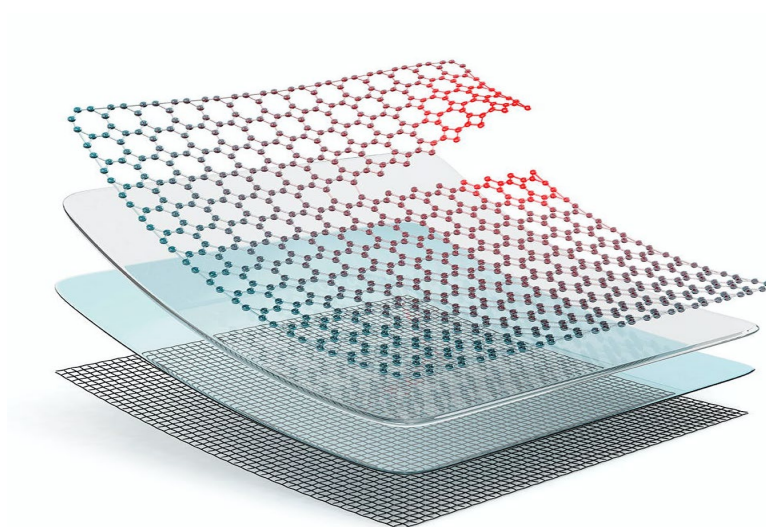




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



**Μελέτη και προδιαγραφές του τρόπου εφαρμογής  
των μηχανικών δοκιμών σε σύνθετα υλικά**

**ΓΚΕΓΚΑ ΓΙΩΡΓΟ**

**A.M. 6712**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**  
**Δρ. ΣΠΥΡΙΔΩΝ ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ**  
Ακαδημαϊκός Υπότροφος

**ΠΑΤΡΑ, ΜΑΙΟΣ 2022**







## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με τίτλο «*Μελέτη και προδιαγραφές τρόπων εφαρμογής των μηχανικών δοκιμών στα σύνθετα υλικά*» εκπονήθηκε στα πλαίσια της ολοκλήρωσης των προϋποθέσεων για την λήψη του πτυχίου μου από τα Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών. Σκοπός μου κατά την διάρκεια της συγγραφής της είναι βασική μου επιδίωξη είναι να εμβαθύνω τις γνώσεις μου σε αυτό και να κατανοήσω το περιεχόμενο να καλύπτει όχι μόνο το θέμα που αναλύεται, αλλά και τις προσδοκίες του καθηγητού μου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Γραμματικόπουλο Σπυρίδων για την εμπιστοσύνη που έδειξε αναθέτοντάς την συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία, τις γνώσεις που μετέφερε, την καθοδήγηση ,την συνεργασία και υπομονή που έδειξε καθ' όλη την διάρκεια υλοποίησής της. Επί προσθέτως δε θα μπορούσα να παραλείψω την μητέρα μου, οι οποία με στήριξε σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου σε πολλούς παράγοντες, με πιο σημαντικό τον οικονομικό πέρα από τις καθημερινές δυσκολίες και δεύτερον την ψυχολογική υποστήριξη, επιτυγχάνοντας έτσι την καλύτερη δυνατή μόρφωσή μου.

Τέλος Θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της Τριμελούς επιτροπής τους Καθηγητές κ. Μπατσούλα και κ. Τσίρκα.



**Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή:** Ο κάτωθι υπογεγραμμένος σπουδαστής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.  
Ο σπουδαστής

(Όνοματεπώνυμο)

.....

(Υπογραφή)





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα σύνθετα υλικά προχωρούν στην αποδοτικότητα του προϊόντος, τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας και την ανάπτυξη ανώτερων ειδικών ιδιοτήτων. Υπάρχουν υψηλές απαιτήσεις στις εφαρμογές τους σε κατασκευές μεταφοράς φορτίου, στην αεροδιαστημική, τις ανεμογεννήτριες, τις μεταφορές, τον ιατρικό εξοπλισμό και ούτω καθεξής. Έτσι, η ισχυρή και αξιόπιστη μη καταστροφική και καταστροφική δοκιμή των σύνθετων υλικών είναι απαραίτητη για τη μείωση των ανησυχιών για την ασφάλεια και το κόστος συντήρησης. Έχουν υπάρξει διάφορες καταστροφικές και μη καταστροφικές μέθοδοι δοκιμών που βασίζονται σε διαφορετικές αρχές για τη διασφάλιση της ποιότητας κατά τη διάρκεια ολόκληρου του κύκλου ζωής ενός σύνθετου προϊόντος.

Η παρούσα Πτυχιακή εξετάζει τις πιο καθιερωμένες τεχνικές δοκιμών για τον εντοπισμό και την αξιολόγηση ελαττωμάτων και εξέλιξης ζημιών σε σύνθετα υλικά. Οι καταστροφικές μέθοδοι δοκιμής περιλαμβάνουν τεχνικές όπως δοκιμή τάσης, διάτμησης, κάμψης και θλίψης σε σύνθετα υλικά. Ορισμένες από αυτές τις δοκιμές περιλαμβάνουν διαφορετικές παραλλαγές και μηχανήματα στα οποία εφαρμόζονται συγκεκριμένες μέθοδοι, όπως στην τάση, μπορούμε να συμπεριλάβουμε δύο τρόπους δοκιμής σύνθετων υλικών είτε με υδραυλικό μηχάνημα είτε με μηχανήματα βιδωτού τύπου (screw jack), η κάμψη μπορεί να γίνει με κάμψη 4 σημείων ή κάμψη 3 σημείων.

Στη συνέχεια εξετάζουμε τις μη καταστροφικές μεθόδους που ονομάζονται αλλιώς μέθοδοι «NDT» Αυτές περιλαμβάνουν ακουστική εκπομπή, δοκιμή υπερήχων, υπέρυθη θερμογραφία, δοκιμή terahertz, διάτμηση, συσχέτιση ψηφιακής εικόνας, καθώς και απεικόνιση ακτινών Χ και νετρονίων. Για κάθε μη καταστροφική τεχνική δοκιμών, καλύπτουμε ένα σύντομο ιστορικό υπόβαθρο, αρχές, τυπικές πρακτικές, εξοπλισμό και εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούνται για σύνθετη έρευνα. Επίσης, συγκρίνουμε και συζητάμε τα οφέλη και τους περιορισμούς τους και συνοψίζουμε περαιτέρω τις δυνατότητες και τις εφαρμογές τους σε σύνθετες κατασκευές. Για όλες αυτές τις μεθόδους υπάρχουν πολλές και σημαντικές προδιαγραφές που μας καθοδηγούν στην εφαρμογή του σωστού τρόπου πειραματισμού και προετοιμασίας του δείγματος. Αυτές οι προδιαγραφές προέρχονται από τα ASTM, ISO, GRAC και άλλα.



## ABSTRACT

Composite materials or structures are advancing in product efficiency, cost-effectiveness, and the development of superior specific properties. There are increasing demands in their applications to load-carrying structures in aerospace, wind turbines, transportation, medical equipment and so on. Thus, robust, and reliable non-destructive and destructive testing of composites is essential to reduce safety concerns and maintenance costs. There have been various destructive and non-destructive testing methods built upon different principles for quality assurance during the whole lifecycle of a composite.

This article reviews the most established testing techniques for detection and evaluation of defects and damage evolution in composites. The destructive test methods include techniques such as Tension, Shear, flexure, and compression testing on composites. Some of these tests include different variations and machinery in which methods are applied such as in Tension we can include two ways of testing composites either with a hydraulics machine or with a screw-jack type of machinery, flexure can be done with 4-point bending or 3-point bending.

Afterwards we look upon the Non-destructive methods witch otherwise called «NDT» methods These include acoustic emission, ultrasonic testing, infrared thermography, terahertz testing, shearography testing, digital image correlation, as well as X-ray and neutron imaging. For each non-destructive testing technique, we cover a brief historical background, principles, standard practices, equipment, and facilities used for composite research. We also compare and discuss their benefits and limitations and further summarize their capabilities and applications to composite structures. For all these methods there are numerous and important specifications which guide us in applying the right way of experimentation and specimen preparation. These specifications are from the ASTM, ISO, GRAC and others.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	V
ΠΕΡΙΛΙΨΗ.....	XI
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Ορισμός.....	1
1.2 Κατηγορίες συνθέτων υλικών.....	1
1.3 Κατηγορίες Ενίσχυσης με ίνες.....	2
1.4 Μορφή πολύ-στρωματικών σύνθετων.....	2
1.5 Προοπτικές μηχανικών δοκιμών.....	3
1.5.1 Γενικοί στόχοι των μηχανικών δοκιμών.....	3
1.5.2 Μηχανικές ιδιότητες σύνθετων υλικών.....	5
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ.....</b>	<b>7</b>
2.1 Εισαγωγή στον εφελκυσμό.....	7
2.2 Απόκτηση δεδομένων.....	11
2.3 Λαβές.....	11
2.4 Λεπτομέρειες δειγμάτων.....	12
2.4.1 Γενικά.....	12
2.4.2 Διαχωρίστηκα φύλλα σύσφιξης (end-tabs).....	14
2.5 Εξοπλισμός δοκιμής εφελκυσμού.....	15
2.6 Διαδικασία δοκιμής εφελκυσμού.....	17
2.7 Πειραματικά Δεδομένα.....	18
2.7.1 Καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης.....	18
2.7.2 Μετρό ελαστικότητας.....	18
2.7.3 Λόγος Poisson.....	19
2.7.4 Αστοχία.....	19
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΔΙΑΤΜΗΣΗ .....</b>	<b>23</b>
3.1 Εισαγωγή.....	23
3.2 Μέθοδοι Δοκιμών.....	23
3.2.1 Μονό-αξονική φόρτιση ενός φύλλου σε γωνιά $\pm 45^\circ$ .....	23
3.2.2 Μονό-αξονική φόρτιση ενός φύλλου σε γωνιά $10^\circ$ .....	27
3.2.3 Δοκιμές διάτμησης με σφικτήρες σε παράλληλη διάταξη (RAIL SHEAR TEST) ...	29

3.2.4 Δοκιμές διάτμησης δοκού με εγκοπές V (ή Iosipescu).....	32
3.2.5 Στρέψη κυλινδρικού σωλήνα.....	34
3.2.6 Μέθοδος Συστροφής πλάκας.....	36
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΘΛΙΨΗ .....</b>	<b>39</b>
4.1 Εισαγωγή στην θλίψη .....	39
4.2 Εξοπλισμός δοκίμων θλίψης .....	40
4.3 Πρότυπα .....	44
4.4 Διαμορφώσεις δειγμάτων.....	45
4.5 Εκτέλεση και προβλήματα .....	48
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΚΑΜΨΗ .....</b>	<b>51</b>
5.1 Εισαγωγή.....	51
5.2 Δοκιμές κάμψης τριών σημείων και τεσσάρων σημείων .....	52
5.3 Σύγκριση των συνιστάμενων μεθόδων δοκιμής .....	55
5.4 Πρότυπα δοκιμής κάμψης.....	55
5.5 Κατηγορίες αστοχίας.....	57
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΔΙΕΥΡΗΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΟΚΙΜΩΝ (NDT).....</b>	<b>59</b>
6.1 Εισαγωγή Στις Διευρυμένες Μεθόδους Δοκίμων .....	59
6.2 Ηχητικά μέσα .....	59
6.2.1 Ηχητική Εκπομπή (Acoustic emission, AE).....	59
6.2.2 Μέθοδος με Υπέρηχο (ultra-sonic testing ,UT) .....	61
6.2.3 Συνδυασμός Υπέρηχου με ηχητική εκπομπή (UT+UA).....	62
6.3 Οπτικά μέσα (Visual inspection, VI) .....	62
6.4 Εικονικά μέσα (imaging technique) .....	63
6.4.1 IRT (infrared) .....	63
6.4.2 THz (Terahertz tech) .....	65
6.4.3 Shearography .....	67
6.4.4 DIC Digital image Correlation .....	67
6.4.5 NI (Neutron Radiography) .....	69
6.4.6 XRI (x-ray actinography).....	70
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>73</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>75</b>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## “ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ”

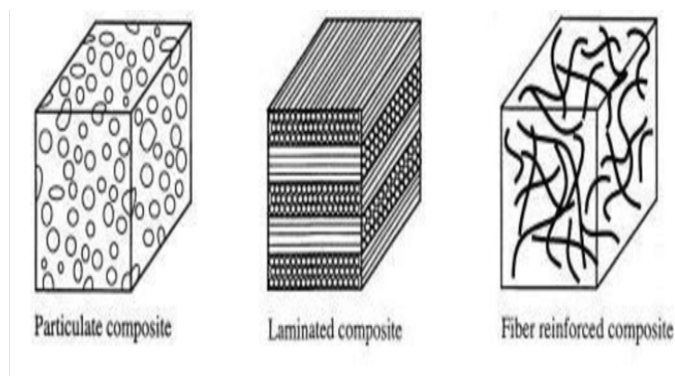
### 1.1 Ορισμός

Σύνθετα είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μία συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους [1].

Ένα υλικό για να χαρακτηριστεί ως «σύνθετο» θα πρέπει να αποτελείται από δύο ή περισσότερα συστατικά μέρη. Τα κυρία συστατικά τα οποία θα πρέπει να αποτελείται ένα σύνθετο είναι το συστατικό ενίσχυσης (reinforcement material) και το συστατικό μήτρας (Matrix).

### 1.2 Κατηγορίες συνθέτων υλικών

- Σύνθετα ενισχυμένα με ίνες (Fiber reinforced composites)
- Πολύ-στρωματικά ενισχυμένα σύνθετα (Multi-layered reinforced composites ή laminated composites)
- Σύνθετα ενισχυμένα με κόκκους (Particulate Composites)



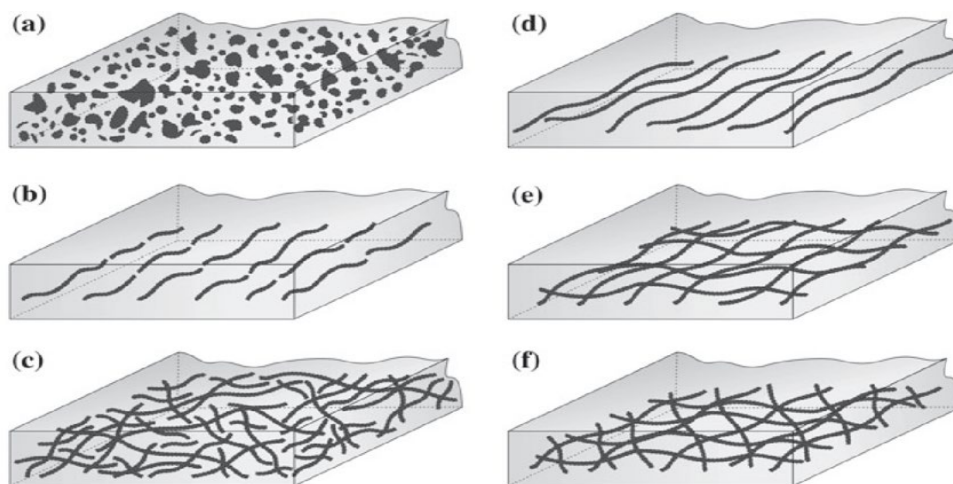
Εικόνα 1.1: Κατηγορίες συνθέτων υλικών [2].

### 1.3 Κατηγορίες Ενίσχυσης με ίνες

Λόγω της μεγάλης χρήσης και έρευνας των συνθέτων ενισχυμένων με ίνες υπάρχουν πολλές μορφολογίες στις κατασκευές συνθέτων που χρησιμοποιούν τις ίνες ως υλικό ενίσχυσης. Οι ίνες αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις εξής μορφές:

- Σύνθετα Μονής διεύθυνσης (Unidirectional Fibers)
- Πολύ-διευθυντικά σύνθετα ή πολλαπλής διεύθυνσης (Multidirectional fibers ή Bi-directional)
- Ινώδη ενίσχυση τυχαίας διεύθυνσης (Random Direction Fibers)
- Ενίσχυση με ίνες σε μορφή πλέξης (Woven Fibers)

Ο τύπος των ινών που υπάρχουν σε ένα σύνθετο υλικό μπορεί, επίσης, να είναι συνεχής (continuous fibers) και μη συνεχής (discontinuous).



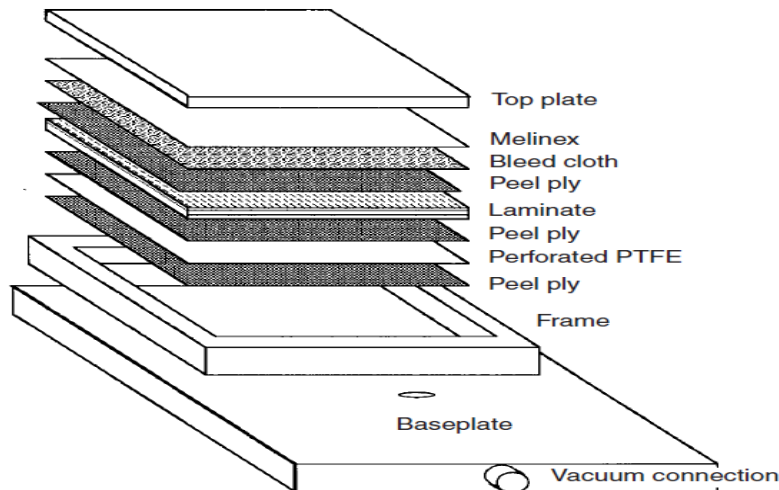
Εικόνα 1.2: Μορφές ενίσχυσης ινών στα σύνθετα [3].

### 1.4 Μορφή πολύ-στρωματικών σύνθετων

Ένα πολύ-στρωματικό σύνθετο αποτελείται από λεπτά φύλλα ή αλλιώς λάμινες οι οποίες είναι επίπεδες πλάκες συνήθως πάχους 1 ή 2 mm, κατασκευάζονται από στρώματα ινών προ-εμποτισμένα με εποξειδική ρητίνη. Η μήτρα είναι συνήθως εποξική, αλλά χρησιμοποιούνται επίσης BMI (bismaleimide). Πρέπει να σημειωθεί ότι η ακόλουθη παράγραφος σχετίζεται κυρίως με τις μήτρες που αποτελούνται από εποξειδική ρητίνη (κυρίως λόγω της δημοτικότητάς τους). Θα πρέπει, ωστόσο, να επισημανθεί ότι η δημιουργία λάμινων με θερμοπλαστικές μήτρες είναι υπό πολλές



απόψεις μία παρόμοια αλλά πιο απλή διαδικασία. Τα λεπτά φύλλα αυτά όταν κατασκευάζονται έπειτα συγκροτούνται μεταξύ τους με ρητίνη ή με άλλες μεθόδους, όπως με τοποθέτηση ειδικών φύλλων (λειτουργεί σαν κολλά) πάχους μικρότερου από 0,3mm ανάμεσα στα κύρια φύλλα που αποτελούνται από το υλικό ενίσχυσης. Ο τύπος του συνθέτου αυτού που δημιουργείται αποκαλείται πολύ-στρωμματικό ή σύνθετο τύπου Sandwich [5].



**Εικόνα 1.3:** Δομή συνθέτου τύπου Sandwich [4].

## 1.5 Προοπτικές μηχανικών δοκιμών

### 1.5.1 Γενικοί στόχοι των μηχανικών δοκιμών

Η εξέλιξη των υλικών από την ανθρωπότητα βασίζονταν πάντα σε πειράματα πάνω σε αυτά, τα οποία αναπτύχθηκαν από συμβατικές δοκιμές σε βάθος χρόνου και οδήγησε στις σύγχρονες επιστημονικές μεθόδους που υποστηρίζουν όλες τις πτυχές της επιστήμης και της τεχνολογίας των υλικών καθώς και την αξιοποίησή τους. Υπάρχει μία αμοιβαία εξάρτηση μεταξύ της εξέλιξης της επιστημονικής γνώσης και της εξέλιξης της μεθόδου δοκιμής, με την πρώτη και στη συνέχεια τις άλλες να παρέχουν τη δυνατότητα διευκόλυνσης για την περαιτέρω πρόοδο στην ανάπτυξη ευέλικτων προγραμμάτων αξιολόγησης, ικανών να στηρίξουν διάφορες βασικές βιομηχανικές δραστηριότητες. Στη συγκεκριμένη περίπτωση μηχανικών δοκιμών αυτές οι δραστηριότητες περιλαμβάνουν:

- έλεγχος ποιότητας
- διασφάλιση ποιότητας
- συγκρίσεις μεταξύ υλικών και επιλογής
- υπολογισμοί σχεδιασμού
- προβλέψεις απόδοσης υπό συνθήκες διαφορετικές από εκείνες της δοκιμής
- δείκτες στα προγράμματα ανάπτυξης υλικών
- σημεία εκκίνησης στη διατύπωση των θεωριών

Ορισμένες από τις λειτουργίες έχουν άμεση σχέση μεταξύ τους και μερικές συνδέονται σε διάφορα στάδια στη μετατροπή των υλικών σε τελικά προϊόντα. Όμως, μεμονωμένα, αυτές οι λειτουργίες καθιστούν διαφορετικές απαιτήσεις στα δεδομένα και ως εκ τούτου τα συμπεράσματα πρέπει να συνδυάζονται προσεκτικά με τις απαιτήσεις συγκεκριμένων περιστάσεων. Για παράδειγμα, ο ποιοτικός έλεγχος μπορεί να επιτευχθεί συνήθως με τη χρήση απλών διαδικασιών δοκιμής, υπό τον όρο ότι αντικατοπτρίζουν τα σχετικά μηχανικά χαρακτηριστικά του προϊόντος.

Η σωστή και προσεκτική προετοιμασία της δοκιμής θεωρείται συνήθως πολύ περισσότερο σημαντική από την επιστημονική επιμέλεια που θα υπάρχει πάνω στην δοκίμιο την στιγμή του πειράματος. Ορισμένες μέθοδοι δοκιμής είναι πολλαπλών χρήσεων λόγω πολλών λειτουργιών που μπορούν να προσφέρουν. Έτσι, μία συμβατική δοκιμή εφελκυσμού που λειτουργεί υπό σταθερές συνθήκες μπορεί να εξυπηρετεί μία λειτουργία ελέγχου ποιότητας, ενώ, με την ελεγχόμενη μεταβολή των μεταβλητών σε μια δοκιμή όπως η θερμοκρασία και η ταχύτητα εφελκυσμού, μπορεί να παρέχει μία εκτίμηση πρώτης τάξης της φέρουσας ικανότητας.

Από την άλλη πλευρά, μερικές μέθοδοι δοκιμής έχουν πιο δύσκολη προετοιμασία και τα δεδομένα που αναπαράγονται μπορεί να μην είναι ακριβής. Υπάρχει μία άλλη επιπλοκή στη δοκιμή υλικών. Οι τιμές που παράγονται από μία μηχανική δοκιμή ποικίλουν ανάλογα με την κατάσταση εσωτερικής σύστασης του ελεγχόμενου αντικειμένου. Κάθε δείγμα ή δοκίμιο είναι τότε μοναδικό και τα δεδομένα που προέρχονται πρέπει να θεωρούνται ότι σχετίζονται μόνο με αυτό και όχι με το υλικό γενικά. Επομένως, υπάρχουν πολλές μεταβλητές για το εύρος των δοκιμών, οι στρατηγικές αξιολόγησης, ο τρόπος χρήσης των δεδομένων, οι διαδικασίες σχεδιασμού κ.ο.κ. [5].

### 1.5.2 Μηχανικές ιδιότητες σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά απαιτούνται για να λειτουργούν ως υψηλής ανθεκτικότητας κατασκευές. Το μετρό ελαστικότητας, η αντοχή, η ολκιμότητα, η σκληρότητα και η τιμή αστοχίας είναι ιδιαιτέρως σημαντικές ιδιότητες. Οι τιμές των ιδιοτήτων και τα γενικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζει ένα σύνθετο είναι το αποτέλεσμα που έχει παραχθεί από διάφορες συνδυάστηκες μεθόδους και τις ιδιότητες των ξεχωριστών συστατικών αυτού.

Ωστόσο, στην πραγματικότητα λόγω πολλών εξωτερικών μεταβλητών όπως η υγρασία που μπορεί να υπάρχει στο εργαστήριο δοκιμής μπορεί να δοθούν λάθος δεδομένα. Ένα δεδομένο που προέρχεται από μία συγκεκριμένη διαδικασία δοκιμής μπορεί να είναι ένας λάθος δείκτης, ή χαρακτηριστικό, ότι η δοκιμή είναι έγκυρη. Ένα άλλο φαινόμενο που μπορεί να εμφανιστεί επίσης είναι ότι η φαινόμενη αντοχή διάτμησης ενός σύνθετου υλικού, όπως μια δοκός ενισχυμένη με ίνες που καταπονείται σε καμπνικά φορτία, είναι ευάλωτη, επειδή οι δοκοί συχνά αστοχούν με έναν συνδυασμό αστοχιών, όπως θραύση στην επιφάνεια και ράγισμα στο εσωτερικό τους που εμποδίζουν κάθε προσπάθεια να αποδοθεί μία σωστή τιμή στο υποτιθέμενο δοκίμιο.

Η πολυμερής φύση των περισσότερων υλικών μήτρας παρουσιάζει ιξωδο-ελαστικά χαρακτηριστικά στη μηχανική συμπεριφορά των σύνθετων υλικών, έτσι ώστε, ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες, οι έννοιες του ελαστικού μέτρου, της αντοχής και της ολκιμότητας μπορεί να επεκταθούν ώστε να συμπεριλάβουν φαινόμενα όπως ερπυσμός, μείωση αντοχής, και κόπωση και χαρακτηριστικά όπως αντοχή στην κρούση. Οι αντίστοιχες λύσεις των σύνθετων τείνουν να επικεντρωθούν στις τέσσερις κύριες ιδιότητες και να δίνουν λιγότερη προσοχή στην «εξαρτώμενο από το χρόνο» πτυχή αυτών των ιδιοτήτων.

Η αντοχή συχνά συνδέεται με το μετρό ελαστικότητας, και τα δύο επηρεάζονται αναλογία που σε ποσότητα ινών και μήτρας που υπάρχει στο σύνθετο. Η ανθεκτικότητα είναι ένα πιο πολύπλοκο θέμα αν το υλικό μας αφορά ένα δομικό στοιχείο. Για ένα ομοιογενές υλικό είναι αντιστρόφως ανάλογο με το μέτρο ελαστικότητας. Ένας κανόνας είναι ότι τα μέτρα που λαμβάνονται για τη βελτίωση του συντελεστή μέτρου ελαστικότητας με τροποποίηση της σύνθεσης του υλικού, τείνουν να μειώνουν την ανθεκτικότητα και αντίστροφα.

