση των δοκιμών.





Παρακάτω εικονίζεται το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης που λάβαμε με τη βοήθεια του ειδικού εξοπλισμού κατά την εκτέλεση του πειράματος θλίψης, καθώς και τα ύψη κατά τα οποία ελήφθησαν οι αντίστοιχες φωτογραφίες. Ακόμη στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται οι ποσότητες που απαιτούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης του συγκεκριμένου δοκιμίου.



<b>αρ. φωτογρ.</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Displacement (mm)</b>	0	0.7338	5.23	6.814	8.064	9.981
	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	
	13.23	14.91	18.23	20.064	-	

<b>Αρχικό φορτίο <math>P = P_{max}</math> (kN)</b>	20.2145
<b>Μέσο μεταελαστικό φορτίο <math>P</math> (kN)</b>	10.6979
<b>Μήκος σύνθλιψης (mm)</b>	20.064
<b>Ολική απορροφούμενη ενέργεια (Joule)</b>	214.6452

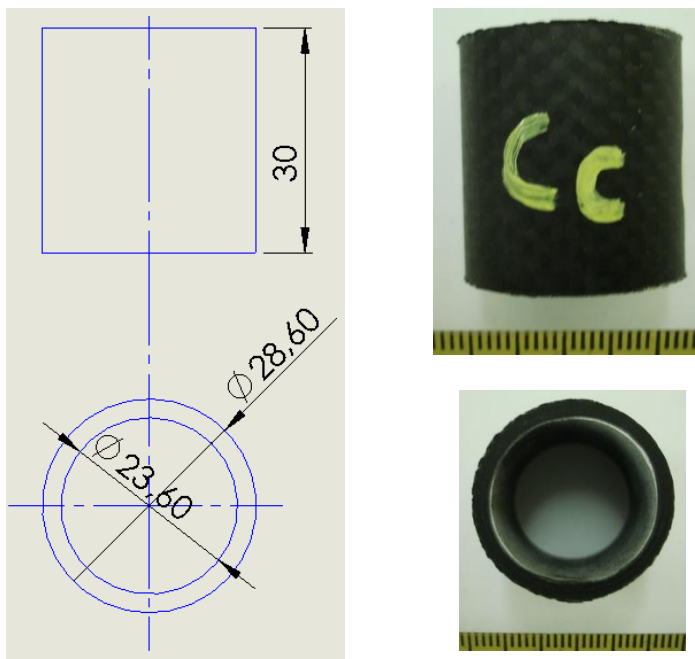
### Παρατηρήσεις

- Κατά την πρώτη φάση της συμπίεσης παρατηρείται μία ραγδαία άνοδος του φορτίου λαμβάνοντας μέγιστη τιμή 20.2145 kN.
- Ενώ περιμένουμε να ξεκινήσει η κατάρρευση από την άνω διαμόρφωση triggering (No.1), ξεκινάει από το κάτω μέτωπο, παρότι υπάρχει υλικό πλήρους διατομής.
- Έχουμε αποκόλληση των εξωτερικών στρώσεων που προεξέχουν και βρίσκονται κάτω απ' το αυλάκι No.2. Η κατάρρευση μεταφέρεται στην αδύνατη περιοχή (No.2) με το φορτίο να ταλαντεύεται γύρω από μία μέση τιμή τάξης 10 kN (φωτογρ. 3-5).
- Ανάμεσα στα σημεία 5 και 6 του διαγράμματος εμφανίζεται μία αύξηση φορτίου η οποία δικαιολογείται καθώς η βάση της πρέσας συναντάει την πλήρη διατομή.

- Από τις φωτογραφίες 3-8 γίνεται αντιληπτό ότι το εξωτερικό τμήμα που αποκολλήθηκε «ταξιδεύει» μαζί με το μέτωπο, χωρίς όμως αυτό να προσφέρει σε κάποιο φορτίο.
- Στο σημείο 9 (φωτογρ. 9) του διαγράμματος, το φορτίο αυξάνει καθώς η πρέσα έρχεται πάλι σε επαφή με υλικό πλήρους διατομής.
- Αξιοσημείωτο είναι ότι η κατάρρευση δεν ξεκίνησε από το πάνω μέτωπο, κάτι που φαίνεται και από την άνω όψη της τελικής κατάστασης του δοκιμίου. Αυτό πιθανώς να οφείλεται σε κακή κατεργασία του υλικού. Η διατομή της διαμόρφωσης No.3 είχε μικρότερη διατομή απ' ότι αυτή της No.1 με αποτέλεσμα να ξεκινήσει η κατάρρευση από εκεί.
- Από την άνω και κάτω όψη της τελικής κατάστασης του δοκιμίου φαίνονται οι αποκολλημένες μονοδιευθυντικές ίνες του σύνθετου υλικού.
- Αν και το διάγραμμα δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις, το δοκίμιο δε θεωρείται αποδοτικό, όσον αφορά την απορρόφηση ενέργειας, καθώς η κατάρρευση μεταφέρεται στις περισσότερες σε σχέση με πριν διαμορφώσεις, με αποτέλεσμα το φορτίο να λαμβάνει μικρότερης τιμές.

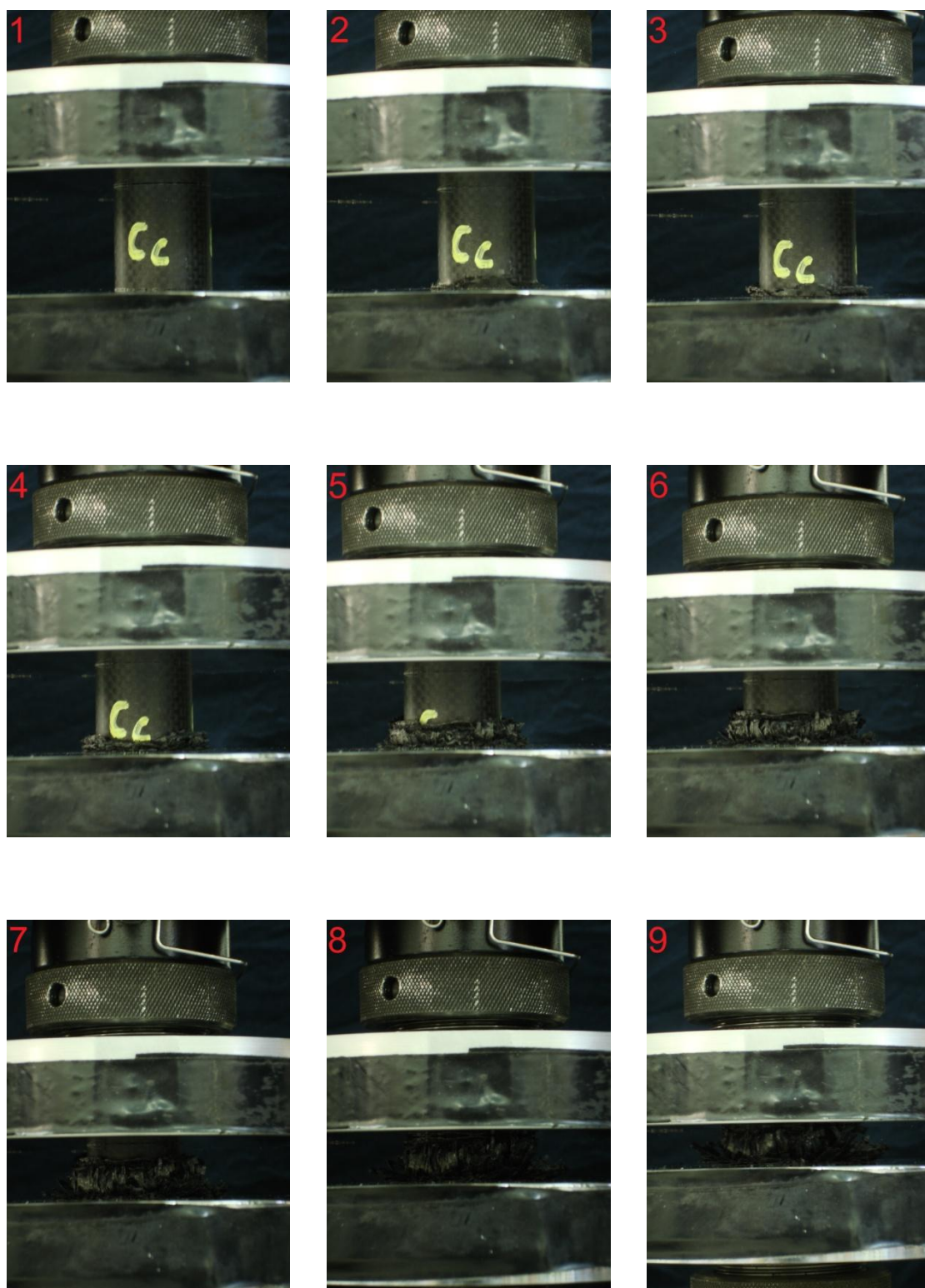
#### 4.2.4.14 Δοκίμιο $C_c$

Παρακάτω παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου  $C_c$ . Το εν λόγω δοκίμιο είναι κυκλικής διατομής και δε φέρει αυλάκια στην εξωτερική του επιφάνεια.

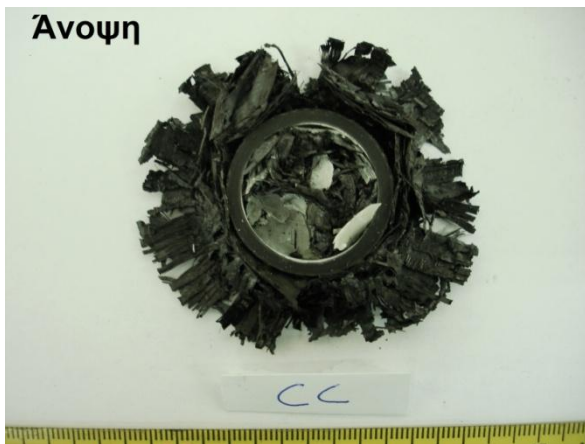
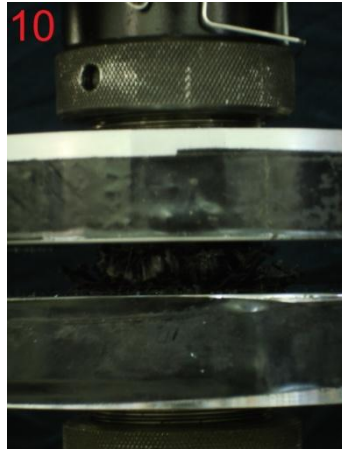


Σχήμα 40: Σκαρίφημα δοκιμίου  $C_c$  (αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου  $C_c$  (δεξιά)

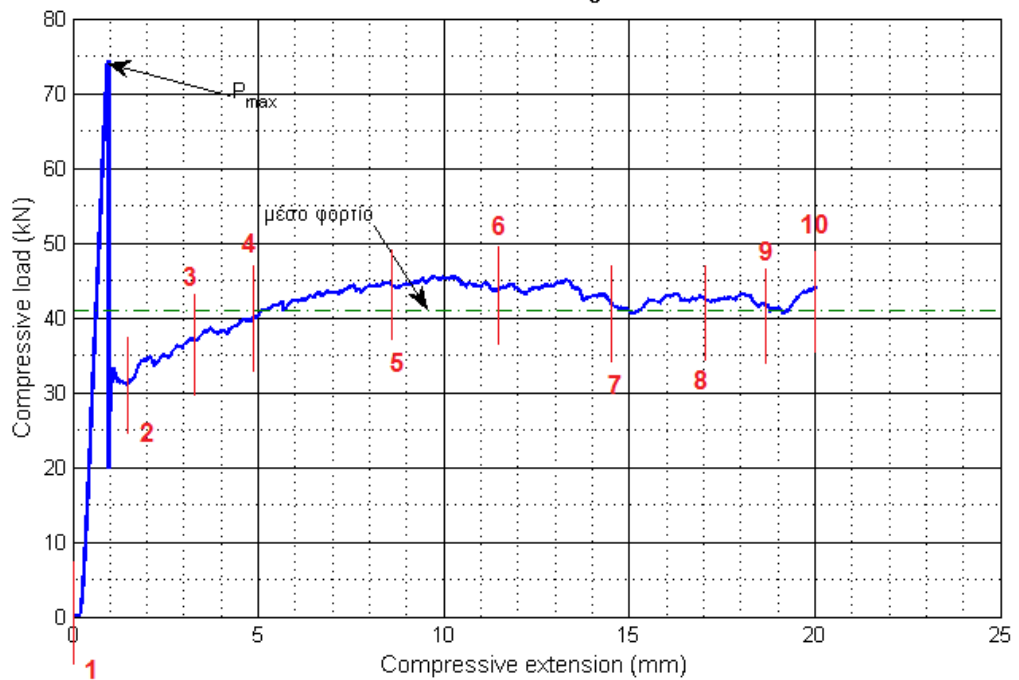
Στη συνέχεια απεικονίζονται οι διαδοχικές φάσεις από την κατάρρευση των δοκιμίων.







Δοκίμιο C<sub>c</sub>



αρ. φωτογρ.	1	2	3	4	5
Displacement (mm)	0	1.534	3.287	4.978	8.781
	6	7	8	9	10
	11.45	14.54	17.03	18.86	20.31

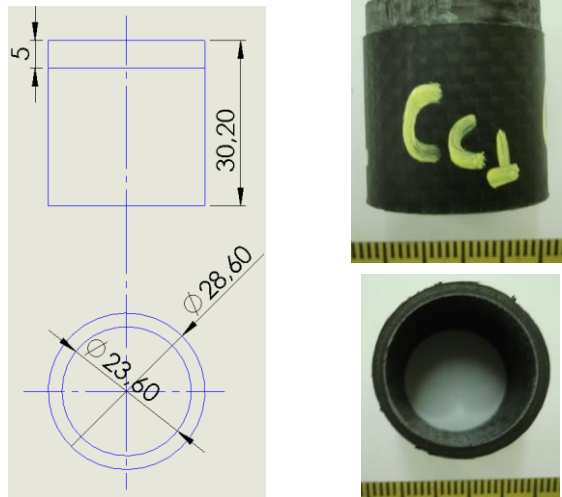
Αρχικό φορτίο $P = P_{max}$ (KN)	74.3614
Μέσο μεταελαστικό φορτίο $P$ (KN)	40.9487
Μήκος σύνθλιψης (mm)	20.31
Ολική απορροφούμενη ενέργεια (Joule)	820.2477

### Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

- Παρατηρούμε ότι κατά την πρώτη φάση της συμπίεσης παρουσιάζεται μία ραγδαία αύξηση του φορτίου, που λαμβάνει μέγιστη τιμή 74.3614 kN για μετατόπιση περίπου 0.95 mm. Σε αυτό το σημείο το δοκίμιο προβάλλει τη μεγαλύτερη αντίσταση στην εφαρμοζόμενη θλιπτική δύναμη.
- Αμέσως μετά υπάρχει μία απότομη πτώση του φορτίου, παρουσιάζεται τοπικό ελάχιστο (0.99 mm) και ξεκινάει η προοδευτική κατάρρευση του δοκιμίου από το κάτω μέτωπο.
- Εν συνέχεια το φορτίο αρχικά παρουσιάζει μία αύξηση και στη συνέχεια ομαλοποιείται πραγματοποιώντας ταλαντώσεις γύρω από μια σταθερή τιμή 42.500 kN μέχρι τα 20.31 mm παραμόρφωσης.
- Η κατάρρευση είναι ελεγχόμενη και ομαλή λόγω των μικροθραύσεων που παρατηρούνται στα σύνθετα υλικά, κάτι που δε συμβαίνει με τα μεταλλικά.
- Όπως φαίνεται από την κάτω όψη της τελικής κατάστασης του δοκιμίου, οι διαστρωματώσεις του υλικού αποκολλήθηκαν (delamination) με αποτέλεσμα κάποιες να καμφθούν προς τα μέσα και κάποιες προς τα έξω.
- Παρατηρούμε ότι το αρχικό φορτίο βρίσκεται πολύ υψηλά στην ελαστική περιοχή, κάτι που δεν είναι επιθυμητό και το αντιμετωπίζουμε με τεχνικές triggering.

#### 4.2.4.15 Δοκίμιο $C_{C1}$

Παρακάτω παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου  $C_{C1}$ . Το εν λόγω δοκίμιο είναι κυκλικής διατομής φέρει ένα εγκάρσιο αυλάκι 5mm και βάθους 0.5mm στο άνω μέτωπό του.



