



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επίδραση συνδυασμού μηχανισμού triggering και  
ατέλειας στην καταστροφική καταπόνηση  
αξονικής συμπίεσης κυλινδρικών δοκιμίων από  
σύνθετο υλικό

ΓΕΩΡΓΙΑ ΚΑΡΟΥΣΑΤΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Δρ. Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

ΑΘΗΝΑ ΜΑΡΤΙΟΣ 2011

*Στον αδερφό μου Κώστα,*

*Ήσουν ο «κυματοθραύστης» μου σε δύσκολους καιρούς*

## *Ευχαριστίες*

Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζονται στον Καθηγητή και Διευθυντή του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών κ. Δημήτριο Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη του στην ανάθεση της διπλωματικής. Επίσης στον υποψήφιο Διδάκτορα κ. Αλέξανδρο Κιτσέλη για την καθοδήγηση και τις υποδείξεις του και στο προσωπικό του εργαστηρίου για την βοήθεια στην διαμόρφωση των δοκιμών.

Θερμές ευχαριστίες στην ομάδα του Grammarios Bikes, κύριους Θεόδωρο Θεοδωρίδη, Ιωάννη Ευσταθίου και Ανδρέα Ζουρνή για την τεχνική και ηθική υποστήριξη.

Τέλος , ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την ηθική συμπαράσταση, βοήθεια και υπομονή τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου .

## **ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ**

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.</b> Πρόλογος Ιστορική αναδρομή.....	1
1.1 Πρόλογος.....	1
1.2 Σύντομη ιστορική αναδρομή.....	2
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.</b> Εισαγωγή στα σύνθετα υλικά και τις διαδικασίες τους.....	4
2.1 Μοναδικά υλικά που απαιτούν μοναδικές διαδικασίες.....	4
2.2 Διαστρωματώσεις (Laminates).....	5
2.3 Ίνες (Fibers).....	8
2.4 Μήτρες (Matrices).....	13
2.5 Μορφές προϊόντων.....	17
2.6 Σύνοψη των διαδικασιών παραγωγής.....	25
2.7. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σύνθετων υλικών.....	33
2.8. Εφαρμογές.....	42
2.9 Σύνοψη κεφαλαίου 2.....	44
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.</b> Ίνες από άνθρακα και γραφίτη (Carbon and graphite fibers).....	46
3.1 Ορολογία για τις ίνες.....	46
3.2 Διαδικασίες κατασκευής.....	47
3.3 Πλεκτά υφάσματα.....	51
3.4 Ενισχυμένα υφάσματα (Reinforced mats).....	56
3.5 Κομμένες ίνες (Chopped fibers).....	57
3.6 Παραγωγή προεμπροτισμένων υφασμάτων (Prepreg manufacturing).....	58
3.7 Σύνοψη κεφαλαίου 3.....	64
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.</b> Triggering (Μηχανισμοί σκανδάλης).....	66
4.1. Αξονική προοδευτική θλίψη (crushing).....	66
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.</b> Μηχανισμοί κατάρρευσης που παρατηρούνται στην αξονική κατάρρευση λεπτότοιχων σωλήνων από σύνθετο υλικό.....	68

## **ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.</b> Διεξαγωγή του πειράματος.....	71
6.1 Αναγνώριση του χρησιμοποιούμενου υλικού.....	71
6.2 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας και χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού.....	72
6.2.1 Επιλογή ταχύτητας δοκιμής.....	72
6.2.2 Λογισμικό επεξεργασίας.....	72
6.3 Πειραματικές δοκιμές και μετρήσεις.....	74
6.3.1 ΔΟΚΙΜΙΟ 1.....	74
6.3.2 ΔΟΚΙΜΙΟ 2.....	81
6.3.3 ΔΟΚΙΜΙΟ 3.....	88
6.3.4 ΔΟΚΙΜΙΟ 4.....	95
6.3.5 ΔΟΚΙΜΙΟ 5.....	102
6.3.6 ΔΟΚΙΜΙΟ 6.....	109
6.3.7 ΔΟΚΙΜΙΟ 7.....	116
6.3.8 ΔΟΚΙΜΙΟ 8.....	123
6.4 Μικρογραφική ανάλυση.....	130
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.</b> Παρατηρήσεις και συμπεράσματα.....	139
7.1 Παρατηρήσεις σχετικά με τον μικρομηχανισμό κατάρρευσης.....	139
7.2 Επίδραση triggering και ατελειών.....	140

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### 1.1 ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι δομές από σύνθετα υλικά έχουν προσελκύσει το μελετητικό ενδιαφέρον εξαιτίας της σημασίας που έχουν λάβει οι εξής δυνατότητες:

- Διαχείρισης ενέργειας κρούσης (crash energy management)
- Crashworthiness (Αντοχή στις συγκρούσεις)

Πολλές από τις μηχανικές κατασκευές που είναι κατασκευασμένες από σύνθετα προορίζονται ειδικά για την απορρόφηση ενέργειας κάτω από αξονική φόρτιση, κάμψη ή σύνθετη φόρτιση. Μια σημαντική απαίτηση για αυτά τα δομικά συστατικά είναι να έχουν την ικανότητα διάχυσης μεγάλων ποσών ενέργειας (energy dissipation) μέσω της ελεγχόμενης κατάρρευσης τους σε περίπτωση π.χ. μιας σύγκρουσης. Γενικά, η συνολική ενέργεια που διαχέεται εξαρτάται από τα κυρίαρχα φαινόμενα παραμόρφωσης όλων ή μέρους των δομικών συστατικών μιας απλής γεωμετρίας όπως είναι οι λεπτότοιχοι σωλήνες, κώνοι, σκελετοί και τομές. Η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας διαφέρει από τεμάχιο σε τεμάχιο ανάλογα με τον τρόπο παραμόρφωσης που εμφανίζεται και το χρησιμοποιούμενο υλικό.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών με ινώδη ενίσχυση σε σύγκριση με συμβατικά ισότροπα υλικά είναι οι πολύ υψηλές τιμές ειδικής αντοχής (specific strength) και ειδικής δυσκαμψίας (specific stiffness) που μπορεί να επιτευχθούν. Επιπλέον, στα σύνθετα ο σχεδιαστής μπορεί να μεταβάλλει τον τύπο ίνας, μήτρας και τον προσανατολισμό των ινών ούτως ώστε να παραχθούν σύνθετα με βελτιωμένες ιδιότητες. Οι προοπτικές του μειωμένου βάρους και της ευελιξίας στην σχεδίαση καθιστούν τα σύνθετα ιδανικά για την κατασκευή ελαφρών δομών απορρόφησης ενέργειας. Τα δεδομένα αυτά έχουν προσελκύσει την προσοχή της αυτοκινητοβιομηχανίας, αλλά και της αεροναυπηγικής βιομηχανίας και έχουν οδηγήσει στην αυξημένη χρήση σύνθετων υλικών σε ποικίλες εφαρμογές, όπως είναι ενδεικτικά οι ράγες του πλαισίου που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του σκελετού του αυτοκινήτου και το υποδάπεδο (subfloor) ενός αεροσκάφους, αντικαθιστώντας τα συμβατικά υλικά που χρησιμοποιούνταν στο παρελθόν.

Προηγούμενες μελέτες υποδεικνύουν ότι τα κελύφη από σύνθετα παραμορφώνονται με διαφορετικό τρόπο από παρόμοια δομικά συστατικά κατασκευασμένα από συμβατικά υλικά. Αυτό οφείλεται στο ότι τα σύνθετα καταρρέουν με διαφορετικούς τρόπους (collapse modes), όπως είναι οι ρωγμές στην μήτρα (matrix cracking), αποκόλληση στρώσεων (delamination), θραύση ινών (fiber breakage). Η πολυπλοκότητα των μηχανισμών κατάρρευσης καθιστά δύσκολο το έργο της διατύπωσης θεωρητικών μοντέλων για την συμπεριφορά στην κατάρρευση των σύνθετων κελυφών με ινώδη ενίσχυση.

Μηχανισμοί σκανδάλης (trigger mechanisms) χρησιμοποιούνται για να διασφαλιστεί η προοδευτική κατάρρευση όταν θέλουμε να αποκλείσουμε την πιθανότητα εμφάνισης ψαθυρής θραύσης (brittle fracture) και buckling. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήσαμε trigger μορφής λοξοτομής (chamfer) γωνίας 45°.

Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει ο συνδυασμός ατελειών και triggering. Εγείρονται ερωτήματα σχετικά με την αλληλεπίδραση ή μη των δύο διαμορφώσεων.

## 1.2 Σύντομη ιστορική αναδρομή

Οι πρώτες χρήσεις σύνθετων χρονολογούνται περίπου στο 1500 π.Χ. όταν οι Αιγύπτιοι και Μεσοποτάμιοι άποικοι χρησιμοποίησαν μίγμα λάσπης και άχυρου για να δημιουργήσουν δυνατά και ανθεκτικά κτίσματα. Το άχυρο συνέχισε να παρέχει ενίσχυση στα αρχαία «σύνθετα» προϊόντα συμπεριλαμβανομένων κεραμικών και βαρκών.

Αργότερα, γύρω στο 1200 μ.Χ. οι Μογγόλοι εφεύραν το πρώτο «σύνθετο» τόξο. Χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό ξύλου, κόκκαλων και «κόλλας» από ζωικά συστατικά, τα τόξα συμπιέζονταν και τυλίγονταν με φλοιό σημύδας. Αυτά τα τόξα ήταν εξαιρετικά ισχυρά και ακριβή. Το συγκεκριμένο τόξο από «σύνθετο» υλικό εξασφάλισε στον Genghis Khan στρατιωτική κυριαρχία και χάρη στην συγκεκριμένη πρώιμη τεχνολογία, αυτό το όπλο θεωρείτο το πιο ισχυρό έως την εφεύρεση της πυρίτιδας.

### ➤ Γέννηση της «Εποχής των Πλαστικών»

Η σύγχρονη εποχή των συνθέτων ξεκίνησε αφότου οι επιστήμονες ανέπτυξαν τα πλαστικά. Έως τότε, οι φυσικές ρητίνες, που προέρχονταν από φυτά και ζώα, ήταν η μόνη πηγή για κόλλες και συνδετικά. Στις αρχές του 1900, αναπτύχθηκαν πλαστικά όπως πολυστυρόλιο, βινυλικές, φαινολικές, πολυεστερικές ρητίνες. Αυτά τα νέα συνθετικά υλικά εκτόπισαν με τις ιδιότητες τους τις φυσικές ρητίνες.

Παρόλαυτα, τα πλαστικά μόνα τους δεν μπορούν να παρέχουν αρκετή αντοχή για δομικές εφαρμογές. Χρειαζόταν κάποιο είδος ενίσχυσης που θα προσέδιδε αντοχή και δυσκαμψία. Το 1935, ο Owens Corning εισήγαγε την πρώτη ίνα ύαλου (fiberglass). Το fiberglass, σε συνδυασμό με πλαστικό πολυμερές δημιουργεί μια εξαιρετικά ανθεκτική δομή, η οποία είναι επίσης και ελαφριά. Αυτή ήταν η αρχή της βιομηχανίας των Fiber Reinforced Polymers (Πολυμερών με ινώδη ενίσχυση).

### ➤ Δεύτερος Παγκόσμιος Πόλεμος. Ορόσημο στην αλλαγή των πρώιμων σύνθετων

Πολλές από τις μεγαλύτερες προόδους στα σύνθετα σημειώθηκαν εξαιτίας του πολέμου. Ο δεύτερος παγκόσμιος πόλεμος «έβγαλε» την βιομηχανία τον FRP 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 ηλεκτρονικών ραντάρ (Radomes).

### ➤ Προσαρμόσιμα σύνθετα: Από διαστημικά υλικά σε υλικά της καθημερινότητας

Μέχρι το τέλος του δεύτερου παγκόσμιου πολέμου μια μικρή βιομηχανία σύνθετων υλικών ήταν σε έντονη λειτουργία. Με μειωμένη την ζήτηση πλέον για στρατιωτικά προϊόντα , οι νεωτεριστές των σύνθετων ξεκίνησαν μια φιλότιμη προσπάθεια να εισάγουν τα σύνθετα και σε άλλες αγορές. Τα πλοία ήταν μια προφανής επιλογή , και το πρώτο εμπορικό κύριο σώμα πλοίου εμφανίστηκε το 1946.

Αυτή την περίοδο ο Brandt Goldsworthy, που αναφέρεται συχνά ως ο «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 εφήυρε επίσης μια διαδικασία κατασκευής γνωστή ως pultrusion (μορφοποίηση με εμβάπτιση).

➤ Συνεχιζόμενη πρόοδος στα σύνθετα

Περίπου το 1970 η βιομηχανία των συνθέτων 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. Οι ίνες άνθρακα (carbon fiber) αναπτύχθηκε περίπου την ίδια περίοδο, από τότε αντικαθιστά τα μέταλλα σαν ένα νέο υλικό επιλογής.

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.

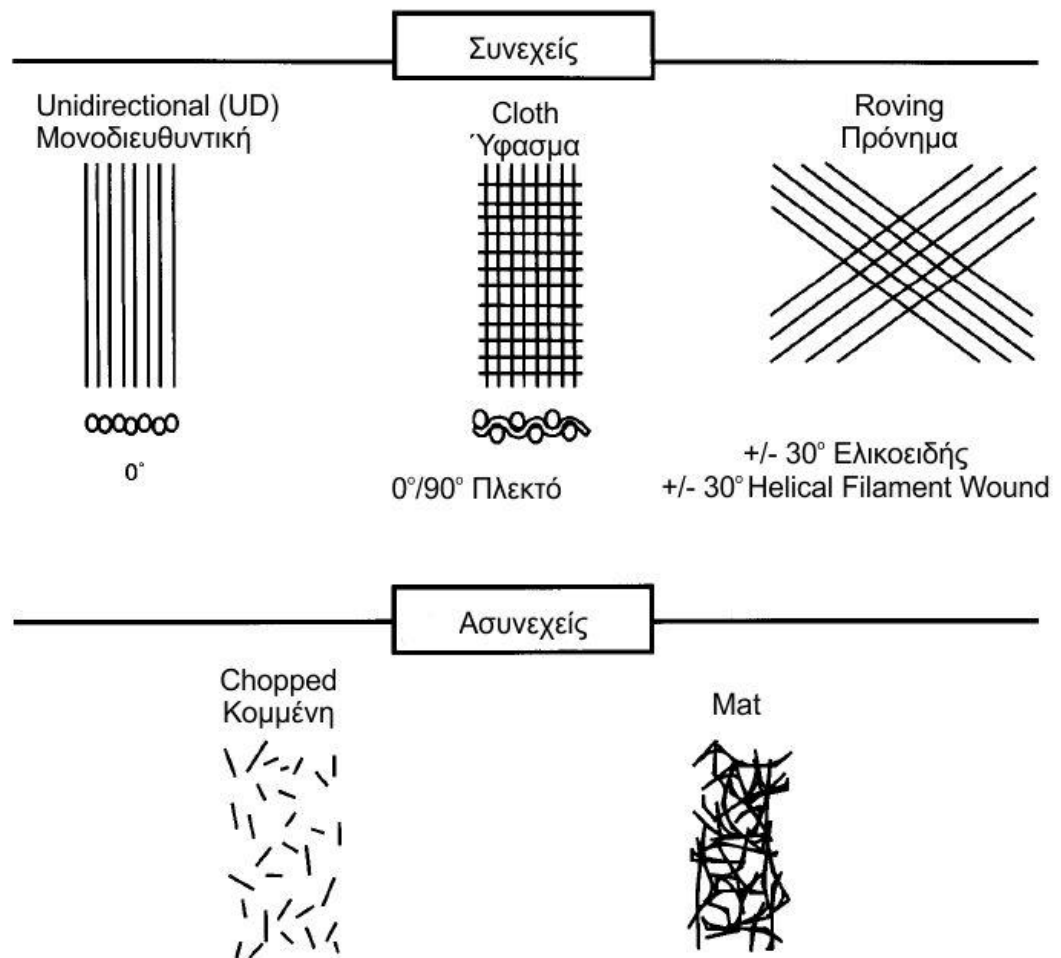
Μελλοντικά τα σύνθετα θα χρησιμοποιούν όλο και καλύτερες ίνες και ρητίνες , πολλές από τις οποίες θα ενσωματώνουν νάνο υλικά. Επιπρόσθετα, τα σύνθετα τείνουν να γίνουν πιο φιλικά προς το περιβάλλον. Οι ρητίνες θα ενσωματώνουν ανακυκλωμένα πλαστικά και πολυμερή με βιολογική βάση.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Εισαγωγή στα σύνθετα υλικά και τις διαδικασίες τους

### 2.1 Μοναδικά υλικά που απαιτούν μοναδικές διαδικασίες

Ως σύνθετο μπορεί να οριστεί ένα υλικό που αποτελεί συνδυασμό δύο ή περισσότερων υλικών. Το αποτέλεσμα είναι υλικό με καλύτερες ιδιότητες από αυτές που θα είχαμε αν χρησιμοποιούσαμε ξεχωριστά καθένα από τα συστατικά υλικά. Σε αντίθεση με τα μεταλλικά κράματα κάθε υλικό διατηρεί τις ξεχωριστές χημικές, φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του. Τα δύο συστατικά είναι συνήθως οι ίνες και η μήτρα. Οι τυπικές ίνες είναι συνήθως κατασκευασμένες από γυαλί, αραμίδιο και άνθρακα και μπορεί να είναι συνεχείς ή ασυνεχείς. Οι μήτρες μπορεί να είναι πολυμερή, μεταλλικά ή κεραμικά υλικά. Στην ΕΙΚΟΝΑ 1 βλέπουμε παραδείγματα συνεχούς ενίσχυσης, τα οποία περιλαμβάνουν τις μονοδιευθυντικές ίνες (unidirectional), το πλεκτό ύφασμα (woven cloth) και την ελικοειδή περιτύλιξη (helical winding) καθώς και παραδείγματα ασυνεχούς ενίσχυσης περιλαμβάνουν τις κομμένες ίνες (chopped fibers) και την τυχαία διάταξη (random mat).



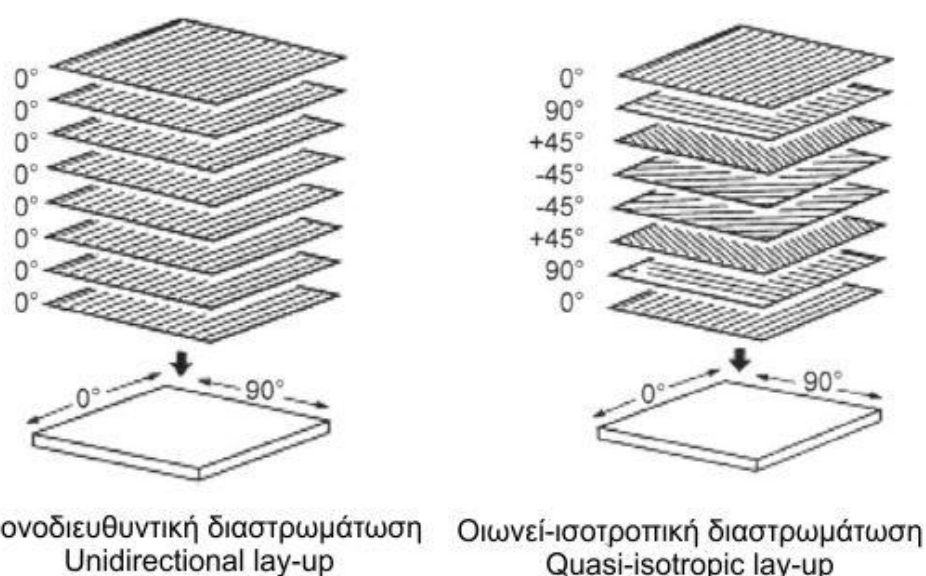
ΕΙΚΟΝΑ 1. Επιλογές ενισχυτικού υλικού

## 2.2 Διαστρωματώσεις (laminates)

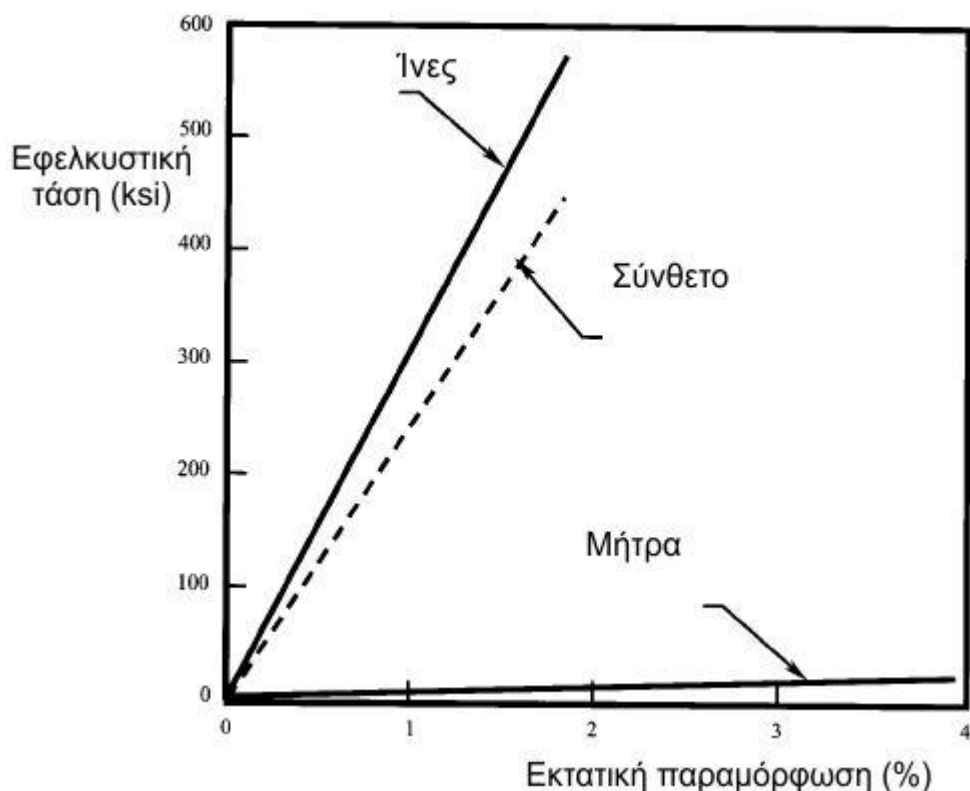
Τα σύνθετα από συνεχείς ίνες είναι υλικά που αποτελούνται από διαστρωματώσεις (ΕΙΚΟΝΑ 2) στις οποίες οι ξεχωριστές στρώσεις προσανατολίζονται σε διευθύνσεις που ενισχύουν την δύναμη στην πρωταρχική διεύθυνση του φορτίου. Οι μονοδιευθυντικές (unidirectional)  $0^\circ$  στρώσεις είναι εξαιρετικά δυνατές και άκαμπτες στην διεύθυνση  $0^\circ$ , όμως είναι πολύ αδύναμες στην διεύθυνση των  $90^\circ$  επειδή το φορτίο πρέπει να παραληφθεί από την πολύ πιο αδύναμη από το πολυμερές, μήτρα. Ενώ μία ίνα υψηλής αντοχής μπορεί να έχει τάση εφελκυσμού 500 ksi (3447,38 MPa) ή περισσότερο, μία τυπική μήτρα από πολυμερές έχει συνήθως τάση εφελκυσμού μόνο 5 έως 10 ksi (34,47 έως 68,95 MPa) (ΕΙΚΟΝΑ 3). Η διαμήκης τάση και τα φορτία συμπίεσης παραλαμβάνονται από τις ίνες, ενώ η μήτρα διανέμει τα φορτία μεταξύ των ινών στον εφελκυσμό ενώ προλαμβάνει την κάμψη των ινών στην συμπίεση. Η μήτρα παραλαμβάνει πρωταρχικά την διάτμηση μεταξύ των στρώσεων (interlaminar shear) και την εγκάρσια τάση ( $90^\circ$ ). Οι σχετικοί ρόλοι ίνας και μήτρας στον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων συνοπτικά φαίνονται στον ΠΙΝΑΚΑ 1.

Μηχανική Ιδιότητα	Κυρίαρχο συστατικό σύνθετου	
	Ίνα	Μήτρα
Μονοδιευθυντική		
Εφελκυσμός $0^\circ$	√	
Θλίψη $0^\circ$	√	√
Διάτμηση		√
Εφελκυσμός $90^\circ$		√
Laminate (Διαστρωμάτωμα)		
Εφελκυσμός	√	
Θλίψη	√	√
Θλίψη εντός επιπέδου	√	
Ενδοστρωματική διάτμηση		√

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Επίδραση ίνας και μήτρας στις μηχανικές ιδιότητες

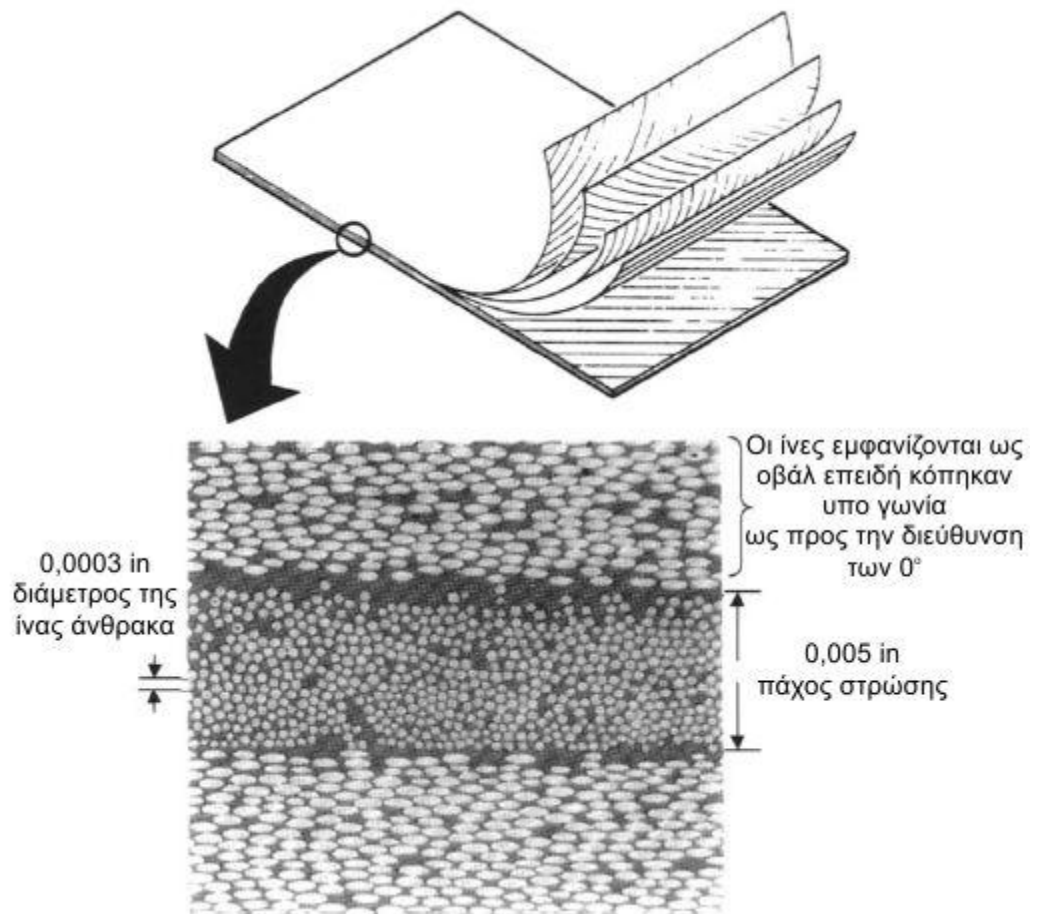


ΕΙΚΟΝΑ 2. Οιωνεί-ισοτροπική διάταξη στρώσεων

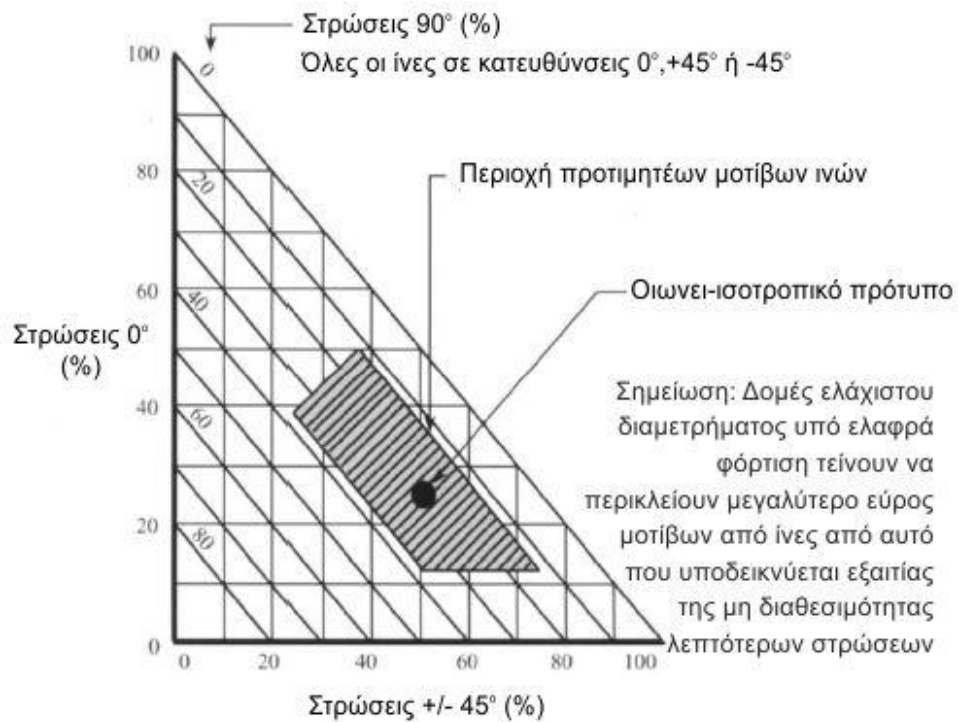


**ΕΙΚΟΝΑ 3.** Ιδιότητες σε εφελκυσμό ινών, μήτρας και σύνθετου

Από τη στιγμή που ο προσανατολισμός των ινών έχει άμεση επίπτωση στις μηχανικές ιδιότητες, θα φαινόταν λογικό να προσανατολίσουμε όσο δυνατόν περισσότερες στρώσεις στην κύρια διεύθυνση παραλαβής του φορτίου. Ενώ αυτή η προσέγγιση μπορεί να είναι δόκιμη για κάποιες κατασκευές, είναι συνήθως απαραίτητο να εξισορροπείται η ικανότητα παραλαβής του φορτίου σ' έναν αριθμό διαφορετικών διευθύνσεων, όπως είναι οι  $0^\circ$ ,  $+45^\circ$ ,  $-45^\circ$  και  $90^\circ$ . Στην ΕΙΚΟΝΑ 4 φαίνεται μια φωτομικρογραφία μιας συνεχούς διασταυρούμενης (cross-plyed) ενίσχυσης από ανθρακόνημα μέσα σε μήτρα εποξικής ρητίνης. Μια ισορροπημένη διαστρωμάτωση με ίσο αριθμό στρώσεων στις κατευθύνσεις  $0^\circ$ ,  $+45^\circ$ ,  $-45^\circ$  και  $90^\circ$  καλείται οιωνοί-ισοτροπική (quasi-isotropic) εφόσον μπορεί να παραλάβει ίσα φορτία και στις 4 διευθύνσεις. Στην ΕΙΚΟΝΑ 5 υπάρχει γραφική αναπαράσταση των προτιμώμενων προσανατολισμών στρώσεων. Αυτές οι διαστρωματώσεις είναι προτιμητέες επειδή είναι αρκετά ισορροπημένες και μπορούν να παραλάβουν φορτία σε πολλαπλές κατευθύνσεις.



**ΕΙΚΟΝΑ 4.** Κατασκευή διαστρωμάτωσης



**ΕΙΚΟΝΑ 5.** Προτιμητέοι προσανατολισμοί στρώσεων

### 2.3 Ίνες (fibers)

Ο πρωταρχικός ρόλος των ινών είναι να παρέχουν δύναμη και ακαμψία. Εν τούτοις, σαν σύνολο, οι ίνες υψηλής αντοχής είναι ψαθυρές, έχουν γραμμική σχέση τάσης – παραμόρφωσης με λίγη ή καθόλου διαρροή, επιδεικνύουν μεγαλύτερες διακυμάνσεις στην αντοχή από τα μέταλλα. Στον ΠΙΝΑΚΑ 2 παρουσιάζεται μια σύνοψη των κυριότερων σύνθετων ενισχυτικών ινών.

Ίνα	Πυκνότητα ( $\frac{\text{lb}}{\text{in}^3} = 27679,9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ )	Αντοχή σε εφελκυσμό (ksi=6,895 MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (msi=6894,757 MPa)	Παραμόρφωση έως αστοχία (Strain to failure) (%)	Διάμετρος (mil=0,0254mm)	Συντελεστής θερμικής διαστολής ( $\frac{10^{-6} \cdot \text{in}}{\text{in} \cdot ^\circ\text{F}} = \frac{1,8 \cdot 10^{-6}}{\text{K}}$ )
E-glass	0,09	500	11,0	4,8	0,36	2,8
S-glass	0,092	650	12,6	5,6	0,36	1,3
Quartz	0,079	490	10,0	5,0	0,35	1,0
Aramid (Kevlar 49)	0,052	550	19,0	2,8	0,47	-1,1
Spectra 1000	0,035	450	25,0	0,7	1,00	-1,0
Carbon (AS4)	0,065	530	33,0	1,5	0,32	-0,2
Carbon (IM-7)	0,064	730	41,0	1,8	0,20	-1,2
Graphite (P-100)	0,078	350	107	0,3	0,43	-1,3
Boron	0,093	520	58,0	0,9	4,00	2,5

#### ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών υψηλής αντοχής

Οι ίνες ύαλου (glass fibers) είναι οι πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενες εξαιτίας της καλής σχέσης μηχανικών ιδιοτήτων – χαμηλού κόστους. Το e-glass (“electrical” glass, «ηλεκτρικό» γυαλί) είναι η πιο κοινή ίνα ύαλου και χρησιμοποιείται εκτενώς σε σύνθετα εμπορικά προϊόντα. Το e-glass είναι μια ίνα χαμηλού κόστους, υψηλής πυκνότητας, χαμηλού μέτρου ελαστικότητας, η οποία έχει καλή αντίσταση κατά της διάβρωσης και ευκολία στην μεταχείριση. Το s-2 glass (“structural” glass, «δομικό» γυαλί) αναπτύχθηκε ως ανταπόκριση στην ανάγκη για μια ίνα μεγαλύτερης αντοχής για δοχεία πίεσης και για συμπαγή κελύφη κινητήρων ρουκετών. Η τιμή της πυκνότητάς του, το επίπεδο απόδοσης και το κόστος κυμαίνονται μεταξύ των αντίστοιχών του e-glass και του άνθρακα. Οι ίνες από χαλαζία (quartz fiber) χρησιμοποιούνται σε πολλές ηλεκτρικές εφαρμογές εξαιτίας της χαμηλής διηλεκτρικής σταθεράς τους, εν τούτοις είναι πολύ ακριβές.

Οι ίνες αραμιδίου (aramid fiber), για παράδειγμα το Kevlar, είναι εξαιρετικά ανθεκτικές οργανικές ίνες με χαμηλή πυκνότητα και επιδεικνύουν εξαιρετική αντοχή στην καταπόνηση (damage tolerance). Παρόλο που έχουν υψηλή τάση εφελκυσμού, δεν έχουν καλή απόδοση στη θλίψη. Είναι επίσης ευαίσθητες στην υπεριώδη ακτινοβολία και η χρήση τους πρέπει να περιορίζεται σε μακροπρόθεσμη λειτουργία σε θερμοκρασίες κάτω από τους 350° F=449,82 K.

Μία ακόμη οργανική ίνα είναι φτιαγμένη από εξαιρετικά υψηλού μοριακού βάρους πολυαιθυλένιο (ultrahigh molecular weight polyethylene, UHMWPE), για παράδειγμα το Spectra. Έχει χαμηλή πυκνότητα με εξαιρετική δυνατότητα απόκρυψης στα radar (radar transparency) και χαμηλή διηλεκτρική σταθερά. Εξαιτίας της χαμηλής πυκνότητας επιδεικνύει πολύ υψηλή ειδική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας σε θερμοκρασία δωματίου. Όμως, όντας πολυαιθυλένιο η χρήση του περιορίζεται μέχρι τους  $290^{\circ}\text{F}=416,48\text{ K}$ . Όπως και το αραμίδιο, το Spectra έχει εξαιρετική αντοχή στην κρούση, όμως πρόβλημα αποτελεί η κακή προσκόλληση στην μήτρα. Βέβαια κατεργασίες με πλάσμα μπορούν να εφαρμοστούν για να βελτιωθεί η προσκόλληση.

Οι ίνες άνθρακα (carbon fiber) περιέχουν τον καλύτερο συνδυασμό ιδιοτήτων αλλά είναι επίσης πιο ακριβές από το γυαλί και από το αραμίδιο. Έχουν χαμηλή πυκνότητα, χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής (CTE, coefficient of thermal expansion) και είναι αγωγιμες. Τα υλικά από ανθρακόνημα είναι κατασκευαστικά πολύ αποδοτικά και επιδεικνύουν εξαιρετική αντοχή στην κόπωση. Είναι επίσης ψαθυρά [κόπωση έως αστοχία (strain-to-failure) λιγότερο από 2%] και επιδεικνύουν χαμηλή αντίσταση σε κρούση. Όντας αγωγιμα, προκαλούν γαλβανική διάβρωση αν έρθουν σε άμεση επαφή με αλουμίνιο. Ανθρακονήματα είναι διαθέσιμα σε ευρύ πεδίο αντοχής (300-1000 ksi) και στιβαρότητας (μέτρο ελαστικότητας 30-145 msi). Με αυτή την ευρεία γκάμα ιδιοτήτων τα ανθρακονήματα ταξινομούνται συχνά όπως φαίνεται και στον ΠΙΝΑΚΑ 3:

- (1) Υψηλής αντοχής (high strength)
- (2) Ενδιάμεσου μέτρου ελαστικότητας
- (3) Υψηλού μέτρου ελαστικότητας

Αεροναυπηγική				
Ιδιότητα	Υψηλή δύναμη, εμπορίου	Υψηλή δύναμη	Ενδιάμεσο μέτρο ελαστικότητας	Υψηλό μέτρο ελαστικότητας
Μέτρο εφελκυσμού (Tensile modulus, msi)	33	32-35	40-43	50-65
Δύναμη εφελκυσμού (Tensile strength, ksi)	550	500-700	600-900	600-800
Επιμήκυνση στην αστοχία (Elongation at failure, %)	1,6	1,5-2,2	1,3-2,0	0,7-1,0
Ηλεκτρική ανθεκτικότητα (Electrical resistivity, $\mu\Omega \cdot cm$ )	1650	1650	1450	900
Θερμική αγωγιμότητα (Thermal conductivity, $\frac{Btu}{ft \cdot h \cdot ^\circ F} = 1,73 \frac{W}{m \cdot K}$ )	11,6	11,6	11,6	29-46
Συντελεστής θερμικής διαστολής στην αξονική διεύθυνση (Coefficient of thermal expansion, axial direction, $10^{-6}/K$ )	-0,4	-0,4	-0,55	-0,75
Πυκνότητα ( $\frac{lb}{in^3}$ )	0,065	0,065	0,065	0,069
Περιεχόμενο σε άνθρακα (%)	95	95	95	+99
Διάμετρος νήματος (Filament diameter, $\mu m$ )	6-8	6-8	5-6	5-8

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.** Ιδιότητες ανθρακονημάτων με βάση το PAN

Οι όροι άνθρακας και γραφίτης χρησιμοποιούνται συχνά για να περιγράψουν το ίδιο υλικό. Όμως τα ανθρακονήματα περιέχουν περίπου 95% άνθρακα και υφίστανται ανθρακοποίηση στους 1800 με 2700 °F (1255,37 έως 1755,37°C), ενώ οι ίνες γραφίτη περιέχουν περίπου 99% άνθρακα, ανθρακοποιούνται πρώτα και μετά γραφιτιάζονται σε θερμοκρασίες μεταξύ των 3600 και 5500 °F (2255,37 και 3310,93 °C αντίστοιχα) . Γενικά, η διαδικασία γραφιτσίας καταλήγει σε ίνα με μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας. Οι ίνες από άνθρακα και γραφίτη κατασκευάζονται από ραιγιόν (rayon), PAN (πολυακρυλονιτρίλιο, polyacrylonitrile) ή από πίσσα με βάση το πετρέλαιο (petroleum-based pitch). Οι ίνες από PAN έχουν τον καλύτερο συνδυασμό ιδιοτήτων. Το rayon αναπτύχθηκε σαν πρόδρομος του PAN αλλά σπανίως χρησιμοποιείται σήμερα, εξαιτίας του υψηλότερου κόστους του και του χαμηλότερου ορίου διαρροής. Οι ίνες από pitch αναπτύχθηκαν επίσης σε χαμηλότερο κόστος εναλλακτικά με το PAN αλλά χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή ινών γραφίτη υψηλού και υπερυψηλού μέτρου ελαστικότητας. Οι ίνες από άνθρακα και από γραφίτη παράγονται σε ευθείες δεσμίδες (untwisted bundles) που ονομάζονται tows. Συνήθη μεγέθη για τα tows είναι 1k, 3k, 6k, 12k και 24k, όπου το k=1000 ίνες. Αμέσως μετά την κατασκευή τους οι ίνες από άνθρακα και γραφίτη συνήθως επεξεργάζονται επιφανειακά για να βελτιωθεί η πρόσφυσή τους στην μήτρα από πολυμερές. Ουσίες sizings, συνήθως εποξικές χωρίς παράγοντα curing εφαρμόζονται συχνά σαν λεπτές επιστρώσεις (1% ή λιγότερο) για να βελτιώσουν την ευκολία στον χειρισμό και για προστασία των ινών κατά τη διάρκεια της ύφανσης ή των άλλων διαδικασιών χειρισμού.

Αρκετές άλλες ίνες χρησιμοποιούνται περιστασιακά για σύνθετα πολυμερή . Ίνες από βόριο ήταν οι αυθεντικές ίνες υψηλής απόδοσης πριν αναπτυχθούν οι ίνες από άνθρακα. Είναι ίνες μεγάλης διαμέτρου που κατασκευάζονται τραβώντας ένα λεπτό σύρμα βολφραμίου μέσα από ένα μακρύ, λεπτό αντιδραστήριο όπου εναποθέτουμε βόριο με χημικό τρόπο υπό τη μορφή ατμού. Από τη στιγμή που κατασκευάζεται μία ίνα την φορά, αντί για χιλιάδες είναι πολύ ακριβή μέθοδος. Εξαιτίας της μεγάλης διαμέτρου και υψηλού μέτρου ελαστικότητας, επιδεικνύει εξαιρετικές ιδιότητες στην συμπίεση. Μειονεκτήματά αυτών των ινών είναι ότι δεν προσαρμόζονται καλά σε πολύπλοκα σχήματα και είναι πολύ δύσκολο να κατεργαστούν. Κεραμικές ίνες υψηλής θερμοκρασίας, όπως είναι τα καρβίδια σιλικόνης (silicon carbide - Nicalon), το οξειδίο του αλουμινίου (aluminium oxide) και η πυριτική βοριο -αλουμίνα (alumina boron silica  $Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 / B_2O_3 \cdot 14SiO_2$ , Nextel) χρησιμοποιούνται συχνά σε σύνθετα με κεραμική βάση αλλά σπάνια σε πολυμερή σύνθετα.

Οι ακόλουθοι παράγοντες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν επιλέγουμε ανάμεσα σε ίνες γυαλιού, αραμιδίου και άνθρακα.

- Αντοχή στον εφελκυσμό (Tensile strength). Εάν η τάση εφελκυσμού είναι η κύρια παράμετρος σχεδιασμού, το e-glass μπορεί να αποτελεί την καλύτερη επιλογή εξαιτίας του χαμηλού κόστους του.
- Μέτρο ελαστικότητας (Tensile modulus). Όταν σχεδιάζουμε με γνώμονα το μέτρο ελαστικότητας, ο άνθρακας έχει διακριτικό πλεονέκτημα έναντι του γυαλιού και του αραμιδίου.
- Αντοχή στη θλίψη (Compression strength). Αν η αντοχή στη θλίψη είναι η πρωταρχική απαίτηση, ο άνθρακας πλεονεκτεί έναντι του γυαλιού και του αραμιδίου. Εξαιτίας της μικρής αντοχής του σε θλίψη το αραμίδιο πρέπει να αποφεύγεται.



- Μέτρο συμπίεσης (Compression modulus). Τα ανθρακονήματα είναι η καλύτερη επιλογή, με το e-glass να έχει τις λιγότερο επιθυμητές ιδιότητες.
- Πυκνότητα. Οι ίνες από αραμιδίο έχουν την χαμηλότερη πυκνότητα, ακολουθούμενες από τις ίνες άνθρακα, στη συνέχεια βρίσκονται οι ίνες από s-2 και τέλος από e-glass.
- CTE. Οι ίνες αραμιδίου και άνθρακα έχουν CTE ελαφρά αρνητικό, ενώ για τα s-2 και e-glass έχει θετική τιμή.
- Αντοχή στην κρούση (impact strength). Οι ίνες από αραμιδίο έχουν εξαιρετική αντοχή στην κρούση ενώ οι ίνες άνθρακα είναι ψαθυρές και πρέπει να αποφεύγονται. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μήτρα έχει επίσης σημαντική επίδραση στην αντοχή στην κρούση.
- Περιβαλλοντική αντίσταση (Environmental resistance). Η επιλογή της μήτρας έχει την μεγαλύτερη επίδραση στην περιβαλλοντική αντίσταση των σύνθετων. Εν τούτοις
  - (1) οι ιδιότητες στις ίνες από αραμιδίο φθίνουν από την υπεριώδη ακτινοβολία και η θερμοκρασία συνεχούς λειτουργίας πρέπει να διατηρείται κάτω από τους 350 °F.
  - (2) Τα ανθρακονήματα υπόκεινται οξειδωση σε θερμοκρασίες που υπερβαίνουν τους 700 °F παρόλο που μακροχρόνια τεστ 1000 ωρών θερμικής οξειδωσης σε πολυαμίδια έχουν δείξει ότι η δύναμη μειώνεται στο εύρος των 500-600 °F.
  - (3) Ουσίες sizings γυαλιού τείνουν να είναι υδρόφιλες και να απορροφούν υγρασία.
- Κόστος. Το e-glass είναι η λιγότερο ακριβή ίνα, ενώ οι ίνες άνθρακα είναι οι ακριβότερες. Όσο μικρότερο είναι το μέγεθος του tow, τόσο πιο ακριβό το ανθρακόνημα. Μεγαλύτερα μεγέθη tow βοηθούν στην μείωση του εργατικού κόστους επειδή περισσότερο υλικό εναποτίθεται με κάθε στρώση (ply). Όμως, μεγάλα μεγέθη tow σε πλεκτό ύφασμα μπορεί να αυξήσουν τις πιθανότητες για κενά και μικρορωγμές της μήτρας (matrix microcracking) εξαιτίας μεγαλύτερων θυλάκων ρητίνης.

## 2.4 Μήτρες (Matrices)

Η μήτρα συγκρατεί τις ίνες στην κατάλληλη θέση, προστατεύει τις ίνες από την τριβή, μεταφέρει φορτία μεταξύ των ινών και παρέχει ενδοστρωματική αντοχή στη διάτμηση (interlaminar shear strength). Μια κατάλληλα επιλεγμένη μήτρα επίσης παρέχει αντίσταση στη θερμοκρασία, στα χημικά και στην υγρασία, έχει μεγάλο λόγο τάσης προς αστοχία (strain-to-failure) και κατεργάζεται θερμικά (curing) σε όσο το δυνατό χαμηλή θερμοκρασία και ακόμη έχει μεγάλη διάρκεια ζωής εκτός κατάψυξης και δεν είναι τοξική. Οι επικρατέστερες θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες που χρησιμοποιούνται για σύνθετες μήτρες (ΠΙΝΑΚΑΣ 4) είναι πολυεστέρες, βινύλ-εστέρες (vinyl esters), εποξικές, βισμαλεϊμίδες (bismaleimides), πολυιμίδια (polyimides) και φαινολικές (phenolics).

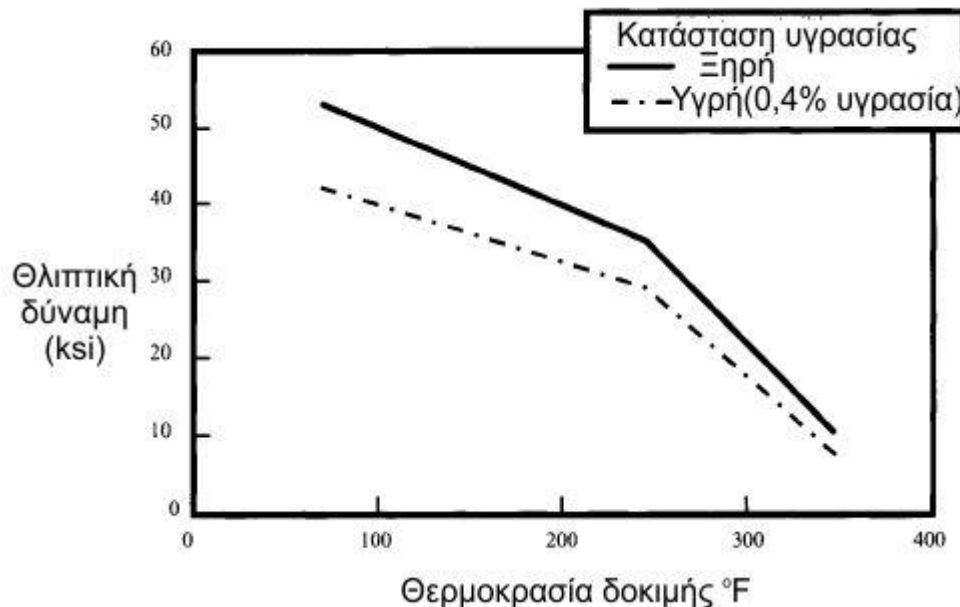
Πολυεστέρες (polyesters)	Χρησιμοποιούνται εκτενώς σε εμπορικές εφαρμογές. Σχετικά ανέξοδοι με ευελιξία στην επεξεργασία. Χρήση για συνεχή και ασυνεχή σύνθετα.
Βινυλεστέρες (Vinyl esters)	Παρεμφερείς με πολυεστέρες αλλά είναι πιο σκληροί και έχουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στην υγρασία.
Εποξικές ρητίνες (epoxies)	Συστήματα μήτρας με υψηλή απόδοση, πρωταρχικά για σύνθετα από συνεχείς ίνες. Μπορεί να χρησιμοποιηθούν για θερμοκρασίες έως $250 - 275^{\circ}\text{F} = 394,26 - 408,15 \text{ K}$ Καλύτερη απόδοση στις υψηλές θερμοκρασίες από τους πολυεστέρες και τους βινυλεστέρες.
Βισμαλειμίδες (bismaleimides)	Μήτρες ρητίνης υψηλών θερμοκρασιών για χρήση στο θερμοκρασιακό εύρος $275 - 350^{\circ}\text{F} = 408,15 - 449,82 \text{ K}$ με επεξεργασία παρόμοια με αυτή των εποξικών. Απαιτούν post cure αυξημένης θερμοκρασίας.
Πολυιμίδια (polyimides)	Συστήματα ρητίνης πολύ υψηλής θερμοκρασίας για χρήση στους $550 - 600^{\circ}\text{F} = 560,93 - 588,70 \text{ K}$ . Πολύ δύσκολα στην επεξεργασία τους.
Φαινολικές ρητίνες (phenolics)	Συστήματα ρητίνης υψηλής θερμοκρασίας με καλή αντίσταση στον καπνό και στη φωτιά. Χρησιμοποιούνται εκτενώς για εσωτερικά αεροσκαφών. Μπορεί να είναι δύσκολα στην επεξεργασία τους.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.** Συγκριτικά χαρακτηριστικά σύνθετων μητρών από ρητίνη

Οι μήτρες για πολυμερή σύνθετα μπορεί να είναι είτε θερμοσκληρυνώμενες (thermoset) ή θερμοπλαστικές (thermoplastic). Οι θερμοσκληρυνώμενες ρητίνες συνήθως αποτελούνται από μια ρητίνη (π.χ. εποξική) και έναν συμβατό παράγοντα curing. Όταν αυτά τα δύο αναμειγνύονται αρχικά σχηματίζουν ένα υγρό χαμηλού ιξώδους το οποίο επεξεργάζεται θερμικά ως αποτέλεσμα είτε μιας εσωτερικά δημιουργούμενης (εξώθερμης) ή μιας εξωτερικά εφαρμοζόμενης πηγής θερμότητας. Η αντίδραση curing σχηματίζει μια σειρά από διασταυρώσεις πλέγματος (cross links) μεταξύ των μοριακών αλυσίδων ούτως ώστε να δημιουργηθεί ένα μεγάλο μοριακό πλέγμα, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα ένα αδιάσπαστο στερεό το οποίο δεν μπορεί να επανεπεξεργαστεί ή να αναθερμανθεί. Από την άλλη μεριά, τα θερμοπλαστικά ξεκινούν ως υλικά που έχουν αντιδράσει πλήρως που δεν δημιουργούν συνδέσμους κατά την θέρμανση. Όταν θερμαίνονται σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία, μπορεί είτε να μαλακώσουν ή να λιώσουν και έτσι μπορούν να επεξεργαστούν αρκετές φορές.

Το πρώτο ζήτημα που πρέπει να ληφθεί υπόψη στην επιλογή ενός συστήματος ρητίνης είναι η θερμοκρασία που απαιτείται για το εξάρτημα. Η θερμοκρασία  $T_g$  (glass transition temperature, θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης) είναι ένας καλός δείκτης της θερμοκρασιακής ικανότητας της μήτρας. Για ένα υλικό από πολυμερές, η  $T_g$  είναι η θερμοκρασία στην οποία μεταβάλλεται και από άκαμπτο, στιλπνό στερεό γίνεται ένα μαλακότερο, ημι-εύκαμπτο υλικό. Σε αυτό το σημείο η δομή του πολυμερούς είναι ακόμα ανέπαφη αλλά οι σύνδεσμοι δεν είναι ακόμα δεσμευμένοι στις θέσεις τους. Μια ρητίνη δεν πρέπει να χρησιμοποιείται πάνω από την  $T_g$  της εκτός και αν η διάρκεια χρήσης της είναι πολύ μικρή (π.χ. στο σώμα ενός πυραύλου). Ένας καλός κανόνας είναι να επιλέγεται μια ρητίνη στην οποία η  $T_g$  είναι  $50^{\circ}\text{F} = 283,15 \text{ K}$  πάνω από την μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας. Από τη στιγμή που οι περισσότερες πολυμερείς ρητίνες απορροφούν υγρασία, η οποία μειώνει την  $T_g$ , δεν είναι ασυνήθιστο να απαιτείται η  $T_g$  να είναι έως και  $100^{\circ}\text{F} = 310,93 \text{ K}$  υψηλότερη από την θερμοκρασία λειτουργίας. Στην ΕΙΚΟΝΑ 6 φαίνεται η επίδραση της

θερμοκρασίας και της υγρασίας στην θερμή-υγρή (hot-wet) αντοχή στη θλίψη ενός συστήματος γυαλιού/εποξικής ρητίνης. Πρέπει να σημειωθεί ότι διαφορετικές ρητίνες απορροφούν υγρασία με διαφορετικούς ρυθμούς και τα επίπεδα κορεσμού μπορεί να είναι διαφορετικά. Συνεπώς η υποψήφια ρητίνη πρέπει να αξιολογηθεί ως προς την περιβαλλοντική της απόδοση. Οι περισσότερες θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες είναι αρκετά ανθεκτικές σε διαλύτες και χημικά.



**ΕΙΚΟΝΑ 6.** Θερμή-υγρή δύναμη θλίψης ύαλου/εποξικής ρητίνης

Γενικά, όσο μεγαλύτερες είναι οι θερμοκρασιακές απαιτήσεις, τόσο περισσότερο ψαθυρή και λιγότερο ανθεκτική σε καταπόνηση είναι η μήτρα. Σκληρυμένες θερμορρυθμιζόμενες ρητίνες είναι διαθέσιμες αλλά είναι πιο ακριβές και η  $T_g$  τους είναι τυπικά χαμηλότερη. Οι ρητίνες υψηλής θερμοκρασίας είναι πιο δαπανηρές αλλά πιο δύσκολες στην επεξεργασία τους.

Η θερμοκρασιακή απόδοση είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί επειδή εξαρτάται από το χρονικό διάστημα παραμονής σε μια θερμοκρασία, αλλά είναι σημαντικό να εξετάσουμε διεξοδικά το περιβάλλον στο οποίο η μήτρα θα προ-σχηματιστεί.

Παρόλο που η επιλεγμένη ίνα συνήθως κυριαρχεί στις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου, η επιλογή μήτρας μπορεί επίσης να επηρεάσει την απόδοση. Κάποιες ρητίνες στεγνώνουν και προσκολλούνται στις ίνες καλύτερα από άλλες, σχηματίζοντας έναν χημικό ή/και μηχανικό δεσμό που επηρεάζει την ικανότητα μεταφοράς φορτίου ίνα-προς-μήτρα. Η μήτρα μπορεί επίσης να υποστεί μικρορωγμές (microcrack) κατά τη διάρκεια του θερμικής επεξεργασίας ή κατά την χρήση. Κοιλότητες με περίσσεια ρητίνης και ψαθυρά συστήματα με ρητίνη είναι ευαίσθητα σε μικροριγματώσεις (microcracking), ειδικά όταν οι θερμοκρασίες κατεργασίας είναι υψηλές και οι θερμοκρασίες χρήσης είναι χαμηλές (π.χ.  $-65\text{ }^\circ\text{F}=219,26\text{ K}$ ), εφόσον αυτή η κατάσταση δημιουργεί πολύ μεγάλη διαφορά στην θερμική διαστολή μεταξύ των ινών και της μήτρας. Σ' αυτή την περίπτωση επίσης σκληρυμένες ρητίνες βοηθούν στην πρόληψη των μικρορωγμών (microcracking) και συχνά σε βάρος της υψηλής θερμοκρασιακής απόδοσης.

Η επιλογή του υλικού της μήτρας μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τις συνθήκες κατεργασίας. Οι ακόλουθοι παράγοντες πρέπει να ληφθούν υπόψη στην επιλογή μια μήτρα από ρητίνη:

➤ Χρόνος ζωής στο δοχείο ή διάρκεια ζωής εκτός ψυγείου (Pot or working life). Αυτό είναι το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η μήτρα διατηρεί τα επιθυμητά χαρακτηριστικά για την προτιθέμενη χρήση. Τυπικά, ο χρόνος ζωής στο δοχείο αναφέρεται σε μη ενισχυμένες ρητίνες (neat resin) και ο χρόνος ζωής εκτός ψυγείου αναφέρεται σε προεμπροτισμένες ίνες (prepregs). Μεγάλη διάρκεια ζωής στο δοχείο (pot-life) είναι επιθυμητός για διεργασίες που χρησιμοποιούν μη ενισχυμένη ρητίνη, όπως είναι οι διαδικασίες περιέλιξης (filament winding), ο εμπροτισμός με μεταφορά ρητίνης στο καλούπι (resin transfer molding) και η μορφοποίηση με εμπάπτιση (pultrusion). Ένας βραχύς χρόνος pot-life απαιτεί συχνές αλλαγές της ρητίνης στο δοχείο (resin bath changes) και αυξημένη απώλεια υλικού (scrap). Ένας μικρός χρόνος pot-life μπορεί επίσης να επηρεάσει αρνητικά την ποιότητα ενός τεμαχίου σε μία υγρή διαδικασία μειώνοντας τον εμπροτισμό (wet-out) των ινών.

➤ Διάρκεια ζωής στην αποθήκη (Shelf life). Αυτό είναι το βάθος χρόνου για το οποίο το υλικό της μήτρας μπορεί να αποθηκευθεί κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος τηρώντας ταυτόχρονα όλες τις απαιτήσεις για τον χειρισμό και την απόδοση του. Τα προεμπροτισμένα θερμορρυθμιζόμενα υλικά αποθηκεύονται συνήθως σε καταψύκτη και έχουν έναν χρόνο ζωής 6-12 μήνες πριν χρειαστεί να επαναπιστοποιηθούν. Θερμορρυθμιζόμενα υλικά των οποίων τα μέρη Α (ρητίνη) και μέρος Β (σκληρυντής) παρέχονται σε διαφορετικά δοχεία, γενικά έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε θερμοκρασία δωματίου (περίπου 2 χρόνια). Παρόλο που δεν αντιδρούν τόσο εύκολα όσο τα προεμπροτισμένα, αλλαγές στο ιξώδες και χημικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα κατά την πάροδο του χρόνου αποθήκευσης. Η συντήρηση σε καταψύκτη επιβραδύνει την διαδικασία και παρατείνει τη διάρκεια ζωής.

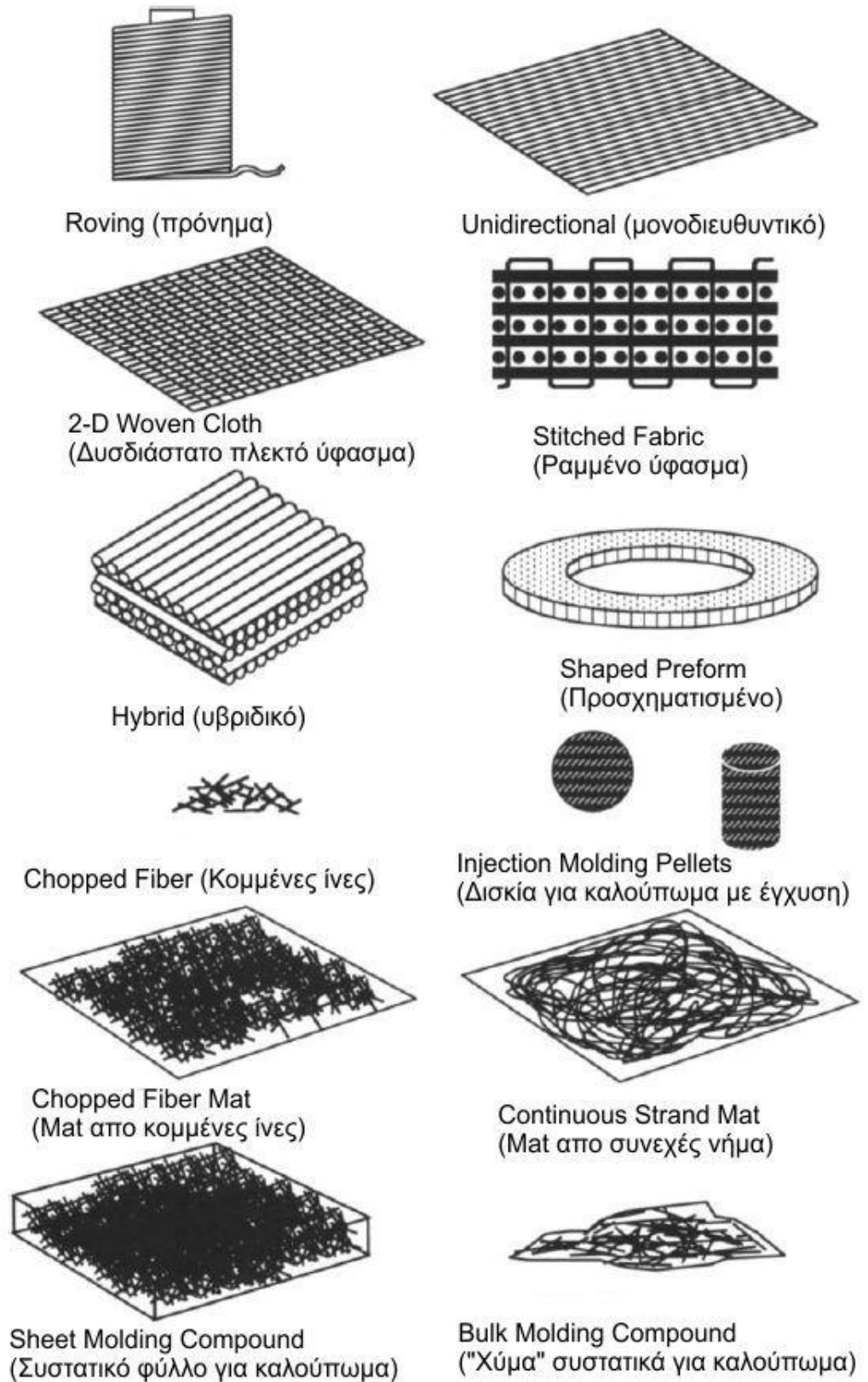
➤ Ιξώδες. Το ιξώδες μιας ρητίνης η οποία δεν έχει υποστεί θερμική κατεργασία μπορεί να περιγραφεί ως η αντίσταση της στην ροή. Μετρείται σε όρους ροής, χρησιμοποιώντας νερό σαν πρότυπο, το οποίο έχει ιξώδες 1cP (centipoises). Οι απαιτήσεις ιξώδους εξαρτώνται από την διεργασία αλλά συνήθως, όσο χαμηλότερο είναι το ιξώδες, τόσο ευκολότερη είναι η κατεργασία και τόσο καλύτερος ο εμπροτισμός της μήτρας στις ίνες. Κατά την θέρμανση της ρητίνης, το ιξώδες αρχικά πέφτει και εν συνεχεία αυξάνει καθώς οι χημικές αντιδράσεις προχωρούν έως ότου πήξει ή αποκτήσει μορφή γέλης («τζελάρει»). Για διεργασίες εμπροτισμού θερμορρυθμιζόμενων, προτιμώνται ιξώδη κάτω από 1000cP. Μια θερμορρυθμιζόμενη ρητίνη θεωρείται ότι έχει «τζελάρει» όταν φθάσει σε ιξώδες 100000cP.

➤ Χρόνος θερμικής επεξεργασίας (Cure time). Για τις θερμορρυθμιζόμενες ρητίνες, ο χρόνος του cure είναι ο χρόνος που απαιτείται για να λάβουν χώρα οι διασταυρώσεις του πλέγματος (cross-linking: σχηματισμός πλευρικών δεσμών μεταξύ διαφορετικών αλυσίδων, στο μόριο του πολυμερούς. Οι διασταυρώσεις πλέγματος αυξάνουν την ακαμψία του μορίου). Τυπικά, ρητίνες με μεγαλύτερη  $T_g$  απαιτούν

μεγαλύτερο χρόνο cure. Οι εποξικές γενικά έχουν χρόνο cure της τάξης των 2-6 h σε αυξημένες θερμοκρασίες. Ένα post-cure μπορεί να μην απαιτείται για κάποιες εποξικές, πολυεστέρες και βινυλεστέρες, επομένως ο αποκλεισμός απαιτήσεων για post-cure πρέπει να αξιολογείται ως ένας τρόπος για να μειωθεί το κόστος επεξεργασίας. Οι ρητίνες με υψηλότερο  $T_g$  (Θερμοκρασία μετάπτωσης γυαλιού, glass transition temperature), όπως είναι οι βισμαλεϊμίδες και τα πολυιμίδια, απαιτούν μεγαλύτερους κύκλους cure και post-cures. Το post-curing αναπτύσσει περαιτέρω μηχανικές ιδιότητες σε υψηλές θερμοκρασίες και βελτιώνει την  $T_g$  της μήτρας για κάποιες ρητίνες, βισμαλεϊμίδες και πολυιμίδια. Πολύ μικροί χρόνοι cure είναι επιθυμητοί για κάποιες διεργασίες, όπως οι κατασκευές με πρέσα (compression molding) και ορισμένες κατεργασίες παραγωγής ανθρακονημάτων π.χ. μορφοποίηση με εμβάπτιση (pultrusion). Οι θερμοκρασίες cure μπορεί να είναι μεταξύ 250 και 350 °F (394,26 και 449,82 K) για εποξικές. Οι θερμοκρασίες cure για βισμαλεϊμίδες έχουν εύρος μεταξύ 350 έως 475 °F (449,82 έως 519,26 K) (συμπεριλαμβανομένου του post-cure). Οι θερμοκρασίες cure για πολυιμίδια βρίσκονται μεταξύ των 600 και των 700 °F (588,70 και 644,26 K).