Παρόμοιες γενικές αρχές και προοπτικές προκύπτουν για σύνθετα υλικά με ίνες. Αυτό συμβαίνει κυρίως επειδή υπάρχει ανακρίβεια στην τιμή της τάσης κοντά στο άκρο της ρωγμής όπου οφείλεται στην ετερογένεια που έχει. Αυτή η συγκεκριμένη λεπτομέρεια υποδεικνύει ένα γενικό σημείο ότι η μηχανική αξιολόγηση σύνθετων δειγμάτων δεν βρίσκεται αποκλειστικά μέσα στο τυπικό πλαίσιο που ορίζεται από την σύγχρονη μηχανική. Λόγο της ανισοτροπίας που παρουσιάζεται υπάρχει μεγαλύτερος αριθμός δοκιμών από ό,τι θα αρκούσε για ένα δείγμα ενός πιο συμβατικού υλικού. Έτσι, για τα σύνθετα, οι μετρήσεις της αντοχής στην κάμψη και της μονό-αξονική θλίψης είναι εξίσου σημαντικές και μερικές φορές πιο σημαντικές από τις δοκιμές εφελκυσμού και μπορούν να θεωρηθούν ως συμπληρωματικές σε αυτές, ενώ για ομοιογενή δείγματα συχνά παίζουν μόνο ένα πρόσθετο ρόλο.

Οι μηχανικές ιδιότητες εξαρτώνται από πολλές μεταβλητές στο σύνθετο υλικό όπως:

- ιδιότητες της ίνας
- χαρακτηριστικά επιφάνειας της ίνας
- ιδιότητες του υλικού της μήτρας
- ιδιότητες οποιασδήποτε άλλης φάσης
- το κλάσμα όγκου της δεύτερης φάσης (και οποιασδήποτε άλλης φάσης)
- χωρική κατανομή και ευθυγράμμιση της δεύτερης φάσης (συμπεριλαμβανομένης της ύφανσης)
- τη φύση της διαχωριστικής επιφάνειας.

Οι μηχανικές ιδιότητες ενός συνθέτου εξαρτώνται, επίσης, από τις πολλές λεπτομέρειες του σταδίου επεξεργασίας, ιδιαίτερα αυτές που επηρεάζουν το βαθμό πρόσφυσης μεταξύ της ενίσχυσης και της μήτρας την φυσική ακεραιότητα και τη συνολική ποιότητα της τελικής δομής. Εάν είναι γνωστές οι μηχανικές ιδιότητες της ενίσχυσης και της μήτρας, επιτρέπουν στα μαθηματικά μοντέλα να υπολογιστούν οι αντίστοιχες ιδιότητες των δειγμάτων. Οι ευθυγραμμίσεις των ινών σε σύνθετα γενικώς αποκλίνουν από τις ιδανικές καταστάσεις που προέρχονται από τα μαθηματικά μοντέλα και οι ιδιότητες αποκλίνουν αντίστοιχα από τις υπολογισμένες προβλέψεις [5].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### “ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ”

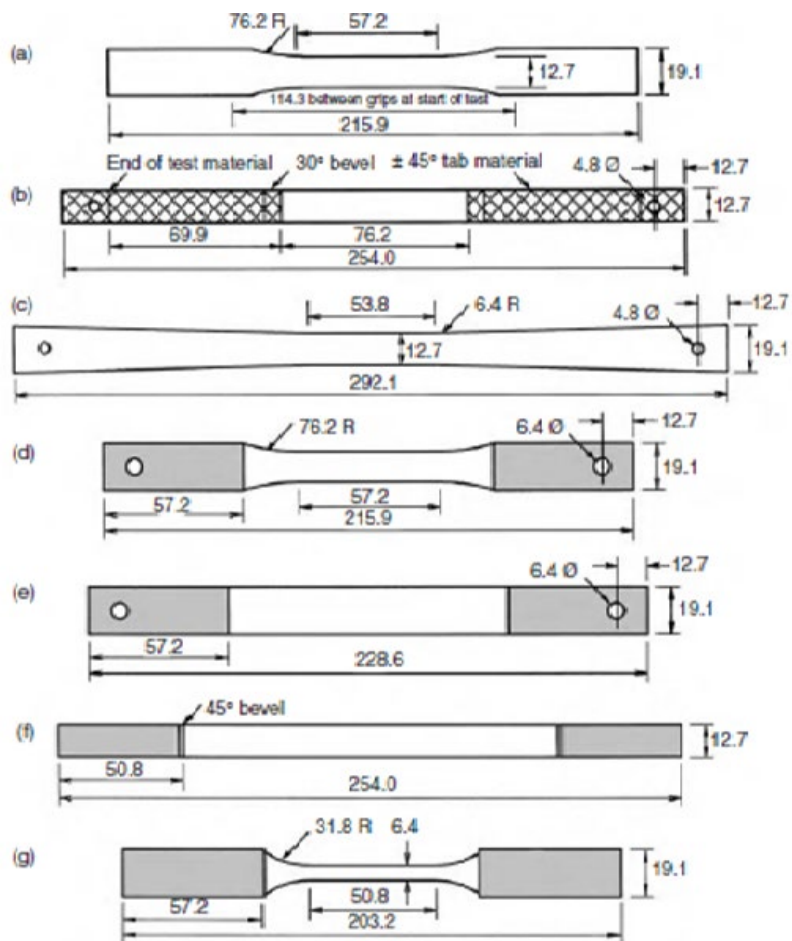
#### 2.1 Εισαγωγή στον εφελκυσμό

Ο σκοπός μιας δοκιμής εφελκυσμού είναι να προσδιοριστεί η μέγιστη εφελκυστική δύναμη τάσης (*UTS: Ultimate Tension Strength*) και ο συντελεστής εφελκυσμού (*E*) ενός υλικού και με επιπλέον όργανα μπορεί να μετρηθεί και ο δείκτης Poisson. Ωστόσο, μία προσεκτική δοκιμή ενός υλικού υπό ελεγχόμενες συνθήκες θα πρέπει να παρέχει περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο που συμπεριφέρεται το σύνθετό μας υπό φορτίο. Η αστοχία σε ένα σύνθετο υλικό μπορεί να παρουσιαστεί χωρίς προειδοποίηση ή μπορεί να εμφανιστεί με ηχητικά ή ορατά σημάδια. Οι παραπάνω πληροφορίες είναι υψηλής σημασίας για τον προσδιορισμό του υλικού.

Οι μηχανικές δοκιμές ξεκίνησαν να διεξάγονται σε επιστημονική βάση στο β' μισό του 19<sup>ου</sup> αιώνα, όταν τα μέταλλο ήταν το πιο κοινό τεχνικό υλικό. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούσαν τότε είχαν πάρει την ονομασία «μεταλλικές τεχνικές»

Οι δοκιμές των μετάλλων δεν είναι ιδιαίτερα δύσκολο έργο χάρη στην ιστροπική φύση του υλικού. Απλουστερά, ένα κομμάτι υλικού μπορεί να εφελκυστεί σε μία μηχανή δοκιμής και να αστοχήσει στην μέση του μήκους του υλικού μειώνοντας τοπικά την εγκάρσια διατομή του τεμαχίου δοκιμής (δημιουργία μέσης ή λαιμού) Η αστοχία πρέπει να πάντα να παρουσιάζεται μακριά από τις λάβες όπου σφίγγεται. Η ανακρίβεια των καθιερωμένων τεχνικών δοκιμής εφελκυσμού, όταν αυτές χρησιμοποιούνται στα σύνθετα υλικά, έγιναν εμφανείς στη δεκαετία του 1960, τονίζοντας το πόσο διαφορετική είναι η συμπεριφορά των σύνθετων υλικών σε σχέση με αυτή των μετάλλων. Οι βασικές διαφορές είναι ότι τα σύνθετα υλικά, εξ ορισμού, είναι ανομοιογενή και μπορούν να παρουσιάζουν αδυναμία κάτω από ένα συγκεκριμένο τρόπο φόρτωσης λόγω της διαφορετικής τους φύσης, και να παρουσιάζουν, επίσης, υψηλή αντοχή κάτω από άλλες λειτουργίες.

Έτσι, ένα δείγμα θα μπορούσε να αστοχήσει επειδή η χαμηλή δύναμη διάτμησης του υλικού έχει ως αποτέλεσμα το ευρύτερο, ή το μεγαλύτερο σε πάχος μέρος του δείγματος, να αστοχήσει μακριά από το σώμα δειγματοληψίας προτού φθάσει σε μέγιστη τάση εφελκυσμού.



**Εικόνα 2.1:** Τρόπος Ελέγχου δείγματος (μεταλλικές τεχνικές) [6].

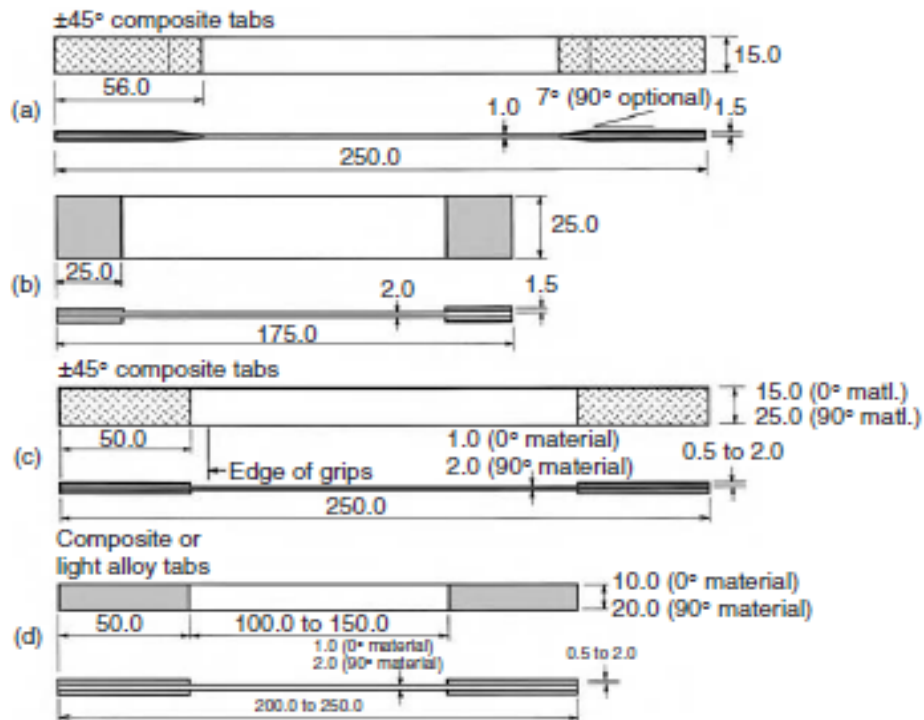
Οι προδιαγραφές των δοκιμών και οι διαδικασίες δοκιμής περιγράφονται λεπτομερώς σε διάφορα δημοσιευμένα πρότυπα ή οδηγούς, τέσσερα από τα οποία συνοψίζονται στον Πίνακα 1 και απεικονίζονται στην *Εικόνα 2.2*. Αυτά είναι τα πρότυπα ASTM D3039 [7], BS2782 [8], CRAG5 [9], και ISO 527 [10]. Αυτή είναι μία πολύ μικρή επιλογή από τα πρότυπα που είναι διαθέσιμα, αλλά η μελέτη τους χρησιμεύει για να καταδείξει πόσα στοιχεία διαφέρουν από το ένα πρότυπο στο άλλο. Αποκαλύπτουν μία σειρά από απόψεις για το πώς θα πρέπει να σχεδιάζεται ένα δείγμα και πώς πρέπει να πραγματοποιείται μία δοκιμή. Θεωρείται ότι οι δοκιμές θα διεξάγονται σύμφωνα με μία από αυτές τις διαδικασίες όπου είναι δυνατόν, αλλά μπορεί να προκύψουν καταστάσεις όπου, για έναν ή τον άλλο λόγο, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα τυποποιημένο σχέδιο δείγματος.

Το κεφάλαιο αυτό στοχεύει να δώσει κάποια βάση στους λόγους που οδηγούν

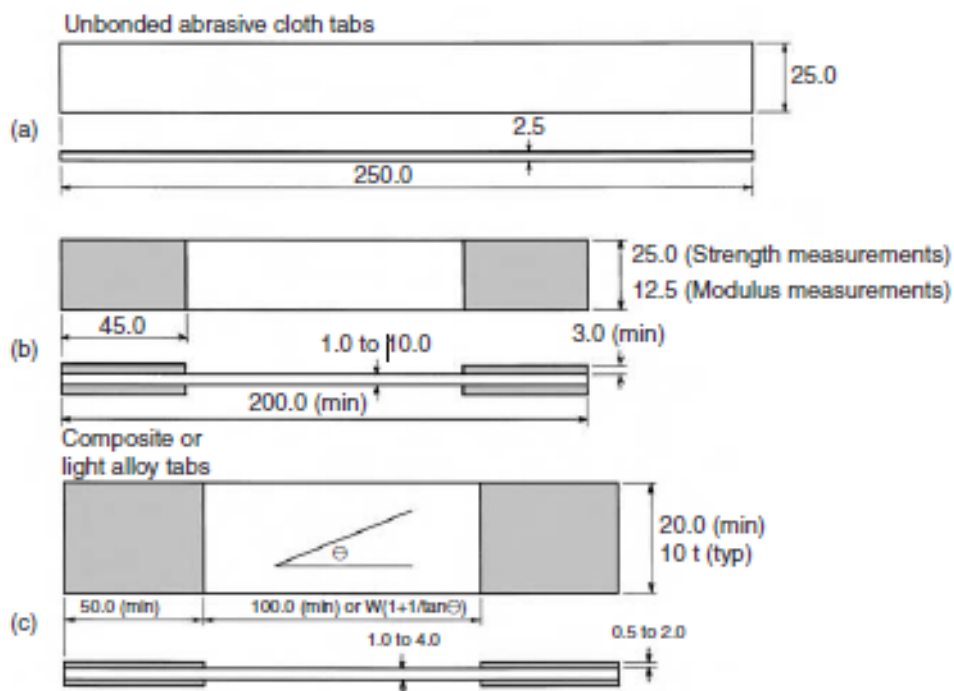
σε μία επιλογή ή άλλης και σκοπεύει να λειτουργήσει ως οδηγός σε μία τεχνική δοκιμών που θα επιτρέψει τη διεξαγωγή έγκυρων δοκιμών σε τέτοιες περιπτώσεις. Αν φαίνεται να γίνεται υπερβολική αναφορά στο πρότυπο ASTM [11], αυτό δεν πρέπει να θεωρηθεί ως ένδειξη προκατειλημμένης συμπεριφοράς, αλλά ότι το πρότυπο ASTM γενικά δίνει περισσότερες πληροφορίες από ό,τι τα περισσότερα. Η πλειονότητα των δοκιμών εφελκυσμού κατευθύνεται προς το αποτέλεσμα του συντελεστή εφελκυσμού, της μέγιστης τάσης εφελκυσμού και του λόγου Poison.

**Πίνακας 1:** Προδιάγραφες Δοκιμών [12].

Standard	ASTM D3039	BS 2782	Μέθοδος CRAG (300 & 301)	Μέθοδος CRAG 302	ISO 527
<b>Εφαρμογές</b>	Σύνθετα υλικά ενισχυμένα με συνεχή ή με μη συνεχές ίνες υψηλής αντοχής	Προ-ενισχυμένα σύνθετα υλικά	Μονής διεύθυνσης ινώδη πλαστικά σύνθετα	Πολλαπλής διεύθυνσης ινώδη σύνθετα	Πολυμερή σύνθετα ενισχυμένα με ίνες. Δεν καθορίζεται για σύνθετα πολλαπλών διευθύνσεων
<b>Πάχος (t)</b>	1mm, 2mm, 2.5mm	1 - 10 mm	1mm ± 0.04(301) & 2mm ±0.04(302)	1mm – 4mm	1 ± 0.2 mm (0°) 2 ± 0.2mm (90°)
<b>Πλάτος(W)</b>	15mm±1%	25mm±0.5	10 μέχρι 20	9t και 10t	15±0.5
<b>Συνολικό μήκος(L)</b>	250±4%	200	100 μέχρι 150+2Lt	Μεγαλύτερο από 100+2Lt	150±1+2Lt
<b>Μήκος φύλου σύσφιξης(Lt)</b>	56	45	50	50	50
<b>Πάχος φύλου σύσφιξης</b>	1.5	Όχι λιγότερο από 3mm	0.5mm-2.0mm	0.5mm-2.0mm	0.5mm-2.0mm



**Εικόνα 2.2:** Πρότυπα δοκιμών ενισχυμένα με ίνες σε κατεύθυνση 0° και 90°: (a) ASTM D 30393 (0°); (b) ASTM D 30393 (90°); (c) ISO 5276 (0°); (d) CRAG methods 300 (0°) και 301 (90°) [13].



**Εικόνα 2.3:** Πρότυπα δοκιμών ενισχυμένα με ίνες (οι ίνες είναι πολλαπλής διεύθυνσης): (a) ASTM D 3039 (b) ISO 527 (c) CRAG method 302 [14].



## 2.2 Απόκτηση δεδομένων

Τα τυπικά πρότυπα απαιτούν το σύστημα ένδειξης φορτίου να έχει ακρίβεια 1%. Ο τρέχων εξοπλισμός με τη χρήση υπολογιστικών συστημάτων απόκτησης δεδομένων και ο ρυθμός συλλογής δεδομένων είναι σημαντικός. Σε περίπτωση που τα σημεία δεδομένων δεν συλλέγονται με κατάλληλο ρυθμό, σημαντικές πληροφορίες μπορεί να χαθούν στο διάστημα μεταξύ σημείων. Δεν είναι ασυνήθιστο να διαπιστωθεί ότι το μέγιστο φορτίο που εμφανίζεται (στιγμιαία μέτρηση) και το μέγιστο φορτίο που καταγράφονται για μία δοκιμή μπορεί να διαφέρει κατά πολύ περισσότερο από 1%. Ένας περίπλοκος αλγόριθμος «datagathering» αναμένεται να ρυθμίσει τον ρυθμό συλλογής δεδομένων σε συνδυασμό με διαφορετικούς ρυθμούς μεταβολής στο φορτίο ή την καταπόνηση.

Το μεγαλύτερο μέρος του λογισμικού των μηχανών για τις δοκιμές προορίζεται να χρησιμοποιηθεί σε δοκιμές ρουτίνας και επιτρέπει τον αυτόματο υπολογισμό πληροφοριών όπως το μέτρο ελαστικότητας και τη στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων. Ωστόσο, συχνά διαπιστώνεται ότι τέτοια συστήματα δεν είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για ερευνητικές εργασίες ή άλλες μη συνήθεις δοκιμές.

Εάν χρησιμοποιείται μηχανή καταγραφής ή αν πρέπει να ληφθούν χειροκίνητα δεδομένα τάσης και καταπόνησης από ένα τυπωμένο γράφημα, συνιστάται η αναβάθμιση των αξόνων φόρτωσης και καταπόνησης έτσι ώστε το γράφημα να έχει κλίση περίπου 45°, καθώς αυτό θα δώσει μεγαλύτερη ακρίβεια μέτρησης σε κάθε άξονα [5].

## 2.3 Λαβές

Τα σύνθετα υλικά όταν καταπονούνται χρειάζεται να υπάρχει κάποια μορφή τριβής όπου το φορτίο μεταφέρεται στο δείγμα μέσω επιφανειών του δοκίμιου και των λαβών οι οποίες είναι τραχιές με οδοντώσεις ή εγκάρσια κοπή. Για τη χρήση με σύνθετα υλικά συνιστάται η δύναμη σύσφιξης να είναι αρκετά μεγάλη μέχρι ενός σημείου ώστε να έχει εξαπλωθεί σε όσον δυνατόν μεγαλύτερη επιφάνεια και να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα βλάβης στο δείγμα. Μία εναλλακτική είναι η εισαγωγή «λειαντικού υφάσματος» (*lubricant sheet*) μεταξύ της επιφάνειας λαβής και του δείγματος. Στην περίπτωση που οι λαβές πρέπει να είναι ειδικά κατασκευασμένες για χρήση με σύνθετα

υλικά, οι συνιστάμενες μέθοδοι για την παραγωγή μιας επιφάνειας σύσφιξης πρέπει να είναι είτε διάβρωση με σπινθήρες ή ηλεκτρο-απορροφητική λειαντική επιφάνεια.

Οι παράλληλες λαβές σύσφιξης, που κλείνουν με χειροκίνητα ή υδραυλικά μέσα, επιτρέπουν στο χειριστή να ελέγχει τη δύναμη σύσφιξης του δείγματος. Στην ιδανική περίπτωση, αυτό δεν πρέπει να υπερβαίνει το αναγκαίο για την πρόσφυση του υπό δοκιμή υλικού μέχρι να επιτευχθεί μέγιστο φορτίο. Έχει παρατηρηθεί στα τεμάχια θλίψης σύνθετων υλικών ότι μία υπερβολική δύναμη σύσφιξης στρεβλώνει τις εξωτερικές ίνες του δοκίμιου προκαλώντας μείωση του φορτίου αστοχίας [9] και το ίδιο μπορεί να βρεθεί ότι ισχύει για τις δοκιμές εφελκυσμού. Από την άλλη πλευρά, η ανεπαρκής δύναμη θα επιτρέψει στο δείγμα να γλιστρήσει, πράγμα που γενικά οδηγεί στην επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με τη λαβή που έχει σκιστεί. Αυτό το υλικό στη συνέχεια γεμίζει τις οδοντώσεις της λαβής.

Η θέση του δείγματος μπορεί να ρυθμιστεί τόσο πλευρικά όσο και εγκάρσια. Τοποθετώντας τις μικρό-μετρικές κεφαλές στο σώμα των λαβών όπου είναι δυνατό να ρυθμίσετε τη θέση του δείγματος, σε σχέση με τον άξονα της μηχανής, με υψηλό βαθμό ακρίβειας [5].

## 2.4 Λεπτομέρειες δειγμάτων

### 2.4.1 Γενικά

Ένα τυπικό δείγμα παρουσιάζεται στην *Εικόνα 2.4* με σχετική ονοματολογία. Η ονοματολογία δεν είναι απαραίτητως καθολική. Ο όρος μήκος, για παράδειγμα, χρησιμοποιείται από πολλές πηγές για την περιοχή που δίνεται εδώ ως «ελεύθερο μήκος». Είναι λυπηρό το γεγονός ότι ο όρος αυτός δεν χρησιμοποιείται ευρύτερα, δεδομένου ότι θα επέτρεπε στη συνέχεια το «μήκος μετρητή» να ορίζει την απόσταση μεταξύ των σημείων επαφής του αισθητήρα μέτρησης μήκους. Οι όροι «δοκιμαστικό τεμάχιο» και «δείγμα» χρησιμοποιούνται συχνά εναλλακτικά, αν και υπάρχει μία ένδειξη ότι το "δοκιμαστικό τεμάχιο" και το "δείγμα" είναι γενικοί όροι.

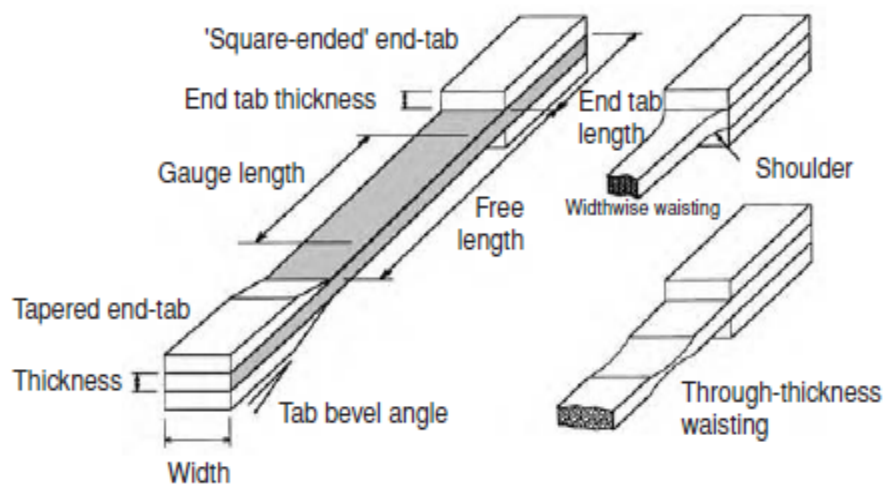
Κάθε δοκίμιο πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικό του σώματος του υλικού από το οποίο αφαιρείται. Θα πρέπει να περιλαμβάνει μία περιοχή ομοιόμορφης τάσης πάνω από την οποία μπορούν να γίνουν μετρήσεις καταπόνησης η οποία θα αστοχήσει.

Το υλικό πρέπει να είναι επίπεδο, τουλάχιστον εάν πρόκειται να καθοριστούν οι θεμελιώδεις ιδιότητες των υλικών, αν και, σε περίπτωση ελασμάτων «βιομηχανικού τύπου», μπορεί να είναι απαραίτητο για τη δοκιμή του υλικού «όπως παρέχεται». Τα δείγματα εφελκυσμού βρίσκονται συνήθως στην περιοχή πλάτους 10-30mm με μήκος 200-250mm, τα στενότερα δείγματα που χρησιμοποιούνται για μονόδρομο υλικό. Το δείγμα πρέπει να είναι μακρύ ώστε να αποφευχθούν οι τελικές επιδράσεις (δηλ. τα αποτελέσματα που προκαλούνται από τις ασυνέχειες φορτίου που σχετίζονται με την περιοχή εισαγωγής φορτίου, σύμφωνα με την αρχή του Saint Venant).

Το πρότυπο ASTM D30393 αναγνωρίζει αυτό προσθέτοντας το διπλάσιο του πλάτους στο μήκος του μετρητή (αλλά υπάρχει εδώ μία ασάφεια και φαίνεται ότι αυτό σημαίνει ελεύθερο μήκος). Δείγματα ενισχυμένα με ίνες πρέπει να είναι αρκετά ευρύ ώστε να περιέχει έναν λογικό αριθμό μονάδων Σε περίπτωση που δοκιμάζονται υλικά υψηλής αντοχής ή παχιά δείγματα των «πραγματικών» ελασμάτων, το μέγεθος του δείγματος μπορεί να περιορίζεται από τη μέγιστη ικανότητα φόρτισης της μηχανής δοκιμής.