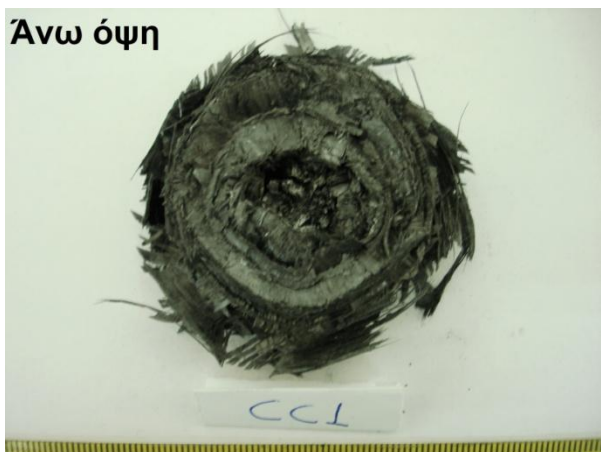
Σχήμα 4.2- 20: Σκαρίφημα δοκιμίου  $C_{C1}$  (αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου  $C_{C1}$  (δεξιά).

Στη συνέχεια απεικονίζονται οι διαδοχικές φάσεις από την κατάρρευση των δοκιμίων.

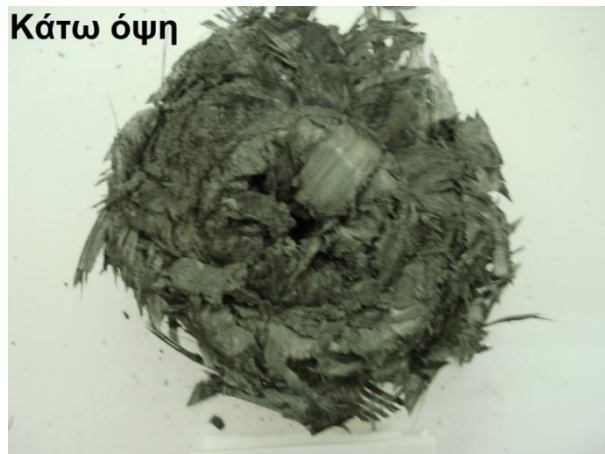




Ανω όψη

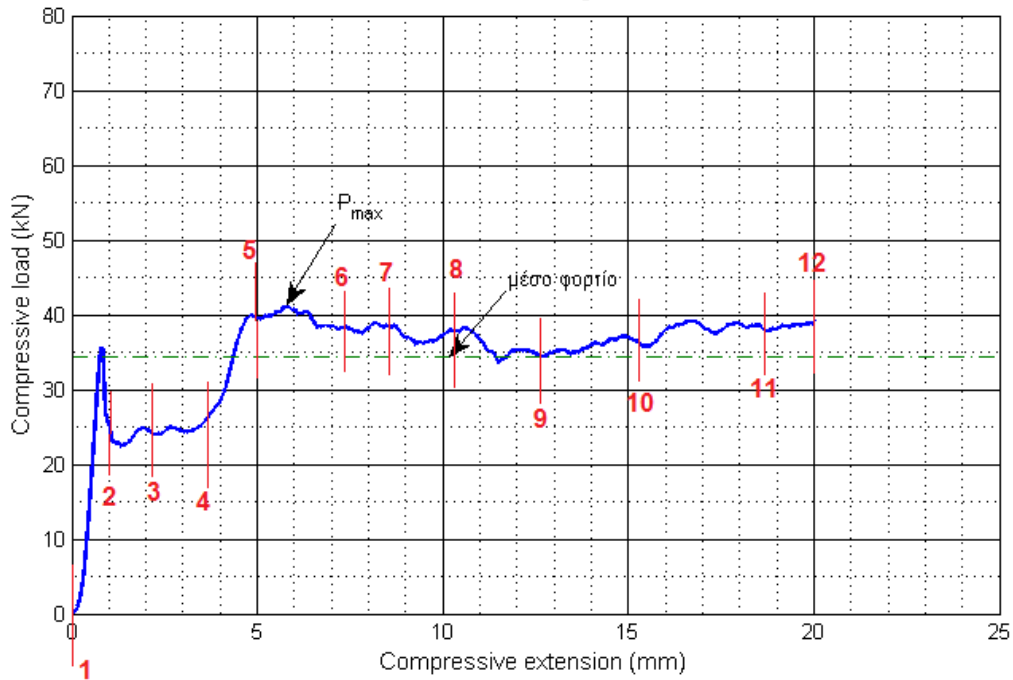


Κάτω όψη



Παρακάτω εικονίζεται το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης που λάβαμε με τη βοήθεια του ειδικού εξοπλισμού κατά την εκτέλεση του πειράματος θλίψης, καθώς και τα ύψη κατά τα οποία ελήφθησαν οι αντίστοιχες φωτογραφίες. Ακόμη στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται οι ποσότητες που απαιτούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης του συγκεκριμένου δοκιμίου.

Δοκίμιο C<sub>c</sub> 1



αρ. φωτογρ.	1	2	3	4	5	6
Displacement (mm)	0	1.052	2.13	3.617	4.962	7.381
	7	8	9	10	11	12
	8.552	10.39	12.64	15.39	18.79	20.052

Αρχικό φορτίο $P(KN)$	35.6103
Μέγιστο φορτίο $P_{max}(KN)$	41.1538
Μέσο μεταελαστικό φορτίο $P(KN)$	34.3780
Μήκος σύνθλιψης (mm)	20.0521
Ολική απορροφούμενη ενέργεια (Joule)	689.3550

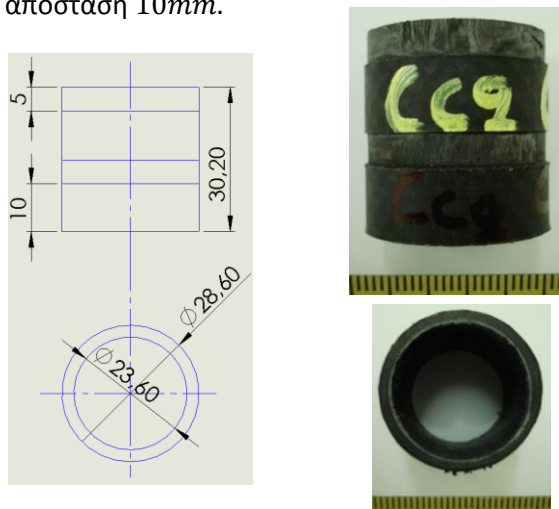
### Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

- Παρατηρούμε ότι κατά τη πρώτη φάση συμπίεσης παρουσιάζεται μια αύξηση τα φορτίου, έως ότου λάβει τιμή  $35.6103kN$  στα  $0.81mm$ . Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς το υλικό είναι ακόμη ακέραιο και ανθίσταται στη δύναμη της πρέσας με πολύ μικρή παραμόρφωση.
- Η μείωση της διατομής στο πάνω άκρο έχει ως αποτέλεσμα να ξεκινήσει η κατάρρευση από το πάνω μέτωπο και το αρχικό φορτίο να μην πάρει υψηλή τιμή στην ελαστική περιοχή.
- Στη συνέχεια, κατά τη κατάρρευση της διαμόρφωσης του δοκιμίου, το φορτίο ταλαντεύεται γύρω από σταθερή τιμή  $25kN$ .
- Μόλις εξαντληθεί το αδύνατο κομμάτι ( $\sim 5mm$ ) παρατηρείται μία αύξηση του φορτίου στα  $41.1538 kN$ , δημιουργώντας μια κοιλάδα μεταξύ των δύο κορυφών του, και στη συνέχεια ταλαντεύεται γύρω από τη σταθερή τιμή των  $35 kN$ . Η αύξηση του φορτίου είναι λογική καθώς η πρέσα συναντάει υλικό μεγαλύτερης επιφάνειας(φωτ 5).

- Παρατηρούμε ότι η κατάρρευση στο πάνω μέτωπο σταματάει ενώ ξεκινάει στο κάτω μέτωπο. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι η διαμόρφωση triggering δεν έγινε με προοδευτική μείωση του υλικού και δημιουργήθηκαν ίσες τάσεις στην πάνω και κάτω επιφάνεια του δοκιμίου (φωτογρ. 6-12).
- Χαρακτηριστικό είναι ότι το φορτίο λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του όχι κατά την αρχική φόρτιση και πριν διαρρέυσει το υλικό, αλλά όταν η πρέσα εξαντλεί την διαμόρφωση του δοκιμίου και συναντά την μεγαλύτερη διατομή.
- Η κατάρρευση θεωρείται ελεγχόμενη και προοδευτική.
- Η απώλεια του υλικού από τα θραύσματα που φεύγουν θεωρείται αμελητέα.
- Όπως φαίνεται από την άνω και κάτω όψη της τελικής κατάστασης του δοκιμίου, οι διαστρωματώσεις του υλικού αποκολλήθηκαν (delamination) με αποτέλεσμα κάποιες να καμφθούν προς τα μέσα και κάποιες προς τα έξω.

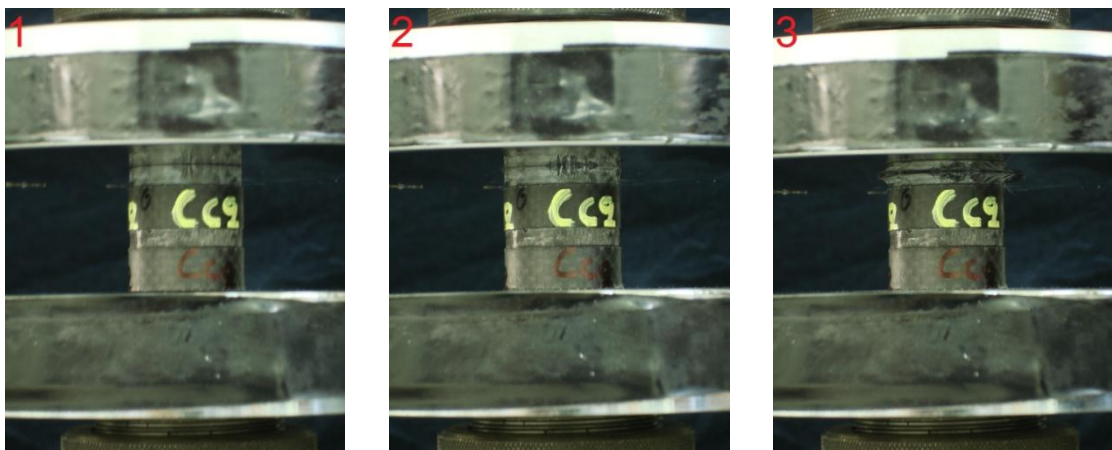
#### 4.2.4.16 Δοκίμιο $C_{C2}$

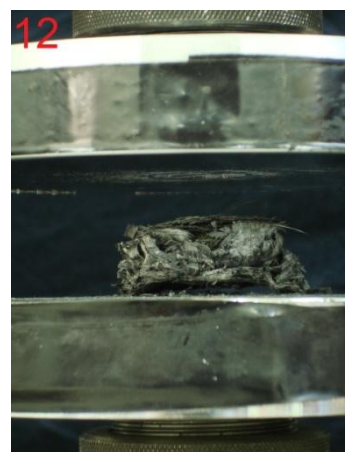
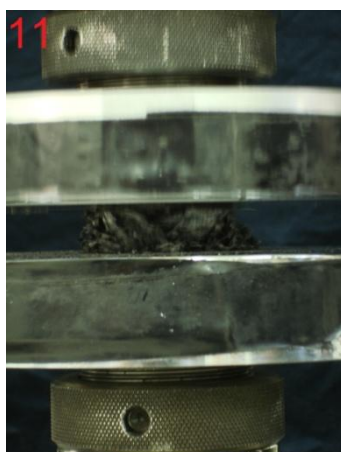
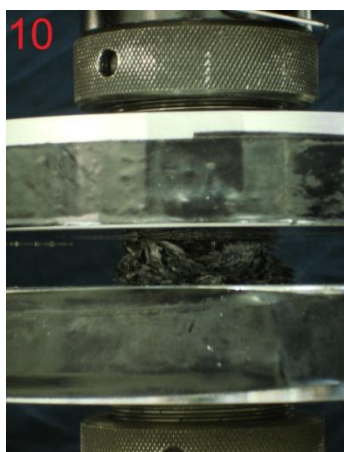
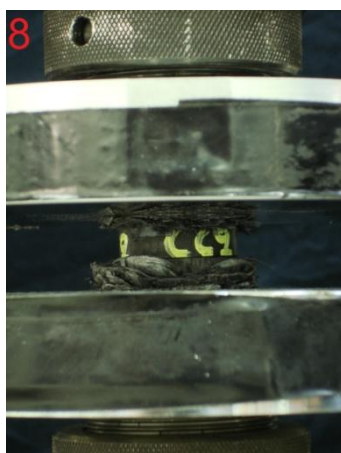
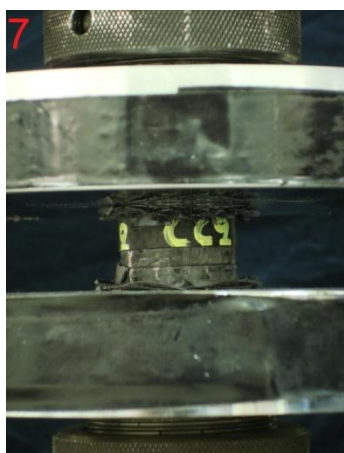
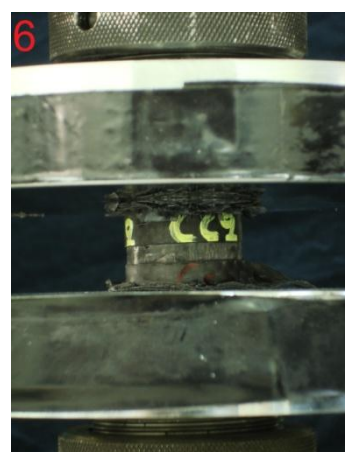
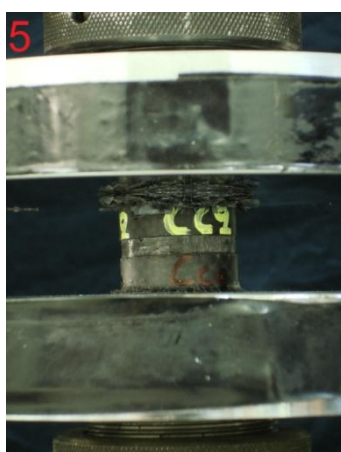
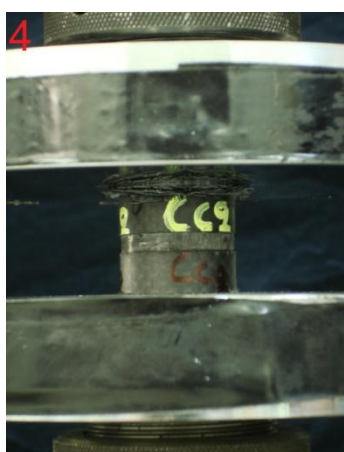
Παρακάτω παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου  $C_{C2}$ . Το εν λόγω δοκίμιο είναι κυκλικής διατομής και φέρει δύο εγκάρσια αυλάκια  $5mm$ , βάθους  $0.5mm$  σε απόσταση  $10mm$ .

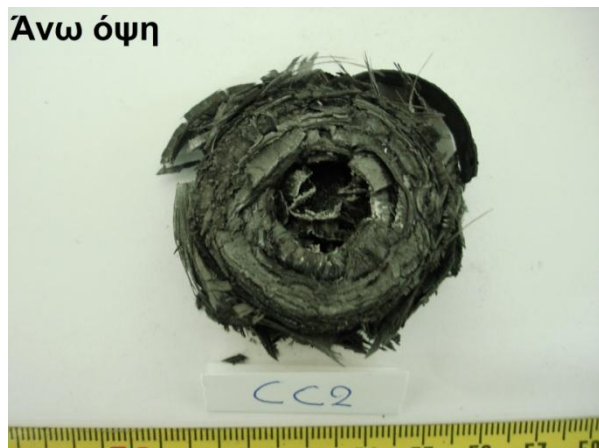


Σχήμα 41: Σκαρίφημα δοκιμίου  $C_{C2}$  (αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου  $C_{C2}$  (δεξιά).