## 2.5 Μορφές προϊόντων

Υπάρχει πλειάδα μορφών υλικού προϊόντος που χρησιμοποιούνται σε δομές από σύνθετα, κάποια από αυτά εικονίζονται στην ΕΙΚΟΝΑ 7. Οι ίνες μπορεί να είναι συνεχείς ή ασυνεχείς. Μπορεί να είναι προσανατολισμένες ή μη (τυχαίες). Μπορεί να προμηθευτούν ως ξηρές (dry) ίνες ή ως προεμποτισμένες με ρητίνη (pre-impregnated). Δεν είναι όλοι οι συνδυασμοί ίνας και μήτρας διαθέσιμοι σε συγκεκριμένη μορφή, εφόσον η αγορά οδηγεί την διαθεσιμότητα. Όσο περισσότερες διεργασίες απαιτούνται από τον προμηθευτή, τόσο υψηλότερο το κόστος. Για παράδειγμα το προεμποτισμένο ύφασμα είναι πιο ακριβό από το στεγνό πλεκτό (dry woven) ύφασμα. Ενώ οι περίπλοκες στεγνές έτοιμες φόρμες (complex dry performs) είναι ακριβές, μπορεί να μεταφραστούν σε χαμηλότερο κόστος παραγωγής μειώνοντας ή απαλείφοντας την χειρωνακτική εργασία της διαστρωμάτωσης (lay up). Στην περίπτωση που η δομική αποδοτικότητα και το βάρος είναι σημαντικές παράμετροι σχεδίασης, χρησιμοποιούνται μορφές συνεχών ενισχυμένων προϊόντων καθώς οι ασυνεχείς ίνες δίνουν χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες.



**ΕΙΚΟΝΑ 7.** Μορφές προϊόντος που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα

Τα προνήματα (rovings = κάθε χαλαρή δεσμίδα από ίνες, όπως είναι δηλαδή προτού ολοκληρωθεί η επεξεργασία τους), οι δεσμίδες ινών (tows = μη στραμένη δέσμη συνεχών νημάτων) και οι κλωστές (yarns = νήματα που έχουν στραφεί) είναι συλλογές από συνεχείς ίνες. Αυτά αποτελούν την βασική μορφή υλικού το οποίο μπορεί να κοπεί, να υφανθεί, να ραφτεί ή να προεμποτιστεί ούτως ώστε να προκύψουν άλλες μορφές προϊόντος. Είναι η λιγότερο ακριβές μορφές προϊόντος και είναι διαθέσιμες και σε άλλες μορφές ινών. Τα προνήματα και δεσμίδες παρέχονται χωρίς συστροφή (twist), ενώ οι κλωστές έχουν μια μικρή συστροφή για να βελτιωθεί η μεταχείρισή τους. Κάποιες διεργασίες όπως είναι η υγρή εναπόθεση υφασμάτων (wet filament winding) και κάποιες κατεργασίες παραγωγής ανθρακονημάτων π.χ. μορφοποίηση με εμβάπτιση, χρησιμοποιούν προνήματα ως την πρωταρχική μορφή προϊόντος.

Τα συνεχή θερμορρυθμιζόμενα προεμποτισμένα υλικά είναι διαθέσιμα σε πολλούς συνδυασμούς ινών και μήτρας. Προεμποτισμένη (prepreg) είναι μια μορφή ίνας η οποία έχει μια προκαθορισμένη ποσότητα ρητίνης η οποία δεν έχει υποστεί θερμική κατεργασία (uncured) και η οποία έχει εμποτιστεί στην ίνα από τον προμηθευτή υλικού. Προεμποτισμένα προνήματα και ταινίες χρησιμοποιούνται κυρίως σε αυτοματοποιημένες διαδικασίες, όπως είναι το η εναπόθεση υφασμάτων με CNC ή αυτοματοποιημένη διαστρωμάτωση με χρήση ταινιών, ενώ μονοδιευθυντικές προεμποτισμένες ταινίες και προεμποτισμένα υφάσματα χρησιμοποιούνται για διαστρωμάτωση με το χέρι (lay-up). Οι μονοδιευθυντικές προεμποτισμένες ταινίες (unidirectional prepreg tapes) προσφέρουν βελτιωμένες δομικές ιδιότητες σε σχέση με τα πλεκτά prepregs χάρη στην απουσία κυματισμών στις ίνες και στην ικανότητα να σχηματίζονται πιο εύκολα τα σχέδια. Παρόλαυτα τα προεμποτισμένα πλεκτά προσφέρουν αυξημένη ευελιξία (drapeability). Με εξαίρεση τα σχέδια στα οποία επικρατεί η μονοδιευθυντική διάταξη, οι μονοδιευθυντικές ταινίες απαιτούν την τοποθέτηση περισσότερων ξεχωριστών στρώσεων κατά τη διαστρωμάτωση (lay-up). Για παράδειγμα στο πλεκτό ύφασμα για κάθε στρώση  $0^\circ$ , περιλαμβάνεται και μία των  $90^\circ$ . Με μονοδιευθυντικό ύφασμα (UD), μια στρώση  $0^\circ$  και μια ξεχωριστή των  $90^\circ$  πρέπει να τοποθετηθούν πάνω στο καλούπι-εργαλείο. Τα prepregs προμηθεύονται είτε με την απαιτούμενη ποσότητα ρητίνης ή με περίσσεια αυτής. Η προσέγγιση με την περίσσεια ρητίνης βασίζεται στην ροή της μήτρας δια μέσου των στρώσεων, που απομακρύνει τον παγιδευμένο αέρα, ενώ η περίσσεια ρητίνης απομακρύνεται μέσω στρώσεων ροής (bleeder plies) στο τελευταίο στρώμα της διαστρωμάτωσης. Ο αριθμός των στρώσεων ροής που χρησιμοποιούνται στη διαστρωμάτωση υποδεικνύει το τελικό περιεχόμενο σε ίνες και ρητίνη. Ακριβείς υπολογισμοί για τον αριθμό και το βάρος επιφανείας των στρώσεων ροής για ένα συγκεκριμένο prepreg χρειάζονται για να εξασφαλιστούν κατάλληλες φυσικές ιδιότητες. Από τη στιγμή που η προσέγγιση με την ακριβή ποσότητα ρητίνης περιλαμβάνει το τελικό περιεχόμενο βάρος ρητίνης στο ύφασμα, δεν απαιτείται αφαίρεση ρητίνης. Αυτό αποτελεί πλεονέκτημα καθώς μπορούν να ελεγχθούν εύκολα οι όγκοι των ινών και της ρητίνης, παρόλαυτα μπορεί να υπάρχουν περισσότεροι θύλακες αέρα καθώς δεν υπάρχει περίσσεια ρητίνης για να ρέει δια μέσου του τεμαχίου, αφαιρώντας τον επιπλέον αέρα. Οι ιδιότητες των θερμορρυθμιζόμενων prepreg περιλαμβάνουν την ποσότητα του πτητικού (volatile content), την ποσότητα της ρητίνης (resin content), τη ροή της ρητίνης (resin flow), το χρόνο μετάπτωσης σε γέλη (gel time), την κολλώδη ιδιότητα (tack), την παραμόρφωση (drape), τη διάρκεια ζωής αποθήκευσης (shelf time) και τη διάρκεια ζωής εκτός καταψύκτη (out-time). Προσεκτικές

δοκιμές, αξιολόγηση και έλεγχος αυτών των χαρακτηριστικών είναι απαραίτητα για να διασφαλιστεί ότι τα χαρακτηριστικά διαχείρισης των prepreg υλικών είναι βέλτιστα και για να αποκτηθεί η δομική απόδοση του τελικού τεμαχίου.

Το πλεκτό ύφασμα είναι η πλέον κοινή μορφή συνεχούς ξηρού υλικού. Ένα πλεκτό ύφασμα αποτελείται από πλεγμένες ίνες και πιο συγκεκριμένα το στημόνι (warp) και το υφάδι (weft). Το στημόνι είναι η διεύθυνση των 0° καθώς το ύφασμα ξετυλίγεται από το ρολό, ενώ το υφάδι είναι η διεύθυνση των 90°. Συνήθως τα πλεκτά υλικά έχουν μεγαλύτερη ευελιξία (drapeability) απ' ό,τι τα μονοδιευθυντικά ή τα ραμμένα υλικά (stitched). Η μορφή της πλέξης επηρεάζει τα χαρακτηριστικά ευελιξία (drapeability characteristics), τον τρόπο χειρισμού και τις δομικές ιδιότητες του πλεκτού υφάσματος. Πολλά πλεκτά μοτίβα –μορφές είναι διαθέσιμα. Όλες οι πλέξεις έχουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η διάταξη του εξαρτήματος κατά την διάρκεια της επιλογής ίνας. Εντούτοις μπορεί να είναι πολύ δύσκολο να πλεχθούν κάποιες ίνες με υψηλό μέτρο ελαστικότητας εξαιτίας της έμφυτης ψαθυρότητας τους. Πλεονεκτήματα των πλεκτών υφασμάτων περιλαμβάνουν την ευελιξία τους (drapeability), τη δυνατότητα να επιτευχθούν μεγαλύτεροι όγκοι ινών, η δομική αποτελεσματικότητα και η διαθεσιμότητα στην αγορά. Ένα μειονέκτημα του πλεκτού υφάσματος είναι η καμπυλότητα που εισάγεται στην ίνα κατά την ύφανση. Τελειώματα και βοηθητικά στοιχεία τοποθετούνται συνήθως στις ίνες για να διευκολύνουν την διαδικασία ύφανσης και για να ελαχιστοποιήσουν την ζημιά σε αυτές. Είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι το τελείωμα είναι συμβατό με την επιλεγμένη μήτρα όταν προδιαγράψουμε ένα ύφασμα.

Ένα ραμμένο ύφασμα (stitched fabric) αποτελείται από μονοδιευθυντικές ίνες, προσανατολισμένες σε συγκεκριμένες διευθύνσεις που στη συνέχεια έχουν συρραφεί για να σχηματίσουν ένα ύφασμα. Ένα τυπικό ραμμένο σχέδιο περιλαμβάνει στρώσεις με 0°, +45°, 90° και -45° για τη δημιουργία ενός πολυδιευθυντικού υφάσματος. Τα πλεονεκτήματα του περιλαμβάνουν:

(1) Την ικανότητα να ενσωματώνονται εκτός κύριου άξονα (off-axis) προσανατολισμοί καθώς ξετυλίγεται το ύφασμα από το ρολό. Η κοπή off-axis δεν είναι απαραίτητη για πολυδιευθυντικό ραμμένο υφάσμα (multidirectional stitched fabric), γεγονός το οποίο μειώνει το ποσοστό scrap (υπολείμματος) (έως και 25%) συγκρινόμενο με συμβατικά πλεκτά υλικά.

(2) Τα εργατικά κόστη μειώνονται επίσης όταν χρησιμοποιούνται πολυστρωματικά ραμμένα υλικά (multi-ply stitched materials) καθώς απαιτείται να κοπούν και γενικά να χρησιμοποιηθούν λιγότερες στρώσεις κατά την κατασκευή ενός τεμαχίου και

(3) Ο προσανατολισμός των στρώσεων παραμένει ανέπαφος κατά τον χειρισμό χάρη στις ραφές (stitch threads) στον z άξονα.

Τα μειονεκτήματα είναι:

(1) Η διαθεσιμότητα ραμμένων με συγκεκριμένο τρόπο σεντ στρώσεων, δηλαδή σχεδίων. Συνήθως απαιτείται ειδική παραγγελία εξαιτίας των απαιτήσεων του πελάτη, όπως είναι η επιλογή ίνας, ο όγκος της και οι απαιτήσεις στο ράψιμο. Δεν είναι τόσες στον αριθμό οι εταιρείες που ράβουν όσο είναι αυτές που υφάνουν.



(2) Μειώνονται τα χαρακτηριστικά ευελιξίας (drapability) (βέβαια αυτό μπορεί να αποτελεί πλεονέκτημα για τεμάχια με μεγάλη και απλή καμπυλότητα). Προσεκτική επιλογή της κλωστής της ραφής (stitching thread) είναι απαραίτητη για να διασφαλιστεί συμβατότητα με την μήτρα και τις θερμοκρασίες κατεργασίας.

Υβρίδια είναι μορφές ύλης που χρησιμοποιούν δύο ή περισσότερους τύπους ίνας. Κοινά υβρίδια αποτελούν οι ίνες από: γυαλί/άνθρακα (glass/carbon), γυαλί/αραμίδιο (glass/aramid), αραμίδιο/άνθρακα (aramid/carbon). Τα υβρίδια χρησιμοποιούνται για την εκμετάλλευση των ιδιοτήτων χαρακτηριστικών κάθε τύπου ενίσχυσης. Κατά μία έννοια τα υβρίδια είναι ένας «συμβιβασμός» ενίσχυσης που επιτρέπει αυξημένη ευελιξία σχεδίασης. Τα υβρίδια μπορεί να είναι interply (δύο εναλλασσόμενες στρώσεις), intraply (παρόντα σε μία στρώση) ή σε επιλεγμένες περιοχές. Τα υβρίδια από γυαλί/άνθρακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόληψη της γαλβανικής διάβρωσης του αλουμινίου από τον άνθρακα. Η υβριδοποίηση σε συγκεκριμένες περιοχές γίνεται συνήθως για να δυναμώσουμε ή να κάνουμε περισσότερο άκαμπτο τοπικά ένα τεμάχιο. Τα υβρίδια άνθρακα/αραμιδίου έχουν χαμηλές θερμικές τάσεις σε σύγκριση με άλλα υβρίδια εξαιτίας των παρόμοιων CTE's τους, αυξημένου μέτρου ελαστικότητας και αντοχής στην συμπίεση σε σχέση μ' ένα σχέδιο μόνο με αραμίδιο και αυξημένη αντοχή σε σχέση με ένα σχέδιο αποκλειστικά με άνθρακα. Τα υβρίδια από άνθρακα/e-glass έχουν καλύτερες ιδιότητες σε σχέση με ένα σχέδιο μόνο από e-glass, αλλά και έχουν χαμηλότερο κόστος από ένα σχέδιο το οποίο αποτελείται μόνο από ίνες άνθρακα. Το CTE κάθε τύπου ίνας σ' ένα υβρίδιο χρειάζεται προσεκτική αξιολόγηση για να διασφαλιστεί ότι δεν εισάγονται υψηλές εσωτερικές τάσεις στην διαστρωμάτωση κατά τη θερμική επεξεργασία (cure), ειδικά όταν αυτή γίνεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

Το προμορφοποιημένο (preform) είναι μια προσχηματισμένη ινώδης ενίσχυση η οποία έχει μορφοποιηθεί με θετικό πυρήνα-άξονα πριν την τοποθέτηση στο καλούπι. Το σχήμα του προμορφοποιημένου μοιάζει πολύ με το σχήμα του τελικού τεμαχίου. Ένα απλό πολυστρωματικό ραμμένο ύφασμα δεν αποτελεί προμορφοποιημένο εκτός και αν μορφοποιηθεί κοντά στο τελικό του σχήμα. Το προμορφοποιημένο είναι η πιο ακριβή μορφή ξηρής, συνεχούς, προσανατολισμένης ίνας, με την χρήση της όμως μπορεί να μειωθεί πολύ η εργασία κατασκευής. Προμορφοποιημένα υφάσματα μπορούν να φτιαχτούν χρησιμοποιώντας προνήματα, κομμένες, πλεκτές, ραμμένες ή μονοδιευθυντικές μορφές υλικού. Αυτές οι ενισχυτικές ίνες σχηματίζονται και διατηρούνται στις θέσεις τους με συρραφή, συνδετήρες ή συγκολλητές, τύλιγμα ή τρισδιάστατη πλέξη.

Τα πλεονεκτήματα των προμορφοποιημένων περιλαμβάνουν χαμηλό εργατικό κόστος, ελάχιστη φύρα υλικού (scrap), μειωμένο ξέφτισμα των πλεκτών ή των ραμμένων υλικών, βελτιωμένη ανοχή σε καταπόνηση για τρισδιάστατα ραμμένα ή πλεκτά προμορφοποιημένα και οι επιθυμητοί προσανατολισμοί των ινών παραμένουν «κλειδωμένοι» στην θέση τους. Τα μειονεκτήματα περιλαμβάνουν τα υψηλά κόστη για προμορφοποιημένα, ανησυχία για τον εμποτισμό των ινών σε πολύπλοκα σχήματα, προβλήματα συμβατότητας των συνδετήρων ή των συγκολλητών με την μήτρα και περιορισμένη ευελιξία στην περίπτωση που απαιτηθούν αλλαγές στο σχέδιο. Ένα κοινό ελάττωμα είναι το να βρίσκονται τα προμορφοποιημένα εκτός ανοχών, το οποίο καθιστά δύσκολη την τοποθέτηση στο εργαλείο και απαραίτητη την αφαίρεση υλικού.

Η χρήση προμορφοποιημένων δεν είναι κατάλληλη για όλες τις εφαρμογές. Όλα τα ζητήματα πρέπει να αξιολογηθούν προσεκτικά πριν γίνει επιλογή ενός προμορφοποιημένου υλικού. Αν το εξάρτημα δεν έχει ιδιαίτερα πολύπλοκη μορφή τα χρήματα που αποταμιεύονται από την μείωση του εργατικού κόστους ίσως δεν αντισταθμίζουν το κόστος του προμορφοποιημένου. Κάθε εφαρμογή πρέπει να αξιολογείται ξεχωριστά για να καθοριστεί αν η προσέγγιση με το προμορφοποιημένο προσφέρει τελικά πλεονεκτήματα στο κόστος και στην ποιότητα.

Οι κομμένες ίνες (chopped fiber) κατασκευάζονται με μηχανική κοπή των προνημάτων, των κλωστών ή των δεσμίδων σε μικρά μήκη, τυπικά  $\frac{1}{4}$  έως 2 ίντσες. Είναι πολύ σημαντικό τα ελάχιστα μήκη των κομμένων ινών να διασφαλίζουν μέγιστη ικανότητα ενίσχυσης. Οι φρεζαρισμένες ίνες, με σύνηθες μήκος  $\frac{1}{32}$  έως  $\frac{1}{4}$ , έχουν χαμηλό λόγο μήκους προς διάμετρο, που παρέχει ελάχιστη δύναμη και επομένως δεν πρέπει να αποτελεί επιλογή για δομικές εφαρμογές. Η αντοχή του συνθέτου μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με αυξημένο μήκος ίνας. Οι ακαμψία επηρεάζεται πολύ λιγότερο από το μήκος της ίνας. Μήκη κομμένων ινών μεγαλύτερα από 1-2 ίντσες δεν προσφέρουν κανένα δομικό πλεονέκτημα επειδή η πλήρης αποδοτικότητα της τυχαίας ίνας έχει ήδη επιτευχθεί. Οι κομμένες ίνες γυαλιού (chopped glass fibers) συχνά εμβαπτίζονται σε ρητίνες θερμορρυθμιζόμενες ή θερμοπλαστικές σε μορφή μικρών σφαιριδίων (pellets) για χύτευση με έγχυση.

Κομμένες ή μπλεγμένες ίνες συνδυάζονται με ένα συνδετικό υλικό και σχηματίζουν μπλοκ υλικού το οποίο ονομάζεται mat ή veil. Με τον όρο veil χαρακτηρίζουμε ένα λεπτό mat το οποίο χρησιμοποιείται για την βελτίωση της εξωτερικής επιφάνειας μιας κατασκευής από σύνθετο που κατασκευάζεται με καλούπι. Αυτή η μορφή υλικού χρησιμοποιείται εκτενώς σε εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία, τη βιομηχανία και τη ναυπηγική, όπου απαιτείται υψηλής ποιότητας, πρώτης κλάσης (class-A), επιφανειακό φινίρισμα. Αυτές είναι πολύ οικονομικές μορφές προϊόντος, με πιο κοινή ίνα το e-glass.

Άλλες ίνες μπορεί να είναι διαθέσιμες σε μορφή mat αλλά είναι γενικά ακριβές εξαιτίας της ειδικής φύσης του προϊόντος. Προς το παρόν, τα carbon mats είναι ασυνήθη λόγω της χαμηλής ζήτησης. Κάποια carbon veils, για προστασία από το φως ή την ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (EMI), είναι διαθέσιμα αλλά είναι ακριβά. Ιστορικά, η αεροναυπηγική βιομηχανία δεν έχει δείξει ενδιαφέρον σ' αυτή την μορφή προϊόντος εξαιτίας της απουσίας δομικής αποδοτικότητας και το αντίστοιχο μειονέκτημα στο βάρος εξαιτίας της ασυνεχούς ενίσχυσής του. Από την άλλη πλευρά, η αυτοκινητοβιομηχανία που χρησιμοποιεί ευρύτατα mats, δεν διατίθεται να πληρώσει το τίμημα του κόστους για τα υλικά από ανθρακόνημα.

Τα υλικά σε μορφή φύλλων για χρήση σε καλούπια (sheet molding compounds, SMCs), αποτελούνται από επίπεδα φύλλα ή από κομμένες, τυχαία προσανατολισμένες ίνες, συνήθως μήκους 1-2 ιντσών, με μια μήτρα B-stage, η οποία συνίσταται συνήθως από ίνες e-glass μέσα σε ρητίνη πολυεστέρα (polyester) ή βινυλεστέρα (vinyl ester). Το υλικό είναι διαθέσιμο είτε σε ρολό (roll) είτε σε φύλλα κομμένα εκ των προτέρων (pre-cut).

Τα υλικά για μαζική παραγωγή και χρήση σε καλούπια (bulk molding compounds, BMCs), είναι επίσης κοντά, τυχαία προσανατολισμένα προ εμποτισμένα υλικά, εντούτοις οι ίνες είναι μόνο  $\frac{1}{8}$  με  $\frac{1}{4}$ της ίντσας μακριές και το επίπεδο ενίσχυσης είναι μικρότερο. Ως

αποτέλεσμα οι μηχανικές ιδιότητες για σύνθετα BMC είναι χαμηλότερες από τις αντίστοιχες για τα SMC. Τα BMC είναι διαθέσιμα σε μορφή πολτού (doughlike bulk) ή υφίστανται διέλαση σε μπιγιέτες (logs) για ευκολότερο χειρισμό. Οι βινυλεστερικές, οι πολυεστερικές και οι φαινολικές είναι οι πιο κοινές χρησιμοποιούμενες μήτρες για τα BMC. Κάποιες φορές, για διευκόλυνση στην ορολογία, τα κομμένα προ εμποτισμένα, που χρησιμοποιούνται για καλούπωμα υπό συμπίεση (compression molding), αναφέρονται ως BMC.

Ο ΠΙΝΑΚΑΣ 5 παρουσιάζει μία σύνοψη μερικών από τις μορφές προϊόντων και των κατεργασιών τους, ενώ ο ΠΙΝΑΚΑΣ 6 παρέχει μια σχετική σύγκριση μεταξύ της χρήσης ξηρής ίνας/ σκέτης ρητίνης (dry fiber/heat resin) και προεμποτισμένου (prepreg) υλικού.

Διαδικασία Μορφή υλικού	Pultrusion (μορφοποίηση με εμβάπτιση)	Resin Transfer molding (καλούπωμα με μεταφορά ρητίνης)	Compression molding (καλούπωμα υπό συμπίεση)	Filament winding (περιέλιξη υλικού)	Hand lay-up (χειρωνακτική διαστρωμάτωση)	Auto tape laying (αυτόματη στρώση ταινίας)
<b>Ασυνεχής</b>						
Sheet molding compound			■			
Bulk molding compound			■			
<b>Τυχαία συνεχής</b>						
Swirl mat (Περιστρεμμένα mat)/Neat resin (σκέτη ρητίνη)	■	■	■	■	■	
<b>Προσανατολισμέ νη συνεχής</b>						
Unidirectional tape (μονοδιευθυντική ταινία)			■		■	■
Woven prepreg (πλεκτό prepreg)			■		■	
Woven fabric (πλεκτό ύφασμα)/Neat resin (σκέτη ρητίνη)	■	■		■	■	
Stitched material (ραμμένο υλικό) /Neat resin (σκέτη ρητίνη)		■				
Prepreg roving (προεμποτισμένο πρόνημα)				■		
Roving (Πρόνημα)/Neat resin (Σκέτη ρητίνη)	■			■	■	
Preform (προσχηματισμένο)/ Neat resin (Σκέτη ρητίνη)		■				

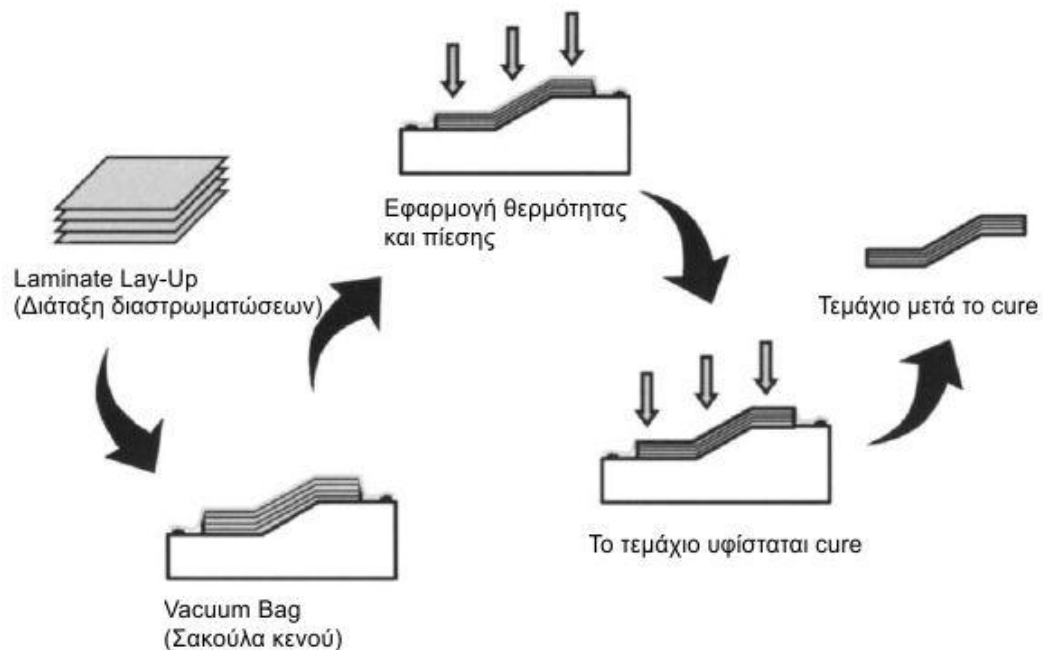
**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.** Τυπικές μορφές προϊόντος υλικού και διαδικασίες

	Dry fiber/Neat resin (Ξηρή ίνα/ Σκέτη ρητίνη)	Prepreg
Κόστος	Χαμηλότερο	Υψηλότερο
Shelf life (διάρκεια ζωής αποθήκευσης)	Καλύτερος	Χειρότερος
Αποθήκευση	Καλύτερη	Χειρότερη
Συμπεριφορά υλικού (material handling)		
➤ Drapability (ευελιξία)	Καλύτερη	Χειρότερη
➤ Tack (κολλώδης ιδιότητα)	Χειρότερο	Καλύτερο
Έλεγχος ρητίνης	Χειρότερο	Καλύτερο
Έλεγχος όγκου ίνας	Χειρότερος	Καλύτερος
Ποιότητα τεμαχίου	Χειρότερη	Καλύτερη

**ΠΙΝΑΚΑΣ 6.** Σύγκριση ξηρής ίνας/Σκέτης ρητίνης (Dry fiber/Neat resin) και προεμποτισμένου (prepreg)

## 2.6 Σύνοψη των διαδικασιών παραγωγής

Το διαστρωμάτωση προεμποτισμένων υλικών (lay up) είναι η διαδικασία κατά την οποία ξεχωριστές στρώσεις τοποθετούνται πάνω σ' ένα εργαλείο και μετά υπόκεινται θερμική επεξεργασία (curing), όπως φαίνεται στην ΕΙΚΟΝΑ 8.



**ΕΙΚΟΝΑ 8.** Διαδικασία lay-up για προεμποτισμένο υλικό

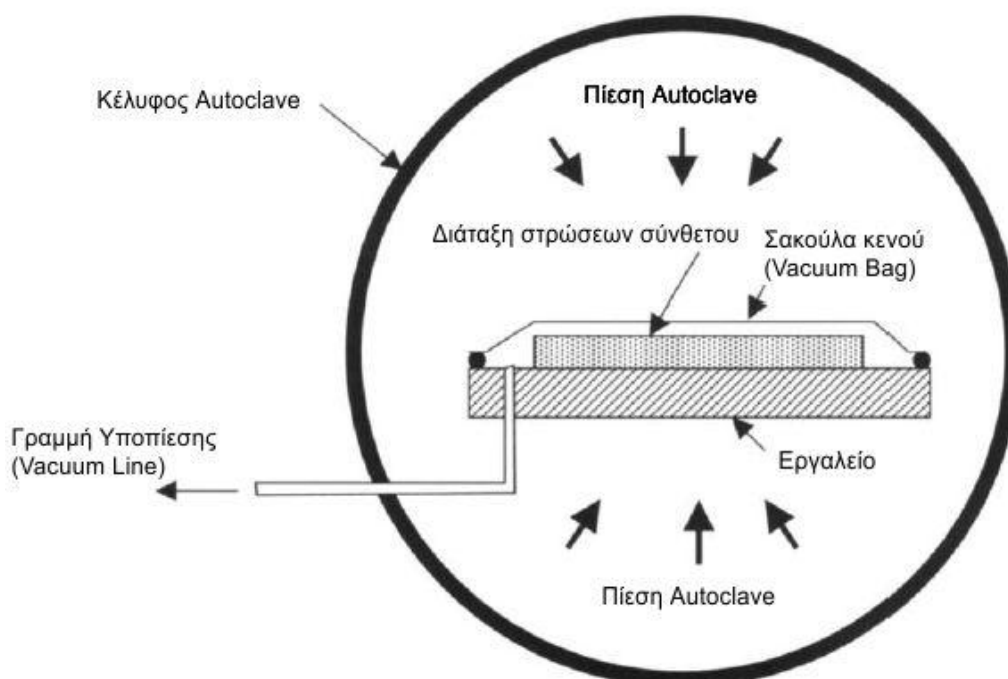
Οι στρώσεις τοποθετούνται στις απαιτούμενες διευθύνσεις και στα σωστά πάχη. Εν συνεχεία μια λεπτή νάιλον σακούλα κενού τοποθετείται γύρω από το υλικό και γίνεται αναρρόφηση ώστε να απομακρυνθεί ο αέρας που υπάρχει μεταξύ των στρώσεων. Το τεμάχιο εντός της σακούλας τοποθετείται εντός κλιβάνου ή εντός autoclave (αυτόκλειστος θάλαμος οπού αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις) και υφίσταται θερμική κατεργασία

(cure) για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, θερμοκρασία και πίεση. Σε περίπτωση που απαιτείται curing σε κλίβανο, η μέγιστη πίεση που μπορεί να επιτευχθεί είναι η ατμοσφαιρική (14,7 psia ή λιγότερο). Ένα autoclave (**ΕΙΚΟΝΑ 9**) εργάζεται με βάση την αρχή της διαφορικής πίεσης αερίου. Η σακούλα κενού (vacuum bag) εκκενώνεται για να απομακρυνθεί ο αέρας και το autoclave παρέχει πίεση αερίου στο τεμαχίο. Ο θάλαμος περιέχει ένα σύστημα θέρμανσης με ανεμιστήρα για την κυκλοφορία του θερμού αερίου. Ένα autoclave παρέχει το εξής πλεονέκτημα: μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολύ μεγαλύτερες πιέσεις (π.χ. 100 psig) με αποτέλεσμα καλύτερη συμπίεση, μεγαλύτερα ποσοστά όγκου ινών, λιγότερα κενά και πορώδες. Πρέσες μπορεί να χρησιμοποιηθούν επίσης γι' αυτή την διαδικασία αλλά έχουν κάποια μειονεκτήματα: (1) Το μέγεθος του τεμαχίου περιορίζεται από το μέγεθος του εμβόλου της πρέσας.

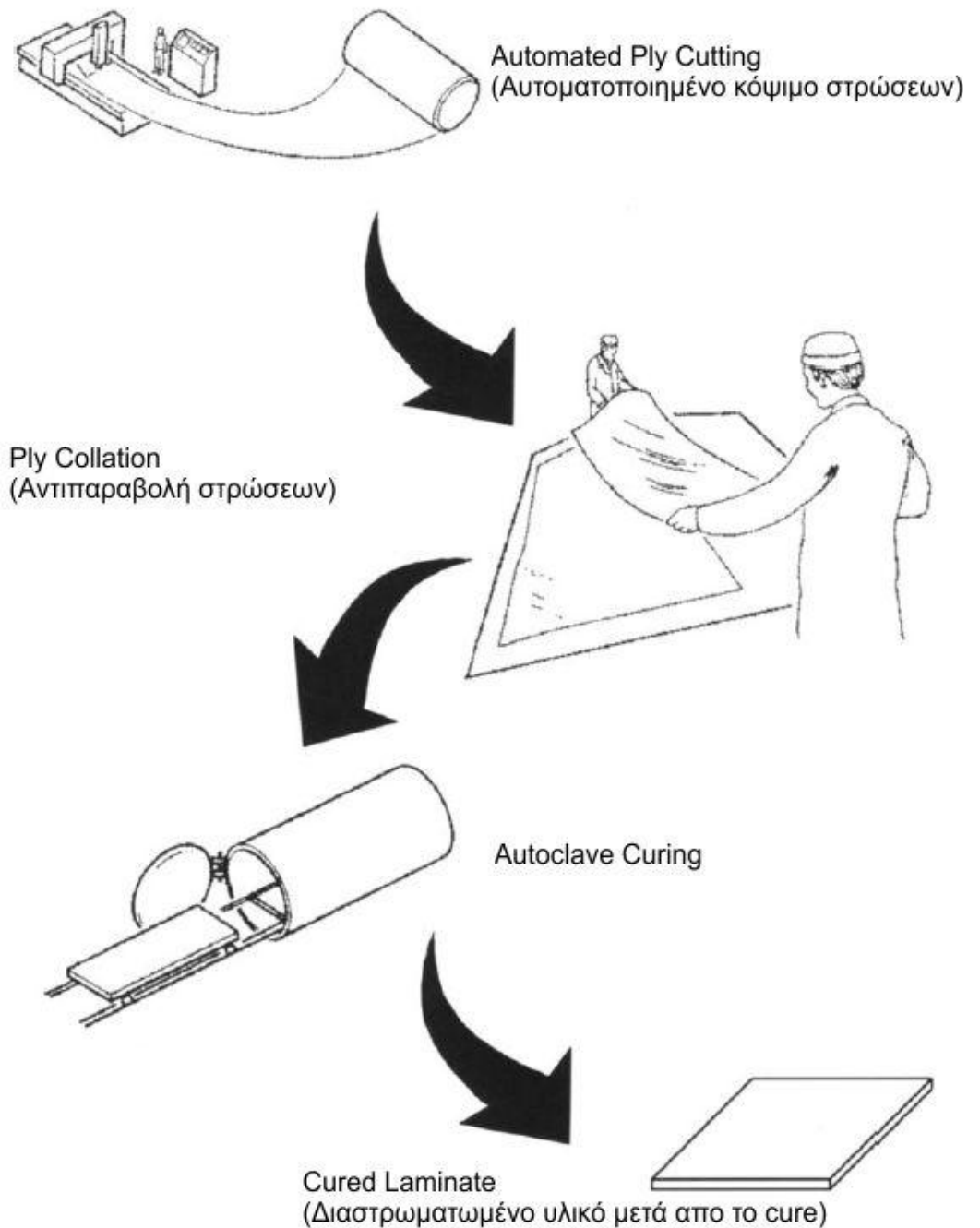
(2) Τα έμβολα μπορούν να δημιουργήσουν μεγάλα ή και μικρά σημάδια πίεσης αν οι πλάκες δεν είναι παράλληλες και τέλος,

(3) Είναι δύσκολο να παραχθούν πολύπλοκα σχέδια.

Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες διαδικασίες για την παραγωγή συνθέτων υψηλής απόδοσης στην αεροναυπηγική είναι: αυτοματοποιημένη κοπή των υφασμάτων για τις διαστρωματώσεις, χειρωνακτική ταξινόμηση, διαστρωμάτωση και επεξεργασία σε autoclave (**ΕΙΚΟΝΑ 10**). Παρόλο που η χειρωνακτική διαστρωμάτωση, είναι ικανή για την κατασκευή τεμαχίων υψηλής ποιότητας και πολύπλοκης γεωμετρίας. Από τη στιγμή που το κόστος είναι σημαντική παράμετρος, υπάρχει εκτενής έρευνα που διεξάγεται για την ανεύρεση περισσότερων οικονομικών μορφών υλικών προϊόντων και διεργασιών.

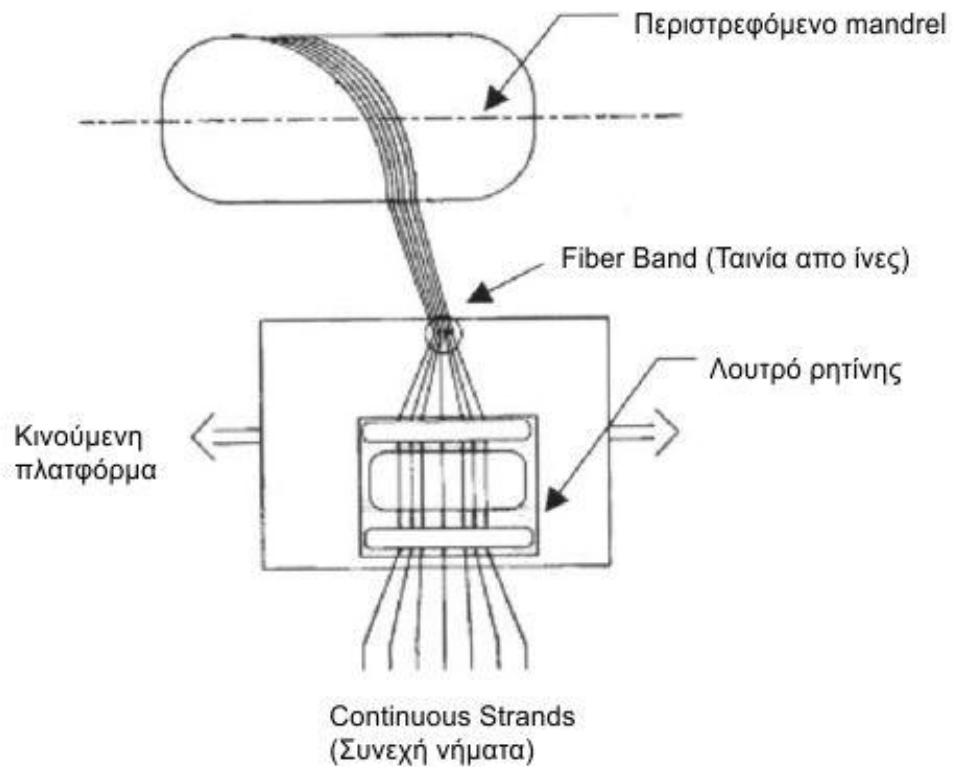


**ΕΙΚΟΝΑ 9.** Αρχή του curing σε autoclave



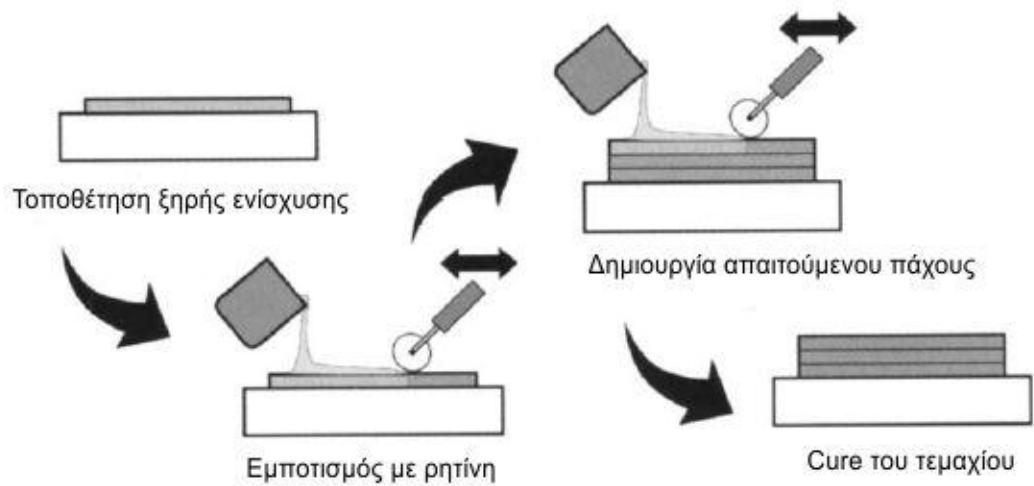
**ΕΙΚΟΝΑ 10.** Παραδοσιακό lay-up και cure σε autoclave

Η περιέλιξη υλικού (filament winding) (ΕΙΚΟΝΑ 11) είναι μια κατεργασία που χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια για την κατασκευή υψηλά αποδοτικών δομών, που αποτελούν σώματα εκ περιστροφής ή σχεδόν σώματα εκ περιστροφής. Η πιο κοινή διαδικασία είναι η υγρή περιέλιξη (wet winding), κατά την οποία προνήματα ξηρών ινών περνούν μέσα από λουτρό ρητίνης πριν από την περιέλιξη στο εργαλείο μορφής (mandrel). Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει και με προ εμποτισμένα προνήματα ή δεσμίδες. Το curing διεξάγεται συνήθως μέσα σε κλίβανο με ή χωρίς σακούλα κενού. Εγκάρσια περιέλιξη (hoop windings) εφαρμόζεται πάνω σε διαχωριστικά φύλλα για να παρέχεται πίεση συμπίεσης κατά τη διάρκεια του cure.



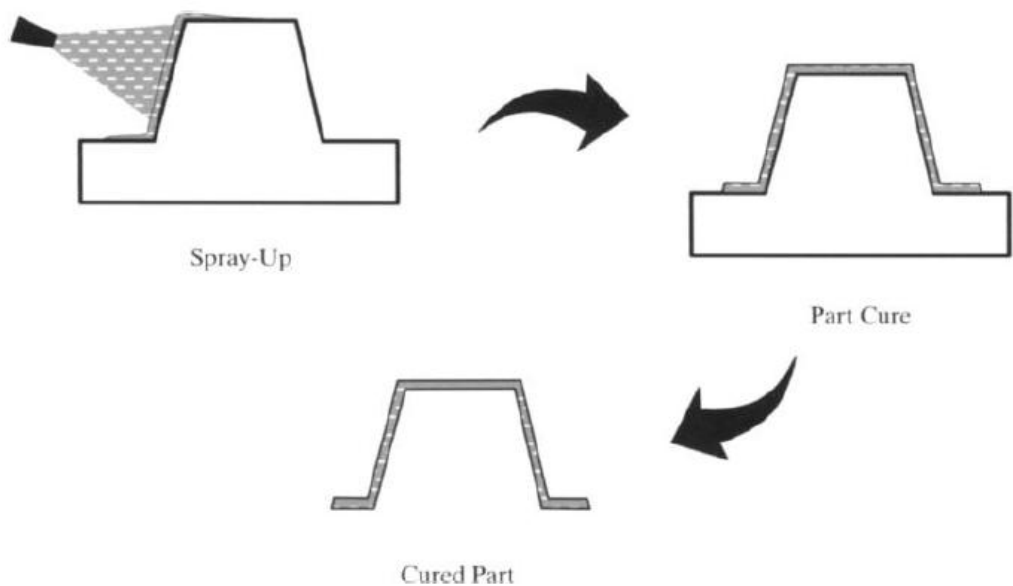
**ΕΙΚΟΝΑ 11.** Περιέλιξη υλικού (*filament winding*)

Η υγρή αναπόθεση (wet lay-up) (όπως φαίνεται στην ΕΙΚΟΝΑ 12) χρησιμοποιείται συχνά για την κατασκευή μεγάλων δομών όπως είναι οι σκελετοί για γιοτ. Μπορεί να είναι οικονομικά αποδοτική διαδικασία όταν η απαιτούμενη ποσότητα είναι μικρή. Ξηρή ενίσχυση, συνήθως πλεκτό ύφασμα ή υλικό mat, τοποθετείται με τα χέρια, μια στρώση την φορά. Κατά την διάρκεια ή πριν από το lay-up κάθε στρώση εμποτίζεται με ρητίνη χαμηλού ιξώδους. Αφού η στρώση έχει τοποθετηθεί στο lay-up, απομακρύνεται η περίσσεια ρητίνης και αέρα με χειροκίνητους κυλίνδρους και συμπιέζονται οι στρώσεις. Μετά το lay-up μπορεί να γίνει cure σε θερμοκρασία δωματίου ή και σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Συχνά το cure διεξάγεται χωρίς σακούλα υποπίεσης, εντούτοις πίεση κενού βοηθά στην βελτίωση της ποιότητας διαστρωμάτωσης. Από την στιγμή που το cure συνήθως διεξάγεται σε θερμοκρασία δωματίου ή σε χαμηλές θερμοκρασίες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί πολύ οικονομικός εξοπλισμός (π.χ. ξύλο) για ελαχιστοποίηση του κόστους.



**ΕΙΚΟΝΑ 12.** Διαδικασία υγρής εναπόθεσης (*wet lay-up process*)

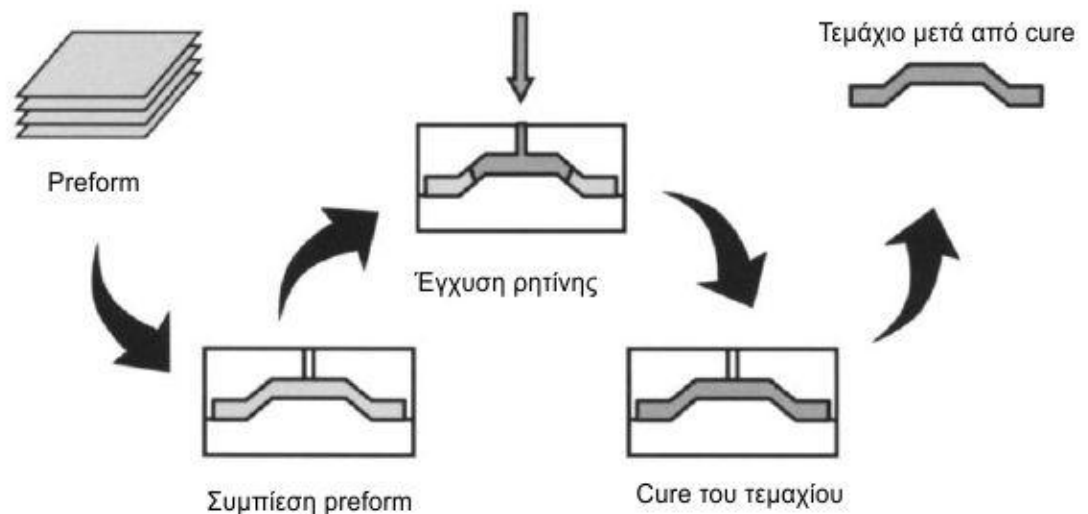
Ο ψεκασμός (spray-up) (ΕΙΚΟΝΑ 13) είναι πιο οικονομικά αποδοτική διεργασία από την υγρή εναπόθεση (*wet lay-up*), αλλά οι μηχανικές ιδιότητες είναι αρκετά χαμηλότερες εξαιτίας της χρήσης τυχαία προσανατολισμένων κομμένων ινών. Κανονικά, συνεχή προνήματα από γυαλί τροφοδοτούνται σ' ένα ειδικό πιστόλι το οποίο τεμαχίζει τις ίνες σε μικρά μήκη και ταυτόχρονα τις αναμειγνύει είτε με πολυεστερική ή βινυλεστερική ρητίνη η οποία ψεκάζεται πάνω στο εργαλείο. Χειροκίνητη συμπίεση με κυλίνδρους χρησιμοποιείται πάλι για την συμπίεση της διαστρωμάτωσης . Curing με σακούλες κενού μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα του τεμαχίου αλλά συνήθως δε χρησιμοποιείται. Από τη στιγμή που οι ίνες είναι κοντές και ο προσανατολισμός είναι τυχαίος, αυτή η διαδικασία δεν χρησιμοποιείται για την κατασκευή δομικών στοιχείων που φέρουν φορτία.



**ΕΙΚΟΝΑ 13.** Διαδικασία *spray-up*

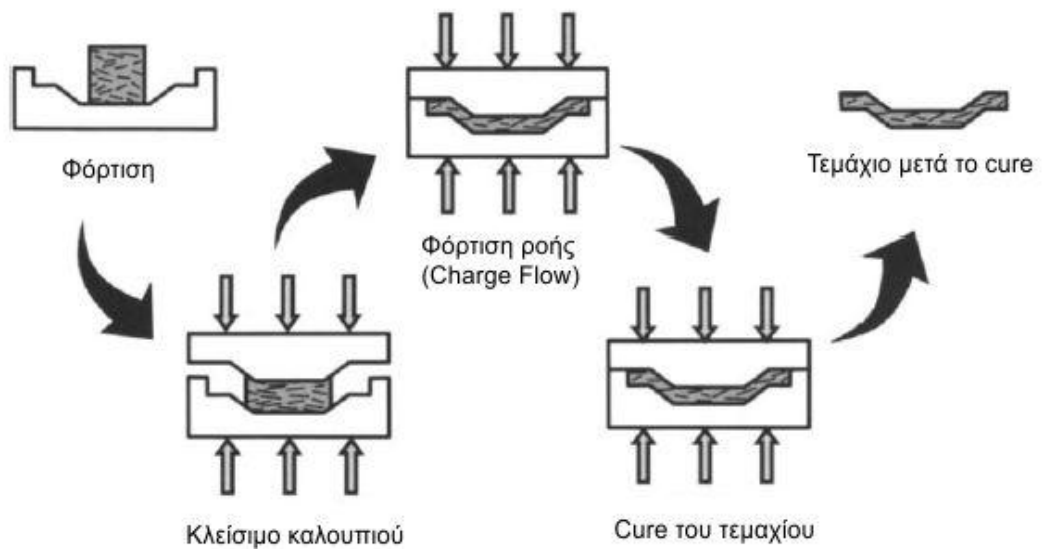


Ο όρος υγρό καλούπωμα (liquid molding), καλύπτει μια εκτενή σειρά διεργασιών. Στο καλούπωμα με μεταφορά ρητίνης (resin transfer molding, RTM), που απεικονίζεται στην ΕΙΚΟΝΑ 14, μια ξηρή προφόρμα ή διαστρωμάτωση τοποθετείται σε ανάλογη μεταλλική μήτρα και ρητίνη χαμηλού ιξώδους εγχέεται υπό πίεση για να γεμίσει την μήτρα. Εφόσον αυτή η διαδικασία είναι γίνεται σε καλούπια ακριβείας, είναι ικανή να διατηρήσει πολύ αυστηρές ανοχές στις διαστάσεις. Η μήτρα μπορεί να περιέχει εσωτερικά θερμαντήρες ή μπορεί να τοποθετηθεί σε εμβολοφόρο πρέσα με θερμαινόμενες πλάκες (heated platen press). Άλλες παραλλαγές αυτής της διαδικασίας περιλαμβάνουν την μεταφορά ρητίνης με υποπίεση {vacuum-assisted RTM (VARTM)}, στην οποία χρησιμοποιείται ένα μονόπλευρο εργαλείο μαζί με σακούλα κενού. Αντί να γίνεται η έγχυση της ρητίνης υπό πίεση, το κενό τραβάει την ρητίνη δια μέσου ενός μέσου ροής που βοηθά να εμποτιστεί η προφόρμα.



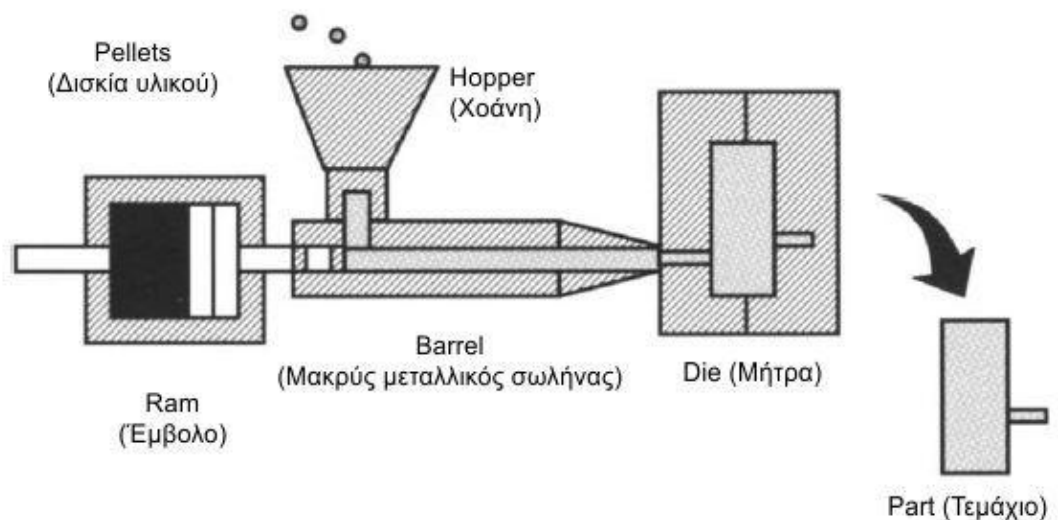
**ΕΙΚΟΝΑ 14.** Καλούπωμα με μεταφορά ρητίνης (Resin transfer molding)

Το καλούπωμα με συμπίεση (compression molding) (ΕΙΚΟΝΑ 15) είναι μια ακόμα διεργασία που γίνεται σε καλούπια ακριβείας και χρησιμοποιούνται είτε ασυνεχές είτε τυχαία προσανατολισμένα SMC ή BMC. Μια προκαθορισμένη ποσότητα υλικού συγκεκριμένου βάρους τοποθετείται μεταξύ των δύο τμημάτων του καλουπιού και μετά εφαρμόζονται πίεση και θερμοκρασία. Το τηγμένο σύνθετο ρέει για να γεμίσει το καλούπι και μετά γίνεται θερμική επεξεργασία πολύ γρήγορα μέσα σε 1-5 λεπτά ανάλογα με τον τύπο του πολυεστέρα ή του βινυλεστέρα που χρησιμοποιείται. Τα θερμοπλαστικά σύνθετα, που συνήθως αποτελούνται από ίνες γυαλιού ή πολυπροπυλένιο, καλουπώνονται επίσης υπό πίεση για την αυτοκινητοβιομηχανία.



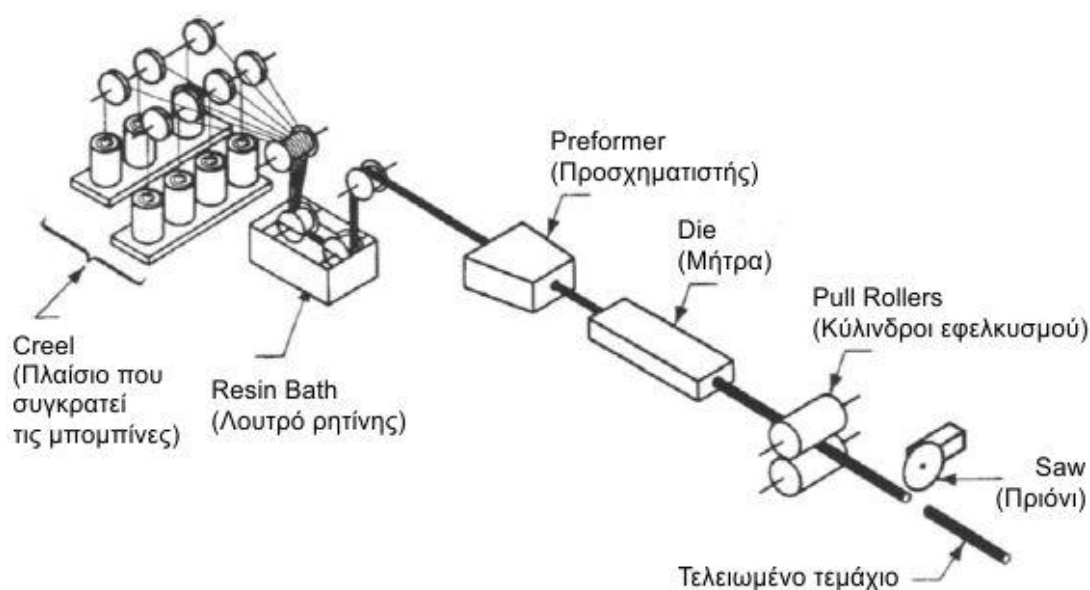
**ΕΙΚΟΝΑ 15 .** Καλούπωμα με συμπίεση (*Compression molding*)

Το καλούπωμα με έγχυση (injection molding) (ΕΙΚΟΝΑ 16) είναι μια διεργασία υψηλού όγκου, ικανή για κατασκευή τεμαχίων μικρού έως μεσαίου μεγέθους. Η ενίσχυση είναι συνήθως ίνες κομμένου γυαλιού με ρητίνη θερμοπλαστική ή θερμορρυθμιζόμενη, παρότι η πλειονότητα των εφαρμογών χρησιμοποιούν θερμοπλαστικές ρητίνες επειδή είναι γρηγορότερες στην κατεργασία τους και έχουν υψηλότερη αντοχή. Κατά το injection molding, σφαιρίδια (pellets) που περιέχουν ενσωματωμένες ίνες ή κομμένες ίνες με ρητίνη, τροφοδοτούνται στη χοάνη μιας μηχανής εκβολής. Εκεί θερμαίνονται έως την θερμοκρασία τήξεώς τους και στη συνέχεια εγχέονται υπό υψηλή πίεση με μια μεταλλική μήτρα καλούπι. Αφότου το θερμοπλαστικό τεμάχιο κρυώσει ή το θερμορρυθμιζόμενο υποστεί curing, απομακρύνεται και ο νέος κύκλος ξεκινά.



**ΕΙΚΟΝΑ 16.** Καλούπωμα με έγχυση (*injection molding*)

Η διαδικασία παραγωγής με μορφοποίηση με εμβάπτιση, pultrusion (Διαδικασία παραγωγής υλικών). Η εξαγωγή των διαβρεγμένων με ρητίνη υλικών όπως ράβδων, σωλήνων και δομικών σχημάτων σε μια συνεχή διατομή. Αφού περάσουν μέσα από μια δεξαμενή με ρητίνη, τα υλικά εφελκύνονται σε καλούπτι και κατεργάζονται ώστε να αποκτήσουν την επιθυμητή διατομή), εικονίζεται στην ΕΙΚΟΝΑ 17, είναι μια μάλλον εξειδικευμένη διεργασία παραγωγής συνθέτων, η οποία είναι ικανή για την κατασκευή μακρών τεμαχίων σταθερού πάχους. Ξηρά προνήματα από e glass κανονικά εφελκύνονται δια μέσου λουτρού ρητίνης και στη συνέχεια προ-μορφοποιούνται στο επιθυμητό σχήμα πριν να εισαχθούν σε θερμό καλούπτι. Τα mats και τα veils είναι συχνά ενσωματωμένα στο τεμάχιο. Η θερμική κατεργασία λαμβάνει χώρα μέσα στο καλούπτι, το επεξεργασμένο τεμάχιο εφελκύεται στο επιθυμητό μήκος και κόβεται. Τα επικρατέστερα συστήματα ρητίνης είναι πολυεστέρες και βινυλεστέρες που υφίστανται γρήγορο curing.



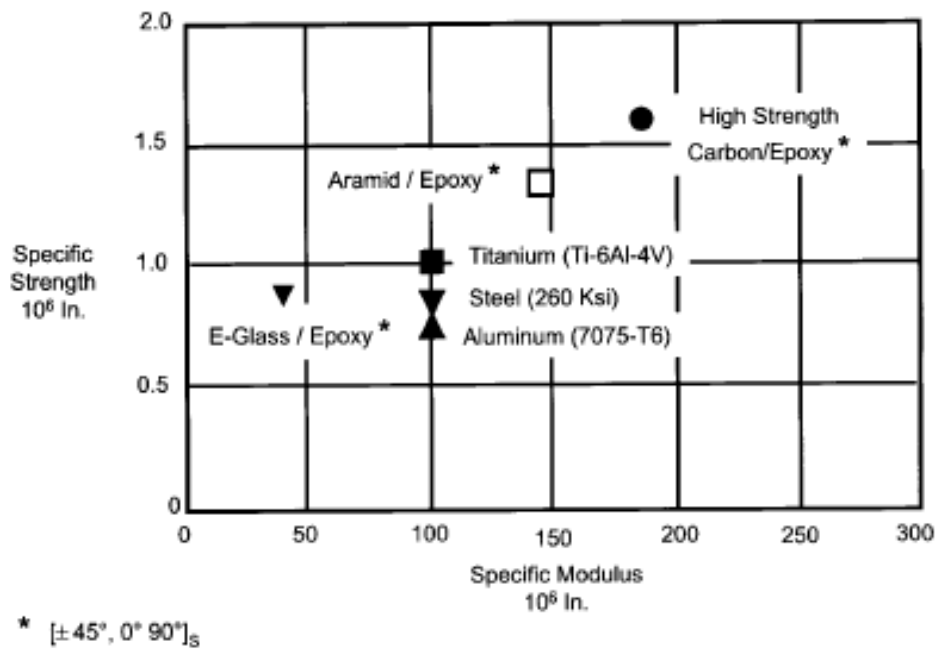
**ΕΙΚΟΝΑ 17.** Μορφοποίηση με εμβάπτιση (pultrusion)

## 2.7 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σύνθετων υλικών

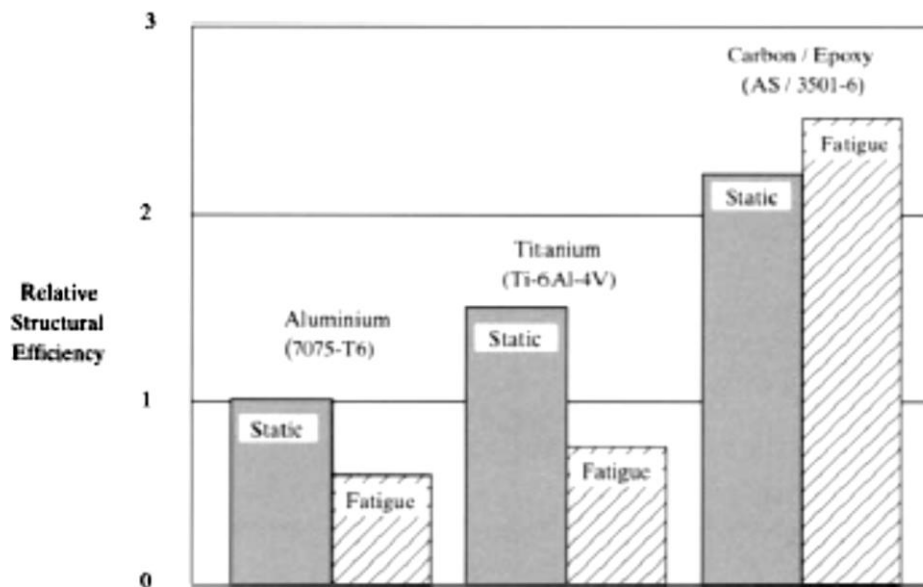
Τα πλεονεκτήματα των σύνθετων είναι πολλά, περιλαμβάνοντας το μικρότερο βάρος, την δυνατότητα προσαρμογής της διαστρωμάτωσης για βέλτιστη αντοχή και δυσκαμψία, βελτιωμένη διάρκεια κόπωσης (fatigue life), αντίσταση στην διάβρωση και με καλή πρακτική σχεδιασμού, μειωμένο κόστος συναρμολόγησης χάρη στα λιγότερα λεπτομερή εξαρτήματα και συνδέσμους.

Η ειδική δύναμη (specific strength)  $\left(\frac{\text{Δύναμη}}{\text{Πυκνότητα}}\right)$  και το ειδικό μέτρο ελαστικότητας (modulus)  $\left(\frac{\text{Μέτρο ελαστικότητας}}{\text{Πυκνότητα}}\right)$  ινών υψηλής δύναμης, ειδικά άνθρακα, είναι υψηλότερα από αυτών άλλων συμβατών μεταλλικών κραμάτων αεροναυπηγικής (ΕΙΚΟΝΑ 18). Αυτό μεταφράζεται σε μεγαλύτερη εξοικονόμηση βάρους, που έχει ως αποτέλεσμα βελτιωμένη απόδοση, υψηλότερο ωφέλιμο φορτίο, ευρύτερο φάσμα και εξοικονόμηση καυσίμου. Η

δομική αποδοτικότητα carbon/epoxy, Ti-6Al-4V και 7075-T6 αλουμινίου συγκρίνονται συνολικά στην ΕΙΚΟΝΑ 19.