Προκειμένου να αποφευχθεί η αστοχία στα άκρα του δείγματος, όπου υπάρχουν φορτία, Τα διαχωρίστηκα φύλλα σύσφιξης (end-tabs) χρησιμοποιούνται γενικά για την προστασία και την ενίσχυση του υλικού. Έχουμε ήδη δει ότι η περιστροφή και η άλλη μηχανική κατεργασία του τεμαχίου δοκιμής αποφεύγονται. Η μηχανική κατεργασία διαμέσου πάχους εφαρμόζεται εν πάση περίπτωση μόνο για υλικό με μονής-διεύθυνσης ενίσχυση, επειδή αυτή η μηχανική κατεργασία πολύ-στρωματικού υλικού θα μπορούσε να μεταβάλει το αποτέλεσμα της σύνθεσης.

Ακόμη και το μονόδρομο υλικό μεταβάλλεται σε κάποιο βαθμό με την απομάκρυνση της πλούσιας σε ρητίνη εξωτερικής επιφάνειας και η μηχανική κατεργασία είναι επίσης πιθανό να βλάψει τις απομένοντες ίνες του δείγματος. Στην πράξη, φαίνεται ότι κυριαρχεί η προηγούμενη επίδραση. Η παλαιότερη έκδοση της μεθόδου CRAG 300 χρησιμοποίησε ένα δείγμα με μέτωπο διαμέσου του πάχους. Αυτό βρέθηκε ότι δίνει υψηλότερες τιμές για τη δύναμη και την ακαμψία από άλλες μεθόδους που χρησιμοποιούν μη δοκιμασμένα τεμάχια.



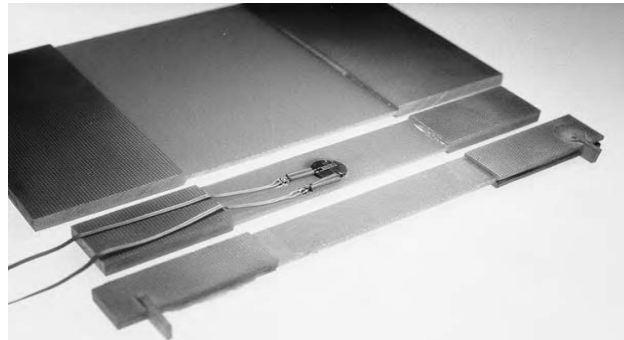
**Εικόνα 2.4:** Μορφή δοκίμιου πριν την δοκιμή στη μηχανή [13].

## 2.4.2 Διαχωρίστηκα φύλλα σύσφιξης (end-tabs)

Αν και δεν καθορίζονται σε μεγάλο εύρος, τα διαχωρίστηκα φύλλα χρησιμοποιούνται σε μεγάλη πλειονότητα των δειγμάτων. Ο σκοπός τους είναι να παρέχουν μία συμβατή επιφάνεια πρόσφυσης, να τροφοδοτούν φορτία στο υποκείμενο υλικό δοκιμής και να προστατεύουν τις εξωτερικές ίνες του δείγματος. Κατά την εξέλιξη του σχεδιασμού δείγματος σύνθετων υλικών, χρησιμοποιήθηκαν διάφορα υλικά, όπως ανοξείδωτο ατσάλι, κράμα αλουμινίου και σύνθετα υλικά σε διάφορες μορφές. Οι απαιτήσεις είναι ότι το υλικό που χρησιμοποιείται πρέπει να είναι αρκετά μαλακό ώστε η εσοχή να σφίγγεται σταθερά από τις σιαγόνες του μηχανήματος δοκιμής, ενώ είναι αρκετά ισχυρό για να μεταφέρει φορτίο στο σώμα του δείγματος.

Αυτό υποδηλώνει έναν συνδυασμό αντοχής διάτμησης μέσω του πάχους με επαρκή αντοχή σε εφελκυσμό. Ο σφιγκτήρας δεν πρέπει να είναι τόσο άκαμπτος ώστε να αποτρέπεται η φυσική παραμόρφωση του δείγματος. Ο ανοξείδωτος χάλυβας δεν προτείνεται πλέον και η επιλογή τώρα είναι μεταξύ του κράματος αλουμινίου και του σύνθετου υλικού. Το πιο συνηθισμένο υλικό φύλλου σύσφιξης είναι πιθανώς πλαστικοποιημένο γυαλί E (laminated E-glass), αν και το πρότυπο CRAG προτείνει τη χρήση ελαφρού κράματος εκτός από τη δοκιμή σε θερμές και υγρές συνθήκες. Το σημαντικό πλεονέκτημα των σύνθετων σφιγκτήρων σε σχέση με τις μεταλλικές εκδόσεις είναι ότι αυτές και το δείγμα μπορούν να συν-επεξεργαστούν στο μέγεθος, το οποίο είναι πολύ πιο εύκολο από το να συνδεθούν μεμονωμένοι σφιγκτήρες σε

προκατασκευασμένα δείγματα, και γενικά οδηγεί σε ένα καλύτερο αποτέλεσμα (Εικόνα 2.5).



**Εικόνα 2.5:** Προετοιμασία δείγματος, τα διαχωρίστηκα φύλλα σύσφιξης έχουν τοποθετηθεί στο αντικείμενο [14].

## 2.5 Εξοπλισμός δοκιμής εφελκυσμού

Υπάρχουν δύο κατηγορίες μηχανικών δοκιμών, αυτές που εφαρμόζουν εφελκυστικό φορτίο στο δοκίμιο με υδραυλικά μέσα, καθώς και εκείνα που προκαλούν φορτίο με εφαρμογή ελεγχόμενης δύναμης εκτροπής προς το τεμάχιο δοκιμής με τη βοήθεια ενός βύσματος. Είναι σημαντικό να εκτιμηθεί η διαφορά μεταξύ των «μαλακών» χαρακτηριστικών του ελέγχου φορτίου και του «σκληρού» φορτίου που παρέχεται από το φορτίο ελεγχόμενης μετατόπισης. Όταν το δείγμα αποδυναμωθεί κάτω από τον έλεγχο μετατόπισης, θα υπάρξει πτώση της δύναμης του φορτίου, ενώ κάτω από τον έλεγχο φορτίου θα εμφανιστεί ανεξέλεγκτη βλάβη, καθώς το μηχάνημα καταβάλλει προσπάθεια για να διατηρήσει το φορτίο σε ένα αποδυναμωμένο τεμάχιο. Αυτό μπορεί να είναι επικίνδυνο και τείνει να αποτρέψει τη μελέτη της αστοχίας.. Το υψηλό κόστος τους και η σχετικά περιορισμένη απόσταση εργασίας τείνουν να είναι εναντίον τους ως επιλογή για γενικές εργασίες δοκιμών. Αυτό αφήνει τη βιδωτού τύπου μηχανή (screw-jack machine) σε υψηλότερη ζήτηση. Σίγουρα η χρήση αυτού του τύπου μηχανής υπόκειται στα περισσότερα πρότυπα, τα οποία καθορίζουν τη φόρτωση ποσοστού από άποψη εκτόπισης ανά μονάδα χρόνου.

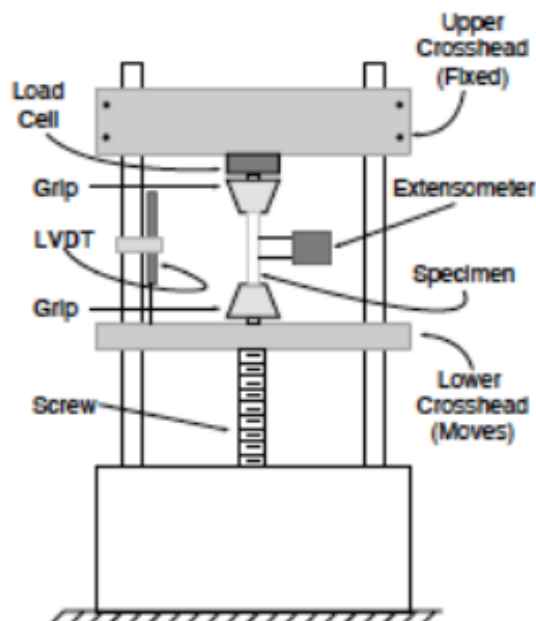
Οι λειτουργίες των μηχανών δοκιμής (λαβές, πλαίσια φόρτωσης, κ.λπ.) δεν άλλαξε πολύ με την πάροδο του χρόνου. Δεν ισχύει το ίδιο για τον έλεγχο και τον εξοπλισμό καταγραφής δεδομένων, ο οποίος αναμένεται τώρα τελευταία να είναι βασισμένος σε υπολογιστή.

Οι μηχανές δοκιμών είναι ανθεκτικές και συνήθως δεν φθείρονται γρήγορα. Το κόστος αντικατάστασής τους είναι υψηλό, γι' αυτό υπάρχει μεγάλος αριθμός παλαιότερων εξοπλισμών που εξακολουθεί να χρησιμοποιείται. Επομένως, είναι σκόπιμο να υποθέσουμε ότι σε αυτό το κεφάλαιο μπορεί να μην χρησιμοποιούνται απαραίτητως υπερσύγχρονα μηχανήματα δοκιμών.

Ενώ ο έλεγχος με μικροεπεξεργαστή μπορεί να προσφέρει ένα ευρύτερο φάσμα επιλογών ελέγχου σε σύγκριση με τα παλαιότερα μηχανήματα, και η καταγραφή δεδομένων μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό την απόκτηση δεδομένων. Εξακολουθούν να πραγματοποιούνται πολλές δοκιμές με τη χρήση μηχανών με περιορισμένο εύρος ταχύτητας δοκιμής όπου δεδομένα ενδέχεται να καταγράφονται μόνο σε χάρτινο διάγραμμα.



**Εικόνα 2.6:** Σέρβο-υδραυλική μηχανή συνδεδεμένη με υπολογιστή για συλλογή δεδομένων για εφελκυστηκές δοκιμές για δοκίμια συνθέτων υλικών [15].



**Εικόνα 2.7:** Μηχανή δοκιμής εφελκυσμού τύπου «screw-jack», δηλαδή βιδωτού τύπου [16].

## 2.6 Διαδικασία δοκιμής εφελκυσμού

Πριν από την έναρξη της δοκιμής, πρέπει να καταγράφουν λεπτομέρειες του υλικού, συμπεριλαμβανομένου των λεπτομερειών κατασκευής (ακολουθία στοίβαξης), την αναλογία ποσότητας ρητίνης και ινών, τα στοιχεία ινών (τύπος, κατασκευαστής, διάμετρος, επιφανειακή επεξεργασία, και τα λοιπά). Το περιβάλλον το οποίο το δείγμα βρισκόταν, παραδείγματος χάρη αν βρισκόταν σε μέρος με υγρασία, αυτό θα πρέπει να περιγράφεται, μαζί με τις λεπτομέρειες των περιβαλλοντολογικών δοκιμών. Η μηχανή δοκιμών, θα πρέπει να παρέχει λεπτομέρειες σχετικά με την ημερομηνία βαθμονόμησης, τον τρόπο σφίξιματος που έχει ο εξοπλισμός, τη μέθοδο απόκτησης δεδομένων και τις σχετικές λεπτομέρειες του εξοπλισμού μέτρησης τάσεων ή εάν χρησιμοποιούνται μετρητές τάσης, συντελεστής μετρητή, μέγεθος, αντίστασης και ούτω καθεξής. Οι διαστάσεις του δείγματος μπορούν στη συνέχεια να μετρηθούν, λαμβάνοντας κανονικά ένα μέσο όρο τριών μετρήσεων από το πλάτος και το πάχος.

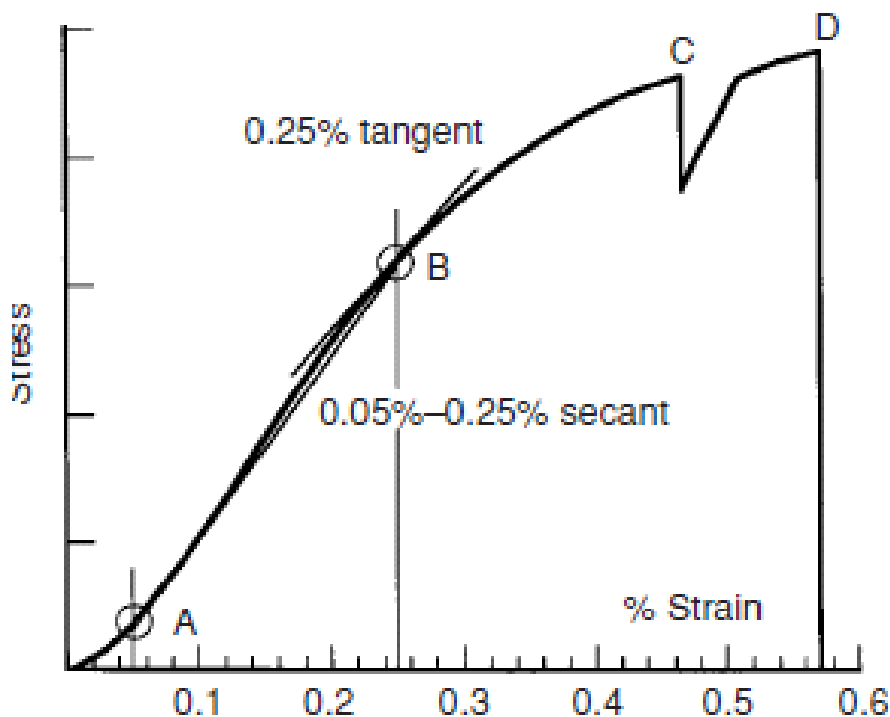
Ο κεντρικός άξονας του δείγματος θα πρέπει να ευθυγραμμιστεί με τον άξονα της μηχανής δοκιμής έτσι ώστε να εξαλειφθεί η κάμψη και η ασύμμετρη φόρτωση. Αν υπάρχει επιμηκυνσιομετρο, αυτό πρέπει να συνδέεται με το κέντρο του δείγματος. Μία μικρή προ-φόρτιση μπορεί να εφαρμοστεί στο δείγμα πριν από την τοποθέτηση του μετρητή. Πρέπει να υπάρχει εξοπλισμός προστασίας γύρω από το δείγμα ή τη

δοκιμαστική μηχανή, σε περίπτωση εμφάνισης εκρηκτικής βλάβης. Η δοκιμή μπορεί στη συνέχεια να αρχίσει [5].

## 2.7 Πειραματικά Δεδομένα

### 2.7.1 Καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης

Η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης που φαίνεται στην *Εικόνα 2.1* περιλαμβάνει όλα τα χαρακτηριστικά που μπορεί να βρεθούν σε μία καμπύλη φόρτισης, συμπεριλαμβανομένων των ενδείξεων αλλαγών όπως την δημιουργία λαιμού, την αστοχία. Πολλά σύνθετα υλικά, ιδιαίτερα εάν περιέχουν μεγάλο ποσοστό ινών σε γωνιά 0°, έχουν ουσιαστικά γραμμικά χαρακτηριστικά καταπόνησης, αλλά δεν είναι ασυνήθιστο η καμπύλη να παρουσιάζει μη γραμμικότητες στην αρχή της δοκιμής.



Εικόνα 2.1: Διάγραμμα καμπύλης τάσης εφελκυσμού [17].

### 2.7.2 Μετρό ελαστικότητας

Υπάρχουν τρεις επιλογές για τον υπολογισμό του συντελεστή ελαστικότητας από μία μη γραμμική καμπύλη φόρτισης. Το πρώτο από αυτά είναι να πάρει το μέτρο



ως εφαπτομένη στο αρχικό τμήμα της καμπύλης, το δεύτερο είναι να κατασκευάσει μία εφαπτόμενη σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο παραμόρφωσης και το τρίτο είναι να κατασκευάσει ένα δευτερεύον μεταξύ δύο σημείων που δίδονται ως A και B στην *Εικόνα 2.1* και τυπικά σε τιμές τάσης των 0.0005 και 0.0025, ή 0.001 και 0.003 . Οι απόλυτες τιμές (π.χ. 0,0025) γίνονται όλο και πιο συνηθισμένες αλλά, προς το συμφέρον της αποφυγής δεκαδικών, είναι χρήσιμη η χρήση εκατοστιαίας καταπόνησης.

Οι τιμές του στοιχείου δίδονται σε αυτές τις περιπτώσεις ως «αρχικό μέτρο εφαπτομένης», Συντελεστή "B% εφαπτομένου" και "A% -B% δόνησης αντίστοιχα. Η χρήση μεθόδων γραμμικής παλινδρόμησης με τη βοήθεια υπολογιστή μπορεί να επιτραπεί αντί για βάση δύο σημείων για τον υπολογισμό αυτών των τιμών. Εάν το υλικό είναι εύθραυστο και αστοχήσει σε ένα στέλεχος μικρότερο από 0,006, το πρότυπο ASTM D 30393 συνιστά τη χρησιμοποίηση εύρους τάσης 25 -50% του τελικού αποτελέσματος [15].

### 2.7.3 Λόγος Poisson

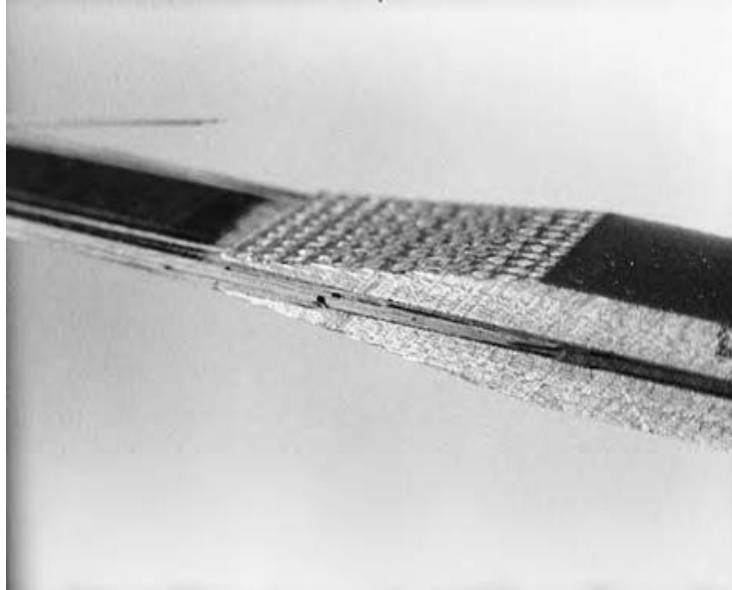
Ο λόγος Poisson μπορεί να υπολογιστεί εάν διατίθενται δεδομένα διαμήκους και εγκάρσιας καταπόνησης χρησιμοποιώντας τα ίδια όρια ανώτερης και κατώτερης τάσης που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μέτρου. Τα ενδιάμεσα δεδομένα είναι γενικά χαμηλά και μπορούν να επηρεαστούν σοβαρά από ψευδή δεδομένα (θόρυβος). Σε αυτή την περίπτωση, η λήψη του λόγου της παλινδρόμησης ταιριάζει στα γραφήματα εγκάρσιας και διαμήκους καταπόνησης, τα οποία λαμβάνονται με τη χρήση απλού λογισμικού σχεδίασης γραφημάτων υπολογιστών, θα πρέπει να δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα [5].

### 2.7.4 Αστοχία

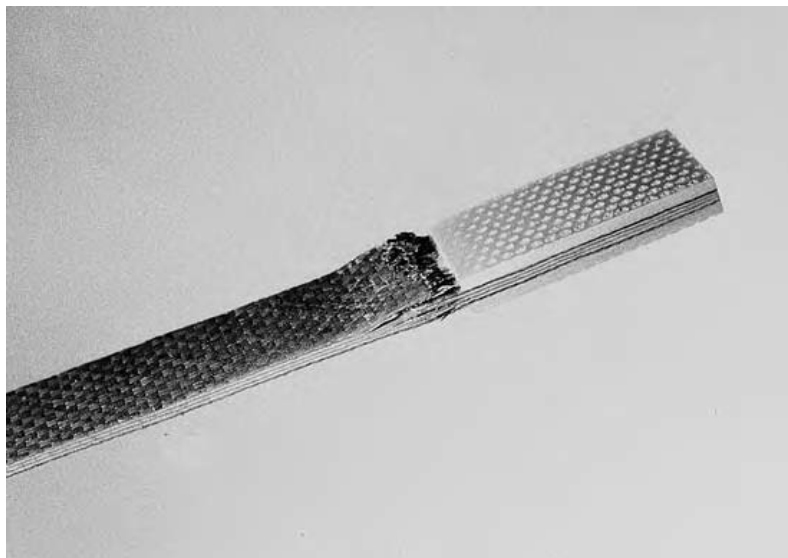
Άλλες διαθέσιμες πληροφορίες στο τέλος μιας δοκιμής είναι ο τρόπος αστοχίας του δείγματος και η θέση της εμφάνισης αστοχίας. Είναι φυσιολογικό να θεωρούμε ότι οι αστοχίες μέσα στην θέση όπου συσφίγγεται το δοκίμιο, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 2.8*, ή σε μία καθορισμένη απόσταση από το φύλλο σύσφιξης (end-tab), *Εικόνα 2.9*, επηρεάζονται από τις λαβές και συνεπώς είναι άκυρες. Το πρότυπο ASTM προτείνει η μέθοδος εισαγωγής φορτίου στο υλικό να επανεξεταστεί εάν εμφανιστεί αυτή η είδος

αστοχία. Το πρότυπο BS 27824 απαιτεί τα δείγματα που έχουν γλιστρήσει στις λαβές, σπασμένα ή μέσα πρέπει να απορρίπτονται και να αντικαθίστανται τα 10 mm των λαβών ή τα «προφανώς ασυνεπή αποτελέσματα για προφανείς λόγους», ενώ το πρότυπο CRAG5 απαιτεί τα δείγματα να αποτύχουν «στην κεντρική περιοχή» να είναι έγκυρα για σχεδιαστικούς σκοπούς. Θεωρείται γενικά ότι αν όλα τα δοκίμια που δοκιμάζονται αποτυγχάνουν στις ή κοντά στις λαβές, οι λαμβανόμενες καταπονήσεις θα πρέπει να αντιμετωπίζονται ως «κατώτατες τιμές».

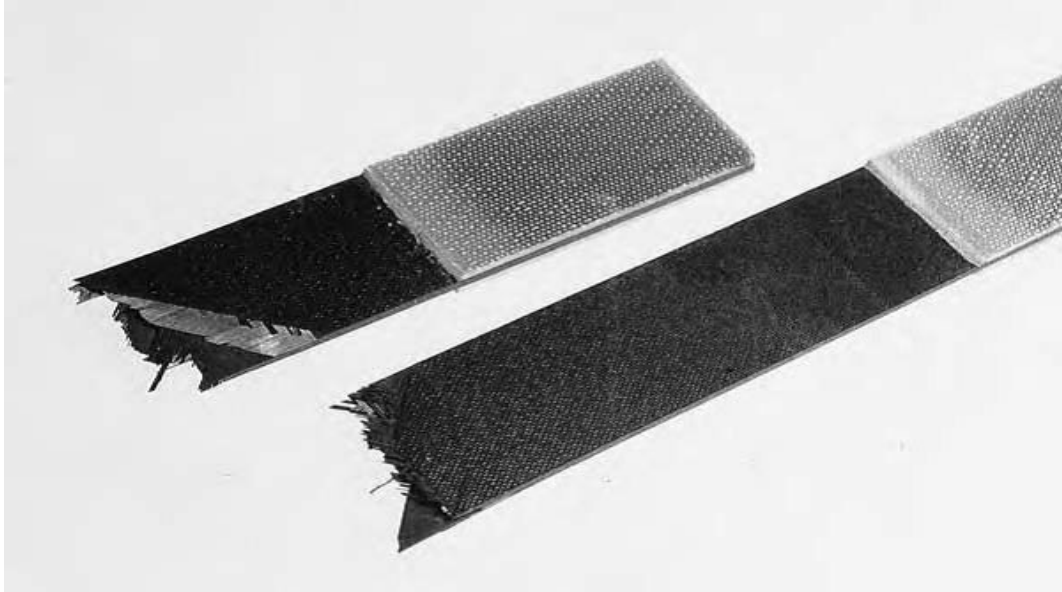
Το πρότυπο ASTM D 30393 συνιστά τη χρήση ενός κωδικού τριών τεμαχίων κατά την περιγραφή των βλαβών, όπου το πρώτο μέρος δηλώνει τον τύπο αστοχίας (διάσπαση, αποκόλληση άκρων, εκρηκτικό κλπ.). Το δεύτερο μέρος δείχνει την αποτυχημένη περιοχή (στο μέρος σύσφιξης.) και το τελευταίο μέρος δίνει τη θέση (πάνω, κάτω, αριστερά, δεξιά, κλπ.). Υπάρχει πιθανότητα να παρατηρηθεί μία ποικιλία τρόπων αστοχίας σε πανομοιότυπα δείγματα από το ίδιο υλικό ή ακόμα και μέσα σε ένα μοναδικό δοκίμιο (βλέπε *Εικόνα 2.8*) και επίσης αρκετά συνηθισμένο να παρατηρείται αστοχία σε περισσότερα από ένα μέρη του δείγματος, είναι σημαντικό να δίδονται πλήρεις λεπτομέρειες των αποτυχιών κατά την αναφορά των αποτελεσμάτων. Είναι φυσιολογικό να παρουσιάζονται δεδομένα για κάθε δείγμα (μέγιστη τάση, συντελεστής κ.λπ.) και όχι ασυνήθιστο να συμπεριλαμβάνονται δεδομένα τάσεως-παραμόρφωσης για κάθε δοκιμή. Ένας πληρέστερος κατάλογος των πληροφοριών που πρέπει να συμπεριληφθούν στην έκθεση παρέχεται στο πρότυπο ASTM D 3039.



**Εικόνα 2.8:** Πρότυπο ASTM D 3039 Δοκίμιο το οποίο αστοχεί αναμεσα στα ενδιάμεσα φύλλα σύσφιξης(End-tab) με το υλικό [18].