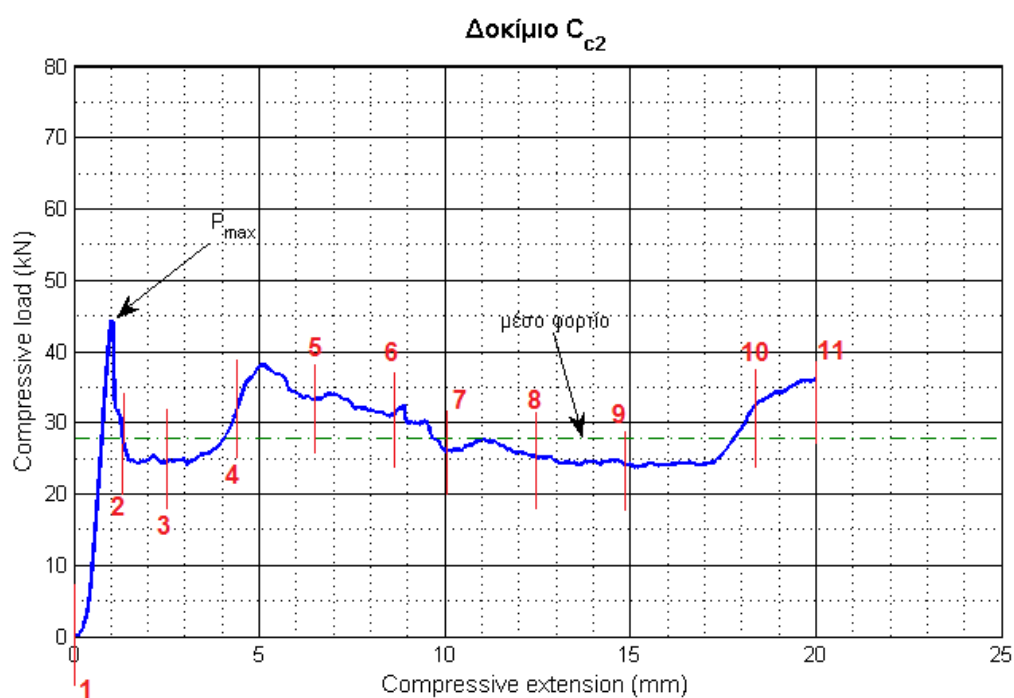
Στη συνέχεια απεικονίζονται οι διαδοχικές φάσεις από την κατάρρευση των δοκιμίων.







Παρακάτω εικονίζεται το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης που λάβαμε με τη βοήθεια του ειδικού εξοπλισμού κατά την εκτέλεση του πειράματος θλίψης, καθώς και τα ύψη κατά τα οποία ελήφθησαν οι αντίστοιχες φωτογραφίες. Ακόμη στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται οι ποσότητες που απαιτούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης του συγκεκριμένου δοκιμίου.



<b>αρ. φωτογρ.</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Displacement (mm)</b>	0	1.267	2.597	4.43	6.556	8.764
	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
	10.01	12.51	14.93	18.26	20.014	-

<b>Αρχικό φορτίο <math>P = P_{max}</math> (KN)</b>	44.3618
<b>Μέσο μεταελαστικό φορτίο <math>P</math> (KN)</b>	27.9228
<b>Μήκος σύνθλιψης (mm)</b>	20.014
<b>Ολική απορροφούμενη ενέργεια (Joule)</b>	558.858

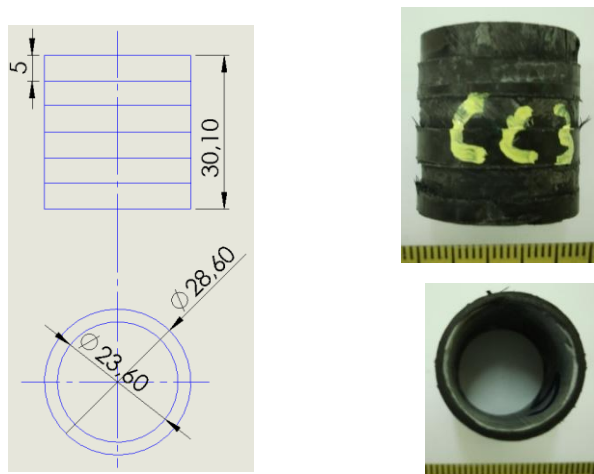


### Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

- Κατά τη πρώτη φάση της συμπίεσης και πριν ξεκινήσει η πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου, παρατηρείται ταχεία αύξηση του φορτίου, λαμβάνοντας μέγιστη τιμή  $44.3618 \text{ kN}$ .
- Λόγω της διαμόρφωσης στο άνω άκρο του δοκιμίου η κατάρρευση ξεκινάει από το άνω μέτωπο. Το φορτίο στη συνέχεια ταλαντεύεται γύρω από σταθερή τιμή των  $\sim 25 \text{ kN}$  μέχρι η πρέσα να διασχίσει το άνω αυλάκι (για  $\sim 5 \text{ mm}$ ).
- Στη συνέχεια, αφού εξαντληθεί το αδύνατο κομμάτι, η πρέσα συναντά την περιοχή πλήρης διατομής (χαρακτηριστικά φαίνεται στο διάγραμμα ( $\sim 5 \text{ mm}$ ) η αύξηση του φορτίου), προκαλώντας ίσες τάσεις άνω και κάτω απ το δοκίμιο με αποτέλεσμα η κατάρρευση να συνεχίζει στο κάτω μέτωπο (τυχαία εξέλιξη) (φωτογρ. 5).
- Αξιοσημείωτο είναι ότι καθώς ξεκινάει η κατάρρευση από κάτω, το υλικό πάει να δημιουργήσει μέτωπο, αλλά επειδή από πάνω του υπάρχει διαμόρφωση (ενδιάμεσο αυλάκι), δε βρίσκει αντίσταση με αποτέλεσμα την αποκόλληση και εκσφενδόνιση της εξωτερικής φλούδας. Συγκεκριμένα λόγω του κοψίματος του υλικού, αποκολλήθηκε μόνο το μισό στεφάνι. (φωτογρ. 7-8)
- Η κατάρρευση συνεχίζεται και στο ενδιάμεσο αυλάκι με διεύθυνση από κάτω προς τα πάνω και στη συνέχεια, περίπου στα  $17,5 \text{ mm}$  παραμόρφωσης, το φορτίο ανεβαίνει ξανά, καθώς η πρέσα βρίσκει την πλήρη διατομή.
- Το συγκεκριμένο δοκίμιο δεν είχε ιδιαίτερη απόδοση καθώς η κατάρρευση μεταφέρθηκε στις (περισσότερες) λεπτές ζώνες με αποτέλεσμα το φορτίο και ως επακόλουθο η απορρόφηση ενέργειας να λάβει μικρότερες τιμές.
- Από την άνω και κάτω όψη της τελικής κατάστασης του δοκιμίου γίνεται εμφανής η αποκόλληση των διαστρωματώσεων του υλικού, καθώς και αυτή της εξωτερικής φλούδας.

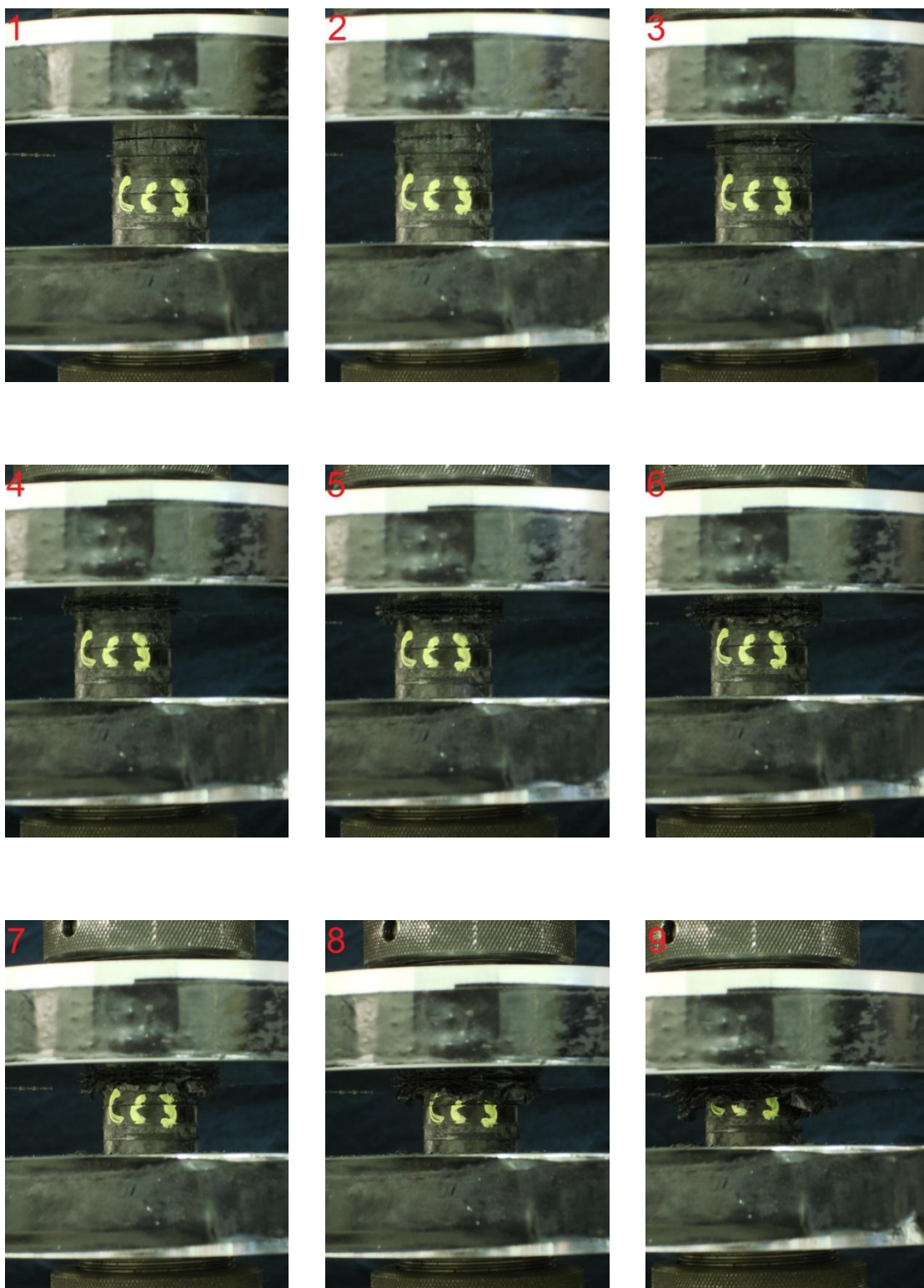
#### 4.2.4.17 Δοκίμιο $C_{C3}$

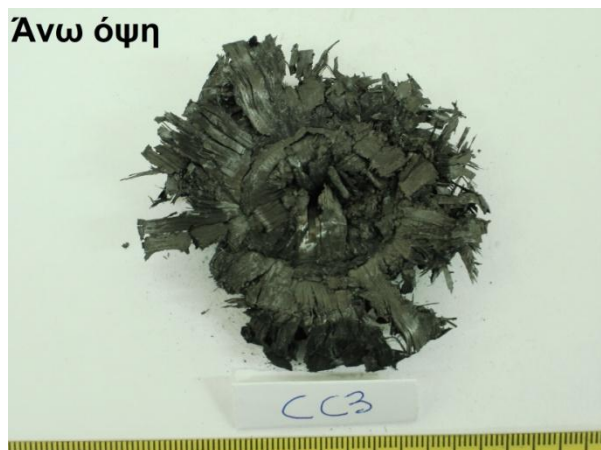
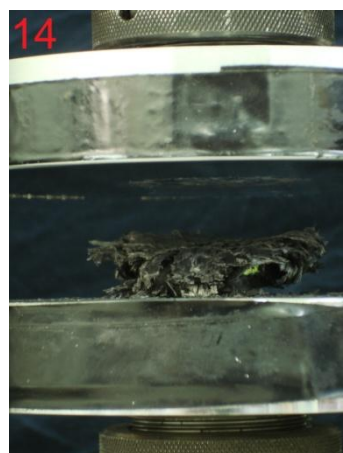
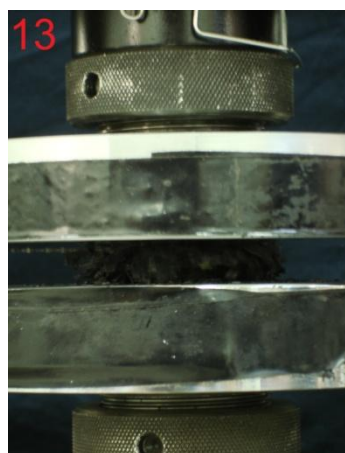
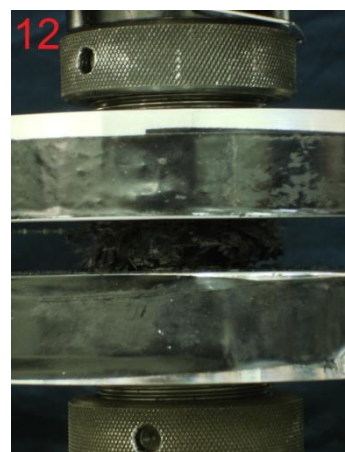
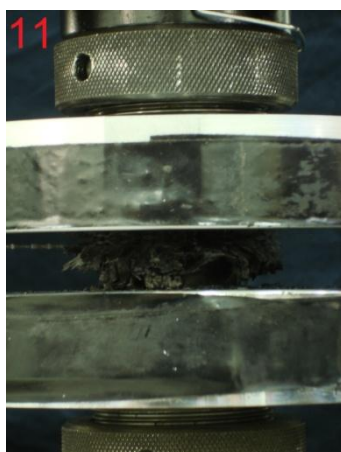
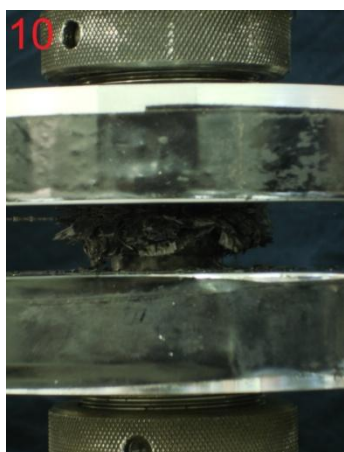
Παρακάτω παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου  $C_{B3}$ . Το εν λόγω δοκίμιο είναι κυκλικής διατομής και φέρει τρία εγκάρσια αυλάκια  $5 \text{ mm}$ , βάθους  $0.5 \text{ mm}$  ανά  $5 \text{ mm}$ .

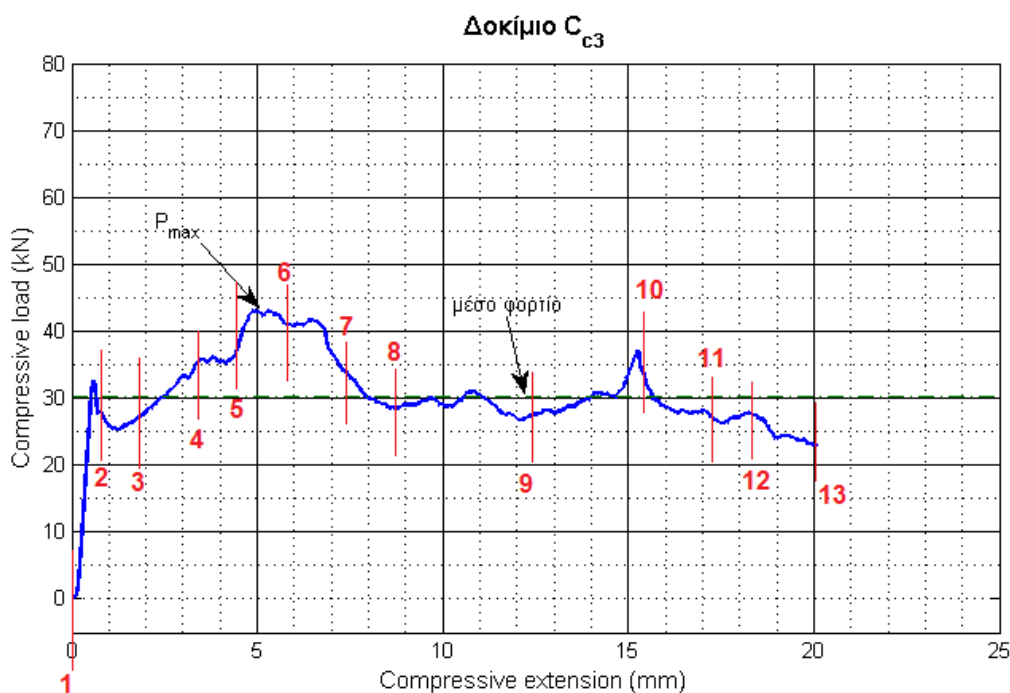


Σχήμα 42: Σκαρίφημα δοκιμίου  $C_{C3}$  (αριστερά), φωτογρ. αρχικής κατάστασης δοκιμίου  $C_{C3}$  (δεξιά).

Στη συνέχεια απεικονίζονται οι διαδοχικές φάσεις από την κατάρρευση των δοκιμίων.