**ΕΙΚΟΝΑ 18.** Σύγκριση ειδικών ιδιοτήτων



**ΕΙΚΟΝΑ 19.** Σχετική δομική αποδοτικότητα υλικών αεροσκαφών

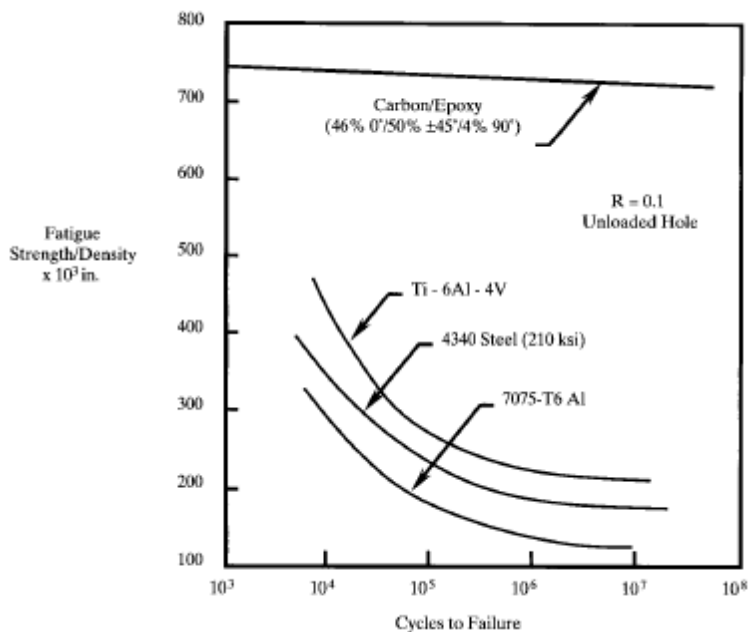
Απόφαση σχεδιασμού	Συνήθη trade-offs	Τυπικά χαμηλότερο κόστος	Τυπικά υψηλότερο κόστος
Τύπος ίνας	Κόστος, δύναμη, ακαμψία (stiffness), πυκνότητα (βάρος), αντοχή σε πρόσκρουση (impact strength), ηλεκτρική αγωγιμότητα (electrical conductivity), περιβαλλοντική σταθερότητα (environmental stability), διάβρωση (corrosion), θερμική διαστολή (thermal expansion)	E-glass	Carbon
Μέγεθος δέσμης (σε περίπτωση που έχει επιλεγεί carbon)	Κόστος, Όγκος ίνας (fiber volume), βελτιωμένος εμποτισμός ίνας (fiber wet-out), δομική απόδοση (structural efficiency) (μείωση πάχους διαστρωμάτωσης), επιφανειακό φινίρισμα (surface finish)	12K tow	3K tow
Modulus (μέτρο ελαστικότητας) ίνας (σε περίπτωση που έχει επιλεγεί carbon)	Κόστος, ακαμψία (stiffness), βάρος, ψαθυρότητα (brittleness)	Carbon χαμηλότερο modulus	Carbon με υψηλότερο modulus
Μορφή ίνας (συνεχής-ασυνεχής, continuous, discontinuous)	Κόστος, δύναμη, βάρος, όγκος ίνας (fiber volume), πολυπλοκότητα σχεδιασμού (design complexity)	Τυχαία, ασυνεχής	Προσανατολισμένη και συνεχής
Μήτρα (matrix)	Κόστος, θερμοκρασία λειτουργίας (service temperature), Δύναμη συμπίεσης (compressive	Βινυλεστερική και πολυεστερική	Για υψηλή θερμοκρασία-πολυαμιδική Για χαμηλή-μέση θερμοκρασία-εποξική

		strength), διαμητικές δυνάμεις μεταξύ στρώσεων (interlaminar shear), περιβαλλοντική απόδοση (environmental performance) (αντίσταση ρευστού, Σταθερότητα σε UV, απορρόφηση υγρασίας), αντοχή σε καταπόνηση (damage tolerance), χρόνος ζωής (shelf life), επεξεργασιμότητα (processability), θερμική διαστολή (thermal expansion)		Για σκληρότητα (toughness)-σκληρυμένη εποξική ρητίνη (εξαρτάται πως ορίζεται ως «υψηλότερη» απόδοση, υψηλή θερμοκρασία, σκληρότητα και ανώτερες μηχανικές ιδιότητες)
Μορφή υλικού	σύνθετου	Κόστος (υλικού και εργασίας), συμβατότητα επεξεργασίας (process compatibility), έλεγχος όγκου ίνας (fiber volume control), χειρισμός υλικού (material handling), εμποτισμός ινών (fiber wet-out), υπολείμματα υλικού (material scrap)	Μορφή βάσης-Καθαρή Ρητίνη / Προνήματα	Προ-εμποτισμένο (Prepreg) (Η μορφή του υλικού δεν καθοδηγείται από την απόδοση, αλλά συνήθως καθορίζεται από την διαδικασία κατασκευής)

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.** Συνήθεις αντισταθμιστικοί παράγοντες (trade-offs) επιλογής σύνθετων υλικών

Η διάβρωση των κραμάτων αλουμινίου είναι σημαντικό κόστος και συνεχές πρόβλημα συντήρησης για εμπορικά και στρατιωτικά αεροσκάφη. Η αντίσταση στην διάβρωση των συνθέτων μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα σημαντική εξοικονόμηση χρημάτων σε κόστος συντήρησης. Ενώ τα σύνθετα από carbon fiber προκαλούν γαλβανική διάβρωση του αλουμινίου, αν οι ίνες εναποτεθούν σε άμεση επαφή με την μεταλλική επιφάνεια, συνδέοντας ηλεκτρική μόνωση υφάσματος από γυαλί σε όλες τις επιφάνειες που έρχονται σ' επαφή με το αλουμίνιο, εξαλείφουμε το πρόβλημα. Η αντοχή σε κόπωση των συνθέτων συγκρινόμενη με αυτή των μετάλλων υψηλής αντοχής φαίνεται στην ΕΙΚΟΝΑ 20. Όσο χρησιμοποιούνται λογικά επίπεδα τάσεων κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού, η κόπωση των σύνθετων από

carbon fiber δεν θα αποτελέσει πρόβλημα.



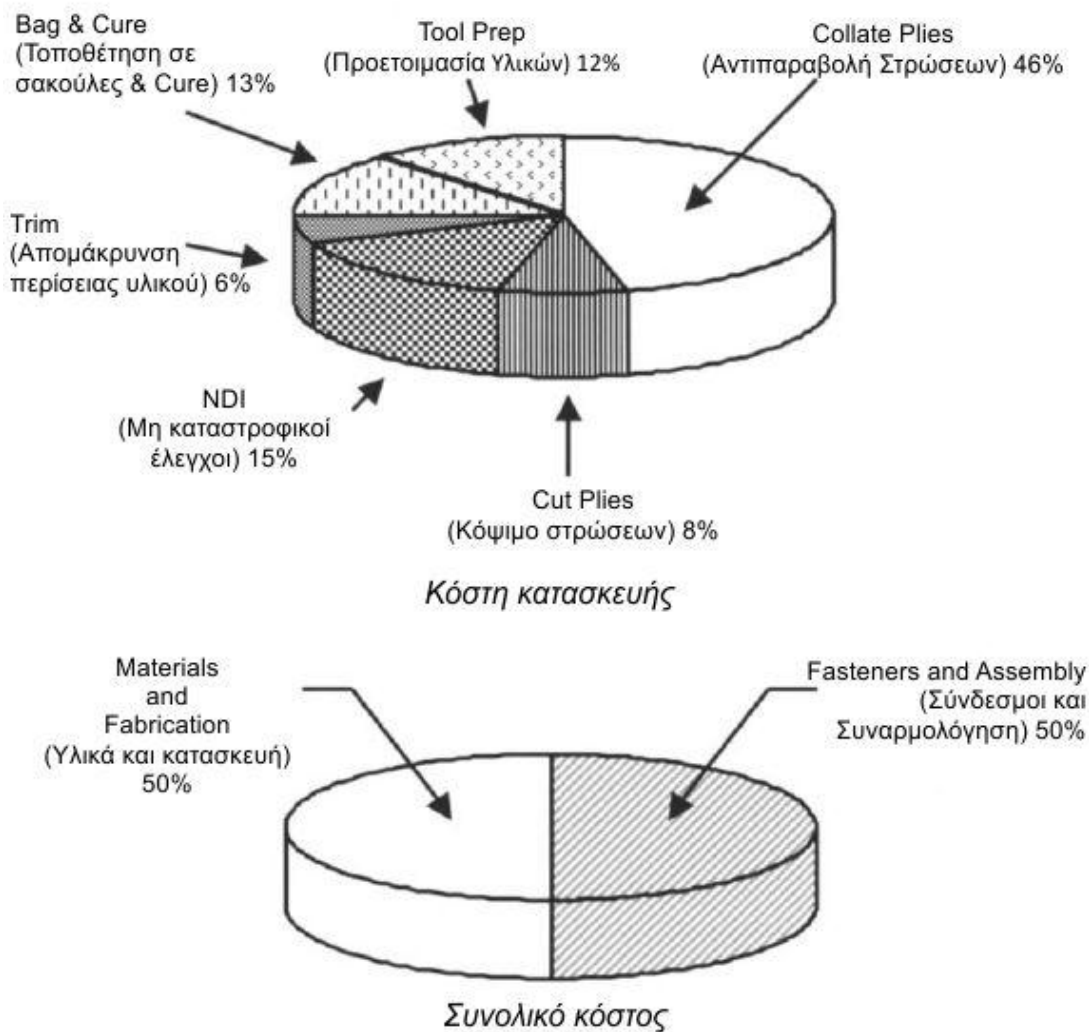
**ΕΙΚΟΝΑ 20.** Ιδιότητες κόπωσης υλικών αεροδιαστημικής

Το κόστος συναρμολόγησης συνήθως αποτελεί το 50 % του κόστους πλαισίου αεροσκάφους. Τα σύνθετα προσφέρουν την δυνατότητα να μειωθούν σημαντικά οι εργασίες συναρμολόγησης και ο αριθμός συνδέσμων. Πολύπλοκα εξαρτήματα μπορούν να συνδυαστούν σε μια μόνο κατασκευή κατά τη διάρκεια είτε του αρχικού cure ή της δευτερογενούς σύνδεσης με κόλλημα (adhesive bonding).

Μειονεκτήματα των συνθέτων περιλαμβάνουν: Το κόστος πρώτης ύλης τους το οποίο είναι υψηλό. Συνήθως επισύρουν υψηλά κόστη συναρμολόγησης και παραγωγής, επηρεάζονται δυσμενώς από την θερμοκρασία και την υγρασία, είναι αδύναμα σε διευθύνσεις «εκτός επιπέδου» («out-of-plane»), όπου η μήτρα φέρει το πρωτεύον φορτίο και δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται όπου υπάρχουν πολύπλοκες σύνθετες καταπονήσεις (load paths) (π.χ. σε μούφες (lugs) και σε ενώσεις (fittings) - εξαρτημάτων). Τα σύνθετα είναι επιρρεπή σε καταπόνηση από κρούση και αποκόλληση στρώσεων (delamination) ή διαχωρισμό τους (ply separations) μπορεί να συμβούν. Είναι πιο δύσκολο να επισκευαστούν απ' ό,τι οι μεταλλικές δομές.

Το μεγαλύτερο κόστος στην παραγωγή ενός συμβατικού τεμαχίου από σύνθετα υλικά με χειρωνακτικό (hand) lay-up είναι το κόστος της διαστρωμάτωσης (collating) των στρώσεων. Αυτό το κόστος (βλέπε ΕΙΚΟΝΑ 21) γενικά αποτελεί 40-60 % του κόστους παραγωγής, ανάλογα με την πολυπλοκότητα του τεμαχίου. Όπως έχει ειπωθεί και προηγουμένως, ένα από τα ενδεχόμενα πλεονεκτήματα των συνθέτων είναι να γίνεται θερμική επεξεργασία ή συγκόλληση ενός αριθμού εξαρτημάτων μαζί, ούτως ώστε να μειωθεί το κόστος

συναρμολόγησης και ο αριθμός απαιτούμενων συνδέσμων.

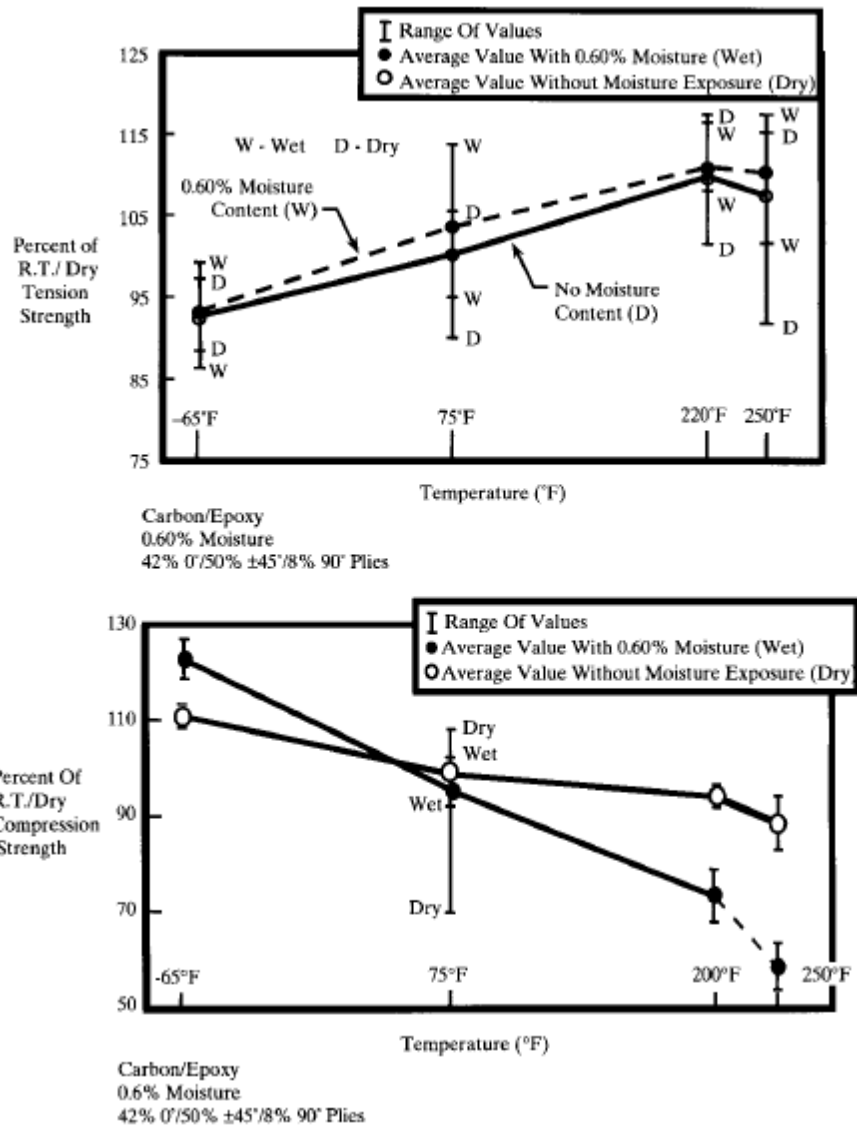


**EIKONA 21.** Κόστη για σύνθετα υλικά

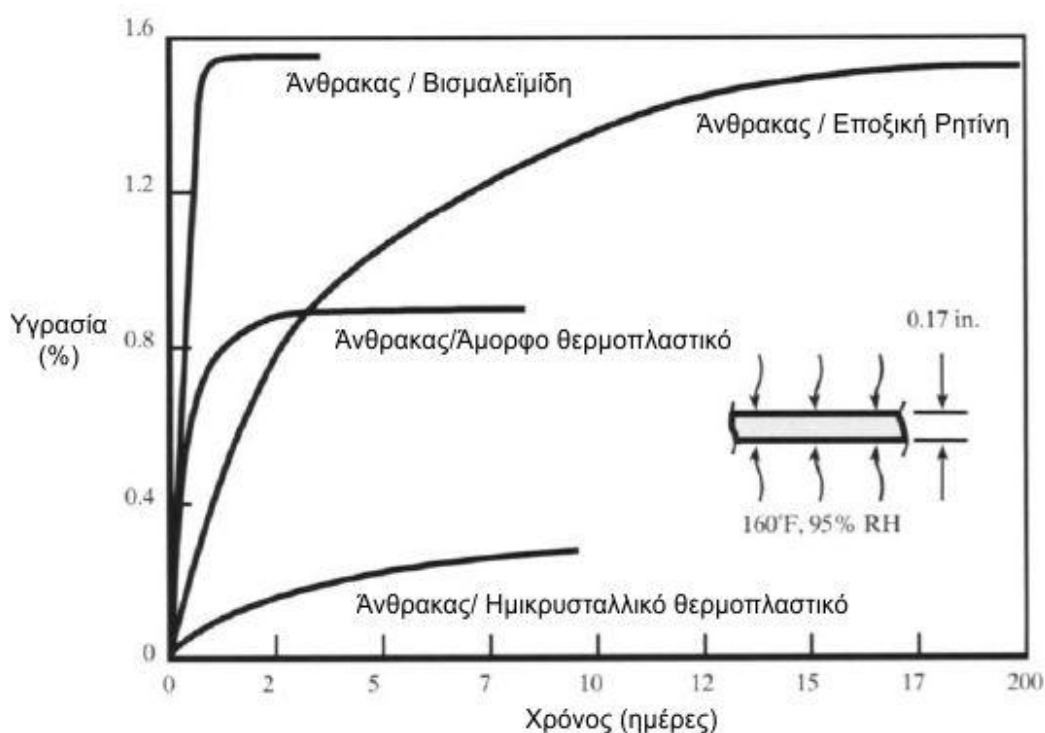
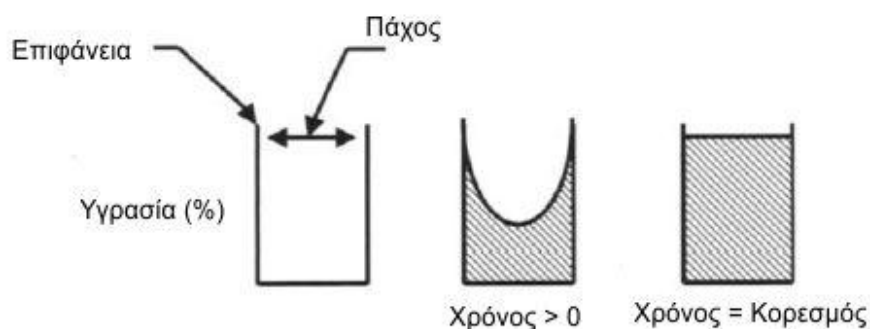
Η θερμοκρασία επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες ενός συνθέτου. Τυπικά, όσο αυξάνει η θερμοκρασία, μειώνονται οι ιδιότητες που επηρεάζονται από τη μήτρα. Οι ιδιότητες που επηρεάζονται από τις ίνες μειώνονται κάπως από τις χαμηλές θερμοκρασίες αλλά οι επιπτώσεις δεν είναι τόσο σοβαρές όσο οι αντίστοιχες από τις υψηλές θερμοκρασίες στις ιδιότητες που επηρεάζονται από τη μήτρα. Όπως φαίνεται στην EIKONA 22, οι παράμετροι σχεδιασμού για carbon/epoxy είναι ψυχρός/ξηρός εφελκυσμός (cold-dry tension) και θερμή/υγρή συμπίεση (hot/wet compression). Το ποσό απορροφημένης υγρασίας (EIKONA 23) εξαρτάται από το υλικό της μήτρας και τη σχετική υγρασία. Αυξημένη θερμοκρασία επιταχύνει τον ρυθμό απορρόφησης υγρασίας. Η απορροφημένη υγρασία μειώνει τις μηχανικές ιδιότητες της μήτρας. Η απορροφημένη υγρασία προκαλεί επίσης την διόγκωση της μήτρας. Αυτή η διόγκωση ανακουφίζει τις εγκλωβισμένες θερμικές τάσεις από την αυξημένη θερμοκρασία του curing. Αυτές οι τάσεις μπορεί να είναι μεγάλες, και μεγάλα πλαίσια τα οποία είναι πακτωμένα στις άκρες τους μπορεί να υποστούν buckling εξαιτίας των τάσεων διόγκωσης. Κατά τη διάρκεια κύκλων ψύξης απόψυξης (freeze-thaw cycles), η



απορροφημένη υγρασία διαστέλλεται κατά τη διάρκεια της ψύξης και μπορεί να προκαλέσει ρωγμές στην μήτρα. Κατά τη διάρκεια υπερακοντίσεων της θερμοκρασίας (thermal spikes), η απορροφημένη υγρασία μπορεί να μετατραπεί σε ατμό. Όταν η πίεση του εσωτερικού ατμού υπερβεί την αντοχή σε εφελκυσμό κατά το επίπεδο του συνθέτου, η διαστρωμάτωση υφίσταται διαστρωματική αποκόλληση (delamination).



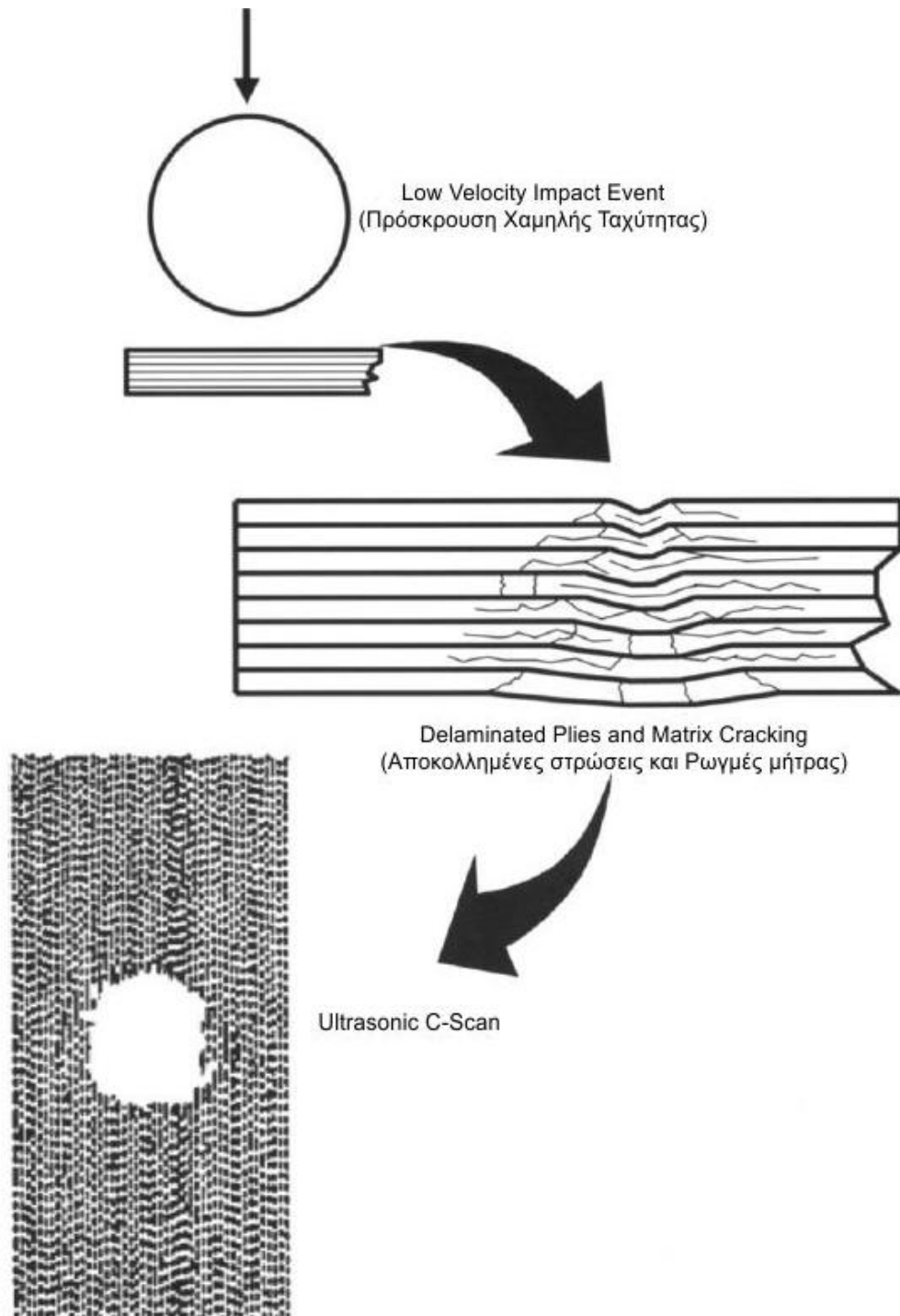
**ΕΙΚΟΝΑ 22.** Επίδραση θερμοκρασίας και υγρασίας στην αντοχή του carbon/epoxy



**ΕΙΚΟΝΑ 23.** Απορρόφηση υγρασίας για πολυμερή σύνθετα

Τα σύνθετα είναι επιρρεπή σε διαστρωματική αποκόλληση κατά τη διάρκεια της παραγωγής, της συναρμολόγησης και εν λειτουργία. Κατά τη διάρκεια της παραγωγής, ξένα υλικά όπως το πλαστικό του prepreg, μπορεί να παραμείνουν από απροσεξία στη διαστρωμάτωση. Κατά την διάρκεια της συναρμολόγησης, ακατάλληλος χειρισμός του τεμαχίου ή λάθος εγκατεστημένοι σύνδεσμοι μπορεί να προκαλέσουν αποκολλήσεις. Εν λειτουργία, καταπονήσεις από χαμηλής ταχύτητας πρόσκρουση ((LVID) low-velocity-impact damage) από εργαλεία που έχουν πέσει ή από φουρκέτες περονοφόρων που λειτουργούν εντός του αεροσκάφους μπορεί να προκαλέσουν φθορά. Η φθορά ενδεχομένως να εμφανίζεται σαν ένα απλό σημάδι στην επιφάνεια, αλλά μπορεί να διαδίδεται δια μέσου των στρώσεων σχηματίζοντας ένα πολύπλοκο σύστημα αποκολλήσεων και ρωγμών στην μήτρα (matrix cracks) όπως απεικονίζεται στην ΕΙΚΟΝΑ 24. Ανάλογα με το μέγεθος της, από τη διαστρωματική αποκόλληση, μπορεί να γίνει μείωση στη στατική αντοχή, στην αντοχή σε κόπωση και στην αντοχή σε buckling. Αν το μέγεθος είναι αρκετά μεγάλο, μπορεί να αυξηθεί κάτω από φόρτιση κόπωσης.

Τυπικά, η αντοχή σε καταπόνηση είναι μια ιδιότητα που καθορίζεται από την ρητίνη. Η επιλογή σκληρυμένης ρητίνης μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την αντίσταση σε καταπόνηση από πρόσκρουση. Επιπρόσθετα, ίνες από αραμίδιο είναι εξαιρετικά δυνατές και ανθεκτικές στις καταπονήσεις. Κατά τη διάρκεια της φάσης του σχεδιασμού, είναι σημαντικό να αναγνωρίζεται το ενδεχόμενο της διαστρωματικής αποκόλλησης και να γίνεται συντηρητική χρήση τάσεων σχεδιασμού, ούτως ώστε δομές που έχουν υποστεί ζημιές να μπορούν να επισκευαστούν.



**ΕΙΚΟΝΑ 24.** Αποκολλήσεις στρώσεων (*delaminations*) και ρωγμές στην μήτρα (*matrix cracking*) εξαιτίας φθοράς από πρόσκρουση

## 2.8 Εφαρμογές

Η χρήση σύνθετων υλικών είναι εκτενής και επεκτείνεται. Οι εφαρμογές τους (ΕΙΚΟΝΑ 25) περιλαμβάνουν προϊόντα για αεροναυπηγική, αυτοκινητοβιομηχανία, ναυπηγική, αθλήματα και πιο πρόσφατα για υποδομές οικοδομών.

Παραδείγματα εφαρμογών στην αεροναυπηγική περιλαμβάνουν τα οριζόντια και κατακόρυφα φτερά στην ουρά του Boeing 777, τα οποία είναι κατασκευασμένα από carbon/epoxy. Κάποια από τα καινούργια επαγγελματικά τζετ έχουν πλαίσια σχεδόν αποκλειστικά από σύνθετα. Μικρά και μεγάλα εμπορικά αεροσκάφη βασίζονται στα σύνθετα για την μείωση του βάρους και την αύξηση με αυτό τον τρόπο της αποδοτικότητας των καυσίμων. Στα στρατιωτικά αεροσκάφη, το βάρος είναι το πιο σημαντικό για λόγους απόδοσης και ωφέλιμου φορτίου και τα σύνθετα συχνά προσεγγίζουν το 20-30% του βάρους του πλαισίου. Για δεκαετίες, τα ελικόπτερα χρησιμοποιούν πτερύγια ρότορα από ενισχυμένες-με-γυαλί ίνες για βελτιωμένη αντοχή σε κόπωση. Τα τελευταία χρόνια έχουν επεκταθεί σε μεγάλο βαθμό πλαίσια για αεροσκάφη από σύνθετα. Τα σύνθετα χρησιμοποιούνται επίσης εκτενώς σε επαναχρησιμοποιούμενα και αναλώσιμα οχήματα εκτόξευσης και δομές για δορυφόρους.

Οι μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες στρέφονται όλο και περισσότερο προς τα σύνθετα για βοήθεια στο να πληρούν τις απαιτήσεις βάρους και απόδοσης, όσο και για το αισθητικό αποτέλεσμα που επιτυγχάνεται στα εξαρτήματα από καλούπια με καλό φινίρισμα επιφάνειας (smooth molded). Το κόστος είναι σημαντική παράμετρος για τα εμπορικά μέσα μεταφοράς και τα σύνθετα συχνά μειώνουν το βάρος και το κόστος συντήρησης. Συνήθη υλικά είναι γυαλί/πολυουρεθάνη κατασκευασμένα με καλούπωμα υγρό ή υπό πίεση (liquid or compression molding) και γυαλί/πολυεστέρας κατασκευασμένα με καλούπωμα υπό πίεση. Σε οχήματα που χρησιμοποιούνται κυρίως για ψυχαγωγία χρησιμοποιούνται εδώ και καιρό ίνες από γυαλί, περισσότερο για την αντοχή τους αλλά και την εξοικονόμηση βάρους σε σχέση με τα μέταλλα. Η μορφή του προϊόντος είναι συνήθως γυαλί SMC και η διεργασία είναι συχνά καλούπωμα με συμπίεση ή με έγχυση (compression or injection molding).

Η συντήρηση είναι μια μεγάλη έγνοια και μεγάλο έξοδο για την ναυπηγική βιομηχανία. Τα σύνθετα βοηθούν να ελαχιστοποιηθούν αυτά τα προβλήματα, πρωταρχικά επειδή δεν διαβρώνονται σαν τα μέταλλα και δεν σαπίζουν το ξύλο. Σκελετοί πλοίων που ποικίλουν από μικρά αλιευτικά έως μεγάλα αγωνιστικά γιοτ κατασκευάζονται συνήθως από ίνες γυαλιού και πολυεστερικές ή βινυλεστερικές ρητίνες. Τα κατάρτια παράγονται συνήθως από ίνες carbon. Μπουκάλες καταδύσεων κατασκευασμένες από σύνθετα υλικά αποτελούν ένα ακόμη παράδειγμα συνθέτων που βελτιώνουν την ναυπηγική βιομηχανία. Ελαφρύτερες μπουκάλες μπορούν να συγκρατούν περισσότερο αέρα κι όμως απαιτούν λιγότερη συντήρηση από τα αντίστοιχα μεταλλικά. Τζετ σκι και ρυμουλκά πλοίων περιέχουν συχνά σύνθετα από γυαλί για να ελαχιστοποιηθεί το βάρος και να μειωθεί η διάβρωση.

Η ρακέτες του τένις κατασκευάζονται εδώ και χρόνια από ίνες γυαλιού και πολλοί άξονες για μπαστούνια του γκολφ είναι φτιαγμένοι από ίνες carbon. Οι διεργασίες μπορεί να περιλαμβάνουν καλούπωμα υπό συμπίεση για τις ρακέτες του τένις και περιέλιξη για τους άξονες του γκολφ. Τα σύνθετα καθιστούν επίσης πιθανά ελαφρύτερα, καλύτερα, δυνατότερα πέδιλα του σκι και ιστιοσανίδες. Τα snowboard αποτελούν ένα ακόμα παράδειγμα εφαρμογής συνθέτων που καταπονούνται κι όμως συνεχίζουν να αποδίδουν. Συνήθως είναι φτιαγμένα χρησιμοποιώντας μια κατασκευή τύπου σάντουιτς (σύνθετη πάνω και κάτω στρώση με κυψελοειδή πυρήνα) για μέγιστη ειδική δυσκαμψία.

Η χρήση συνθέτων για την βελτίωση των υποδομών των δρόμων και γεφυρών είναι μια σχετικά νέα, αλλά συναρπαστική εφαρμογή. Πολλοί από τους δρόμους και τις γέφυρες του κόσμου είναι άσχημα διαβρωμένοι και απαιτούν διαρκή συντήρηση ή και αντικατάσταση.

Τα σύνθετα παρέχουν πολύ μεγαλύτερη ζωή με λιγότερες απαιτήσεις συντήρησης χάρη στην αντίστασή τους στην διάβρωση. Τυπικά υλικά και επεξεργασίες περιλαμβάνουν επισκευές με υγρή εναπόθεση και ανθεκτικά στη διάβρωση προϊόντα μορφοποίησης με εμβάπτιση. Οι διελασμένοι οπλισμοί από υαλονήματα ενισχύουν το μπετόν και ίνες γυαλιού χρησιμοποιούνται σε κάποια υλικά για ξυλοκέραμα. Με τον αριθμό των ώριμων, ψηλών δέντρων να μικραίνει σιγά – σιγά, η χρήση των συνθέτων για πυλώνες ηλεκτρισμού και κολώνες φωτισμού αυξάνεται ραγδαία. Συνήθως αυτά είναι κατασκευασμένα με μορφοποίηση με εμβάπτιση ή περιέλιξη γυαλιού. Τα πτερύγια για μεγάλες ανεμογεννήτριες είναι κατασκευασμένα συνήθως από σύνθετα για να βελτιωθεί η απόδοση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.



**EΙΚΟΝΑ 25.** Οι εφαρμογές των συνθέτων είναι ποικίλες και επεκτείνονται

## 2.9 Σύνοψη κεφαλαίου 2

Τα προηγμένα σύνθετα αποτελούνται είτε από συνεχείς ή ασυνεχείς ίνες ένθετες μέσα σε μια μήτρα. Κοινές ίνες περιλαμβάνουν το γυαλί (glass), το αραμίδιο (aramid) και τον άνθρακα (carbon). Οι ίνες γυαλιού χρησιμοποιούνται εκτενώς σε εμπορικές εφαρμογές εξαιτίας της καλής ισορροπίας μεταξύ ιδιοτήτων και χαμηλού κόστους. Οι ίνες αραμιδίου, όντας οργανικές, έχουν χαμηλές πυκνότητες και εξαιρετική σκληρότητα. Οι ίνες από άνθρακα έχουν τον καλύτερο συνδυασμό δύναμης και δυσκαμψίας αλλά είναι επίσης και οι πιο ακριβές από τις τρεις.

Η μήτρα συγκρατεί τις ίνες στην σωστή θέση και τις προστατεύει από την τριβή. Η μήτρα μεταφέρει τα φορτία δια μέσου των ινών και τις υποστηρίζει στην συμπίεση. Οι πιο κοινά χρησιμοποιούμενες μήτρες για σύνθετα συμπεριλαμβάνουν πολυεστέρες, βινυλεστέρες, βισμαλδεΰδες φαινόλες και πολυαμίδια με τους πολυεστέρες και τους βινυλεστέρες να κυριαρχούν τις εμπορικές αγορές και τα εποξικά τις αγορές της αεροναυπηγικής. Η μήτρα συνήθως καθορίζει την άνω θερμοκρασία έως την οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί το σύνθετο. Η θερμοκρασία μετάβασης σε γυαλί (glass transition temperature) ( $T_g$ ), μία σημαντική ιδιότητα της μήτρας, είναι η θερμοκρασία στην οποία η μήτρα μετασχηματίζεται από υαλώδες στερεό σ' ένα πιο μαλακό, ελαστικό υλικό. Μια μήτρα δεν θα πρέπει ποτέ να χρησιμοποιείται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από την  $T_g$  της εκτός και αν ο χρόνος λειτουργίας είναι εξαιρετικά βραχύς.

Υπάρχει πλειάδα διαθέσιμων μορφών προϊόντων. Προνήματα, δεσμίδες και κλωστές είναι τα βασικά κομμάτια κατασκευής σχεδόν όλων των μορφών σύνθετων προϊόντων. Τα προεμποτισμένα στα οποία τα προνήματα, οι δεσμίδες και οι κλωστές είναι προ-εμποτισμένα με προκαθορισμένο ποσό ρητίνης, είναι οι κυρίαρχες μορφές προϊόντων για δομικές εφαρμογές υψηλής απόδοσης. Είναι διαθέσιμα με μονοδιευθυντικές ταινίες (unidirectional tape) ή ως πλεκτά (woven broadgoods). Για την εκμετάλλευση μερικών χαρακτηριστικών από διαφορετικές ίνες, χρησιμοποιούνται περιστασιακά υβρίδια, όπως είναι αραμίδιο με άνθρακα (μεγαλύτερη σκληρότητα) ή γυαλί με άνθρακα (χαμηλότερο κόστος). Ξηρό πλεκτό ύφασμα (dry woven cloth), ραμένα υφάσματα και προφόρμες, που μειώνουν το κόστος της διαστρωμάτωσης είναι διαθέσιμα για διεργασίες υγρού καλούπωματος. Όπου δεν απαιτούνται ιδιότητες υψηλής δύναμης, κοντές ίνες, πρωταρχικά γυαλιού, χρησιμοποιούνται για καλούπωμα με συμπίεση (SMCs) και καλούπωμα με έγχυση.

Οι διαδικασίες παραγωγής συνθέτων περιλαμβάνουν:

- Διαστρωμάτωση προεμποτισμένων (Prepreg lay-up). Είναι ακριβή μέθοδος αλλά παράγει τα τεμάχια με την υψηλότερη ποιότητα. Τα προεμποτισμένα τεμάχια υφίστανται συνήθως θερμική επεξεργασία (cure) σε autoclave για να βελτιστοποιηθεί η ποιότητα του τεμαχίου.
- Περιέλιξη (Filament winding). Είναι μια διεργασία ικανή για την κατασκευή τεμαχίων τα οποία είναι σώματα εκ περιστροφής ή σχεδόν σώματα εκ περιστροφής.

Μπορεί να διεξαχθεί χρησιμοποιώντας είτε προεμποτισμένα προνήματα ή υγρή εναπόθεση (prepreg roving ή wet winding).

➤ Η υγρή εναπόθεση - διαστρωμάτωση (Wet lay-up) σε συνδυασμό με ρητίνες που υφίστανται cure σε χαμηλές θερμοκρασίες, είναι ικανή να παράγει πολύ μεγάλες δομές. Είναι μια εξαιρετική διεργασία για μεγάλα τεμάχια χαμηλού όγκου. Τα τεμάχια που κατασκευάζονται με υγρή εναπόθεση μπορεί να υποστούν cure με ή χωρίς σακούλα κενού.

➤ Ο ψεκασμός (Spray-up) είναι μια ακόμα διεργασία ικανή για κατασκευή τεμαχίων πολύ μεγάλων μεγεθών. Εξαιτίας στην τυχαία, ασυνεχή φύση των ινών, οι μηχανικές ιδιότητες είναι χαμηλότερες από αυτές των τεμαχίων που έχουν κατασκευαστεί με prepreg συνεχών ινών ή wet lay-up.

➤ Η διεργασίες υγρού καλουπώματος (liquid-molding processes) χρησιμοποιούν μια ξηρή προφόρμα (preform) που τοποθετείται σε διαιρετό καλούπι (matched-die), μετά υγρή ρητίνη εγχέεται και το τεμάχιο υφίσταται cure μέσα στο καλούπι. Η ρητίνη μπορεί να εγχυθεί υπό πίεση ή να τραβηχτεί δια μέσου της προφόρμας με κενό.

➤ Το καλούπωμα με συμπίεση (compression molding) είναι μια ακόμα διαδικασία στην οποία χρησιμοποιούνται καλούπια και χρησιμοποιεί είτε SMCs ή BMCs που φορτίζεται με προκαθορισμένη φόρτιση. Η θερμότητα και η πίεση σχηματίζουν και κατεργάζουν θερμικά το τεμάχιο στην συγκεκριμένη μορφή.

➤ Το καλούπωμα με έγχυση (injection molding) είναι μια διεργασία υψηλού όγκου παραγωγής ικανή για την παραγωγή εκατομμυρίων τεμαχίων κάθε χρόνο. Θερμοπλαστική ή θερμορρυθμιζόμενη ρητίνη ενισχυμένη με κοντές ίνες εγχέεται σ' ένα καλούπι ακριβείας κάτω από υψηλές πιέσεις, όπου είτε ψύχεται (θερμοπλαστική) ή υφίσταται cure (θερμορρυθμιζόμενη).

➤ Η μορφοποίηση με εμπάπτιση (pultrusion) είναι μια συνεχής διαδικασία για την κατασκευή δομικών σχημάτων συνεχούς διατομής. Τα προνήματα συνήθως εφελκύνονται μέσα από λουτρό ρητίνης και μέσα σε θερμοασμένη μήτρα, όπου το τεμάχιο υφίσταται cure και ταξιδεύει δια μέσου της μήτρας. Στη συνέχεια εφελκύεται στο επιθυμητό μήκος και κόβεται με μηχανικό πριόνι.

Τα προηγμένα σύνθετα είναι αναπτυσσόμενη βιομηχανία με μεγάλη ποικιλία χάρη στα εμφανή πλεονεκτήματά τους σε σχέση με τα ανταγωνιστικά μεταλλικά, περιλαμβάνοντας χαμηλότερο βάρος, υψηλότερη απόδοση, και αντίσταση στην διάβρωση. Χρησιμοποιούνται στην αεροναυπηγική, αυτοκινητοβιομηχανία, ναυπηγική, αθλητικά αγαθά και πιο πρόσφατα σε εφαρμογές υποδομής. Το κύριο μειονέκτημα των συνθέτων είναι το υψηλό τους κόστος. Η σωστή επιλογή υλικών (ινών και μήτρας), μορφών προϊόντων και διεργασιών έχουν σημαντική επίδραση στο κόστος του τελειωμένου τεμαχίου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Ίνες από άνθρακα και γραφίτη (Carbon and graphite fibers)

Οι ίνες από άνθρακα και γραφίτη είναι οι πιο κυρίαρχες μορφές ίνας σε σύνθετες δομές υψηλής απόδοσης. Οι ίνες από άνθρακα και γραφίτη μπορούν να παραχθούν με ένα μεγάλο εύρος ιδιοτήτων, παρόλαυτα γενικά επιδεικνύουν ανώτερη αντοχή σε εφελκυσμό και σε συμπίεση, υψηλά μέτρα ελαστικότητας, έχουν εξαιρετικά χαρακτηριστικά κόπωσης και δεν διαβρώνονται. Παρόλο που οι όροι χρησιμοποιούνται συχνά εναλλακτικά, οι ίνες γραφίτη:

(1) υπόκεινται σε θερμικές κατεργασίες πάνω από τους  $3000^{\circ}\text{F} \approx 1922\text{ K}$

(2) κατέχουν τρισδιάστατη σχέση διάταξης των ατόμων τους

(3) έχουν περιεχόμενο άνθρακα πάνω από 99%

(4) έχουν μέτρο ελαστικότητας (E) μεγαλύτερο από 50 msi.

Οι ίνες άνθρακα (ανθρακονήματα) έχουν χαμηλότερο περιεχόμενο άνθρακα (93 με 95 %) και κατεργάζονται θερμικά σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

### 3.1 Ορολογία για τις ίνες

Προτού εξετάσουμε τους διάφορους τύπους ινών που χρησιμοποιούνται για ενισχύσεις από σύνθετα, θα γίνει ανασκόπηση της κύριας ορολογίας που χρησιμοποιείται για την τεχνολογία των ινών. Οι ίνες παράγονται και πωλούνται σε πολλές μορφές:

➤ Ίνα (Fiber). Ένας γενικός όρος για υλικό που έχει μακρύ άξονα, ο οποίος είναι αρκετές φορές μεγαλύτερος από την διάμετρό του. Ο όρος “aspect ratio” (λόγος όψης-  $\frac{l}{d} = \frac{\text{μήκος ίνας}}{\text{διάμετρος ίνας}}$ ), χρησιμοποιείται συχνά για την περιγραφή μικρά μήκη ινών. Για ίνες, η τιμή για το aspect ratio είναι συνήθως μεγαλύτερο από το 100.

➤ Νήμα (Filament). Η μικρότερη μονάδα ενός ινώδους υλικού. Για ίνες που έχουν υφανθεί, αυτή είναι η μονάδα που σχηματίζεται από μια μόνο οπή (spinning hole) στην διαδικασία της ύφανσης. Είναι συνώνυμο με το fiber.

➤ End. Ένας όρος που χρησιμοποιείται πρωταρχικά για ίνες γυαλιού, που αναφέρεται σε ομάδα από filaments σε μεγάλα παράλληλα μήκη.

➤ Strand. Ένας ακόμη όρος που σχετίζεται με τις ίνες γυαλιού που αναφέρεται σε δέσμη ή ομάδα από μη περιστραμμένα νήματα (bundle or group of untwisted filaments). Οι συνεχείς δέσμες από προνήματα (strand rovings) παρέχουν καλά χαρακτηριστικά επεξεργασίας στο σύνολό τους μέσω γρήγορου wet-out (διείσδυση ρητίνης εντός του strand), και ίδια αντοχή στην τριβή και στον εφελκυσμό κατά την διάρκεια της επεξεργασίας. Μπορούν να κοπούν καθαρά και να διασπαρθούν ομοιόμορφα δια μέσου της ρητίνης κατά την διάρκεια του καλουπώματος.



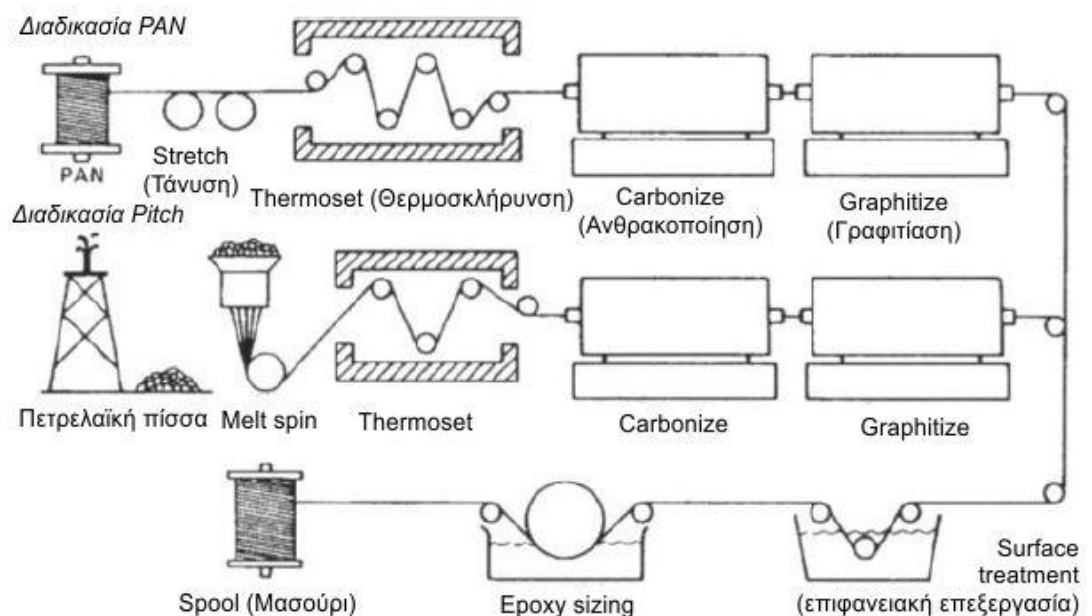
- Tow (δεσμίδα). Όμοια με το strand για τις ίνες από γυαλί, ο όρος tow χρησιμοποιείται για ίνες άνθρακα και γραφίτη για να περιγράψει τον αριθμό των μη περιστραμμένων (untwisted) filaments που παράγονται μονομιάς. Το μέγεθος μιας δεσμίδας (tow) εκφράζεται συνήθως ως xK. Για παράδειγμα, ένα tow 12K περιέχει 12000 filaments.
- Roving. Ένας αριθμός από strands ή tows που συλλέγεται σε μια παράλληλη δέσμη χωρίς να έχει τυλιχτεί. Τα rovings μπορούν να κοπούν σε μικρότερα τμήματα ίνας για sheet molding compound (SMC), bulk molding compound (BMC) ή injection molding (καλούπωμα με έγχυση).
- Yarn. Ένας αριθμός από strands ή tows που συλλέγονται σε παράλληλη δέσμη αφού περιστραφούν (with twist). Η περιτύλιξη βελτιώνει την ευκολία χειρισμού και κάνει επεξεργασίες όπως είναι αυτή της ύφανσης ευκολότερη, όμως το τύλιγμα μειώνει επίσης την αντοχή.
- Band. Το πάχος ή πλάτος αρκετών προνημάτων (rovings), yarns ή δεσμίδων (tows) όπως αυτό εφαρμόζεται σε ένα πυρήνα (mandrel) ή ένα εργαλείο. Ένας συνηθισμένος όρος που χρησιμοποιείται στην περιέλιξη (filament winding).
- Tape (ταινία). Μία μορφή σύνθετου προϊόντος στην οποία ένας μεγάλος αριθμός παράλληλων filaments (π.χ. tows) συγκρατούνται μαζί με ένα υλικό οργανικής μήτρας (π.χ. εποξική ρητίνη). Το μήκος του tape, κατά την διεύθυνση των ινών, είναι πολύ μεγαλύτερο από το πλάτος και το πλάτος είναι πολύ μεγαλύτερο από το πάχος. Συνήθεις μορφές προϊόντων ως tape είναι εκατοντάδες feet (1 feet=0,3048m) σε μήκος, 6-60 in=152,4-1524 mm σε πλάτος και έχουν πάχος 0,005-0,0010 in=0,127-0,254 mm.
- Woven Cloth (Πλεκτό ύφασμα). Ακόμα μια μορφή σύνθετου προϊόντος, που έχει κατασκευαστεί υφαίνοντας yarns ή tows σε ποικίλα σχέδια για να παρέχεται ενίσχυση σε δύο κατευθύνσεις, συνήθως 0° και 90°. Τυπικά δυσδιάστατα πλεκτά υφάσματα είναι αρκετά εκατοντάδες feet σε μήκος, 24-60 in=609,6-1524 mm σε πλάτος και 0,010 – 0,015 in=0,254-0,381 mm σε πάχος.

### 3.2 Διαδικασίες κατασκευής

Οι ίνες από άνθρακα και γραφίτη μπορεί να φτιαχτούν από ραιγιόν (rayon), πίσσα (pitch) ή πολυακρυλονιτριλισμο polyacrylonitrile (PAN) προδρόμων (precursors, προϊόντα υφαντουργίας, υφαντουργικό προϊόν από το οποίο κατασκευάζονται ανθρακονήματα, όπως το πολυακρυλονιτρίλιο). Παρόλο που οι ίνες PAN είναι πιο ακριβές από τις ίνες από ραιγιόν, χρησιμοποιούνται εκτενώς για δομικές ίνες άνθρακα επειδή το όριο διαρροής τους είναι σχεδόν διπλάσιο από το αντίστοιχο των ινών από ραιγιόν. Η διαδικασία με την πίσσα παράγει ίνες που έχουν χαμηλότερη αντοχή από αυτές που κατασκευάζονται με PAN, αλλά μπορεί να παράγει ίνες με υπέρ-υψηλό μέτρο ελαστικότητας (50-145msi).

Οι ίνες που είναι κατασκευασμένες με PAN (ΕΙΚΟΝΑ 36) τανύονται (are stretched), υφίστανται θερμοσκλήρυνση (heat set), ανθρακοποιούνται (are carbonized), γραφιτιάζονται

(are graphitized) και μετά κατεργάζονται επιφανειακά (are surface treated). Η διαδικασία του τεντώματος βοηθά στον προσανατολισμό των μορίων και διατηρείται κάποιος εφελκυσμός κατά τη διάρκεια όλης της διαδικασίας. Η θερμοσκλήρυνση (heat setting) ή οξείδωση στους 390-570°F ≈ 472-572 K διασταυρώνει (cross-links) το πλέγμα του PAN και σταθεροποιεί την δομή, το οποίο προλαμβάνει την τήξη κατά τη διάρκεια της διεργασίας ανθρακοποίησης. Η διεργασία της θερμοσκλήρυνσης διεξάγεται σε ατμόσφαιρα αέρα και μετατρέπει το θερμοπλαστικό PAN σε μια μη-κυκλική ή κλιμακωτή ένωση (ladder, πολυμερές με μορφής ανεμόσκαλας, συνέπεια της δομής είναι η πολύ καλή θερμική σταθερότητα), ικανή να αντέξει τις υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούν κατά τη διάρκεια της ανθρακοποίησης. Η ανθρακοποίηση μετατρέπει το PAN σε άνθρακα και διεξάγεται σε ατμόσφαιρα αζώτου στους 1800-2700 °F≈1255-1755 K .Κατά τη διάρκεια της ανθρακοποίησης, οι ίνες συρρικνώνονται και χάνουν περίπου 50% του βάρους τους. Εάν είναι επιθυμητή μια πραγματική ίνα γραφίτη, τότε η ίνα γραφιτίζεται σε θερμοκρασίες μεταξύ των 3600-5500 °F≈2255-3311 K , όπου και παράγεται μια πιο σταθερή κρυσταλλική δομή και ένα μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας. Το τελικό βήμα, η επιφανειακή κατεργασία, διεξάγεται για να βελτιωθεί ο δεσμός ίνας-με-μήτρα και συνήθως γίνεται σε ηλεκτρολυτικό αλκαλικό λουτρό. Η επιφανειακή κατεργασία προσκολλά τις ομάδες καρβοξυλίων, καρβονυλίων και υδροξυλίων στην επιφάνεια των ινών, που μπορεί να σχηματίσει δεσμό με την πολυμερική μήτρα. Αν η ίνα πρόκειται να πλεχθεί, εφαρμόζεται επιφανειακή επεξεργασία των ινών (συνήθως με epoxy) για να προστατευτεί η επιφάνεια της ίνας από μηχανική τριβή.



**ΕΙΚΟΝΑ 26.** Διαδικασίες κατασκευής για ίνες άνθρακα και γραφίτη

Οι ίνες άνθρακα και γραφίτη που βασίζονται στην πίσσα (pitch) κατασκευάζονται από ανθρακόπισσα (coal-tar) που θερμαίνεται έως και 40 ώρες στους 800 °F≈700 K ,σχηματίζοντας ένα υγρό υψηλού ιξώδους με υψηλό βαθμό μοριακής τάξης γνωστό ως μεσόφαση (mesophase). Ο προσανατολισμός είναι υπεύθυνος για την ευκολία της σταθεροποίησης της πίσσας (pitch) σε άνθρακα. Η μεσόφαση (mesophase) τότε στροβιλίζεται δια μέσω ενός ακροφυσίου με μικρό στόμιο, έτσι ευθυγραμμίζονται τα μόρια

κατά μήκους του άξονα των ινών. Οι ίνες με βάση την πίσσα επεξεργάζονται ακολουθώντας τα ίδια βασικά βήματα που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των ινών με βάση το PAN, δηλαδή τέντωμα (stretching), ανθρακοποίηση, γραφίτιση και επιφανειακή κατεργασία. Οι ίνες γραφίτη με βάση την πίσσα χαρακτηρίζονται από υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας και χαμηλότερη αντοχή απ' ό,τι τα ανθρακονήματα που κατασκευάζονται με την διαδικασία PAN. Οι ίνες γραφίτη υψηλού μέτρου ελαστικότητας με βάση την πίσσα, που έχουν μέτρο ελαστικότητας μεταξύ 50 και 145 msi χρησιμοποιούνται συχνά σε κατασκευές στην αεροδιαστημική που απαιτούν υψηλή ακαμψία. Όσο υψηλότερες είναι οι θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται στην διαδικασία της γραφίτισης για ίνες γραφίτη έχουμε ως αποτέλεσμα πιο αυστηρό προσανατολισμό των κρυστάλλων γραφίτη ως προς τον άξονα των ινών. Όσο καλύτερος είναι ο προσανατολισμός των κρυσταλλιτών, τόσο μεγαλύτερο είναι το μέτρο ελαστικότητας της ίνας. Παρόλαυτα, υψηλή κρυσταλλικότητα (κρυσταλλικότητα: Ιδιότητα μιας ένωσης στην οποία άτομα ή μόρια μπορούν να τοποθετούνται κανονικά στο χώρο και τα κέντρα βάρους αυτών να καταλαμβάνουν πλευρές κάποιου κρυσταλλικού πλέγματος), καθιστά επίσης την ίνα αδύναμη στην διάτμηση, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερη αντοχή στην θλίψη. Συνεπώς, ίνες γραφίτη με υψηλή κρυσταλλικότητα δεν επιδεικνύουν ισορροπημένες μηχανικές ιδιότητες σε εφελκυσμό και θλίψη. Εκτός από υψηλό μέτρο ελαστικότητας και χαμηλή θερμική διαστολή, οι ίνες γραφίτη με βάση την πίσσα έχουν υψηλές τιμές θερμικής αγωγιμότητας, π.χ. με τιμές  $900-1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  σε σύγκριση με τις τιμές  $10-20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  για τις ίνες άνθρακα με βάση το PAN. Αυτές οι υψηλές θερμικές αγωγιμότητες χρησιμοποιούνται στο να απομακρύνουν και να διασκορπίζουν θερμότητα σε εφαρμογές στην αεροδιαστημική. Ίνες γραφίτη με μεγάλο μέτρο ελαστικότητας μπορούν επίσης να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας την διαδικασία PAN, όμως το υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας που επιτυγχάνεται είναι γύρω στο 85 msi.

Η αντοχή των ινών άνθρακα και γραφίτη εξαρτάται από τον τύπο του πρόδρομου που χρησιμοποιείται, τις συνθήκες επεξεργασίας κατά τη διάρκεια της κατασκευής, όπως είναι ο εφελκυσμός ίνας και οι θερμοκρασίες και την παρουσία ατελειών και ελαττωμάτων. Ατέλειες στην μικροδομή (microstructure) των ανθρακονημάτων περιλαμβάνουν εσωτερικές κοιλότητες (internal pits), εγκλείσματα (inclusions), εξωτερικές αυλακώσεις (external gouges), γρατζουνιές (scratches), κολλημένα υπολείμματα από νήματα (stuck filament residues), όπως επίσης ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά όπως είναι αυλακώσεις (striations) και ραβδώσεις (flutes). Αυτά τα ελαττώματα μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση στην αντοχή της ίνας σε εφελκυσμό, αλλά μικρή επιρροή, έως και καθόλου, στο μέτρο ελαστικότητας, στην αγωγιμότητα, και στη θερμική διαστολή. Οι ίνες άνθρακα και γραφίτη έχουν συνήθως ελαφρώς αρνητικό συντελεστή θερμικής διαστολής που γίνεται πιο αρνητικός καθώς το μέτρο ελαστικότητας  $E$  αυξάνει. Μια συνέπεια της χρήσης ινών άνθρακα υψηλού και υπέρ-υψηλού μέτρου ελαστικότητας είναι η αυξημένη πιθανότητα μικρορωγμών στην μήτρα (matrix microcracking) κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας ή της περιβαλλοντικής έκθεσης εξαιτίας του κακού συνταιριάσματος στους συντελεστές θερμικής διαστολής μεταξύ των ινών και της μήτρας.

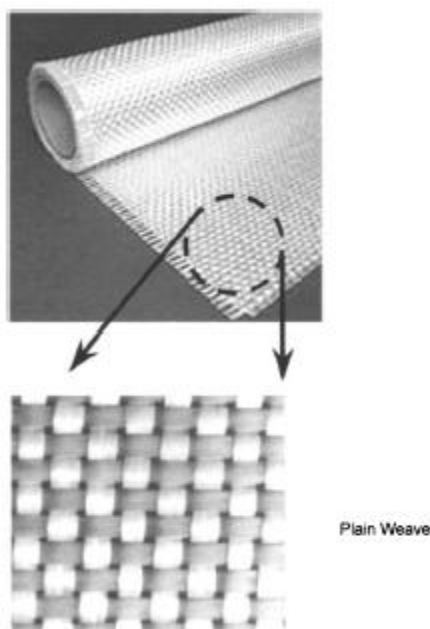
Ανθρακονήματα με ευρύ πεδίο αντοχής και μέτρων ελαστικότητας είναι διαθέσιμα από μεγάλο αριθμό παραγωγών. Τα ανθρακονήματα με βάση το PAN, που έχουν αντοχή με εμβέλεια από 500 έως 1000 ksi και μέτρο ελαστικότητας από 30 έως 45 msi με επιμηκύνσεις

έως 2% είναι εμπορικά διαθέσιμα. Ίνες PAN με τυπικά μέτρα ελαστικότητας (standard-modulus) έχουν καλές ιδιότητες και χαμηλότερο κόστος, ενώ ίνες PAN με υψηλότερα μέτρα ελαστικότητας κοστίζουν περισσότερο επειδή απαιτούνται υψηλότερες θερμοκρασίες επεξεργασίας. Η θέρμανση των ινών στους  $1800^{\circ}\text{F}\approx 1255\text{ K}$ , προκαλεί διαρροή (yields) στις ίνες PAN που περιέχουν 94% άνθρακα και 6% άζωτο, ενώ η θέρμανση στους  $2300^{\circ}\text{F}\approx 1533\text{ K}$  αφαιρεί το άζωτο και αυξάνει το περιεχόμενο σε άνθρακα περίπου στο 99,7%. Υψηλότερες θερμοκρασίες επεξεργασίας αυξάνουν την αντοχή σε εφελκυσμό (tensile modulus) βελτιώνοντας την κρυσταλλική δομή και την τρισδιάστατη φύση της δομής. Η διάμετρος των ανθρακονημάτων συνήθως βρίσκεται μεταξύ 0,3 και 0,4 mil (1mil = 0,0254mm). Τα ανθρακονήματα παρέχονται σε δέσμες άπλεκτων ινών (untwisted bundles) που ονομάζονται δεσμίδες (tows). Τα μεγέθη των δεσμίδων ποικίλλουν από τόσο μικρό όπως 1000 ίνες ανά δεσμίδα, έως περισσότερες από 200000 ίνες ανά δεσμίδα. Μια τυπική περιγραφή των "12K tow" υποδηλώνει ότι μία δεσμίδα περιέχει 12000 ίνες. Κανονικά, όσο το μέγεθος της δεσμίδας μειώνεται, η αντοχή και το κόστος αυξάνουν. Το μικρό μέγεθος της δεσμίδας 1K δεν χρησιμοποιείται κανονικά εκτός και αν τα πλεονεκτήματα των ιδιοτήτων υπερτερούν του μειονεκτήματος κόστους. Για αεροναυπηγικές δομές, κανονικά μεγέθη δεσμίδων είναι 3K, 6K και 6K όντας τα πιο δεδομένα για πλεκτό ύφασμα και 12 K για μονοδιευθυντική ταινία. Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν πολύ μεγάλα μεγέθη δεσμίδων (>200K) που χρησιμοποιούνται για εμπορικές εφαρμογές και οι οποίες κόβονται αφού κατασκευαστούν σε μικρότερα μεγέθη δεσμίδων (π.χ. 48K) για μεταγενέστερη μεταχείριση και επεξεργασία. Τα κόστη των ανθρακονημάτων εξαρτώνται από την επεξεργασία παραγωγής, τον τύπο του πρόδρομου υλικού που έχει χρησιμοποιηθεί, τις τελικές μηχανικές ιδιότητες και το μέγεθος της δεσμίδας. Το κόστος μπορεί να κυμαίνεται από κάτω των 10\$ ανά λίβρα (round) για εμπορικές ίνες με μεγάλο αριθμό δεσμίδων έως αρκετών εκατοντάδων δολαρίων ανά round για ίνες με βάση την πίσσα, με μικρό αριθμό δεσμίδων και υπέρ-υψηλό μέτρο ελαστικότητας (ultrahigh modulus). Η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης για ίνες άνθρακα και γραφίτη σε οξειδωτική ατμόσφαιρα είναι  $930^{\circ}\text{F}=772\text{ K}$ .

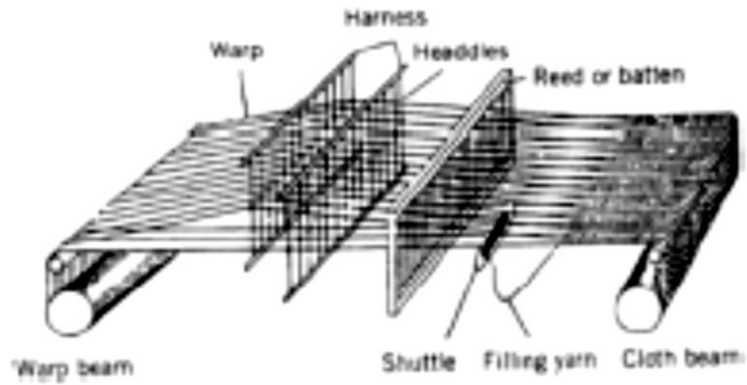
Τα ιδεατά μηχανολογικά υλικά πρέπει να έχουν υψηλή αντοχή, δυσκαμψία, σκληρότητα και χαμηλό βάρος. Οι ίνες άνθρακα συνδυασμένες με μήτρες πολυμερών πληρούν αυτά τα κριτήρια πιο πολύ από οποιοδήποτε άλλο υλικό. Τα ανθρακονήματα αστοχούν «ελαστικά» (are elastic to failure) σε χαμηλές θερμοκρασίες, είναι ανθεκτικά σε ερπυσμό και δεν είναι επιρρεπή στην αστοχία, είναι χημικά αδρανή, εκτός αν βρίσκονται σε ισχυρά οξειδωτικά περιβάλλον ή σ' επαφή με ορισμένα χυτά μέταλλα και έχουν εξαιρετικά χαρακτηριστικά απόσβεσης. Κάποια από τα μειονεκτήματα των ανθρακονημάτων είναι: είναι ψαθυρά και έχουν χαμηλή αντίσταση στην κρούση, έχουν χαμηλές τάσεις αστοχίας (low strains to failure), οι αντοχές τους σε θλίψη είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες σε εφελκυσμό και είναι σχετικά ακριβά σε σύγκριση με τις ίνες γυαλιού.

### 3.3 Πλεκτά υφάσματα

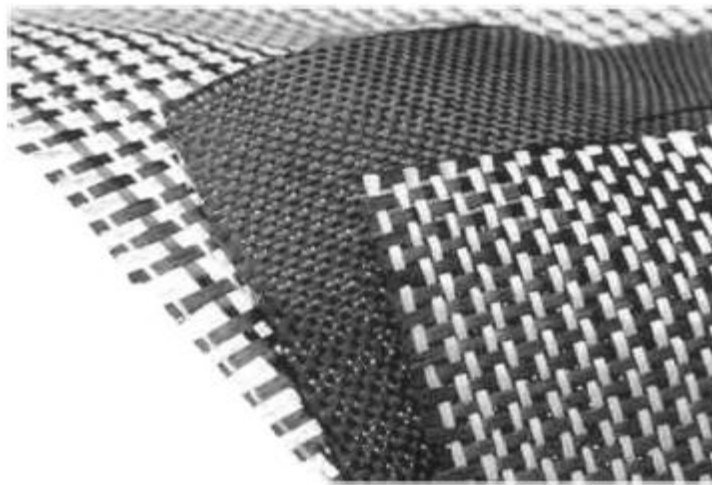
Δισδιάστατα πλεκτά προϊόντα (EIKONA 37) προσφέρονται συνήθως ως κατασκευές 0° και 90°. Ωστόσο, πλάγιες υφάνσεις (+45°, -45°) μπορεί να φτιαχτούν στρίβοντας τις βασικές κατασκευές των 0° και 90°. Οι υφάνσεις φτιάχνονται σε αργαλειό συνυφαίνοντας δύο ορθογώνια (αμοιβαία κάθετα) σετ κλωστών στις διευθύνσεις υφαδιού και στημονιού. Η διεύθυνση του υφαδιού είναι παράλληλη κατά μήκος του κυλίνδρου, ενώ του στημονιού είναι κάθετη στην διεύθυνση του κυλίνδρου. Οι αργαλειοί υφασμάτων (EIKONA 38) παράγουν πλεκτό ύφασμα διαχωρίζοντας τα τις κλωστές για το στημόνι και εισάγοντας τα τις κλωστές για το υφάδι. Τα ξεχωριστά υφάδια και στημόνια χειρίζονται από τα «harnesses», τα οποία με τη σειρά τους κινούν τα «headdles». Τα υφάδια μεταφέρονται από το σύστημα της σαΐτας του αργαλειού που μετακινείται εμπρός-πίσω δημιουργώντας ένα συμπλεκόμενο ύφασμα. Οι περισσότερες υφάνσεις περιέχουν παρόμοιο αριθμό ινών και χρησιμοποιούν το ίδιο υλικό και στις δύο διευθύνσεις. Ωστόσο υβριδικές υφάνσεις (EIKONA 39) όπως είναι άνθρακας με γυαλί και υφάνσεις που κυριαρχούνται από ίνες στο στημόνι χρησιμοποιούνται συχνά. Αυτές οι υβριδικές υφάνσεις μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να επιτευχθούν ορισμένες ιδιότητες, όπως στην περίπτωση ανάμειξης άνθρακα με αραμιδίδιο για την εκμετάλλευση της σκληρότητας του αραμιδίου, ή για μείωση του κόστους, όπως όταν έχουμε ανάμειξη ινών γυαλιού με άνθρακα. Τα πλεκτά υφάσματα μπορούν να αγοραστούν είτε ως ξηρές προφόρμες είτε ως προεμποτισμένα (EIKONA 40). Στις περισσότερες εφαρμογές, πολλαπλές στρώσεις δισδιάστατων υφάνσεων διαστρωματώνονται μαζί (are laminated together). Όπως και στις διαστρωματώσεις με ταινίες, οι στρώσεις προσανατολίζονται ούτως ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη αντοχή και στιβαρότητα.