**Εικόνα 2.9:** Πρότυπο CRAG μέθοδος 302 Αστοχία σε δοκίμιο ενισχυμένο με πλέξεις [18].



**Εικόνα 2.10:** Πρότυπο CRAG μέθοδος 302, ιστροπικό δοκίμιο το οποίο δεν έδειξε αστοχία στο κέντρο του ολικού μήκους [18].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### “ΔΙΑΤΜΗΣΗ”

#### 3.1 Εισαγωγή

Σύνθετα υλικά τα οποία είναι ενισχυμένα με ίνες παρουσιάζουν μεγαλύτερη αδυναμία σε διατμητικά φορτία με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν παραμόρφωση στην γεωμετρία τους και έπειτα αστοχία. Οπού αυτό προώθησε τον σχεδιασμό συνθέτων τύπου sandwich για την μεγιστοποίηση στην αντοχή σε διατμητικά φορτία. Για το λόγο αυτό, υπάρχει η ανάγκη για ακριβείς μεθόδους μέτρησης στις διατμητικές ιδιότητες.

Μία από τις κύριες δυσκολίες στην ανάπτυξη μιας μεθόδου δοκιμής για τη μέτρηση της διατμητικής ιδιότητας είναι η παροχή μιας σωστής κατάστασης πειραματικής διαδικασίας διατμητικής τάσης στο δείγμα. Ιδανικά, για ποσοτικές διατμητικές μετρήσεις, η μέθοδος δοκιμής διάτμησης πρέπει να παρέχει μία περιοχή με καθαρή και ομοιόμορφη διατμητική τάση στο τμήμα δοκιμής στο δείγμα σε όλα τα γραμμικά και μη γραμμικά συστήματα απόκρισης.

Οι περισσότερες δοκιμές διάτμησης έχουν αναπτυχθεί με στόχο τη μεγιστοποίηση διατμητικής τάσης και την ελαχιστοποίηση των εξωγενών καταπονήσεων. Κατά την αξιολόγηση των μεθόδων δοκιμής με διάτμηση, θα δοθεί προσοχή στις διατμητικές ιδιότητες που επιτυγχάνονται, τις διατμητικές κατανομές τάσεων στις δοκιμές, τις απαιτήσεις κατασκευής δειγμάτων και συσκευής δοκιμών, τα δεδομένα της διαδικασίας μείωσης και την αναπαραγωγιμότητα των δεδομένων [5].

#### 3.2 Μέθοδοι Δοκίμων

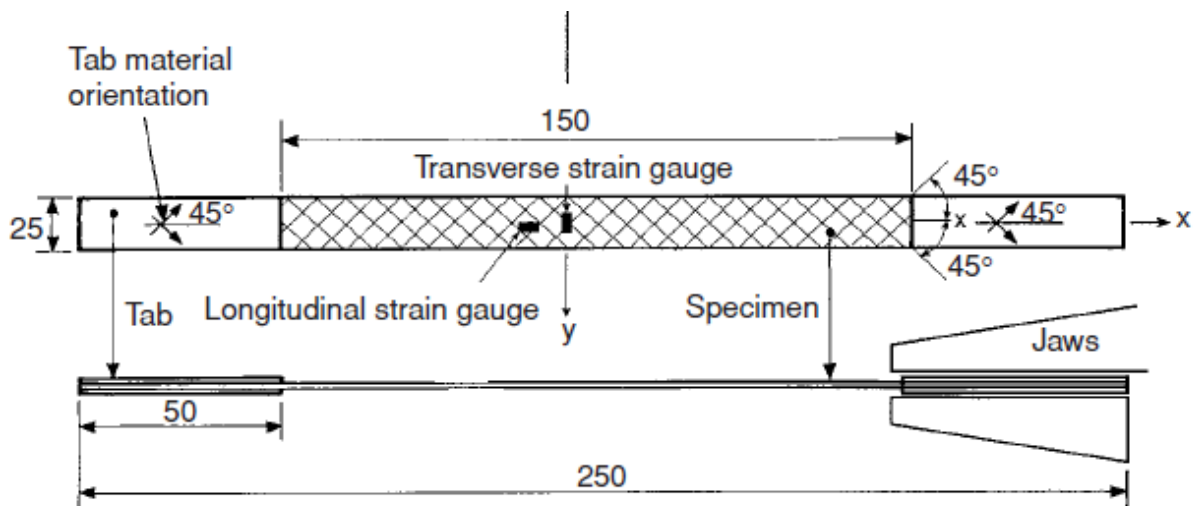
##### 3.2.1 Μονό-αξονική φόρτιση ενός φύλλου σε γωνιά $\pm 45^\circ$

Η εφαρμογή μονό-αξονικής τάσης σε ένα ισορροπημένο και συμμετρικό πολύ-στρωματικό σύνθετο  $\pm 45^\circ$  είναι μία σχετικά απλή μέθοδος για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών διάτμησης (συντελεστής και αντοχή) συνεχών ευθυγραμμισμένων συστημάτων ενισχυμένων με ίνες. Η μέθοδος χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία αεροδιαστημικής. Οι διαδικασίες δοκιμής που περιγράφονται σε αυτά τα πρότυπα βασίζονται στο πρότυπο ASTM D 3518 [19] και χρησιμοποιούν ορθογώνιο δείγμα

μήκους 250mm με πλάτος 25mm και πάχος 2mm (βλέπε *Εικόνα 3.1*). Συνιστάται, για υλικά κατασκευασμένα με στρώματα παχύτερα από 0,125mm και το έλασμα πρέπει να αποτελείται από 16 στρώματα.

Το δείγμα κατεργάζεται στις απαιτούμενες διαστάσεις χρησιμοποιώντας εξοπλισμό υψηλής τεχνολογίας, για παράδειγμα, κοπτικά από διαμάντι. Συνιστάται η χρήση υγρού ψυκτικού μέσου, όπως νερό με σαπουνέλαιο, για να αποφευχθεί η συσσώρευση θερμότητας στο δοκίμιο, το οποίο θα μπορούσε να προκαλέσει ζημία στο υλικό, η ακόμα χειρότερα να το «βάψει» δηλαδή να σκληρύνει την επιφάνεια του. Οι επιφάνειες και οι άκρες πρέπει να είναι απαλλαγμένες από γρατσουνιές, λακούβες, και άλλα. Οι άκρες πρέπει να είναι παράλληλες στο έδαφος για την απομάκρυνση ελαττωμάτων κατεργασίας. Η αστοχία δεν συμβαίνει εντός της περιοχής λαβής, τα δείγματα μπορούν να δοκιμαστούν με ή χωρίς φύλλα σύσφιξης (end-tabs). Τα φύλλα σύσφιξης (end-tabs), εάν χρησιμοποιούνται, πρέπει να είναι κατασκευασμένα από υφασμάτινο πολύ-στρωματικό υλικό κατασκευασμένο από ίνες γυαλιού/ρητίνης, με τους άξονες ινών του υφάσματος να ρυθμιστούν στους  $\pm 45^\circ$  στον άξονα του δείγματος.

Τα φύλλα σύσφιξης (end-tabs) που τοποθετούνται αναμεσά στο δείγμα και στην μέγγενη με ειδική κόλλα έχουν συνιστάμενο μήκος 50mm. Αυτό αντιστοιχεί σε συνολικό μήκος (μεταξύ λαβών) 150mm. Το πάχος του υλικού σύσφιξης πρέπει να είναι μεταξύ 0,5mm και 2,0mm, με γωνία  $90^\circ$ .



**Εικόνα 3.1:** Σχέδιο πειράματος με μονό-αξονική φόρτιση φύλλου σε  $45^\circ$  [20].

Όταν ένα έλασμα καταπονείται σε μόνο-αξονική διεύθυνση  $\pm 45^\circ$ , προκαλείται μία διαξονική κατάσταση τάσης σε κάθε ένα από τα ελάσματα  $+45^\circ$  και  $-45^\circ$  (δηλαδή στρώματα). Οι κανονικές τάσεις  $\sigma_{11}$  και  $\sigma_{22}$  στο σύστημα συντεταγμένων ελασμάτων

εξαρτάται τόσο από την εφαρμοζόμενη τάση εφελκυσμού  $\sigma_{xx}$  όσο και από την επαγόμενη τάση διάτμησης  $t_{xy}$ , ενώ η τάση διάτμησης  $\tau_{12}$  σχετίζεται μόνο με την εφαρμοζόμενη τάση εφελκυσμού  $\sigma_{xx}$ , έτσι ώστε:

$$\sigma_{11} = \frac{\sigma_{xx}}{2} + t_{xy}, \quad \sigma_{22} = \frac{\sigma_{xx}}{2} - t_{xy}, \quad \tau_{12} = \pm \frac{\sigma_{xx}}{2} \quad (1)$$

Αυτή η ανάλυση προϋποθέτει ότι δεν υπάρχει σύνδεση διάτμησης. Τα αντίστοιχα ενδοεπίπεδα στελέχη  $\varepsilon_{11}$  και  $\varepsilon_{22}$  και διάτμηση  $\gamma_{12}$  δίνονται από την εξίσωση 2.

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}}{2} \quad \gamma_{12} = \varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy} \quad (2)$$

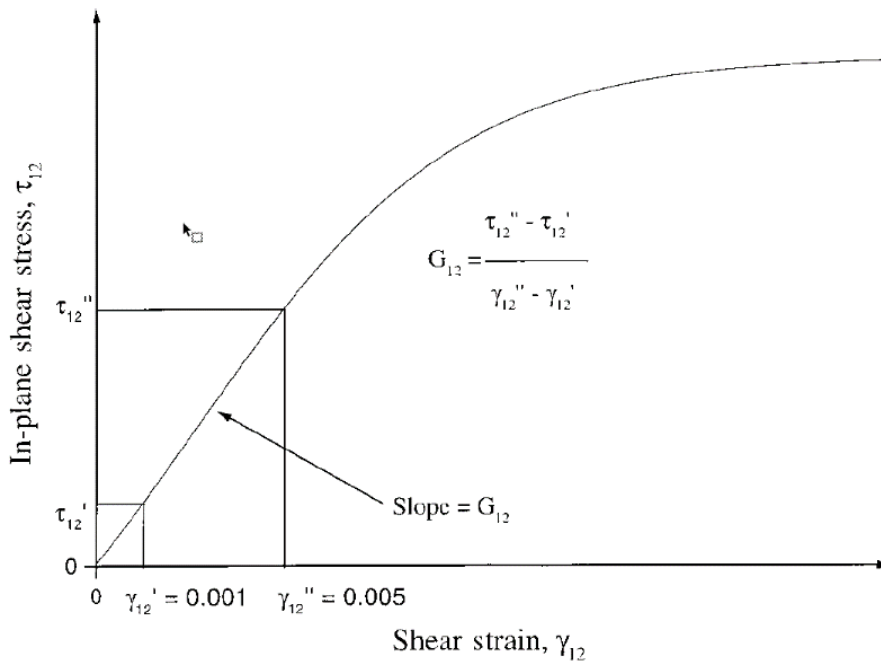
όπου τα  $\varepsilon_{xx}$  και  $\varepsilon_{yy}$  είναι τα κανονικά στελέχη παράλληλα και κάθετα στον άξονα δείγματος, αντίστοιχα.

Προκειμένου να προσδιοριστεί ο συντελεστής διάτμησης εντός του επιπέδου,  $G_{12}$ , τα στελέχη πρέπει να μετρηθούν παράλληλα και κάθετα προς τον άξονα δείγματος χρησιμοποιώντας είτε μετρητές τάσης είτε εκτενόμετρα. Η συνήθης προσέγγιση κατά τη χρήση μετρητών τάσης είναι η τοποθέτηση δύο ξεχωριστών μετρητών στο δείγμα όπως φαίνεται στην *Εικόνα 3.1* με χρήση κολλάς. Η ταχύτητα δοκιμής που δίνεται στο πρότυπο ISO είναι 2mm. Ο συντελεστής διάτμησης εντός του επιπέδου δίνεται από την Εξίσωση 3.

$$G_{12} = \frac{\sigma_{xx}}{2(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})} = \frac{t_{12} - t_{12}}{\gamma_{12} - \gamma_{12}} \quad (3)$$

λαμβάνεται από την αρχική κλίση της καμπύλης τάσης διάτμησης – τάσης ( $t_{12}$  έναντι  $G_{12}$ ) σε εύρος τάσης 0,1-0,5 %, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 3.2*. Η γεωμετρία του δείγματος έχει επιλεγεί για να διασφαλιστεί ότι ο συντελεστής διάτμησης δεν επηρεάζεται από τα φαινόμενα των άκρων, τα τελικά αποτελέσματα ή τη διαξονική κατάσταση του στρες εντός των επιμέρους ελασμάτων. Η αντοχή στο επίπεδο της διάτμησης,  $S_{12}$ , εκφράζεται ως

$$S_{12} = \frac{Pmax}{2bh} \quad (4)$$



**Εικόνα 3.2:** Καμπύλη Τάσης σε πείραμα μονό-αξονικής φόρτισης [21].

όπου το  $Pmax$  αντιστοιχεί στο εφαρμοζόμενο φορτίο σε αστοχία, και  $b$  και  $h$  είναι το πλάτος και το πάχος του δείγματος, αντίστοιχα. Η δοκιμή εφελκυσμού  $\pm 45^\circ$  παρέχει μία αποδεκτή μέθοδο για τον προσδιορισμό του συντελεστή διάτμησης, αλλά πρέπει να δοθεί προσοχή στην ερμηνεία των τελικών αποτελεσμάτων διάτμησης και καταπόνησης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα ελάσματα βρίσκονται σε κατάσταση μη αξονικής καταπόνησης και όχι καθαρή διάτμηση. Οι κανονικές τάσεις παρόμοιου μεγέθους με αυτές των τάσεων διάτμησης δρουν κατά μήκος των επιπέδων διάτμησης, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ρωγμών.

Πριν από το τελικό αποτέλεσμα συμβαίνουν πολλαπλές ρωγμές, περιστροφή ινών και ακμές ή εσωτερικές αποκολλήσεις, με την έναρξη του σπασίματος να καθυστερεί λόγω του περιορισμού που επιβάλλεται στο στρώμα από τα υπόλοιπα στρώματα. Η πραγματική αστοχία είναι δύσκολο να προσδιοριστεί, με τα περισσότερα πρότυπα που καθορίζουν την αντοχή διάτμησης που αντιστοιχούν είτε στο τελικό φορτίο που δημιουργείται κατά τη διάρκεια της δοκιμής είτε σε ένα καθορισμένο επίπεδο καταπόνησης. Συνιστάται στο πρότυπο ISO να τερματιστεί η δοκιμή σε  $\gamma_{12} = 5,0\%$ . Το μέγιστο φορτίο σε ή πριν από την καταπόνηση 5% λαμβάνεται ως αντοχή σε διάτμηση.



### 3.2.2 Μονό-αξονική φόρτιση ενός φύλλου σε γωνία 10°

Η δοκιμή εφελκυσμού σε γωνία 10° είναι μία μέθοδος που χρησιμοποιείται συνήθως για τον χαρακτηρισμό διάτμησης των ενισχυμένων με ίνες πολυμερών σύνθετων υλικών. Η δοκιμή συνίσταται σε φόρτωση μονό-αξονικής κατεύθυνσης πολυστρωματικού υλικού με ίνες προσανατολισμένες στις 10° στον άξονα φορτίου (Εικόνα 3.3). Μία διαξονική καταπόνηση προκαλείται στο κύριο σύστημα συντεταγμένων του υλικού όταν υποβάλλεται σε μονό-αξονικό εφελκυστικό φορτίο. Η γωνία 10° επιλέχθηκε για να ελαχιστοποιηθούν οι επιδράσεις των διαμηκών και εγκάρσιων καταπονήσεων  $\sigma_{11}$  και  $\sigma_{22}$  στην απόκριση διάτμησης. Σε γωνία 10° το στέλεχος διάτμησης πλησιάζει τη μέγιστη τιμή [3],[6]. Οι φυσιολογικές δυνάμεις στο επίπεδο και οι διατμητικές τάσεις και η διατμητική τάση (στο βασικό σύστημα συντεταγμένων υλικού) που αναπτύχθηκε εντός του δείγματος δίνονται από τις εξισώσεις:

$$\sigma_{11} = \sigma_{xx} \cos^2 \theta, \sigma_{22} = \sigma_{xx} \sin^2 \theta, \tau_{12} = \frac{1}{2} \sigma_{xx} \sin 2\theta \quad (5)$$

$$\gamma_{12} = (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}) \sin 2\theta + \gamma_{xy} \cos 2\theta \quad (6)$$

Όπου  $\theta=10^\circ$  οι εξισώσεις παίρνουν την μορφή :

$$\sigma_{11} = 0.970\sigma_{xx}, \sigma_{22} = 0.030\sigma_{xx}, \tau_{12} = 0.171\sigma_{xx} \quad (7)$$

Όπου  $\sigma_{xx}$  ισούται με την εφαρμοσμένη δύναμη P προς τις διαστάσεις του δοκίμιου (bxh).

Από το μετρητικό όργανο τάσεως που έχουμε βάλει στο κέντρο του δοκίμιου κατά την διάρκεια του πειράματος το οποίο έχει 3 αισθητήρες κολλημένους πάνω στην επιφάνεια σε κλίσεις (αισθητήρας 1 = 0°, αισθητήρας 2 = 45°, αισθητήρας 3 = 90°) προσδιορίζουμε τους τύπους:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_1, \varepsilon_{yy} = \varepsilon_3, \gamma_{xy} = 2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3 \quad (8)$$

Έτσι ο τύπος (8) παίρνει μια πιο απλοϊκή μορφή:

$$\gamma_{12} = 1.879\varepsilon_2 - 1.282\varepsilon_1 - 0.598\varepsilon_3 \quad (9)$$

Αλλιώς οι τάσεις μπορούν να υπολογίσουν με διαφορετικό μετρητικό όργανο (Delta rosette) όπου έχει διαφορετικές διεύθυνσης (αισθητήρας 1 = 0°, αισθητήρας 2 = +120° και αισθητήρας 3 = -120° κι προκύπτει ο τύπος (12)

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_1 \quad (10), \quad \varepsilon_{yy} = \frac{2\varepsilon_2 + 2\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{3} \quad (11), \quad \gamma_{xy} = \frac{2(\varepsilon_3 - \varepsilon_2)}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

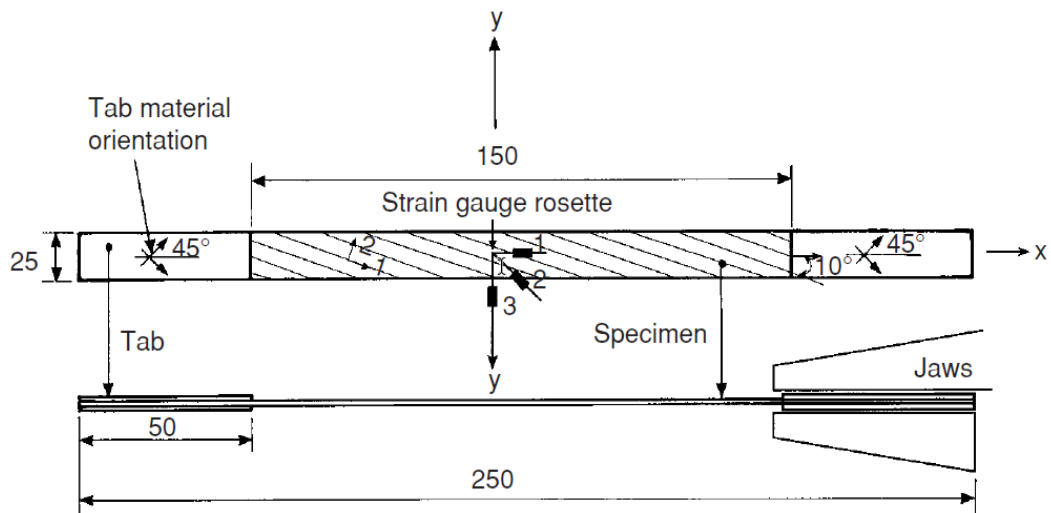
Και έπειτα μετά από αντικατάσταση των μεταβλητών στον τύπο (9) προκύπτει:

$$\gamma_{12} = 1.313\varepsilon_3 - 0.456\varepsilon_1 - 0.857\varepsilon_2 \quad (13)$$

Το κύριο μέλημα αυτής της μεθόδου δοκιμής είναι η μη ομοιομορφία του πεδίου τάσης κοντά στις λαβές, η οποία προκαλείται από περιορισμούς στα άκρα που εμποδίζουν την περιστροφή, προκαλώντας έτσι ροπές και δυνάμεις διάτμησης στα άκρα. Η χρήση μεγάλων δειγμάτων (αναλογίες διαστάσεων 10 ή μεγαλύτερες) προάγει μία κατάσταση ομοιόμορφης διατμητικής τάσης στο κέντρο του δείγματος και έτσι μειώνει το σφάλμα στο μέτρο διάτμησης που προκαλείται από τους περιορισμούς των άκρων. Ωστόσο, απαιτείται ένας πολύπλοκος διορθωτικός συντελεστής για τον υπολογισμό του πραγματικού συντελεστή διάτμησης.

Η αστοχία των δειγμάτων εκτός άξονα 10° συμβαίνει λόγω του συνδυασμού εγκάρσιων τάσεων εφελκυσμού και διάτμησης. Κατά συνέπεια, η μέθοδος τείνει να υποτιμά την απόλυτη αντοχή και καταπόνηση. Η έναρξη της αστοχίας είναι καταστροφική, με μία ενιαία ευθεία ρωγμή να αναπτύσσεται νωρίς, να διαδίδεται γρήγορα σε όλη την τομή και να διαχωρίζει το δείγμα σε δύο φύλλα.

Μία πρόσφατη εξέλιξη ήταν η χρήση λοξών φύλλων σύσφιξης για τη δοκιμή αυτών των δειγμάτων. Αριθμητικές και πειραματικές αναλύσεις έχουν δείξει ότι παρόλο που παράγεται μία κατάσταση ομοιογενούς διατμητικής τάσης, εξακολουθούν να υπάρχουν εγκάρσιες τάσεις εφελκυσμού.

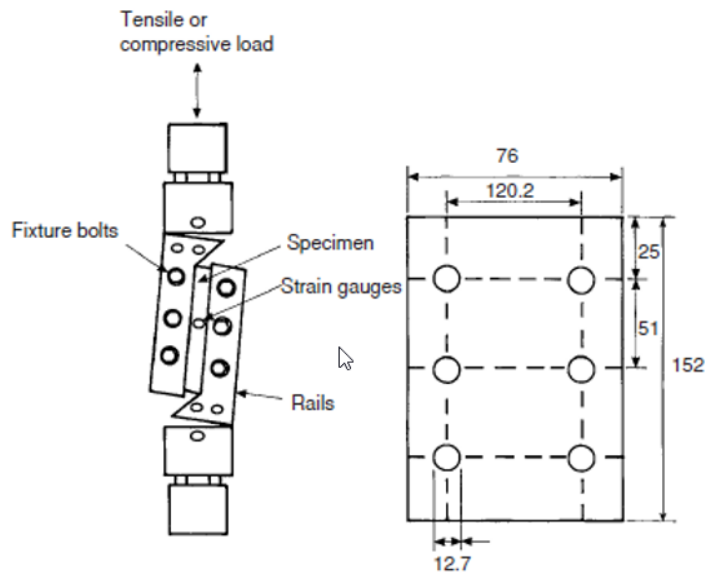


**Εικόνα 3.3:** Σχεδιάγραμμα πειράματος μονό-αξονικής φόρτισης σε 10° [22].

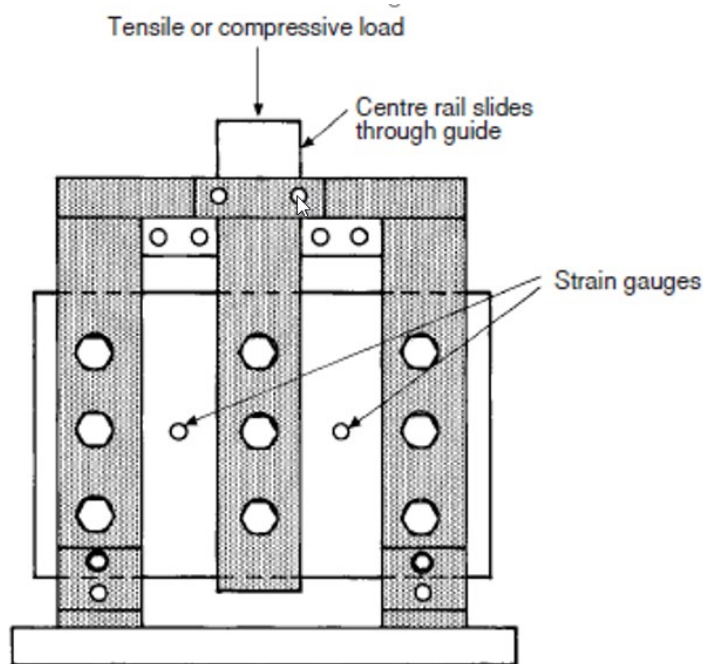
### 3.2.3 Δοκιμές διάτμησης με σφικτήρες σε παράλληλη διάταξη (RAIL SHEAR TEST)

Μία τρίτη μέθοδος για τον προσδιορισμό διάτμησης των επιπέδων των ενισχυμένων με ίνες πολυμερών σύνθετων είναι η δοκιμή διάτμησης με σφικτήρες σε παράλληλη διάταξη. Η μορφολογία της κατασκευής αυτής έχει παρόμοια γεωμετρία με τις ράγες τρένου και για αυτό το λόγο το πείραμα αυτό έχει πάρει την ονομασία rail shear test. Αυτή η μέθοδος δοκιμής χρησιμοποιείται εκτενώς σε ολόκληρη την αεροδιαστημική βιομηχανία, με τις ιδιότητες εντός του αεροσκάφους να προσδιορίζονται με την επιβολή φορτίων διάτμησης στο πολύ-στρωματικό υλικό χρησιμοποιώντας ένα εξάρτημα δύο ράβδων (*Εικόνα. 3.4*) ή τριών ράβδων (*Εικόνα. 3.5*).

Υπάρχουν 2 μέθοδοι για την δοκιμή αυτή η μια είναι η διάτμηση με δύο σφικτήρες και (ii) η διάτμηση με τρεις σφικτήρες, οι σχετικές γεωμετρικές δειγμάτων δοκιμής καθορίζονται στο πρότυπο ASTM D 4255, ένας τυπικός οδηγός για τον έλεγχο ιδιοτήτων διάτμησης εντός του επιπέδου σύνθετων. Αυτός ο τυποποιημένος οδηγός καλύπτει τον προσδιορισμό των επιπέδων διάτμησης των επιπέδων συνεχών και ασυνεχών ευθυγραμμισμένων υλικών (προσανατολισμοί 0° και 90°), συμμετρικά ελασματοποιημένα και τυχαία προσανατολισμένα ινώδη ελάσματα.