αρ. φωτογ.	1	2	3	4	5	6	7
Displacement (mm)	0	0.8378	1.914	3.497	4.581	5.91	7.414
	8	9	10	11	12	13	14
	8.748	12.41	15.50	17.25	18.33	20.08	-

<b>Αρχικό φορτίο <math>P(KN)</math></b>	32.603
<b>Μέγιστο φορτίο <math>P_{max}(KN)</math></b>	43.0061
<b>Μέσο μεταελαστικό φορτίο <math>P(KN)</math></b>	30.3309
<b>Μήκος σύνθλιψης (mm)</b>	20.0809
<b>Ολική απορροφούμενη ενέργεια (Joule)</b>	609.0719

### Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

- Κατά την πρώτη φάση της συμπίεσης παρουσιάζεται αύξηση του φορτίου, έως ότου λάβει τιμή 32.6036kN στα 0.58mm, δημιουργήσει τοπικό μέγιστο και ξεκινήσει η κατάρρευση του υλικού.
- Η κατάρρευση ξεκινάει από το πάνω μέτωπο του δοκιμίου, κάτι απόλυτα λογικό καθώς η διατομή εκεί είναι μικρότερη λόγω κατάλληλης διαμόρφωσης.
- Στη συνέχεια παρατηρούμε (σημεία 3-5 στο διάγραμμα) μία αύξηση του φορτίου, η οποία δικαιολογείται καθώς η πρέσα έρχεται σε επαφή με τις διαστρωματώσεις που έχουν ήδη αποκολληθεί, οι οποίες με τη σειρά τους έρχονται σε επαφή με τη πλήρη διατομή του υλικού που βρίσκεται από κάτω τους.
- Αφού καμφθεί και η αντίσταση της πλήρους διατομής του υλικού, το φορτίο αρχίζει να πέφτει ομαλά και στη συνέχεια να ταλαντεύεται γύρω από μία σταθερή τιμή (~30 kN) μέχρι τα ~15mm παραμόρφωσης.

- Εν συνεχεία, η πρέσα αφού έχει εξαντλήσει και το δεύτερο από πάνω αυλάκι, συναντάει διατομή πλήρους υλικού, προκαλώντας μια αύξηση στο φορτίο. Τέλος το φορτίο μειώνεται ομαλά μέχρι την ολοκλήρωση του πειράματος.
- Διακρίνουμε 3 εμφανής κορυφές του φορτίου απ' τις οποίες η μία οφείλεται στην έναρξη της κατάρρευσης του δοκιμίου και οι άλλες δύο στην διαμόρφωση της επιφανείας του.
- Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν υπήρξε κατάρρευση από το κάτω μέτωπο, κάτι που γίνεται αντιληπτό αν δούμε την κάτω όψη της τελικής κατάστασης του δοκιμίου.
- Η κατάρρευση σε αυτήν την περίπτωση δε θεωρείται ομαλή, καθώς λόγω των πολλών δακτυλιδιών είχαμε αρκετές αυξομειώσεις του φορτίου.
- Και σε αυτήν την περίπτωση το θλιπτικό φορτίο προκάλεσε την διαστρωματική αποκόλληση του υλικού.
- Στην φωτογραφία 14 παρουσιάζεται η τελική εικόνα του δοκιμίου μετά την κατάρρευση. Παρατηρούμε ότι το δοκίμιο έχει παραμορφωθεί εν μέρει ελαστικά, γι' αυτό και επανέρχεται εν μέρει μετά το τέλος του πειράματος.





## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 5.1 Παρατηρούμενοι Μηχανισμοί κατάρρευσης

Κατά την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας τα δείγματα φάνηκαν να καταρρέουν με τους εξής μηχανισμούς:

- I. **Μηχανισμός κατάρρευσης I:** Χαρακτηρίζεται κυρίως από τη σταθερή και σταδιακή κατάρρευση του δοκιμίου στην ζώνη παραμόρφωσής του. Η εν λόγω μορφή κατάρρευσης, που λόγω ομοιότητας αναφέρεται σαν μορφή αστοχίας «μανιτάρι» («mashrooming failure»), χαρακτηρίζεται κυρίως από την σταδιακή κατάρρευση του κελύφους, από το άνω ή κάτω μέτωπο, μέσω του σχηματισμού συνεχών μετώπων τα οποία εκτείνονται εσωτερικά και εξωτερικά και με την ταυτόχρονη ανάπτυξη ενός αριθμού αξονικών διαρηγματώσεων (axial splits) στο εξωτερικό μέτωπο. Το φορτίο ανέρχεται βαθμιαία σε μια σταθερή κατάσταση (με περίπου σταθερή κλίση) η οποία εξαρτάται από το όριο θραύσης του υλικού και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κελύφους και ακολουθείται από την πριονωτή διακύμανση του φορτίου περί μια μέση τιμή στη περιοχή κατάρρευσης. Αυτή η μορφή κατάρρευσης παρατηρήθηκε τόσο σε λεπτότοιχους σωλήνες όλων των γεωμετριών που δεν φέρουν διαμόρφωση (αυλάκια) στην εξωτερική τους επιφάνεια (δοκίμια  $R_A, R_B, C_A, C_B, C_C$ ), όσο και σε κελύφη με διαμήκη αυλακώσεις (δοκίμια  $R_{A2}, R_{B1}, R_{B2}$ ).
- II. **Μηχανισμός κατάρρευσης II:** Χαρακτηρίζεται από την καταστροφική αστοχία του υλικού με την εμφάνιση περιφερειακής θραύσης. Μία περιφερειακή ρωγμή, ο σχηματισμός της οποίας συνοδεύεται από χαρακτηριστικό θόρυβο, οδηγεί σε αποχωρισμό του δοκιμίου σε δύο μέρη, που κινούνται σχετικά το ένα ως προς το άλλο (π.χ. δοκίμιο  $R_{A1}$ , φωτογρ. 2-5). Οι πλευρές του ενός (συνήθως του άνω μέρους) τείνουν να υπερκαλύψουν τις πλευρές του άλλου, ώστε το ένα κομμάτι κελύφους να εισέλθει ουσιαστικά εντός του άλλου. Η ικανότητα μεταφοράς φορτίου μειώνεται σε ένα πολύ χαμηλό επίπεδο (μείωση έως και 90% περίπου), ενώ κατά τη διάρκεια του φαινομένου χαρακτηριστικό είναι ότι το φορτίο παραμένει σε χαμηλά επίπεδα καθώς αργεί να βρει υψηλό φορτίο αντίστασης και αυξάνεται μόνο όταν η επιφάνεια θραύσης έρθει σε επαφή με την τράπεζα στερέωσης (αντίθετη πλάκα πρέσας). Η εν λόγω μορφή κατάρρευσης παρατηρήθηκε στα δοκίμια  $R_{A1}, C_{A1}$ .
- III. **Μηχανισμός κατάρρευσης III:** Παρατηρείται σε δοκίμια κυκλικής διατομής που φέρουν εγκάρσιες διαμορφώσεις στην εξωτερική τους επιφάνεια. Το φορτίο ανέρχεται ραγδαία και ξεκινάει η κατάρρευση από την αδύνατη περιοχή. Ακολούθως η παραμόρφωση μεταφέρεται εναλλάξ στις διατομές πλήρους πάχους και στα αυλάκια. Στο διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης παρουσιάζονται ραγδαίες αυξήσεις και βυθίσεις του φορτίου. Χαρακτηριστικό είναι ότι η κατάρρευση ξεκινάει και μεταφέρεται μόνο από το ένα μέτωπο καθώς το άλλο μένει αναλλοίωτο. Ο εν λόγω μηχανισμός κατάρρευσης εμφανίζεται στα δοκίμια  $C_{A2}, C_{B3}, C_{C3}$ .
- IV. **Μηχανισμός κατάρρευσης IV:** Ο τέταρτος τρόπος κατάρρευσης που παρατηρήθηκε αφορά και αυτός τα δοκίμια κυλινδρικής διατομής που φέρουν εγκάρσια αυλάκια στην εξωτερική τους επιφάνεια. Συγκεκριμένα, το φορτίο ανέρχεται βαθμιαία μέχρι



μια μέγιστη τιμή και εν συνεχεία ξεκινάει η κατάρρευση από το διαμορφωμένο μέτωπο (άνω ή κάτω) του δοκιμίου. Αφού εξαντληθεί η αδύνατη περιοχή και η κεφαλή της πρέσας έρθει σε επαφή με υλικό πλήρους διατομή, η κατάρρευση μεταφέρεται στο άλλο μέτωπο (αντίστοιχα άνω ή κάτω) με αποτέλεσμα το δοκίμιο να παραμορφώνεται και από τις δύο πλευρές του. Χαρακτηριστικό αυτής της περίπτωσης είναι η μορφή του διαγράμματος φορτίου – μετατόπισης που παρουσιάζει σημαντικές αυξομειώσεις καθώς όσο η κατάρρευση διανύει αυλάκι το φορτίο παραμένει χαμηλά ενώ όταν συναντάει μεγαλύτερη διατομή, αρχικά αυξάνει ραγδαία και στη συνέχεια βυθίζεται πάλι. Αυτός ο μηχανισμός κατάρρευσης παρατηρήθηκε στα δοκίμια  $C_{B1}$ ,  $C_{B2}$ ,  $C_{C1}$ ,  $C_{C2}$ .

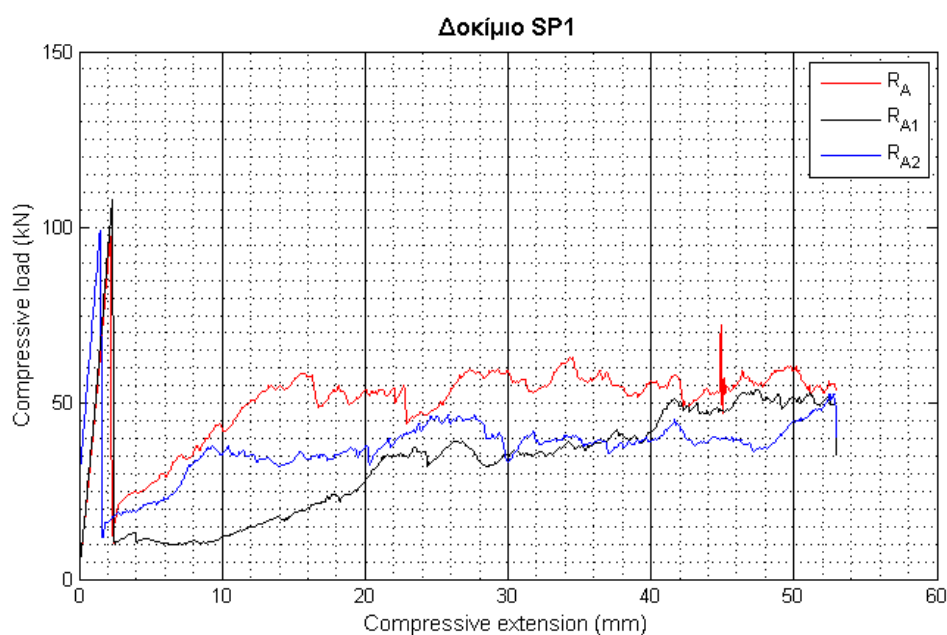
## 5.2 Συγκριτική παράθεση των πειραματικών καμπυλών

Γενικά, διαπιστώθηκε ότι η ύπαρξη αυλακώσεων στην εξωτερική επιφάνεια των δοκιμίων είτε είχε μικρή επίδραση είτε προκαλούσε μεγάλες μεταβολές στην ενέργεια απορρόφησης λόγω του ασταθούς μηχανισμού κατάρρευσης. Στη συνέχεια επιχειρείται η σύγκριση των διαγραμμάτων φορτίου-μετατόπισης για να διαπιστωθεί η επίδραση της πυκνότητας των αυλακώσεων, της γεωμετρίας της διατομής και του υλικού στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των εξεταζόμενων δοκιμίων.

### 5.2.1 Επίδραση της πυκνότητας των αυλακώσεων στην απορροφούμενη ενέργεια.

#### 5.2.1.1 Κέλυφος $SP1$ ( $R_A, R_{A1}, R_{A2}$ )

Στο Σχήμα 44 παρατίθενται οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για τα δοκίμια τετραγωνικής διατομής  $R_A, R_{A1}, R_{A2}$ .

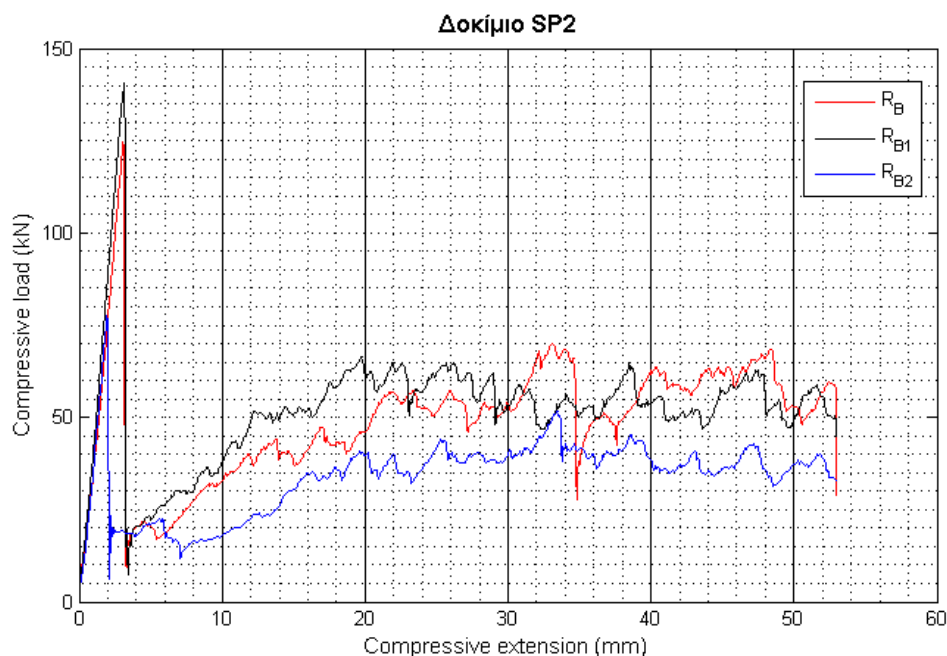


Σχήμα 43: Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών φορτίου μετατόπισης των δοκιμίων  $R_A, R_{A1}, R_{A2}$

	$R_A$	$R_{A1}$	$R_{A2}$
Ολική απορροφούμενη ενέργεια (Joule)	2689.3712	1778.1550	2013.9612

### 5.2.1.2 Κέλυφος $SP2$ ( $R_B, R_{B1}, R_{B2}$ )

Στο Σχήμα 45 παρατίθενται οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για τα δοκίμια ορθογωνικής διατομής  $R_B, R_{B1}, R_{B2}$ .



Σχήμα 44: Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών φορτίου μετατόπισης των δοκιμών  $R_B, R_{B1}, R_{B2}$

	$R_B$	$R_{B1}$	$R_{B2}$
<b>Ολική απορροφούμενη ενέργεια (Joule)</b>	2626.1357	2781.8702	1794.2697

#### Παρατηρήσεις

Τα δοκίμια τετραγωνικής και ορθογωνικής διατομής φέρουν αυλακώσεις κατά μήκος της εξωτερικής τους επιφάνειας. Όσο αυξάνεται η πυκνότητα των αυλακώσεων, αναμένουμε τη μείωση της απορροφούμενης ενέργειας του δοκιμίου, καθώς λόγω της αφαίρεσης υλικού, μειώνεται η διατομή και το δοκίμιο φέρει μικρότερη αντίσταση. Παρ' όλα αυτά, τα πειραματικά αποτελέσματα μας δείχνουν κάτι διαφορετικό. Στο κέλυφος  $SP1$ , η μικρότερη απορροφούμενη εμφανίζεται στο δοκίμιο  $R_{A1}$  και όχι στο  $R_{A2}$  με τις πιο πυκνές αυλακώσεις, όπως περιμέναμε. Ομοίως στο κέλυφος  $SP2$  το δοκίμιο  $R_{B1}$  εμφανίζει μεγαλύτερη ολική απορροφούμενη ενέργεια απ' ότι το  $R_B$ .