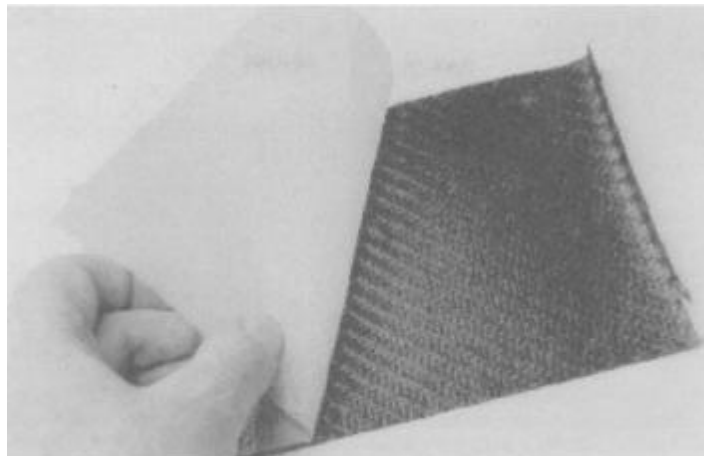
**EIKONA 27.** Τυπικό πλεκτό ύφασμα από ίνες γυαλιού



**ΕΙΚΟΝΑ 28.** Η βασική διαδικασία ύφανσης σχηματικά



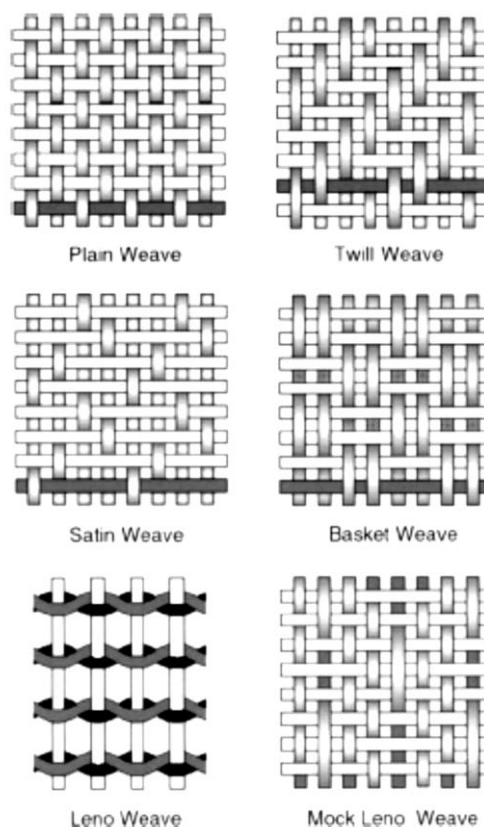
**ΕΙΚΟΝΑ 29.** Παραδείγματα υβριδικών υφάνσεων



**ΕΙΚΟΝΑ 30.** Πλεκτό ύφασμα προεμποτισμένου υλικού (prepreg) από άνθρακα, με χαρτί στο πίσω μέρος

Οι υφάνσεις πρέπει να ταξινομηθούν βάση του μοτίβου συνύφανσης (interlacing pattern) όπως φαίνεται στην ΕΙΚΟΝΑ 41. Το απλούστερο μοτίβο είναι η απλή πλέξη (plain weave).

Στην απλή πλέξη, κάθε κλωστή στημονιού και υφαδιού πηγαίνει εναλλάξ πάνω και μετά κάτω από διαδοχικές κλωστές στημονιού και υφαδιού αντίστοιχα. Οι απλές πλέξεις έχουν τις περισσότερες συνυφάνσεις στην μονάδα επιφανείας από κάθε άλλο τύπο πλέξης και, επομένως, το πιο «συμπιεσμένο» (tightest) βασικό σχέδιο υφάσματος και το πιο ανθεκτικό σε διατμητική κίνηση εντός επιπέδου (in-plane shear movement). Επομένως, οι απλές πλέξεις ανθίστανται στην παραμόρφωση κατά τη διάρκεια του χειρισμού τους, αλλά μπορεί να είναι δύσκολο να σχηματιστούν πολύπλοκα περιγράμματα. Είναι επίσης περισσότερο δύσκολο να εμποτιστούν πλήρως. Ένα ακόμα μειονέκτημα της απλής πλέξης είναι οι συχνές εναλλαγές θέσης από την κορυφή έως την βάση που δημιουργούνται από κάθε κλωστή. Αυτή η κυματοειδής μορφή της κλωστής μειώνει την αντοχή και την στιβαρότητα του συνθέτου.



**ΕΙΚΟΝΑ 31.** Κοινές δυσδιάστατες πλέξεις

Η πλέξη basket είναι μια παραλλαγή της απλής πλέξης στην οποία δύο (ή περισσότερες) κλωστές από στημόνια και δύο (ή περισσότερες) κλωστές από υφάδια έχουν πλεχτεί μαζί. Μια διάταξη δύο στημονιών που διασταυρώνονται με δύο υφάδια ονομάζεται basket 2x2, αλλά η διεύθυνση των ινών δεν χρειάζεται να είναι συμμετρική, για παράδειγμα, είναι πιθανό να έχουμε 8x2, 5x4 και άλλες παραλλαγές. Η πλέξη basket έχει λιγότερες πτυχώσεις απ' ό τι η απλή και είναι επομένως, κάπως δυνατότερη. Οι απλές πλέξεις χρησιμοποιούνται συχνά για λιγότερο καμπύλα τεμάχια ενώ οι πλέξεις με μοτίβα 5x και 8x (harness direction) τύπου satin χρησιμοποιούνται για τεμάχια με εντονότερο περίγραμμα.

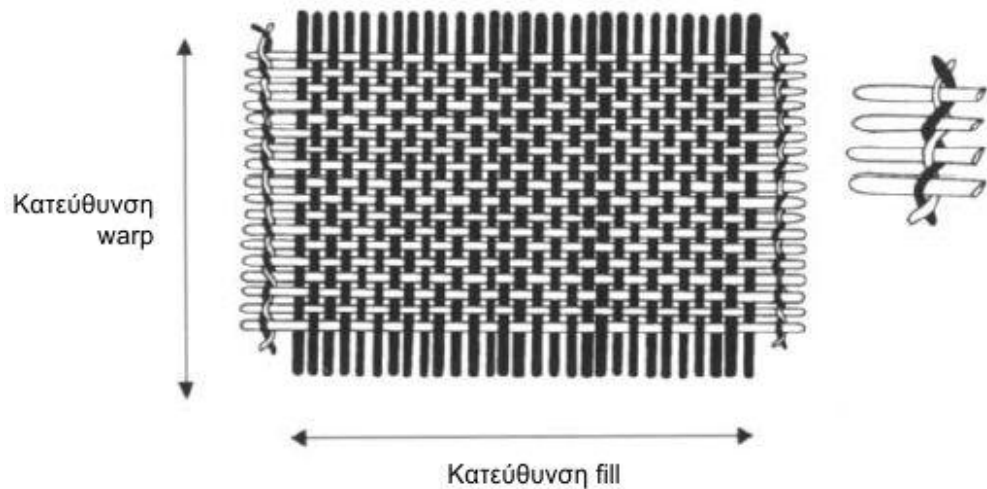
Οι πλέξεις satin χαρακτηρίζονται από μία ελάχιστη συνύφανση και, συνεπώς, έχουν μικρότερη αντίσταση στην διατμητική κίνηση στο επίπεδο (in-plane shear movement) και έχουν την καλύτερη ικανότητα παραμόρφωσης (drapability). Στην «four-harness» satin πλέξη,

τα οι κλωστές των στημονιών περνούν πάνω από τρεις κλωστές υφαδιών και μετά περνούν κάτω από μία κλωστή υφαδιού. Στην «five-harness» satin πλέξη, οι κλωστές των στημονιών περνούν πάνω από τέσσερις κλωστές υφαδιών και μετά κάτω από μία κλωστή υφαδιού. Τέλος, στην «eight-harness» satin πλέξη, οι κλωστές των στημονιών περνούν πάνω από επτά κλωστές υφαδιών και μετά κάτω από μία κλωστή υφαδιού. Εξαιτίας μικρότερων πτυχώσεων της ίνας (fiber crimp), τα υφάσματα με satin πλέξη έχουν υψηλότερη αντοχή από τα υφάσματα με απλή πλέξη. Παρέχουν επίσης ομαλά επιφανειακά τελειώματα σε ελάχιστο πάχος ανά στρώση. Η «eight-harness» satin πλέξη έχει την καλύτερη παραμορφωσιμότητα αυτής της ομάδας, παρόλαυτα, οι «five-harness» πλέξεις χρησιμοποιούν κανονικά μια δεσμη 6K άνθρακα το οποίο είναι λιγότερο ακριβό από το 3K που χρησιμοποιείται για «eight-harness» satin πλέξεις. Η τάση σε αυτή την βιομηχανία είναι να προς την ευρύτερη χρήση των λιγότερο ακριβών five-harness satin πλέξεων.

Οι πλέξεις twill χρησιμοποιούνται περιστασιακά επειδή έχουν καλύτερη ικανότητα παραμόρφωσης από τις απλές πλέξεις και είναι γνωστές για την εξαιρετικά καλή ικανότητα εμποτισμού. Σε αυτή την πλέξη, ένα ή περισσότερα στημόνια πλέκονται εναλλάξ πάνω και κάτω από δύο ή περισσότερα υφάδια με έναν κανονικά επαναλαμβανόμενο τρόπο, παράγοντας το οπτικό εφέ ενός ευθείου ή σπασμένου «νεύρου» στο ύφασμα.

Οι πλέξεις leno και mock leno χρησιμοποιούνται σπάνια για δομικά σύνθετα. Η πλέξη leno είναι επίσης μια μορφή της απλής πλέξης στην οποία οι γειτονικές ίνες στημονιών τυλίγονται γύρω από συνεχείς ίνες υφαδιών, σχηματίζοντας ένα ελικοειδές ζευγάρι, «κλειδώνοντας» αποτελεσματικά έτσι κάθε ένα το άλλο στην θέση του. Αυτή η παράγει ένα ύφασμα με εξαιρετικά μεγάλα κενά (open fabric) με μικρό περιεχόμενο σε ίνες. Η πλέξη leno χρησιμοποιείται συχνά για το δέσιμο ξηρών ινών (EIKONA 42) ούτως ώστε να μην ξετυλιχτούν κατά τη διάρκεια του χειρισμού τους. Η mock leno (που είναι επίσης παραλλαγή της απλής πλέξης), έχει σποραδικά ίνες στημονιών σε τακτά διαστήματα, αλλά αρκετές ίνες χωριστά, που παρεκκλίνουν από την εναλλασσόμενη συνύφανση πάνω-κάτω και αντί γι' αυτό συνυφαίνονται κάθε δύο ή και περισσότερες ίνες. Αυτό συμβαίνει με ανάλογη συχνότητα στην διεύθυνση του υφαδιού και το συνολικό αποτέλεσμα είναι ένα ύφασμα με αυξημένο πάχος, τραχύτερη επιφάνεια και μεγαλύτερο πορώδες. Τα πλεκτά υφάσματα περιέχουν συχνά κλωστές εντοπισμού. Για παράδειγμα, κίτρινες κλωστές αραμιδίου πλέκονται συχνά σε διαστήματα δύο ιντσών σε ύφασμα carbon κατά μήκος της διεύθυνσης του στημονιού, για να βοηθήσουν τους κατασκευαστές να ταυτοποιήσουν τις διευθύνσεις του στημονιού και του υφαδιού κατά την διάρκεια της διαστρωμάτωσης ενός σύνθετου τεμαχίου.





**ΕΙΚΟΝΑ 32.** Ύφασμα με απλή πλέξη και leno ούγιο

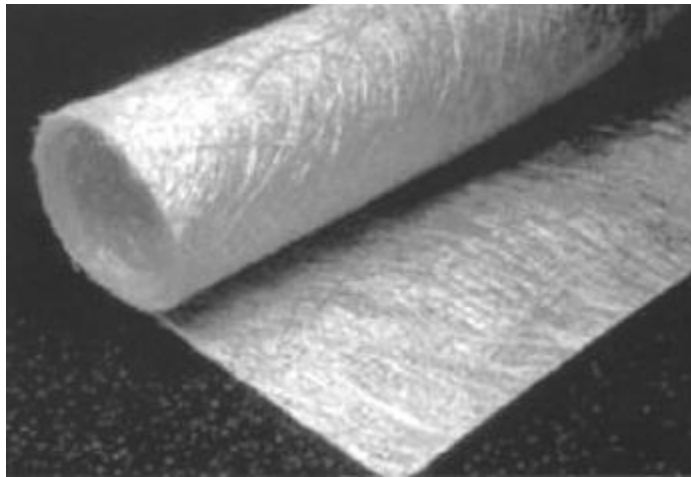
Η επιλογή πλέξης περιλαμβάνει ζητήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την κατασκευή όπως και τις τελικές μηχανικές ιδιότητες. Ο τύπος πλέξης επηρεάζει την διαστασιολογική σταθερότητα και την προσαρμοστικότητα (conformability ή drape) του υφάσματος πάνω σε πολύπλοκες επιφάνειες. Οι πλέξεις satin, για παράδειγμα, επιδεικνύουν καλή προσαρμοστικότητα. Δυστυχώς, η καλή προσαρμοστικότητα και η αντοχή στην διάτμηση είναι αμοιβαία αποκλειόμενες. Έτσι, ενώ τα πλεκτά υφάσματα είναι συχνά το υλικό επιλογής για πολύπλοκες γεωμετρίες, ο σχεδιαστής πρέπει να έχει αντιληφθεί ότι καθορισμένες διευθύνσεις υλικού μπορεί να είναι αδύνατο να τηρηθούν σε σύνθετα περιγράμματα και άλλα πολύπλοκα σχήματα, π.χ. κλωστές που αρχικά μπορεί να είναι ορθογώνιες μπορεί να μην έχουν παραμείνει ορθογώνιες στο τελειωμένο τεμάχιο. Αρκετές από τις κοινώς χρησιμοποιούμενες πλέξεις για σύνθετα υψηλής απόδοσης φαίνονται στον ΠΙΝΑΚΑ 8.

Πλέξη	Τύπος ίνας	<i>Κατασκευαστικά νήματα</i> <i>in</i> <i>Warp × Fill</i> (Στιμόνι × Υφάδι)	Βάρος επιφανείας ίνας ( $\frac{g}{m^2}$ )	Πάχος cured per ply κατά προσέγγιση (in) (το ακριβές πάχος εξαρτάται από το σύστημα ρητίνης, το περιεχόμενο σε ρητίνη και τις συνθήκες επεξεργασίας)
Style 120	E-Glass	60 x 58	107	0,005
Style 7781	E-Glass	57 x 54	303	0,010
Style 120	Kevlar 49	34 x 34	61	0,004
Style 285	Kevlar 49	17 x 17	170	0,010
8-harness satin	3K Carbon	24 x 23	370	0,014
5-harness satin	6K Carbon	11 x 11	370	0,014
5-harness satin	1K Carbon	24 x 24	125	0,005
Plain	3K Carbon	11 x 11	193	0,007

**ΠΙΝΑΚΑΣ 8.** Κοινά στυλ πλέξεων που χρησιμοποιούνται σε σύνθετα υψηλής απόδοσης

### 3.4 Ενισχυμένα υφάσματα (Reinforced Mats)

Τα ενισχυμένα υφάσματα, τα οποία φαίνονται στην ΕΙΚΟΝΑ 43, είναι φτιαγμένα από κομμένα ή συνεχή νήματα τοποθετημένα με μια στροβιλώδη μορφή. Αυτά τα υφάσματα συγκρατούνται συνήθως με συνδετικό υλικό από ρητίνη. Χρησιμοποιούνται για τεμάχια μέσης αντοχής με ομοιόμορφες διατομές. Τα ενισχυμένα υφάσματα από κομμένες αλλά και συνεχείς ίνες είναι διαθέσιμα σε βάρη από 0,75 έως 4,5 oz ft<sup>-2</sup> και σε διάφορα πλάτη. Τα επιφανειακά υφάσματα ή αλλιώς επικαλύψεις, είναι λεπτά, ελαφριά υλικά που χρησιμοποιούνται μαζί με ενισχυμένα υφάσματα και υλικά για να παρέχουν καλό επιφανειακό τελείωμα. Είναι αποτελεσματικά στο να ακολουθούν το σχήμα του καλουπιού και των στρώσεων. Συνδυαστικά υφάσματα, αποτελούμενα από μια στρώση πλεκτού προνήματος, που έχει σχηματίσει χημικό δεσμό με κομμένα υφάσματα, είναι διαθέσιμα από αρκετούς επεξεργαστές γυάλινων ενισχυτικών. Αυτά τα προϊόντα σχηματίζουν μια ευέλικτη ενίσχυση που συνδυάζει τον δι-διευθυντικό προσανατολισμό του πλεκτού προνήματος με τον πολυδιευθυντικό προσανατολισμό των του κομμένου υφάσματος. Αυτό εξοικονομεί χρόνο σε σχέση με τη χειρωνακτική διαστρωμάτωση, από τη στιγμή που δύο στρώσεις μπορούν να τοποθετηθούν ταυτόχρονα στο καλούπι σε μία μόνο κίνηση. Άλλοι συνδυασμοί είναι διαθέσιμοι για βελτίωση του επιφανειακού τελειώματος όπως και για πολυστρωματική ενίσχυση.



**EIKONA 33.** Mat με ενίσχυση από γυαλί

### 3.5 Κομμένες ίνες (Chopped Fibers)

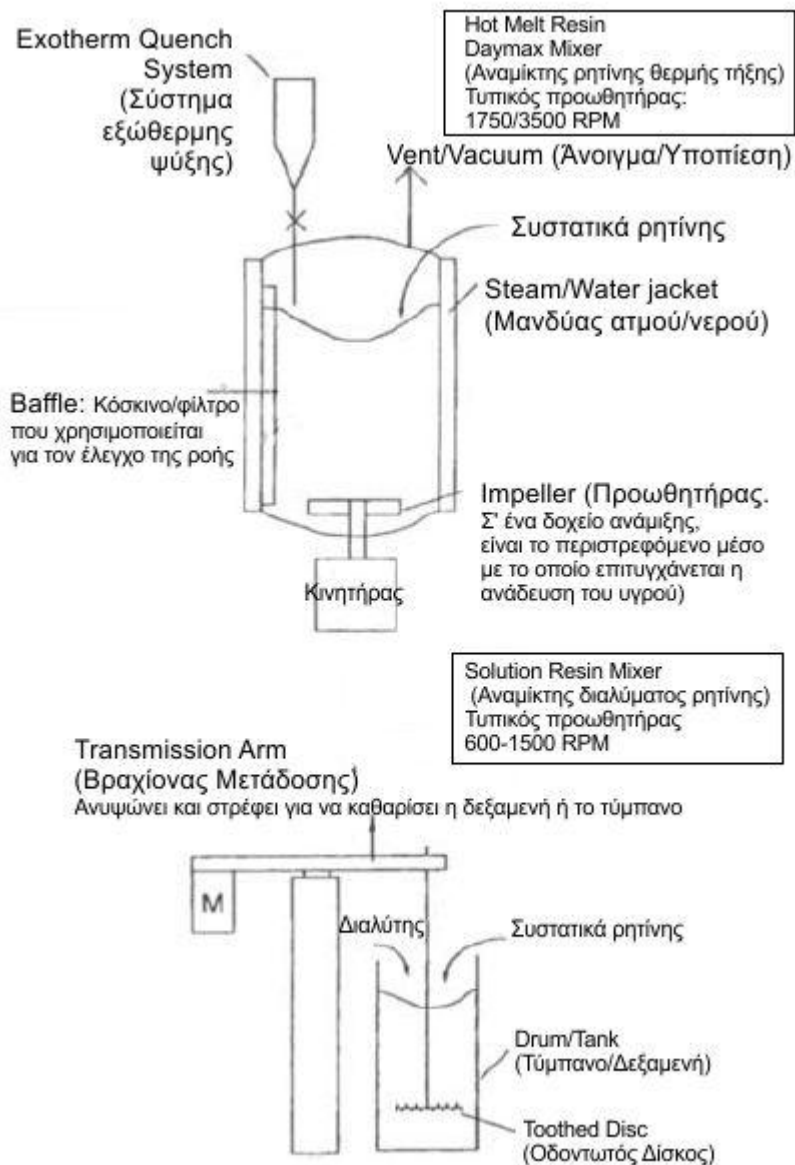
Οι κομμένες ίνες (EIKONA 44) παράγουν υψηλότερη δύναμη σε τεμάχια που έχουν προέλθει από συμπίεση και καλούπωμα με έγχυση (injection molding). Οι κομμένες ίνες είναι συνήθως διαθέσιμες σε διάφορα μήκη από 0,125 έως 2 ίντσες ,αν και είναι διαθέσιμες επίσης κοντύτερες και μακρύτερες ίνες. Αναμειγνύονται με ρητίνες και άλλα πρόσθετα ούτως ώστε να προετοιμαστούν τα υλικά για το καλούπωμα με συμπίεση ή με έγχυση, την ενθυλάκωση (encapsulation) και άλλες διεργασίες). Η ενίσχυση από κομμένο γυαλί είναι διαθέσιμη με πολλές επιφανειακές επεξεργασίες για να διασφαλιστεί ή βέλτιστη συμβατότητα με τα περισσότερα συστήματα θερμορρυθμιζόμενων και θερμοπλαστικών ρητινών. Οι κοντύτερες κομμένες ενισχύσεις είναι περισσότερο κατάλληλες για ανάμειξη με συστήματα θερμοπλαστικών ρητινών για καλούπωμα με έγχυση. Οι μακρύτερες κομμένες ενισχύσεις αναμειγνύονται με συστήματα θερμορρυθμιζόμενων ρητινών για καλούπωμα με συμπίεση και μεταφορά (compression and transfer molding). Οι φρεζαρισμένες ίνες (milled fibers) συνδυάζουν ενισχυτικές ιδιότητες με ευκολία επεξεργασίας στην ενθυλάκωση ή στο καλούπωμα με συμπίεση. Οι φρεζαρισμένες ίνες είναι ίνες γυαλιού με μήκος από 1/32 έως 1/8 ίντσες. Χρησιμοποιούνται για ενίσχυση θερμοπλαστικών τεμαχίων όπου οι απαιτήσεις δύναμης είναι από χαμηλές έως μέτριες και για ενισχυτικά πρόσθετα (fillers) και συγκολλητικά (adhesives).



**EIKONA 34.** Κομμένες ίνες γυαλιού

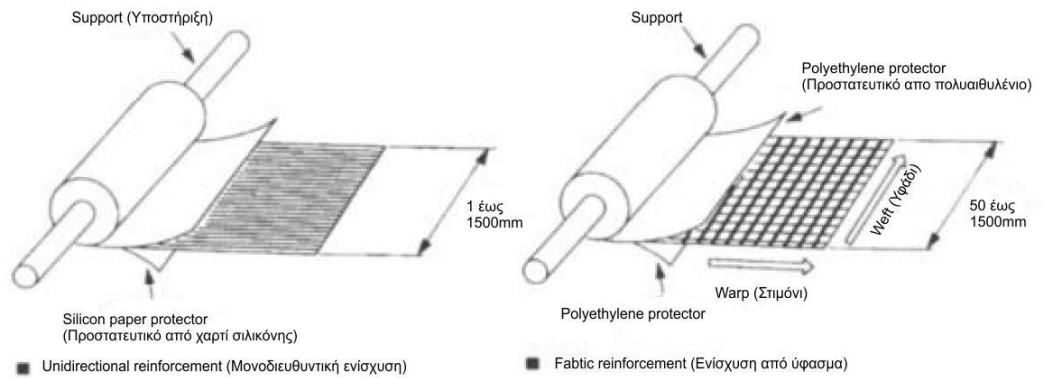
### 3.6 Παραγωγή προεμποτισμένων υφασμάτων (Prepreg manufacturing)

Υπάρχουν διάφορα στάδια από τα οποία περνάει μια ρητίνη κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παράγωγής. Οι ρητίνες φτιάχνονται συνήθως σε παραγωγή ανά παρτίδες κατά την οποία τα συστατικά τοποθετούνται σε συσκευές ανάμειξης (EIKONA 45) και θερμαίνονται αργά στην κατάσταση A-σταδίου (A-stage) ή διαφορετικά αρχική κατάσταση ανάμειξης, όπου η ρητίνη έχει πολύ χαμηλό ιξώδες που επιτρέπει την ροή και τον εμποτισμό των ινών. Από τη στιγμή που οι ρητίνες και οι παράγοντες του curing που χρησιμοποιούνται στις σύνθετες μήτρες μπορεί να είναι αρκετά αντιδραστικά, ο προσεκτικός έλεγχος της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ανάμειξης είναι κρίσιμος για να αποφευχθεί η εμφάνιση εξώθερμης αντίδρασης που μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα φωτιά. Κάποια συστατικά μπορεί να απαιτούν προ ανάμειξη πριν προστεθούν στο κύριο μείγμα. Μετά την ανάμειξη, η ρητίνη τοποθετείται συνήθως σε πλαστικές σακούλες έως ότου χρειαστεί για προεμποτισμό ή αποστολή για διαδικασίες όπως είναι η υγρή περιέλιξη, το υγρό καλούπωμα ή η μορφοποίηση με εμβάπτιση (wet filament winding, wet molding or pultrusion).

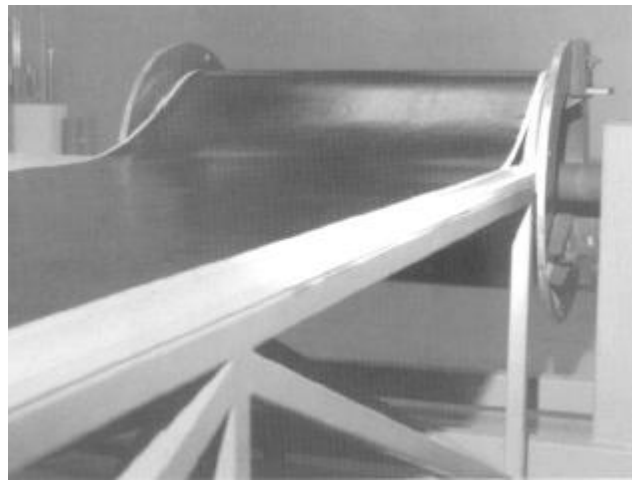


**ΕΙΚΟΝΑ 35.** Ανάμιξη ρητίνης σχηματικά

Το prepreg είναι η πλέον κυρίαρχη μορφή προϊόντος που χρησιμοποιείται στην κατασκευή προηγμένων σύνθετων. Συνίσταται συνήθως από μια στρώση ινών που έχει εμποτιστεί σε ρητίνη Β-σταδίου, όπως φαίνεται στην ΕΙΚΟΝΑ 46. Στην ΕΙΚΟΝΑ 47 φαίνεται ένα μεγάλο ρολό πλάτους 48 ιντσών ταινίας carbon/epoxy. Κάποιοι κατασκευαστές χρησιμοποιούν prepreg με πολλαπλές στρώσεις, αν η χρήση τους δικαιολογεί τα επιπλέον κόστη. Κατά τη διάρκεια του προ-εμποτισμού, η ρητίνη προχωρά στην κατάσταση Β-σταδίου στην οποία είναι ημιστερεή σε θερμοκρασία δωματίου, όπου τήκεται ξανά και ρέει κατά τη διάρκεια του κύκλου θερμικής επεξεργασίας (cure). Η ρητίνη Β-σταδίου κανονικά περιέχει ουσίες που της δίνουν κολλητική ικανότητα η οποία ονομάζεται "tack" και η οποία της επιτρέπει να προσκολλάται στον εαυτό της και στα εργαλεία επεξεργασίας κατά την διάρκεια της διαστρωμάτωσης. Όντας μια ρητίνη σε κατάσταση συνεχούς αντίδρασης, ο βαθμός της προόδου της, το tack και η ροϊκή συμπεριφορά της μεταβάλλονται εκτός και αν διατηρείται στην κατάψυξη όταν δεν χρησιμοποιείται.



**ΕΙΚΟΝΑ 36.** Ταινία από σύνθετα (*composite tape*)



**ΕΙΚΟΝΑ 37.** Υλικό από *carbon/epoxy* με πλάτος 48 ίντσες

Αρκετές παράμετροι καθορίζουν ένα prepreg, δηλαδή, το είδος της ίνας, η μορφή της ίνας (π.χ. μονοδιευθυντική ή πλεκτή), ο τύπος της ρητίνης, το βάρος επιφανείας της ίνας (FAW, fiber areal weight), το περιεχόμενο σε ρητίνη του προεμποτισμένου (RC: resin content), και το πάχος ανά στρώση του θερμικά επεξεργασμένου (CPT cured per ply thickness). Το βάρος επιφανείας της ίνας είναι απλά το βάρος της ίνας σε δεδομένη περιοχή και συνήθως καθορίζεται σε  $g\ m^{-2}$ . Το RC προδιαγράφει το ποσοστό της ρητίνης κατά βάρος στο prepreg. Αυτό δεν είναι απαραίτητα το περιεχόμενο σε ρητίνη του cured τεμαχίου. Κάποιες ρητίνες προ εμποτίζονται με περίσσεια ρητίνης (π.χ. 42%) η οποία θα αποβληθεί κατά τη διάρκεια του cure αποδίδοντας ένα τελικό περιεχόμενο ρητίνης μετά τη θερμική επεξεργασία 28 με 30 % κατά βάρος. Υπάρχουν υφάσματα με ρητίνη στα οποία η περιεκτικότητα δεν μεταβάλλεται πρακτικά πριν και μετά τη θερμική επεξεργασία και τα οποία ονομάζονται προεμποτισμένα με καθαρή περιεκτικότητα ρητίνης (net resin content prepregs). Σε αυτά τα προεμποτισμένα δεν απαιτείται αποβολή περίσσειας ρητίνης. Τέλος, το πάχος ανά στρώση του θερμικά επεξεργασμένου (cured per ply thickness) καθορίζεται ως το πάχος κάθε στρώσης σε ίντσες. Πρέπει να σημειωθεί ότι το τελικό CPT εξαρτάται από την διαμόρφωση του τεμαχίου και πιο συγκεκριμένα από το πάχος του τεμαχίου και τις συνθήκες επεξεργασίας που χρησιμοποιούνται από τον χρήστη.

Τα προεμποτισμένα προμηθεύονται συνήθως είτε ως προνήματα, ως μονοδιευθυντική ταινία (unidirectional tape) ή πλεκτό ύφασμα (woven cloth). Τα προεμποτισμένα προνήματα είναι

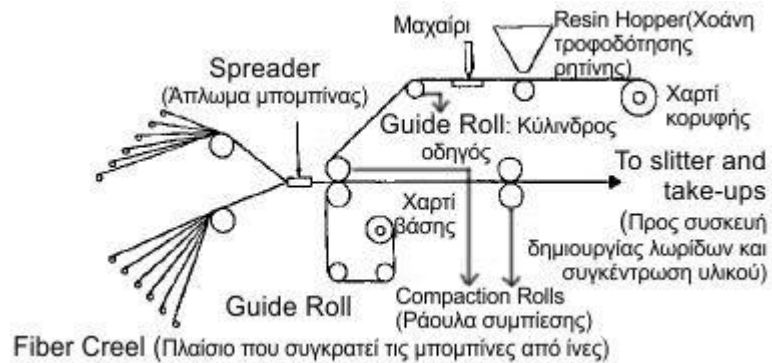
δέσμες από ίνες που χρησιμοποιούνται πρωταρχικά για περιέλιξη (filament winding) ή για τοποθέτηση ινών (fiber placement). Όπως υπονοεί και το όνομα, μια δέσμη ινών εμποτίζεται με την ρητίνη κατά τη διάρκεια του προεμποτισμού. Η διατομή και των δύο μορφών προϊόντων είναι ένα επίπεδο ορθογώνιο με πλάτος περίπου 0,10 και 0,25 ίντσες. Το υλικό προμηθεύεται σε μήκη, έως 20000 ft ανά τόπι.. Η προεμποτισμένη μονοδιευθυντική ταινία (unidirectional tape prepreg) είναι συνδυασμός πολλαπλών ευθυγραμμισμένων δεσμίδων εν παραλλήλω, τα οποία είναι εμποτισμένα με ρητίνη. Τυπικά επιφανειακά βάρη ρητινών έχουν εύρος από τόσο χαμηλό όσο  $30 \frac{g}{m^2}$  έως τόσο υψηλό όσο  $300 \frac{g}{m^2}$ , με τυπικές τιμές να είναι 95, 145, και  $190 \frac{g}{m^2}$  που αντιστοιχούν σε CPT (cured per ply thickness) 0,0035, 0,005 και 0,0075 ίντσες αντίστοιχα. Το πλάτος κυμαίνεται οπουδήποτε από 6 έως 60 ίντσες. Μηχανήματα αυτόματης τύλιξης ταινιών χρησιμοποιούν συνήθως υλικό πλάτους από 6 έως 12 ίντσες, ενώ τα πλατύτερα εμπορεύματα των 60 ιντσών κόβονται με μηχανήματα σε μορφές στρώσεων και χρησιμοποιούνται για χειρωνακτική διαστρωμάτωση. Τα υφάσματα των prepregs αποτελούνται από πλεκτό ύφασμα που έχει εμποτιστεί με ρητίνη. Από τη στιγμή που τα προεμποτισμένα υφάσματα χρησιμοποιούνται πρωταρχικά για χειρωνακτική διαστρωμάτωση, το υλικό προμηθεύεται συνήθως στην μορφή πλατιών ρολών, μέχρι πλάτους έως 60 ίντσες πάλι, για την ελαχιστοποίηση του αριθμού συνδέσμων που μπορεί να απαιτούνται σε ένα τεμάχιο. Τα υφάσματα prepregs έχουν συνήθως μεγαλύτερα βάρη επιφανείας ίνας (FAW) από την μονοδιευθυντική ταινία (unidirectional tape) και μεγαλύτερο CPT (π.χ. 0,014 ίντσες ανά στρώση).

Ο προεμποτισμός μπορεί πραγματοποιηθεί με:

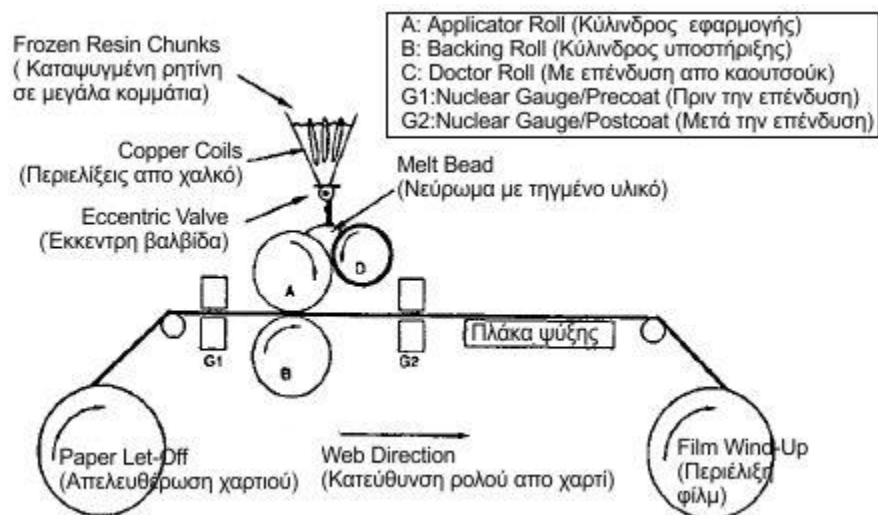
- (1) Εμποτισμό θερμής τήξης (hot-melt impregnation)
- (2) Λεπτή μεμβράνη ρητίνης (resin filming)
- (3) Εμποτισμό διαλύτη (solvent impregnation)

Στην πρωτότυπη διαδικασία της θερμής τήξης (ΕΙΚΟΝΑ 48) οι ίνες τροφοδοτούνταν από το μηχανήμα στήριξης των ινών, ευθυγραμμίζονταν και εμποτιζονταν με την τηγμένη ρητίνη και στη συνέχεια ψύχονταν άμεσα πριν τυλιχτούν στο ρολό. Η καινούργια διαδικασία λεπτής μεμβράνης ρητίνης λαμβάνει χώρα με δύο διαφορετικές λειτουργίες. Αρχικά, η ρητίνη γίνεται φιλμ με ελεγχόμενο πάχος πάνω σε χαρτί ενίσχυσης, όπως φαίνεται στην ΕΙΚΟΝΑ 49. Μετά η τυλιγμένη μεμβράνη μπορεί να οδηγηθεί απευθείας στην διαδικασία του προεμποτισμού ή να καταψυχθεί για μελλοντική χρήση. Η πλειοψηφία των prepregs φτιάχνεται σήμερα με την τεχνική του filming, που επιτρέπει καλύτερο έλεγχο της περιεχόμενης ρητίνης και του επιφανειακού βάρους της ίνας. Τυπικά βάρη που επιτυγχάνονται με την μέθοδο του filming έχουν εύρος από 20 έως  $80 \frac{g}{m^2}$  με ταχύτητες έως  $40 \frac{ft}{min}$ . Όταν το φιλμ ρητίνης είναι έτοιμο για εμποτισμό, οδηγείται σε μια ξεχωριστή μηχανή (ΕΙΚΟΝΑ 50), στην οποία ο ιστός από ίνες προστατεύεται και από τις δύο πλευρές με χαρτί ενίσχυσης. Ο εμποτισμός επιτυγχάνεται με την εφαρμογή θερμότητας και πίεση από ράουλα τα οποία χρησιμοποιούνται για να πιέζουν δύο ή περισσότερα φύλλα μαζί ούτως ώστε να σχηματιστεί ένα διαστρωματωμένο προϊόν. Η υψηλή πίεση που δημιουργείται φέρνει τα φύλλα σε πολύ στενή επαφή και μπορεί να οδηγήσει στην αποβολή φυσαλίδων που μπορεί να οδηγούσαν σε ελαττωματικό δεσμό. Αφού το υλικό περάσει από το δεύτερο ζεύγος ράουλων, ψύχεται άμεσα για να αυξηθεί το ιξώδες της ρητίνης και παράγεται ένα ημι-στερεό prepreg. Στην έξοδο, το άνω φύλλο

αφαιρείται και πετιέται, οι άκρες διαμορφώνονται ευθείες με ειδικά κοπτικά και το τελειωμένο προεμποτισμένο ύφασμα γίνεται ρολό στο καρούλι. Η διαδικασία λειτουργεί με περίπου  $\frac{ft}{min}$  με πλάτη έως 60 ίντσες.

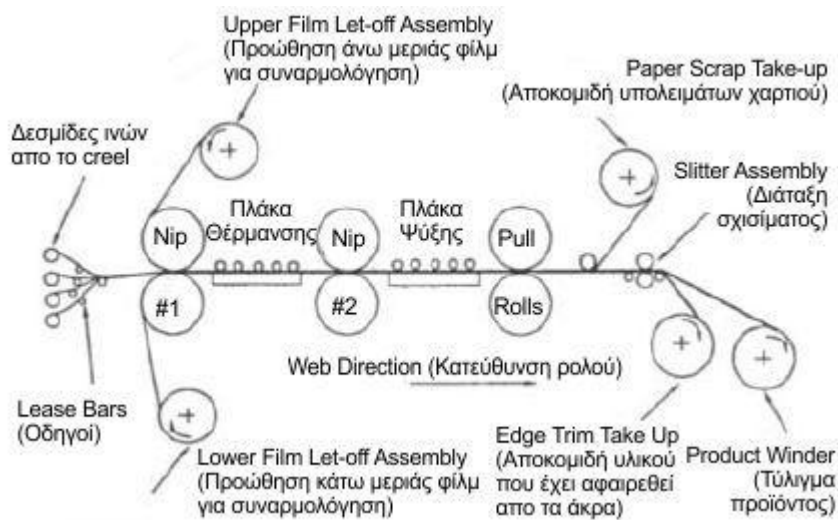


**ΕΙΚΟΝΑ 38.** Διαδικασία εμποτισμού ρητίνης θερμής τήξης (Hot melt resin impregnation process)



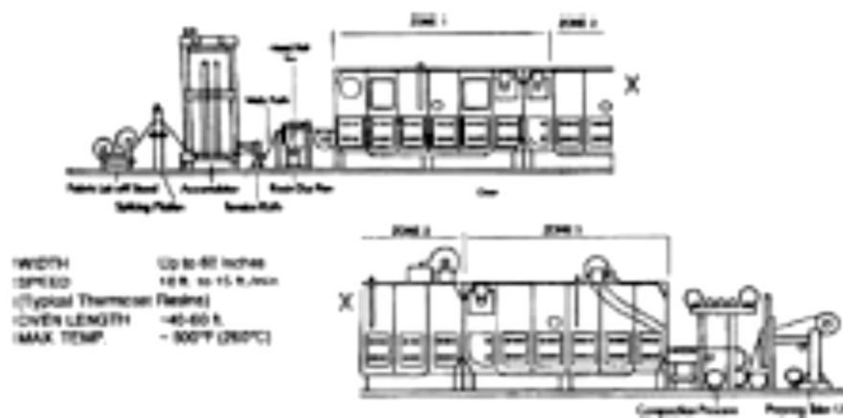
**ΕΙΚΟΝΑ 39.** Διαδικασία δημιουργίας λεπτής μεμβράνης (φίλμ) από ρητίνη





**ΕΙΚΟΝΑ 40.** Hot melt tape from resin film. (Ταινία θερμής τήξης από μεμβράνη ρητίνης)

Η τρίτη μέθοδος, εμποτισμός με διαλύτη (solvent impregnation) (ΕΙΚΟΝΑ 51) χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για εμποτισμό δεσμιδών, πλεκτών υφασμάτων ή ρητίνες υψηλής θερμοκρασίας (π.χ. πολυιμίδια), τα οποία δεν υπόκεινται προεμποτισμό θερμής τήξης και πρέπει να διαλυθούν σε διαλύτη. Ένα μειονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι ότι κατάλοιπα διαλύτη μπορεί να παραμείνουν στο prepreg και να προκαλέσουν πρόβλημα πηχτικότητας κατά την διάρκεια του cure, επομένως, η πρόσφατη τάση είναι η χρήση μεθόδων θερμής τήξης ή φιλμ ρητίνης για μονοδιευθυντικά αλλά και για prepreg υφάσματα. Την επεξεργασία του διαλύματος χειρίζεται μια γραμμή παραγωγής η οποία ονομάζεται treater line. Ο ιστός του υφάσματος τραβιέται από το καρούλι μέσα σε μια δεξαμενή εμβάπτισης, η οποία περιέχει το διάλυμα ρητίνης (η ακετόνη είναι ο πιο κοινός διαλύτης για εποξικές ενώσεις) και μετά περνάει δια μέσου ελεγχόμενου σερτ ράουλων για να τεθεί το περιεχόμενο ρητίνης. Τυπικές ταχύτητες είναι  $10-15 \frac{ft}{min}$  για υλικό πλάτους 60 ιντσών. Ο ιστός περνάει κάτω από κλιβάνο θερμού αέρα, ο οποίος εξυπηρετεί στο να εξατμιστεί το κύριο μέρος του διαλύτη και προωθεί την ρητίνη για τον έλεγχο της ικανότητας προσκόλλησης. Στο τέλος του κλιβάνου το υλικό τυλίγεται με εφαρμογή ενός στρώματος πλαστικού φιλμ στην μια πλευρά, το οποίο λειτουργεί ως διαχωριστής. Κάποια προϊόντα απαιτούν συμπίεση σ' αυτό το στάδιο για να κλείσει η ύφανση ενώ άλλα μπορεί να έχουν παραμορφωθεί κατά την διέλευση τους από την γραμμή παραγωγής και να απαιτούν επανεπεξεργασία σε ένα μηχάνημα ευθυγράμμισης το οποίο ονομάζεται tenter, και το οποίο τραβάει και ισιώνει το ύφασμα για να επαναφέρει την ευθυγράμμιση.



**ΕΙΚΟΝΑ 41.** Γραμμή εμπροτισμού διαλύματος (Solution impregnation line)

### 3.7 Σύνοψη κεφαλαίου 3

Εξαιτίας του χαμηλού κόστους τους, της υψηλής αντοχής σε εφελκυσμό, αντοχής σε κρούση και καλής χημικής αντίστασης, οι ίνες γυαλιού χρησιμοποιούνται εκτενώς σε εμπορικές εφαρμογές συνθέτων. Παρόλαυτα, οι ιδιότητες τους δεν μπορούν να συναγωνιστούν αυτές των ανθρακονημάτων για εφαρμογές συνθέτων υψηλής απόδοσης. Κατέχουν ένα σχετικά μικρό μέτρο ελαστικότητας και έχουν κατώτερες ιδιότητες κόπωσης συγκρινόμενες με τα ανθρακονήματα. Οι τρεις πλέον κοινές ίνες γυαλιού που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα είναι τα: E-glass, S-2 glass και quartz.

Οι ίνες αραμιδίου κατέχουν συνδυασμό καλής αντοχής σ' εφελκυσμό και μέτρου ελαστικότητας, έξοχης σκληρότητας με εξαιρετική βαλλιστική αντίσταση και αντίσταση στην κρούση. Όμως εξαιτίας της έλλειψης πρόσφυσης στην μήτρα, επιδεικνύουν χαμηλή εγκάρσια τάση και χαμηλές δυνάμεις διαμήκους συμπίεσης και ενδοστρωματικής διάτμησης.

Οι ίνες άνθρακα και γραφίτη είναι οι κυρίαρχες μορφές ίνας σε δομές σύνθετων υψηλής απόδοσης. Οι ίνες γραφίτη και άνθρακα μπορεί να παραχθούν με ένα μεγάλο εύρος ιδιοτήτων, εντούτοις επιδεικνύουν γενικά ανώτερη αντοχή σε εφελκυσμό και θλίψη, έχουν υψηλά μέτρα ελαστικότητας, έξοχα χαρακτηριστικά κόπωσης και δεν διαβρώνονται. Οι ίνες άνθρακα και γραφίτη μπορεί προέρχονται από ραιγιόν (rayon), πίσσα ή PAN (πολυακρυλονιτρίλιο, polyacrylonitrile). Το ραιγιόν χρησιμοποιείται σπάνια εξαιτίας του χαμηλού ορίου διαρροής και του υψηλού κόστους. Τα ανθρακονήματα που βασίζονται στο PAN και έχουν δυνάμεις με εύρος από 500 έως 1000 ksi και μέτρα ελαστικότητας με εύρος από 30 έως 45 msi, με επιμηκύνσεις έως 2 % είναι εμπορικά διαθέσιμα.

Οι ίνες γραφίτη με βάση την πίσσα με υψηλό μέτρο ελαστικότητας μεταξύ 50 και 145 msi χρησιμοποιούνται συχνά σε χωρικές (space) δομές που απαιτούν υψηλή ακαμψία.

Τα πλεκτά προϊόντα δύο διαστάσεων είναι διαθέσιμα συνήθως σαν κατασκευές 0°,90°. Οι πλέξεις φτιάχνονται σε αργαλειό συνυφαίνοντας δύο ορθογώνια (αμοιβαία κάθετα) σεί από νήματα (στημόνι και υφάδι). Η διεύθυνση του στημονιού είναι παράλληλη με το μήκος του

ρολού, ενώ του υφαιδιού είναι κάθετη στο μήκος του ρολού. Οι πλέξεις πρέπει να κατατάσσονται σύμφωνα με το μοτίβο της συνύφανσης περιλαμβάνοντας τις πλέξεις plain (απλή), basket, satin, twill, leno και mock leno. Τα ενισχυμένα μπλοκ (mats) με κομμένες ή περιστρεφμένες ίνες, είναι επίσης διαθέσιμα για τεμάχια που απαιτούν χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες.

Ο προεμποτισμός είναι μια διαδικασία στην οποία προκαθορισμένη ποσότητα ρητίνης μπαίνει στις ίνες από τον προμηθευτή. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με:

- (1) Εμποτισμό θερμής τήξης (hot-melt impregnation)
- (2) Λεπτή μεμβράνη ρητίνης (resin filming)
- (3) Εμποτισμό διαλύτη (solvent impregnation)

Ο εμποτισμός θερμής τήξης έχει αντικατασταθεί σε μεγάλο βαθμό από την διαδικασία του resin filming εξαιτίας της καλύτερης ποιότητας και του καλύτερου ελέγχου που επιτυγχάνεται με τη χρήση λεπτής μεμβράνης ρητίνης. Ο εμποτισμός με διαλύτη χρησιμοποιείται για υλικά που δεν υπόκεινται θερμής τήξης ή resin filming, όμως η παρουσία υπολειπόμενου διαλύτη μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην επεξεργασία υπό την μορφή κενών και πορώδους κατά την διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας.

Οι ίνες ενίσχυσης μπορεί να προμηθευτούν σε ξηρή μη εμποτισμένη μορφή ή ως προεμποτισμένα υφάσματα έτοιμα για διασρωμάτωση.

Τα επίπεδα απορρόφησης ειδικής ενέργειας (specific energy absorption levels) που επιτυγχάνονται κατά την προοδευτική αξονική συμπίεση προφίλ σύνθετων υλικών με οργανική μήτρα, είναι συγκρίσιμα ή ακόμα και μεγαλύτερα από αυτά που λαμβάνονται με προοδευτική συμπίεση, που οδηγεί στην δημιουργία πτυχωσεων, σε προφίλ χάλυβα ή αλουμινίου. Αυτό το γεγονός καθιστά τα σύνθετα υλικά μια καλή επιλογή για τον σχεδιασμό στοιχείων απορρόφησης ενέργειας στην πρόσκρουση.

Διαφορετικά μέσα triggering, μπορεί να χρησιμοποιούνται για να ξεκινά η κατάρρευση σε μικρότερα μέγιστα φορτία (peak loads) και για να διασφαλίζεται επαναληψιμότητα στην διάδοση της κατάρρευσης στις κατασκευές. Το triggering μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για τον έλεγχο της περιοχής έναρξης της αστοχίας. Τα triggers μπορεί να έχουν την μορφή γεωμετρικών χαρακτηριστικών ή μηχανικών συσκευών που εισάγουν συγκεντρώσεις τάσεων μέσα στην δομή, οι οποίες στη συνέχεια μειώνουν τα μέγιστα φορτία και διασφαλίζουν περισσότερο ευνοϊκή συμπεριφορά κατάρρευσης.

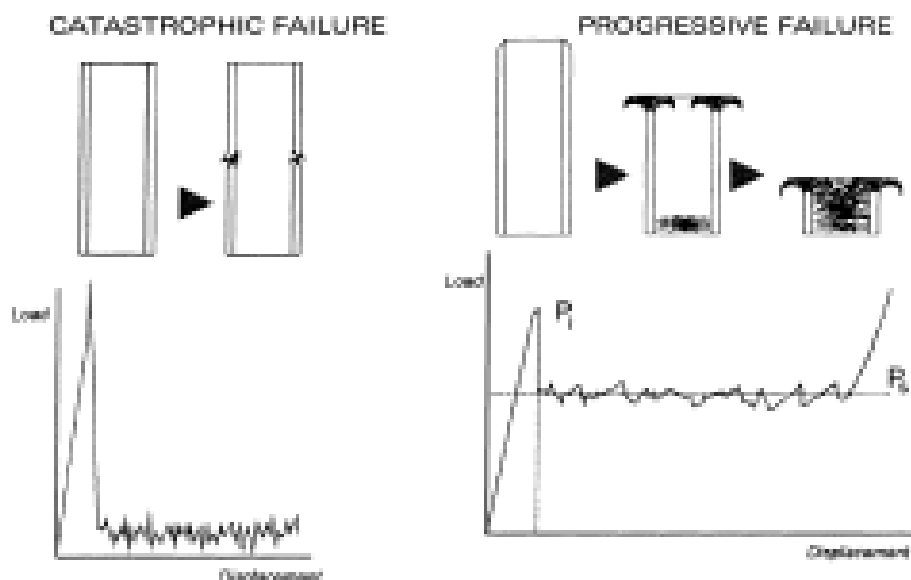
Δομικά εξαρτήματα, ειδικά σχεδιασμένα για την αποτελεσματική απορρόφηση ενέργειας, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές οχημάτων εδώ και δεκαετίες. Αυτά τα εξαρτήματα είναι κυρίως διαφορετικά είδη δοκών, σωλήνων, κώλουροι κώνοι (frusta) και ενισχυτικά ράβδων (struts). Σε πρώιμες κατασκευές αυτά τα εξαρτήματα ήταν σχεδόν αποκλειστικά κατασκευασμένα από χάλυβα. Πιο πρόσφατα κυρίως σε πιο εξεζητημένα αυτοκίνητα, εξαρτήματα τύπου σάντουιτς ή από σύνθετα έχουν κάνει την εμφάνισή τους. Οι μηχανισμοί αστοχίας κατά την συμπίεση δομών μεταλλικών και από σύνθετα είναι ουσιαστικά διαφορετικοί. Οι μεταλλικές δομές είναι σχετικά όλκιμες και κυρίως παραμορφώνονται ελαστικά, ενώ τα σύνθετα υλικά αστοχούν γενικά με πιο ψαθυρό τρόπο. Διαφορετικά triggers χρησιμοποιούνται για διαφορετικά υλικά. Σε μεταλλικούς σωλήνες, οι ατέλειες μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την διασφάλιση σταθερού, προοδευτικού «πλαστικού διπλώματος» της δομής. Τα dyes είναι άλλα κοινώς χρησιμοποιούμενα triggers για μεταλλικούς σωλήνες, όπου οι σωλήνες για παράδειγμα μπορεί να αναγκαστούν να αναποδογυρίσουν ή να διαχωριστούν. Σε ψαθυρούς σωλήνες από σύνθετα χρησιμοποιούνται διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως είναι διαμόρφωση άκρων σαν λοξοτομή (chamfer), ή μορφή διαχύτη (tulip), ή αυλάκι (groove) εσοχή με σκοπό να δημιουργήσουν προοδευτική αστοχία.

### 4.1 Αξονική προοδευτική θλίψη (crushing)

Η αστοχία ενός σύνθετου προφίλ κάτω από αξονική φόρτιση συμπίεσης λαμβάνει χώρα συνήθως με καταστροφικό τρόπο εκτός και αν εξασφαλίζεται ένας μηχανισμός triggering προοδευτικής αστοχίας. Ο μηχανισμός triggering συνίσταται τις περισσότερες φορές από την διαμόρφωση μιας ειδικής γεωμετρίας σε μια από τις ακμές του προφίλ. Η γεωμετρία του trigger δημιουργεί μια εντοπισμένη περιοχή αστοχίας ως αποτέλεσμα συγκέντρωσης τάσεων, εν συνεχεία η εντοπισμένη περιοχή αστοχίας προοδευτικά επεκτείνεται. Στην ΕΙΚΟΝΑ 52

φαίνονται οι τυπικές καμπύλες φορτίου/μετατόπισης για καταστροφική και προοδευτική αστοχία από την αξονική συμπίεση ενός σύνθετου προφίλ.

Το εμβαδό κάτω από την καμπύλη φορτίου –μετατόπισης αντιπροσωπεύει την απορροφημένη ενέργεια κατά την διάρκεια της διαδικασίας αστοχίας. Αυτή η περιοχή είναι πολύ υψηλότερη κατά την διάρκεια της προοδευτικής θλίψης εξαιτίας του σχεδόν σταθερού φορτίου υπό του οποίου προχωρά η αστοχία. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο απαιτείται ένας μηχανισμός trigger για να επιτευχθεί ένα υψηλό επίπεδο απορρόφησης ενέργειας.



**ΕΙΚΟΝΑ 42.** Απορρόφηση ενέργειας σε αξονική προοδευτική θλίψη

Η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας ενός προφίλ μετράται με το μέγεθος ειδική απορρόφηση ενέργειας ( $E_s$  specific energy absorption) η οποία ορίζεται ως  $E_s = \frac{P_s}{\rho \cdot A}$  όπου  $A$  είναι το εμβαδόν της τομής του προφίλ,  $P_s$  είναι το υφιστάμενο φορτίο και  $\rho$  είναι η πυκνότητα του υλικού.

Όταν ένα προφίλ χρησιμοποιείται για την προστασία μιας κατασκευής μέσω απορρόφησης της ενέργειας πρόσκρουσης, είναι σημαντικό να περιοριστούν τα φορτία που μεταδίδει το προφίλ, για την αποφυγή αστοχίας της υπόλοιπης κατασκευής. Συνεπώς, για την επιλογή της γεωμετρίας του trigger ενός στοιχείου απορρόφησης ενέργειας, δεν είναι σημαντικό μόνο να ληφθεί υπόψη το υφιστάμενο φορτίο κατά την διάρκεια της σύνθλιψης αλλά και το μέγιστο επίπεδο φορτίου που εμφανίζεται κατά μήκος του στοιχείου. Είναι επίσης σημαντικό να δίνεται προσοχή στο τελευταίο ανοδικό μέρος της καμπύλης προοδευτικής αστοχίας της ΕΙΚΟΝΑΣ 52. Αντιστοιχεί σε μια ανεξέλεγκτη αύξηση του φορτίου που μπορεί να συμβεί σε κλειστά προφίλ σαν αποτέλεσμα υλικού αστοχίας που έχει εγκλωβιστεί μέσα στο προφίλ. Γι' αυτό τον λόγο υπάρχει και διαφορά στην συμπεριφορά μεταξύ κλειστών και ανοικτών προφίλ.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Μηχανισμοί αστοχίας που παρατηρούνται στην αξονική κατάρρευση λεπτότοιχων σωλήνων από σύνθετο υλικό

Εκτενής πειραματική μελέτη σε σχέση με την αξονική κατάρρευση λεπτότοιχων σωλήνων από σύνθετα υλικά, ποικίλων γεωμετριών και συνδυασμών ίνας/μήτρας έχει επιδείξει υψηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας αυτών των υλικών. Έχουν αναπτυχθεί κάποιοι τρόποι αστοχίας βάση των πειραματικών παρατηρήσεων.

Ο τρόπος αστοχίας λεπτότοιχων κυλινδρικών σύνθετων σωλήνων, που υφίστανται αξονική συμπίεση, εξαρτάται από έναν μεγάλο αριθμό παραμέτρων που έχουν να κάνουν με το υλικό, την δομή του και τις συνθήκες δοκιμής. Κάποιες από αυτές τις παραμέτρους είναι: η διάταξη των ινών, τα υλικά των συστατικών (μήτρας και ινών), οι γεωμετρικές διαστάσεις των σωλήνων, η τάξη μεγέθους της εφαρμοζόμενης τάσης κλπ. Από την ευρεία πειραματική μεταχείριση αξονοσυμμετρικών σωλήνων, κατασκευασμένων από σύνθετα υλικά με μήτρα από πολυμερές και ινώδη ενίσχυση, παρατηρήθηκαν οι εξής κύριοι τρόποι κατάρρευσης κατά την διάρκεια της αξονικής τους συμπίεσης:

- (Τρόπος κατάρρευσης I – Mode I)
- Ψαθυρή αστοχία / θραύση του εξαρτήματος, που έχει ως αποτέλεσμα την καταστροφική αστοχία με πολύ μικρή απορρόφηση ενέργειας. (Τρόπος κατάρρευσης II – Mode II)
- Προοδευτικό δίπλωμα (folding) παρόμοιο με την συμπεριφορά σε θλίψη λεπτότοιχων μεταλλικών και πλαστικών σωλήνων, με επίδειξη μέτριας ικανότητας απορρόφησης ενέργειας. ( Τρόπος κατάρρευσης III – Mode III)

Ο τρόπος κατάρρευσης I συνιστά τον πιο αποτελεσματικό τρόπο απορρόφησης ενέργειας και γι' αυτό τον λόγο έχει συγκεντρώσει το πειραματικό ενδιαφέρον.

Ο τρόπος αυτός χαρακτηρίζεται από την προοδευτική αστοχία του κελύφους και τον σχηματισμό συνεχών μετώπων (continuous fronds), τα οποία εξαπλώνονται ακτινικά προς τα έξω και προς τα μέσα υπό την μορφή αστοχίας σχήματος «μανιταριού» ('mushrooming' failure) ΕΙΚΟΝΑ 53.



**ΕΙΚΟΝΑ 43.** Αστοχία υπό την μορφή μανιταριού

Καθώς η παραμόρφωση προχωρά, τα διαμορφωμένα μέτωπα στην εξωτερική πλευρά του δοκιμίου αναδιπλώνονται προς τα κάτω (ΕΙΚΟΝΑ 54) και ταυτόχρονα αναπτύσσονται αξονικές ρωγμές (axial splits), που οφείλονται στην αναπτυσσόμενη τάση περιφερειακά του κελύφους, η οποία ακολουθείται από διεύρυνση των λωρίδων του υλικού. Ο ακριβής τρόπος παραμόρφωσης εξαρτάται από το υλικό του κελύφους και τις συνθήκες διαστρωμάτωσης. Το μήκος των ρωγμών πιθανόν απορρέει από το ενεργό μήκος των λωρίδων του υλικού που υφίστανται φόρτιση.

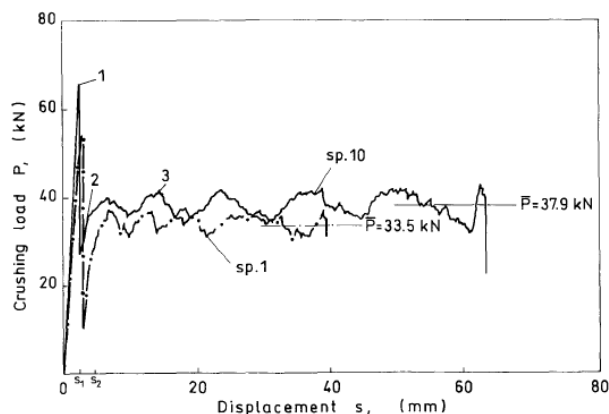


**ΕΙΚΟΝΑ 44.** Αναδίπλωση προς τα κάτω εξωτερικών μετώπων, ανάπτυξη axial splits

Τυπική μορφή διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης παρατίθεται στην ΕΙΚΟΝΑ 55. Αρχικά το κέλυφος συμπεριφέρεται ελαστικά και το φορτίο αυξάνει με σταθερό ρυθμό έως το μέγιστο φορτίο,  $P_{max}$ , η τιμή του οποίου εξαρτάται από την γεωμετρία του κελύφους και τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε υλικού. Στη συνέχεια το φορτίο μειώνεται απότομα. Σε αυτή την φάση, σχηματίζεται μια κεντρική ρωγμή (central intrawall crack) μήκους  $L_c$  στην άκρη του κελύφους παρακαίμενα στην περιοχή φόρτισης ΕΙΚΟΝΑ 56. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο σχηματισμός επιπρόσθετων διαμηκών ενδοστρωματικών ρωγμών, εκατέρωθεν της κεντρικής ρωγμής, μπορεί να οφείλεται σε κάμψη εξαιτίας μη παραλληλότητας μεταξύ του δοκιμίου και

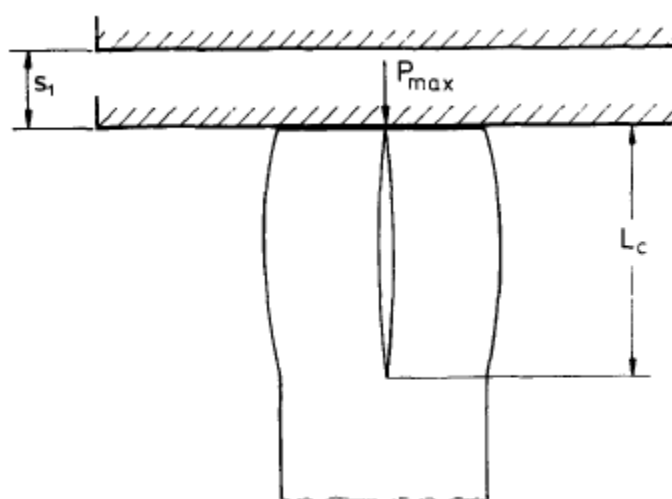
της πλάκας της πρέσας. Εξαιτίας της πλαστικής παραμόρφωσης του κελύφους σχηματίζεται μια δίογκωση του άνω άκρου του , που εφάπτεται στην περιοχή φόρτισης.

Σε δοκιμή αξονικής φόρτισης η απορροφημένη ενέργεια από το δοκίμιο που έχει καταρρεύσει κατά την διαδικασία της θλίψης υπολογίζεται μετρώντας την περιοχή κάτω από την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Καθώς η παραμόρφωση προχωρά μετά την εμφάνιση του  $P_{max}$  και την απότομη πτώση του φορτίου που επακολουθεί ,η μορφή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης εξαρτάται από τον τρόπο κατάρρευσης και τις συνθήκες φόρτισης. Για λεπτότοιχα κελύφη από σύνθετα υλικά η συμπεριφορά θραύσης του κελύφους φαίνεται να επηρεάζει την σταθερότητα φόρτισης , όπως και το μέγεθος του φορτίου θραύσης και την απορρόφηση ενέργειας κατά την διάρκεια της δοκιμής. Τα κελύφη που παραμορφώνονται με σταθερό, προοδευτικό και ελεγχόμενο τρόπο μπορούν και διαχέουν μεγάλα ποσά ενέργειας. Η περιοχή μετά την θραύση χαρακτηρίζεται από πριονωτές διακυμάνσεις οφειλόμενες στην απορρόφηση της ενέργειας από αλληλουχία μικρορωγμών (microcracking sequence) , που χαρακτηρίζουν κάθε περίπτωση κατάρρευσης.