**Εικόνα 3.4:** Μέθοδος δοκιμής διάτμησης με εξάρτημα με 2 σφικτήρες (2 rail shear test) [23].



**Εικόνα 3.5:** Δοκιμή διάτμησης με την χρήση εξαρτήματος με 3 σφικτήρες (3 rail shear test) [24].

Η δοκιμή διάτμησης με δυο σφικτήρες (2 rail shear test) περιλαμβάνει τη σύσφιξη των μακριών πλευρών ενός ορθογώνιου δείγματος μεταξύ δύο ζευγών άκαμπτων σφικτήρων, με τις άλλες πλευρές να παραμένουν χωρίς περιορισμούς (Εικόνα 3.4). Οι σφικτήρες αυτοί συνήθως βιδώνονται στο δείγμα δοκιμής. Εφαρμόζεται δύναμη εφελκυσμού στις ράγες, η οποία προκαλεί ένα φορτίο διάτμησης εντός του επιπέδου στο δείγμα. Το πρότυπο ASTM D 4255 καθορίζει μήκος δείγματος

76mm και πλάτος 152mm . Ένας μετρητής τάσης, τοποθετημένος με ειδική κόλλα στο δείγμα στους 45° με τον διαμήκη άξονα του δείγματος, χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της διάτμησης.

Η διατμητική ισχύς, ο συντελεστής διάτμησης και η διάτμηση,  $G_{xy}$ , μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$S_{xy} = \frac{P_{max}}{Lh} \quad (14)$$

$$G_{xy} = \frac{\Delta t_{xy}}{\Delta \gamma_{\chi\nu}} = \frac{\Delta P}{2Lh\Delta \epsilon_{45}} \quad (15)$$

όπου το  $P_{max}$  είναι το απόλυτο φορτίο αστοχίας, L το μήκος του δείγματος κατά μήκος των σιδηροτροχιών και το πάχος του δείγματος.

Οι μεταβλητές  $\Delta P$  και  $\Delta \epsilon_{45}$  είναι η αλλαγή στο εφαρμοζόμενο φορτίο και καταπόνηση (για + 45° ή - 45° εύρος καταπόνησης) στην αρχική γραμμική περιοχή της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης.

Η δοκιμή διάτμησης τριών σφικτήρων (συμμετρική), αποτελείται από τρία ζεύγη σιδηροτροχιών που στερεώνονται στο δείγμα δοκιμής, συνήθως με μπουλόνια (Εικόνα. 3.5). Τα δύο εξωτερικά ζεύγη σφικτήρων συνδέονται με μία πλάκα βάσης, η οποία στηρίζεται στη δοκιμαστική μηχανή. Ο τρίτος σφικτήρας που βρίσκεται στο κέντρο καθοδηγείται μέσω μιας σχισμής στην κορυφή του εξαρτήματος βάσης. Ο κεντρικός σφικτήρας συνήθως φορτώνεται σε θλίψη, καθώς το πρώτο δεν απαιτεί στερέωση του εξαρτήματος βάσης στο μηχάνημα δοκιμής. Ο συντελεστής διάτμησης μετρείται στο κέντρο και των δύο τμημάτων δοκιμής χρησιμοποιώντας μετρητές πίεσης συνδεδεμένοι στους 45° με τον διαμήκη άξονα του δείγματος. Το πλάτος και το μήκος δείγματος είναι 137mm και 152mm, αντίστοιχα η ισχύς διάτμησης, ο συντελεστής διάτμησης  $S_{xy}$  και η διάτμηση,  $G_{xy}$ , μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις.

$$S_{xy} = \frac{P_{max}}{2Lh} \quad (16)$$

$$G_{xy} = \frac{\Delta t_{xy}}{\Delta \gamma_{xy}} = \frac{\Delta P}{4Lh\Delta \varepsilon_{45}} \quad (17)$$

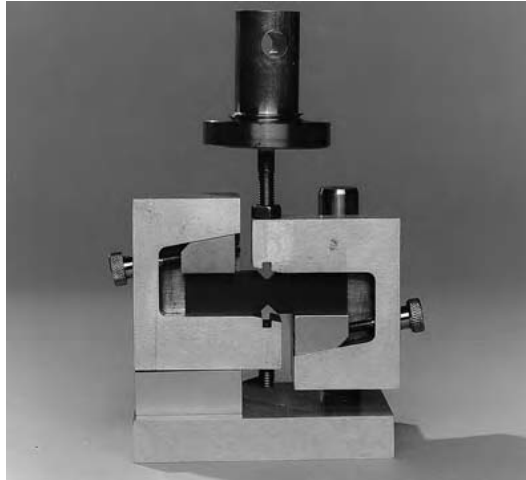
Συνιστάται τα ελάσματα να είναι 1,27–3,17mm (δηλαδή 0,050in – 0,12in) πάχους. Λεπτά ελάσματα τείνουν να λυγίζουν σε χαμηλά φορτία, ενώ τα παχύτερα ελασματοποιημένα φύλλα ενδέχεται να έχουν αντοχή σε διάτμηση που υπερβαίνει την ικανότητα σύσφιξης της ράγας. Οι διαστάσεις δείγματος και για τις δύο δοκιμές διάτμησης ράγας φαίνονται στις *Εικόνες 3.5 και 3.4*. Τα δείγματα βιδώνονται στους σφικτήρες χρησιμοποιώντας μπουλόνια 9,5mm. Τα μπουλόνια εισάγονται μέσω του δείγματος μέσω διατρημένων οπών διαμέτρου 12,5mm.

Οι οπές είναι υπερβολικά μεγάλες ώστε να διασφαλιστεί ότι το φορτίο διάτμησης εισάγεται στο έλασμα μέσω δυνάμεων τριβής μεταξύ του δείγματος και των σφικτήρων. Είναι σημαντικό να μην υπάρχει επαφή μεταξύ υλικού και μπουλονιών. Εάν η ροπή είναι πολύ χαμηλή, το δείγμα θα γλιστρήσει και τα μπουλόνια θα αρχίσουν να φέρουν πάνω στο δείγμα και εάν η ροπή είναι πολύ υψηλή, τότε οι αστοχίες μπορεί να προκληθούν από τις υψηλές τοπικές συμπιεστικές τάσεις πάχους. Η συνιστάμενη ροπή σε κάθε μπουλόνι είναι 100 Nm και τα μπουλόνια μπορεί να χρειαστεί να σφίξουν κατά τη φόρτωση. Η προετοιμασία και η δοκιμή δειγμάτων είναι χρονοβόρα και δαπανηρή [5].

### 3.2.4 Δοκιμές διάτμησης δοκού με εγκοπές V (ή Iosipescu)

Η δοκός τύπου V είναι μια δοκός όπου η άκρη της έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του δοκίμιου για την πειραματική διαδικασία έχει σχήμα V. Η μέθοδος αυτή αρχικά προήλθε από τον Iosipescu για το προσδιορισμό διατμητικών ιδιοτήτων σε μέταλλα, έπειτα προσαρμόστηκε για τον προσδιορισμό μηχανικών ιδιοτήτων σε σύνθετα υλικά, όπως πλαστικά ενισχυμένα με ίνες (ASTM D-5379) από τους Adams και Walrath. Το δοκίμιο έχει τετραγωνικό σχήμα και είναι σε μορφή «Flat», όπου φαίνεται στην *Εικόνα 3.6* και συνήθως αναφέρεται ως πειραματικό δοκίμιο «Wyoming». Οι δυο άκρες της δοκού που έρχονται σε επαφή με την επιφάνεια του δοκίμιου έχουν γωνία στις 90 μοίρες με διάμετρο 1.3mm. Το δοκίμιο έχει μήκος 76 mm και πλάτος 20 mm με το πάχος του να κυμαίνεται ανάμεσα στα 3 με 4mm, επίσης μπορούν να δοκιμαστούν και μικρότερου πάχους δοκίμια, αν και αυτό προϋποθέτει ότι οι άκρες του

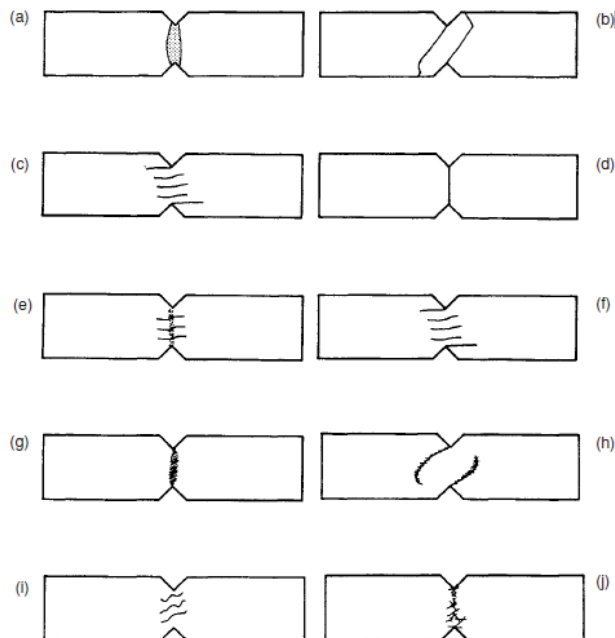
δοκιμίου με του εξαρτήματος θα είναι ενωμένες με μια στρώση κόλλας περίπου στα 1,5mm για να αποφευχθούν πρόωρες ζημιές και τοπικές θραύσεις.



**Εικόνα 3.6:** Εξάρτημα δοκιμής διάτμησης με την μέθοδο locipescu [25].

$$S_{xy} = \frac{P_{max}}{wh} \quad (18)$$

$$G_{xy} = \frac{\Delta t_{xy}}{\Delta \gamma_{xy}} = \frac{\Delta P}{wh \Delta(\epsilon_{45} - \epsilon_{-45})} \quad (19)$$



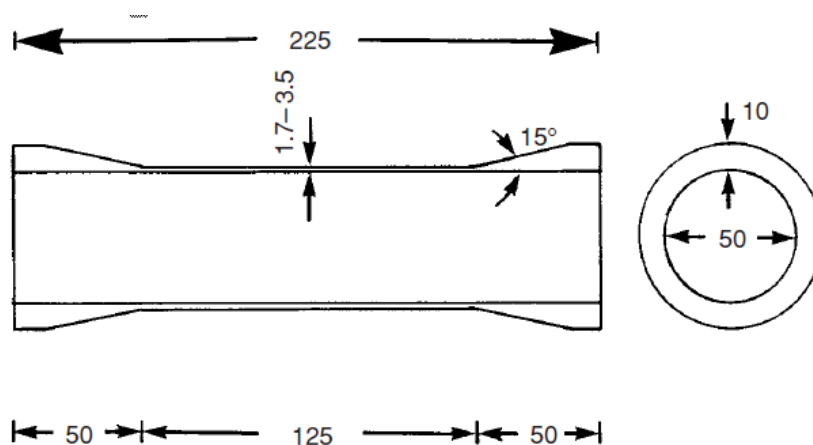
**Εικόνα 3.6:** Τύποι αστοχιών δοκιμίου από την μέθοδο locipescu. Τυπικές λειτουργίες αστοχίας για δοκιμή διάτμησης με εγκοπή V. (a) Μη ενισχυμένη θερμοπλαστική διάτμηση, (b) μη ενισχυμένο θερμοσκληρυνόμενο, (c) 0° συνεχές μονής κατεύθυνσης, (d) 90° συνεχές μονής κατεύθυνσης, (e,f)

ενδοελασματική ενίσχυση με πλέξη, (g) θερμοπλαστικό ενισχυμένο με μακριές ίνες, (h) εφελκυστική αστοχία σε θερμοπλαστικό ενισχυμένο με ίνες, (i) μορφοποίηση φύλλων (SMC), (j) ραγισμένη επιφάνεια (CSM) [26].

### 3.2.5 Στρέψη κυλινδρικού σωλήνα

Η στρέψη ενός κυλινδρικού σωλήνα λεπτού τοιχώματος είναι μία μέθοδος άμεσης εφαρμογής φορτίου διάτμησης σε ενισχυμένα με ίνες πλαστικά σύνθετα υλικά και από εφαρμοσμένη μηχανική άποψη είναι η πιο επιθυμητή μέθοδος χαρακτηρισμού διάτμησης.

Σε αυτή την δοκιμή, προκαλείται κατά προσέγγιση κατάσταση καθαρής τάσης διάτμησης σε κυλινδρικό σωλήνα με περιμετρικά τυλιγμένο λεπτό τοίχωμα που υπόκειται σε καθαρή ροπή γύρω από τον διαμήκη άξονα του δείγματος. Η διατμητική τάση κατανέμεται ομοιόμορφα γύρω από την περιφέρεια και κατά μήκος του δείγματος. Επειδή το πάχος του τοιχώματος είναι μικρό σε σύγκριση με τη μέση ακτίνα του σωλήνα, τα δείγματα συνδέονται με κόλλα για να κλείνουν ομόκεντρα συναρμολογημένα κυκλικά εξαρτήματα, τα οποία εισάγονται σε κάθε άκρο του δείγματος. Τα άκρα του δείγματος είναι τυλιγμένα με πρόσθετο υλικό και κωνικά για να εξασφαλίσουν ότι η αστοχία θα συμβεί εντός του μήκους του μετρητή. Τα μήκη δεσμού στα άκρα πρέπει να είναι 20mm. Τα εξαρτήματα που είναι προσαρτημένα στο δείγμα τοποθετούνται ομόκεντρα στη δοκιμαστική μηχανή.



**Εικόνα 3.8:** Σχέδιο Δοκίμιου για την Μέθοδο με επιθυμητές διαστάσεις [27].



Το φορτίο εφαρμόζεται με σταθερή ταχύτητα ροπής  $2^\circ / \text{λεπτό}$ . Οι αξονικές τάσεις που προκύπτουν από την παραμόρφωση του δείγματος λόγω διατμητικών φορτίων μπορούν να αποφευχθούν επιτρέποντας την ελεύθερη αξονική μετατόπιση. Ένα παράδειγμα εποξειδικού δείγματος ενισχυμένου με ίνες άνθρακα με κωνικό άκρο οπλισμού φαίνεται στην *Εικόνα 3.8*

Τα φορτία τα οποία προκαλούνται από την δοκιμή δίνονται μέσω τριών συνδεδεμένων μετρητών τάσης τα οποία είναι τοποθετημένα σε διαφορετικές διευθύνσεις ( $0^\circ / 45^\circ / 90^\circ$ ), στο κέντρο του δείγματος. Οι μετρητές τάσης έχουν μήκος μετρητή 6mm. Οι διαμήκεις και εγκάρσιοι μετρητές τάσης παρακολουθούνται για να διασφαλιστεί ότι δεν υπάρχουν σημαντικές δυνάμεις κάμψης στο δείγμα κατά τη διάρκεια της δοκιμής και ότι δεν υπάρχουν φορτία κάμψης κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Η απλοποίηση των δεδομένων γίνεται πιο κατανοητή, με την κατακόρυφη τάση και το συντελεστή διάτμησης να υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις:

$$t_{xy} = \frac{2TRo}{\pi(Ro^4 - Ri^4)} \quad (20)$$

$$G_{xy} = \frac{\Delta t_{xy}}{\Delta \gamma_{xy}} = \frac{\Delta t_{xy}}{\Delta(\epsilon_{45} - \epsilon_{-45})} \quad (21)$$

όπου  $T$  είναι η εφαρμοσμένη ροπή,  $Ro$  το εξωτερικό ακτινικό όριο και  $Ri$  το εσωτερικό ακτινικό όριο του κυλίνδρου.

Η διατμητική καταπόνηση προσδιορίζεται από τον μέσο όρο των διατμητικών στελεχών που μετρούνται χρησιμοποιώντας τους μετρητές τάσης σε  $\pm 45^\circ$ . Η αστοχία ξεκινά να παρουσιάζεται στην εξωτερική επιφάνεια, με την τάση διάτμησης  $G_{xy}$ .

Το κύριο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το κόστος και η δυσκολία που σχετίζονται με την κατασκευή και τον έλεγχο σωληνοειδών δειγμάτων. Το απαγορευτικό κόστος υλικού και κατασκευής και η ανάγκη εξειδικευμένου εξοπλισμού δοκιμών έχουν περιορίσει τη χρήση αυτής της μεθόδου δοκιμής. Ωστόσο, η μέθοδος χρησιμοποιείται συχνά για τη δημιουργία δεδομένων αναφοράς για σύγκριση με άλλες

μεθόδους δοκιμής επειδή η κατάσταση τάσης εντός κυλίνδρων σε στρέψη πλησιάζει μία ιδανική κατάσταση ομοιόμορφης διάτμησης.

### 3.2.6 Μέθοδος Διάτμησης πλάκας

Στη δοκιμή διάτμησης πλάκας, που φαίνεται στην *Εικόνα 3.9*, μια τετράγωνη πλάκα τοποθετείται αναμεσά στις δύο βάσεις η οποίες έχουν δυο άκρα η καθεμιά και είναι διαγώνιες μεταξύ τους όπου θλιπτικό φορτίο εφαρμόζεται με ένα σταθερά ρυθμό στις βάσεις αυτές. Η τάση που προκαλείται στην πλάκα χαρακτηρίζεται ως πραγματική τάση διάτμησης. Το συνολικό φορτίο καταγράφεται ως συνάρτηση της μετατόπισης που προκύπτει.

Η πλάκα πρέπει να έχει τετράγωνο ή ορθογώνιο σχήμα με τις διαγώνιες να είναι ίσου μήκους και ο λόγος μήκους προς πάχος να είναι  $\geq 35$  για να ελαχιστοποιηθούν τα διατμητικές επιδράσεις πάχους. Αυτή η μέθοδος δοκιμής είναι ακατάλληλη για υλικά που δεν είναι εγκάρσια ισότροπα ή ομοιογενή μέσω της τομής (π.χ. πολυστρωματικά φύλλα που περιλαμβάνουν διασταυρώσεις  $0^\circ/90^\circ$ ). Για αυτά τα υλικά, το μέτρο διάτμησης που παράγεται κάτω από καμπτικά φορτία δεν είναι πλέον ισοδύναμο με το συντελεστή διάτμησης εντός του επιπέδου.



**Εικόνα 3.9:** Μέθοδος διάτμησης πλάκας [28].

Το μετρό διάτμησης  $G_{12}$  υπολογίζεται με βάση την μετατόπιση  $\Delta\delta\rho$  των σημείων φόρτισης από τον τύπο παρακάτω :

$$G_{12} = \frac{3\Delta P a b K}{4\Delta\delta\rho h^3} \quad (22)$$

Και από την μετατόπιση στο κέντρο της πλάκας  $\Delta\delta c$

$$G_{12} = \frac{3\Delta P a b K}{8\Delta\delta c h^3} \quad (23)$$

Όπου  $a$  και  $b$  είναι η διαστάσεις της πλάκας,  $h$  το πάχος και  $\Delta P$  η αλλαγή στην φόρτιση. Η τοποθέτηση τις πλάκας για την δοκιμή δεν είναι πάντα 100% ακριβής για αυτό υπάρχει κι ένας συντελεστής διόρθωσης  $K(r)$ .

$$K(r) = 3r^2 - 2r - 2(1 - r)^2 - \ln(1 - r) \quad (24)$$

Όπου  $r$  είναι ο λόγος  $L$ : διαγώνιος μήκος του αναμεσά στα σημεία που δίνουν το φορτίο με το  $d$ : το μήκος της πλάκας διαγώνια.

Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα κι μειονεκτήματα των δοκίμων διάτμησης.

**Πίνακας 2:** Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μεθόδων δοκίμων διάτμησης.

Μέθοδος	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<b>+/-45</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Η προετοιμασία του δοκίμιου και ο εξοπλισμός του πειράματος είναι σαφή.</li> <li>• Τα δεδομένα υπολογίζονται ευκολά.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Είναι χρήσιμη για δοκιμές σε σύνθετα ενισχυμένα με ίνες.</li> <li>• Ειδικά διαμορφούμενες στρώσεις στο υλικό.</li> <li>• Η καταπόνηση εξαρτάται από τον αριθμό των στρώσεων.</li> </ul>

<b>10 offset</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Έχουμε παραπάνω στοιχεία σε μηχανικές ιδιότητες στο εσωτερικό του δοκίμιου.</li> <li>• Η προετοιμασία του δοκίμιου είναι σαφής.</li> <li>• Οικονομικός εξοπλισμός.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Η κατανόηση των δεδομένων είναι περίπλοκη.</li> <li>• Δεν υπάρχουν συγκεκριμένες προδιαγραφές.</li> <li>• Χρησιμότητα μόνο για σύνθετα ενισχυμένα με ίνες.</li> </ul>
<b>Με Ράβδους</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Συμβατή δοκιμή με τα περισσότερα είδη υλικού.</li> <li>• Εύκολη κατανόηση δεδομένων.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ακριβός εξοπλισμός.</li> <li>• Δυσκολία προετοιμασίας δοκίμιου.</li> <li>• Χρειάζεται ειδική βάση.</li> </ul>
<b>Με εγκοπές V</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Συμβατή δοκιμή με τα περισσότερα είδη υλικού.</li> <li>• Δεν χρειαζόμαστε μεγάλη ποσότητα υλικού.</li> <li>• Ευκολία στην κατανομή δεδομένων.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μεγάλη σημασία στην ακρίβεια της προετοιμασίας του υλικού.</li> <li>• Χρειάζεται ειδική βάση.</li> </ul>
<b>Συστροφή πλάκας</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Συμβατή δοκιμή με τα περισσότερα είδη υλικού.</li> <li>• Οικονομική δοκιμή.</li> <li>• Εύκολη κατανομή δεδομένων.</li> </ul>	
<b>Στρέψη Σωλήνα</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Συμβατή δοκιμή με τα περισσότερα είδη υλικού.</li> <li>• Εύκολη κατανομή δεδομένων.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ακριβή δοκιμή.</li> <li>• Χρονοβόρα προετοιμασία δείγματος και εξοπλισμού.</li> <li>• Ειδική βάση για την σωστή σύσφιξη του σωλήνα.</li> </ul>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### “ΘΛΙΨΗ”

#### 4.1 Εισαγωγή στην θλίψη

Οι πιο ελαφριές κατασκευές και τα δομικά τους μέρη περιλαμβάνουν σημεία στην επιφάνεια τους, τα οποία μπορούν να δεχτούν φόρτιση με απευθείας θλίψη ή συνδυασμό φορτίων κάμψης και θλίψης. Η συνήθης διαδικασία σχεδιασμού για ελαφριές δομές επιχειρεί να εισάγει καθαρά θλιπτικά φορτία και εφελκυστικά φορτία. Η καμπτική φόρτιση σε κατασκευές τύπου sandwich, για παράδειγμα, μετασχηματίζεται σε ουσιαστικά καθαρή θλιπτική και εφελκυστική φόρτωση δοκών ή επιφανειών. Τα σύνθετα υλικά είναι ιδιαίτερα προσαρμόσιμα σε τέτοια σχέδια λόγω της υψηλής ορθοτροπίας τους.

Η αξονική ακαμψία σε μια δοκό η οποία καταπονείται από θλιπτικά φορτία μπορεί να ελέγχεται από την επιφάνεια εγκάρσιας διατομής (cross sectional area) η οποία είναι ανάλογη του βάρους. Η δυσκαμψία των αξονικά συμπιεσμένων επιφανειών έχει ιδιαίτερη σημασία, δεδομένου ότι η παραμόρφωση κατά την διάρκεια καταπόνησης πρέπει κανονικά να αποφεύγεται. Αυτή η ακαμψία μπορεί να μεταβληθεί με γεωμετρικά μέσα, για παράδειγμα, με τη χρήση σωλήνων αντί ράβδων, σάντουιτς αντί για απλές πλάκες και άλλα.

Οι τάσεις σε ένα μέρος μιας συγκεκριμένης γεωμετρίας μπορούν να μειωθούν μόνο αυξάνοντας την διατομή υπό φορτίο. Η υψηλή ειδική ακαμψία και η αντοχή τόσο στον εφελκυσμό όσο και στη θλίψη είναι επιθυμητά χαρακτηριστικά για το ιδανικά ελαφρύ δομικό υλικό. Τα ενισχυμένα με ίνες πλαστικά (σε μήτρα) σύνθετα προτείνονται ιδιαίτερα λόγω της υψηλής ανθεκτικότητας σε εφελκυσμό. Ωστόσο, η συγκριτικά χαμηλή αντοχή σε θλίψη ορισμένων σύνθετων υλικών, για παράδειγμα εκείνα που είναι ενισχυμένα με ίνες αραμιδίου, μειώνουν τις πιθανές εφαρμογές.

Ιδανικά, τα ινώδη σύνθετα ενδέχεται να αστοχήσουν στη θλίψη χρησιμοποιώντας το πλήρες δυναμικό της ενίσχυσης, καθώς από την μια η αναλογία θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής είναι χαμηλή για τις εξαιρετικά ανισότροπες ίνες, αλλά από την άλλη η αντοχή στη θλίψη από ενισχυμένα σύνθετα ινών γυαλιού είναι πιθανώς υψηλότερη από την αντοχή εφελκυσμού τους. Επομένως, τα πειραματικά στοιχεία

δείχνουν ότι η αστοχία στην θλίψη των σύνθετων υλικών, που περιέχουν ίνες υψηλής αντοχής σε θλίψη, οφείλεται στον λυγισμό των ινών και όχι στην αστοχία θλίψης. [5].