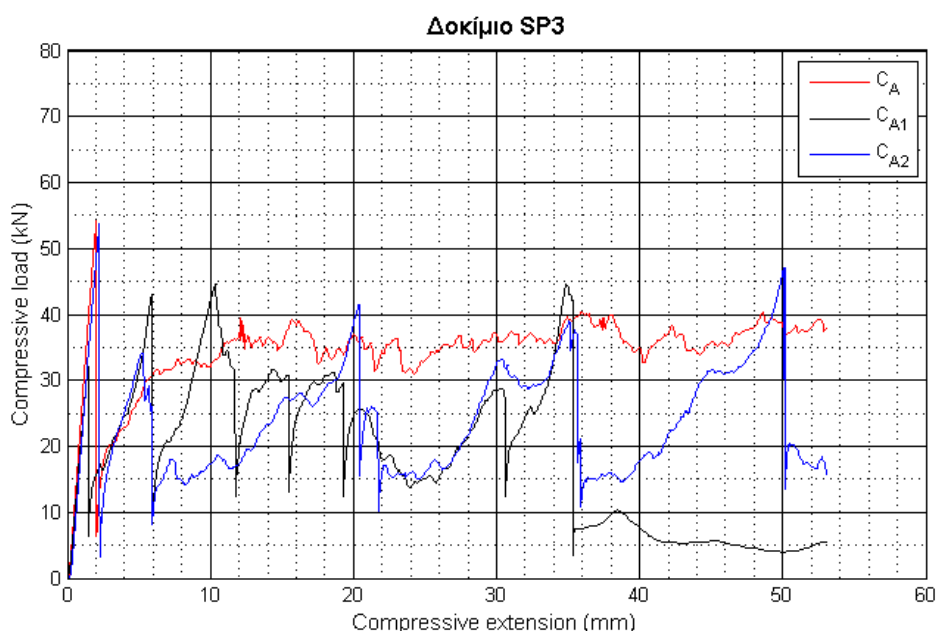
Αυτό που τελικώς συμπεραίνουμε είναι ότι η χάραξη των αυλακώσεων δεν επιδρά στην κατάρρευση καθώς το βάθος τους ( $\sim 0.5mm$ ) δεν είναι ικανό να επιφέρει σημαντικές διαφοροποιήσεις. Ακόμη, σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του μηχανισμού κατάρρευσης παίζει η ποιότητα κατασκευής των δοκιμών. Για παράδειγμα, λόγω κακής κατασκευής, το  $R_{A1}$  παρουσιάζει περιφερειακή θραύση κατά την έναρξη της κατάρρευσης με αποτέλεσμα να

μειώνεται σημαντικά η ολική απορροφούμενη ενέργειά του. Από τα σκαριφήματα των δοκιμών  $R_B, R_{B1}$  παρατηρούμε ότι το πρώτο έχει διατομή μικρότερου πάχους, λόγω ανομοιομορφίας του κελύφους, κάτι που δικαιολογεί τόσο την μικρότερη συγκριτικά απορροφούμενη ενέργειά του, όσο και το μικρότερο αρχικό φορτίο (initial load).

Συμπεραίνουμε επίσης πως για τα κελύφη που δεν επιφέρουν διαμορφώσεις, η τιμή του φορτίου που προσεγγίζεται στο τέλος της ελαστικής περιοχής είναι συνήθως η μέγιστη τιμή φορτίου που μπορεί να επιδεχθεί το κέλυφος.

### 5.2.1.3 Κέλυφος SP3 ( $C_A, C_{A1}, C_{A2}$ )

Στο Σχήμα 46 παρατίθενται οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για τα δοκίμια κυκλικής διατομής  $C_A, C_{A1}, C_{A2}$ .

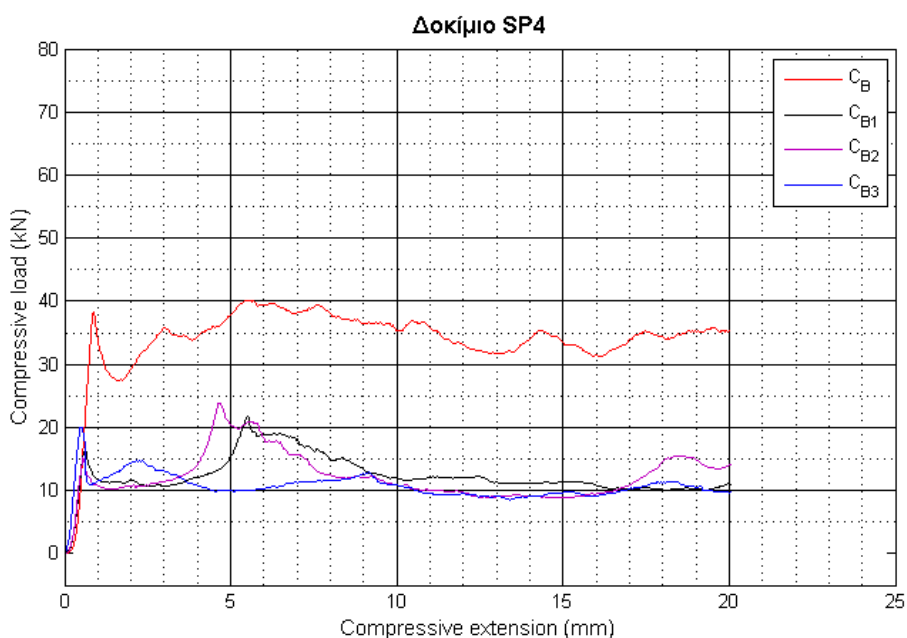


Σχήμα 45: Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών φορτίου μετατόπισης των δοκιμών  $C_A, C_{A1}, C_{A2}$

	$C_A$	$C_{A1}$	$C_{A2}$
<b>Ολική απορροφούμενη ενέργεια (Joule)</b>	1831.1773	984.0012	1260.5415

### 5.2.1.4 Κέλυφος SP4 ( $C_B, C_{B1}, C_{B2}, C_{B3}$ )

Στο Σχήμα 47 παρατίθενται οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για τα δοκίμια κυκλικής διατομής  $C_B, C_{B1}, C_{B2}, C_{B3}$ .

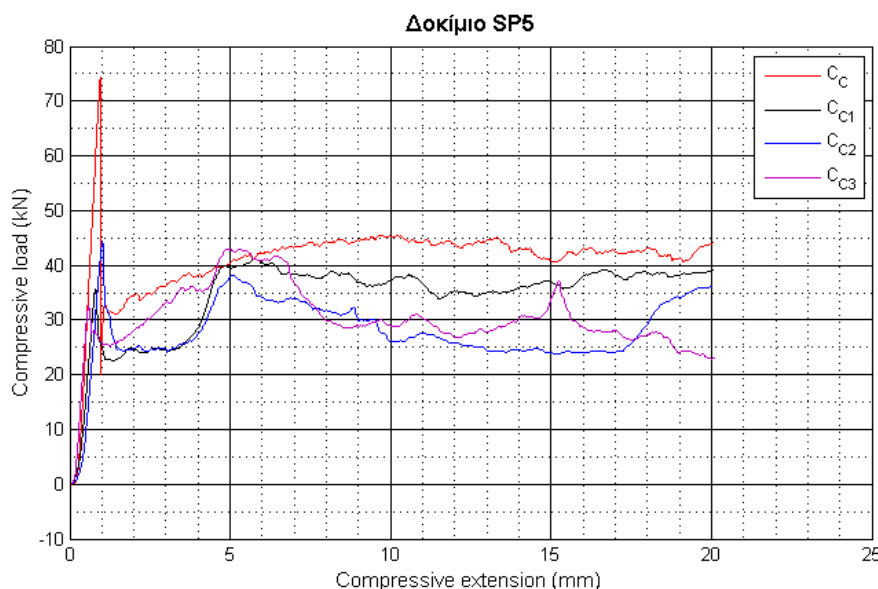


Σχήμα 46: Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών φορτίου μετατόπισης των δοκιμών  $C_B, C_{B1}, C_{B2}, C_{B3}$ .

	$C_B$	$C_{B1}$	$C_{B2}$	$C_{B3}$
<b>Ολική απορροφούμενη ενέργεια (Joule)</b>	678.6620	248.3424	246.0749	214.6452

### 5.2.1.5 Κέλυφος SP5 ( $C_C, C_{C1}, C_{C2}, C_{C3}$ )

Στο Σχήμα 48 παρατίθενται οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για τα δοκίμια κυκλικής διατομής  $C_C, C_{C1}, C_{C2}, C_{C3}$ .



Σχήμα 47: Διάγραμμα καμπυλών φορτίου μετατόπισης των δοκιμών  $C_C, C_{C1}, C_{C2}, C_{C3}$

	$C_C$	$C_{C1}$	$C_{C2}$	$C_{C3}$
<b>Ολική απορροφούμενη ενέργεια (Joule)</b>	820.2477	689.3550	558.858	609.0719

#### Παρατηρήσεις

Τα δοκίμια κυλινδρικής διατομής φέρουν εγκάρσιες περιφερειακές αυλακώσεις. Από τα πειραματικά αποτελέσματα συμπεραίνουμε πως καθώς αυξάνεται η πυκνότητα των αυλάκων, η απορροφούμενη ενέργεια μειώνεται. Αυτό οφείλεται σε δύο βασικούς παράγοντες. Πρώτον, με την αφαίρεση υλικού, η διατομή αδυνατίζει και φέρει μικρότερη αντίσταση, με αποτέλεσμα το φορτίο να κυμαίνεται σε χαμηλότερα επίπεδα και κατ' επέκταση η απορροφούμενη ενέργεια και δεύτερον, το ότι η κατάρρευση μεταφέρεται στις αδυνατισμένες περιοχές, κρατώντας έτσι το φορτίο σε μικρότερες τιμές.

Το παραπάνω συμπέρασμα, επιβεβαιώνεται καθώς τα δοκίμια που δε φέρουν αυλακώσεις ( $C_A, C_B, C_C$ ) είναι αυτά που παρουσιάζουν την υψηλότερη ολική απορροφούμενη ενέργεια.

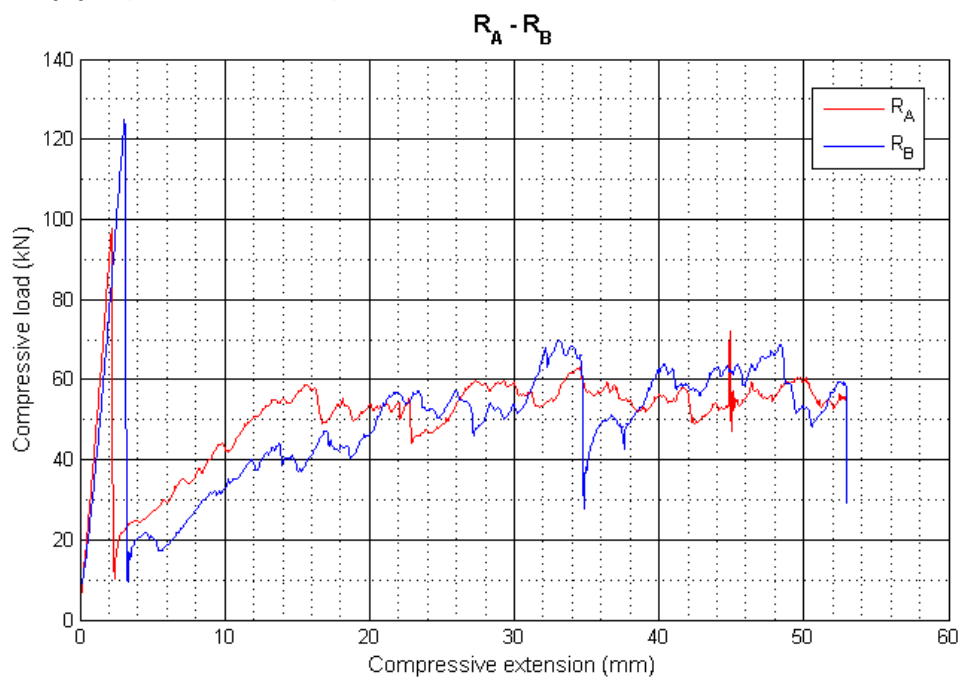
Ένα ακόμη χαρακτηριστικό των διαγραμμάτων φορτίου-μετατόπισης είναι πως παρουσιάζουν τόσες βυθίσεις φορτίου, όσες είναι οι αυλακώσεις με τις κοιλάδες μεταξύ των δύο κορυφών να προσεγγίζουν το μήκος του αύλακα ( $\sim 0.5mm$ ).

Ακόμη παρατηρείται πως η χρησιμοποίηση μηχανισμού σκανδάλης στο πάνω άκρο του σωλήνα(triggering method) (δοκίμια  $C_{A1}$ ,  $C_{B1}$ ,  $C_{C1}$ ), είναι δυνατόν να μειώσει αισθητά την τιμή του  $P_{max}$  (μείωση τάξης 40%). Παράλληλα όμως παρατηρούμε ότι επηρεάζει αισθητά την απορροφούμενη ενέργεια του δοκιμίου, καθώς εμφανίζεται μικρότερη κατά ~50%. Αυτό πιθανώς να συμβαίνει λόγω του ότι η διαμόρφωση triggering δεν έγινε υπό γωνία ώστε να ξεκινήσει ομαλά η κατάρρευση, αλλά είχε τη μορφή αύλακα.

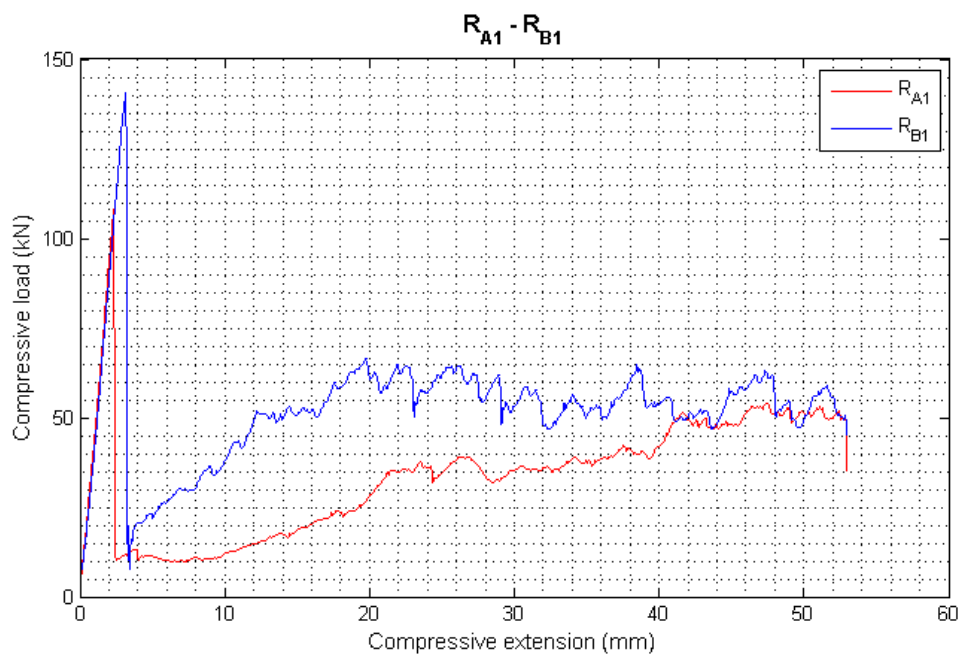
Τέλος, παρατηρείται όπως και στα προηγούμενα εξεταζόμενα κελύφη πως τα δοκίμια που δε φέρουν εξωτερικές διαμορφώσεις, παρουσιάζουν μέγιστη τιμή φορτίου στο τέλος της ελαστικής περιοχής.

## 5.2.2 Επίδραση της γεωμετρίας του δοκιμίου στην απορροφούμενη ενέργεια.

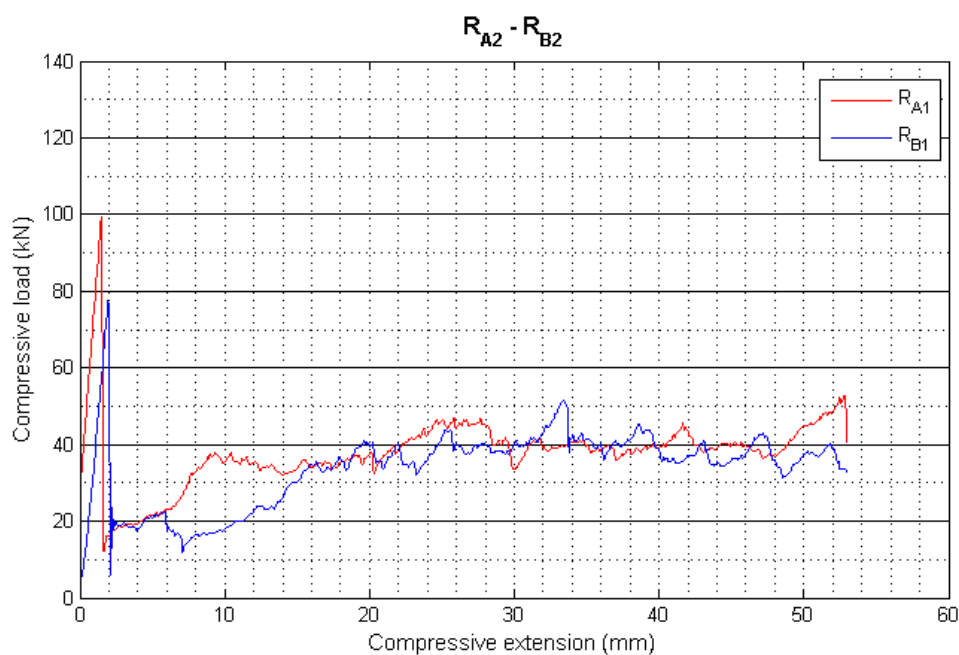
### 5.2.2.1 Σύγκριση $SP1$ , $SP2$ κελυφών.