**ΕΙΚΟΝΑ 45.** Τυπική μορφή διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης

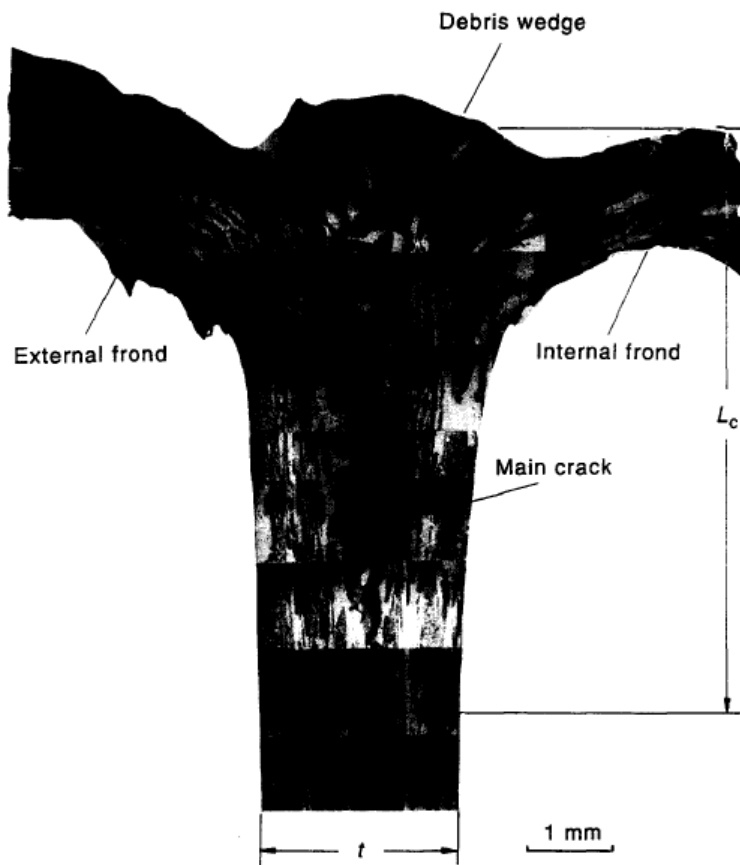




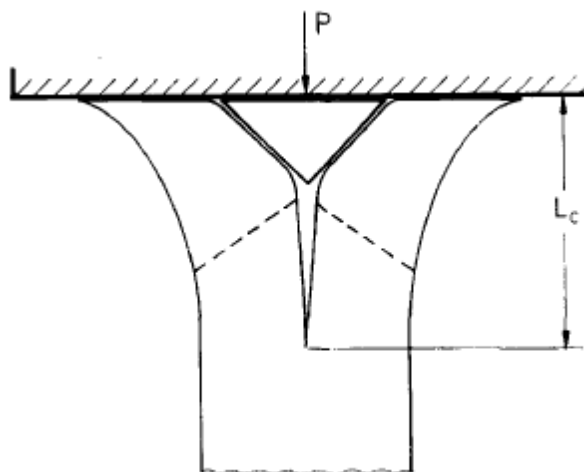
**ΕΙΚΟΝΑ 46.** Κεντρική ρωγμή

Μετά από την αύξηση του φορτίου με σταθερό ρυθμό και την απότομη πτώση του, ακολουθεί η δεύτερη φάση (post-crushing regime). Το φορτίο μεγαλώνει ξανά με αυξανόμενη απόκλιση και αρχίζει να ταλαντώνεται γύρω από ένα μέσο φορτίο θλίψης (mean post-crushing load  $\bar{P}$ ). Ο σχηματισμός της πρώτης κορυφής και πτώσης του φορτίου (βλέπε ΕΙΚΟΝΑ 55) μπορεί να σχετίζεται με τον σχηματισμό δύο ίσων δεσμών στρώσεων που έχουν καμφθεί προς τα μέσα και προς τα έξω, εξαιτίας της καμπτικής φθοράς που επέρχεται μετά την απότομη πτώση του φορτίου σε απόσταση από την επιφάνεια επαφής ίση με το πάχος του τοιχώματος.

Σε αυτή την φάση μια τριγωνική σφήνα αποτελούμενη από κονιοποιημένο υλικό (debris wedge) αρχίζει να σχηματίζεται (ΕΙΚΟΝΕΣ 57 και 58). Ο σχηματισμός της μπορεί να οφείλεται στην τριβή μεταξύ των καμφθέντων δεσμών υλικού και της πλάκας της πρέσας. Πρέπει να σημειωθεί ότι η σφήνα ολοκληρώνεται όταν το θλιπτικό φορτίο αρχίζει να ταλαντώνεται και εν συνεχεία παραμένει σταθερή καθ' όλη την διαδικασία παραμόρφωσης στην φάση του post crushing.



**ΕΙΚΟΝΑ 47.** Debris wedge, internal-external frond, main crack



**ΕΙΚΟΝΑ 48.** Σχηματισμός εσωτερικού μηχανισμού θραύσης

Η συμπεριφορά των ινών της ενίσχυσης εξαρτάται από τον προσανατολισμό τους. Οι ίνες που έχουν ευθυγραμμιστεί αξονικά κάμπτονται προς τα μέσα ή προς τα έξω, με ή χωρίς θραύση ανάλογα με την ευκαμψία τους και τους περιορισμούς που επιβάλλονται από τις άλλες ίνες. Η ευκαμψία των ινών εξαρτάται από τον τρόπο που έχει δομηθεί το σύνθετο από αυτές. Ίνες που έχουν τοποθετηθεί κατά την εγκάρσια διεύθυνση μπορούν να επεκταθούν:

προς τα έξω με θραύση (fracturing) ή

προς τα μέσα είτε με θραύση, με λυγισμό ή buckling.

Αποκόλληση στρώσεων (delamination) συμβαίνει λόγω διάτμησης και εφελκυσμού μεταξύ των στρώσεων. Οι αξονικές στρώσεις διαχωρίζονται σε προοδευτικά λεπτότερες στρώσεις, σχηματίζοντας με αυτό τον τρόπο, διαστρωματικές ρωγμές κάθετες ως προς την κατεύθυνση των ινών. Αυτό συμβαίνει κυρίως εξαιτίας του buckling των ινών που καταλήγει στην θραύση τους ή εξαιτίας διαστρωματικής διάτμησης που χωρίζει την διαστρωμάτωση σε πολλές λεπτές στρώσεις χωρίς να υπάρχει θραύση των ινών. Οι ρωγμές διαδίδονται κατά προτίμηση δια μέσου των πιο αδύναμων περιοχών της δομής του σύνθετου υλικού, οι οποίες είναι:

- περιοχές πλούσιες σε ρητίνη
- σημεία που συνορεύουν εγκάρσιες ίνες

σ' αυτές τις περιπτώσεις καταλήγουμε σε debonding (καταστροφή του δεσμού μεταξύ ίνας και ρητίνης)

ή δια μέσου

- της επιφάνειας επαφής διαμηκών και εγκάρσιων στρώσεων

σ' αυτήν περίπτωση καταλήγουμε σε delamination (αποκόλληση στρώσεων)

Οι κύριες πηγές διάχυσης ενέργειας σε μικροσκοπική κλίμακα, που συντελούν στην γενική απορρόφηση ενέργειας κατά την διάρκεια της κατάρρευσης, μπορεί να αναφερθούν επιγραμματικά:

- Εσωτερική διάδοση ρωγμών (intrawall crack propagation)
- Κάμψη μετώπων (fronds bending) εξαιτίας αποκόλλησης στρώσεων
- Αξονικός διαχωρισμός μεταξύ μετώπων (axial splitting between fronds)
- Καμπτική φθορά ξεχωριστών στρώσεων εξαιτίας μικρής ακτίνας καμπυλότητας στα όρια της αποκόλλησης των στρώσεων
- Αντίσταση δια τριβής στην αξονική ολίσθηση μεταξύ παρακείμενων στρώσεων
- Αντίσταση δια τριβής στην διείδυση της δακτυλιοειδούς debris wedge
- Αντίσταση δια τριβής στα μέτωπα που ολισθαίνουν κατά μήκος της πλάκας της πρέσας

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Διεξαγωγή του πειράματος**

**6.1 Αναγνώριση του χρησιμοποιούμενου υλικού**

Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια. Το σύνθετο υλικό αποτελείται από ίνες carbon E722/HS08000/PK1 (Toray T300 equivalent) ,  $205 \frac{g}{m^2}$ , plain, 45% resin weight και E722/UHS130/PK01 (Toray T700 equivalent),  $130 \frac{g}{m^2}$ , UD 35% resin weight.

Για να βρεθεί η ακριβής διαστρωμάτωση του υλικού έγινε σταδιακή απομάκρυνση υλικού με χρήση γυαλόχαρτων με χειρωνακτικό τρόπο. Χρησιμοποιήθηκαν εναλλάξ γυαλόχαρτα P 500 και P 800. Χρήση του P 500 γινόταν αρχικά μέχρι την αποκάλυψη της κάθε στρώσης, και με το P 800 εξομαλύνουμε την επιφάνεια , ούτως ώστε η νέα στρώση -κάθε φορά- να διαφαίνεται καθαρά και ομοιόμορφα στο μικροσκόπιο. Σε κάθε βήμα γινόταν μέτρηση του εναπομείναντος πάχους του τοιχώματος, ούτως ώστε να αποτυπώσουμε το πάχος της κάθε στρώσης έστω και προσεγγιστικά.

Στον ΠΙΝΑΚΑ που ακολουθεί αποτυπώνονται οι στρώσεις του lay-up που χρησιμοποιήθηκαν:

α/α	Είδος πλέξης	Κατεύθυνση (°)	Πάχος (mm)
1	Πλεκτή plain	±45	0,2
2	Unidirectional	±45	0,1
3	Unidirectional	0	0,1
4	Unidirectional	±45	0,1
5	Unidirectional	0	0,1
6	Πλεκτή plain	±0/90	0,2
7	Πλεκτή plain	±0/90	0,2
8	Πλεκτή plain	±0/90	0,2
9	Πλεκτή plain	±0/90	0,2
10	Unidirectional	0	0,1
11	Πλεκτή plain	±0/90	0,2
12	Unidirectional	0	0,1
13	Πλεκτή plain	±0/90	0,2
14	Πλεκτή plain	±0/90	0,2
15	Unidirectional	0	0,1
16	Πλεκτή plain	±0/90	0,2

## 6.2 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας και χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού

Πραγματοποιήθηκε αξονική στατική θλίψη. Για την καταπόνηση χρησιμοποιήθηκε η πρέσα δοκιμών Instron 4482 του εργαστηρίου. Πρόκειται για μηχανική πρέσα (μηχανισμού κοχλία-περικοχλίου). Οι δυνατότητες της πρέσας είναι:

Ονομαστική δύναμη: 10 ton

Μέγιστη δυνατή ταχύτητα κινητής κεφαλής:  $500 \frac{mm}{min}$

Ταχύτητα επιστροφής κινητής κεφαλής στην αρχική θέση:  $600 \frac{mm}{min}$

Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο στην μέγιστη ταχύτητα: 75 KN

Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής σε μέγιστο φορτίο:  $250 \frac{mm}{min}$

Ευαισθησία κεφαλής πρέσας:  $2 \frac{mV}{V}$

Πολύ σημαντική παράμετρος για την ορθή εκτέλεση του πειράματος είχε η σωστή τοποθέτηση του εκάστοτε δοκιμίου μεταξύ των δύο πλακών της πρέσας. Σωστή τοποθέτηση προϋποθέτει το δοκίμιο να μην μετακινηθεί όταν οι δύο πλάκες -άνω και κάτω- λάβουν την αρχική θέση για την τέλεση του πειράματος και οι δύο πλάκες να έχουν αυστηρή παραλληλότητα μεταξύ τους κατά την τέλεση του πειράματος. Έτσι δεν εισάγονται σφάλματα λόγω στρεπτικής δύναμης στην πλάκα βάσης και αποφεύγεται η επιβολή μεγάλων φορτίων.

Τεστ στατικής αξονικής καταπόνησης πραγματοποιούνται με πολύ χαμηλή ταχύτητα μεταξύ παράλληλων πλακών πρέσας. Αντίστοιχα δυναμικά τεστ πραγματοποιούνται με άμεση πρόσκρουση χρησιμοποιώντας πίπτουσα μάζα. Το κύριο χαρακτηριστικό της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης κελύφους που έχει υποστεί στατική καταπόνηση είναι η χαρακτηριστική ταλάντωση γύρω από ένα μέσο «post-crushing (μετά τη σύγκρουση)» φορτίο, που συνοδεύεται από μικρές πριονωτές διακυμάνσεις. Αντίθετα κέλυφος που έχει υποστεί δυναμική καταπόνηση χαρακτηρίζεται από διαδοχικές και μεγάλες διακυμάνσεις φορτίου με κορυφές και κοιλάδες πιθανόν εξαιτίας του διαφορετικού μηχανισμού μικροθραύσης (microfracturing mechanism).

### 6.2.1 Επιλογή ταχύτητας δοκιμής

Το μέγεθος αυτό εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, όπως είναι το υλικό του χρησιμοποιούμενου δοκιμίου, οι αλλαγές που αναμένουμε ότι θα υποστεί κατά την διάρκεια του πειράματος και η μέγιστη ταχύτητα του εξωτερικού καταγραφικού συστήματος – συστήματος δειγματοληψίας. Εμείς επιλέξαμε ταχύτητα  $5 \frac{mm}{min}$ .

### 6.2.2 Λογισμικό επεξεργασίας

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το Bluehill 2. Χρειάστηκε να εισάγουμε τα εξής δεδομένα:

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίων: μορφή (κυλινδρική), εξωτερική διάμετρος (28,5mm), πάχος τοιχώματος (2,5mm), ύψος (40mm)

Οδηγίες για την διεκπεραίωση των πειραμάτων: Ταχύτητα κεφαλής ( $5\frac{mm}{min}$ ), τύπος δοκιμής (θλίψη), κριτήριο τερματισμού δοκιμής (να παραμένει το  $\frac{1}{2}$  του ύψους του δοκιμίου, δηλαδή στα 20 mm).

Εν συνεχεία γινόταν τοποθέτηση του δοκιμίου πάνω στην πλάκα βάσης και κατεβάζαμε την άνω πλάκα έως το σημείο που ακουμπούσε οριακά το δοκίμιο. Σε εκείνο το σημείο, γινόταν μηδενισμός των τιμών του φορτίου και της μετατόπισης.

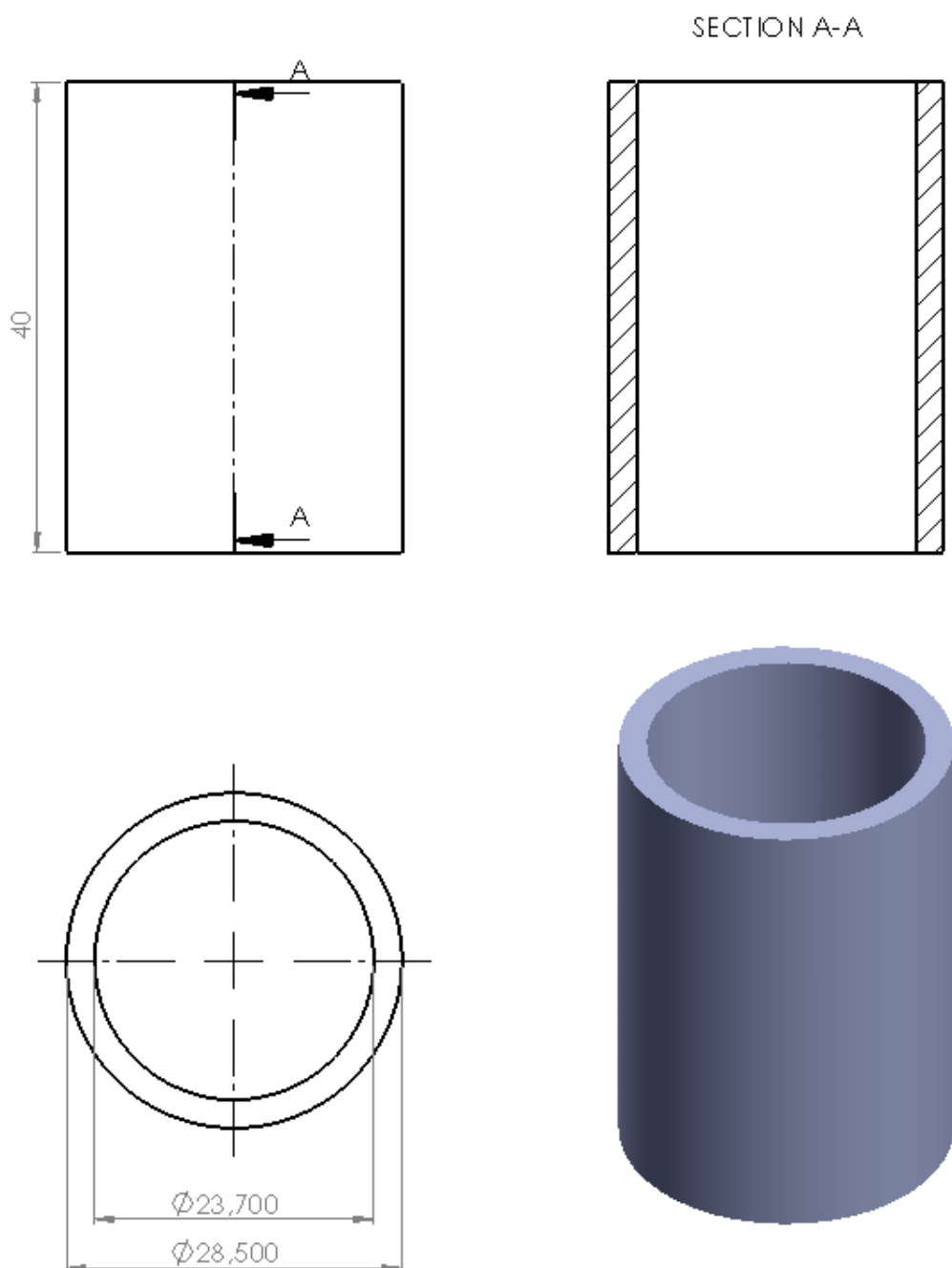
Προφανώς, η πλευρά του triggering ήταν προς τα πάνω.

## 6.3 Πειραματικές δοκιμές και μετρήσεις

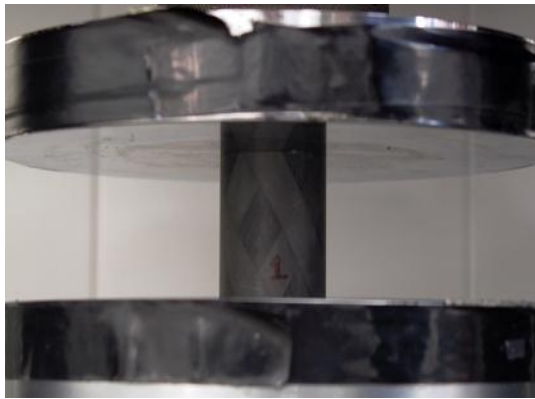
### 6.3.1 ΔΟΚΙΜΙΟ 1

Το πρώτο δοκίμιο δεν έχει υποστεί κάποια διαμόρφωση triggering και δεν έχει ατέλειες. Η συμπεριφορά του στην δοκιμή θλίψης θα αποτελέσει την βάση σύγκρισης για τα υπόλοιπα δοκίμια.

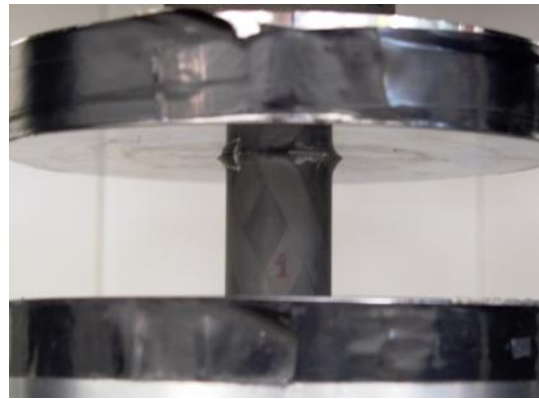
Στην συνέχεια παρατίθεται φωτογραφία και οι διάφορες όψεις του δοκιμίου 1 σε σχέδιο, πριν αυτό καταπονηθεί στην πρέσσα. Κατόπιν παρατίθενται οι φωτογραφίες που τραβήχτηκαν διαδοχικά καθόλη την διαδικασία της κατάρρευσης για μετατόπιση του εμβόλου ανά 1 mm. Τέλος, το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης που βασίζεται στις μετρήσεις αυτές, όπως λήφθηκαν από το λογισμικό της Instron. Στο διάγραμμα επισημαίνονται και οι χρονικές στιγμές κατά τις οποίες ελήφθησαν οι φωτογραφίες.



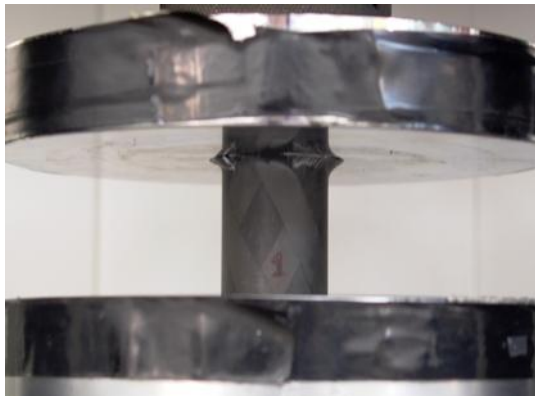
$T_0 = 0 \text{ sec}$



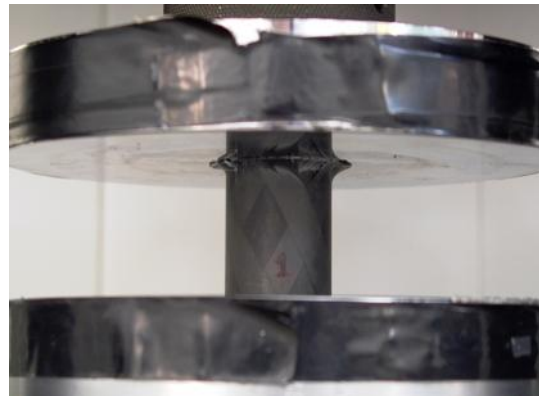
$T_1 = 12 \text{ sec}$



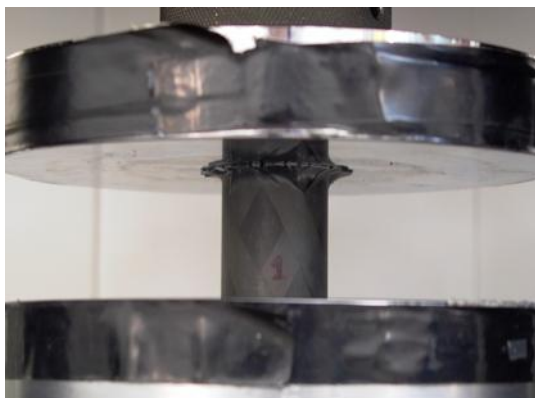
$T_2 = 24 \text{ sec}$



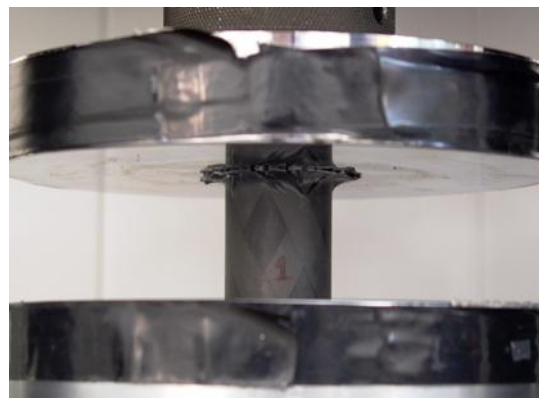
$T_3 = 36 \text{ sec}$



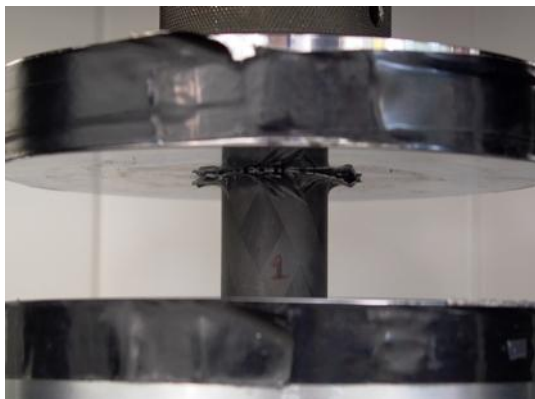
$T_4 = 48 \text{ sec}$



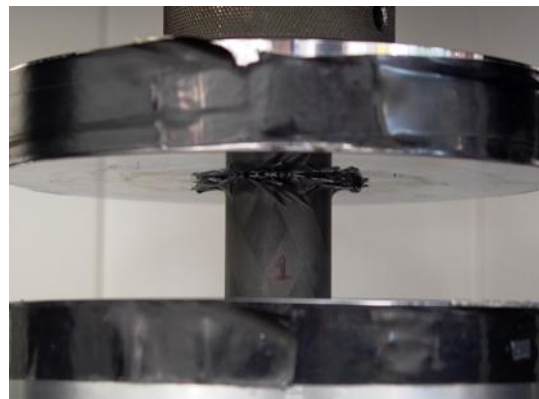
$T_5 = 60 \text{ sec}$



$T_6 = 72 \text{ sec}$

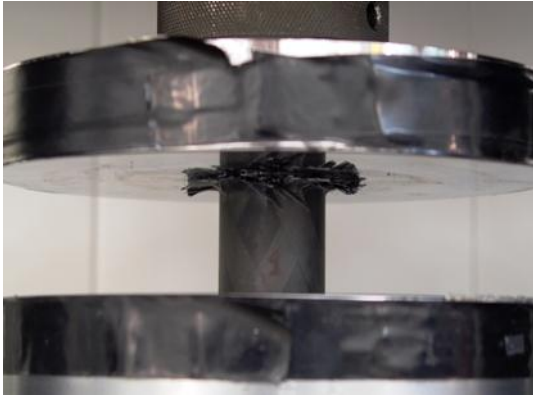


$T_7 = 84 \text{ sec}$

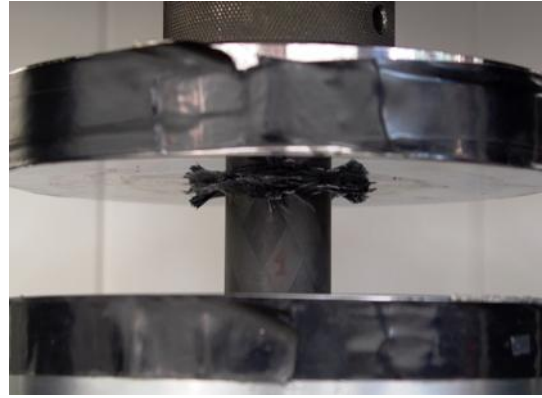




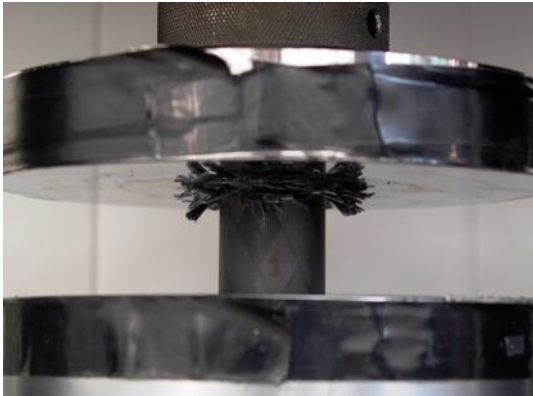
$T_8 = 96 \text{ sec}$



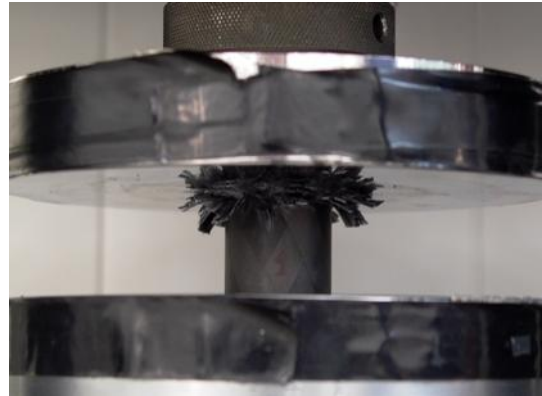
$T_9 = 108 \text{ sec}$



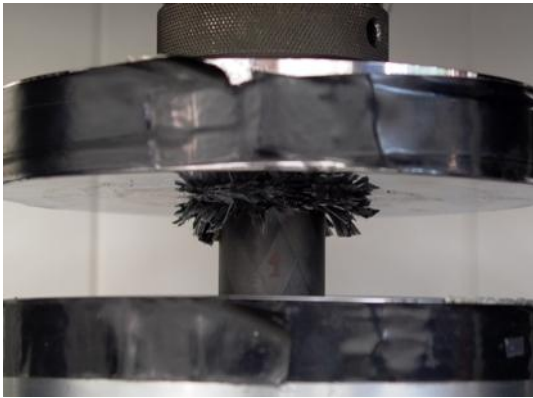
$T_{10} = 120 \text{ sec}$



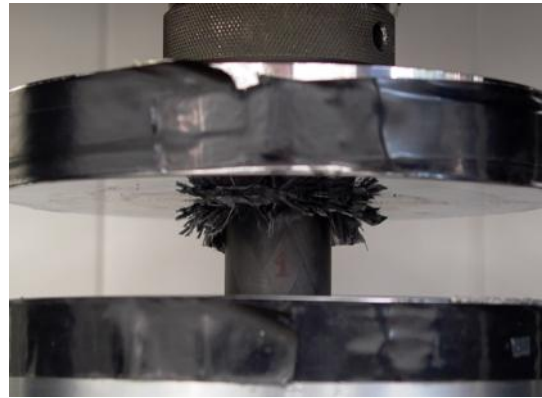
$T_{11} = 132 \text{ sec}$



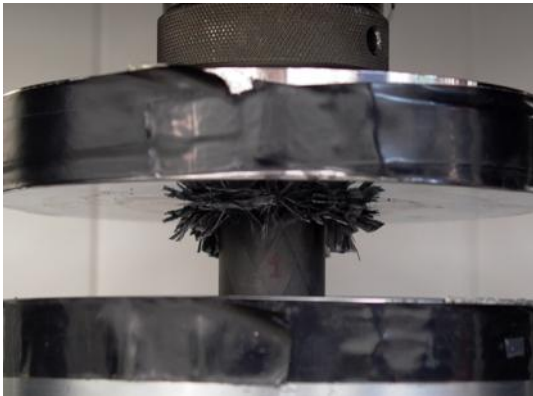
$T_{12} = 144 \text{ sec}$



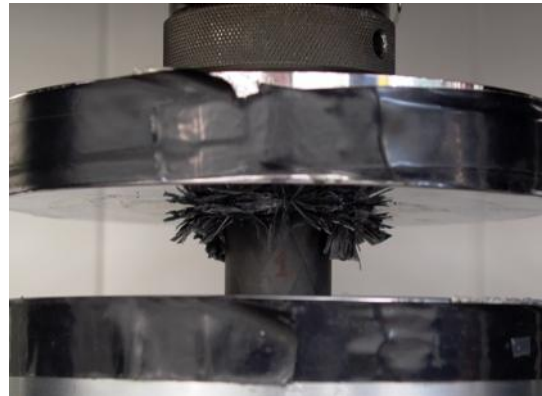
$T_{13} = 156 \text{ sec}$



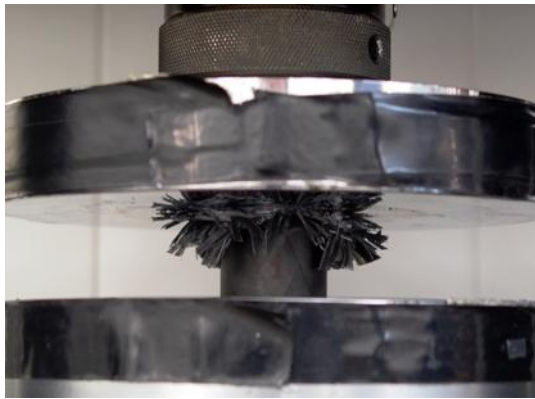
$T_{14} = 168 \text{ sec}$



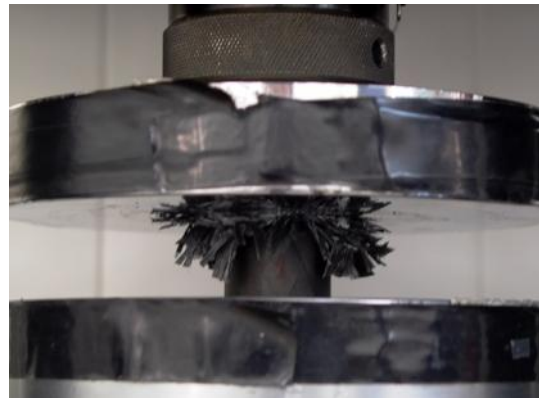
$T_{15} = 180 \text{ sec}$



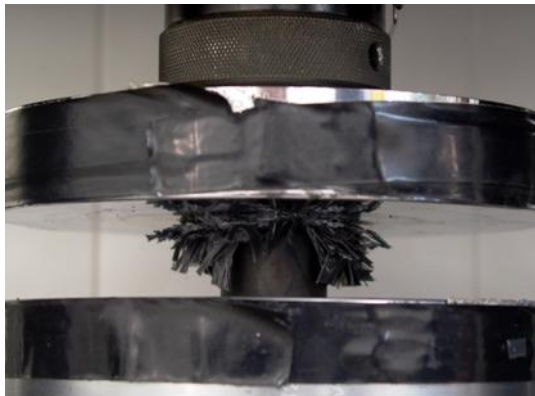
$T_{16} = 192 \text{ sec}$



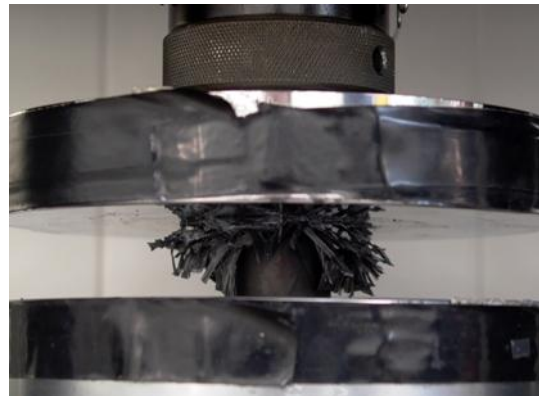
$T_{17} = 204 \text{ sec}$



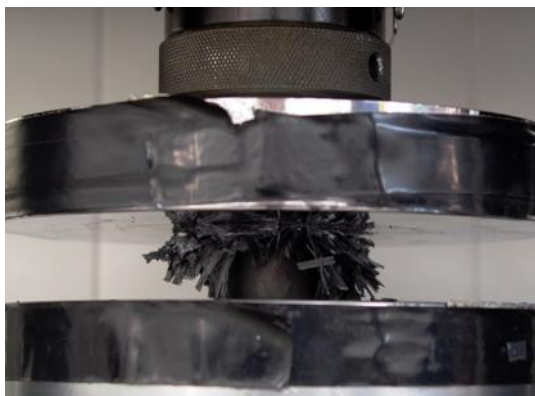
$T_{18} = 216 \text{ sec}$



$T_{19} = 228 \text{ sec}$



$T_{20} = 240 \text{ sec}$

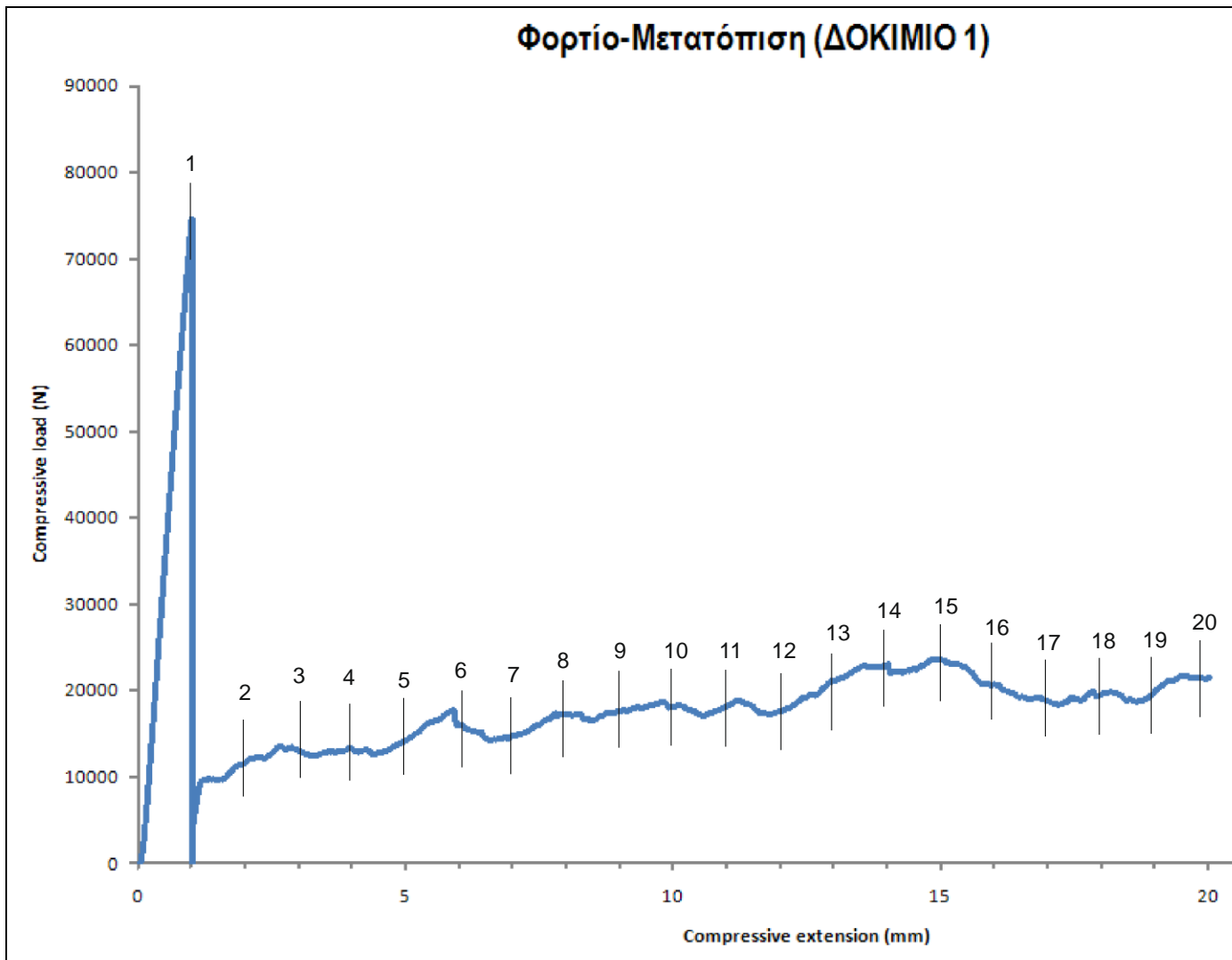


Στη συνέχεια παρατίθενται φωτογραφίες του δοκιμίου 1 μετά την καταστροφική καταπόνηση με την ακόλουθη σειρά:

- κάτοψη
- πλάγια όψη 1
- πλάγια όψη 2
- τομή

αντίστοιχα.





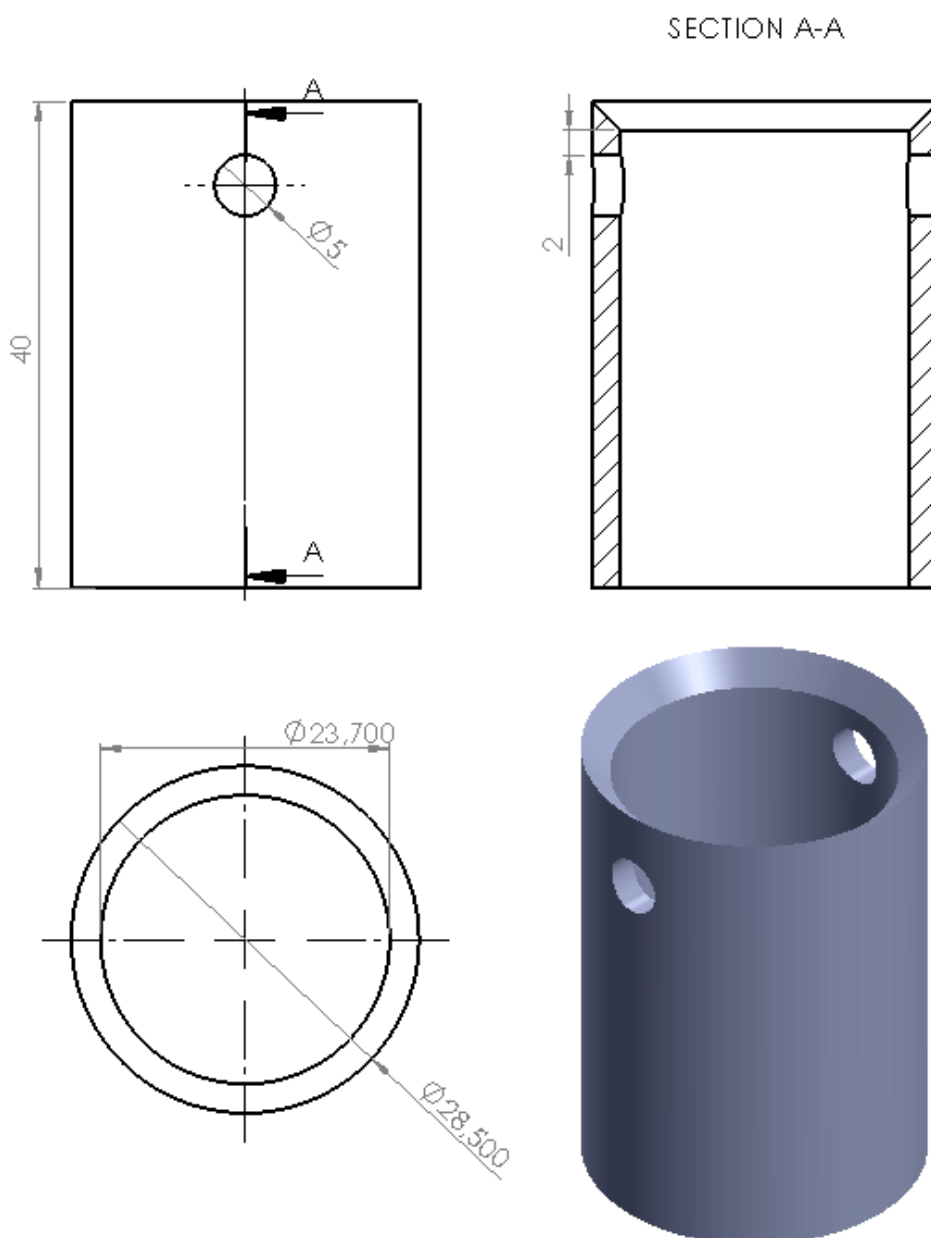
### Σχόλια για την διαδικασία κατάρρευσης

- Κατά την πρώτη φάση της συμπίεσης παρατηρούμε μια ραγδαία και σχεδόν γραμμική αύξηση του φορτίου , που λαμβάνει μέγιστη τιμή 746050 N (peak load) περίπου για μετατόπιση 1mm. Αρχικά το δοκίμιο είναι ακέραιο και προβάλλει την μεγαλύτερη αντίσταση στην εφαρμοζόμενη θλιπτική δύναμη.
- Εν συνεχεία εμφανίζεται τοπικό ελάχιστο , και ξεκινά η προοδευτική κατάρρευση του δοκιμίου. Το φορτίο σχεδόν ομαλοποιείται και η καμπύλη του προς το τέλος της δοκιμής σχεδόν ταλαντώνεται γύρω από την μέση τιμή των 20000 N.
- Η μορφή αυτής της καμπύλης προσομοιάζει την θεωρητική μορφή καμπύλης της ΕΙΚΟΝΑΣ 55.
- Οι διαστρωματώσεις του υλικού αποκολλήθηκαν (delamination) και οι μισές κάμφθηκαν προς το εξωτερικό του δοκιμίου, ενώ οι υπόλοιπες συμπίεστηκαν στο εσωτερικό μέρος του κυλίνδρου.

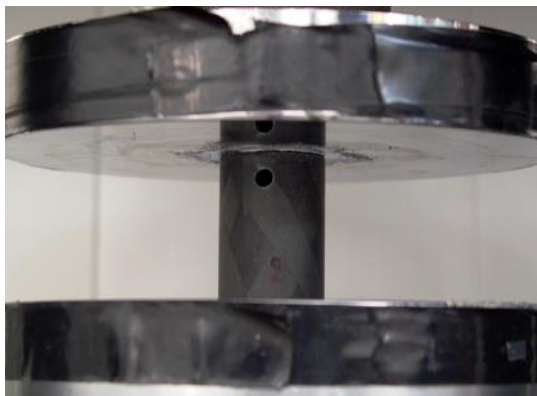
### 6.3.2 ΔΟΚΙΜΙΟ 2

Το δεύτερο δοκίμιο έχει υποστεί διαμόρφωση triggering στο ένα του άκρο. Η μορφή του triggering θα παραμείνει σταθερή και στα υπόλοιπα δοκίμια (δοκίμιο 2 έως και δοκίμιο 8). Το triggering έχει την μορφή κωνικότητας υπό γωνία  $45^\circ$  προς την εσωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου και ξεκινάει ακριβώς στο «πρόσωπο» της άκρης του δοκιμίου.

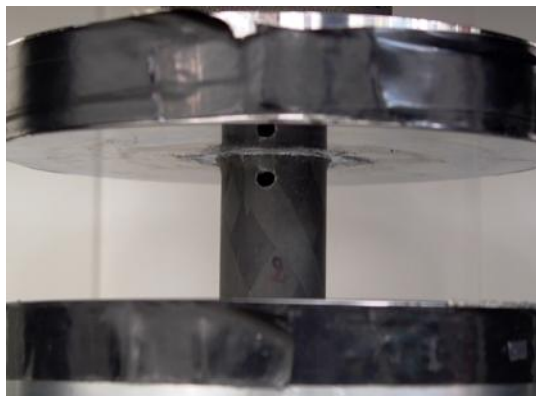
Οι ατέλειες είναι δύο αντιδιαμετρικές οπές διαμέτρου 5 mm . Η μορφή των ατελειών επίσης παραμένει σταθερή στα δοκίμια 2 έως 8, αλλά θα αλλάζει κάθε φορά η θέση των οπών. Θα έχουμε μετακίνηση των ατελειών από πάνω προς τα κάτω ανά ίσα διαστήματα. Στην συνέχεια παρατίθεται φωτογραφία και οι διάφορες όψεις του δοκιμίου 2 σε σχέδιο, πριν αυτό καταπονηθεί στην πρέσσα. Κατόπιν παρατίθενται οι φωτογραφίες που τραβήχτηκαν διαδοχικά καθόλη την διαδικασία της κατάρρευσης για μετατόπιση του εμβόλου ανά 1 mm. Τέλος, το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης που βασίζεται στις μετρήσεις αυτές, όπως λήφθηκαν από το λογισμικό της Instron. Στο διάγραμμα επισημαίνονται και οι χρονικές στιγμές κατά τις οποίες ελήφθησαν οι φωτογραφίες.



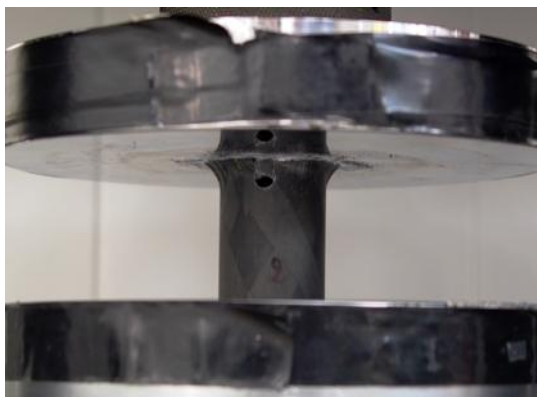
$T_0 = 0 \text{ sec}$



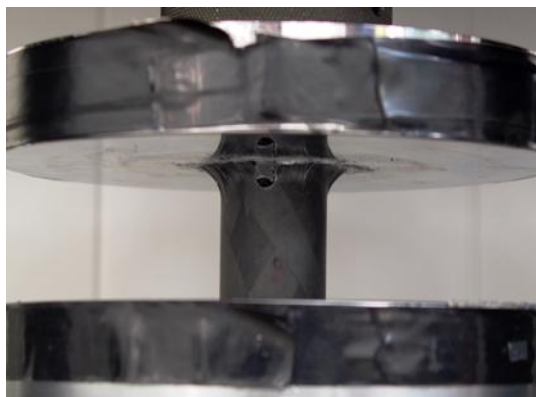
$T_1 = 12 \text{ sec}$



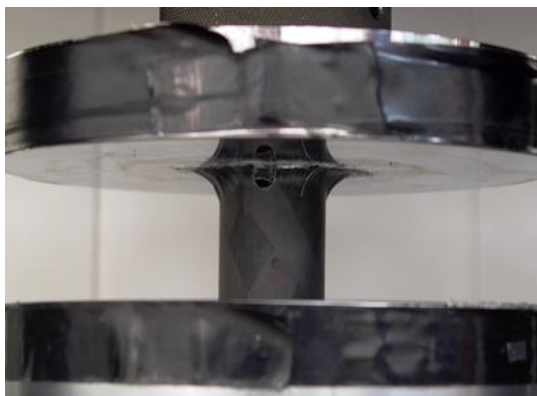
$T_2 = 24 \text{ sec}$



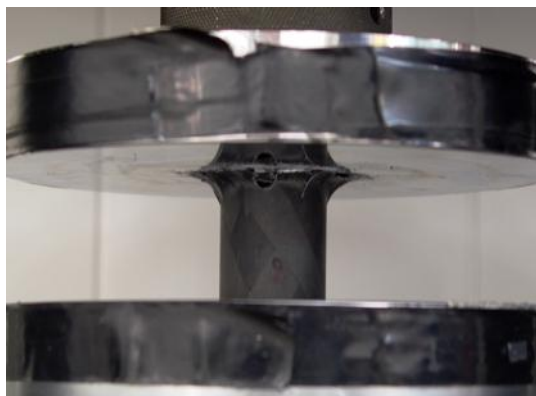
$T_3 = 36 \text{ sec}$



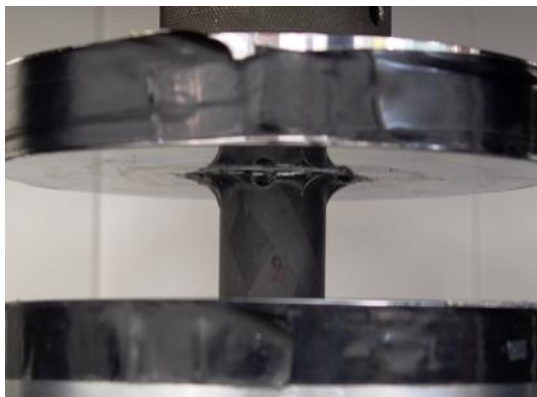
$T_4 = 48 \text{ sec}$



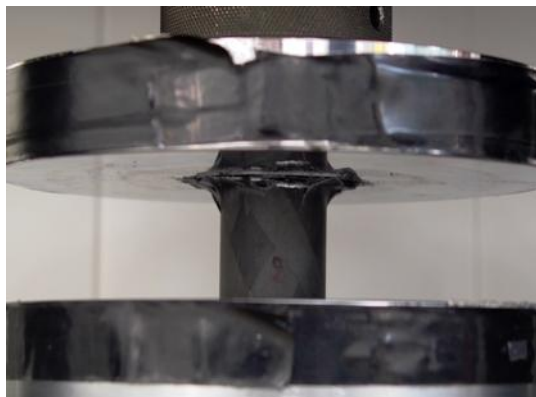
$T_5 = 60 \text{ sec}$



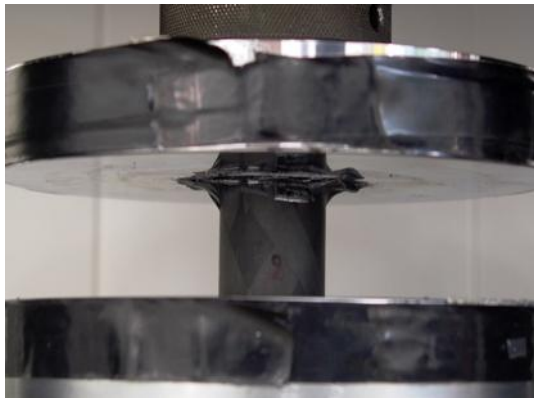
$T_6 = 72 \text{ sec}$



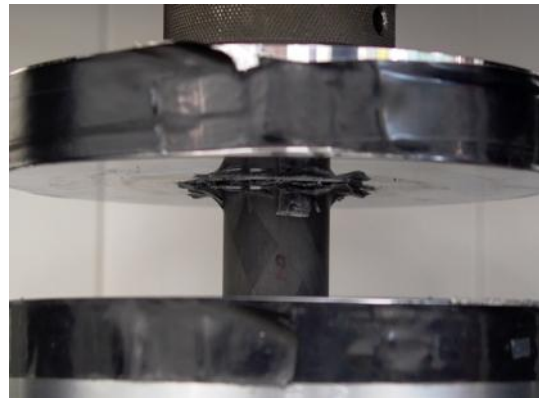
$T_7 = 84 \text{ sec}$



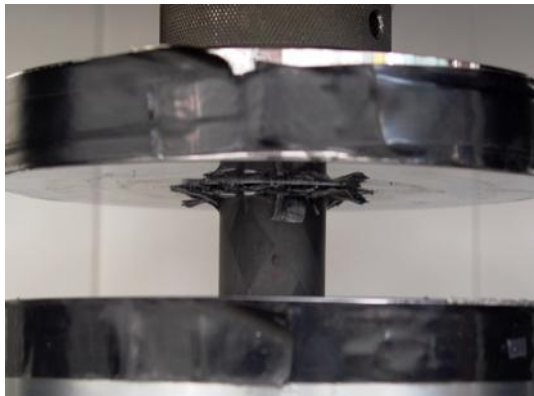
$T_8 = 96 \text{ sec}$



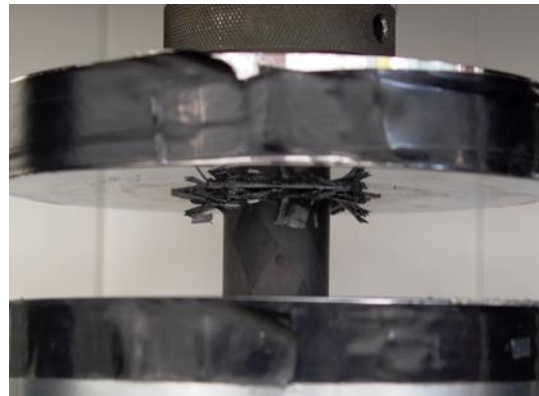
$T_9 = 108 \text{ sec}$



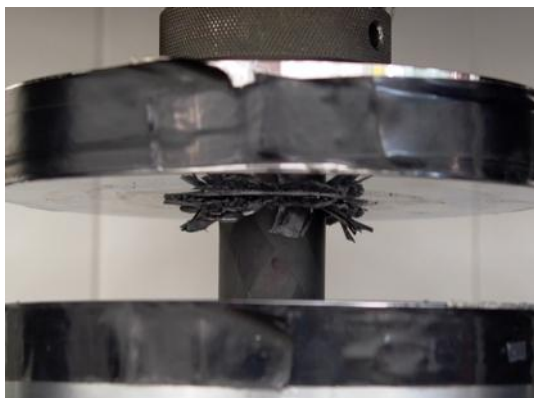
$T_{10} = 120 \text{ sec}$



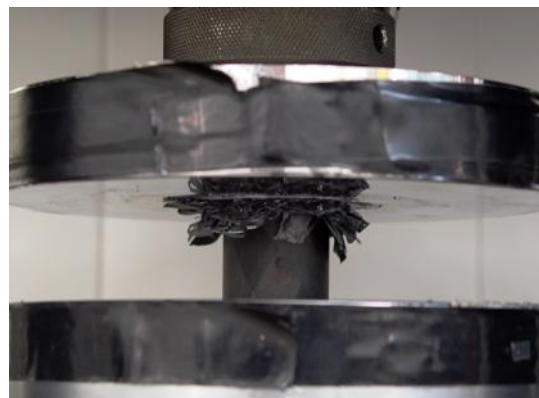
$T_{11} = 132 \text{ sec}$



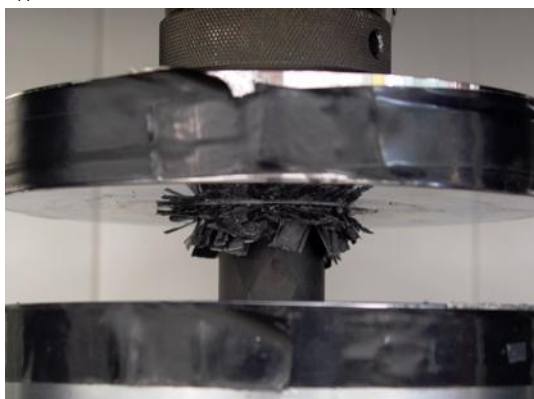
$T_{12} = 144 \text{ sec}$



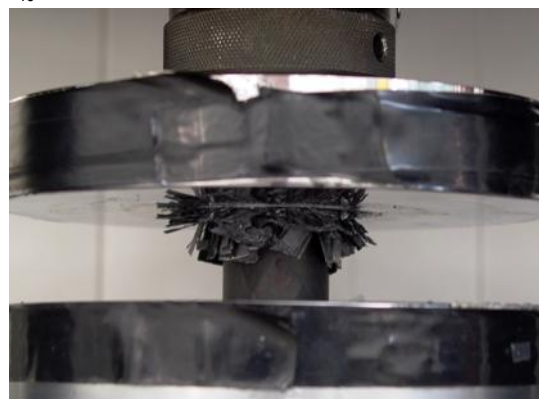
$T_{13} = 156 \text{ sec}$



$T_{14} = 168 \text{ sec}$

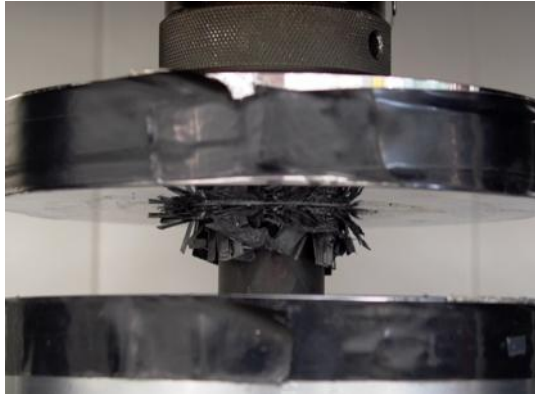


$T_{15} = 180 \text{ sec}$

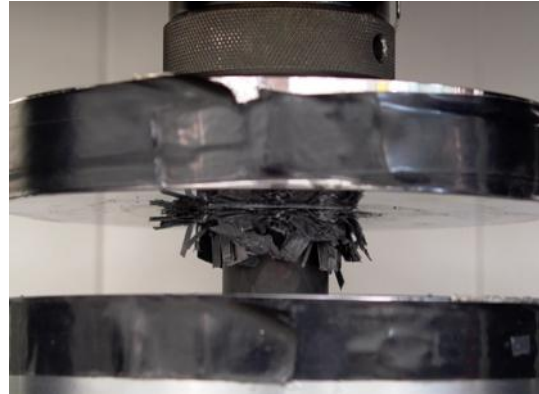




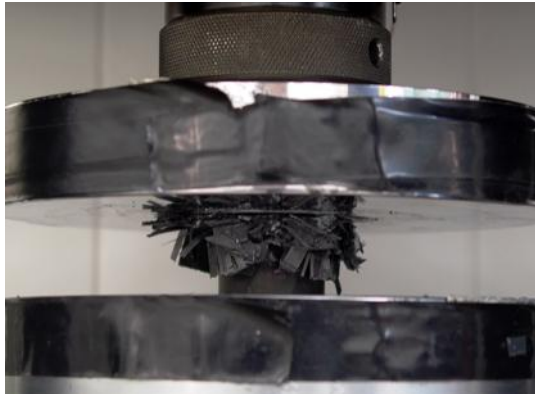
$T_{16} = 192 \text{ sec}$



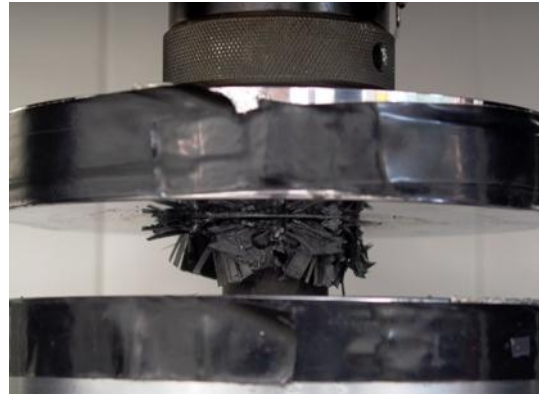
$T_{17} = 204 \text{ sec}$



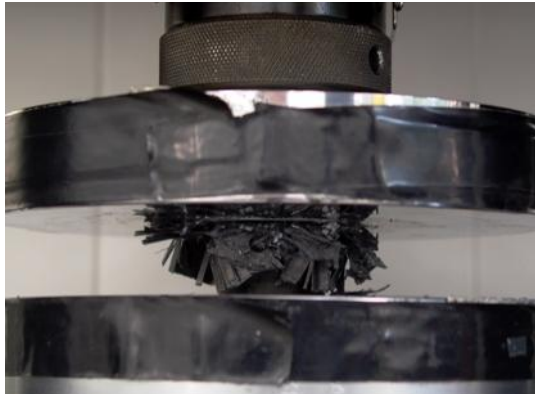
$T_{18} = 216 \text{ sec}$



$T_{19} = 228 \text{ sec}$



$T_{20} = 240 \text{ sec}$

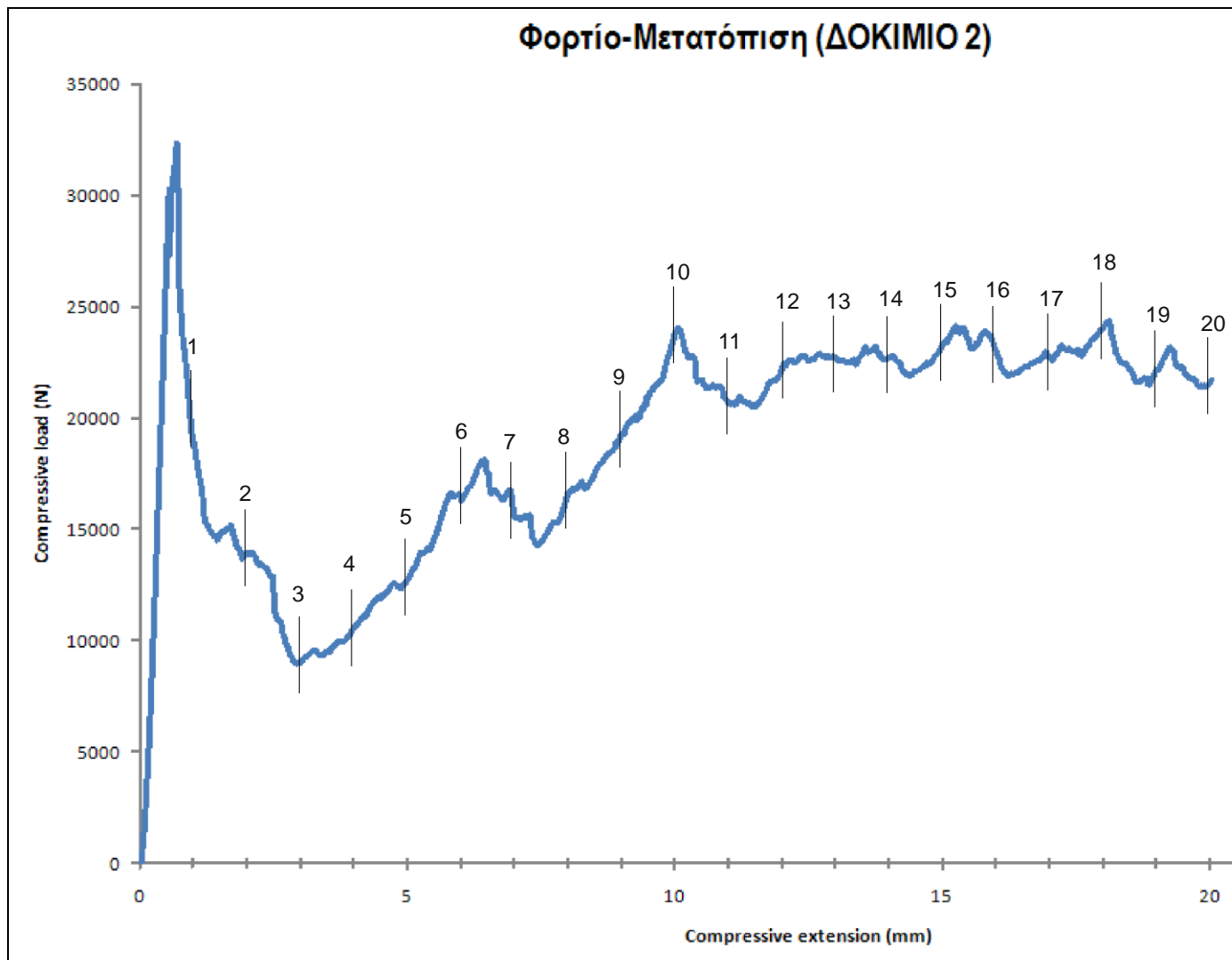


Στη συνέχεια παρατίθενται φωτογραφίες του δοκιμίου 2 μετά την καταστροφική καταπόνηση με την ακόλουθη σειρά:

- κάτοψη
- πλάγια όψη 1
- πλάγια όψη 2
- τομή

αντίστοιχα.