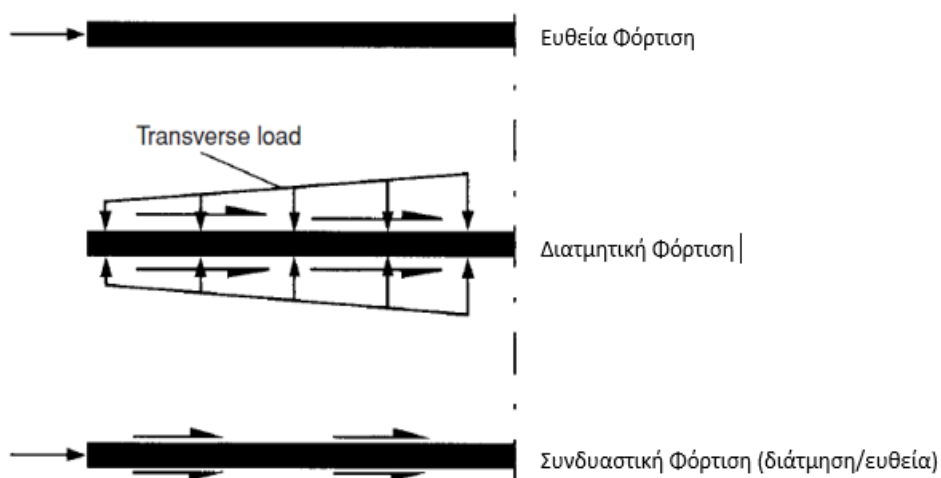
## 4.2 Εξοπλισμός δοκίμων θλίψης

Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι για την εφαρμογή ενός θλιπτικού φορτίου σε ένα δείγμα. Αρχικά, η άμεση (ευθεία φόρτιση) του άκρου του δείγματος, έπειτα η διατμητική φόρτιση του δείγματος και τέλος η «μικτή» ευθεία και διατμητική φόρτωση .

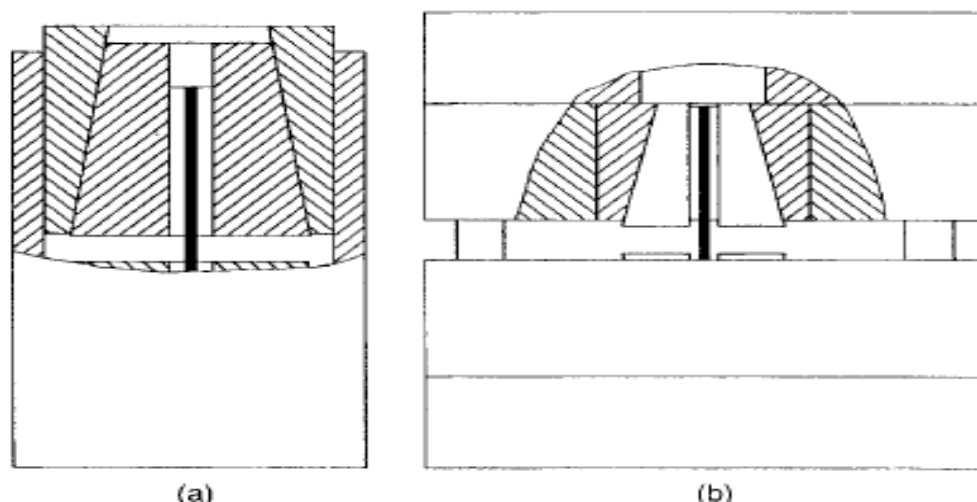
Η άμεση φόρτιση του άκρου του δείγματος δεν είναι κατάλληλη για υψηλής αντοχής σύνθετα. Εξαιτίας της χαμηλής εγκάρσιας και της ενδο-ελασματικής αντοχής, τα δείγματα αποτυγχάνουν με την τελική θλίψη, που συχνά αναφέρεται ως «ξετύλιγμα» ή διαμήκη διάσπαση.

Η καταπόνηση διάτμησης του δείγματος η οποία είναι συνήθως παρόμοια με την μέθοδο ελέγχου εφελκυσμού, αποτελεί την πιο κοινή μέθοδο. Το σχήμα, το υλικό και η ακρίβεια των τελικών συντελεστών είναι πιθανό να επηρεάσουν την αστοχία και το τελικό αποτέλεσμα αντοχής.

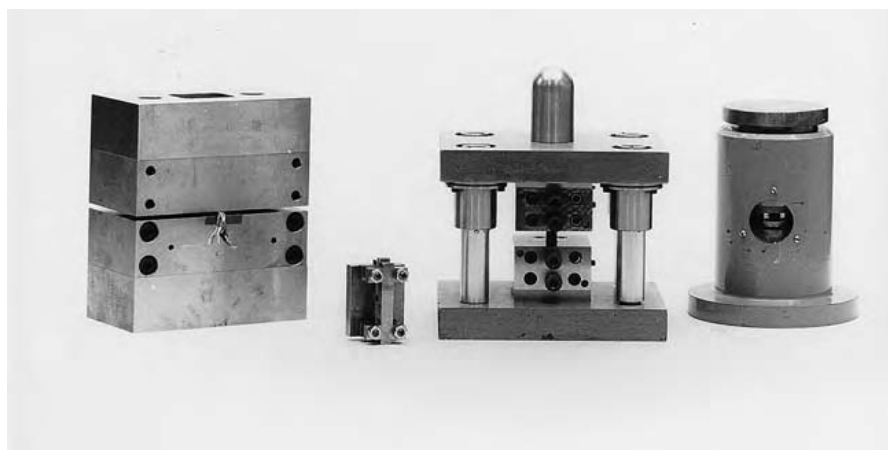
Ένα από τα πρώτα εξαρτήματα που αναπτύσσονται χρησιμοποιώντας αυτή την αρχή είναι γνωστό ως το αναπόσπαστο εξάρτημα Celanese. Το δείγμα συγκρατείται σε κωνικές λαβές σφήνας οι οποίες στεγάζονται σε μία κωνικής διαμορφούμενη θήκη (tapered sleeve) όπου ένας εξωτερικός κύλινδρος διατηρεί την ευθυγράμμιση των τμημάτων. Όταν εφαρμόζεται φορτίο μεταδίδεται στο δείγμα με διάτμηση, μέσω της τριβής μεταξύ του δείγματος και των λαβών.



**Εικόνα 4.1:** Μέθοδοι καταπόνησης για πείραμα θλίψης [29].



**Εικόνα 4.2:** Σχεδιαστική αναπαράσταση του εξαρτήματος Celanese [30].



**Εικόνα 4.3:** Εργαλεία / εξαρτήματα πλήρως συναρμολογημένα για πειράματα θλίψης. Το 1<sup>ο</sup> και το 2<sup>ο</sup> αφορούν πείραμα με ευθεία φόρτιση, το 3<sup>ο</sup> αφορά διαμητική φόρτιση και το 4ο είναι το εξάρτημα Celanese (μικτά φορτία) [31].

Αυτό το εξάρτημα χρειάζεται προσεκτική προσαρμογή στο πάχος του δείγματος αν η ανομοιόμορφη κατανομή φορτίου στους κώνους δεν οδηγεί σε παραμόρφωση της κωνικής θήκης και τριβή με τον εξωτερικό κύλινδρο. Εάν δεν έχουν τηρηθεί ακριβείς διαστάσεις του πάχους δείγματος, οι κωνικές σφήνες σχηματίζουν μία γραμμική επαφή με την κωνική θήκη, με αποτέλεσμα την αστάθεια του δείγματος και, κατά συνέπεια, χαμηλότερες τιμές αντοχής. Μία θεμελιώδης τροποποίηση του σκελετού από το εξάρτημα Celanese αναπτύχθηκε από το Ινστιτούτο Τεχνολογικής Έρευνας του Illinois (IITRI). Εδώ χρησιμοποιούνται συγκολλημένες λαβές με επίπεδη επιφάνεια, οι οποίες ταιριάζουν σε υποδοχή η οποία έχει κατασκευαστεί σε τεράστια χαλύβδινα τεμάχια, αντί για κωνική θήκη, έτσι τα δείγματα από διαφορετικά πάχη

μπορούν εύκολα να ταιριάξουν. Τα χαλύβδινα τεμάχια ευθυγραμμίζονται με οδηγούς και γραμμικά έδρανα. Ένα σχηματικό διάγραμμα της διατάξεως IITRI παρουσιάζεται στην *Εικόνα 4.2* (β) και τα συναρμολογημένα και αποσυναρμολογούμενα εξαρτήματα φαίνονται στην *Εικόνα 4.3*. Το βάρος αυτού του εξαρτήματος, περίπου 250 N, μειώνει σημαντικά την ευκολία χρήσης.

Η τροποποιημένη εκδοχή της κατασκευής του εξαρτήματος Celanese του Πανεπιστημίου Wyoming χρησιμοποιεί τραπεζοειδείς λαβές σφήνας παρόμοιες με το εξάρτημα IITRI. Αυτή η προσέγγιση αφήνει το εργαλείο λιγότερο ευάλωτο στα προβλήματα που προκαλούνται από τη μεταβλητότητα του πάχους των δειγμάτων, στην οποία υπόκειται ο αρχικός σχεδιασμός που χρησιμοποιεί κωνικά εξαρτήματα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε όλα τα προαναφερθέντα εξαρτήματα το άκρο του δείγματος είναι ενεργό κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

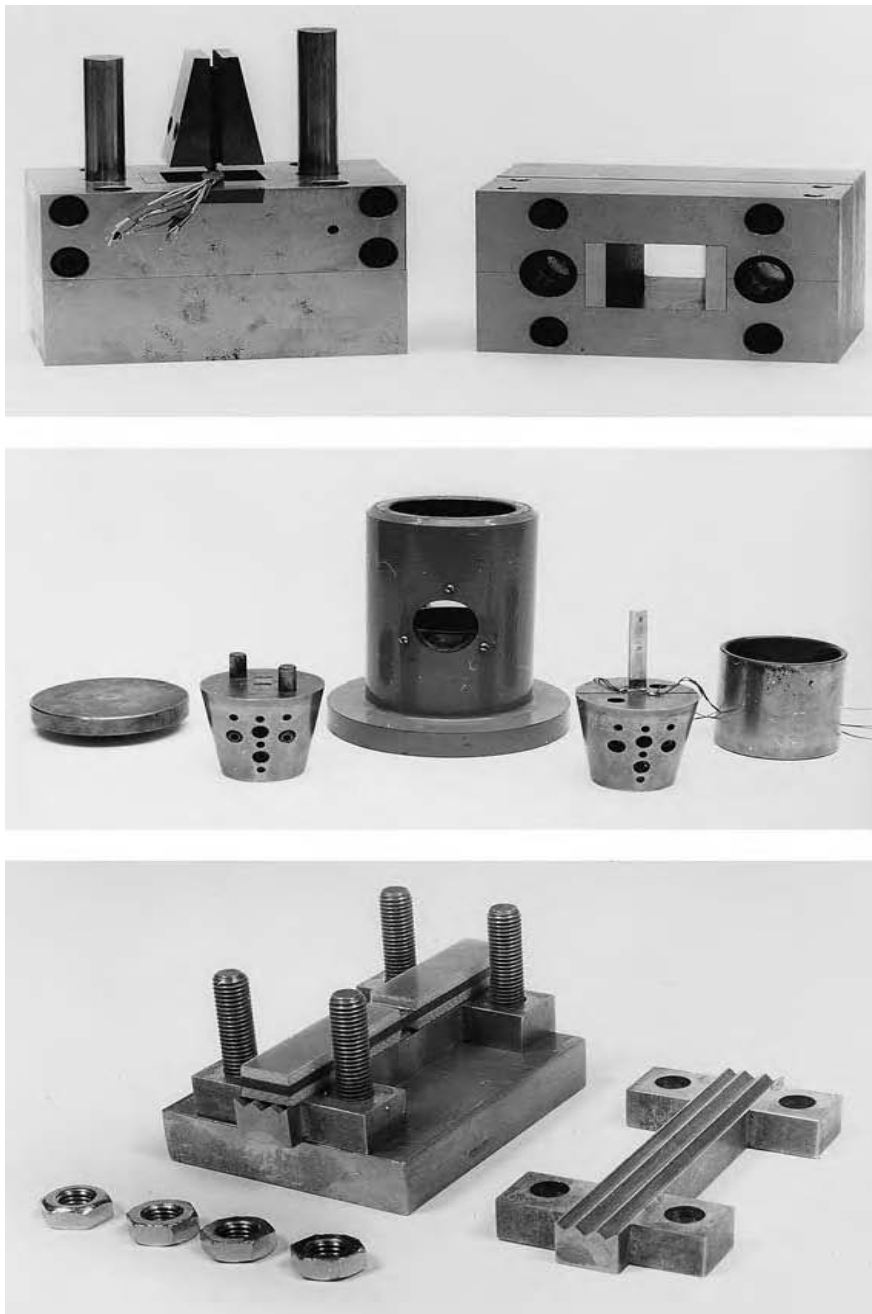
Ένα τυπικό αντιπροσωπευτικό εξάρτημα για μικτή διάτμηση προτάθηκε από τους Purslow και Collings και μεταγενέστερα τροποποιήθηκε από τον Port στο γνωστό ως Οργανισμός Αξιολόγησης και Έρευνας Άμυνας, DERA, Farnborough, UK). Το δείγμα συνδέεται σε εγκοπές σε τερματικά μπλοκ αλουμινίου, που απεικονίζονται σχηματικά στην *Εικόνα 4.5* (β). Η τιμή του φορτίου διάτμησης εξαρτάται από τις ιδιότητες της κόλλας καθώς επίσης και από το πάχος της δεσμευτικής στρώσης. Στην τροποποιημένη μέθοδο ASTM D 695, το φορτίο εφαρμόζεται με παρόμοιο τρόπο όπως φαίνεται στην *Εικόνα 4.6*, όπως και η συναρμολογημένη και αποσυναρμολογούμενη διάταξη. Μια συγκεκριμένη ποσότητα της τάσης διάτμησης εφαρμόζεται στο δείγμα διαμέσου των φύλλων σύσφιξης (end-tabs), η τιμή της τάσης αυτής εξαρτάται από την δυσκαμψία που παρουσιάζουν τα φύλλα σύσφιξης. Επομένως, χρειαζόμαστε μία επιπλέον συσκευή μέτρησης. Αν και το δοκίμιο απαιτεί προσεκτική προετοιμασία, η παραλληλότητα των άκρων του δείγματος είναι ιδιαίτερα σημαντική και το δοκίμιο δεν έχει μεγάλο κόστος και είναι εύκολο στην προετοιμασία του. Λόγω του περιορισμού της παραμόρφωσης του Poisson, το δείγμα μπορεί να παρουσιάσει κάποια εγκάρσια φόρτιση η οποία με τη σειρά του οδηγεί σε τριβή μεταξύ των επιφανειών στήριξης και του δείγματος.

Μία παραλλαγή της μεθόδου είναι το εξάρτημα της RAE που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο Birmingham [32]. Εδώ, ένα δοκίμιο τύπου RAE με ένα τμήμα με συσφίγγεται περιμετρικά μέσα σε χαλύβδινους κύβους στα άκρα του αντί να συνδέεται, όπως φαίνεται στη *Εικόνα 4.6*. Έτσι, το άκρο του δείγματος φορτώνεται απευθείας και

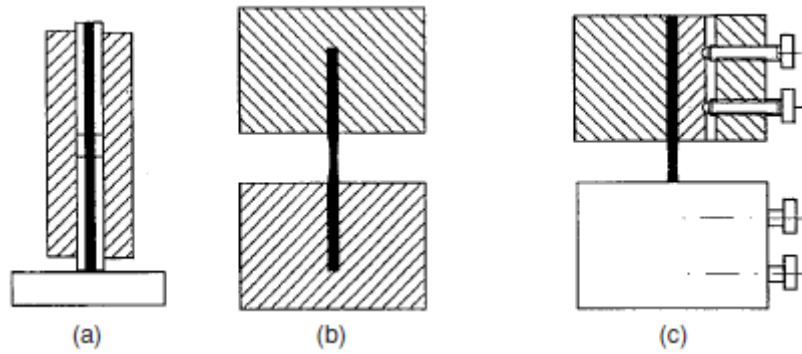


ένα τμήμα του φορτίου καταπονείται με διατμητικά φορτία, ανάλογα με τη δύναμη σύσφιξης. Η τοποθέτηση του δείγματος είναι πολύ απλή.

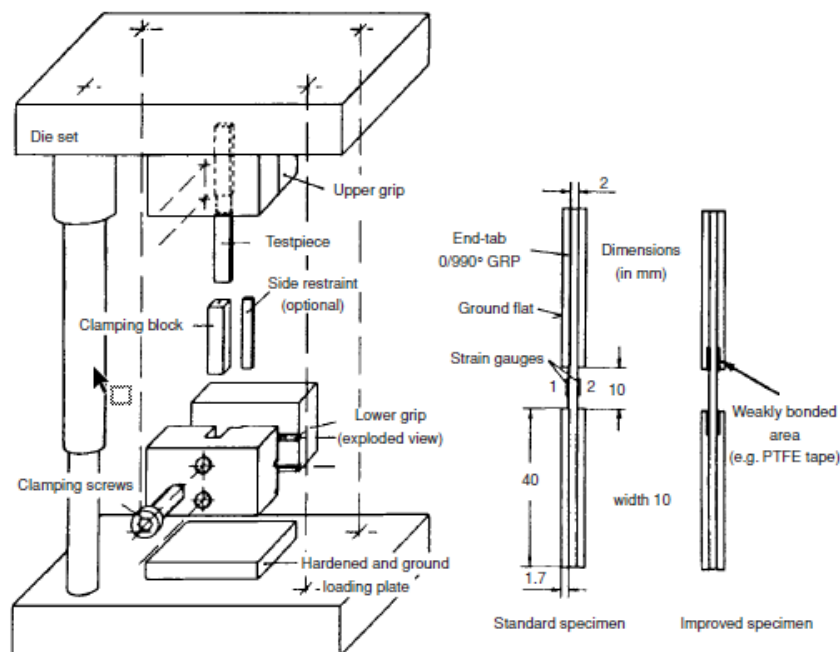
Μία περαιτέρω βελτίωση της συσκευής του Birmingham (RAE) έχει αναπτυχθεί στο Imperial College στο Λονδίνο, Ηνωμένο Βασίλειο. Εκτός από κάποιες τροποποιήσεις στα μπλοκ στα οποία είναι τοποθετημένο το δείγμα, ολόκληρο το εξάρτημα τοποθετείται σε μία τετράπλευρου τύπου μήτρας, εξασφαλίζοντας καλή ευθυγράμμιση. Το εξάρτημα απεικονίζεται στην *Εικόνα 4.5 (c)* και στην *Εικόνα 4.4* . Και πάλι, η τοποθέτηση και η αποσυναρμολόγηση του δείγματος είναι πολύ απλή.



**Εικόνα 4.4.** Τύποι εξαρτημάτων για κάθε μέθοδο (a) IITRI, (b) CRAG (Celanese), (c) ASTM D 695 (modified) [33].



**Εικόνα 4.5.** Σχεδιαστική αναπαράσταση των Εξαρτημάτων (α) ASTM, (β) RAE, (γ) Birmingham [34].



**Εικόνα 4.6** Σχεδιαστική αναπαράσταση από το Imperial College (jig) [35].

### 4.3 Πρότυπα

Από τις προαναφερθείσες μεθόδους, ορισμένες υιοθετήθηκαν από τους διάφορους οργανισμούς τυποποίησης. Το εξάρτημα Celanese, σε ελαφρώς τροποποιημένη μορφή, καθορίζεται από το γερμανικό πρότυπο DIN 29971 και από την CRAG (Συμβουλευτική Ομάδα Συμβουλευτικών Ερευνών) [36]. Η μέθοδος υιοθετείται στο πλαίσιο του προτύπου ASTM D 3410, το οποίο, περιλαμβάνει επίσης μία έκδοση του IITRI. Από τις άλλες χρησιμοποιήθηκε μόνο η μέθοδος ASTM D 695, η οποία αρχικά δημιουργήθηκε για μη ενισχυμένα πλαστικά, αλλά με τροποποίηση του δείγματος.

Υπάρχουν πολλά πρότυπα. Η Boeing Aircraft Corporation χρησιμοποιεί την τροποποιημένη προδιαγραφή ASTM D 695 και η British Aerospace χρησιμοποιούν τη δική τους παραλλαγή του σφικτήρα. Η *Εικόνα 4.7* δείχνει αυτό το εξάρτημα αποσυναρμολογούμενο. Αυτή η συσκευή τριβής συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των συσκευών Celanese και IITRI και μπορεί να θεωρηθεί ως σύνθεση των δύο εξαρτημάτων. Οι λαβές σφήνας IITRI περιέχονται σε κωνικές θήκες τύπου Celanese. Ο εξωτερικός κύλινδρος που ευθυγραμμίζει με την κωνική θήκη είναι ένα ανοιχτό πλαίσιο αντί για ένα κλειστό κέλυφος, επιτρέποντας την πρόσβαση στο δείγμα. Οι ακίδες συγκράτησης ταχείας απελευθέρωσης διευκολύνουν το χειρισμό.

Στη διεθνή σκηνή, έχει γίνει πολλή δουλειά στην ανάπτυξη ενός προτύπου ISO για την δοκιμή της θλίψης. Αυτό θα είναι γνωστό στο Ηνωμένο Βασίλειο ως BS EN ISO 14126, υποδεικνύοντας ότι υιοθετείται όχι μόνο ως διεθνές πρότυπο αλλά επίσης ως Ευρωπαϊκό και Βρετανικό. Σημαντικά στοιχεία αυτού του νέου προτύπου θα υιοθετηθούν επίσης στο πλαίσιο του προτύπου ASTM D 3410 [5].



**Εικόνα 4.7.** British Aerospace compression jig, Έκδοχή της μεθόδου Celanese [37].

#### **4.4 Διαμορφώσεις δειγμάτων**

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι δειγμάτων, ο πρώτος είναι το μη υποστηριζόμενο μήκος μικρού διαμετρήματος, δευτέρων υποστηριζόμενου μήκους υψηλού διαμετρήματος και κατασκευές τύπου σάντουιτς. Η χρήση δοκιμών τύπου σάντουιτς είναι σχετικά σπάνια, εξαιτίας της πρόσθετης δαπάνης και της δυσκολίας κατασκευής

τους. Επομένως, οι πρώτες δύο συνθέσεις δειγμάτων είναι αυτές που έχουν γενικότερη χρήση.

Οι μέθοδοι που προτείνουν για την χρήση μη υποστηριζόμενου μήκους μικρού διαμετρήματος δειγμάτων είναι γενικά κατάλληλες για τη μέτρηση των ιδιοτήτων των μονής κατεύθυνσης υλικών. Παρότι τα δείγματα με άλλες ελασματοποιημένες πλάκες μπορούν επίσης να δοκιμαστούν με αυτές τις μεθόδους, πρέπει να σημειωθεί ότι το μήκος, όσο μικρό και να είναι, δεν υποστηρίζεται και ο λυγισμός του στην αστοχία είναι πολύ πιθανός. Λεπτομέρειες σχετικά με τα σχήματα των δειγμάτων που συνιστώνται στα πρότυπα CRAG 400, ASTM D 3410 και ASTM D 695 παρουσιάζονται στην *Εικόνα 4.8*, το οποίο δείχνει το αντικατεστημένο δοκίμιο με βάση το πρότυπο ASTM D 3410 Celanese, το οποίο είχε τελικές σφικτήρες με λοξό τμήμα στα άκρα, με γωνία 9°, καθώς και το δείγμα. Το δοκίμιο που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στο όργανο IITRI είναι το ίδιο με εκείνο που χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή Celanese, και για τα δύο εξαρτήματα το δείγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς τελικούς σφικτήρες όπου χρειάζεται. Επίσης παρουσιάζονται και οι δύο τύποι δειγμάτων που περιλαμβάνονται στο πρότυπο ASTM D 695.

Το πρότυπο ICSTM χρησιμοποιεί, επίσης δείγματα μικρού μεγέθους, αν και αυτό μπορεί να υποδεχτεί και μη συμμετρικά σχήματα των δειγμάτων. Οι τυπικές διαστάσεις των δειγμάτων με προεξοχές φαίνονται στην *Εικόνα 4.8*, συμπεριλαμβανομένων των αρχικών και τροποποιημένων εκδόσεων. Το τροποποιημένο δείγμα βρέθηκε ότι δίνει πιο συνεπή αποτελέσματα. Το εγκάρσιο στρώμα GRP (πλαστικό ενισχυμένο με ύαλο) υιοθετήθηκε ως το προτιμώμενο υλικό τελικού πλέγματος. Πολύ λίγες συνιστώμενες μέθοδοι δοκιμής συμβουλεύουν τώρα την περιστροφή των δειγμάτων.

Ωστόσο, αυτό θεωρήθηκε ως αποδεκτό μέσο εξασφαλίζοντας την αστοχία σε μία συγκεκριμένη περιοχή του δείγματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η περιστροφή μπορεί να θεωρηθεί ως μία βελτιστοποιημένη μορφή διαχωρίσματος, αλλά πρέπει να πραγματοποιηθεί με εξαιρετική προσοχή και φροντίδα, τόσο στην πραγματική λειτουργία μηχανουργικής επεξεργασίας όσο και για να διατηρηθεί ένα συμμετρικό δείγμα, διαφορετικά θα γίνει εισαγωγή κάμψης προκαλώντας πρόωρη αστοχία. Το Port έδειξε ότι μπορεί να αποφευχθεί η διάσπαση μεταξύ των επιφανειών λόγω υπερβολικών διατμητικών τάσεων, ακολουθώντας την εξίσωση κωνικού ορίου, η οποία δίνει το ελάχιστο μήκος:

$$gl_{min} = \ln\left(\frac{H}{h}\right) h\left(\frac{S_c}{S_{iS}}\right)$$

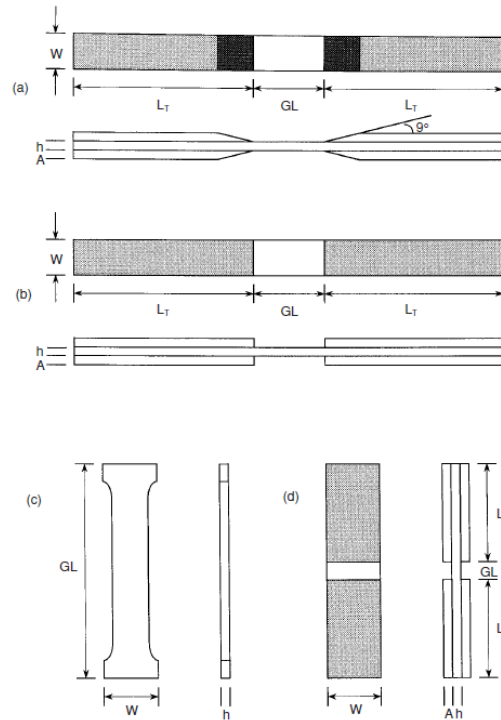
όπου το  $gl_{min}$  είναι το ελάχιστο μήκος μετρητή, το  $H$  είναι το ονομαστικό πάχος του δείγματος, το  $h$  είναι το ελάχιστο πάχος του δείγματος, το  $S_c$  είναι η δύναμη θλίψεως και το  $S_{iS}$  είναι η ενδοελασματική δύναμη διάτμησης.