Σχήμα 48: Διάγραμμα καμπυλών φορτίου-μετατόπισης δοκιμίων  $R_A$ ,  $R_B$



Σχήμα 49: Διάγραμμα καμπυλών φορτίου-μετατόπισης δοκιμών  $R_{A1}, R_{B1}$



Σχήμα 50: Διάγραμμα καμπυλών φορτίου-μετατόπισης δοκιμών  $R_{A2}, R_{B2}$

	$R_A$	$R_B$	$R_{A1}$	$R_{B1}$	$R_{A2}$	$R_{B2}$
<b>Ολική απορροφούμενη ενέργεια (Joule)</b>	2689.371	2626.135	1778.155	2781.870	2013.961	1794.269



### Παρατηρήσεις

Μελετώντας τώρα την επίδραση της γεωμετρίας στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας μιας κατασκευής, παρατηρούμε ότι τα ορθογωνικά κελύφη ( $SP2$ ) υστερούν σχετικώς έναντι των αντίστοιχων τετραγωνικών κελυφών ( $SP1$ ) από το ίδιο υλικό. Μόνη εξαίρεση αποτελεί το δοκίμιο  $R_{A1}$  που όπως προαναφέρθηκε ακολουθεί μηχανισμό κατάρρευσης II και λόγω περιφερειακής θραύσης η ολική αστοχία του επέρχεται πιο γρήγορα.

Από τα σχήματα 49-51 παρατηρούμε ότι τα δοκίμια που προέρχονται απ' το κέλυφος  $SP2$ , τείνουν να παρουσιάσουν μεγαλύτερο αρχικό φορτίο (initial load). Το μέγεθος της μέγιστης τιμής του φορτίου στην ελαστική περιοχή,  $P_{max}$ , εξαρτάται από κάποια γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής. Στην προκειμένη περίπτωση από το πάχος του τοιχώματος και το μήκος της πλευράς των δοκιμών. Αξίζει να σημειωθεί ότι σημαντικό ρόλο παίζουν τυχόν μικροελαττώματα στα άκρα του σωλήνα καθώς επίσης και από το «βαθμό παραλληλότητας» μεταξύ των δύο αυτών άκρων.

#### 5.2.3 Επίδραση του υλικού στην απορροφούμενη ενέργεια.

Στον πίνακα 16 γίνεται σύγκριση της ολικής απορροφούμενης ενέργειας των κελυφών  $SP4, SP5$ , από τα οποία κατασκευάστηκαν δοκίμια ίδιου ονομαστικού ύψους και διαμέτρου.

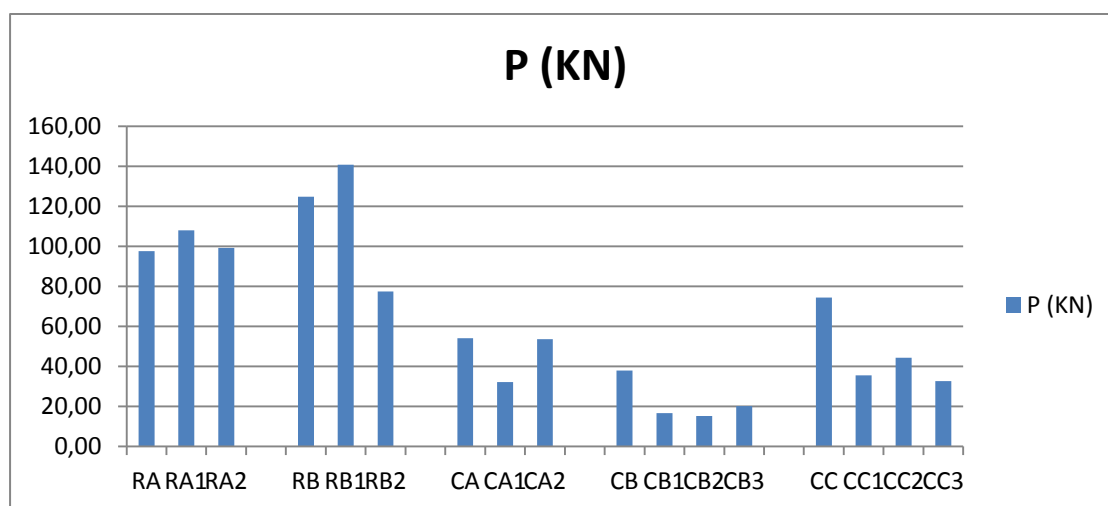
	$C_B$	$C_C$	$C_{B1}$	$C_{C1}$	$C_{B2}$	$C_{C2}$	$C_{B3}$	$C_{C3}$
<b>Ολική απορροφούμενη ενέργεια (<i>Joule</i>)</b>	678.662	820.247	248.342	689.355	246.074	558.858	214.645	609.071

Πίνακας 16: Συγκριτικός πίνακας  $SP4, SP5$  κελυφών

Συγκρίνοντας τα δύο υλικά ως προς την ικανότητά τους για απορρόφηση ενέργειας, επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα η υπεροχή του υλικού του κελύφους  $SP5$  έναντι του  $SP4$ .

### 5.3 Αρχικό φορτίο $P$ (initial load)

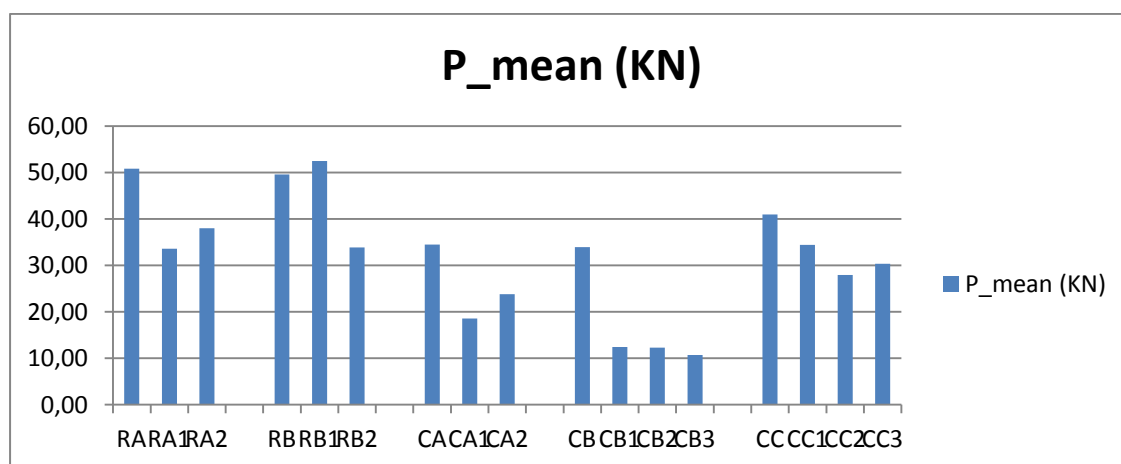
Κατά τη σύγκρουση ενός οχήματος ένα μέρος της ενέργειας διαχέεται από την κατασκευή λόγω πλαστικής παραμόρφωσης, ενώ το υπόλοιπο παραλαμβάνεται από την γύρω κατασκευή και κατ'επέκταση από τους επιβάτες. Έτσι θα πρέπει το μέγιστο φορτίο πρόσκρουσης κατά την έναρξη της διαδικασίας να είναι μικρότερο από τα επιτρεπτά όρια, ώστε να μην προκληθεί τραυματισμός κατά την αρχική επιβράδυνση. Τα επιτρεπτά όρια καθορίζονται από το κριτήριο τραυματισμού στο κεφάλι HIC.



Σχήμα 51: Συγκριτικό διάγραμμα αρχικού αναπτυσσόμενου φορτίου των δοκιμών

### 5.4 Μέσο φορτίο $P_{mean}$

Ένα ακόμη κριτήριο για την αξιολόγηση της ικανότητας της κατασκευής για χρήση ως σύστημα απορρόφησης ενέργειας είναι το μέσο φορτίο  $P_{mean}$ , το οποίο σχετίζεται με την ικανότητα απορρόφησης πλαστικής παραμόρφωσης κατά την αξονική κατάρρευση.



Σχήμα 52: Συγκριτικό διάγραμμα μέσου αναπτυσσόμενου φορτίου των δοκιμών



## 6. ΜΙΚΡΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

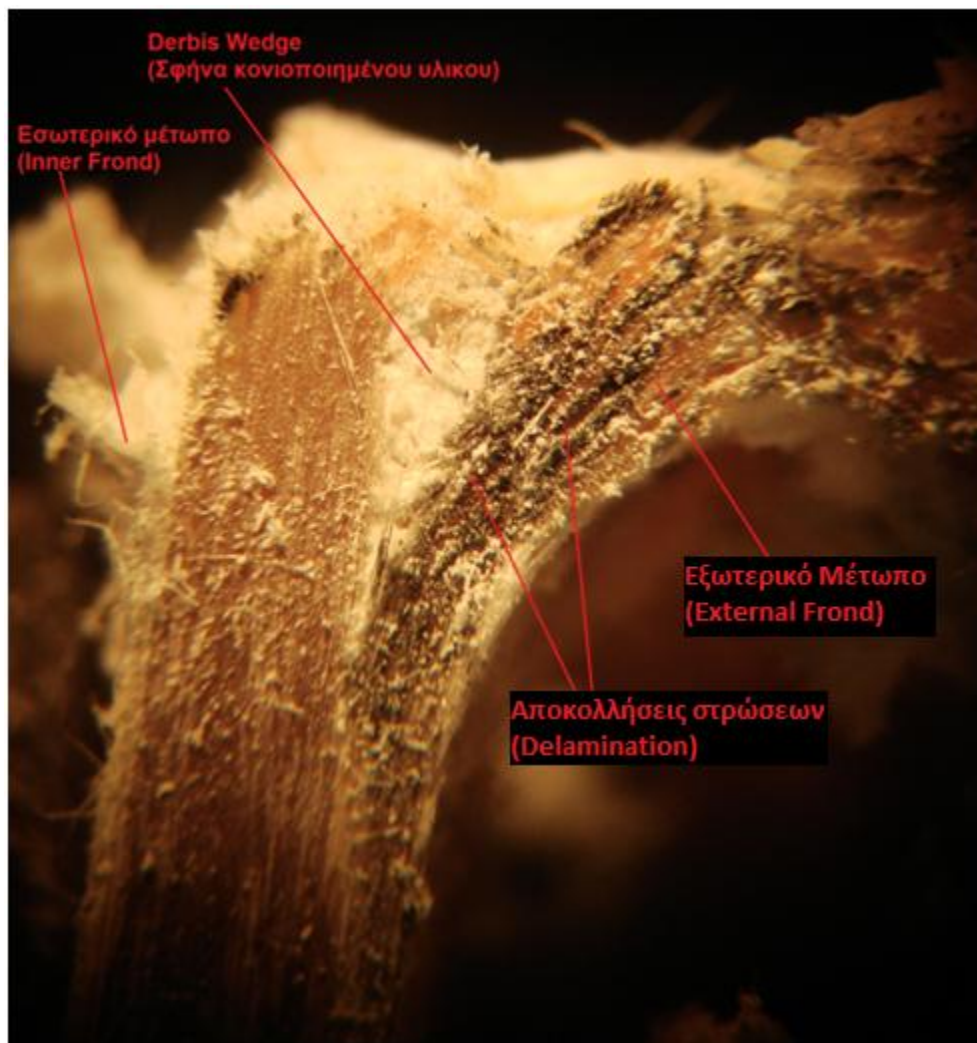
### 6.1 Μικρομηχανισμοί απορρόφησης ενέργειας

Το φαινόμενο της θραύσης στα σύνθετα υλικά συνίσταται στον συνδυασμό και την υπέρθεση των αστοχιών των επιμέρους υλικών που τα συνθέτουν. Αστοχίες που εμφανίζονται συνήθως είναι: θραύση της ρητίνης, αποκόλληση των στρώσεων, θραύση των ινών και αποχωρισμός των ινών από την μήτρα. Η εξέλιξη των μηχανισμών θραύσεως εξαρτάται από τις ιδιότητες των ινών και της ρητίνης, τις ιδιότητες της διεπιφάνειας ινών-ρητίνης καθώς και από τις διευθύνσεις και την κατανομή των ινών στη ρητίνη. Αξίζει να τονιστεί ότι μεταξύ των επιμέρους αστοχιών υπάρχει πάντα μία αλληλεπίδραση.