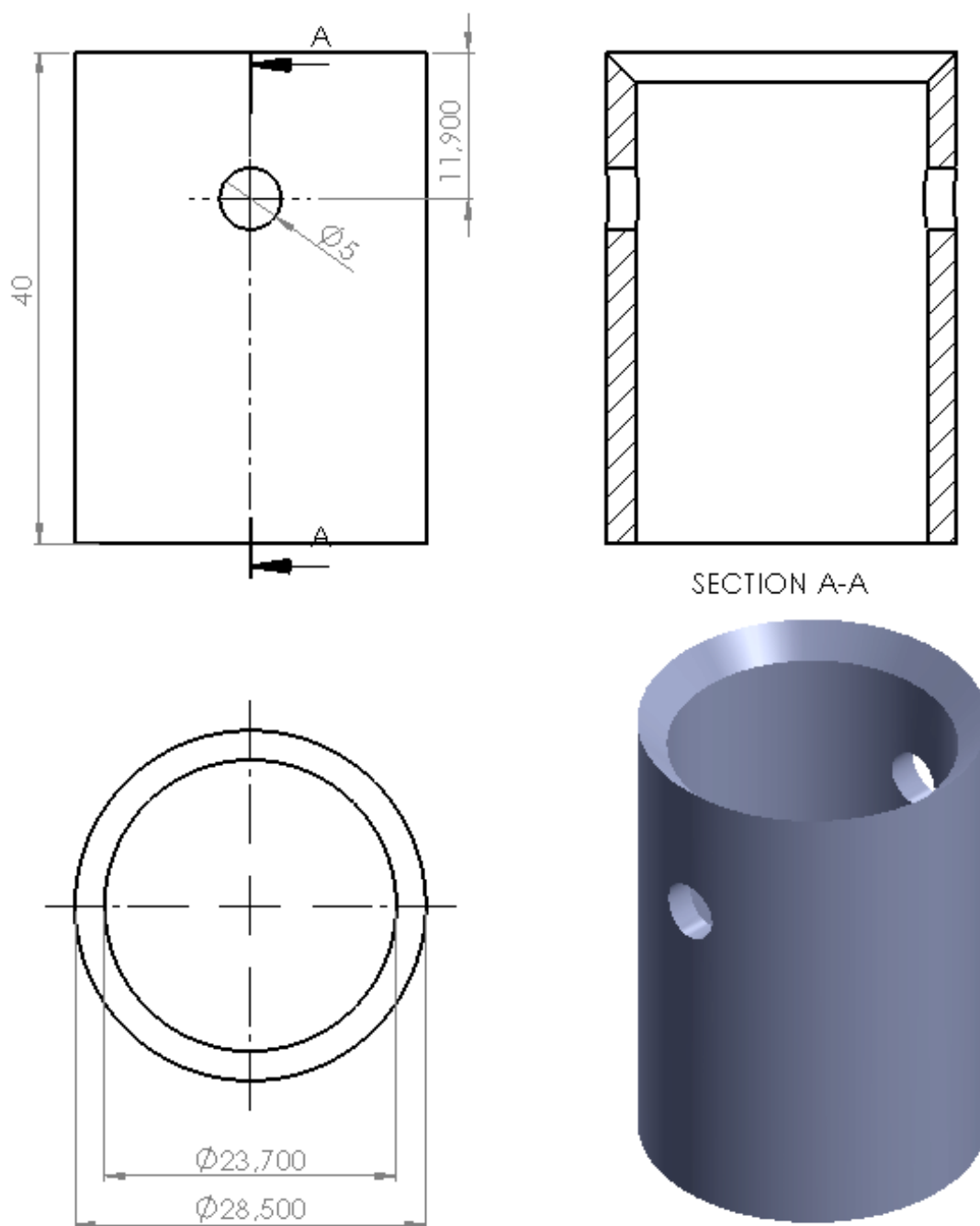


### Σχόλια για την διαδικασία κατάρρευσης

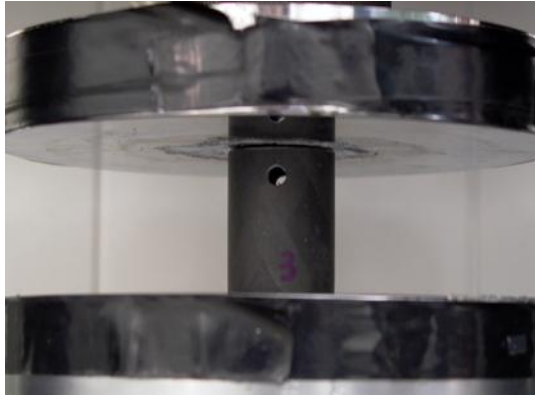
- Κατά την πρώτη φάση της συμπίεσης παρατηρούμε μια ραγδαία αύξηση του φορτίου , που λαμβάνει μέγιστη τιμή 32309 N (peak load) για μετατόπιση περίπου 0,7 mm. Αμέσως μετά υπάρχει μια απότομη πτώση του φορτίου. Ξεκινά η κατάρρευση από την πλευρά του triggering.
- Στην συνέχεια εμφανίζεται μια πιο ομαλή πτώση του φορτίου που ακολουθείται από μια ομαλή αύξηση.
- Διακρίνουμε δύο εμφανείς κορυφές φορτίου.
- Την ατέλεια την συναντούμε περίπου στα 4,4mm και εκτείνεται έως τα 9,4mm. Σε αυτή την περιοχή παρατηρούμε μια «κοιλιάδα» μεταξύ δύο «κορυφών» φορτίου.
- Μετά περίπου από τα 9 mm το φορτίο αρχίζει να ταλαντώνεται γύρω περίπου από μια σταθερή τιμή, περίπου στα 22000 N.
- Οι διαστρωματώσεις του υλικού αποκολλήθηκαν (delamination) και οι μισές κάμφθηκαν προς το εξωτερικό του δοκιμίου, ενώ οι υπόλοιπες συμπίεστηκαν στο εσωτερικό μέρος του κυλίνδρου.

### 6.3.3 ΔΟΚΙΜΙΟ 3

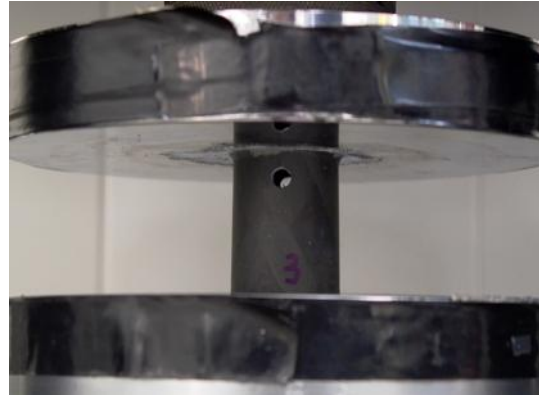
Το τρίτο δοκίμιο έχει υποστεί διαμόρφωση triggering με μορφή κωνικότητας υπό γωνία  $45^\circ$  προς την εσωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου και ξεκινάει ακριβώς στο «πρόσωπο» της άκρης του δοκιμίου. Οι ατέλειες είναι δύο αντιδιαμετρικές οπές διαμέτρου 5 mm. Η ακριβής θέση των οπών φαίνεται στο κατασκευαστικό σχέδιο που ακολουθεί. Στην συνέχεια παρατίθεται φωτογραφία και οι διάφορες όψεις του δοκιμίου 3 σε σχέδιο, πριν αυτό καταπονηθεί στην πρέσσα. Κατόπιν παρατίθενται οι φωτογραφίες που τραβήχτηκαν διαδοχικά καθόλη την διαδικασία της κατάρρευσης για μετατόπιση του εμβόλου ανά 1 mm. Τέλος, το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης που βασίζεται στις μετρήσεις αυτές, όπως λήφθηκαν από το λογισμικό της Instron. Στο διάγραμμα επισημαίνονται και οι χρονικές στιγμές κατά τις οποίες ελήφθησαν οι φωτογραφίες.



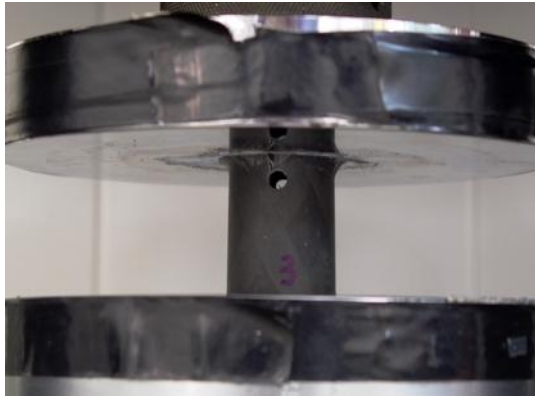
$T_0 = 0 \text{ sec}$



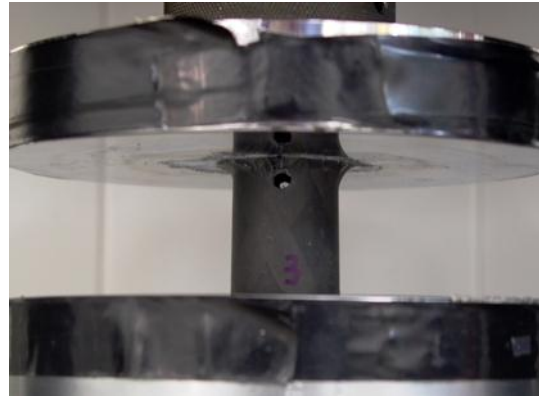
$T_1 = 12 \text{ sec}$



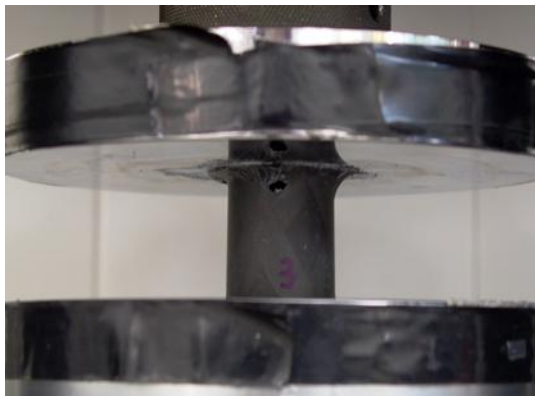
$T_2 = 24 \text{ sec}$



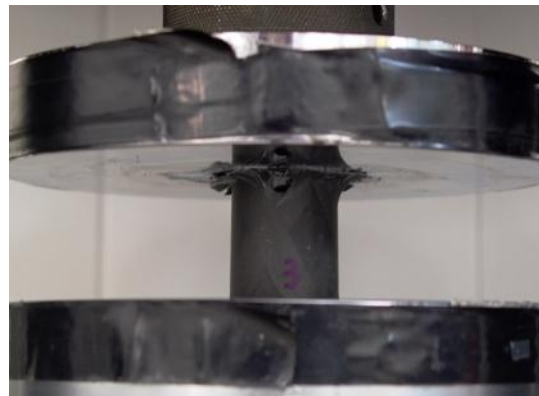
$T_3 = 36 \text{ sec}$



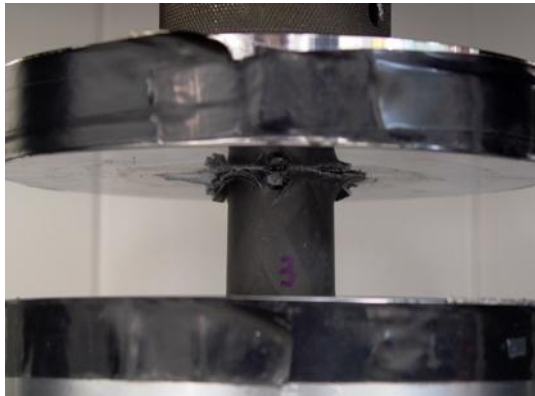
$T_4 = 48 \text{ sec}$



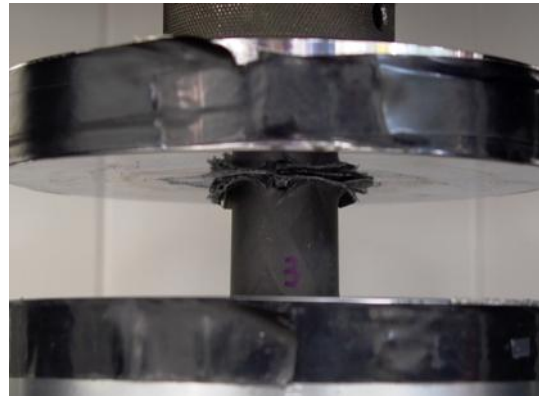
$T_5 = 60 \text{ sec}$



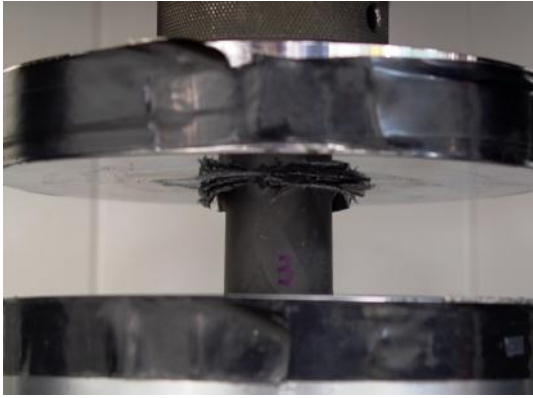
$T_6 = 72 \text{ sec}$



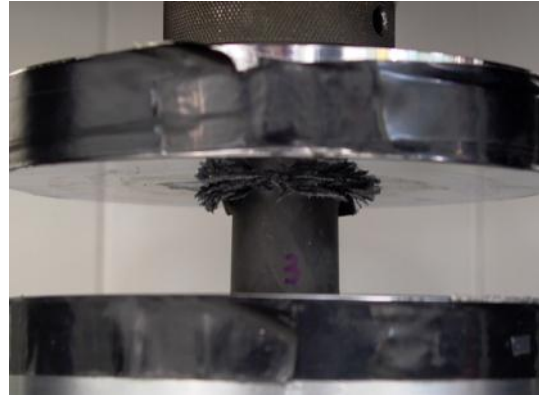
$T_7 = 84 \text{ sec}$



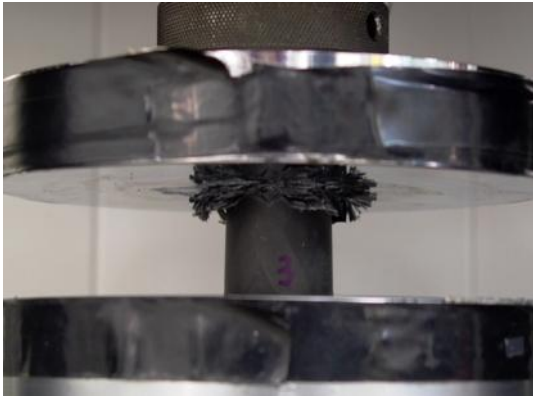
$T_8 = 96 \text{ sec}$



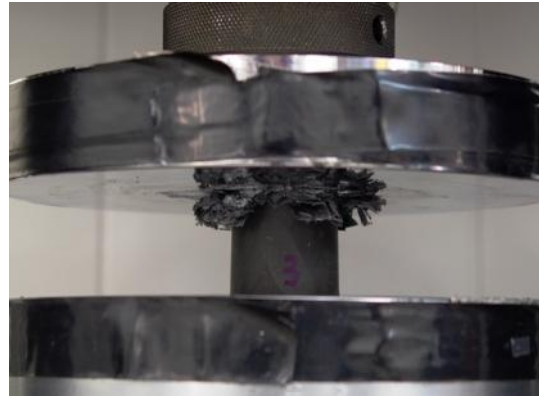
$T_9 = 108 \text{ sec}$



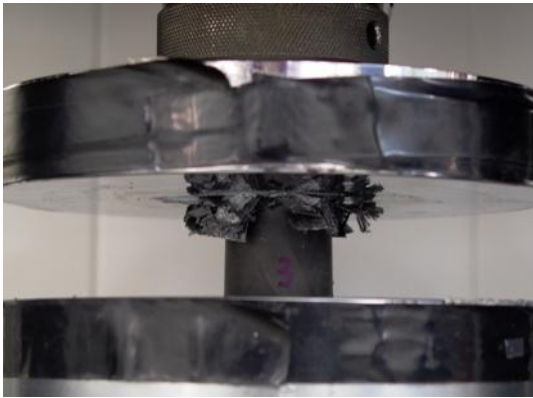
$T_{10} = 120 \text{ sec}$



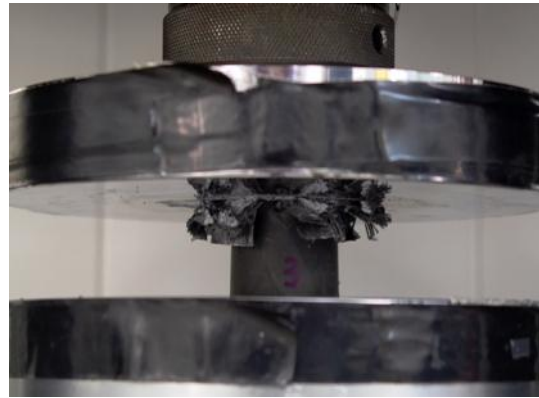
$T_{11} = 132 \text{ sec}$



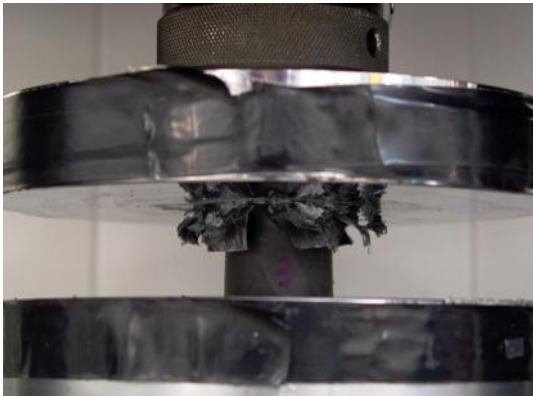
$T_{12} = 144 \text{ sec}$



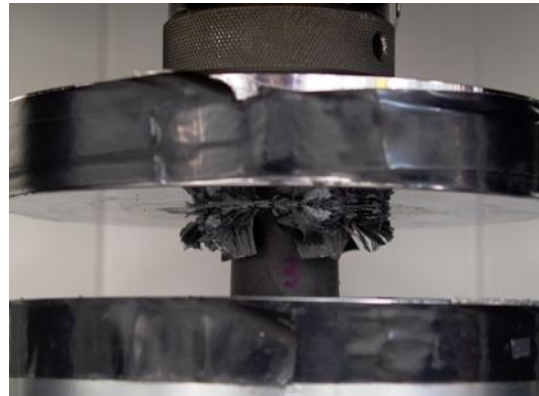
$T_{13} = 156 \text{ sec}$



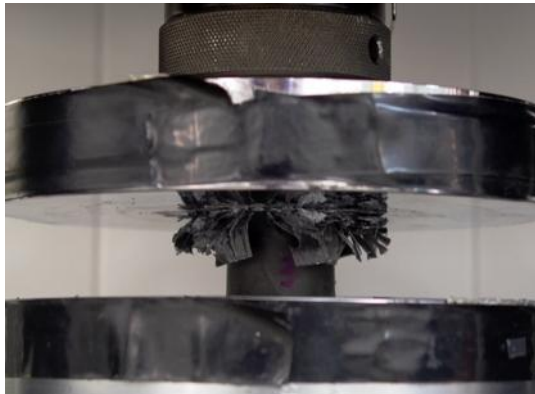
$T_{14} = 168 \text{ sec}$



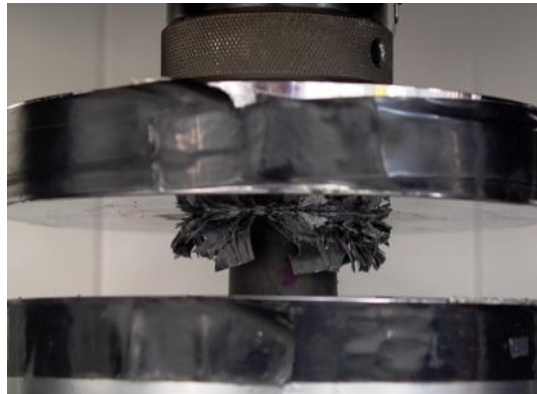
$T_{15} = 180 \text{ sec}$



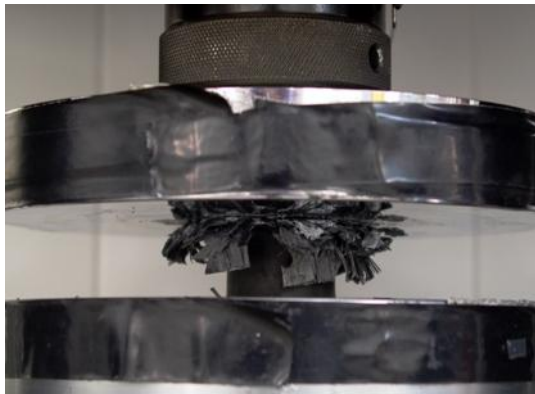
T<sub>16</sub> = 192 sec



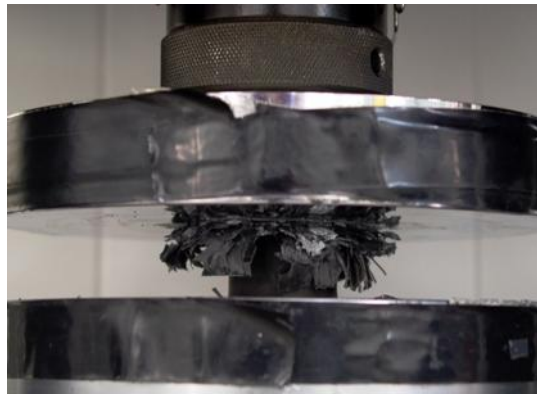
T<sub>17</sub> = 204 sec



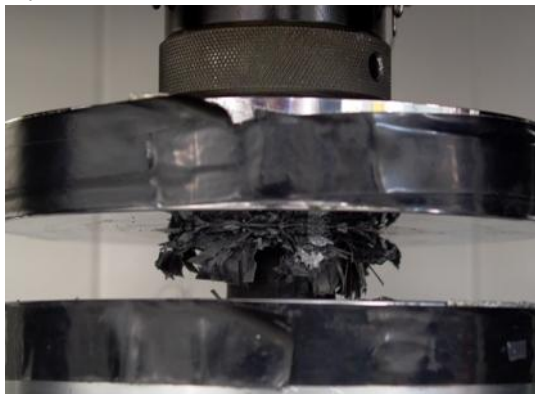
T<sub>18</sub> = 216 sec



T<sub>19</sub> = 228 sec



T<sub>20</sub> = 240 sec



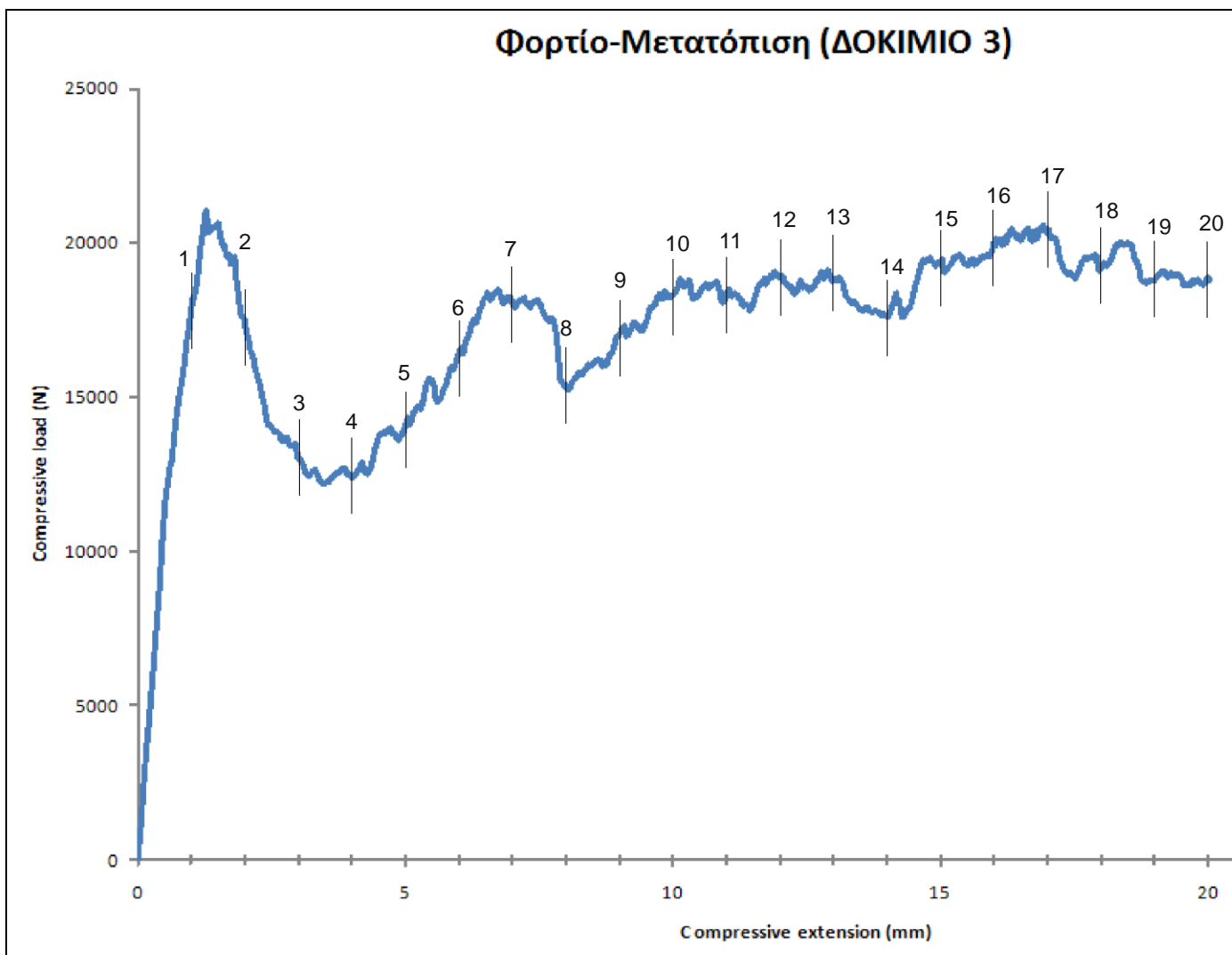


Στη συνέχεια παρατίθενται φωτογραφίες του δοκιμίου 3 μετά την καταστροφική καταπόνηση με την ακόλουθη σειρά:

- κάτοψη
- πλάγια όψη 1
- πλάγια όψη 2
- τομή

αντίστοιχα.





### Σχόλια για την διαδικασία κατάρρευσης

- Κατά την πρώτη φάση της συμπίεσης εμφανίζεται ένα τοπικό μέγιστο 21034 N (peak load) για παραμόρφωση περίπου 1,3 mm. Η κλίση αύξησης του φορτίου είναι απότομη, αλλά όχι τόσο πολύ όσο στα πρώτα δύο δοκίμια. Στη συνέχεια έχουμε το πρώτο τοπικό ελάχιστο και αρχίζει η διαδικασία κατάρρευσης.
- Το δοκίμιο καταρρέει από την πλευρά του triggering.
- Εμφανίζεται ένα ακόμα τοπικό μέγιστο και τοπικό ελάχιστο
- Σχεδόν αμέσως η καμπύλη του φορτίου σχεδόν σταθεροποιείται γύρω από μια μέση τιμή περίπου 17500 N.
- Την ατέλεια την συναντούμε περίπου στα 9,4mm και συνεχίζεται έως τα 14,4 mm. Σε αυτή την περιοχή το φορτίο έχει ομαλοποιηθεί.
- Οι διαστρωματώσεις του υλικού αποκολλήθηκαν (delamination) και οι μισές κάμφθηκαν προς το εξωτερικό του δοκιμίου, ενώ οι υπόλοιπες συμπίεστηκαν στο εσωτερικό μέρος του κυλίνδρου.

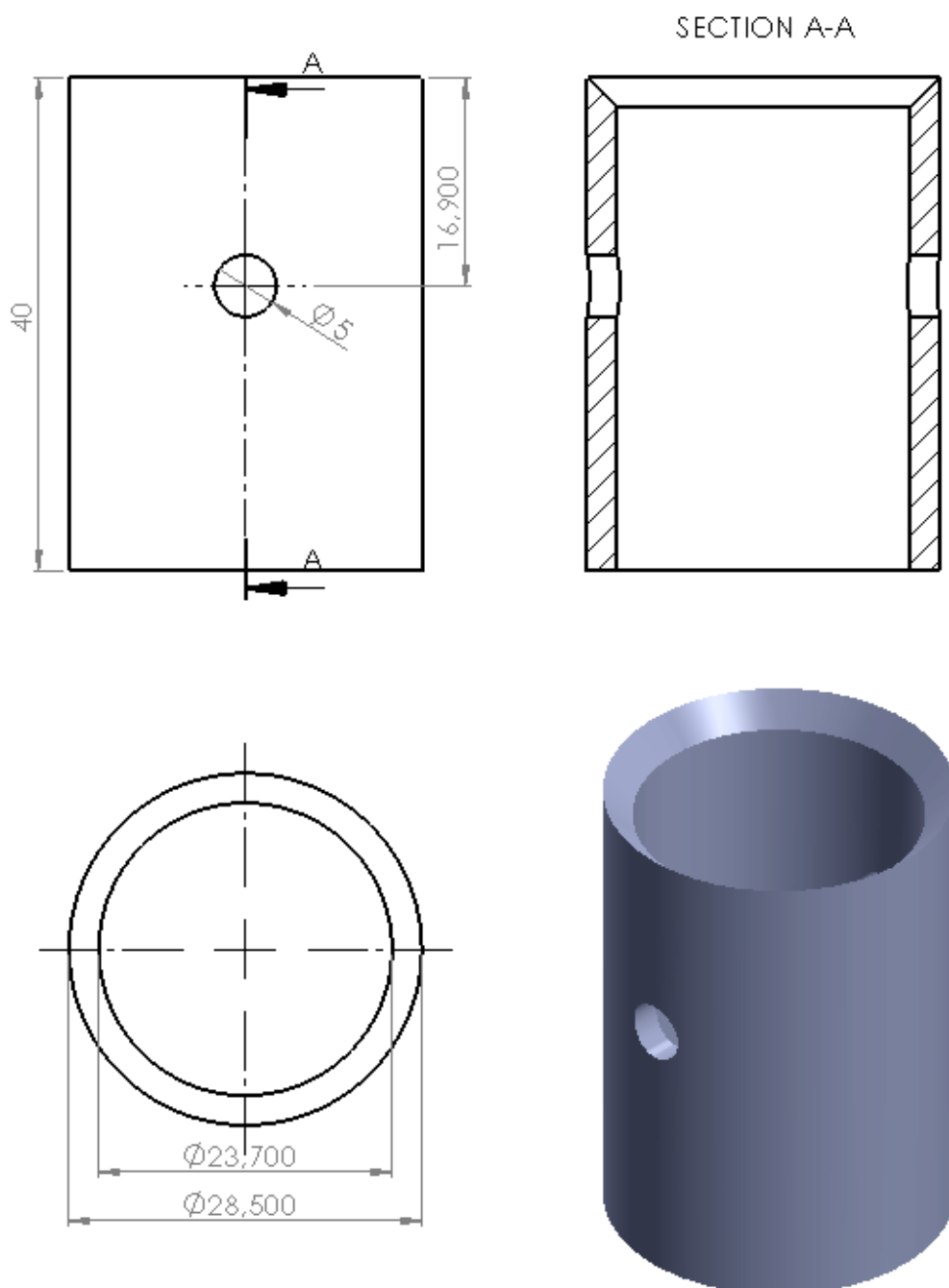
#### 6.3.4 ΔΟΚΙΜΙΟ 4

Το τέταρτο δοκίμιο έχει υποστεί διαμόρφωση triggering με κωνικότητα μορφής γωνίας  $45^\circ$  προς την εσωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου και ξεκινάει ακριβώς στο «πρόσωπο» της άκρης του δοκιμίου.

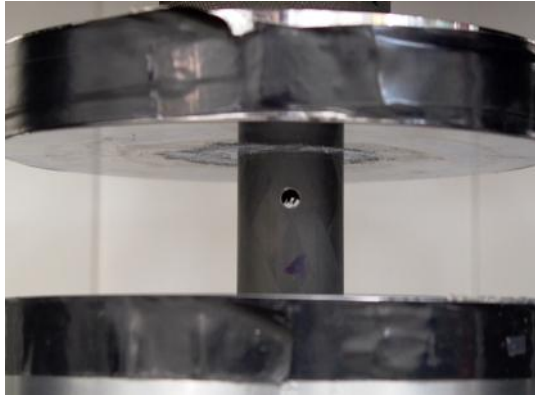
Οι ατέλειες είναι δύο αντιδιαμετρικές οπές διαμέτρου 5 mm . Η ακριβής θέση των οπών φαίνεται στο κατασκευαστικό σχέδιο που ακολουθεί. Στην συνέχεια παρατίθεται φωτογραφία και οι διάφορες όψεις του δοκιμίου 4 σε σχέδιο, πριν αυτό καταπονηθεί στην πρέσσα.

Κατόπιν παρατίθενται οι φωτογραφίες που τραβήχτηκαν διαδοχικά καθόλη την διαδικασία της κατάρρευσης για μετατόπιση του εμβόλου ανά 1 mm.

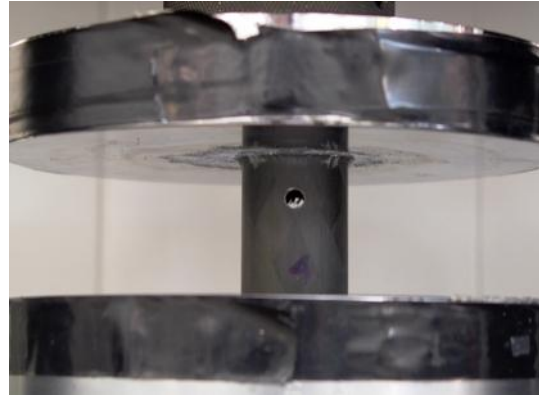
Τέλος, το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης που βασίζεται στις μετρήσεις αυτές, όπως λήφθηκαν από το λογισμικό της Instron. Στο διάγραμμα επισημαίνονται και οι χρονικές στιγμές κατά τις οποίες ελήφθησαν οι φωτογραφίες.



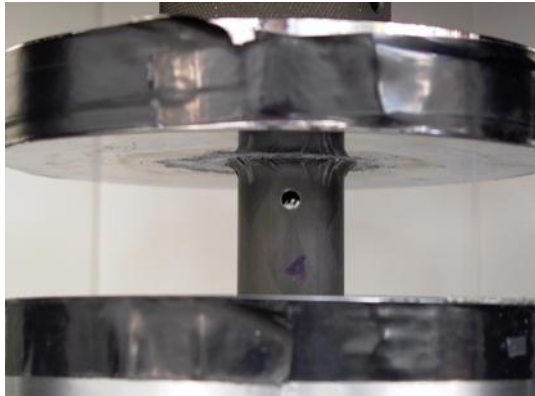
$T_0 = 0 \text{ sec}$



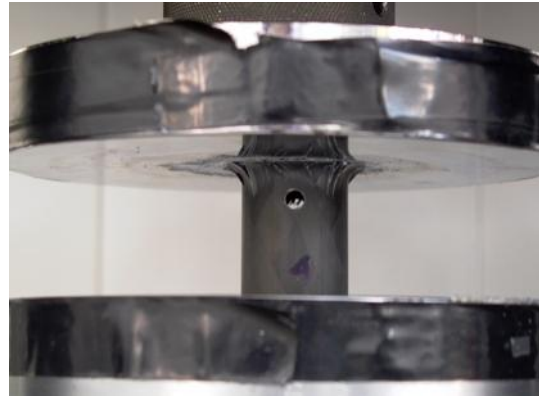
$T_1 = 12 \text{ sec}$



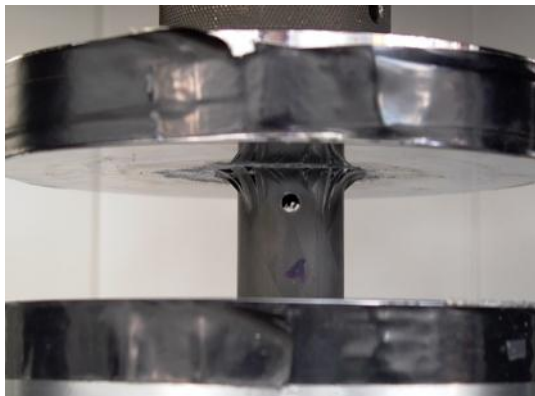
$T_2 = 24 \text{ sec}$



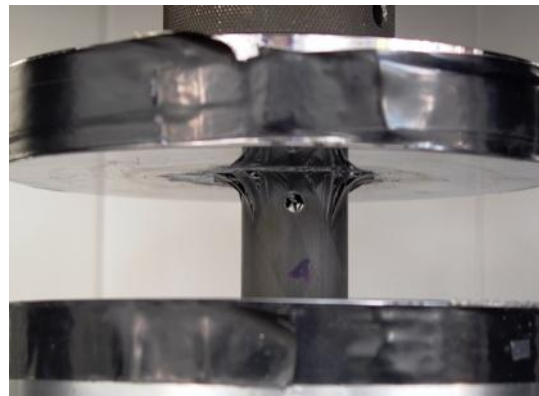
$T_3 = 36 \text{ sec}$



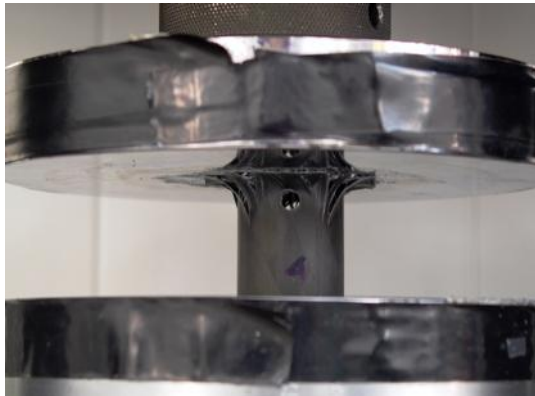
$T_4 = 48 \text{ sec}$



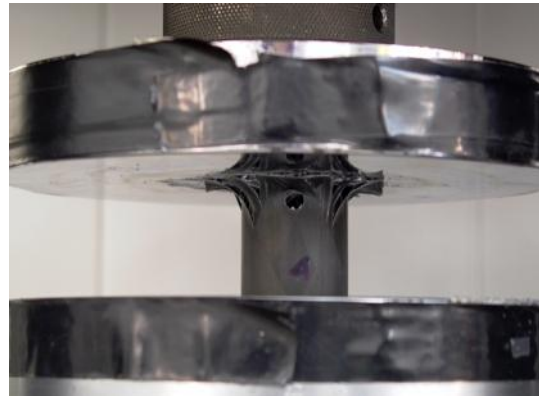
$T_5 = 60 \text{ sec}$



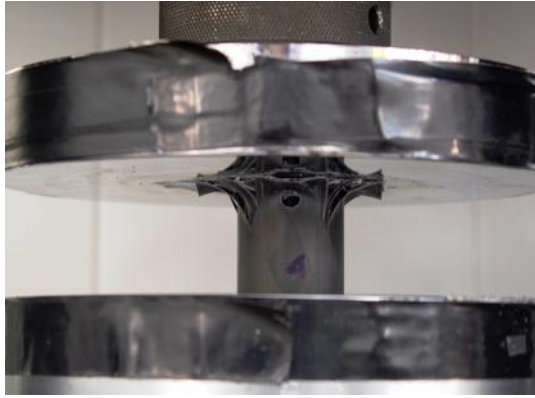
$T_6 = 72 \text{ sec}$



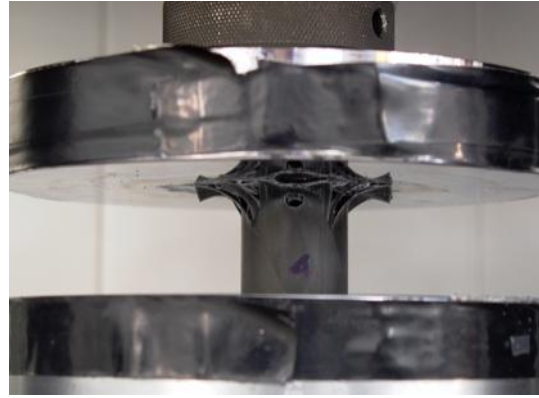
$T_7 = 84 \text{ sec}$



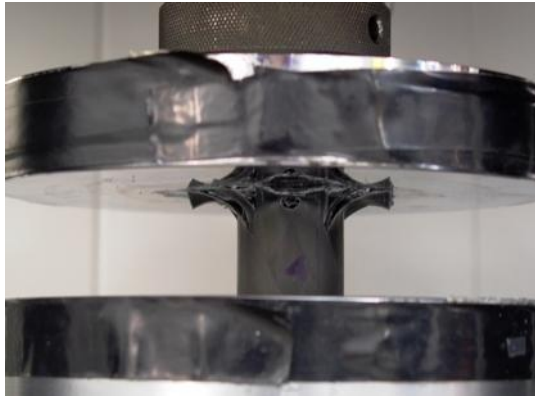
$T_8 = 96 \text{ sec}$



$T_9 = 108 \text{ sec}$



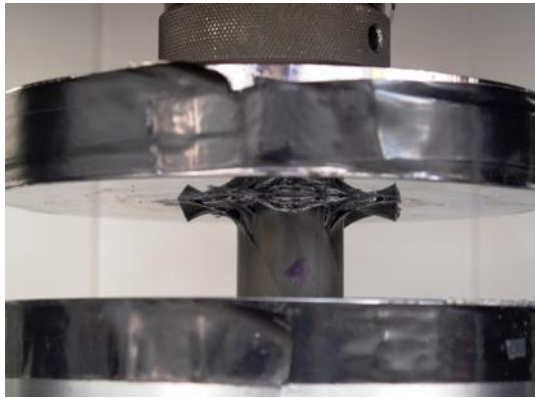
$T_{10} = 120 \text{ sec}$



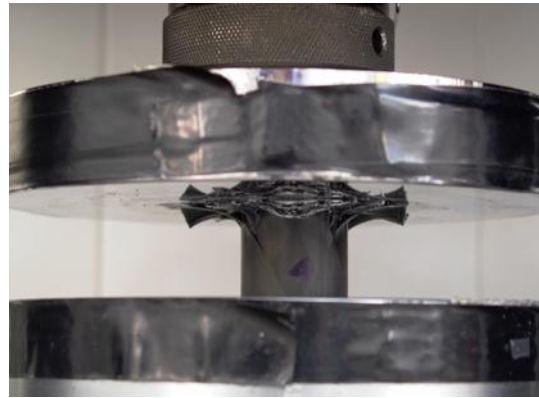
$T_{11} = 132 \text{ sec}$



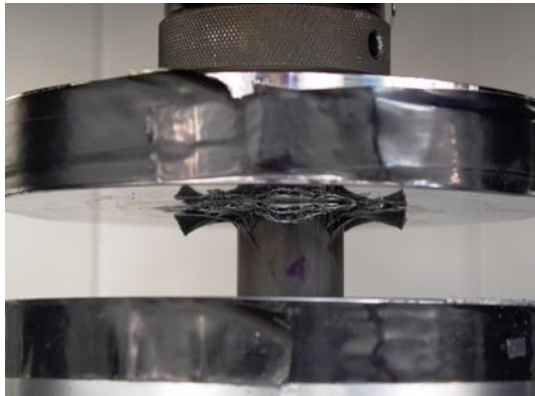
$T_{12} = 144 \text{ sec}$



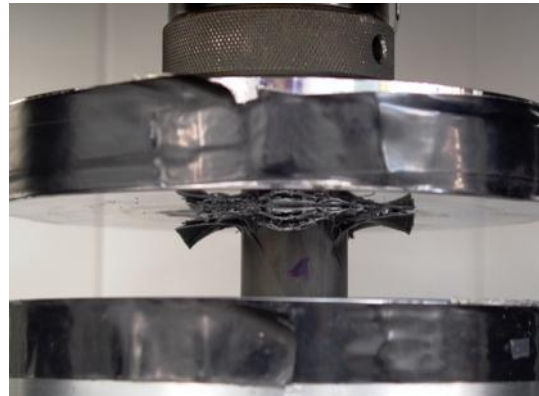
$T_{13} = 156 \text{ sec}$



$T_{14} = 168 \text{ sec}$



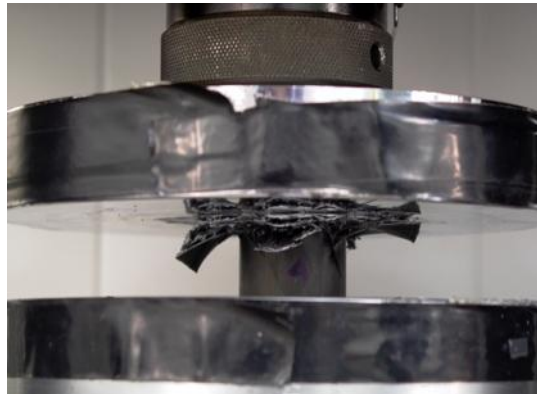
$T_{15} = 180 \text{ sec}$



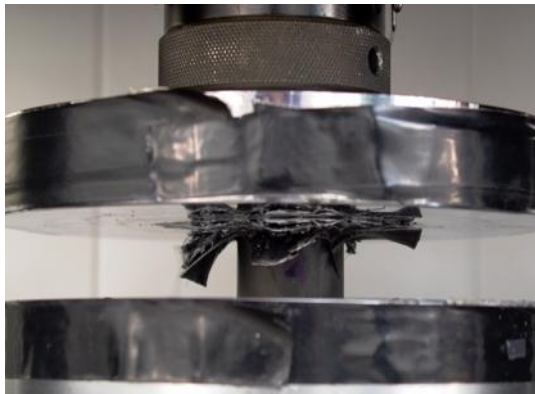
T<sub>16</sub> = 192 sec



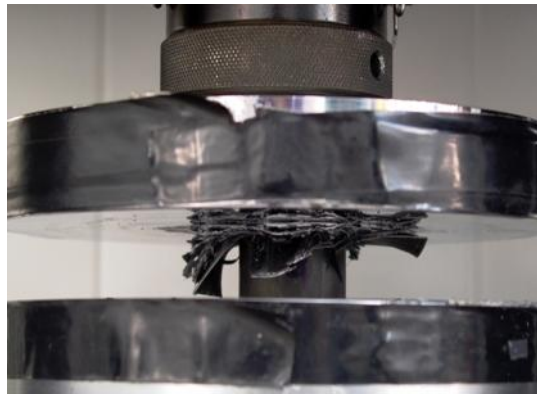
T<sub>17</sub> = 204 sec



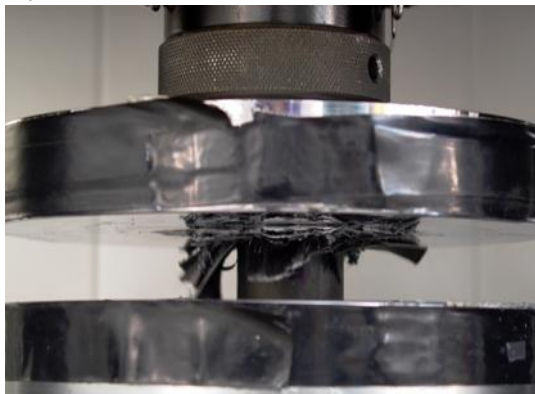
T<sub>18</sub> = 216 sec



T<sub>19</sub> = 228 sec



T<sub>20</sub> = 240 sec



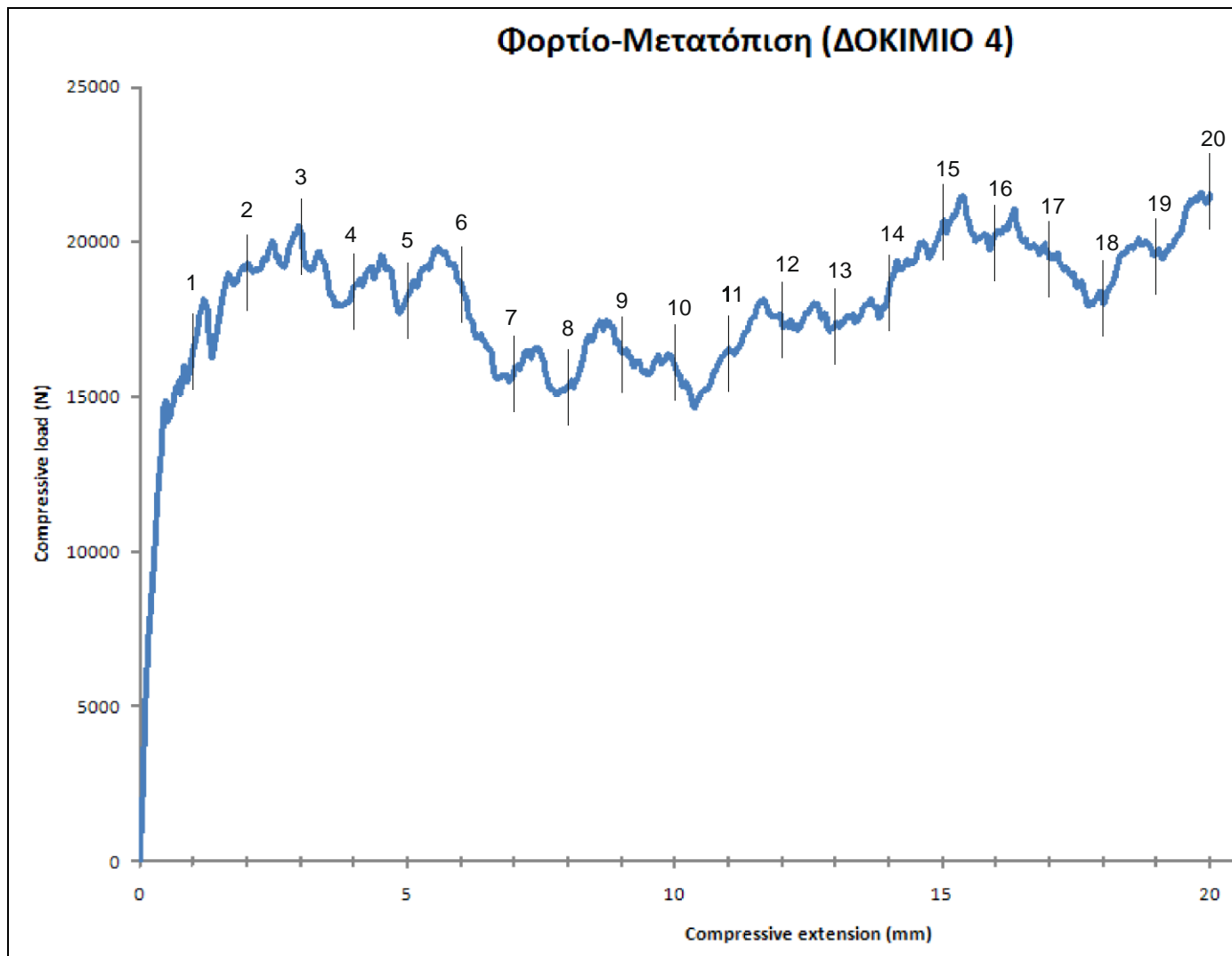
Στη συνέχεια παρατίθενται φωτογραφίες του δοκιμίου 4 μετά την καταστροφική καταπόνηση με την ακόλουθη σειρά:

- κάτοψη
- πρόοψη
- οπίσθια όψη
- τομή

αντίστοιχα.







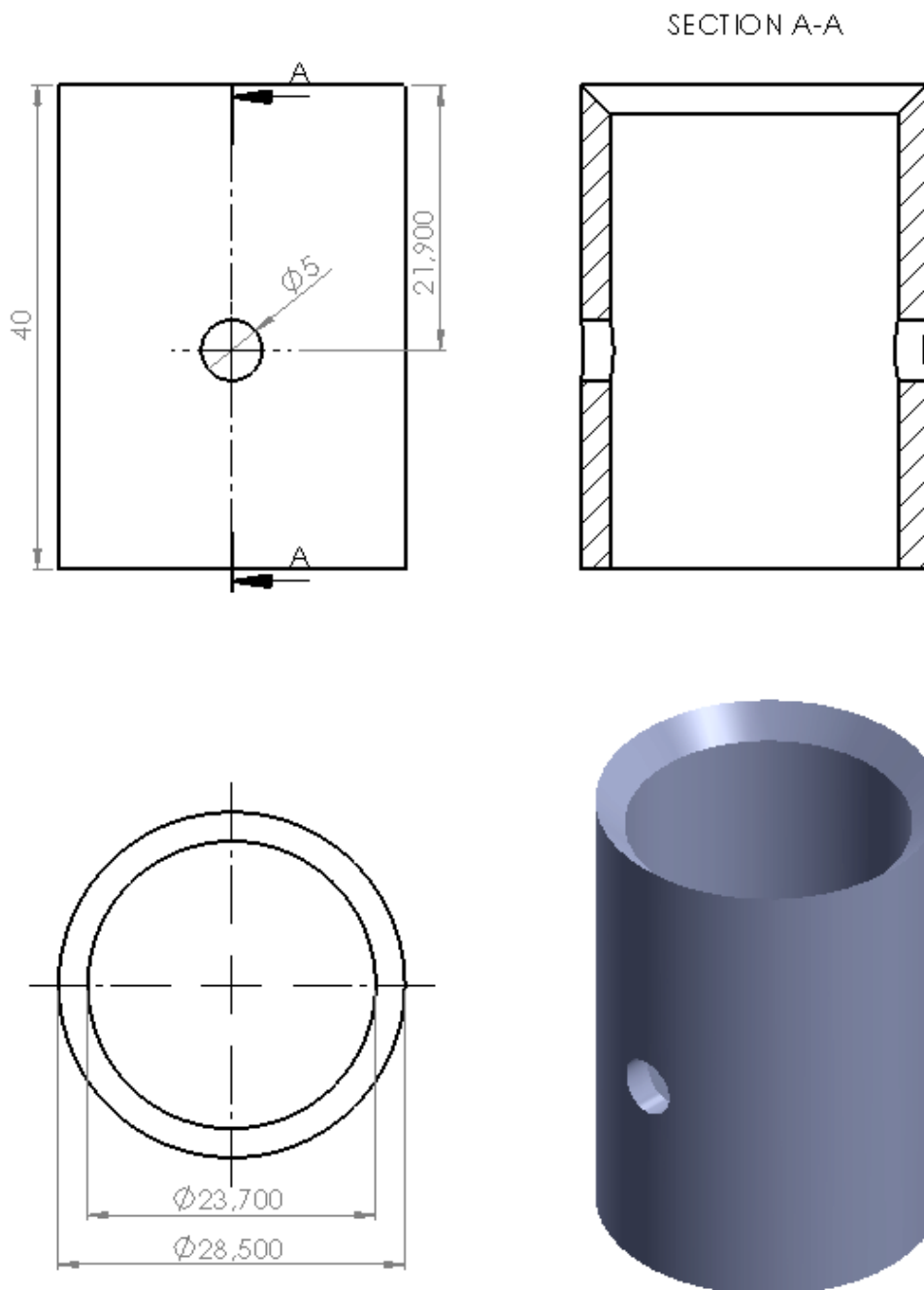
### Σχόλια για την διαδικασία κατάρρευσης

- Κατά την πρώτη φάση της συμπίεσης παρατηρείται ένα τοπικό μέγιστο περίπου 15000 N για μετατόπιση περίπου ίση 0,5 mm. Από την στιγμή αυτή καταρρέει το δοκίμιο από την επιφάνεια που έχουμε το triggering.
- Στην συνέχεια το φορτίο ξεκινά μια σχεδόν ταλαντωτική πορεία γύρω από μια μέση τιμή περίπου στα 17500 N.
- Η διαφορά με τις προηγούμενες περιπτώσεις είναι ότι το μέγιστο της καμπύλης εμφανίζεται , όχι στην αρχή , αλλά σχεδόν στο τέλος της καταπόνησης, περίπου στα 19,84 mm και είναι 21571 N. Καταναλίσκεται λιγότερη ενέργεια για την κατάρρευση του triggering παρά για την κατάρρευση του υπόλοιπου δοκιμίου.
- Την απέλεια την συναντούμε μεταξύ 14,4 και 19,4 mm , όπου και εμφανίζεται μια «κοιλιάδα» φορτίου. Σε αυτή την περιοχή το φορτίο έχει αρχίσει να ομαλοποιείται.
- Η άνοδος του φορτίου στο τελευταίο μέρος της καμπύλης μπορεί να οφείλεται σε υλικό που έχει εγκλωβιστεί μέσα στο προφίλ.
- Οι διαστρωματώσεις του υλικού αποκολλήθηκαν (delamination) και οι μισές κάμφθηκαν προς το εξωτερικό του δοκιμίου, ενώ οι υπόλοιπες συμπίεστηκαν στο εσωτερικό μέρος του κυλίνδρου.

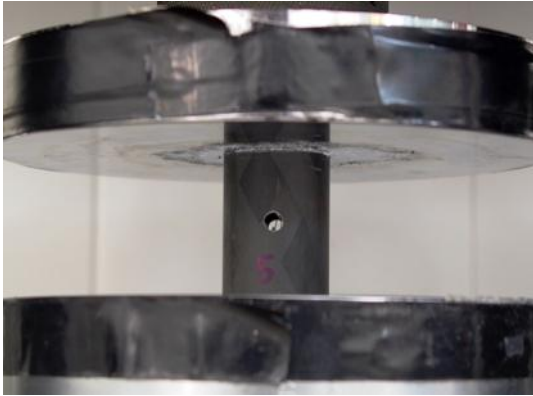
### 6.3.5 ΔΟΚΙΜΙΟ 5

Το πέμπτο δοκίμιο έχει υποστεί διαμόρφωση triggering με κωνικότητα μορφής γωνίας  $45^\circ$  προς την εσωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου και ξεκινάει ακριβώς στο «πρόσωπο» της άκρης του δοκιμίου.

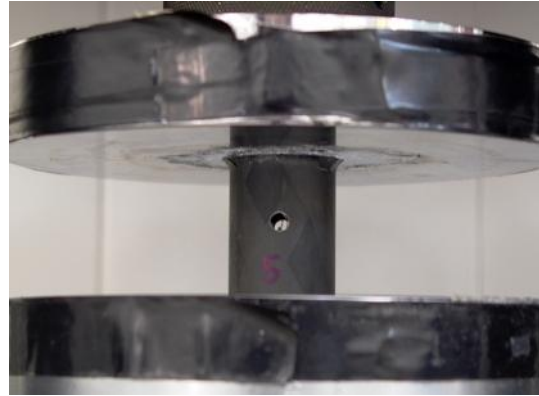
Οι ατέλειες είναι δύο αντιδιαμετρικές οπές διαμέτρου 5 mm . Η ακριβής θέση των οπών φαίνεται στο κατασκευαστικό σχέδιο που ακολουθεί. Στην συνέχεια παρατίθεται φωτογραφία και οι διάφορες όψεις του δοκιμίου 5 σε σχέδιο, πριν αυτό καταπονηθεί στην πρέσσα. Κατόπιν παρατίθενται οι φωτογραφίες που τραβήχτηκαν διαδοχικά καθόλη την διαδικασία της κατάρρευσης για μετατόπιση του εμβόλου ανά 1 mm. Τέλος, το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης που βασίζεται στις μετρήσεις αυτές, όπως λήφθηκαν από το λογισμικό της Instron. Στο διάγραμμα επισημαίνονται και οι χρονικές στιγμές κατά τις οποίες ελήφθησαν οι φωτογραφίες.