Μια παραπάνω εκδοχή για τα δείγματα για τα οποία υπάρχουν καλά αποτελέσματα που προτάθηκε από τους εργαζόμενους στον Οργανισμό Άμυνας Έρευνας (DRA) Farnborough , Ηνωμένο Βασίλειο (σήμερα γνωστός ως Οργανισμός Αξιολόγησης και Έρευνας Άμυνας, DERA). Κατά την προσέγγισή τους παράγεται ένα σκληρυνόμενο ελασματοποιημένο υλικό τύπου σάντουιτς μονής κατεύθυνσης μεταξύ στρώσεων προσανατολισμένων σε  $\pm 45^\circ$ . Τα σύνθετα τύπου σάντουιτς κατεργάζονται στο εργαστήριο για να δώσουν ένα δείγμα με ενσωματωμένα φύλλα σύσφιξης.

Προκειμένου να αποφευχθούν οι περιορισμοί στα άκρα, τα δείγματα πολλαπλής διεύθυνσης είναι συνήθως πολύ μακρύτερα από αυτά της μονής διεύθυνσης και, ως εκ τούτου, πρέπει να υποστηρίζονται από έναν οδηγό. Η μέθοδος CRAG 401 είναι χαρακτηριστική . Λεπτομέρειες δειγμάτων δίνονται στην *Εικόνα 4.8* , μαζί με το σχέδιο.

Τα δείγματα σάντουιτς συνήθως σχεδιάζονται για να δοκιμαστούν ως δοκοί αντί για κολόνες και καταπονούνται σε κάμψη 4 σημείων. Το φύλλο στην κορυφή του σύνθετου είναι το δείγμα που πρόκειται να δοκιμαστεί. Ένας μεταλλικός κυψελοειδής πυρήνας και ένα μεταλλικό φύλλο κάλυψης με μεγαλύτερη ακαμψία και αντοχή εξασφαλίζει ότι το δείγμα θα αποτύχει στην άνω συμπιεστική πλευρά. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να δοκιμαστούν πολύ λεπτά δείγματα. Το υψηλό κόστος που συνεπάγεται η κατασκευή αυτού του τύπου δείγματος οδήγησε στην ανάπτυξη μιας επαναχρησιμοποιήσιμης δοκού τύπου σάντουιτς.

Εδώ, ο πυρήνας στο τμήμα δοκιμής είναι κατασκευασμένος από πλεξιγκλάς και ένα φύλλο CFRP που χρησιμοποιείται ως όψη εφελκυσμού. Στην πλευρά θλίψης, αντί να συνδεθεί, το δείγμα συσφίγγεται ανάμεσα σε δύο καπάκια αλουμινίου. Μία μορφή δείγματος στήλης σάντουιτς χρησιμοποιεί τη ρητίνη ως μήτρα.



**Εικόνα 4.8.** Προδιάγραφες δοκιμών για (a) ASTM D3410,(b)GRAG 400, (c) ASTM D 695, (d) διαμορφωμένη εκδοχή ASTM D695 [38].

#### 4.5 Εκτέλεση και προβλήματα

Η πραγματοποίηση δοκιμής θλίψης ή οποιουδήποτε άλλης δοκιμής για αυτό το θέμα, θα πρέπει να είναι απλή χωρίς να θυσιάζεται η επαναληψιμότητα και η αναπαραγωγιμότητα των αποτελεσμάτων της δοκιμής. Αυτοί οι δύο όροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον χαρακτηρισμό μιας μεθόδου δοκιμής και μπορούν να διακριθούν με τον ακόλουθο τρόπο όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα :

*Πίνακας 3:Μεταβλητές που επηρεάζουν τις μεθόδους δοκιμής*

<u>Επαναληψιμότητα</u>	<u>Αναπαραγωγιμότητα</u>
ίδια μέθοδος	ίδια μέθοδο
πανομοιότυπο υλικό	πανομοιότυπο υλικό
ίδιο εργαστήριο	διαφορετικό εργαστήριο
ίδιο εξοπλισμό	διαφορετικό εξοπλισμό
ίδιο χειριστή	διαφορετικό χειριστή

Καθώς οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν τα αποτελέσματα της δοκιμής θλίψης προτείνονται τα ακόλουθα:

- Μέθοδος δοκιμής
- Εργαστήριο
- Χείριστης

Η μέθοδος δοκιμής και οι τρόποι παραγωγής δειγμάτων έχουν αντιμετωπιστεί παραπάνω . Η κατάσταση του υλικού δοκιμής, για παράδειγμα ο παραλληλισμός των επιφανειών φόρτωσης και η βαθμονόμηση του οργάνου μέτρησης, μπορεί προφανώς να επηρεάσει τα αποτελέσματα και μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί μέρος της «επιρροής χειριστή», η οποία φυσικά δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί και συχνά θεωρείται υπεύθυνη για μία σειρά εφέ. Συγκεκριμένα, την αξιολόγηση και ερμηνεία των τρόπων αστοχίας και των αποτελεσμάτων των δοκιμών είναι σημαντικά σε αυτό το πλαίσιο και εξαρτώνται από την εμπειρία του ελεγκτή. Για παράδειγμα, η μερική φόρτωση της εξέδρας θα έχει παραπλανητικά αποτελέσματα, εκτός εάν οι καμπύλες τάσης-καταπόνησης εξεταστούν κριτικά.

Σε μία μέθοδο δοκιμής Θα πρέπει η επιρροή χειριστή να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη Η αποτυχία αντιμετώπισης των ζητημάτων που παρατίθενται μπορεί να οδηγήσει σε διάφορα προβλήματα, είτε κατά την εκτέλεση μιας δοκιμής είτε στοιχείων και αποτελεσμάτων. ορισμένα από αυτά έχουν ήδη αναφερθεί. Όποια μέθοδο και αν υιοθετηθεί, είναι ζωτικής σημασίας ο χειριστής να αποκτήσει εμπειρία προτού χρησιμοποιήσει οποιαδήποτε δεδομένα δημιουργούνται. Είναι σαφές ότι όσο πιο απλή είναι η δοκιμή, τόσο πιο γρήγορα μπορεί να καθιερωθεί μία αποτελεσματική και αξιόπιστη διαδικασία.

Ένα κρίσιμο στοιχείο που πρέπει πάντα να ελέγχεται είναι η αστοχία. Βασικά, η ιδανική αστοχία συμβαίνει στο τμήμα όπου βρίσκεται το μετρητικό όργανο. Ωστόσο, μερικές φορές η αστοχία μπορεί να ξεκινήσει κοντά στο άκρο και να εξαπλωθεί κατά μήκος. Αυτή η αστοχία θα θεωρηθεί έγκυρη, αλλά οποιοδήποτε δείγμα αποτύχει εντός της περιοχής των λαβών σύσφιξης(Grip) θα πρέπει να θεωρείται άκυρο και η δοκιμή να επαναληφθεί [5].





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### “ΚΑΜΨΗ”

#### 5.1 Εισαγωγή

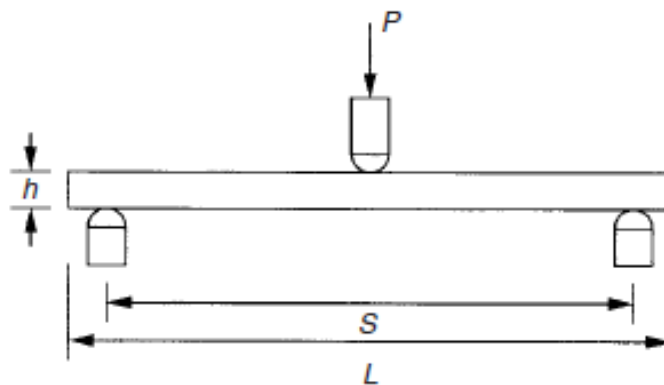
Η χρήση δοκιμών κάμψης για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των συνθέτων υλικών ενισχυμένων με ίνες είναι ευρέως διαδεδομένα σε ολόκληρη τη βιομηχανία λόγω της σχετικής απλότητας της μεθόδου δοκιμής, κι τον εξοπλισμό που χρειάζεται. Με τις δοκιμές κάμψης μπορούμε επίσης να προσδιορίσουμε την ενδοελασματική διάτμηση σε σύνθετα υλικά τύπου sandwich. Σε αυτό το κεφάλαιο η μελέτη περιορίζεται στη δοκιμή κάμψης απλών ελασματοποιημένων δοκών. Υπάρχει μία μεγάλη ποικιλία πρότυπων μεθόδων δοκιμής για κάμψη που περιγράφεται από τους εθνικούς και διεθνείς οργανισμούς τυποποίησης. Οι δοκιμάστηκες μέθοδοι που συνιστώνται ποικίλλουν από τη μία οργάνωση στην άλλη, μερικές είναι πολύ ακριβείς, άλλες επιτρέπουν έναν ευρύ βαθμό επιλογής.

Λίγες από τα διαθέσιμες μεθόδους δοκιμής αναπτύχθηκαν ειδικά με υψηλή απόδοση σε σύνθετα με πλαστική μήτρα, έχοντας κατά νου τη μηχανική δοκιμή ομοιογενών στερεών. Μεταξύ των εξαιρέσεων εδώ είναι εκείνες οι μέθοδοι που περιγράφονται από την Αμερικανική Εταιρεία για Δοκιμές και υλικά (ASTM), η συμβουλευτική ομάδα έρευνας για τα σύνθετα υλικά (CRAG) και το διεθνές πρότυπο που θεσπίστηκε πρόσφατα. Αυτές οι οργανώσεις έχουν κάνει κάποια προσπάθεια να ανταποκριθούν στις ιδιαίτερες ανάγκες αυτών των υλικών.

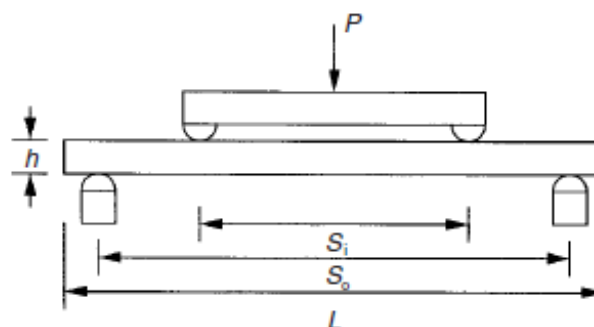
Αν και συχνά διαπιστώνεται ότι οι δοκιμές κάμψης δίνουν αποτελέσματα που είναι πολύ παρόμοια με εκείνα από άλλες δοκιμές (εφελκυσμός και θλίψη, για παράδειγμα) που συνιστώνται για την απόκτηση των δεδομένων. Δεδομένα που λαμβάνονται από ορισμένες μεθόδους δοκιμής κάμψης πρέπει να αντιμετωπίζονται με προσοχή, αν όχι με σκεπτικισμό, επειδή τα αποτελέσματα συνάρτηση της μεθόδου δεν αντικατοπτρίζει με οποιονδήποτε τρόπο τις ιδιότητες του υλικού που προοριζόταν να μετρηθεί. Γενικά, οι δοκιμές τύπου κάμψης ισχύουν για τον ποιοτικό έλεγχο και την επιλογή υλικού. Ως εκ τούτου, αυτοί οι τύποι δοκιμών εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ευρέως, επειδή η απλότητα τους επιτρέπει μία ταχεία αξιολόγηση με ελάχιστη δυσκολία και τεχνική εξειδίκευση [5].

## 5.2 Δοκιμές κάμψης τριών σημείων και τεσσάρων σημείων

Για τις δοκιμές κάμψης δεν υπάρχει περιπλοκή με τα φύλλα σύσφιξης (end-tabs) ή διαμορφώσεις στο σχήμα του δείγματος, οι δοκιμές διεξάγονται σε απλά δομικά σύνθετα υλικά ίδιας διατομής. Οι δύο μέθοδοι που χρησιμοποιούνται συνήθως για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων κάμψης είναι οι δοκιμές τριών και τεσσάρων σημείων που απεικονίζονται σχηματικά στις *Εικόνες 5.1 και 5.2*, αντίστοιχα. Ένα επίπεδο ορθογώνιο δοκίμιο απλά στηρίζεται κοντά στα άκρα του και είτε κεντρικά φορτωμένο σε κάμψη τριών σημείων είτε με δύο φορτία τοποθετημένα συμμετρικά μεταξύ των στηριγμάτων, δίνοντας κάμψη τεσσάρων σημείων. Επίσης εμφανίζεται στην *Εικόνα 5.1 και 5.2* είναι τα διαγράμματα διατμητικής δύναμης και ροπής κάμψης που σχετίζονται με τα συγκεκριμένα καθεστώτα φόρτωσης.

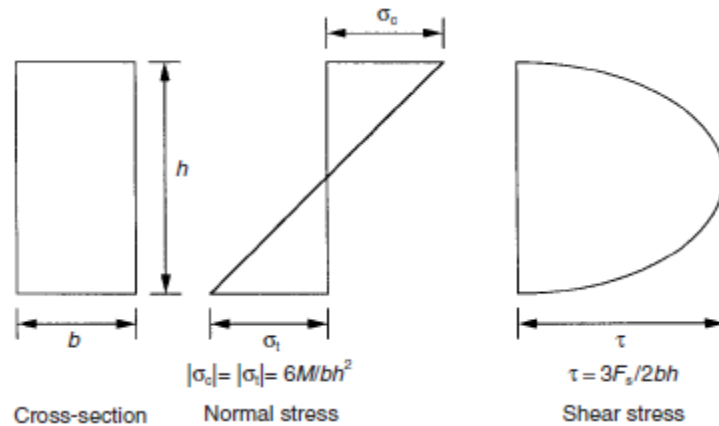


**Εικόνα 5.1.** Σχεδιαστική αναπαράσταση μεθόδου κάμψης 3 σημείων [38].



**Εικόνα 5.2** . Σχεδιαστική αναπαράσταση κάμψης 4 σημείων [39].

Υπάρχουν σαφώς τάσεις στα σημεία φόρτωσης, αλλά σε φόρτωση τεσσάρων σημείων, μεταξύ των εσωτερικών σημείων φόρτωσης, υπάρχει μία σταθερή ροπή κάμψης. Η *Εικόνα 5.3* δείχνει τη μεταβολή της τάσης, που προκαλείται από τη ροπή κάμψεως και τη διατμητική τάση, που προκαλείται από τη δύναμη διάτμησης, υποθέτοντας μία ορθογώνια διατομή δείγματος.



**Εικόνα 5.3:** Μεταβολή κανονικής τάσης και διατμητικής τάσης σε δοκιμή κάμψης [40].

Στις *Εικόνες 5.1* έως *5.3* οι ιδιότητες του υλικού θεωρούνται ότι είναι ομοιόμορφες μέσω του πάχους, επειδή είναι σε μονής διεύθυνσης ενισχυμένα σύνθετα υλικά ή ιστροπικά υλικά. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, η κανονική τάση μεταβάλλεται γραμμικά από το μέγιστο σε θλίψη σε μία επιφάνεια έως ένα ίσο μέγιστο σε τάση στην άλλη επιφάνεια, περνώντας από το μηδέν στο μεσαίο επίπεδο, το οποίο ονομάζεται συνήθως ουδέτερος άξονας. Η μέγιστη τάση δίνεται από την Εξίσωση (26):

$$\sigma = \frac{6M}{bh^2} \quad (26)$$

όπου  $M$  είναι η ροπή κάμψης, με  $b$  και  $h$  να είναι το πλάτος του δείγματος και το πάχος, αντίστοιχα.

Η κατανομή της διατμητικής τάσης είναι παραβολική, με μέγιστο τον ουδέτερο άξονα και μηδέν στις εξωτερικές επιφάνειες της δέσμης. Η μέγιστη τιμή τάσης δίνεται από την Εξίσωση (27):

$$\tau = \frac{3F_s}{2bh} \quad (27)$$

όπου  $F_s$  είναι η δύναμη διατμήσεως στην εγκάρσια τομή του δείγματος.

Η αντοχή στην κάμψη επιτυγχάνεται καταγράφοντας το φορτίο και το προκύπτον δοκίμιο. Η τάση μπορεί να μετρηθεί με τη σύνδεση ενός μετρητή τάσης στην επιφάνεια εφελκυσμού ή με τη μέτρηση της μετατόπισης στο κέντρο της δοκού [4], έτσι ώστε να μπορούν να υπολογιστούν τα στελέχη. Η ροπή κάμψης,  $M$ , είναι μία συνάρτηση του μετρημένου φορτίου και της γεωμετρίας του δείγματος, έτσι ώστε η εφαρμοζόμενη τάση να μπορεί να υπολογιστεί από την Εξίσωση 26 και μπορεί να επιτευχθεί ο πλήρης υπολογισμός καταπόνησης στην κάμψη.

Τα επίπεδα καταπόνησης στα δείγματα που υποβάλλονται σε δοκιμές κάμψης τριών ή τεσσάρων σημείων είναι κάπως διαφορετικές και μπορεί να οδηγήσουν σε διαφορετικά αποτελέσματα. Η ροπή κάμψεως σε δοκιμή τριών σημείων κάμψης αυξάνει γραμμικά από το μηδέν στα υποστηρίγματα σε ένα μέγιστο κάτω από κεντρικό σημείο φόρτωσης, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 5.3*, ενώ η δύναμη διάτμησης (και συνεπώς η ενδοελασματική διατμητική τάση στο μεσαίο επίπεδο) είναι ομοιόμορφη κατά το μήκος της δοκού.

Σε κάμψη τεσσάρων σημείων οι ροπές κάμψης αυξάνονται γραμμικά από το μηδέν στα υποστηρίγματα σε ένα μέγιστο στα σημεία φόρτωσης και είναι σταθερές μεταξύ αυτών των σημείων, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 5.3*. Η διατμητική δύναμη και η ενδοελασματική τάση διάτμησης είναι μηδέν μεταξύ των σημείων φόρτωσης, έτσι ώστε αυτό το κεντρικό τμήμα της δέσμης να υποβάλλεται σε μία καθαρή ροπή κάμψης. Από την άποψη της κατάστασης καταπόνησης, η δοκιμή τεσσάρων σημείων είναι η πιο επιθυμητή από τις δύο μεθόδους αλλά η δοκιμή τριών σημείων είναι ευκολότερη.

Η αντοχή στην κάμψη είναι η τάση στην επιφάνεια του δείγματος σε περίπτωση βλάβης, η οποία θα πρέπει να συνοδεύεται από τη θραύση των ινών. Η αντοχή υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη μέγιστη ροπή κάμψης, που αντιστοιχεί στο φορτίο αστοχίας, στην *Εξίσωση 27* και λαμβάνει μία γραμμική σχέση τάσης–καταπόνησης μέχρι την αστοχία. Η αστοχία στην κάμψη παρουσιάζεται σε μεγαλύτερη ακρίβεια από τη χρήση ενός μεγάλου εύρους φόρτωσης σε αναλογία πάχους δείγματος, επειδή το άνοιγμα της δέσμης δεν έχει καμία επίδραση στην διατμητική καταπόνηση αλλά μία μεγάλη έκταση έχει ως αποτέλεσμα μία υψηλότερη ροπή κάμψης, προάγοντας τη διαμήκη αστοχία. Δυστυχώς, οι μεγάλες δυσαναλογίες στο πάχος παράγουν μεγάλες εκτροπές, υπό φορτίο, οι οποίες καθιστούν αναγκαία την συνεκτίμηση των οριζόντιων

δυνάμεων που αναπτύσσονται στα υποστηρίγματα κατά τον υπολογισμό της κατάλληλης ροπής κάμψης.

### 5.3 Σύγκριση των συνιστάμενων μεθόδων δοκιμής

Στόχος είναι να εστιάσουμε την προσοχή σε μερικές από τις ασάφειες (και πιθανές παγίδες κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών) που υπάρχουν μεταξύ μερικών από τις μεθόδους δοκιμών κάμψης που έχουν δημοσιευθεί. Είναι προφανές ότι δεν είναι δυνατόν να ληφθούν υπόψη όλα τα εθνικά πρότυπα, οπότε η σύγκριση θα περιοριστεί σε αυτά που δίνουν ένα καλό παράδειγμα γενικής πρακτικής για τη δοκιμή πλαστικών υλικών ενισχυμένων με ίνες. Αυτά περιλαμβάνουν αυτά της Αμερικανικής Εταιρείας Δοκιμών και Υλικών (ASTM D 790M-93), της Συμβουλευτικής Ομάδας Έρευνας Σύνθεσης (CRAG), BSI 2782 μεθόδου και ISO-14125 .

Μία λεπτομερής ανάγνωση αυτών των συστάσεων αποκαλύπτει ότι πριν από την δημοσίευση του ISO-14125 δεν υπήρξε συμφωνία για σχεδόν καμία πτυχή της μεθόδου δοκιμής που θα χρησιμοποιηθεί μεταξύ των τριών οργανισμών. Οι διαφωνίες περιλαμβάνουν: τις διαστάσεις των δειγμάτων, τις αναλογίες απόστασης προς το πάχος, τη χρήση ρυθμίσεων φόρτωσης τριών ή τεσσάρων σημείων, την ακτίνα φόρτισης και στήριξης δοκιμίων, το ποσοστό φόρτωσης, την ελάχιστη προεξοχή του μήκους δείγματος πέρα από τα σημεία στήριξης και τους υπολογισμούς που χρησιμοποιούνται όταν λαμβάνετε υπόψη τις μεγάλες μετατοπίσεις.

### 5.4 Πρότυπα δοκιμής κάμψης

Οι προδιαγραφές από τα πρότυπα της ASTM και της BSI επιτρέπουν πολλές επιλογές όσον αφορά τις διαστάσεις του δοκίμιου όσο το σχήμα παραμένει ορθογώνιο και έχει συγκεκριμένη αναλογία όσον αφορά το μήκος με το πάχος του (s/h ratio). Και στους 2 τύπους μεθόδων για την κάμψη (τριών και τεσσάρων) οι προδιαγραφές της ASTM προσφέρουν αρκετές αναλογίες σχετικά με τις διαστάσεις του δοκίμιου ενώ η BSI έχει μόνο μία όπου είναι καθορισμένη μόνο για πλαστικά σύνθετα ενισχυμένα με ίνες γυαλιού. Από την άλλη, τα πρότυπα κατά CRAG όπου είναι περιορισμένα μόνο σε δοκιμές κάμψης 3 σημείων, απαιτεί μόνο το πάχος του δοκίμιου να είναι στα 2 mm και κατηγοριοποιεί τις σχέσεις αναλογίας διαστάσεων με βάση τον αριθμό των στρωμάτων που έχει το σύνθετο. Αυτό έχει ως στόχο την έρευνα για υψηλής αποδοτικότητας υλικά.