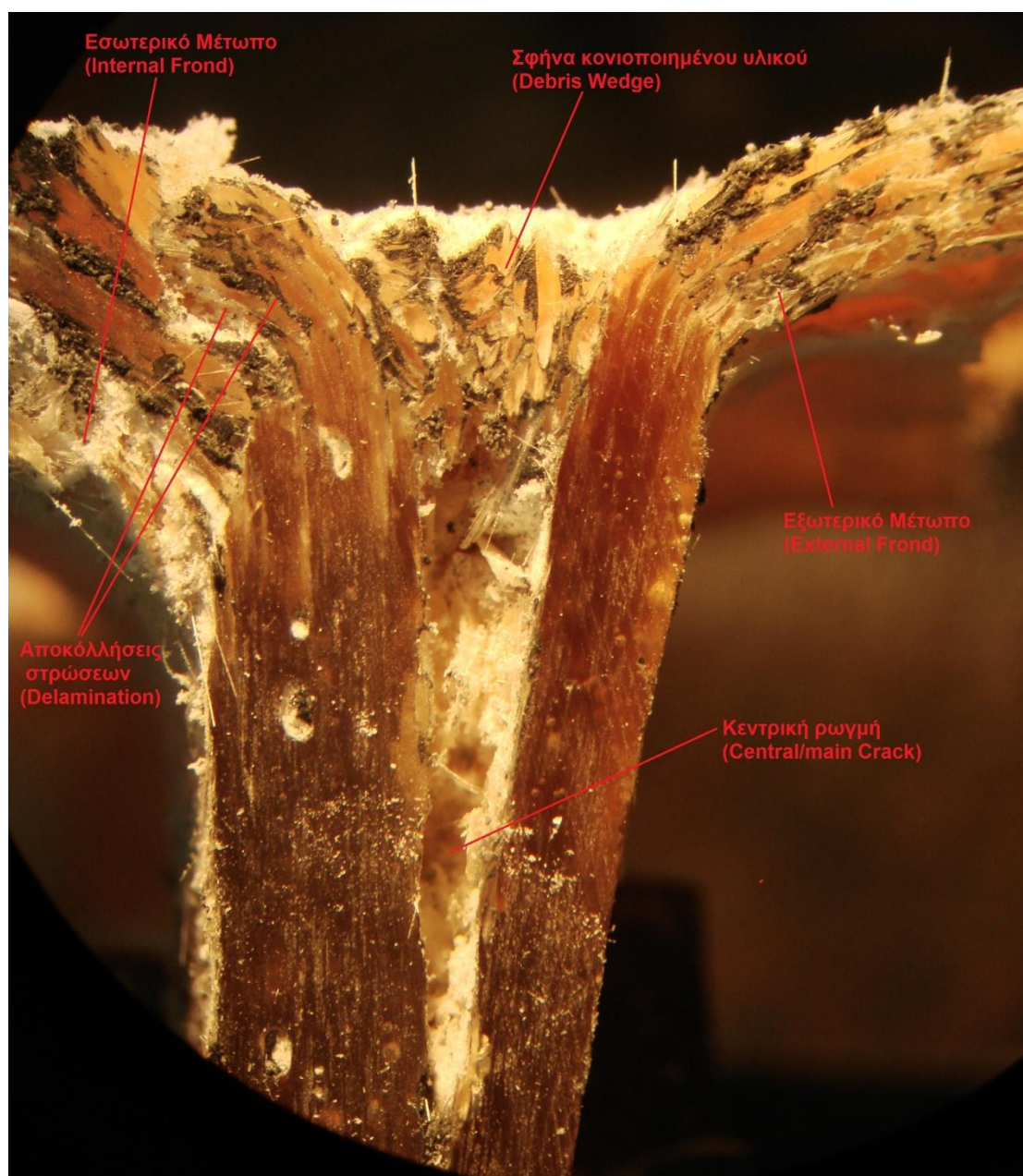
### 6.2 Μικρογραφική ανάλυση δοκιμών

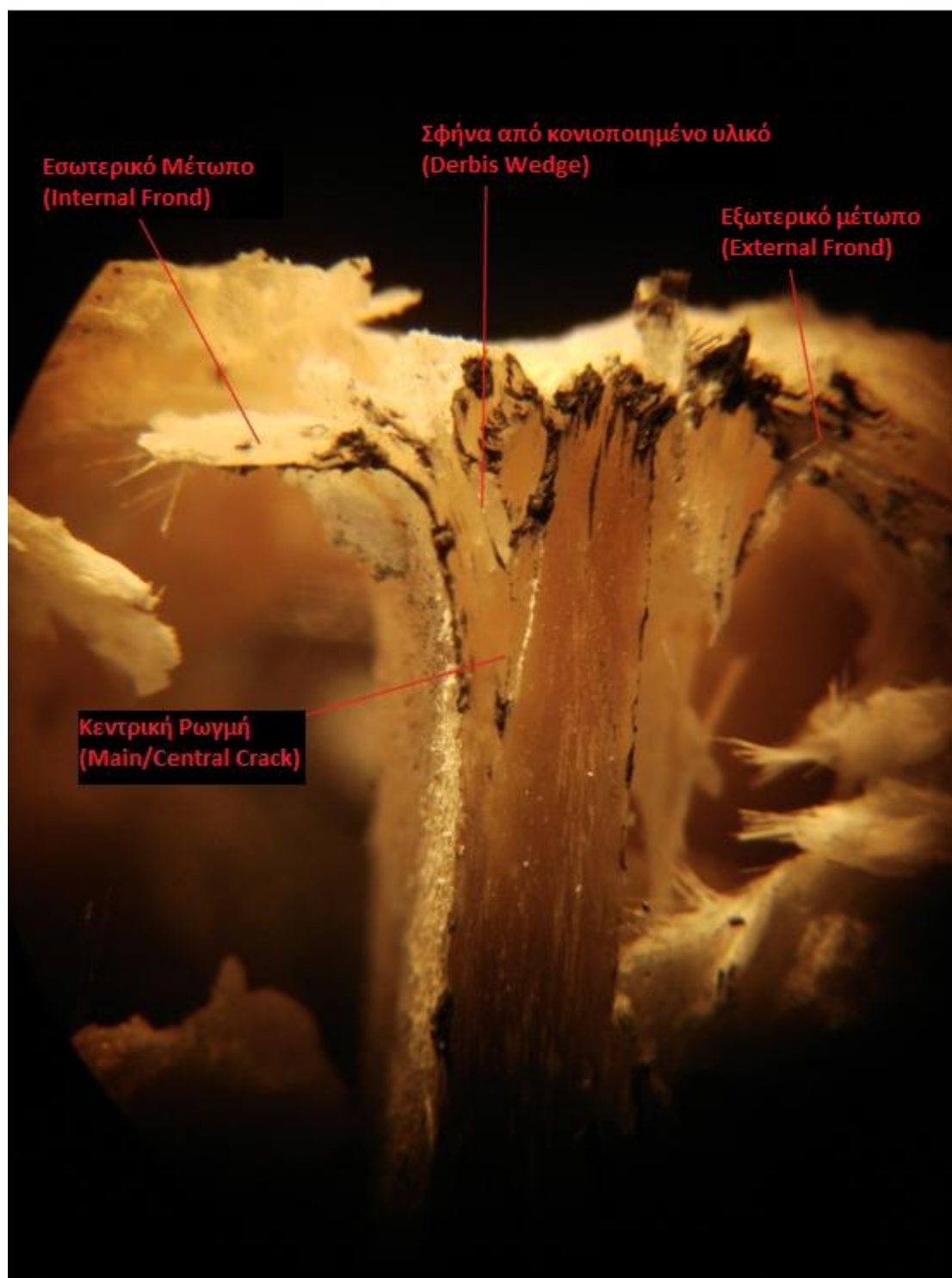
Για την μικρογραφική ανάλυση επιλέχτηκαν τα δοκίμια που δε φέρουν διαμορφώσεις στην εξωτερική τους επιφάνεια (δοκίμια  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $C_A$ ,  $C_B$ ,  $C_C$ ).

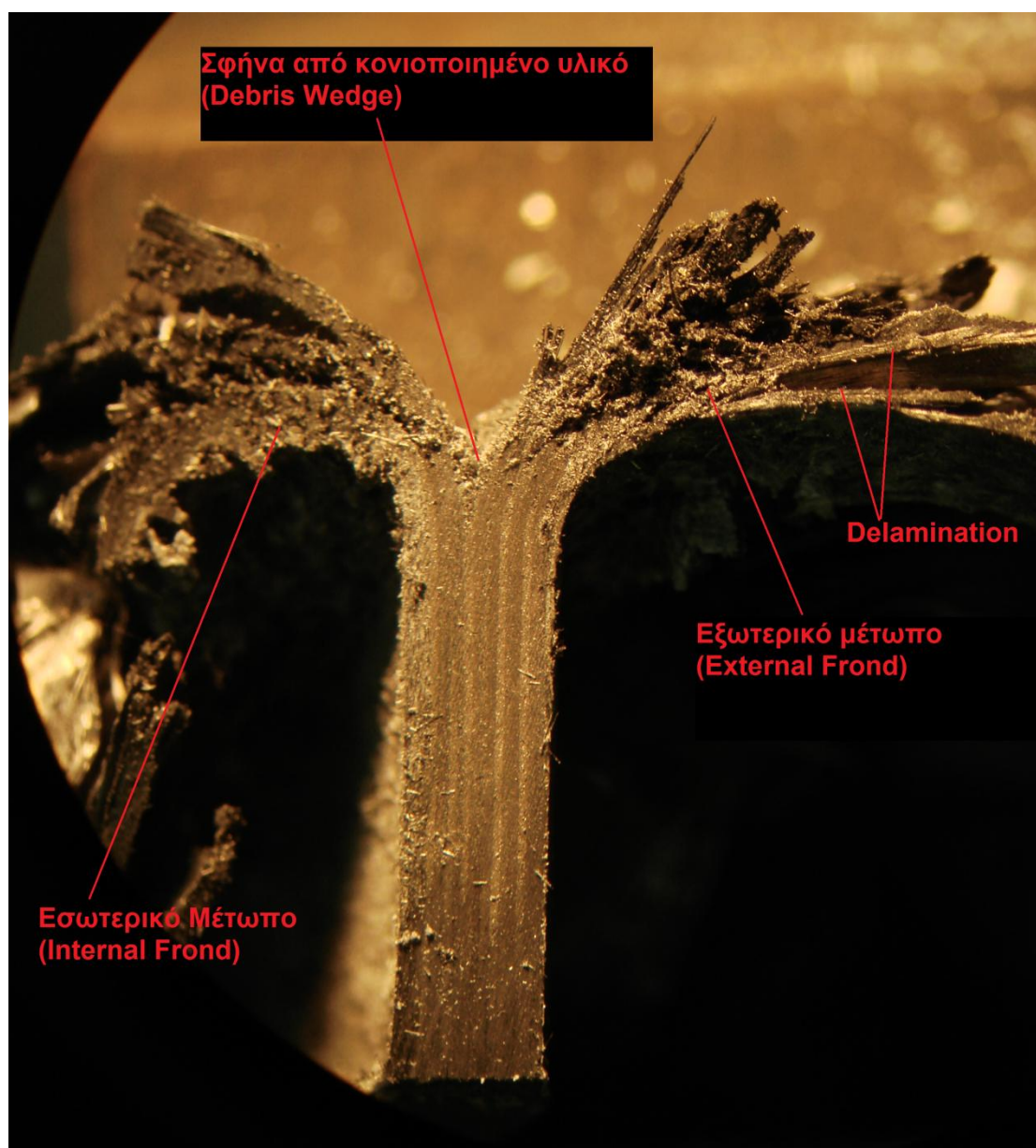
#### 6.2.1 Δοκίμιο $R_A$

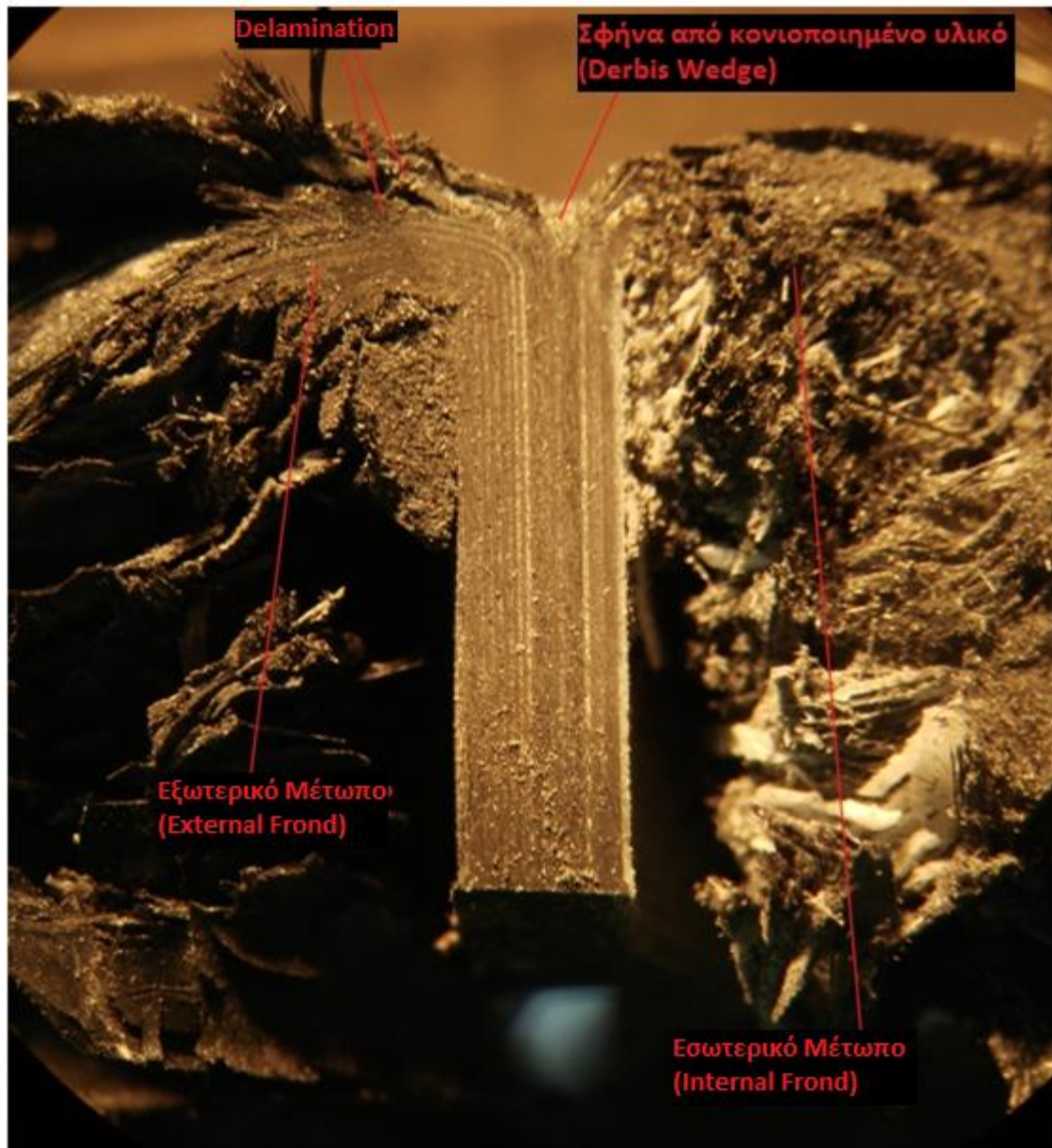


Σχήμα 53: Μικρογράφημα της ζώνης παραμόρφωσης Δοκιμίου  $R_A$

6.2.2 Δοκίμιο  $R_B$ Σχήμα 54: Μικρογράφημα της ζώνης παραμόρφωσης Δοκιμίου  $R_B$

6.2.3 Δοκίμιο  $C_A$ Σχήμα 55: Μικρογράφημα της ζώνης παραμόρφωσης Δοκιμίου  $C_A$

6.2.4 Δοκίμιο  $C_B$ Σχήμα 56: Μικρογράφημα της ζώνης παραμόρφωσης Δοκιμίου  $C_B$

6.2.5 Δοκίμιο  $C_C$ Σχήμα 57: Μικρογράφημα της ζώνης παραμόρφωσης Δοκίμιου  $C_C$



### 6.3 Παρατηρήσεις σχετικά με τους μικρομηχανισμούς κατάρρευσης

Σύμφωνα με αυτά που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 5, τα εν λόγω δοκίμια ακολουθούν τον μηχανισμό κατάρρευσης I, ο οποίος παρουσιάζει και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Κατά τη διαδικασία κατάρρευσης των κελυφών με τον τρόπο αυτό λαμβάνει χώρα μια ακολουθία μικρομηχανισμών αστοχίας του υλικού στην περιοχή της ζώνης παραμόρφωσης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα κύρια χαρακτηριστικά του μηχανισμού κατάρρευσης ακόμα και σε μικροσκοπικό επίπεδο, παραμένουν βασικά τα ίδια ανεξάρτητα της γεωμετρίας του δοκιμίου.

Ο μικρομηχανισμός αστοχίας των κελυφών χαρακτηρίζεται κυρίως από την εμφάνιση μιας ευκρινούς ζώνης παραμόρφωσης η οποία μετατοπίζεται αξονικά προς τα κάτω (ταυτόχρονα με την επιβολή περαιτέρω φόρτισης και την μείωση του ύψους του δοκιμίου) διατηρώντας όμως τα όριά της σταθερά. Το κύριο χαρακτηριστικό της είναι η ύπαρξη μιας δακτυλιοειδούς σφήνας (Debris Wedge) κωνικής διατομής από κονιοποιημένο υλικό, η οποία πιέζει αξονικά προς τα κάτω προκαλώντας τη δημιουργία και διάδοση μιας κεντρικής κύριας ρωγμής (main/central crack) (φωτογρ. 6.2-2, 6.2-3) στο μέσο (συνήθως) του σωλήνα. Ο μηχανισμός που διέπει τον σχηματισμό της σχετίζεται προφανώς με την εγκάρσια διαστολή του τοιχώματος λόγω της αξονικής συμπίεσης, προκαλώντας έναν αριθμό θραύσεων που αναπτύσσονται στην διεπιφάνεια εμβόλου/ζώνης παραμόρφωσης. Η αρχική ζώνη θραύσης, που σχηματίζεται και εξελίσσεται στη συνέχεια από την περαιτέρω διείδυση της σχηματιζόμενης σφήνας από κονιοποιημένο υλικό μεταπίπτει σε μια σταθερά κινούμενη ρηγάτωση μέσα στο τοίχωμα του δοκιμίου, προκαλώντας έτσι τον διαχωρισμό των στρώσεων σε δύο δέσμες στην περιοχή της αστοχίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό δύο μετώπων: το εξωτερικό (external frond) και το εσωτερικό (internal frond). Τα δύο μέτωπα αντιστέκονται στο εφαρμοζόμενο φορτίο έως μια κρίσιμη τιμή του και τελικά κάμπτονται και αναδιπλώνονται (bending and curling) προς τα κάτω. Το φαινόμενο εξελίσσεται με την αποκόλληση των διαστρωματώσεων του υλικού (delamination) (σχήμα 53-57).

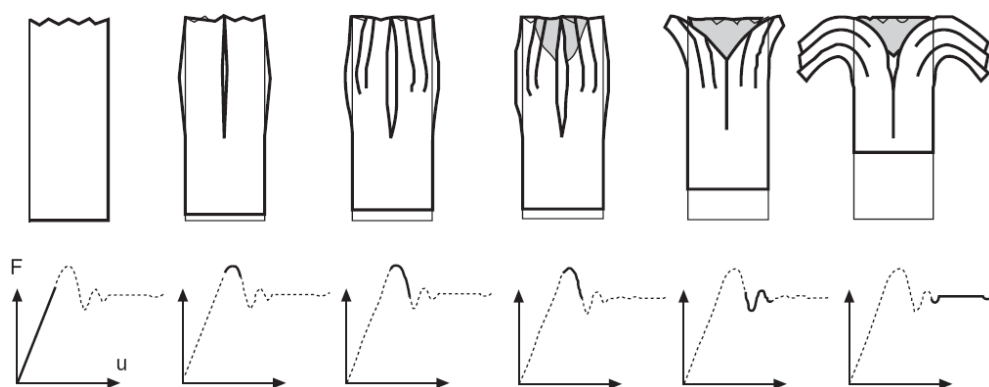
Η κύρια κεντρική ρωγμή μπορεί να διαδοθεί μπορεί να διαδοθεί είτε μεταξύ δύο γειτονικών στρώσεων (ρωγμή διαστρωματικής αποκόλλησης), είτε μεταξύ των ινών μιας στρώσης στην περιοχή παραμόρφωσης του κελύφους.

Περαιτέρω καταστροφική καταπόνηση, μετά τη δημιουργία της κύριας κεντρικής ρωγμής, συντελεί στη συμπίεση των αξονικών στρώσεων στην κοιλότητα της ρωγμής, θραύοντας το υλικό σε πολύ μικρά κομμάτια σε τέτοια έκταση ώστε οι αρχικές επιφάνειες θραύσης να καταστρέφονται τελείως. Μια σύνθετη διαδικασία κάμψης των ινών, που αλληλοεπηρεάζονται και ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη λόγω του περιορισμένου όγκου στην κοιλότητα της ρωγμής, προφανώς συντελεί στο σχηματισμό του θρυμματισμένου υλικού. Σαν αποτέλεσμα του παραπάνω μηχανισμού έχουμε το σχηματισμό της τριγωνικής σφήνας. Η σφήνα αυτή αποτελείται από μικρά κομμάτια σπασμένων ινών γυαλιού αναμεμιγμένων με κονιοποιημένη ρητίνη.