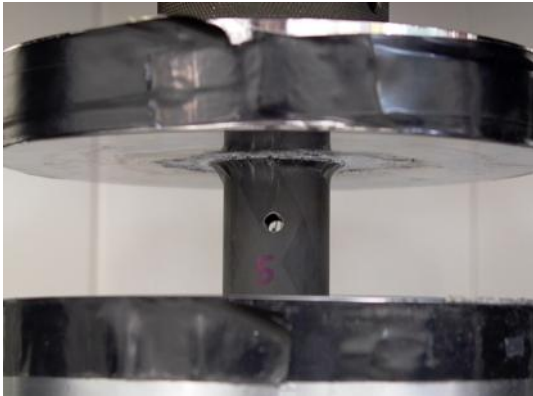
$T_0 = 0 \text{ sec}$



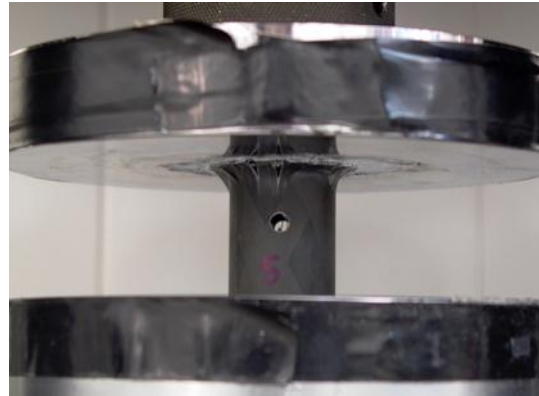
$T_1 = 12 \text{ sec}$



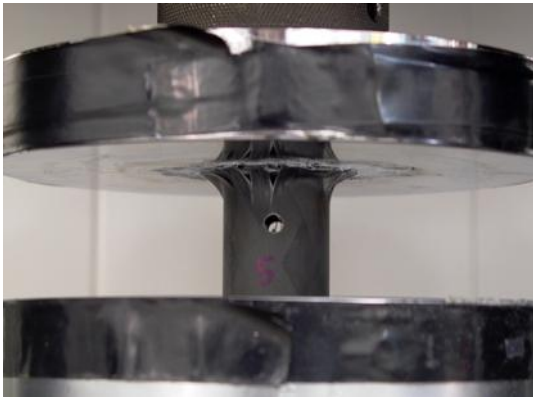
$T_2 = 24 \text{ sec}$



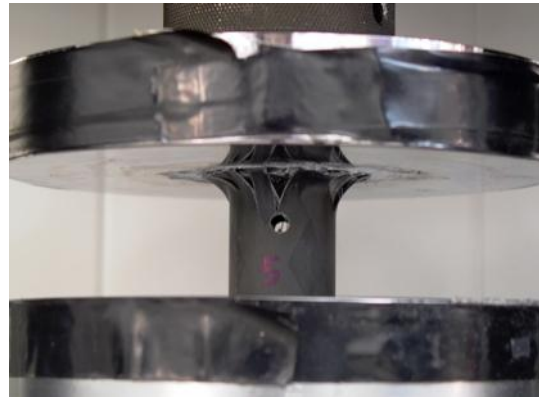
$T_3 = 36 \text{ sec}$



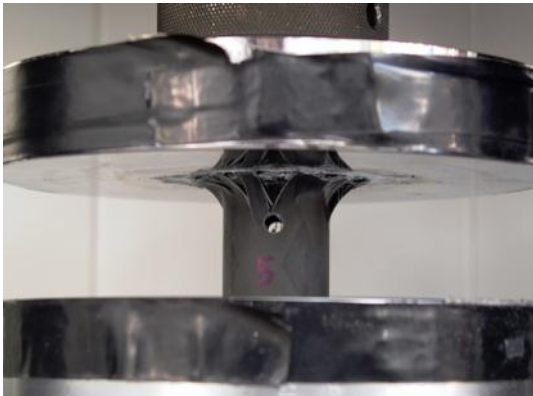
$T_4 = 48 \text{ sec}$



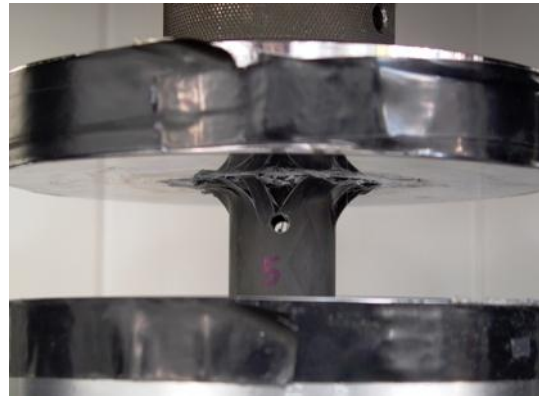
$T_5 = 60 \text{ sec}$



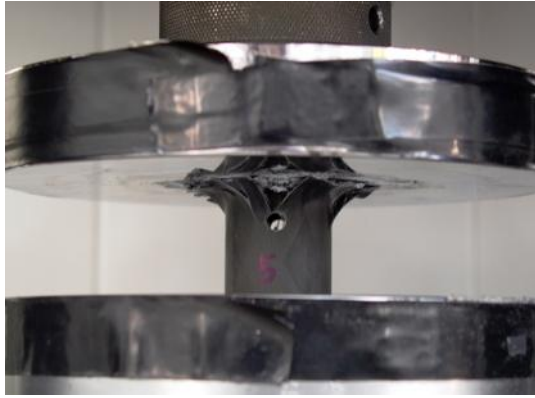
$T_6 = 72 \text{ sec}$



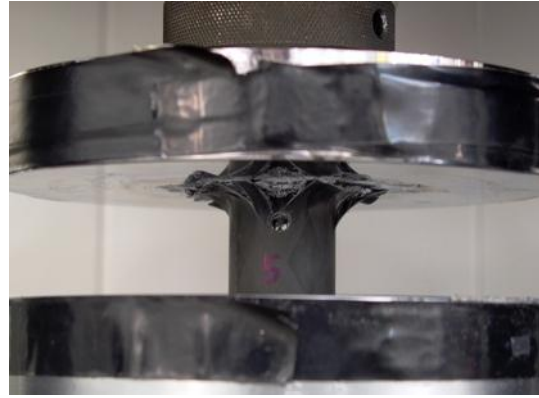
$T_7 = 84 \text{ sec}$



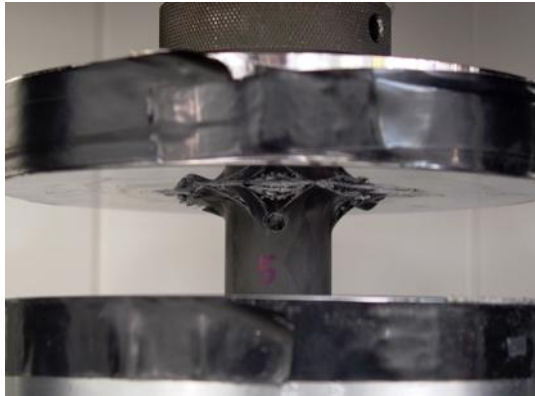
$T_8 = 96 \text{ sec}$



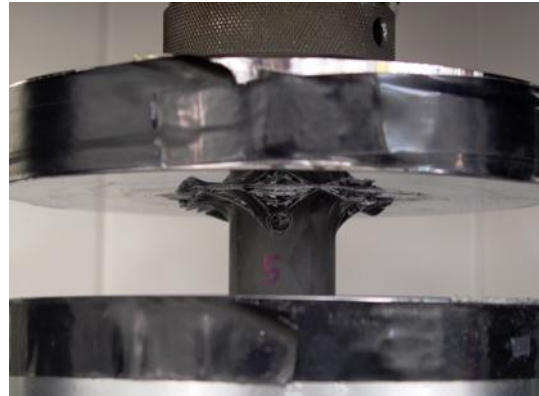
$T_9 = 108 \text{ sec}$



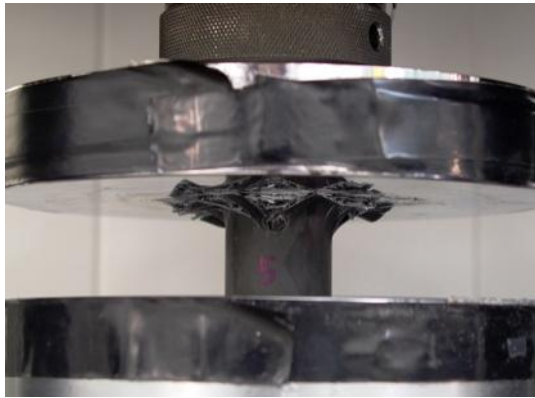
$T_{10} = 120 \text{ sec}$



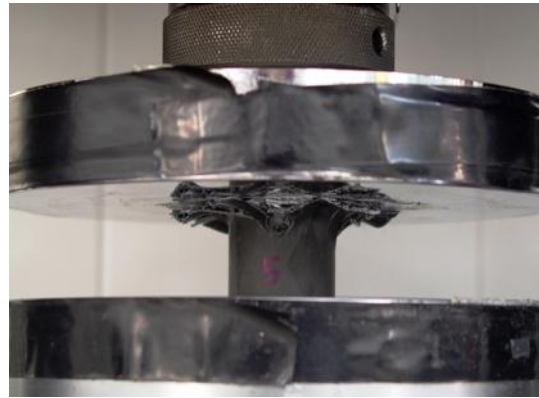
$T_{11} = 132 \text{ sec}$



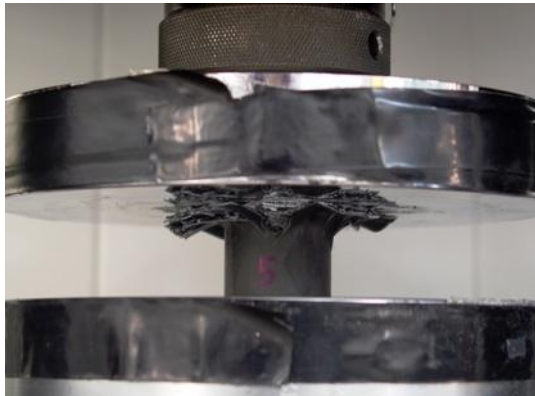
$T_{12} = 144 \text{ sec}$



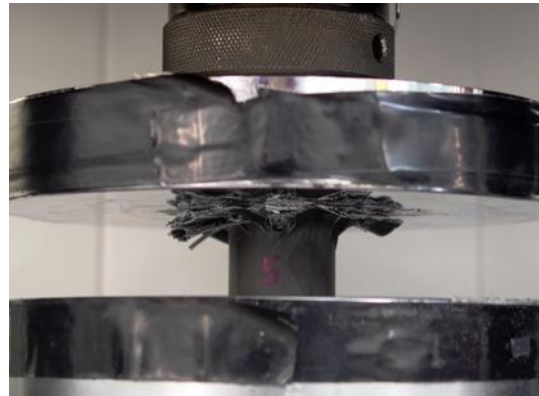
$T_{13} = 156 \text{ sec}$



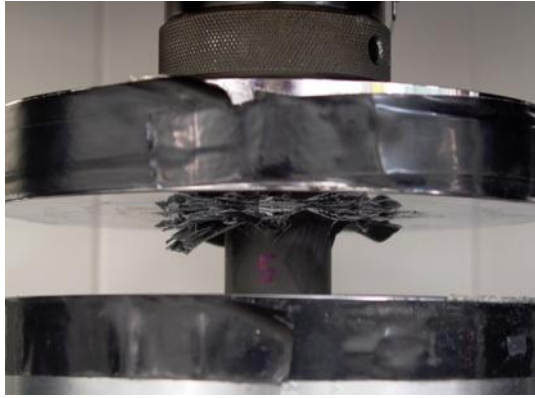
$T_{14} = 168 \text{ sec}$



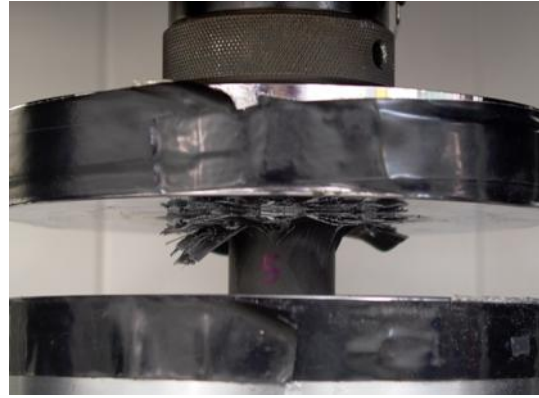
$T_{15} = 180 \text{ sec}$



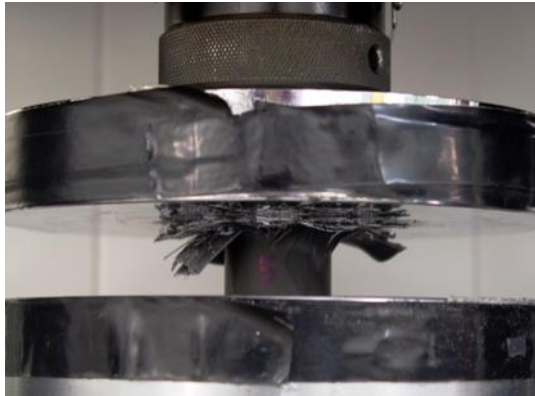
$T_{16} = 192 \text{ sec}$



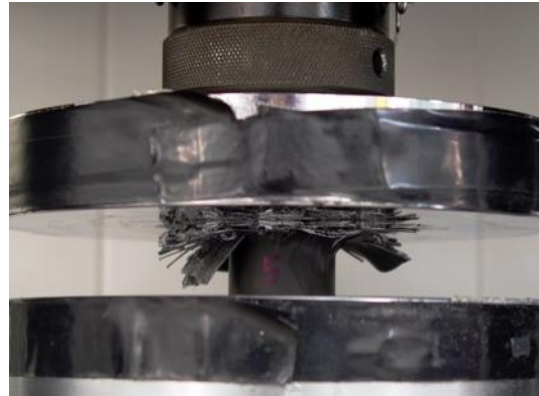
$T_{17} = 204 \text{ sec}$



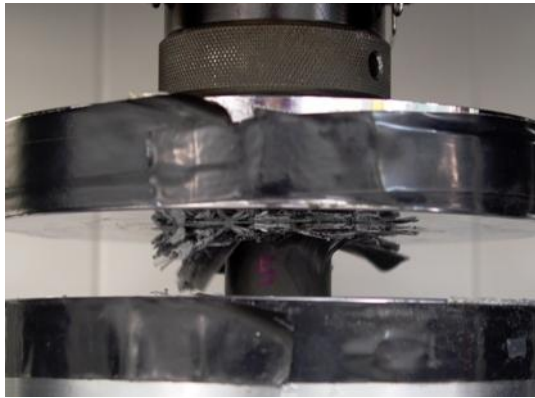
$T_{18} = 216 \text{ sec}$



$T_{19} = 228 \text{ sec}$



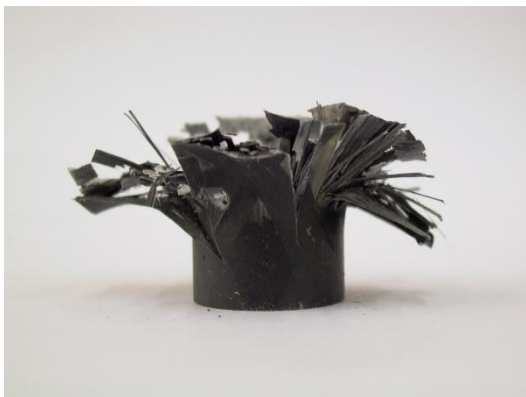
$T_{20} = 240 \text{ sec}$

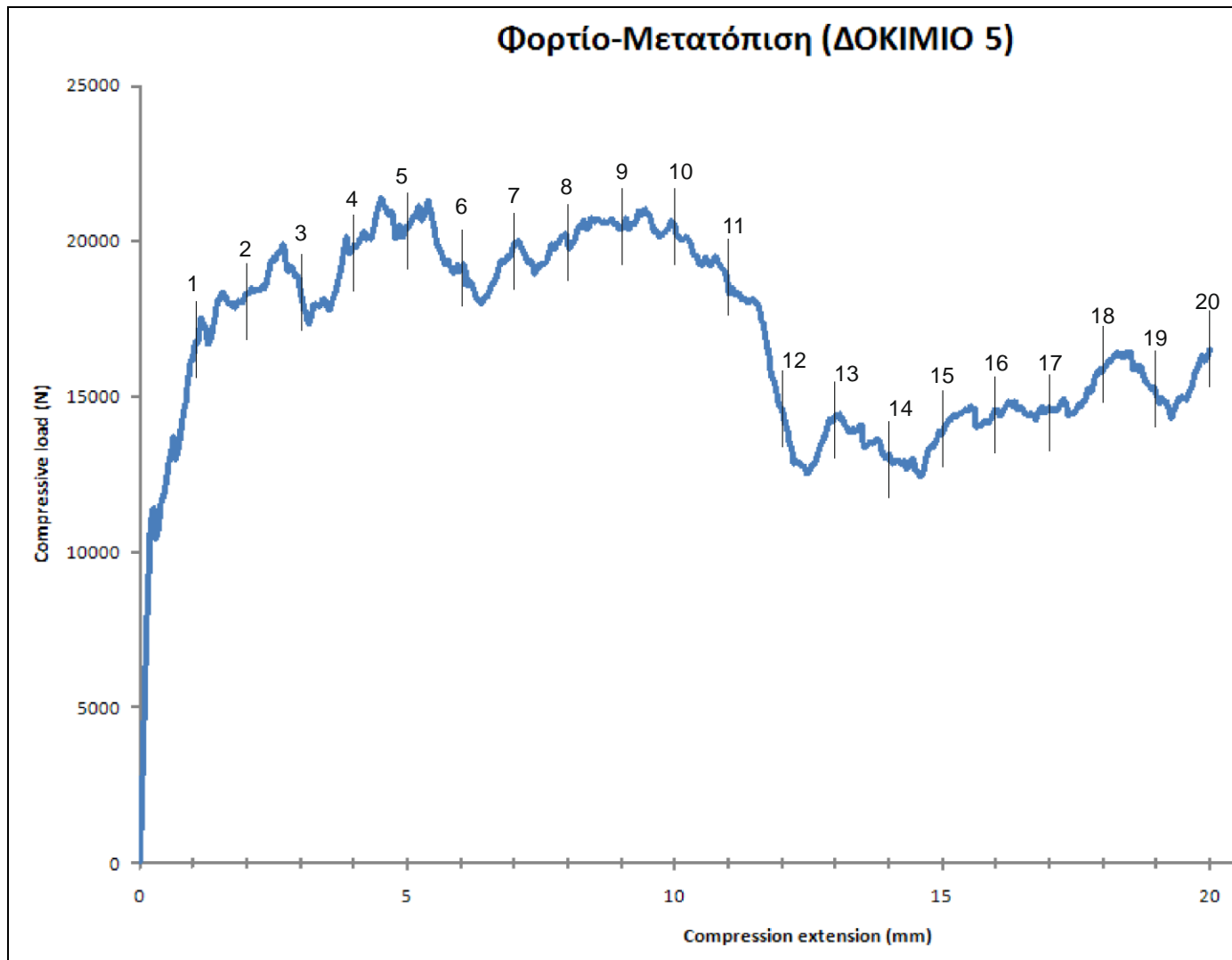


Στη συνέχεια παρατίθενται φωτογραφίες του δοκιμίου 5 μετά την καταστροφική καταπόνηση με την ακόλουθη σειρά:

- κάτοψη
- πρόοψη
- οπίσθια όψη
- τομή

αντίστοιχα.







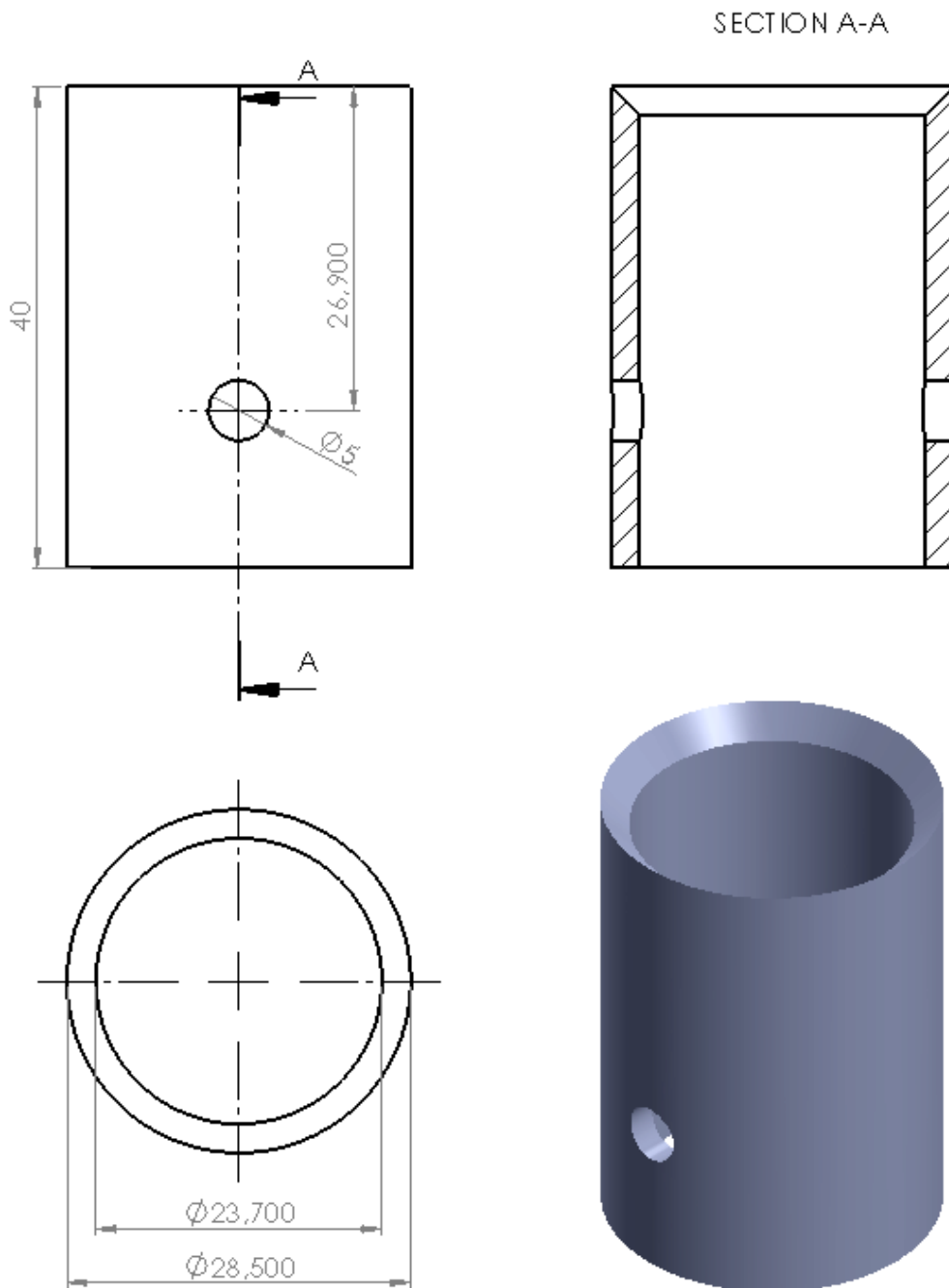
### Σχόλια για την διαδικασία κατάρρευσης

- Κατά την αρχική φάση της συμπίεσης παρατηρείται μια απότομη αύξηση του φορτίου έως την τιμή περίπου 11400 N για μετατόπιση 0,25mm.
- Το φορτίο συνεχίζει την ανοδική του πορεία έως περίπου το 1mm.
- Το δοκίμιο αρχίζει να τα καταρρέει από την πλευρά του triggering.
- Εν συνεχεία και έως τα 11,5 mm περίπου έχουμε μια σχεδόν ταλαντωτική κίνηση του φορτίου γύρω από μια μέση τιμή περίπου 19000N. Σε αυτή την περιοχή βρίσκεται και η μέγιστη τιμή του φορτίου , η οποία είναι 21383 N περίπου στα 4,5mm. Το φορτίο λαμβάνει την μέγιστη τιμή του μετά από το triggering.
- Μετά, παρατηρούμε μια απότομη πτώση έως τα 12,5 mm που ακολουθείται από ένα τοπικό μέγιστο στα 13mm.
- Την ατέλεια την συναντούμε περίπου στα 19,4mm και εκτείνεται περίπου έως τα 24,4mm. Η δοκιμή βέβαια έχει τελειώσει πριν συναντήσουμε το πέρας της ατέλειας. Στην αρχή της ατέλειας παρατηρούμε ότι το φορτίο έχει ανοδική πορεία.
- Έως το τέλος της δοκιμής το φορτίο σχεδόν σταθεροποιείται γύρω από την τιμή 15000 N.
- Η άνοδος του φορτίου στο τελευταίο μέρος της καμπύλης μπορεί να οφείλεται σε υλικό που έχει εγκλωβιστεί μέσα στο προφίλ.
- Οι διαστρωματώσεις του υλικού αποκολλήθηκαν (delamination) και οι μισές κάμφθηκαν προς το εξωτερικό του δοκιμίου, ενώ οι υπόλοιπες συμπίεστηκαν στο εσωτερικό μέρος του κυλίνδρου.

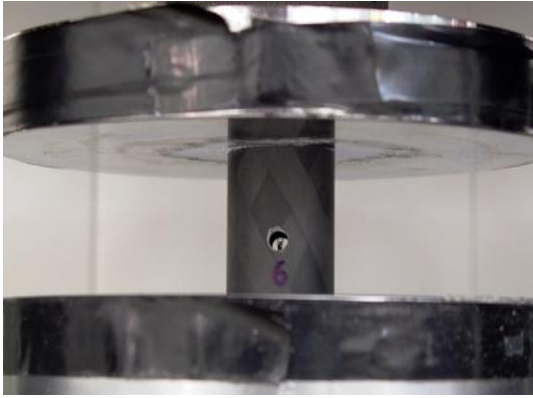
### 6.3.6 ΔΟΚΙΜΙΟ 6

Το έκτο δοκίμιο έχει υποστεί διαμόρφωση triggering με κωνικότητα μορφής γωνίας 45° προς την εσωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου και ξεκινάει ακριβώς στο «πρόσωπο» της άκρης του δοκιμίου.

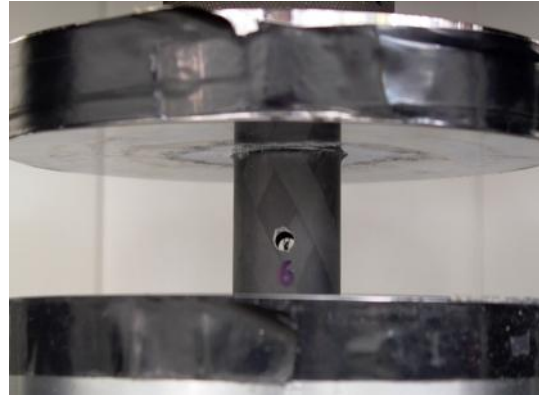
Οι ατέλειες είναι δύο αντιδιαμετρικές οπές διαμέτρου 5 mm . Η ακριβής θέση των οπών φαίνεται στο κατασκευαστικό σχέδιο που ακολουθεί. Στην συνέχεια παρατίθεται φωτογραφία και οι διάφορες όψεις του δοκιμίου 6 σε σχέδιο, πριν αυτό καταπονηθεί στην πρέσσα. Κατόπιν παρατίθενται οι φωτογραφίες που τραβήχτηκαν διαδοχικά καθόλη την διαδικασία της κατάρρευσης για μετατόπιση του εμβόλου ανά 1 mm. Τέλος, το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης που βασίζεται στις μετρήσεις αυτές, όπως λήφθηκαν από το λογισμικό της Instron. Στο διάγραμμα επισημαίνονται και οι χρονικές στιγμές κατά τις οποίες ελήφθησαν οι φωτογραφίες.



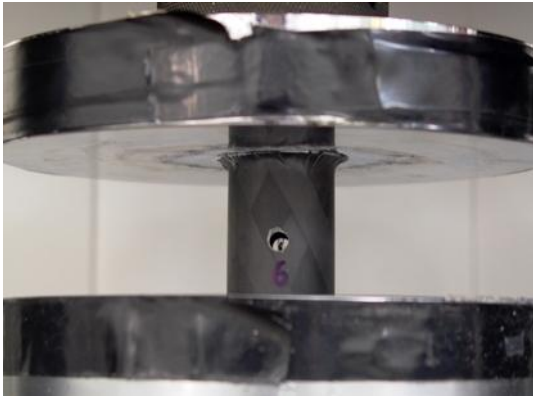
$T_0 = 0 \text{ sec}$



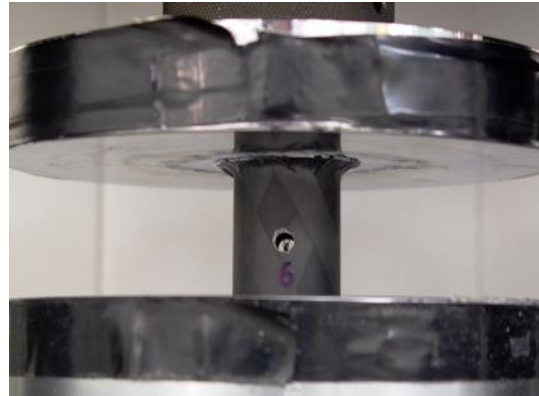
$T_1 = 12 \text{ sec}$



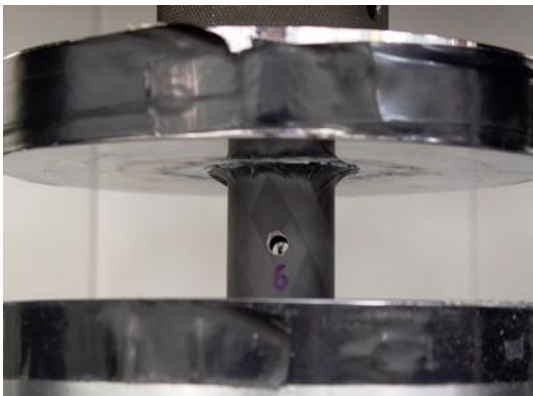
$T_2 = 24 \text{ sec}$



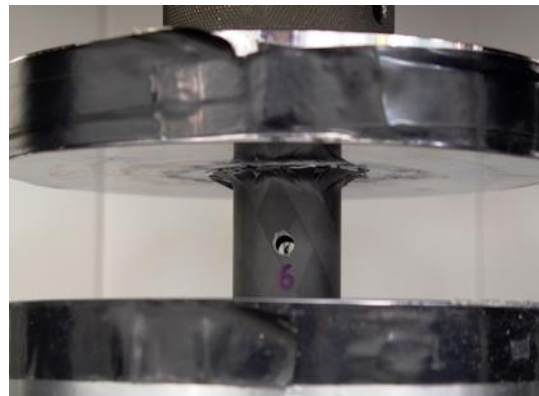
$T_3 = 36 \text{ sec}$



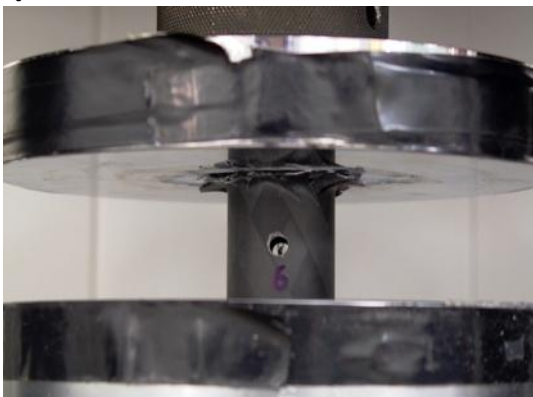
$T_4 = 48 \text{ sec}$



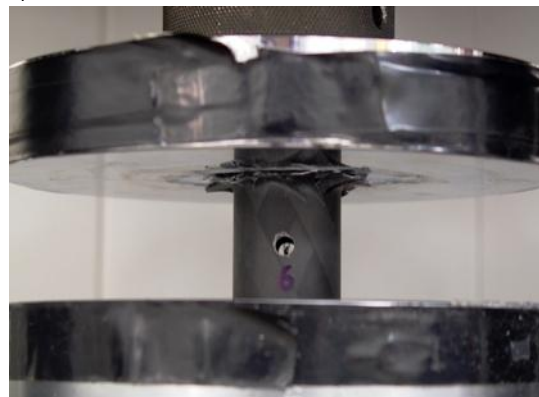
$T_5 = 60 \text{ sec}$



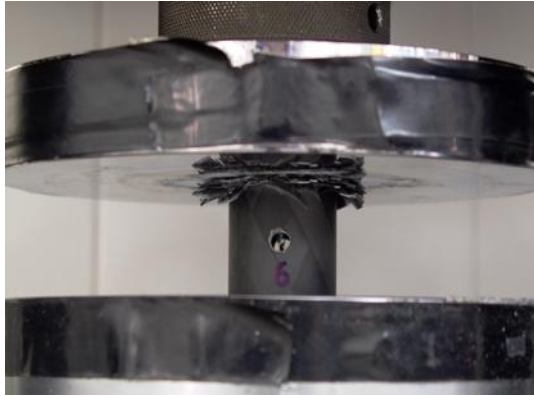
$T_6 = 72 \text{ sec}$



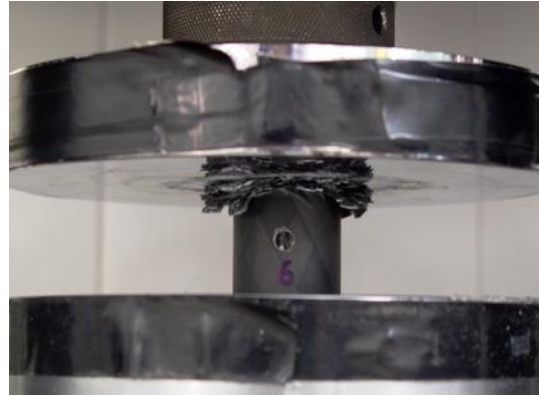
$T_7 = 84 \text{ sec}$



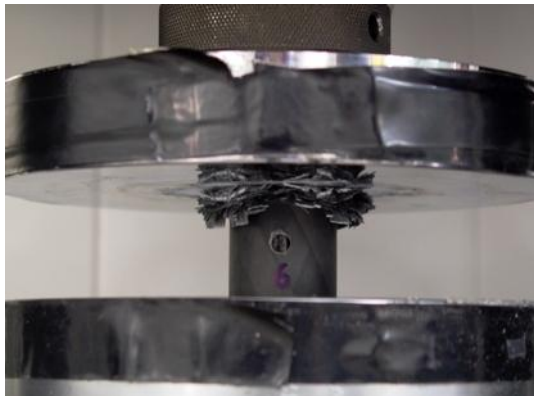
$T_8 = 96 \text{ sec}$



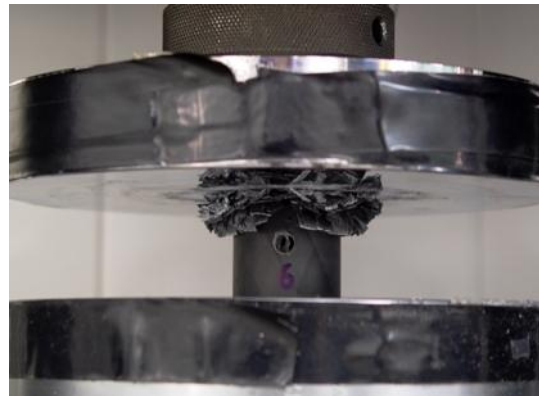
$T_9 = 108 \text{ sec}$



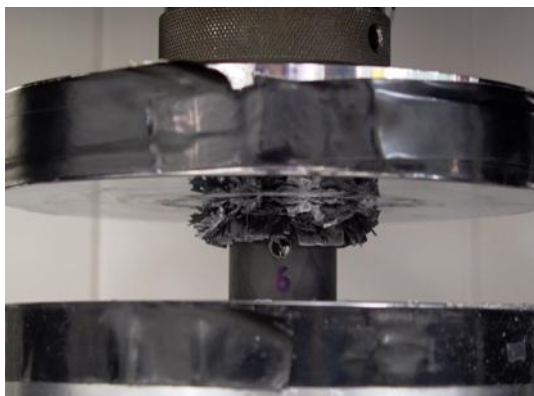
$T_{10} = 120 \text{ sec}$



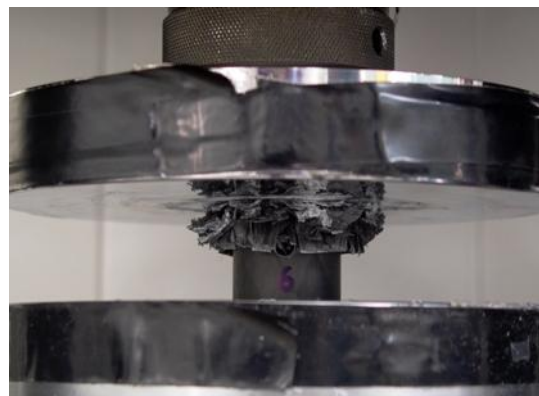
$T_{11} = 132 \text{ sec}$



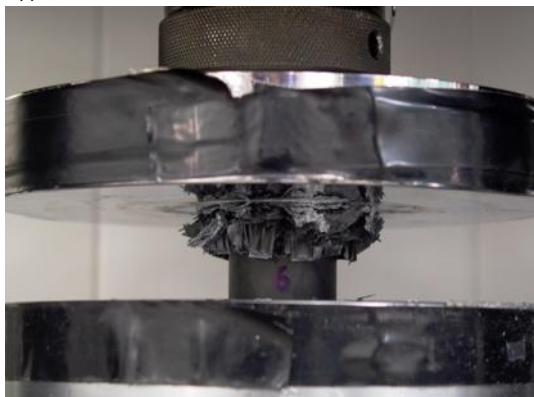
$T_{12} = 144 \text{ sec}$



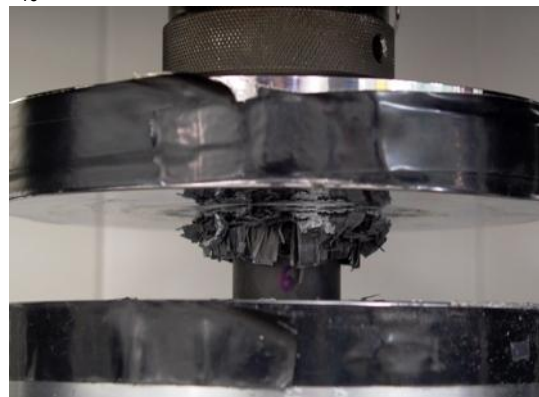
$T_{13} = 156 \text{ sec}$



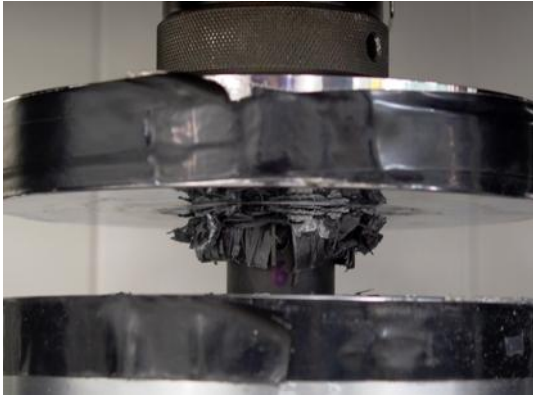
$T_{14} = 168 \text{ sec}$



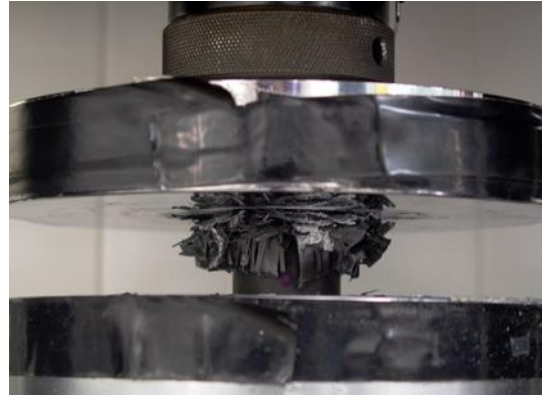
$T_{15} = 180 \text{ sec}$



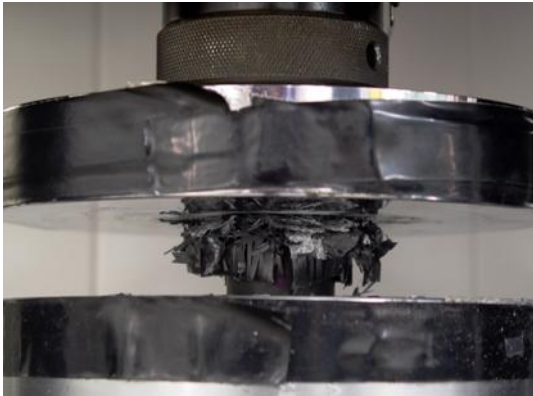
T<sub>16</sub> = 192 sec



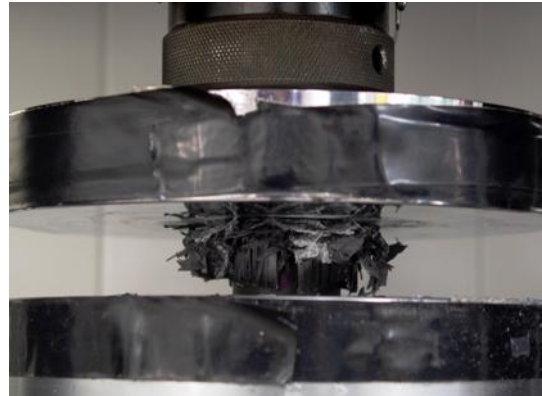
T<sub>17</sub> = 204 sec



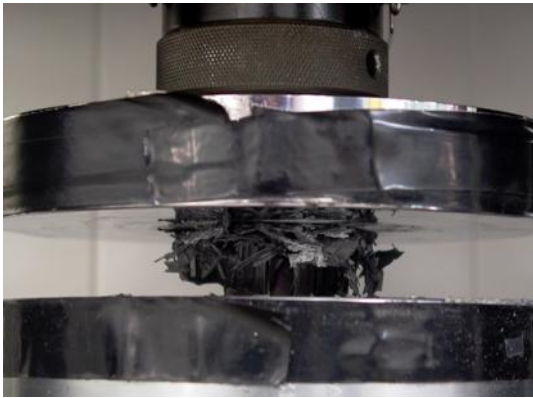
T<sub>18</sub> = 216 sec



T<sub>19</sub> = 228 sec



T<sub>20</sub> = 240 sec

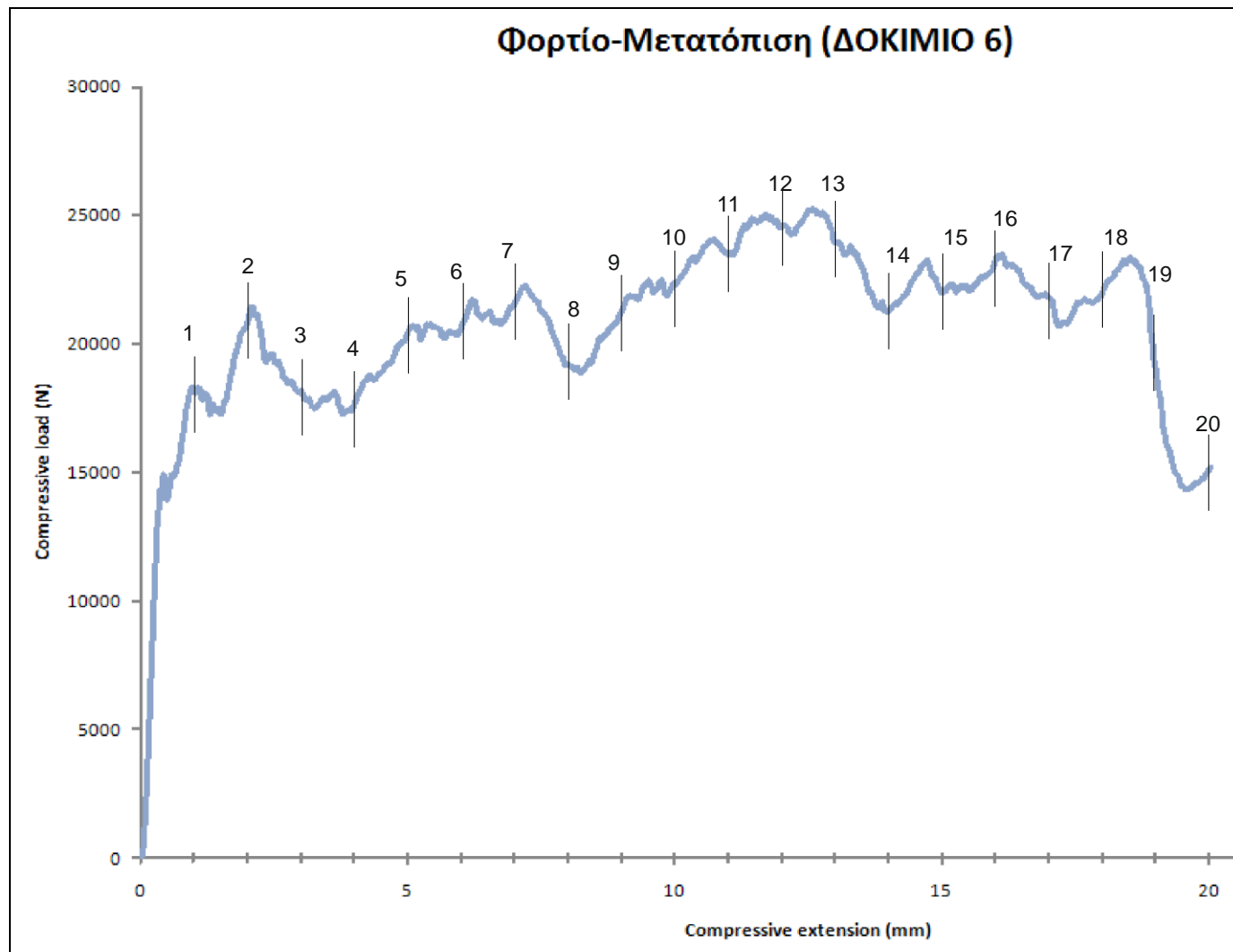


Στη συνέχεια παρατίθενται φωτογραφίες του δοκιμίου 6 μετά την καταστροφική καταπόνηση με την ακόλουθη σειρά:

- κάτοψη
- πρόοψη
- οπίσθια όψη
- τομή

αντίστοιχα.





### Σχόλια για την διαδικασία κατάρρευσης

- Κατά την αρχική φάση της συμπίεσης παρατηρείται απότομη αύξηση του φορτίου και η πρώτη κορυφή βρίσκεται στα 14937 N και για παραμόρφωση περίπου 0,44 mm.
- Το δοκίμιο αρχίζει να καταρρέει από την πλευρά του triggering.
- Εν συνεχεία εμφανίζονται δύο ακόμα έντονα τοπικά μέγιστα και ελάχιστα.
- Ύστερα η καμπύλη αρχίζει να εξομαλύνεται.
- Η μέγιστη τιμή του φορτίου εμφανίζεται περίπου στα 12,6 mm και έχει τιμή 25274,85 N. Η μέγιστη τιμή του φορτίου λοιπόν δεν εμφανίζεται στην περιοχή του triggering.
- Η δοκιμή τελειώνει πριν φτάσει η πλάκα της πρέσσας στην ατέλεια.
- Προς το τέλος της δοκιμής υπάρχει απότομη πτώση του φορτίου.
- Οι διαστρωματώσεις του υλικού αποκολλήθηκαν (delamination) και οι μισές κάμφθηκαν προς το εξωτερικό του δοκιμίου, ενώ οι υπόλοιπες συμπίεστηκαν στο εσωτερικό μέρος του κυλίνδρου.



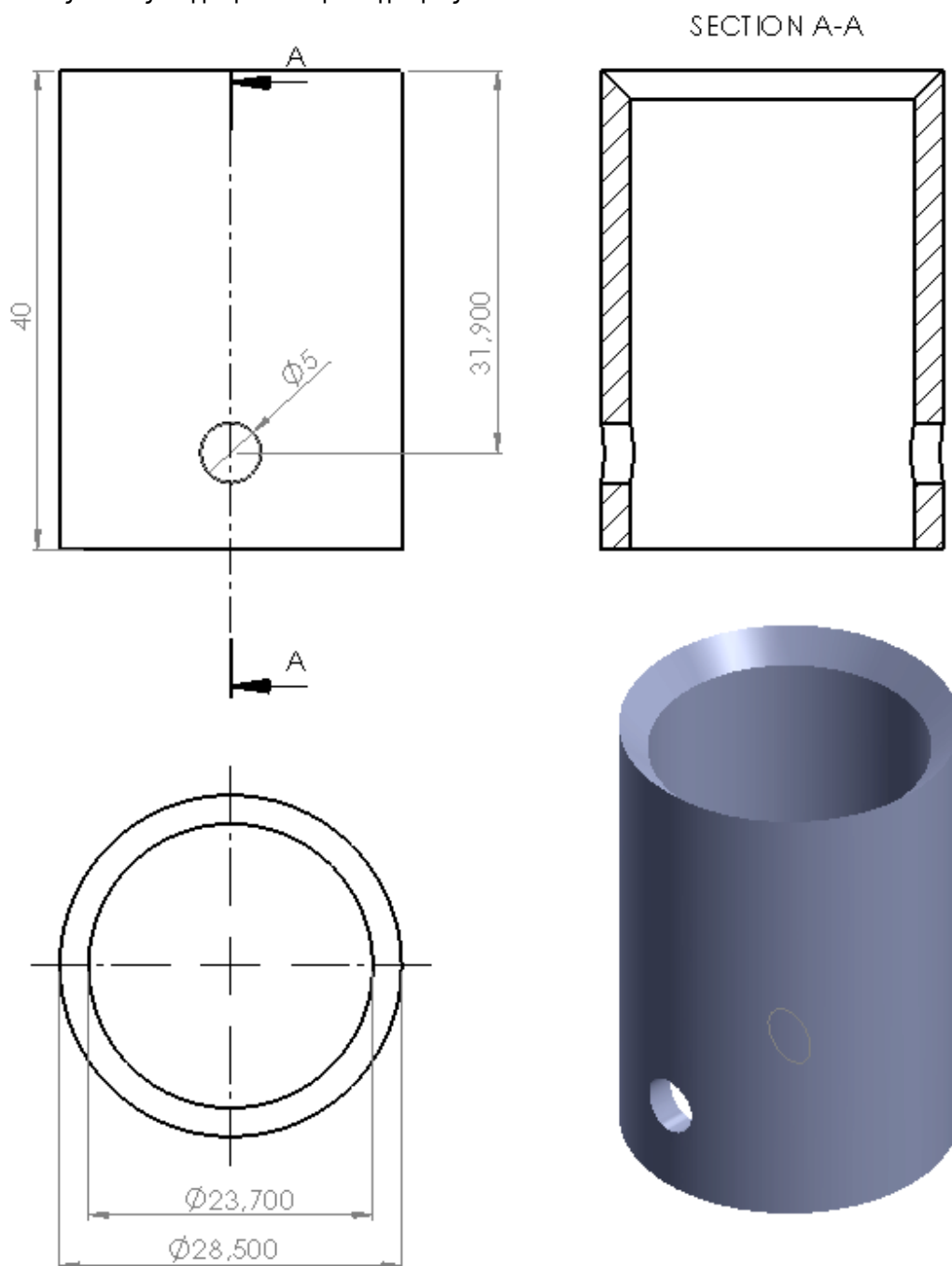
### 6.3.7 ΔΟΚΙΜΙΟ 7

Το έβδομο δοκίμιο έχει υποστεί διαμόρφωση triggering με κωνικότητα μορφής γωνίας  $45^\circ$  προς την εσωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου και ξεκινάει ακριβώς στο «πρόσωπο» της άκρης του δοκιμίου.

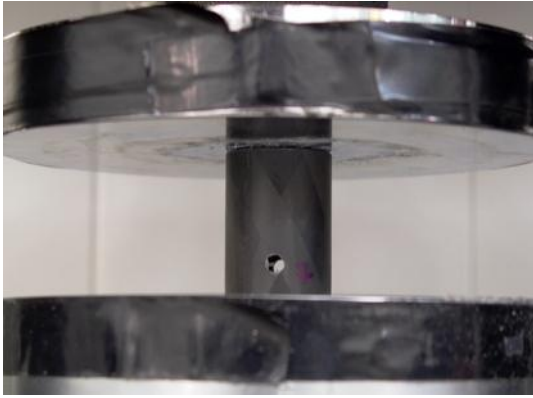
Οι ατέλειες είναι δύο αντιδιαμετρικές οπές διαμέτρου 5 mm . Η ακριβής θέση των οπών φαίνεται στο κατασκευαστικό σχέδιο που ακολουθεί.

Στην συνέχεια παρατίθεται φωτογραφία και οι διάφορες όψεις του δοκιμίου 7 σε σχέδιο, πριν αυτό καταπονηθεί στην πρέσσα. Κατόπιν παρατίθενται οι φωτογραφίες που τραβήχτηκαν διαδοχικά καθόλη την διαδικασία της κατάρρευσης για μετατόπιση του εμβόλου ανά 1 mm.

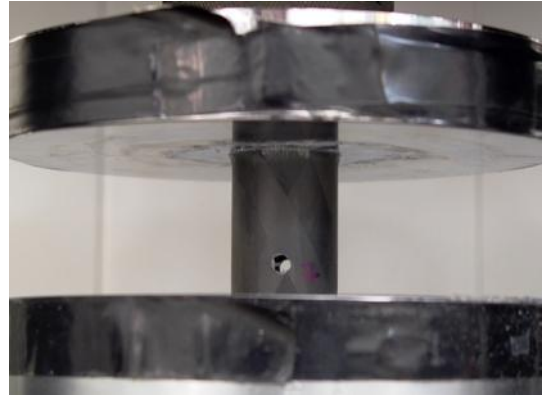
Τέλος, το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης που βασίζεται στις μετρήσεις αυτές , όπως λήφθηκαν από το λογισμικό της Instron. Στο διάγραμμα επισημαίνονται και οι χρονικές στιγμές κατά τις οποίες ελήφθησαν οι φωτογραφίες.



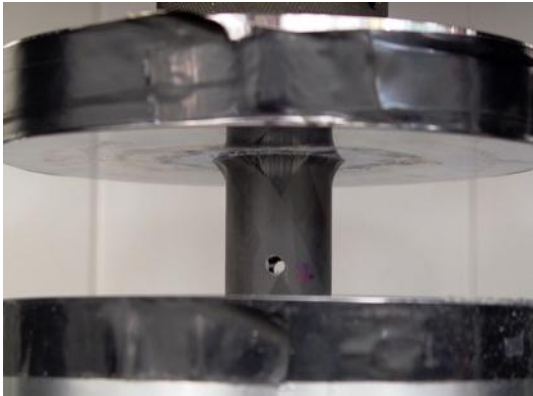
$T_0 = 0 \text{ sec}$



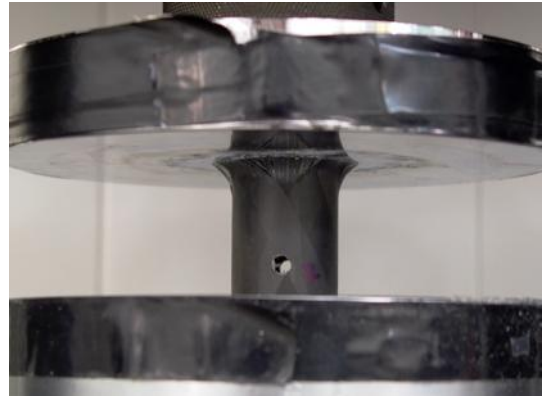
$T_1 = 12 \text{ sec}$



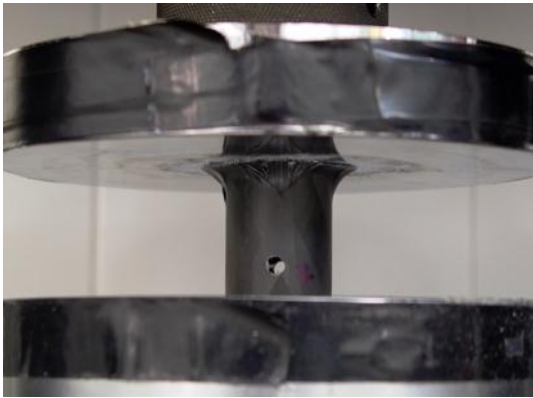
$T_2 = 24 \text{ sec}$



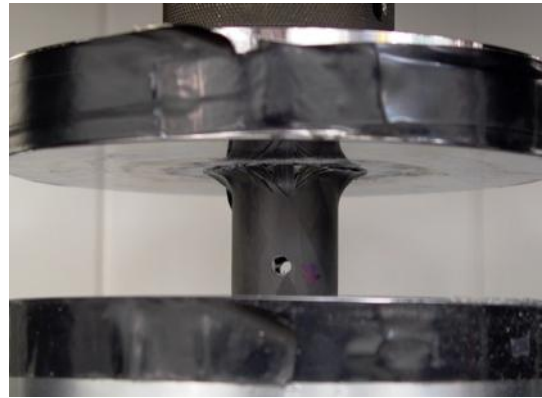
$T_3 = 36 \text{ sec}$



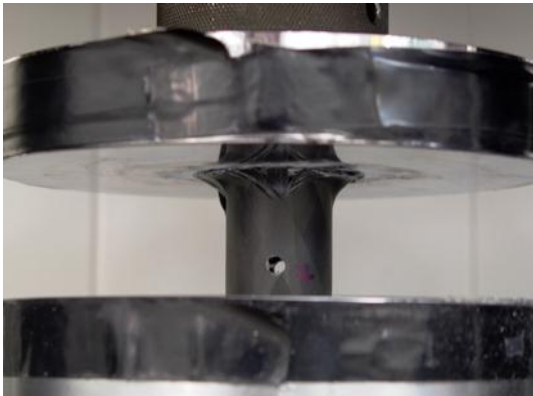
$T_4 = 48 \text{ sec}$



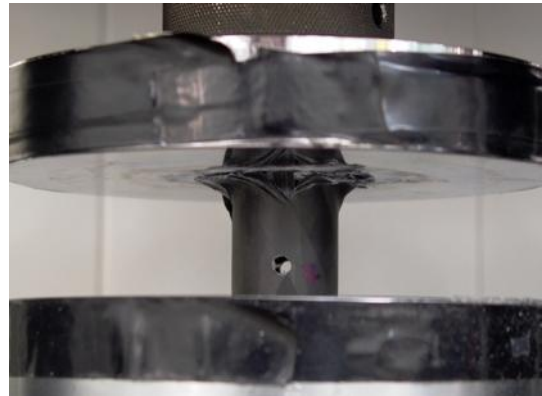
$T_5 = 60 \text{ sec}$



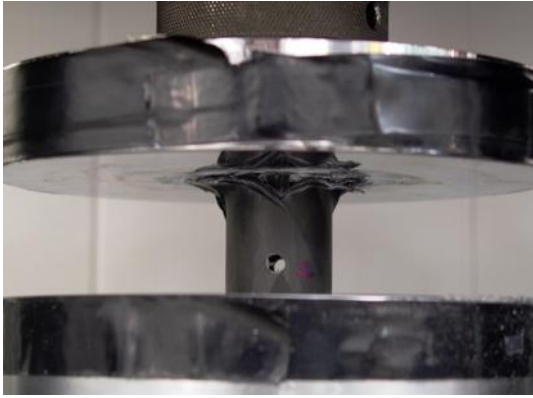
$T_6 = 72 \text{ sec}$



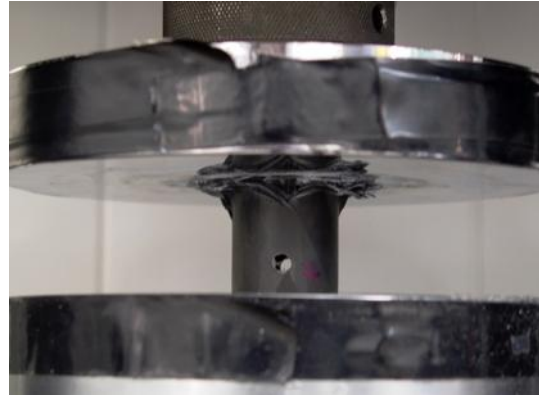
$T_7 = 84 \text{ sec}$



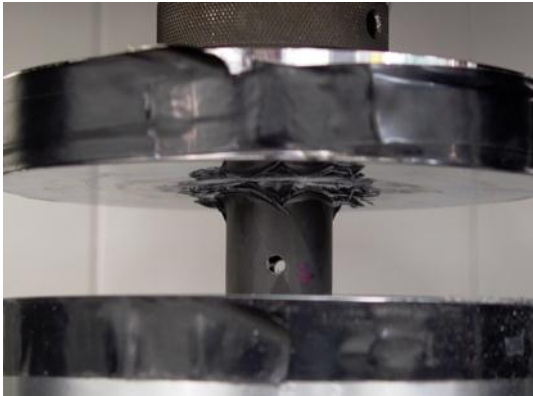
$T_8 = 96 \text{ sec}$



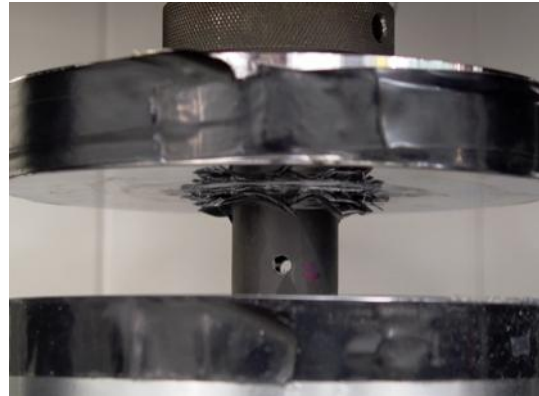
$T_9 = 108 \text{ sec}$



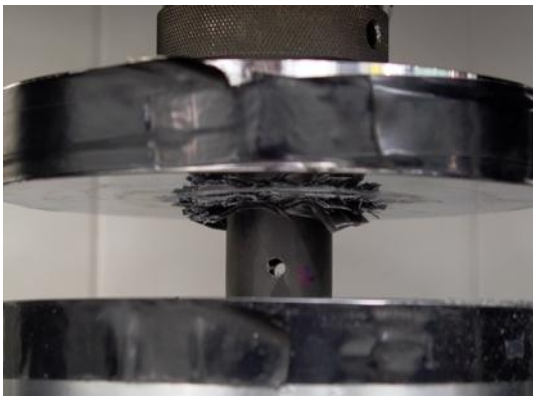
$T_{10} = 120 \text{ sec}$



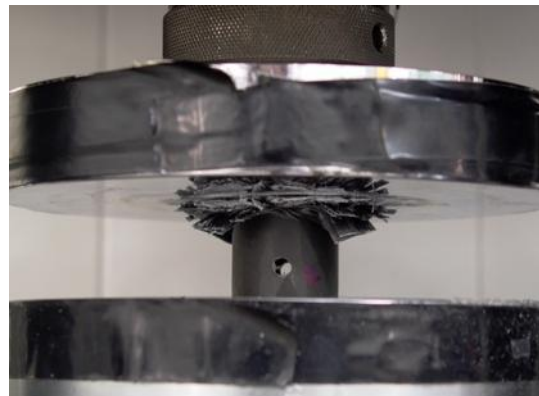
$T_{11} = 132 \text{ sec}$



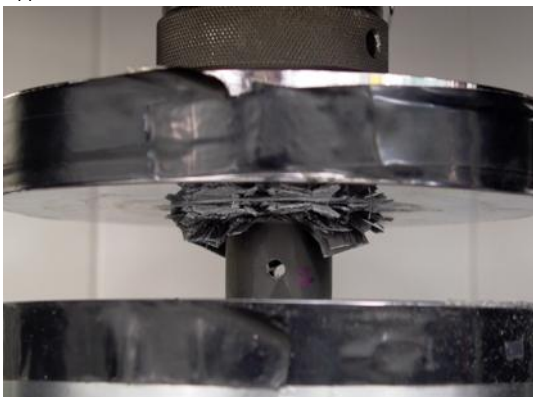
$T_{12} = 144 \text{ sec}$



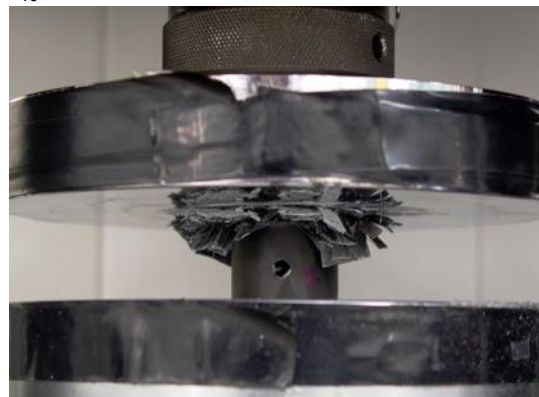
$T_{13} = 156 \text{ sec}$



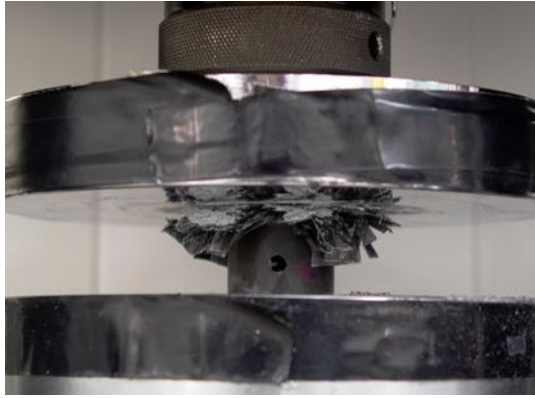
$T_{14} = 168 \text{ sec}$



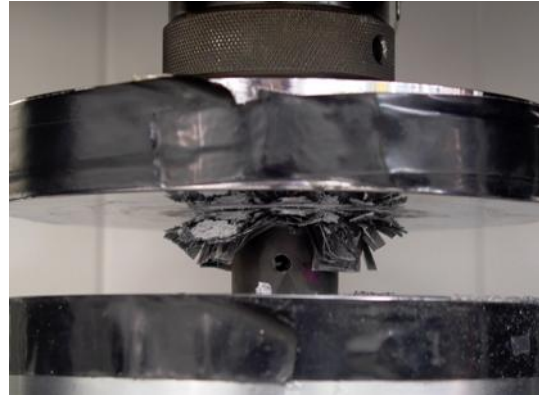
$T_{15} = 180 \text{ sec}$



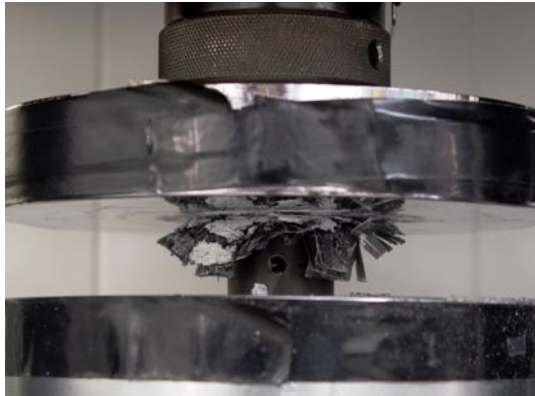
T<sub>16</sub> = 192 sec



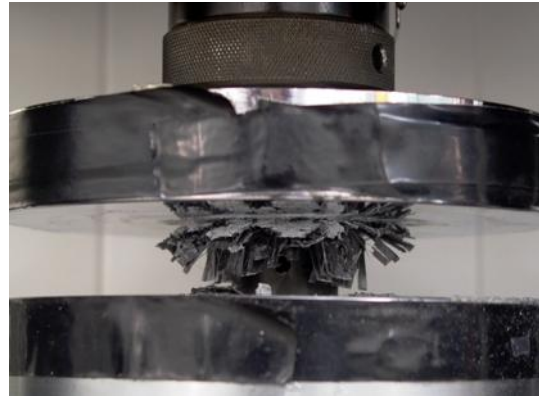
T<sub>17</sub> = 204 sec



T<sub>18</sub> = 216 sec



T<sub>19</sub> = 228 sec



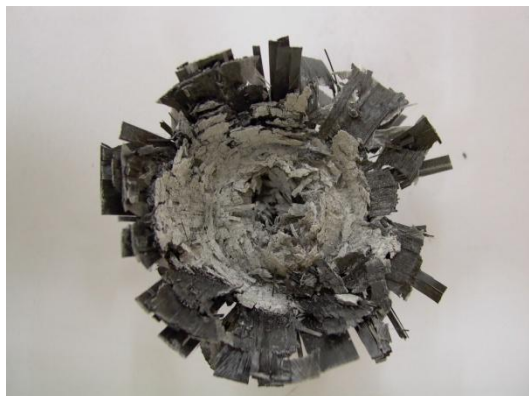
T<sub>20</sub> = 240 sec

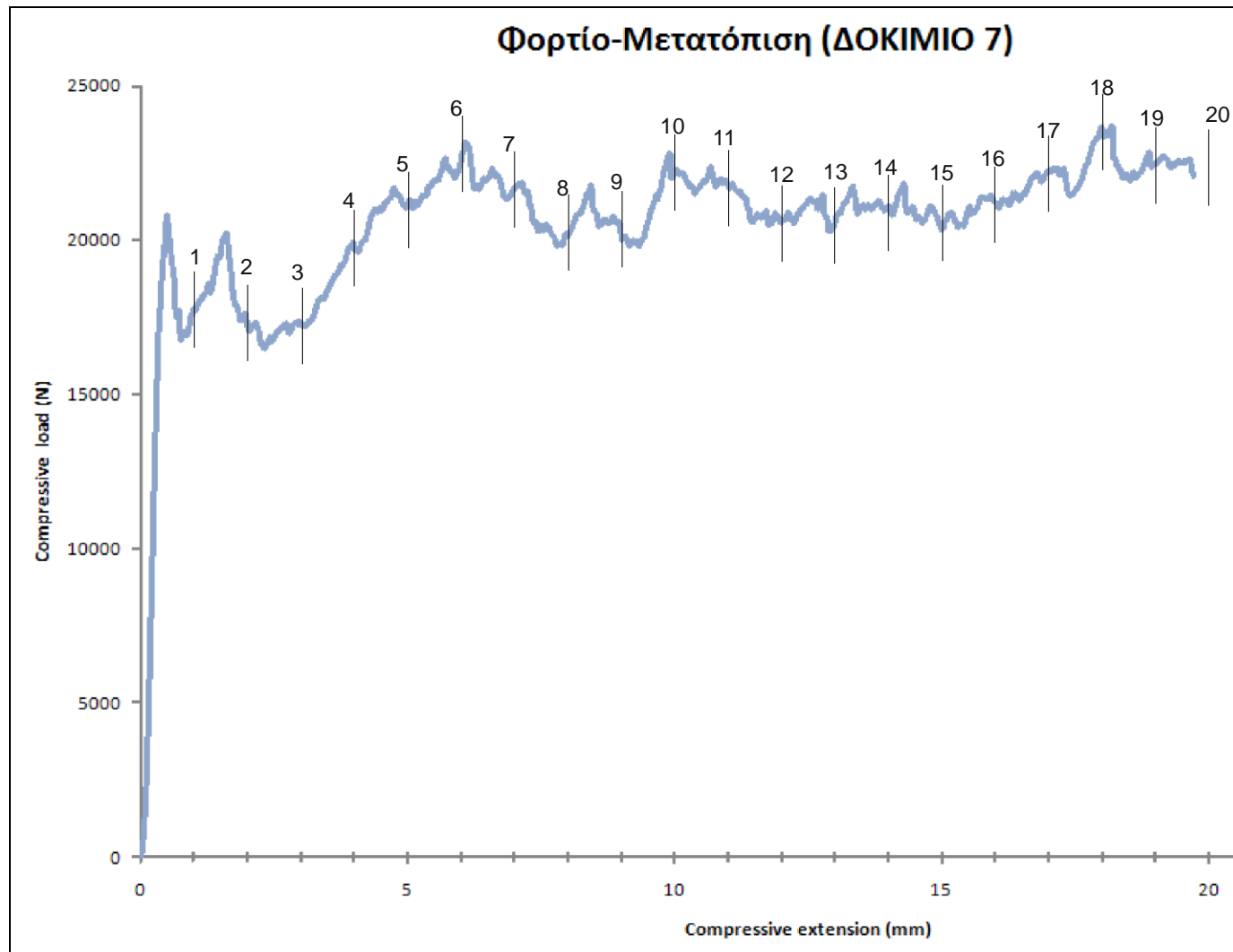


Στη συνέχεια παρατίθενται φωτογραφίες του δοκιμίου 7 μετά την καταστροφική καταπόνηση με την ακόλουθη σειρά:

- κάτοψη
- πρόοψη
- οπίσθια όψη
- τομή

αντίστοιχα.





### Σχόλια για την διαδικασία κατάρρευσης

- Κατά την αρχική φάση της συμπίεσης παρατηρείται ένα τοπικό μέγιστο 20580 N σε απόσταση περίπου 0,8 mm.
- Το δοκίμιο αρχίζει να καταρρέει από την πλευρά του triggering.
- Εν συνεχεία εμφανίζεται ακόμα ένα τοπικό μέγιστο και ελάχιστο.
- Μετά από περίπου 4,5 mm μετατόπισης, η καμπύλη αρχίζει να εξομαλύνεται.
- Η μέγιστη τιμή του φορτίου 23677,55 N εμφανίζεται προς το τέλος της δοκιμής , περίπου στα 18,5 mm. Το μέγιστο φορτίο και σε αυτή την περίπτωση δεν σχετίζεται με το triggering.
- Στο δοκίμιο 7 η συμπίεση σταματά πριν φθάσει στο ύψος της ατέλειας.
- Οι διαστρωματώσεις του υλικού αποκολλήθηκαν (delamination) και οι μισές κάμφθηκαν προς το εξωτερικό του δοκιμίου, ενώ οι υπόλοιπες συμπίεστηκαν στο εσωτερικό μέρος του κυλίνδρου.

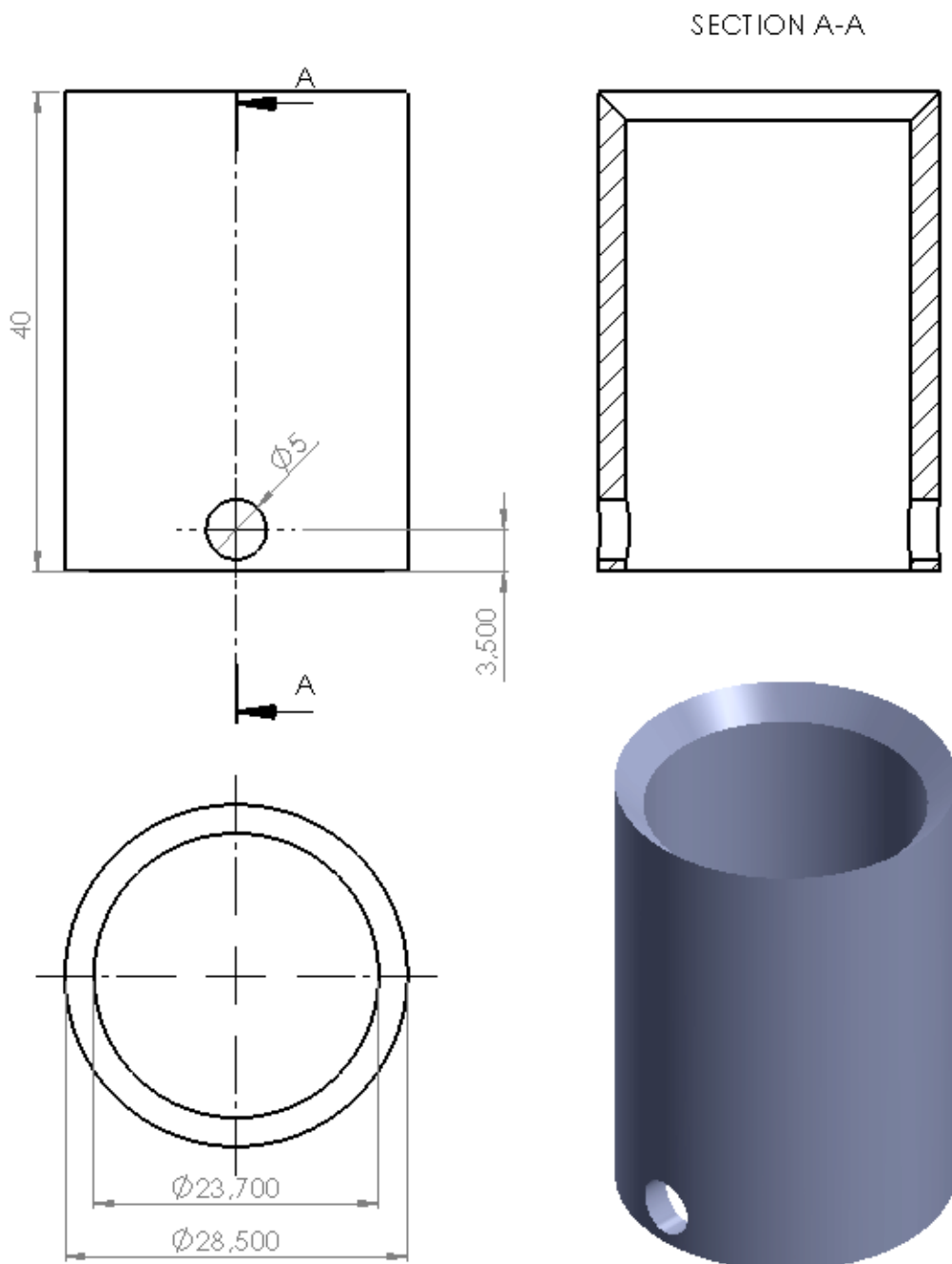
### 6.3.8 ΔΟΚΙΜΙΟ 8

Το όγδοο δοκίμιο έχει υποστεί διαμόρφωση triggering με κωνικότητα μορφής γωνίας  $45^\circ$  προς την εσωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου και ξεκινάει ακριβώς στο «πρόσωπο» της άκρης του δοκιμίου.

Οι ατέλειες είναι δύο αντιδιαμετρικές οπές διαμέτρου 5 mm . Η ακριβής θέση των οπών φαίνεται στο κατασκευαστικό σχέδιο που ακολουθεί.

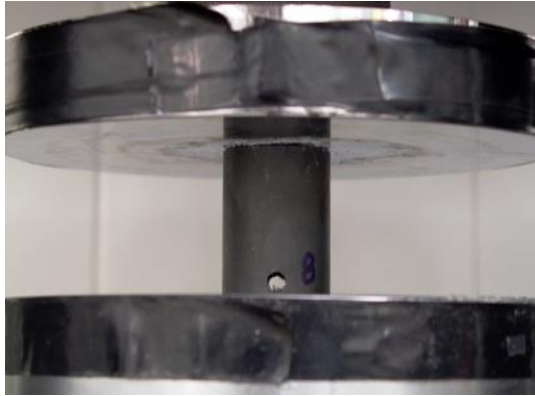
Στην συνέχεια παρατίθεται φωτογραφία και οι διάφορες όψεις του δοκιμίου 8 σε σχέδιο, πριν αυτό καταπονηθεί στην πρέσσα. Κατόπιν παρατίθενται οι φωτογραφίες που τραβήχτηκαν διαδοχικά καθόλη την διαδικασία της κατάρρευσης για μετατόπιση του εμβόλου ανά 1 mm.

Τέλος, το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης που βασίζεται στις μετρήσεις αυτές , όπως λήφθηκαν από το λογισμικό της Instron. Στο διάγραμμα επισημαίνονται και οι χρονικές στιγμές κατά τις οποίες ελήφθησαν οι φωτογραφίες.

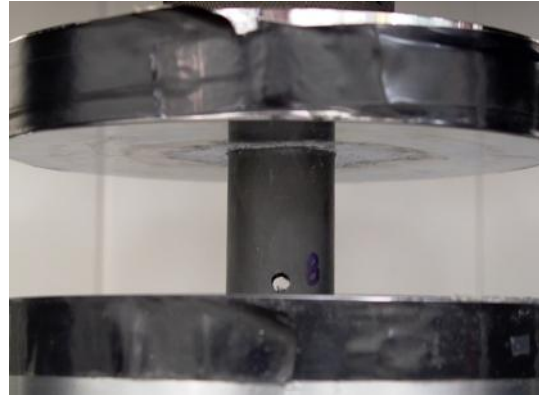




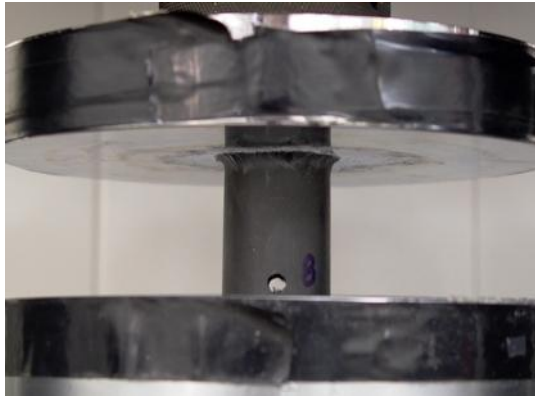
$T_0 = 0 \text{ sec}$



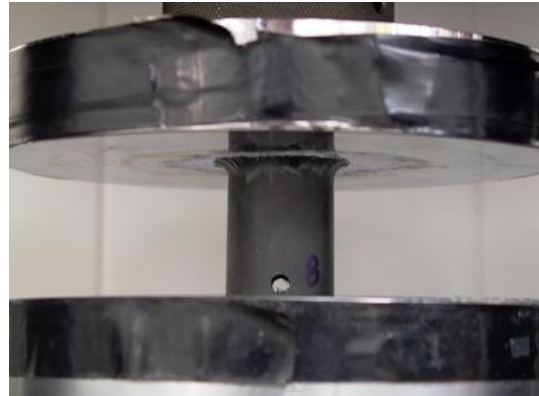
$T_1 = 12 \text{ sec}$



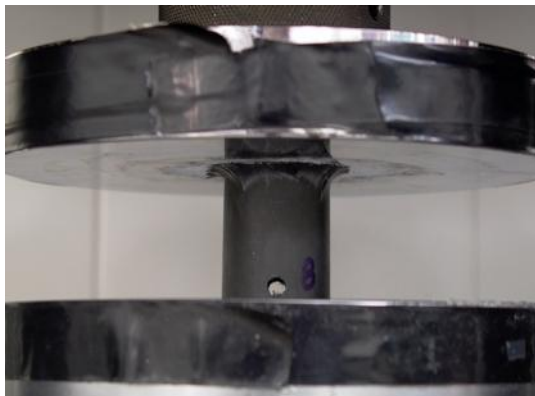
$T_2 = 24 \text{ sec}$



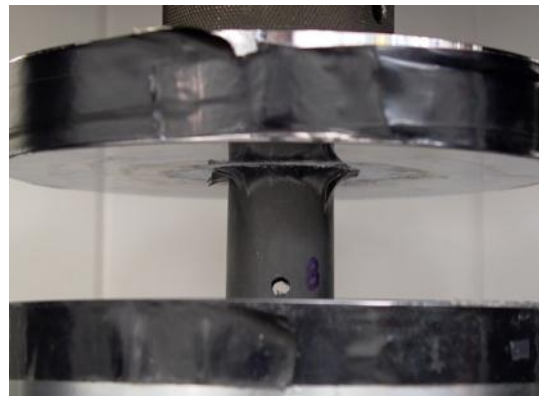
$T_3 = 36 \text{ sec}$



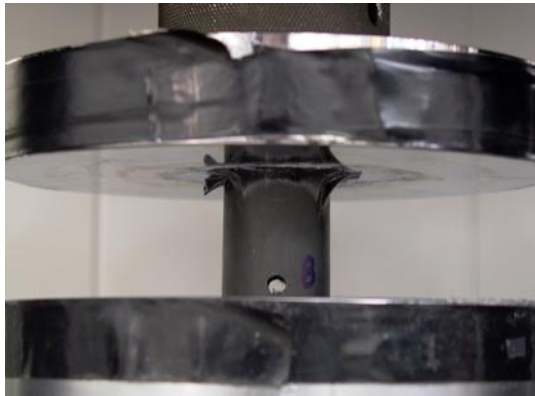
$T_4 = 48 \text{ sec}$



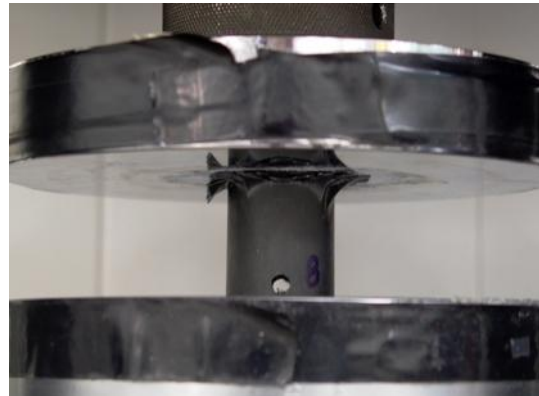
$T_5 = 60 \text{ sec}$



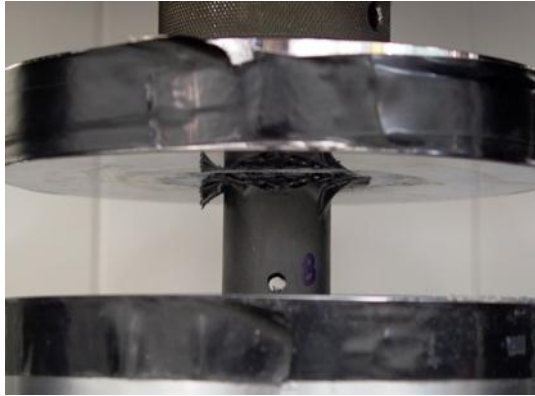
$T_6 = 72 \text{ sec}$



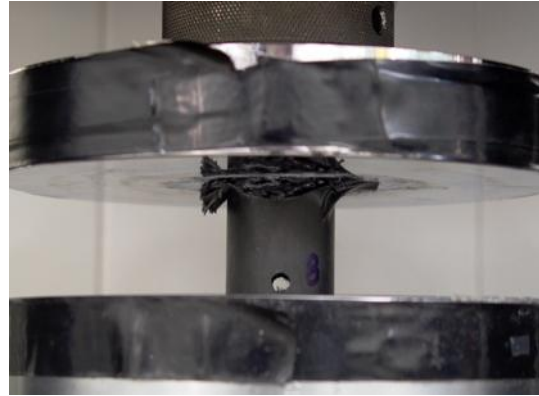
$T_7 = 84 \text{ sec}$



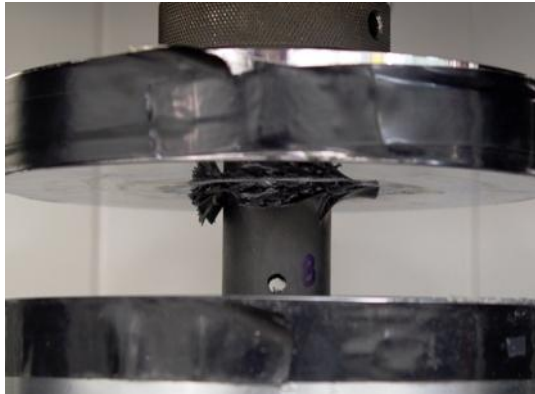
$T_8 = 96 \text{ sec}$



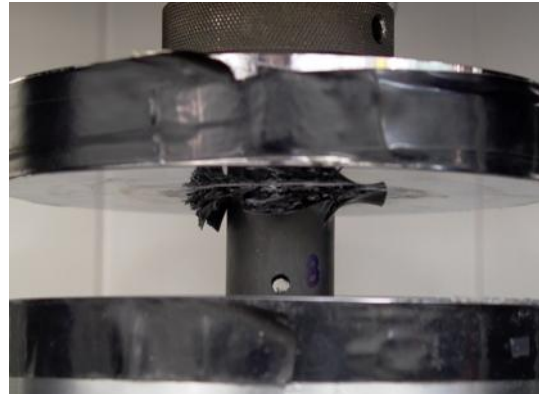
$T_9 = 108 \text{ sec}$



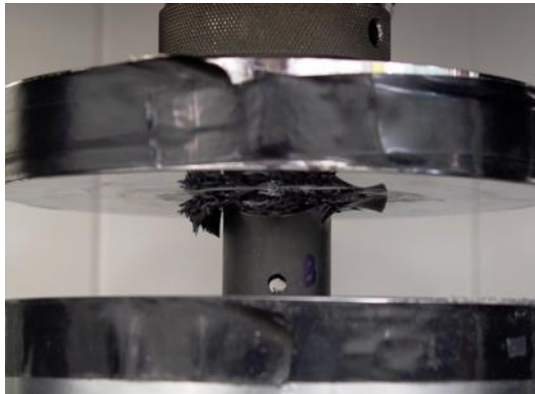
$T_{10} = 120 \text{ sec}$



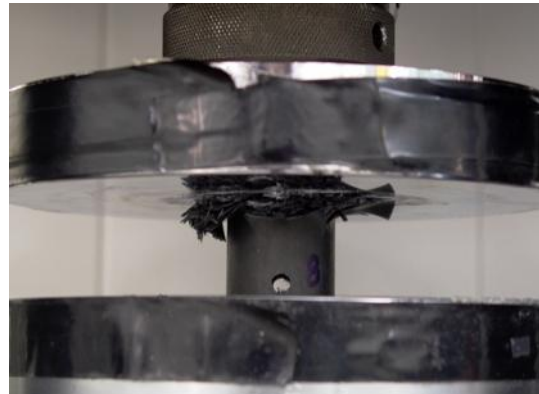
$T_{11} = 132 \text{ sec}$



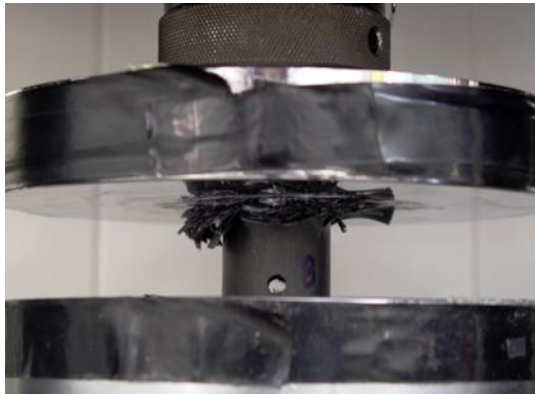
$T_{12} = 144 \text{ sec}$



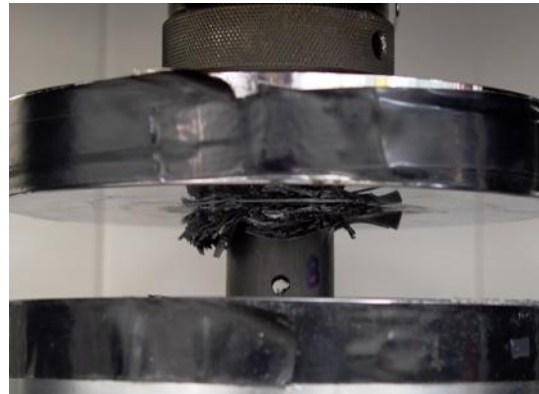
$T_{13} = 156 \text{ sec}$



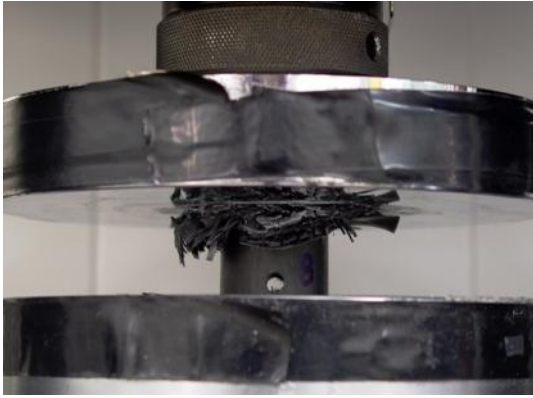
$T_{14} = 168 \text{ sec}$



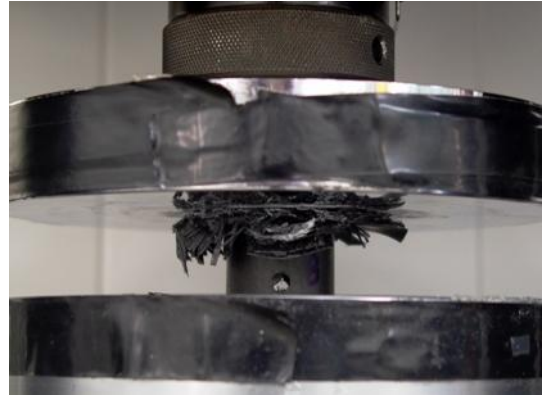
$T_{15} = 180 \text{ sec}$



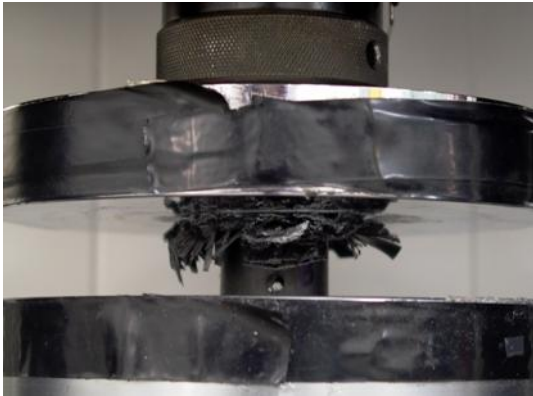
T<sub>16</sub> = 192 sec



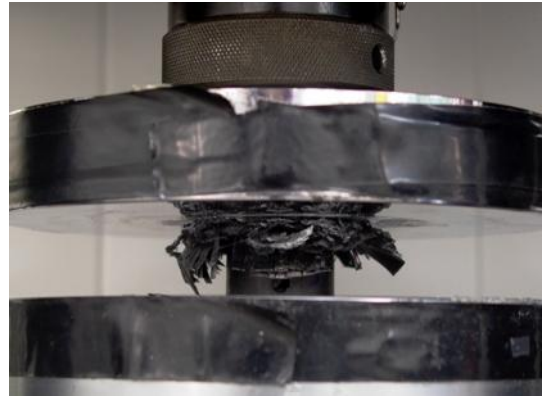
T<sub>17</sub> = 204 sec



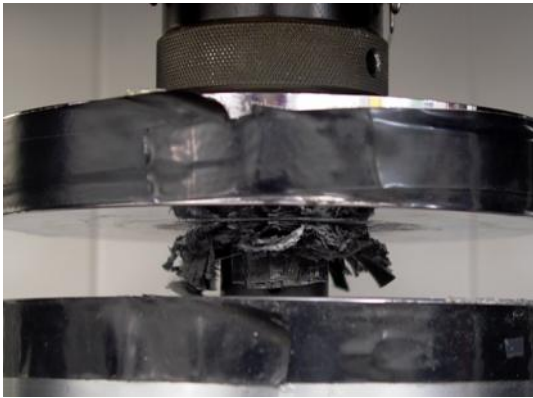
T<sub>18</sub> = 216 sec



T<sub>19</sub> = 228 sec



T<sub>20</sub> = 240 sec

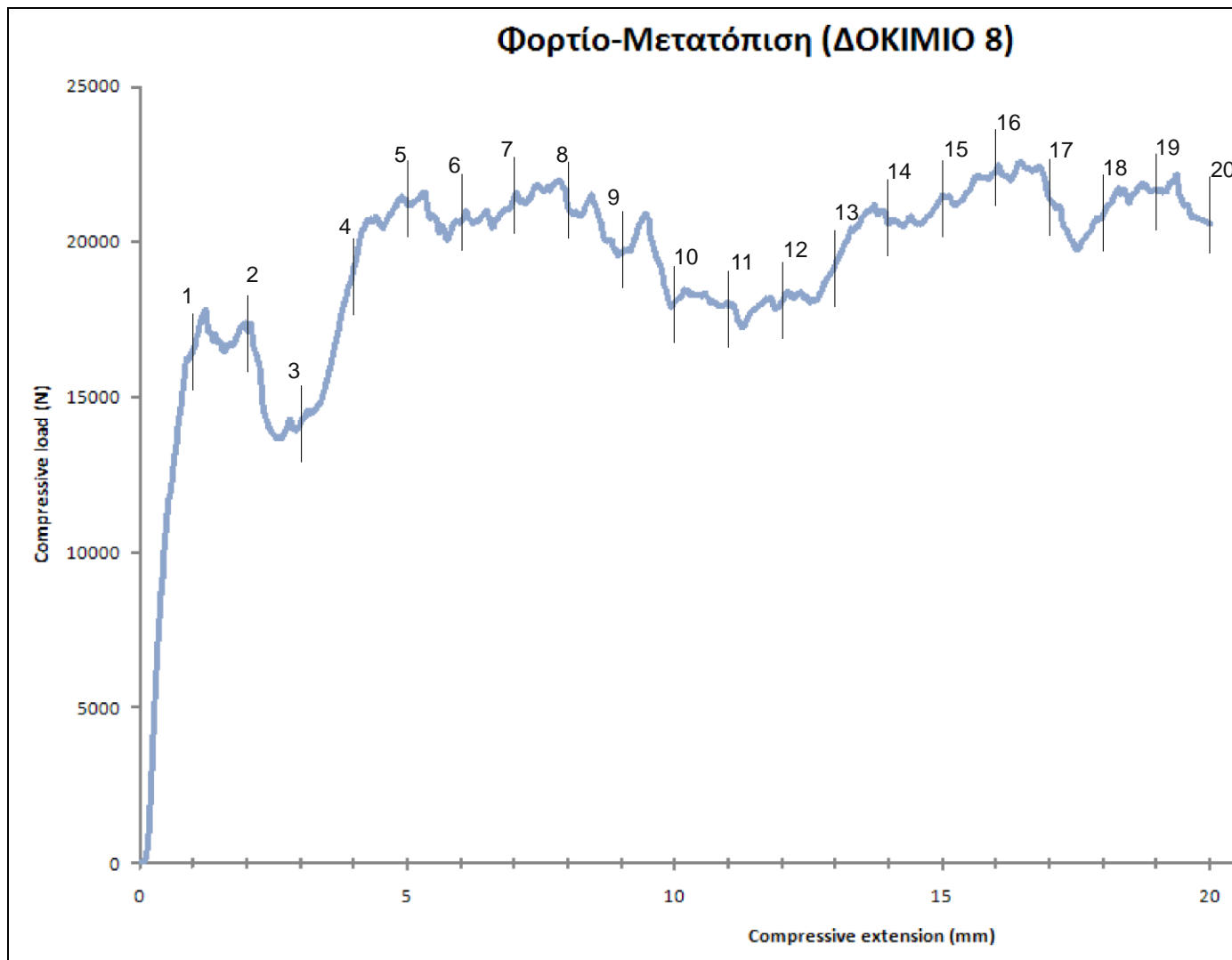


Στη συνέχεια παρατίθενται φωτογραφίες του δοκιμίου 8 μετά την καταστροφική καταπόνηση με την ακόλουθη σειρά:

- κάτοψη
- πλάγια όψη 1
- πλάγια όψη 2
- τομή

αντίστοιχα.





### Σχόλια για την διαδικασία κατάρρευσης

- Κατά την αρχική φάση της συμπίεσης υπάρχει μια απότομη αύξηση του φορτίου έως την τιμή 17809 N που εμφανίζεται για 1,6 mm.
- Το δοκίμιο αρχίζει να καταρρέει από την πλευρά του triggering, παρόλο που η ατέλεια πλέον εντοπίζεται πολύ κοντά στο κάτω άκρο του δοκιμίου.
- Εν συνεχεία η καμπύλη εμφανίζει ένα ακόμα τοπικό μέγιστο και ελάχιστο.
- Μετά από μετατόπιση περίπου 4,5 mm, η καμπύλη αρχίζει να εξομαλύνεται και η τιμή του φορτίου κυμαίνεται γύρω από την μέση τιμή των 20000 N.
- Η μέγιστη τιμή του φορτίου είναι 22590,32N και εμφανίζεται για 16,8 mm, δηλαδή προς το τέλος της δοκιμής. Η μέγιστη τιμή του φορτίου δεν εμφανίζεται στην περιοχή του triggering.
- Στο δοκίμιο 8 η συμπίεση σταματά πριν φθάσει στο ύψος της ατέλειας.
- Οι διαστρωματώσεις του υλικού αποκολλήθηκαν (delamination) και οι μισές κάμφθηκαν προς το εξωτερικό του δοκιμίου, ενώ οι υπόλοιπες συμπίεστηκαν στο εσωτερικό μέρος του κυλίνδρου.

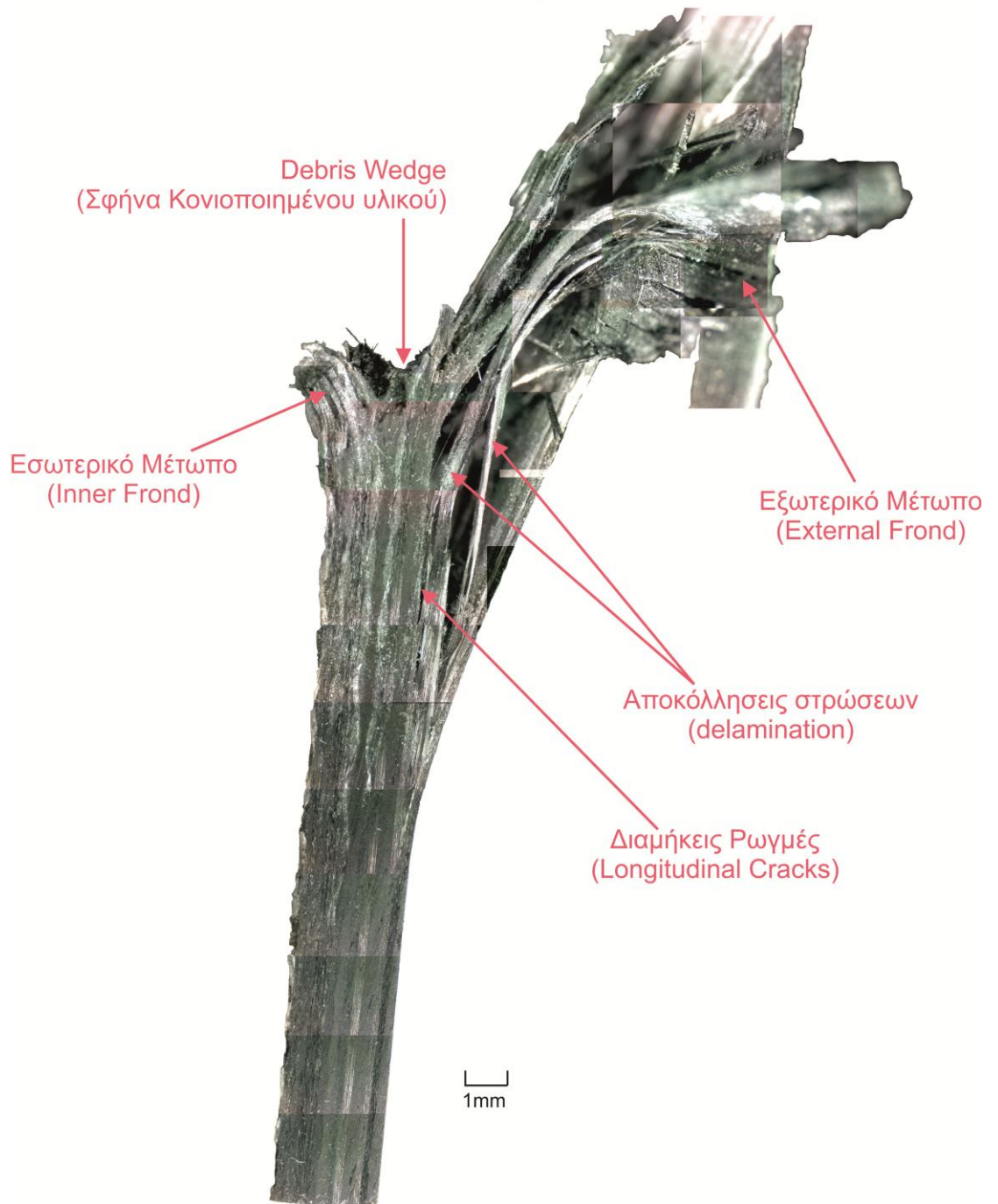
#### 6.4 ΜΙΚΡΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Τα δοκίμια μετά την καταστροφική καταπόνηση κόπηκαν σε τεταρτοκύκλια. Στη συνέχεια παρατηρήθηκαν στο μικροσκόπιο ούτως ώστε να επισημανθούν οι ατέλειες που δημιουργήθηκαν εξαιτίας του τρόπου κατάρρευσης. Το μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Insize ISM-PM200S. Χρησιμοποιήθηκε μεγέθυνση x100.



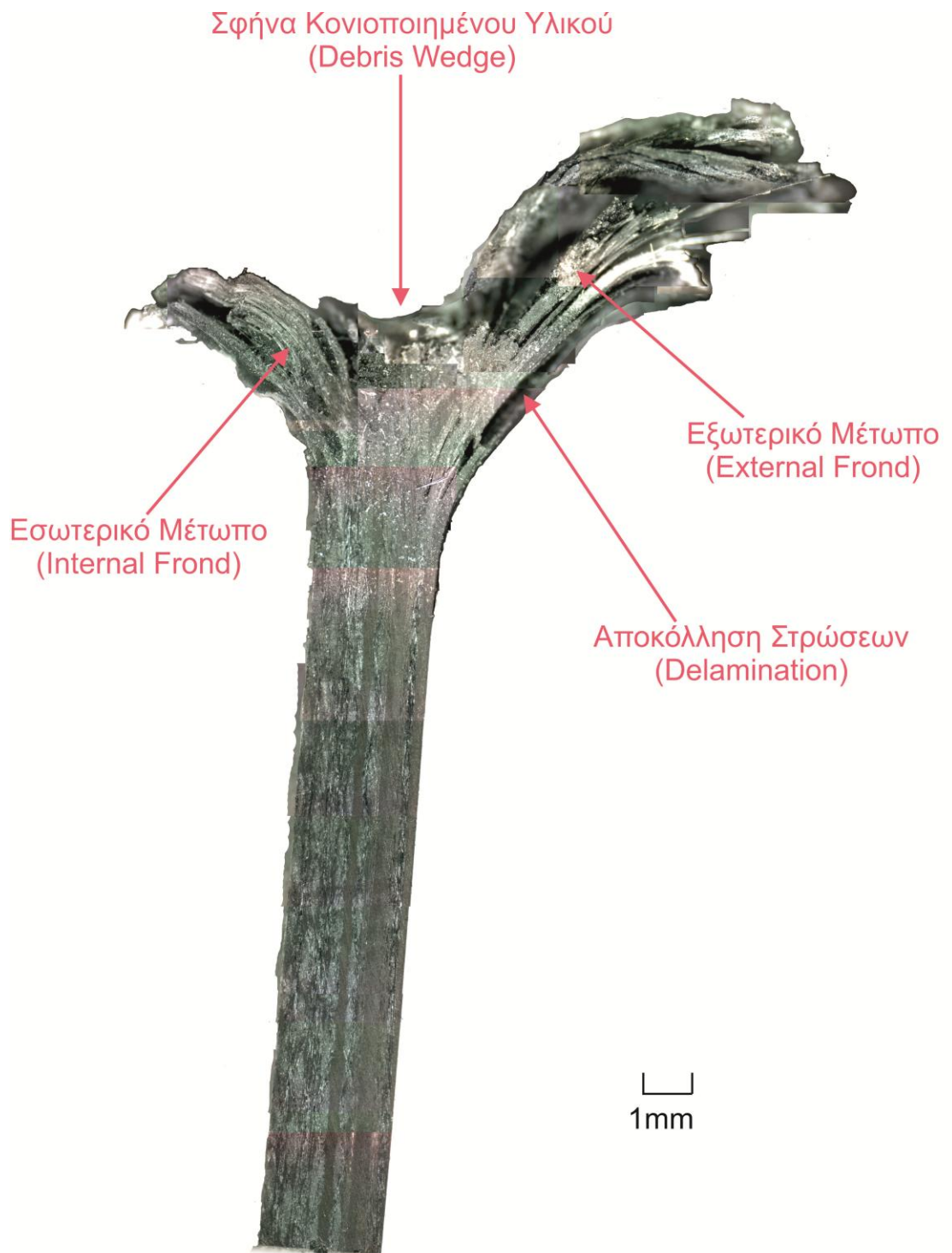
Στη συνέχεια παρατίθενται οι εικόνες από το μικροσκόπιο για κάθε δοχείο, με επισήμανση των ατελειών που παρατηρήθηκαν.

**ΔΟΚΙΜΙΟ 1**

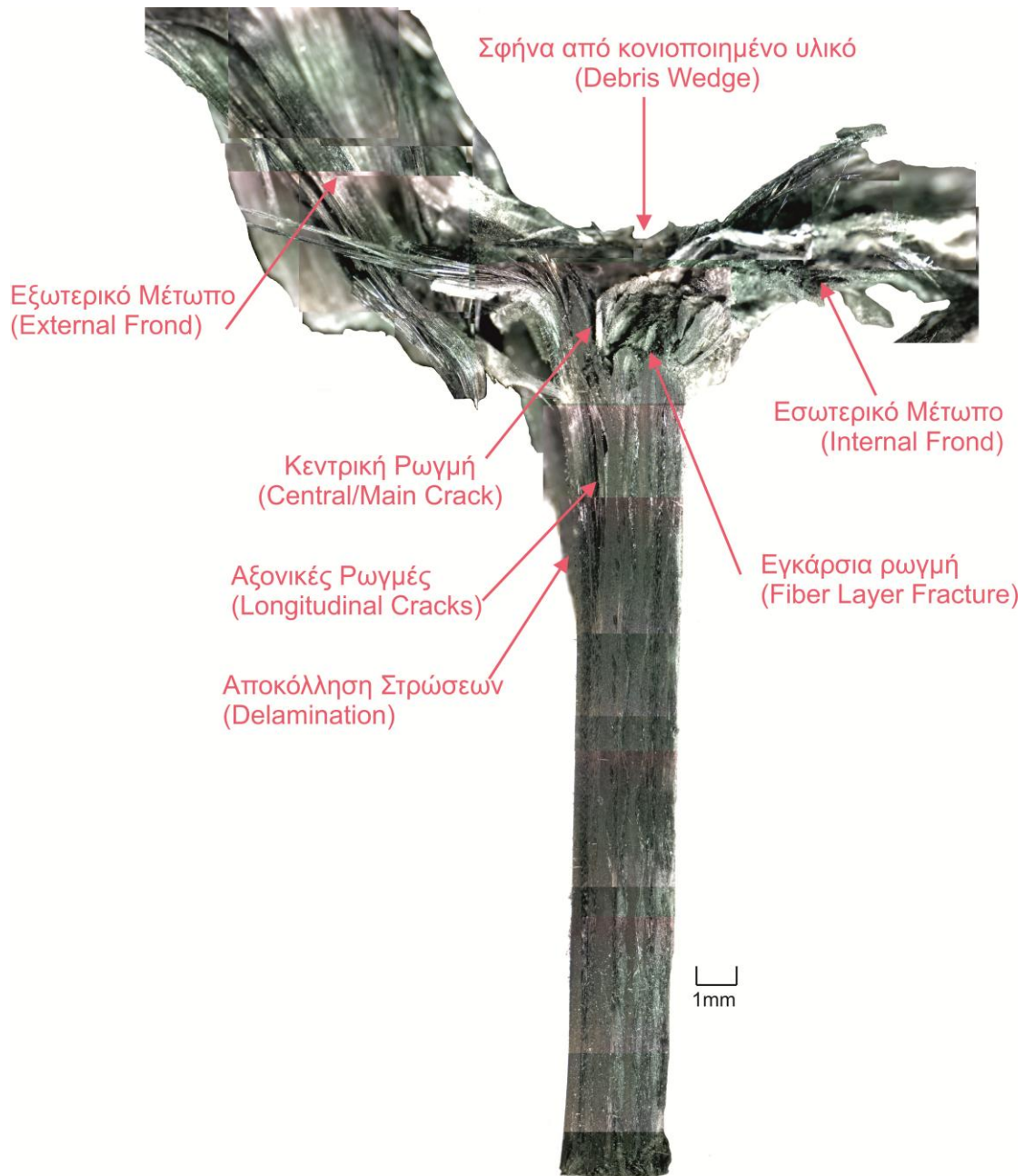




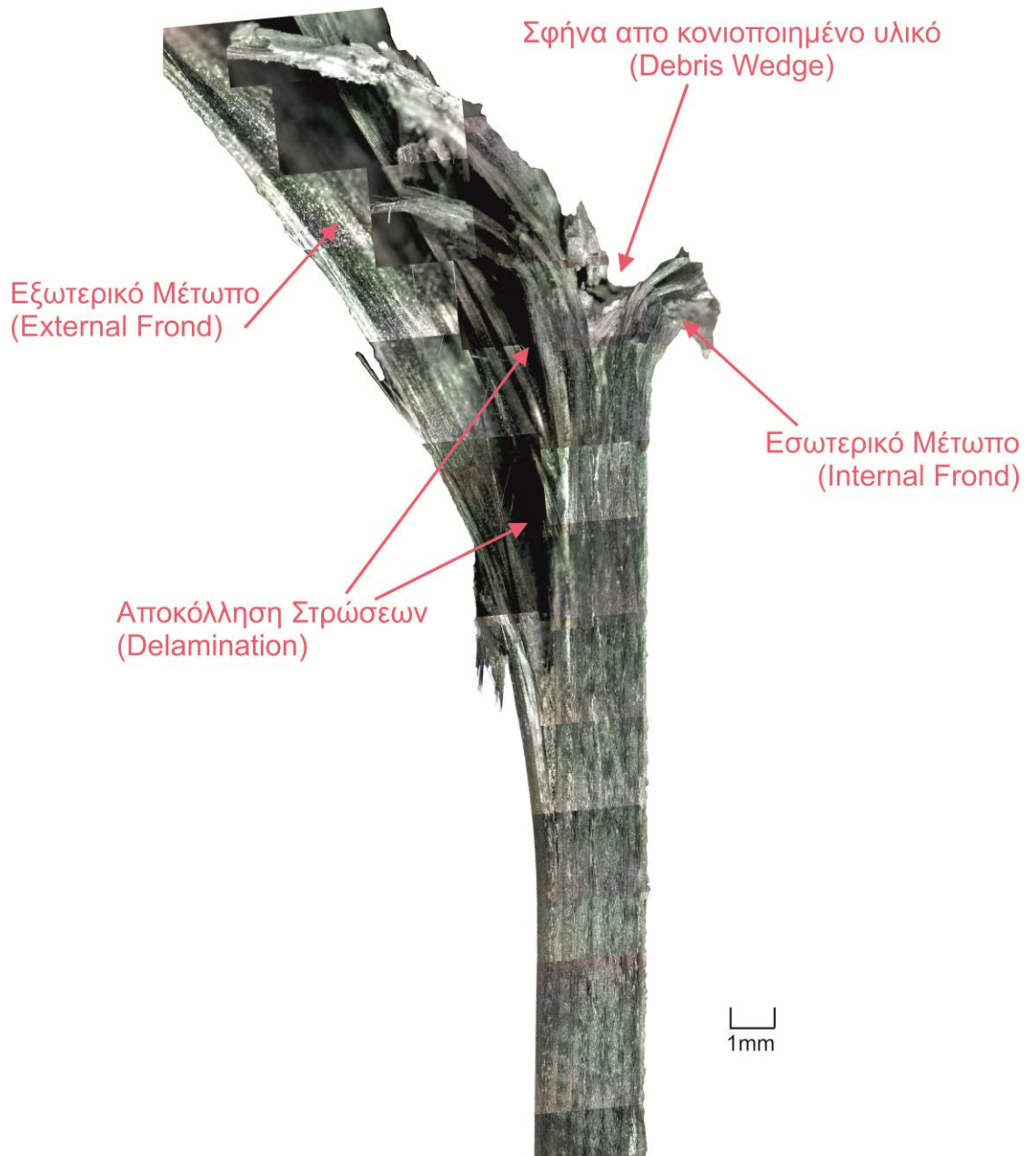
**ΔΟΚΙΜΙΟ 2**



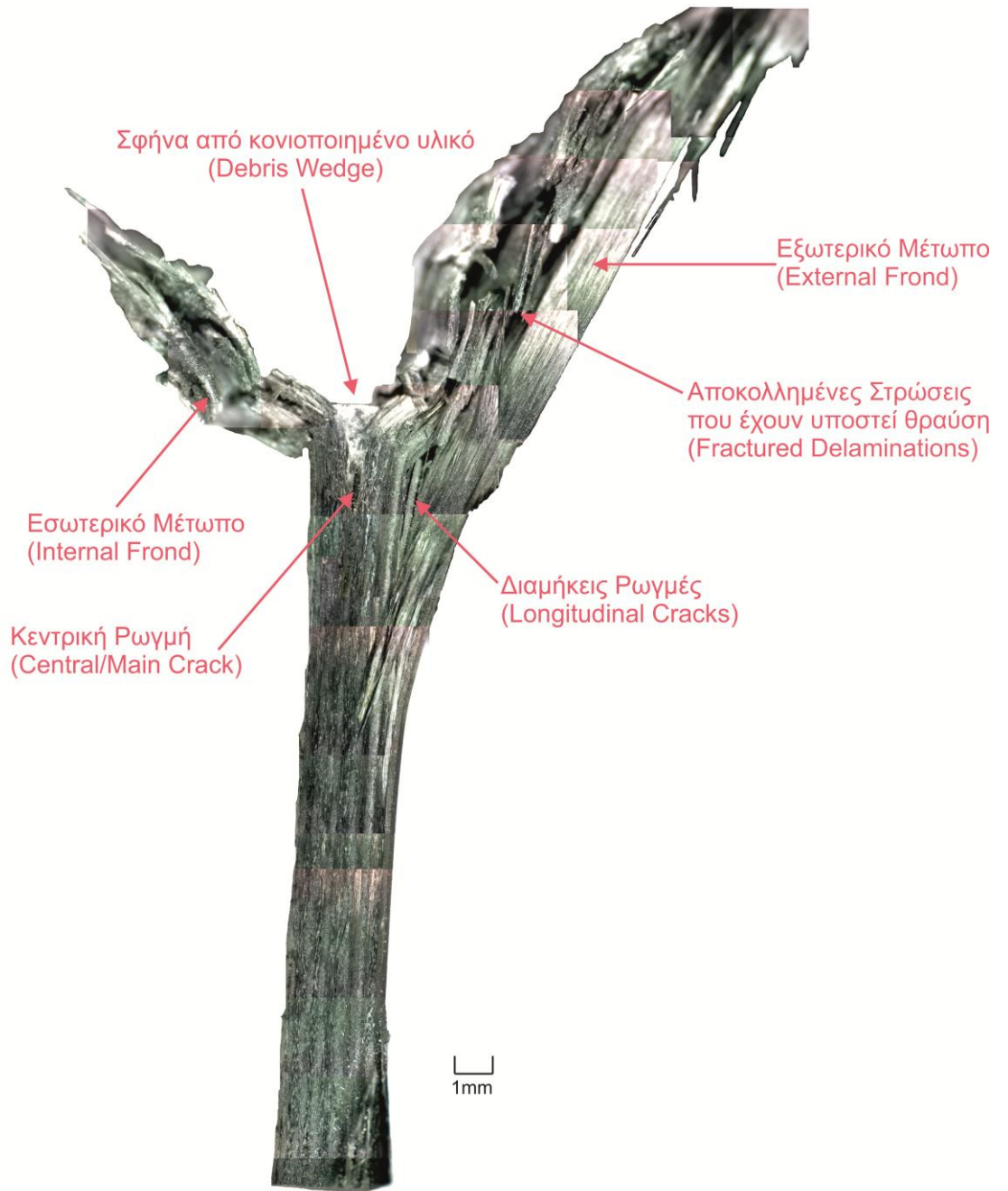
### ΔΟΚΙΜΙΟ 3



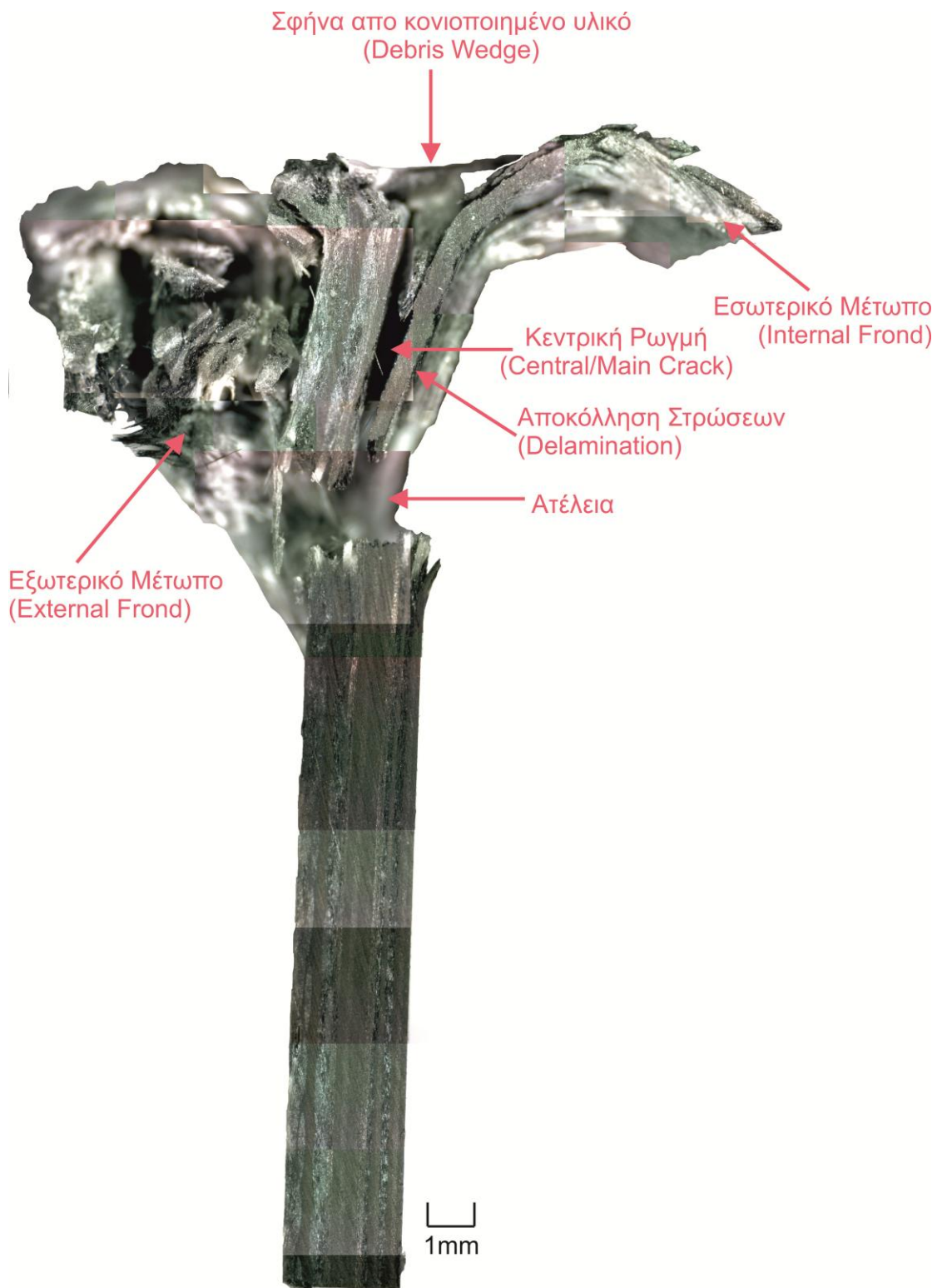
#### ΔΟΚΙΜΙΟ 4



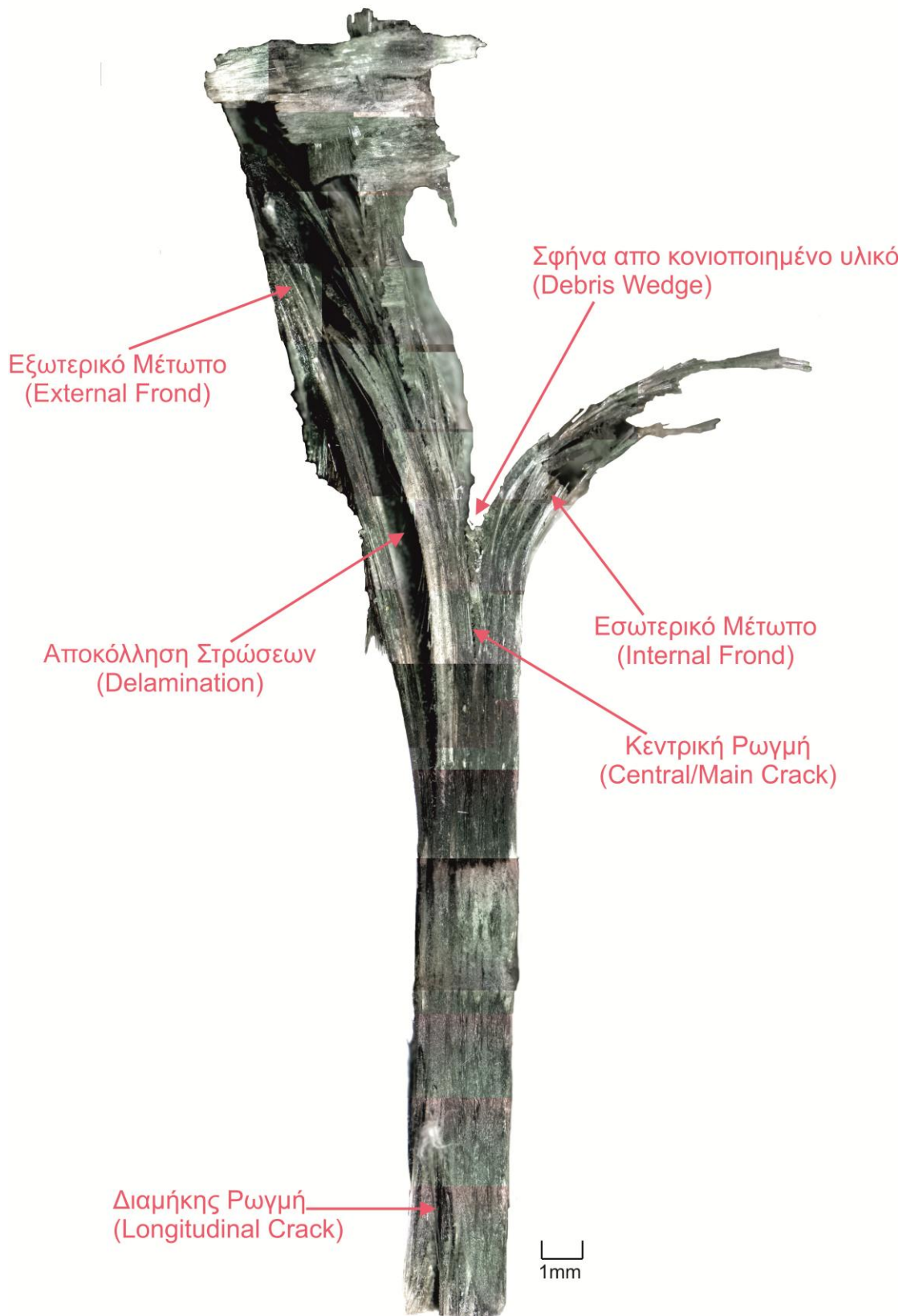
**ΔΟΚΙΜΙΟ 5**



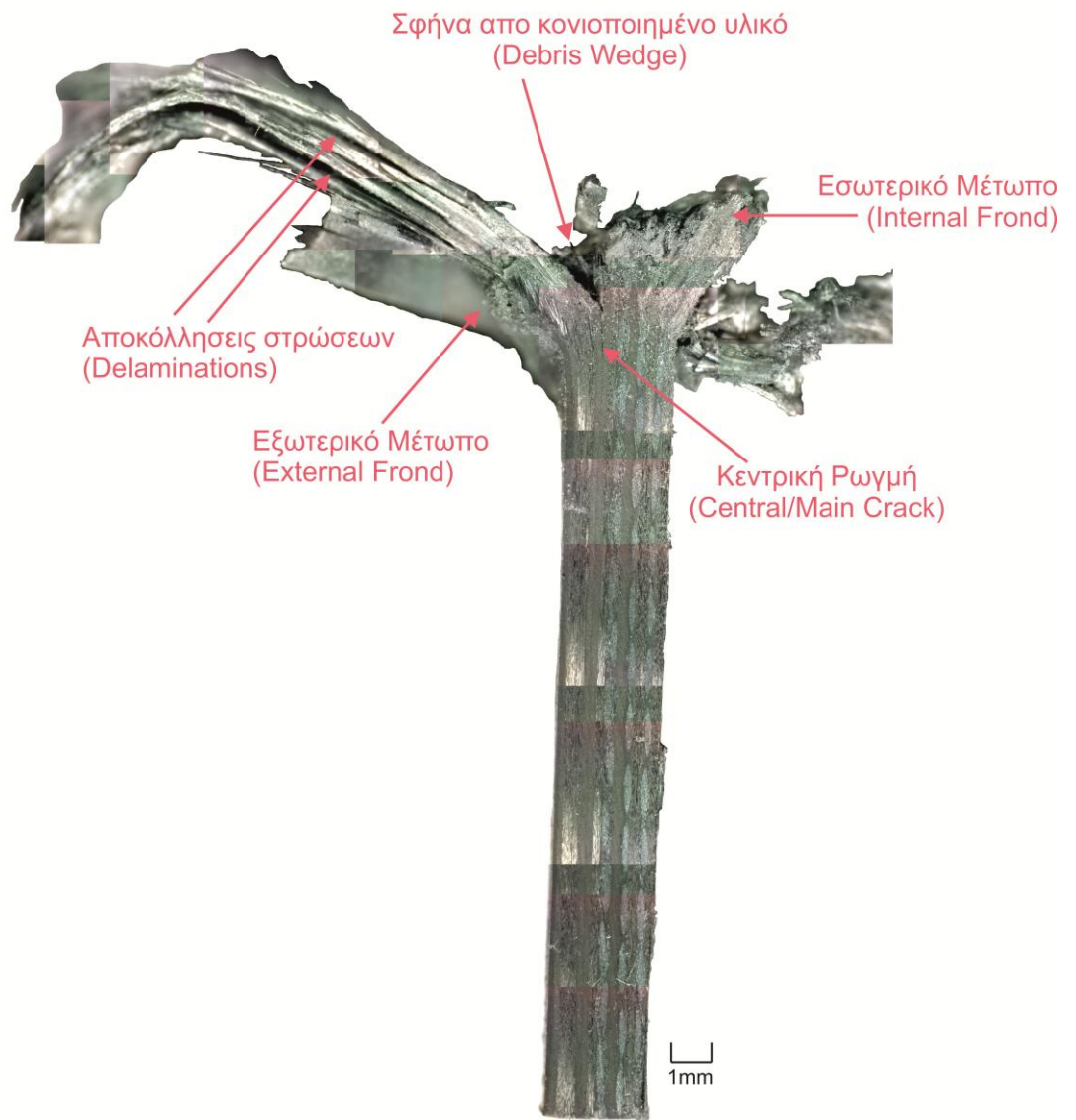
**ΔΟΚΙΜΙΟ 6**



**ΔΟΚΙΜΙΟ 7**



## ΔΟΚΙΜΙΟ 8



:

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. Παρατηρήσεις και Συμπεράσματα

### 7.1 Παρατηρήσεις σχετικά με τον μικρομηχανισμό κατάρρευσης

- Από τις διαδοχικές φωτογραφίες κατά την διάρκεια της δοκιμής παρατηρούμε μια ευκρινή ζώνη παραμόρφωσης, η οποία μετατοπίζεται κατά την αξονική κατεύθυνση προς το μέσο του (κριτήριο τερματισμού δοκιμής). Δημιουργούνται αξονικά μέτωπα που εξαπλώνονται προς τα έξω και προς τα μέσα υπό την μορφή αστοχίας «μανιταριού». Το κύριο και κοινό χαρακτηριστικό σε όλα τα δοκίμια μας είναι η δημιουργία μιας δακτυλιοειδούς σφήνας από κονιοποιημένο υλικό (θραυσμένες ίνες άνθρακα αναμειγμένες με ρητίνη), η οποία πιέζει αξονικά προς τα κάτω. Στα δοκίμια 3,5,6,7,8 στο άκρο της σφήνας δημιουργείται κεντρική ρωγμή περίπου στο μέσο του τοιχώματος του σωλήνα. Η κεντρική ρωγμή έχει πολύ έντονη μορφή μόνο στο δοκίμιο 6. Στα δοκίμια 1,2,4 δεν είναι εμφανής η παρουσία κεντρικής ρωγμής.
- Σχηματίζεται μια αρχική ζώνη θραύσης από την περαιτέρω διεύθυνση της σφήνας, η οποία οδηγεί σε αποκόλληση στρώσεων. Η αποκόλληση των στρώσεων είναι αποτέλεσμα κυρίως της εξάπλωσης της σφήνας ακτινικά προς τα μέσα και προς τα έξω. Σχηματίζονται έτσι δύο μέτωπα: το εξωτερικό (external frond) και το εσωτερικό (internal frond), τα οποία είναι σχεδόν ισοπαχή.
- Τα δύο μέτωπα ανιστέκονται στο εφαρμοζόμενο φορτίο έως μια κρίσιμη τιμή του και τελικά κάμπτονται και αναδιπλούνται (bending and curling) προς τα κάτω. Αυτό το φαινόμενο συνοδεύεται από εκτενείς αποκολλήσεις στρώσεων (delaminations), και θραύση ινών αξονικά και εγκάρσια.
- Έχουμε αστοχία λόγω κάμψης μεμονωμένων στρώσεων λόγω μικρής ακτίνας καμπυλότητας στα όρια της διαστρωματικής αποκόλλησης.
- Συνήθως όταν υπάρχουν περισσότερες μονοδιευθυντικές στρώσεις έχουμε περισσότερες διαμήκεις διαρρηγματώσεις απ' ό,τι εγκάρσιες.
- Η ολίσθηση των θραυσμένων μετώπων πάνω στην πλάκα της πρέσας πραγματοποιείται κάτω από συνθήκες μεγάλης αντίστασης λόγω τριβής.
- Επίσης έχουμε αντίσταση λόγω τριβής εξαιτίας της σχεικής ολίσθησης μεταξύ των αποκολλημένων στρώσεων.
- Η διαρρηγμάτωση (cracking) εξαπλώνεται στα καμθέντα μέτωπα.



## 7.2. Επίδραση triggering και ατελειών

Στον συγκεντρωτικό πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται τα δοκίμια με φθίνουσα σειρά βάσει του μέγιστου φορτίου που παρουσιάστηκε σε κάθε περίπτωση.

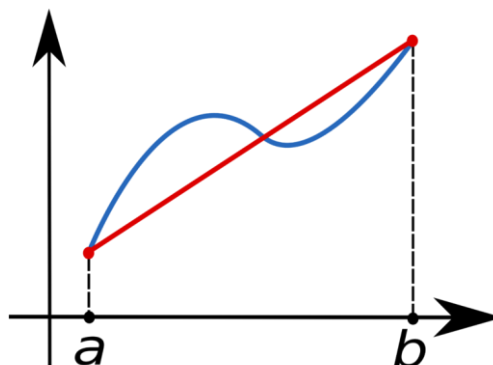
α/α δοκιμίου	Μέγιστο φορτίο N	Αντοχή διαρροής (Yield strength) (Mpa)
1	74605	345
2	32309	148
6	25275	72
7	23678	96
8	22590	57
4	21571	70
5	21383	53
3	21034	71

Το πρώτο προφανές συμπέρασμα είναι ότι το triggering επιτελεί τον σκοπό του και μειώνει το μέγιστο φορτίο έως και  $3\frac{1}{2}$  φορές (δοκίμιο 4). Ο τρόπος κατάρρευσης είναι ο I (Mode I), δηλαδή έχουμε προοδευτική θραύση με μικροθρυμματισμό του σύνθετου υλικού, που σχετίζεται με το μεγάλο ποσό της ενέργειας θλίψης.

Η ταξινόμηση των φορτίων δεν μας δίνει κάποια συσχέτιση μεταξύ της θέσης της σπής και του αναπτυσσόμενου φορτίου. Ακόμα και το όγδοο δοκίμιο, στο οποίο η ατέλεια εντοπιζόταν σχεδόν στην βάση του κατέρρευσε από την πλευρά του triggering χωρίς κάποια ιδιαίτερη διαφοροποίηση στο αναπτυσσόμενο φορτίο.

Υπολογίστηκε προσεγγιστικά από τα διαγράμματα η απορροφημένη ενέργεια, η οποία είναι το εμβαδό κάτω από την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης χρησιμοποιώντας τον κανόνα του τραπεζίου με διαμερίσεις 1mm.

Κανόνας τραπεζίου



$$\int_a^b f(x)dx = (b - a) \cdot \frac{f(a) + f(b)}{2}$$

Παρατίθεται ο πίνακας των αποτελεσμάτων.

α/α ΔΟΚΙΜΙΟ	Απορροφημένη ενέργεια ( $N \cdot mm$ )
1	355468
2	361345
3	331345
4	334930
5	327570
6	399930
7	396607
8	375284

Παρατηρούμε ότι η συνολικά απορροφημένη ενέργεια δεν έχει μεγάλη διαφοροποίηση. Εντούτοις αν λάβουμε υπόψη ότι το μέγιστο φορτίο που εμφανίζεται στην ελαστική περιοχή είναι πολύ μεγαλύτερο στο πρώτο δοκίμιο, αντιλαμβανόμαστε ότι τα δοκίμια που φέρουν triggering απορροφούν περισσότερη ενέργεια αφού έχει αρχίσει η κατάρρευση με μικρότερο μέγιστο φορτίο, όπως αναμέναμε.

Μεταξύ των δύο μηχανισμών (triggering και ατελειών) επικρατεί το triggering στην κατάρρευση. Στην περιοχή που εντοπιζόταν κάθε φορά η ατέλεια δεν εντοπίστηκε κάποιο κοινό χαρακτηριστικό στις καμπύλες φορτίου-μετατόπισης των 8 δοκιμίων.

Ακόμα και όταν η κατάρρευση έχει σταματήσει πριν η πλάκα συναντήσει την ατέλεια το φορτίο κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα.

## Βιβλιογραφία

- F.C. Campell: "Manufacturing Processes for Advanced Composites"
- M.A. Jiménez, A. Miravete, E. Larrodé, D. Revuelta: "Effect of trigger geometry on energy absorption in composite profiles"
- A.Linsdtström, S Hallström: "Energy absorption of SMC/balsa sandwich panels with geometrical triggering features"
- A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, G.A. Demosthenous & M.A. Ioannidis: "Analysis of Failure Mechanisms Observed in Axial Collapse of Thin-Walled Circular Fibreglass Composite Tubes"
- A.G. Mamalis, M. Robinson, D.E. Manolakos, G.A. Demosthenous. M.B. Ioannidis & J. Carruthers: "Crashworthy capability of composite material structures"
- Todd Johnson "The Evolution of Lightweight Composite Materials" About.com Guide
- A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, M. B. Ioannidis, D. P. Papapostolou : "Crashworthy characteristics of axially thin-walled square CFRP composite tubes experimental", Composite Structures 63 (2004), p.p. 347-360.
- A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, M. B. Ioannidis, D. P. Papapostolou : "On the response of thin-walled CFRP composite tubular components subjected to static and dynamic axial compressive loading experimental", Composite Structures 69 (2005), p.p. 407-420.
- A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, M. B. Ioannidis, D. P. Papapostolou : "The static and dynamic axial collapse of CFRP square tubes, finite element modelling", Composite Structures 74 (2006), p.p. 213-225.
- A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, M. B. Ioannidis, D. G. Chronopoulos, P. K. Kostazos: "On the crashworthiness of composite rectangular thin-walled tubes internally reinforced with aluminium or polymeric foams experimental and numerical simulation", Composite Structures 89 (2009), p.p.416-423.
- Chang F.K. and Chang K.Y: "A progressive damage model for laminated composites containing stress concentrations", Composite Materials 21 (1987), p.p. 834-855.
- Tsai S.W. and Wu E.M.: "A general theory of strength for anisotropic materials, Composite Materials 5 (1971), p.p. 58-80.
- Chen W.H. and Lee Y.J: "Failure process and pin-bearing strength of laminated composites at elevated temperatures", Reinforced Plastics and Composites 11 (1992), p.p. 743-771.
- Jiancheng Huang, Xinwei Wang: "Numerical and experimental investigations on the axial crushing response of composite tubes", Composite Structures 91 (2009), p.p. 222-228.
- F. C. Campbell : "Manufacturing Processes for Advanced Composites", Elsevier 2004, p.p. 3-103, 400-437
- Tobias G. Wouters: "Leading – edge composite material research", Nova science Publishers 2008, p.p. 25-72.
- Daniel Gay, Suong V. Hoa, Stephen W. Tsai: "Composite materials, Design and applications", CRC Press 2003, p.p. 14-76, 141-340.

- Isaac M. Daniel, Ori Ishai: "Engineering Mechanics of composite materials", Oxford University Press 1994, p.p. 3-36.
- Lawrence C. Bank: "Composites for construction, structural design with FRP materials", Wiley 2006, p.p. 1-129.
- C. S. Lee, W. Hwang, H. C. Park, K. S. Han: "Failure of carbon/epoxy composite tubes under combined axial and torsional loading, Fracture morphology and failure mechanism", Composites Science and Technology 59 (1999), .p. 1789-1804.
- Deborah D. L. Chung: " Carbon Fiber Composites", Butterworth – Heinemann 1994, p.p. 65-84, 145-176.
- H. Hamada, S. Ramakrishna, H. Satoh: "Crushing mechanism of carbon fibre/PEEK composite tubes", Composites 26 (1995), p.p. 749-755.
- Chiara Bisagni: "Dynamic buckling of fiber composite shells under impulsive axial compression", Thin-Walled Structures 43 (2005), p.p. 499-514.
- Richard Degenhardt, Alexander Kling, Arne Bethge, Jana Orf, Luise Karger, Rolf Zimmermann, Klaus Rohwer, Adriano Calvi: "Investigations on imperfection sensitivity and deduction of improved knock-down factors for unstiffened CFRP cylindrical shells", Composite Structures 92 (2010), p.p. 1939-1946.
- Stanislaw Ochelski, Pawel Gotowicki: "Experimental assessment of energy absorption capability of carbon-epoxy and glass-epoxy composites", Composite Structures 87 (2009), pp. 215-224.
- Chou S.C., Orringer O., Rainey J.H.: "Post-failure behavior of laminates I-No stress concentration", Composite Materials 10 (1976), p.p. 371-381.
- Chou S.C., Orringer O. and Rainey J.H.: "Post-failure behavior of laminates II-Stress concentration", Composite Materials 11 (1976), p.p. 71-78.
- Hashin Z.: "Failure criteria for unidirectional fibre composites", Applied Mechanics 47 (1980), p.p. 329-334.
- Chen W.H. and Lee S.S.: "Numerical and experimental failure analysis of composite lamines with bolted joints under bending loads", Journal of Composite Materials 29 (1995), p.p. 15-36
- Peter Morgan: "Carbon Fibers and their Composites", Taylor and Francis 2005, p.p. 1-59.
- Valery V. Vasiliev, Evgeny V. Morozov: " Advanced Mechanics of composite
- Kirk, Othmer: "Encyclopedia of chemical technology, Carbon and Graphite fibers to chlorocarbons and chlorohydrocarbons", Volume 5, Watcher, .p. 1-9.
- A. Mortensen: "Concise encyclopedia of composite materials", Elsevier 2007, p.p. 85-96, 111-126.
- P. K. Mallick: "Fiber – reinforced composites, materials, manufacturing and design", CRC Press 2007, p.p. 47-376.
- <http://www.aerovac.com/>
- <http://www.ambercomposites.com/>
- <http://www.advanced-composites.co.uk/>
- <http://www.torayusa.com/>