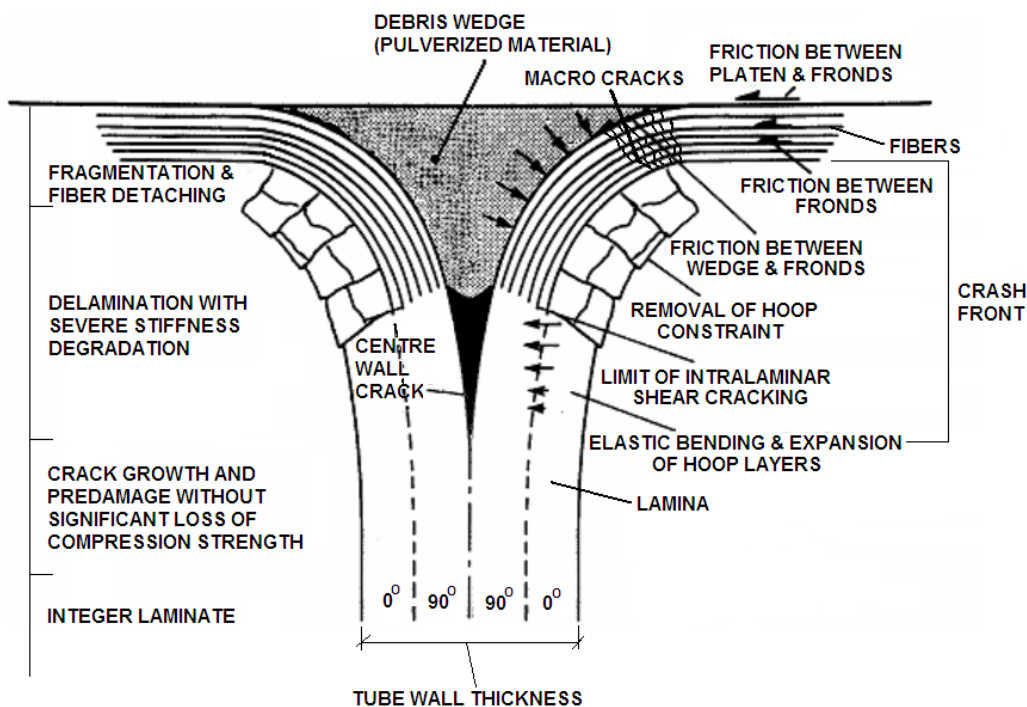
Ακόμη παρατηρείται καμπτική αστοχία (flexural damage) στα όρια της διαστρωματικής αποκόλλησης με τη μορφή πολλαπλών ακτινικών ρωγμών στις διπλώσεις που παρουσιάζονται στα μέτωπα.

Τέλος εμφανίζονται αξονικές διαρηγματώσεις των μετώπων (axial splitting), ο αριθμός των οποίων εξαρτάται από την γεωμετρία του κελύφους. Στην περίπτωση των κυλινδρικών κελυφών εξαρτάται από την διάμετρο του δοκιμίου ενώ στην περίπτωση των κελύφων ορθογωνικής και τετραγωνικής διατομής, οι αξονικές διαρηγματώσεις εμφανίζονται μόνο στις θέσεις των ακμών.

Στην εικόνα 6.2-6 παρουσιάζονται οι διαδοχικές φάσεις κατάρρευσης του τοιχώματος, οι οποίες οδηγούν στον σχηματισμό τριγωνικής σφήνας από κονιοποιημένο υλικό.



Σχήμα 58: Σχηματισμός σφήνας θρυμματισμένου υλικού



Σχήμα 59: Μέτωπο κατάρρευσης (crash-front) σωλήνα σύνθετου υλικού σε αξονική συμπίεση.



## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### 7.1 Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Βιβλιογραφικές Αναφορές

1. Kamal, M.M. (1970) "Analysis and Simulation of vehicle to Barrier Impact", Society of Automotive Engineers, SAE Paper No. 700414.
2. Wang, H.C. and Merdith, D., (1983) "The Crush Analysis of Vehicle Structures", International Journal of Impact Engineering, Vol. 1, No. 3, pp. 199-225.
3. Chang, D.C. (1977) "A Design-Analysis Method for the Front Crush Strength of Body Structures", SAE Paper No. 770593.
4. Isuzu Motors Limited, (1987) "Crash Analysis of 760 Coupe", Body Engineering Department, Personal Communication.
5. Sheh, M.Y. and Khalil, T.B. (1991) "The Impact Response of a Vehicle Structural Rail by Experiments and Finite Element Analysis in Symposium on Crashworthiness and Occupant Protection in Transportation Systems", T.B. Khalil, H.F. Mahmood, C.M. Ni and A.I. King (eds.), ASME Publication, AMD-Vol. 126/BED-Vol. 19, pp. 195-207.
6. Johnson W., Mamalis A.G and Reid S.R (1982), "Crashworthiness of vehicles", Mechanical Engineering Publications, London, U.K.
7. Mamalis A.G., Robinson M., Manolakos D.E, Demosthenous G.A Ioannidis M.B and Carruthers (1997), "Crashworthy Capability of Composite Material structures: A Review", Composite Structures, (in Press).
8. Mamalis A.G., Robinson M., Manolakos D.E, Demosthenous G.A Ioannidis M.B (1996) , "The static & dynamic collapse of fibreglass composite automotive frame rails", Comp. Structures 34,77.
9. Lubin, George (Ed.) (1982), "Handbook of Composites", New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc.
10. Lee, Stuart M. (Ed.) (1990), International Encyclopedia of Composites, "Historical Perspectives of Composites," by John Delmonte, New York: VCH Publishers.
11. Strong, A. Brent (1989), "Fundamentals of Composites Manufacturing", Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers.
12. Mamalis A.G., Robinson M., Manolakos D.E, Demosthenous G.A Ioannidis M.B (1996) , "The static & dynamic axial crumbling of thin-walled fibreglass composite square tubes", Composites Engineering 6.

## 7.2 Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Βιβλιογραφικές Αναφορές

1. Δημήτρης Ι. Παντελής (2008), "Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά", 2<sup>η</sup> έκδοση.
2. ASM Handbook (2001), Volume 21, "Composites", Published by ASM International.
3. R. Boyer (2001), Aircraft Materials, "Encyclopedia of Materials: Science and Technology", Elsevier Science Ltd, p.66-73.
4. J. Delmonte (1981), "Technology of Carbon and Graphite Fiber Composites, Van Nostrand Reinhold, New York.
5. M. Grayson (ed.) (1983), "Encyclopedia of composite Materials and Components", Wiley, New York.
6. D. Hull (1981), An Introduction to composite Materials, Cambridge University Press, Cambridge.
7. A. Kelly, S.T. Mileiko (eds.) (1983), "Fabrication of composites, Elsevier, Amsterdam.
8. R. M. Jones (1999), Mechanics of Composite Materials, Second Edition, Taylor & Francis.
9. Agarwal B.D. and Broutman L.J. (1990), "Analysis and performance of fiber composites", John Wiley & Sons, Inc, USA.
10. Ashby M.F. (1992), "Materials selection in mechanical design", Pergamon press, 48.
11. Berry J. and Hull D. (1984), "Effect of speed on progressive crushing of epoxy-glass cloth tubes", 3<sup>rd</sup> Int. Conf. Mech. Prop. High Rates of Strain, Oxford, 463.
12. Farley G.L. (1983), "Energy absorption of composite materials", Journal of composite Materials 17, p.167.
13. Farley G.L. (1986a), "Effect of specimen geometry in the energy absorption of composite materials", J. of Composite Materials 20.
14. Farley G.L. (1991), "The effects of crushing speed on the energy-absorption capability of composite tubes", J. of composite Materials, 25,1314.
15. Farley G.L. (1986b), "Effect of fibre and matrix maximum strain rate on the energy absorption of composite materials", J. of Composite Materials, 20.
16. Mamalis A.G., Robinson M., Manolakos D.E, Demosthenous G.A Ioannidis M.B and Carruthers (1997), "Crashworthy Capability of Composite Material structures: A Review", Composite Structures, (in Press).
17. Mamalis A.G., Robinson M., Manolakos D.E, Demosthenous G.A Ioannidis M.B (1996) , "The static & dynamic collapse of fibreglass composite automotive frame rails", Comp. Structures.
18. Mamalis A.G., Manolakos D.E. and Viegelaahn G.L. (1990), "Crashworthy behaviour of thin-walled tubes of fibreglass composite material subjected to axial loading", J. of Comp. Mat 24,72.
19. Mamalis A.G., Robinson M., Manolakos D.E, Demosthenous G.A Ioannidis M.B (1996), "Analysis of failure mechanisms observed in axial collapse of thin-walled circular fibreglass composite tubes", Thin-Walled structures 24,335.
20. Mamalis A.G., Robinson M., Manolakos D.E, Demosthenous G.A Ioannidis M.B (1994), "Axial collapse of thin-walled fibreglass composite tubular components at elevated strain rates", Composites engineering 4,371.
21. Mamalis A.G., Yuan Y.B. and Viegelaahn G.L. (1992), "Collapse of thin-wail composite sections subjected to high speed axial loading", In. J. of Vehicle Design 13,564.
22. Thornton P.H. (1979), "Energy absorption in composite structures", J. of composite Materials 13, Composite Materials 24, 594.
23. Hull D. (1991), "A unified approach to progressive crushing in fibre reinforced composite tubes", Composites Science and Technology 40 p. 377-422.

### 7.3 Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Βιβλιογραφικές Αναφορές

1. Α.Δ. Γκότσης (2007), "Σημειώσεις επιστήμης και τεχνολογίας σύνθετων υλικών", Εκδ. Πολυτεχνείου Κρήτης.
2. Κ. Μπέλτσιος (2003), "Επιστήμη και τεχνολογία σύνθετων υλικών", Εκδ. Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.
3. Anastasios P. Vasiolopoulos, Thomas Keller (2011), "Fatigue of Fiber-reinforced Composites", Springer-Verlag London Limited.

### 7.4 Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>, 5<sup>ο</sup> και 6<sup>ο</sup>: Βιβλιογραφικές Αναφορές

1. Mamalis A.G., Manolakos D.E., Ioannidis M.B., Papapostolou D.P., Kostazos P.K., Kostantinidis D.G. (2002), "On the compression of hybrid sandwich composite panels reinforced with internal tube inserts: experimental, Manufacturing Technology Division, Department of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens.
2. Mamalis A.G., Manolakos D.E., Ioannidis M.B., Papapostolou D.P. (2003), "Crashworthy characteristics of axially statically compressed thin-walled square CFRP composite tubes: experimental", Manufacturing Technology Division, N.T.U.A.
3. Mamalis A.G., Manolakos D.E., Ioannidis M.B., Papapostolou D.P. (September 2004), "On the response of thin-walled CFRP composite tubular components subjected to static and dynamic axial compressive loading: experimental", Manufacturing Technology Division, N.T.U.A.
4. Mamalis A.G., Manolakos D.E., Ioannidis M.B., Papapostolou D.P. (November 2004), "On the experimental investigation of crash energy absorption in laminate splaying collapse mode of FRP tubular components", Manufacturing Technology Division, N.T.U.A.
5. Mamalis A.G., Manolakos D.E., Demosthenous G.A. (1992), "Crushing behaviour of thin-walled, non-circular, glass fibre-reinforced composite tubular components duo to bending", Department of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens.
6. Mamalis A.G., Manolakos D.E., Demosthenous G.A., Ioannidis M.B. (1995), "Energy Absorption Capability of Fiberglass Composite Square Frusta Subjected to Static and Dynamic Axial Collapse", Department of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens.
7. Mamalis A.G., Manolakos D.E., Demosthenous G.A., Ioannidis M.B. (1995), "Analysis of Failure Mechanisms Observed in Axial Collapse of Thin-Walled Circular Fibreglass Composite Tubes", Department of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens.
8. Mamalis A.G., Manolakos D.E., Demosthenous G.A., Ioannidis M.B. (1995), "The deformation mechanism of Thin-Walled non-circular composite tubes subjected to bending", Department of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens.
9. Mamalis A.G., Manolakos D.E., Demosthenous G.A., Ioannidis M.B. (1995), "Analytical and experimental approach damage and residual strength of fiberglass composite frame rails during manufacturing", Department of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens.
10. Mamalis A.G., Manolakos D.E., Demosthenous G.A., Ioannidis M.B. (1996), "Analytical Modelling of the Static and Dynamic Axial Collapse of Thin-Walled fibreglass composite

square tubes", Department of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens.

11. Mamalis A.G., Manolakos D.E., Demosthenous G.A., Ioannidis M.B. (1996), "The static and Dynamic axial collapse of fiberglass composite automotive frame rails", Department of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens.
12. Mamalis A.G., Manolakos D.E., Demosthenous G.A., Ioannidis M.B. (1996), "Analytical Modeling of the Static and Dynamic Collapse of Thin-Walled Fibreglass Composite Conical Shells", Manufacturing Technology Division, Department of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens.
13. Mamalis A.G., Manolakos D.E., Demosthenous G.A., Ioannidis M.B. (1998), "Experimental Derermination of Spliting in Axially Collapsed Thick-Walled Fibre-Reinforced Composite Frusta", Manufacturing Technology Division, Department of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens.







## 8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

## 8.1 Ορολογία

<b>Abrasive wear</b>	Μηχανισμοί φθοράς
<b>Axial splits</b>	Αξονικές διαρρηγματώσεις
<b>Brittle fracture</b>	Ψαθυρή θραύση
<b>Buckling effect of fibres</b>	Αναδίπλωση και συστροφή ινών
<b>Collapse modes</b>	Τρόποι κατάρρευσης
<b>Crack deflection</b>	Απόκλιση ρωγμής
<b>Crack propagation</b>	Διάδοση ρωγμής
<b>Crashworthiness</b>	Καταστροφική καταπόνηση (περιλαμβάνει κρούση)
<b>Debonding</b>	Αποσύνδεση των ινών από τη μήτρα
<b>Debris wedge</b>	Δακτυλιοειδής σφήνα κωνικής διατομής από κονιοποιημένο υλικό
<b>Expand (fronds)</b>	Ακτινική διάδοσή τους
<b>Fibre pull out</b>	Εκρίζωση των ινών
<b>Filament</b>	Περιέλιξη νήματος
<b>Flexural damage</b>	Καμπτική αστοχία
<b>Fragmentation</b>	Πολλαπλή μονομηματική θραύση-θρυμματισμός
<b>Honeycomb cell</b>	Κυψελοειδής ιστός
<b>Hoop direction</b>	Οι ίνες που βρίσκονται διατεταγμένες περιφερειακά και κάθετα προς τον άξονα του κελύφους
<b>Injection moulding</b>	Τυποποίηση με έγχυση
<b>Interface</b>	Διεπιφάνεια
<b>Interphase</b>	Ενδιάμεση φάση
<b>Kink bands</b>	Επιφανειακές πτυχώσεις
<b>Laminae/layer</b>	Στρώση
<b>Laminar/laminate composite</b>	Σύνθετο στρωματικό υλικό
<b>Laminate</b>	Έλασμα αποτελούμενο από πολλές στρώσεις
<b>Longitudinal strength in compression</b>	Αντοχή σε θλίψη κατά τη διεύθυνση των ινών
<b>Longitudinal strenght in tension</b>	Αντοχή σε εφελκυσμό κατά τη διεύθυνση των ινών
<b>Mat</b>	Στρώση ινών
<b>Micro-cracking</b>	Ρωγμάτωση
<b>Micro-cutting</b>	Κοπή
<b>Micro-ploughing</b>	Απόξεση
<b>Modulus</b>	Μέτρο ελαστικότητας
<b>Moulding</b>	Χύτευση
<b>Ply</b>	Στρώση πολύστρωτου ελάσματος
<b>Pull out test</b>	Αποκόλληση ινών με εφελκυσμό
<b>Roving</b>	Πλεξίδες ινών



---

<b>Shear banding fracture</b>	Θραύση μέσω ταινιών διάτμησης
<b>Shear debond (test)</b>	Πείραμα θλιπτικής διατμητικής αστοχίας
<b>Shear strength</b>	Αντοχή σε καθαρή διάτμηση
<b>Speed of crushing</b>	Ταχύτητα φόρτισης
<b>Splaying mode</b>	Μηχανισμός Λυσίματος της διαστρωμάτωσης
<b>Spray moulding</b>	Τυποποίηση με ψεκασμό
<b>Stiffness</b>	Στιβαρότητα
<b>Tow</b>	Πλεξίδες ινών
<b>Transverses strength in compression</b>	Αντοχή σε θλίψη
<b>Transverses strength in tension</b>	Αντοχή σε εφελκυσμό
<b>Volume fraction</b>	Περιεκτικότητα κατ'όγκο του σύνθετου σε ίνες
<b>Warp</b>	Η διεύθυνση μεγαλύτερης αντοχής (περισσότερες ενισχυτικές ίνες
<b>Whiskers</b>	Νηματίδια
<b>Winding</b>	Περιέλιξη νήματος
<b>Yarn</b>	Πλεξίδες ινών