Στους παρακάτω πίνακες αναγράφονται οι προδιαγραφές για τις διαστάσεις των δοκιμίων για κάθε οργανισμό:

*Πίνακας 4: Προδιαγραφές σε μερικές διαστάσεις δοκιμίων για πείραμα κάμψης [41].*

Προδιαγραφές	Πάχος (mm)	Πλάτος (mm)	Μήκος (mm)
<b>ASTM</b>	1-25	10-25	50-1800
<b>BSI</b>	1-50	15-80	20
<b>CRAG</b>	2	10	100

*Πίνακας 5: Προδιαγραφές κατά CRAG αναλογίας S/h σε ινώδη τύπου ενισχυμένα σύνθετα [42].*

Ενίσχυση Συνθέτου	Προσανατολισμός ινών	Αναλογία πάχους-μήκους
Άνθρακας μονής κατεύθυνσης	0°	40:1
Άνθρακας μονής κατεύθυνσης	90°	25:1
Πλέξης άνθρακας	0° / 90°	25:1
Γυαλί μονής κατεύθυνσης	0°	20:1
Γυαλί μονής κατεύθυνσης	90°	20:1
Πλέξης γυαλιού	0° / 90°	20:1
Πλέξης kevlar	0° / 90°	16:1

*Πίνακας 6: Προτεινόμενες διαστάσεις δοκίμιου σε κάμψη 3 σημείων για διαφορετικά υλικά κατά ISO-14125 [43].*

Υλικό	Μήκος (mm)	Διάστημα (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)
<b>Κατηγορία 1</b>	80	64	10	4
<b>Κατηγορία 2</b>	80	64	15	4
<b>Κατηγορία 3</b>	60	40	15	2
<b>Κατηγορία 4</b>	100	80	15	2

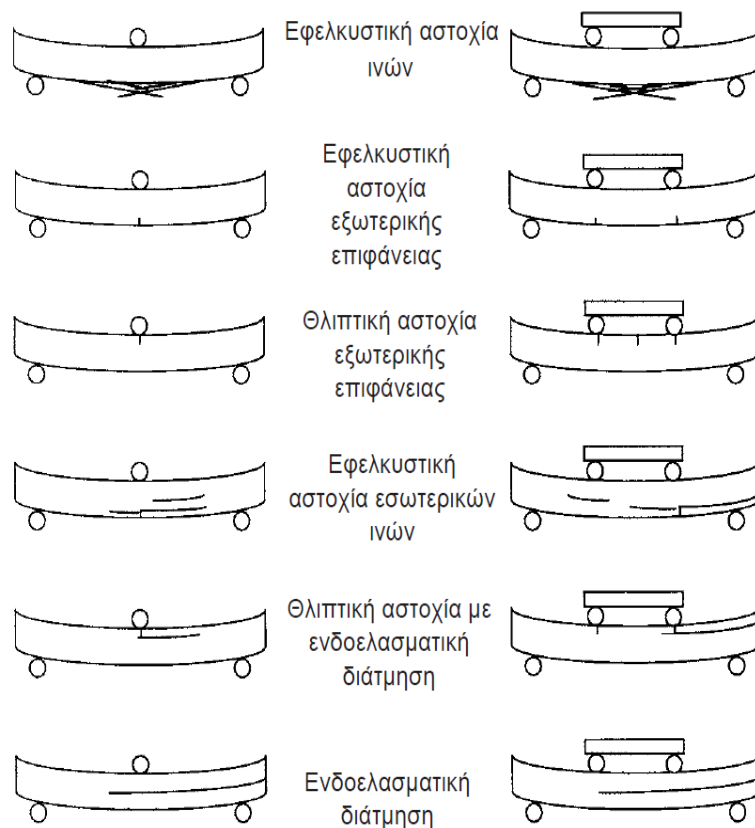
*Πίνακας 7: Προτεινόμενες διαστάσεις δοκίμιου σε κάμψη 4 σημείων για διαφορετικά υλικά κατά προτύπου ISO-14125 [44].*

Υλικό	Μήκος (mm)	Υποστηριζόμενο Διάστημα (mm)	Διάστημα καταπόνησης (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)
<b>Κατηγορία 1</b>	80	66	22	10	4
<b>Κατηγορία 2</b>	80	66	22	15	4
<b>Κατηγορία 3</b>	60	45	15	15	2
<b>Κατηγορία 4</b>	100	81	27	15	2

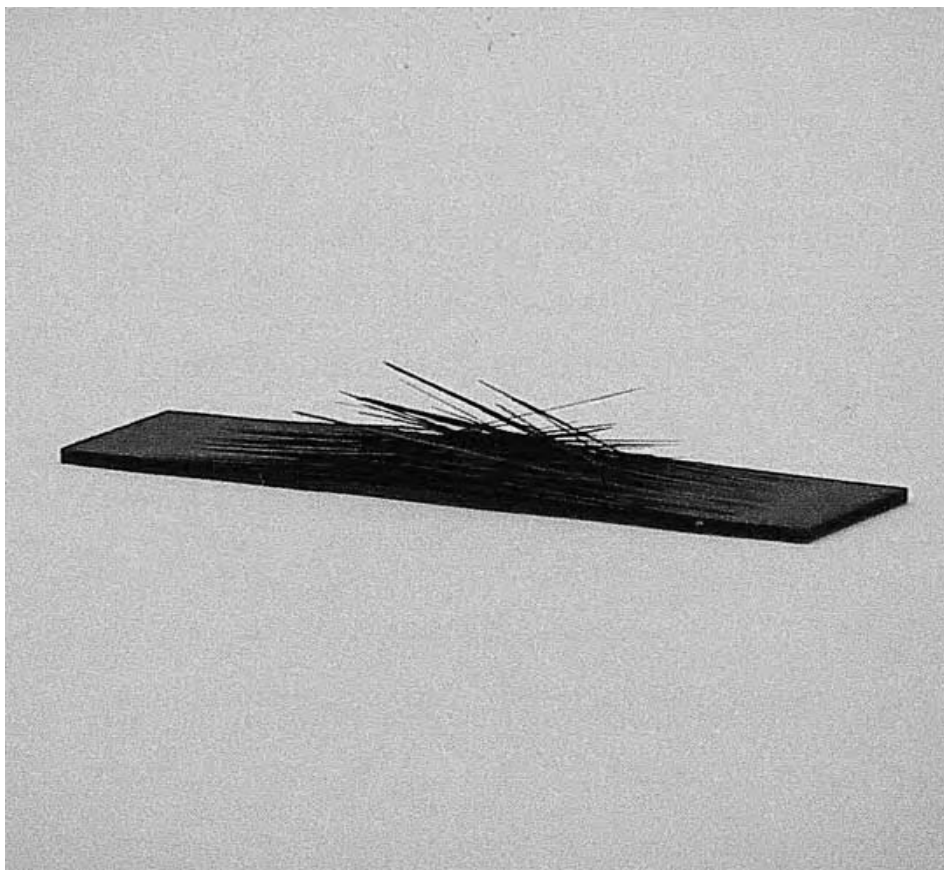
- **Κατηγορία 1:** ασυνεχή θερμοπλαστικά ενισχυμένα με ίνες.
- **Κατηγορία 2:** ενίσχυση τύπου πλεξης και ενισχυμένο πλαστικό. DMC (ένωση σχηματισμού τύπου πλέγματος SMC (ένωση χύτευσης φύλλου).
- **Κατηγορία 3:** Εγκάρσια ( $90^\circ$ ) μιας κατεύθυνσης σύνθετα υλικά. Μονής κατεύθυνσης ( $0^\circ$ ) και σύνθετα υλικά πολλαπλών κατευθύνσεων (για παράδειγμα, ίνες γυαλιού)
- **Κατηγορία 4:** μονής κατεύθυνσης ( $0^\circ$ ) και πολυκατευθυντικά σύνθετα υλικά (για παράδειγμα, συστήματα από ανθρακονήματα).

### 5.5 Κατηγορίες αστοχίας

Υπάρχουν Πολλών ειδών αστοχιών στο πείραμα τις κάμψεις κι αυτό γιατί υπάρχουν αρκετές παράμετροι όπως το υλικό, το είδος πειράματος, αν το υλικό μας είναι ενισχυμένο με ίνες ή πολύ-στρωματικά κ.α. Η παρακάτω εικόνα μας δείχνει τις πιο συχνές αστοχίες



**Εικόνα 5.3:** Κατηγορίες Αστοχιών Κάμψης [45].



**Εικόνα 5.4.** Αστοχία υλικού σε μέθοδο κάμψης 4 σημείων [46].



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### “ΔΙΕΥΡΗΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΟΚΙΜΩΝ (NDT)”

#### 6.1 Εισαγωγή Στις Διευρυμένες Μεθόδους Δοκίμων

Υπάρχουν ποικιλίες για την αξιολόγηση υλικών ή εξαρτημάτων και οι μη καταστρεπτικές μέθοδοι αποτελούν σημαντική κατηγορία αυτών με πολλές εφαρμογές. Το πεδίο Μη Καταστρεπτικής Αξιολόγησης (NDE) ή Μη Καταστρεπτικών Δοκιμών (NDT, Non Destructive Testing) περιλαμβάνει τον εντοπισμό και τον χαρακτηρισμό ζημιών στην επιφάνεια και στο εσωτερικό των υλικών χωρίς να διαχωρίζονται ή να αλλοιώνονται με κάποιο άλλο τρόπο το υλικό (Lockard, 2015). Με άλλα λόγια, το NDT αναφέρεται στη διαδικασία αξιολόγησης και επιθεώρησης υλικών ή εξαρτημάτων για χαρακτηρισμό ή εύρεση ελαττωμάτων σε σύγκριση με ορισμένα πρότυπα χωρίς να αλλάξουν τα αρχικά χαρακτηριστικά ή να βλάψουν το αντικείμενο που δοκιμάζεται.

Οι τεχνικές NDT παρέχουν ένα οικονομικά αποδοτικό μέσο δοκιμής ενός δείγματος για μεμονωμένη έρευνα ή μπορεί να εφαρμοστεί σε ολόκληρο το υλικό για έλεγχο σε ένα σύστημα ελέγχου ποιότητας παραγωγής (Newswire, 2013). Οι Μη-καταστροφικές μέθοδοι μπορούν κατηγοριοποιηθούν σε 3 βασικές κατηγορίες:

- Τα Οπτικά μέσα (Visual inspection)
- Τα Εικονικά μέσα (Imaging techniques)
- Τα ηχητικά μέσα (Acoustic wave bases)

#### 6.2 Ηχητικά μέσα

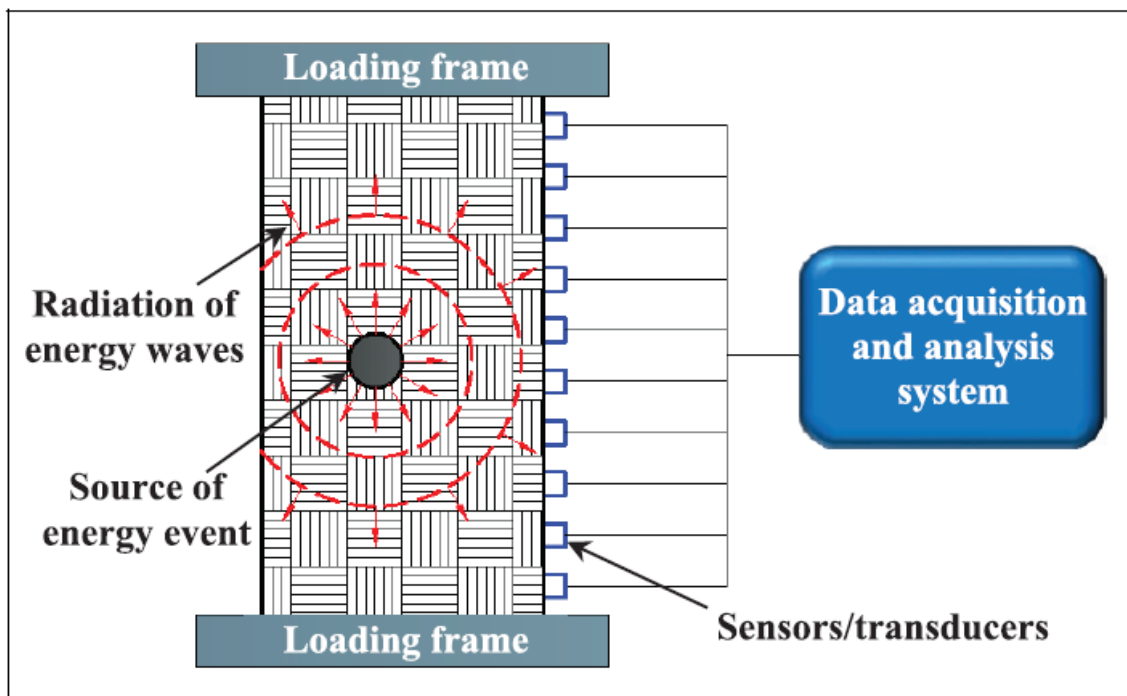
##### 6.2.1 Ηχητική Εκπομπή (Acoustic emission, AE)

Η μέθοδος AE είναι μοναδική στο ότι: (1) τα σήματα, δηλαδή τα κύματα τάσης, εκπέμπονται από το δείγμα δοκιμής, όχι από εξωτερικές πηγές (όπως συμβαίνει με άλλες μεθόδους NDT, (2) συνήθως καταγράφονται δεδομένα τάσης ή μετατόπισης και όχι ως γεωμετρικά ελαττώματα, (3) παρακολουθεί δυναμικές διεργασίες σε ένα υλικό, παρακολουθώντας την ανάπτυξη ορισμένων ελαττωμάτων, γεγονός που ωφελεί σημαντικά τις δοκιμές κόπωσης. Έχει αναφερθεί ότι το NDT που βασίζεται σε AE

μπορεί να ανιχνεύσει ρωγμές κόπωσης, αστοχία στις ίνες, μικρορωγμές στη μήτρα, και αποκόλληση στην επιφάνεια. Ωστόσο, υπάρχουν επίσης ορισμένες δυσκολίες. Τα δεδομένα που συλλέγονται κατά τη φόρτωση ενός σύνθετου συστήματος μπορεί να είναι σε διάφορες μορφές. το πιο συνηθισμένο είναι το σήμα πλάτους AE.

Η επεξεργασία και η ανάλυση δεδομένων είναι χρονοβόρα και απαιτούν συγκεκριμένες δεξιότητες και εμπειρία. Έχουν γίνει προσπάθειες για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων. Μια κοινή προσέγγιση είναι η ανάλυση πολλαπλών παραμέτρων για τη συμπλήρωση της ανάλυσης ζημιών, όπως αθροιστικές μετρήσεις συμβάντων, ενέργεια, διάρκεια ή συχνότητα των λαμβανόμενων σημάτων .

Άλλες λύσεις περιλαμβάνουν επαλήθευση τρόπων βλάβης μέσω άλλων μεθόδων, για παράδειγμα, μικροσκοπία, για την παροχή πιο αξιόπιστης ανάλυσης. Οι τυποποιημένες πρακτικές χρήσης AE περιλαμβάνουν το πρότυπο ASTM E1067 για την εξέταση δεξαμενών/δοχείων από πλαστικό ενισχυμένο με ίνες υάλου (GFRP). Το πρότυπο ASTM E1118 σε σύνθετους σωλήνες, το πρότυπο ASTM E2191 σε σύνθετα δοχεία πίεσης με νήματα. Το πρότυπο ASTM E207667 σε σύνθετα πτερύγια ανεμιστήρα καθώς και το πρότυπο ASTM E2661 σε πλάκες και επίπεδες σύνθετες κατασκευές για την αεροδιαστημική.



**Εικόνα 6.1:** Σχηματική απεικόνιση τοπικών παροδικών αλλαγών στα αποθηκευμένα ελαστική ενέργεια μέσα σε σύστημα υλικού υπό φόρτιση, που δείχνει την αρχή μέτρησης του NDT που βασίζεται σε ακουστικές εκπομπές [47].

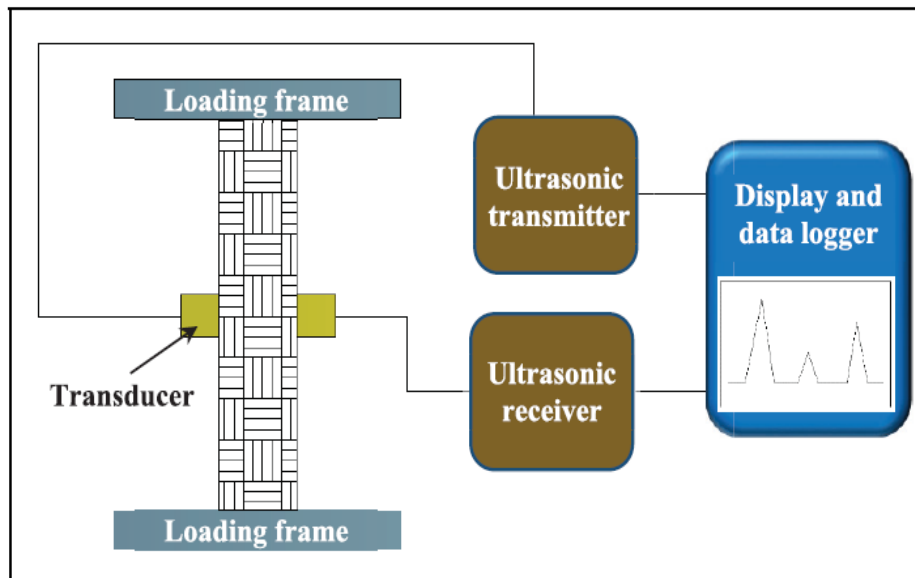
## 6.2.2 Μέθοδος με Υπέρηχο (ultra-sonic testing ,UT)

Το UT είναι μια τεχνική ακουστικής επιθεώρησης, η οποία επεκτείνεται γρήγορα σε πολλούς τομείς κατασκευής και ανίχνευσης εν λειτουργία. Λειτουργεί μέσω δοκιμών επιφανειακών κυμάτων, διάδοσης μαζικού κύματος και διάδοσης καθοδηγούμενου κύματος, ενώ η τεχνική ανάλυσης καθοδηγούμενου κύματος είναι ανώτερη για ανισότροπα υλικά. Για επιθεώρηση NDT σύνθετων υλικών, τα ελαστικά κύματα ή τα «Lamb waves» μεταδίδονται σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις λόγω της ανισότροπης φύσης τους που καθιστά την τεχνική αποτελεσματική.

Το UT λειτουργεί σε τρεις τρόπους ανίχνευσης, δηλαδή, αντανάκλαση, μετάδοση και ευρεία μετάδοση παλμικών ελαστικών κυμάτων σε ένα υλικό. Εισάγει καθοδηγούμενα ηχητικά κύματα υψηλής συχνότητας (που κυμαίνονται από 1 kHz έως 30MHz) για να ανιχνεύσει αποτελεσματικά το μέγεθος του ελαττώματος, τη θέση ρωγμών, τη θέση αποκόλλησης, την κυματικότητα των ινών, τον προσανατολισμό των ινών της μεσαίας κλίμακας και τη σειρά στοίβαξης. Υπάρχουν διάφοροι τύποι συστημάτων UT με εκατοντάδες κατευθυντήριες λειτουργίες και συχνότητες κυμάτων διαθέσιμες. Ένα τυπικό σύστημα UT αποτελείται από ένα κύκλωμα πομπού και δέκτη, εργαλείο μορφοτροπεία και συσκευές απεικόνισης, βλέπε *Εικόνα 6.2*.

Ο πομπός μπορεί είτε να είναι διατεταγμένος υπό γωνία προς το δείγμα είτε με τη μορφή σταδιακής συστοιχίας. Τα καθοδηγούμενα κύματα μπορούν να δημιουργηθούν με χρήση: (1) υπερηχητικού αισθητήρα, (2) λείζερ, (3) πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, (4) μετατροπεία ή (5) οπτικών ινών. Οι πιθανοί τύποι ζημιών που μπορεί να προσφέρει ο NDT βασισμένος σε κύματα Lamb συνοψίζονται από τον Rose η επιλογή τρόπου, δημιουργία και συλλογή, μοντελοποίηση και προσομοίωση, επεξεργασία σήματος και ερμηνεία έχουν τεκμηριωθεί καλά από τους Su et al. μεταγενέστερη ανασκόπηση για καθοδηγούμενα κύματα για αναγνώριση ζημιών σε δομές αγωγών παρέχεται από τους Guan.

Οι τεχνικές UT για σύνθετα υλικά έχουν τυποποιηθεί: Το ASTM E2373 παρέχει τις απαιτήσεις για την ανάπτυξη UT του χρόνου πτήσης (TOF). ASTM E2580 για επιθεωρήσεις σε επίπεδα σύνθετα πάνελ και δομές σάντουιτς σε αεροδιαστημικές εφαρμογές. ASTM E2981 για δοχεία πίεσης σε αεροδιαστημικές εφαρμογές.



**Εικόνα 6.2** Αρχή της δοκιμής υπερήχων ενός σύνθετου υλικού σε λειτουργία μετάδοσης [47].

### 6.2.3 Συνδυασμός Υπέρηχου με ηχητική εκπομπή (UT+UA)

Υπάρχει επίσης κάποιο ενδιαφέρον για μια συνδυασμένη μέθοδο ΑΕ και UT, δηλαδή την ακουστο-υπερηχητική τεχνική (AUT), όπως εισήχθη για πρώτη φορά από τον Vary το 1981. Υιοθετώντας ο μετατροπέας υπερήχων, οι επαναλαμβανόμενοι παλμοί υπερήχων εισάγονται σε ένα υλικό και οι κυματομορφές που δημιουργούνται μεταφέρουν τις μορφολογικές πληροφορίες που συμβάλλουν να καταστρέψουν μηχανισμούς. Η έννοια του «συντελεστή κύματος τάσης» ορίζεται ως μια σχετική μέτρηση της αποδοτικότητας της διάχυσης ενέργειας για να υποδείξει περιοχές ζημιών. Σε NDT, το AUT χρησιμοποιείται κυρίως για τον προσδιορισμό της σοβαρότητας των εσωτερικών ατελειών και ανομοιογενειών που εμφανίζονται στα σύνθετα υλικά

### 6.3 Οπτικά μέσα (Visual inspection, VI)

Το VI είναι ο πιο βασικός τύπος τεχνικής NDT για την επιθεώρηση ζημιών. Είναι γρήγορο, οικονομικό και ευέλικτο, ενώ τα μειονεκτήματά του είναι αρκετά εμφανή και σημαντικά. Οι μέθοδοι VI περιλαμβάνουν οπτικό έλεγχο (VOT) και LPT. Η ανάλυση VOT είναι μια κορυφαία διαδικασία στην παρακολούθηση των ατελειών της επιφάνειας για κριτήρια αποδοχής και απόρριψης κατά την παραγωγή σύνθετων εξαρτημάτων. Η τεχνική LPT είναι μια ευρέως εφαρμοσμένη μέθοδος ελέγχου χαμηλού κόστους. Έχει

χρησιμοποιηθεί σε μη πορώδη υλικά για τον εντοπισμό ελαττωμάτων χύτευσης, σφυρηλάτησης και συγκόλλησης επιφανειών, όπως ρωγμές, πορώδες επιφάνειας, διαρροές, ρωγμές κόπωσης κατά τη χρήση και ούτω καθεξής.

Οι μέθοδοι VI είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές στην ανίχνευση μακροσκοπικών ατελειών, λανθασμένες διαστάσεις, κακό φινίρισμα επιφάνειας και κακές προσαρμογές. Συνήθως η χρήση και εύρεση εξοπλισμού είναι εύκολη, όπως μικροσκοπικές κάμερες ή ενδοσκόπια. Πέντε μελέτες μικρών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων έδειξαν ότι η διάρκεια της στερέωσης των αισθητήρων από εκπαιδευμένους επιθεωρητές ήταν 200ms. Παρατηρείτε ότι όσο πιο γρήγορη είναι η συλλογή δεδομένων τόσο πιο λιγότερη ακρίβεια θα μας δείξει το πείραμα. Η ακρίβεια των δεδομένων εξαρτάται επίσης από την εκπαίδευση, τις διαδικασίες και τις συσκευές επιθεώρησης (οπτικά, φωτισμός κλπ.)

## **6.4 Εικονικά μέσα (imaging technique)**

### **6.4.1 Μέθοδος δοκιμής με υπέρυθρες IRT (infrared)**

Η IRT είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό και την επεξεργασία των υπέρυθρων εκπομπών ενέργειας από ένα αντικείμενο με τη μέτρηση και τη χαρτογράφηση θερμικών κατανομών. Το κάθε αντικείμενο με θερμοκρασία υψηλότερη από το απόλυτο μηδέν εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εμπίπτει στο φάσμα υπέρυθρων ακτινών. Παρέχει δυνατότητες από άποψη μη επαφής, μη επεμβατικής, μέτρησης σε πραγματικό χρόνο, υψηλής ανάλυσης και κάλυψης μεγάλων όγκων.

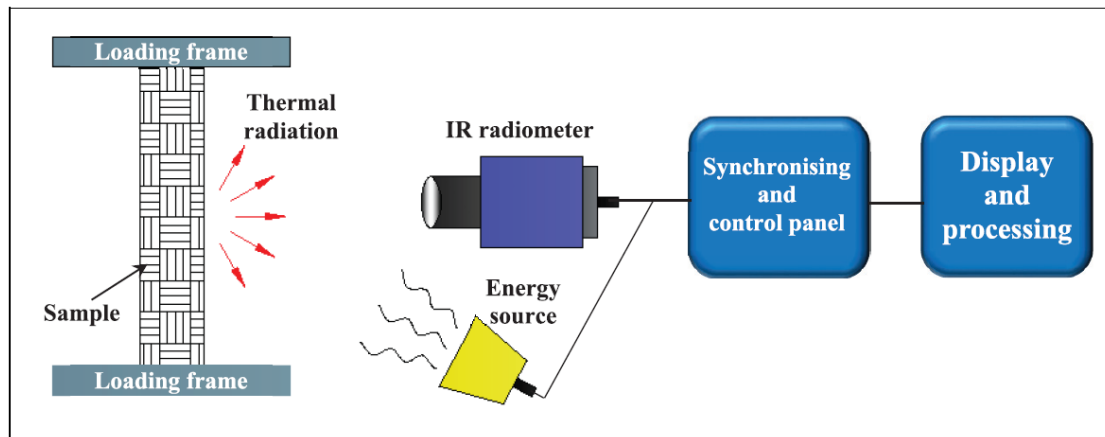
Η μέθοδος IRT χρησιμοποιείται αποτελεσματικά για την παρακολούθηση ολόκληρης της ζωής ενός προϊόντος, από την κατασκευή (έλεγχος διαδικτυακής διαδικασίας), έως το τελικό προϊόν (αξιολόγηση NDT) και έως τη συντήρηση και διάγνωση κατά την υπηρεσία. Έχει εφαρμοστεί στην έρευνα και σε διάφορα πτυχές στον κλάδο, συμπεριλαμβανομένου του NDT, των διαγνωστικών κτιρίων, επιστήμη προσκόλλησης, προληπτική συντήρηση παρακολούθησης καταστάσεων, ιατρικά διαγνωστικά, κτηνιατρική και πολλά άλλα. Όσον αφορά τα σύνθετα υλικά και δομές, το NDT με βάση το IRT έχει επίσης χρησιμοποιηθεί ευρέως, ειδικά κατά τη διάρκεια της κατασκευής για αεροδιαστημικές εφαρμογές. Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό συμπερασμάτων, αποσύνδεσης, αποκόλλησης και σπασμένων δικτύων. Τόσο η

Boeing όσο και η Airbus έχουν χρησιμοποιήσει το IRT για τη διαρθρωτική παρακολούθηση της υγείας για να διασφαλίσουν την ακεραιότητα των σύνθετων προϊόντων τους.

Ένα τυπικό σύστημα IRT περιέχει ένα υπέρυθρο ακτινομετρητή, με ή χωρίς πηγή ενέργειας, συνδεδεμένος με έναν πίνακα ελέγχου, λογισμικό απεικόνισης, βλέπε *Εικόνα 6.3*. Το ραδιόμετρο είναι ο πυρήνας του συστήματος IRT. απορροφά τις εκπομπές ενέργειας IR και τις μετατρέπει σε ηλεκτρικά σήματα τάσης ή ρεύματος. Στη συνέχεια μεταδίδονται και εμφανίζονται ως υπέρυθρες εικόνες κατανομής θερμοκρασίας. Η χρήση IRT μπορεί να εφαρμοστεί μέσω: (1) παθητικής και (2) ενεργής θερμογραφίας (AT). Στην παθητική θερμογραφία (PT), η θερμική ακτινοβολία εκπέμπεται απευθείας από τις επιφάνειες του σώματος δοκιμής υπό φυσικές συνθήκες και στη συνέχεια παρακολουθούνται.

Για το AT, μια ροή θέρμανσης ή ψύξης δημιουργείται και διαδίδεται στο αντικείμενο δοκιμής, και θερμικές αποκρίσεις σύμφωνα με το νόμο Stefan – Boltzmann στη συνέχεια ανιχνεύεται και καταγράφεται για να αποκαλύψει εσωτερικές δομές. Πρόσφατες εξελίξεις στις τεχνικές επεξεργασίας σήματος και τις εξελίξεις εξοπλισμού έχουν καταστήσει τη μέθοδο AT πιο πρακτική και αποτελεσματική από τη συμβατική προσέγγιση PT. Με βάση τις μεθόδους ενεργειακής διέγερσης, η μέθοδος AT έχει εξελιχθεί σε διαφορετικές κατηγορίες. Πρώτον, η οπτική θερμογραφία είναι η πιο παραδοσιακή μορφή IRT, χρησιμοποιώντας οπτικές πηγές όπως φωτογραφικά φλας, λάμπες αλογόνου ή λέιζερ, οι οποίες είναι επίσης γνωστές ως παλμική θερμογραφία, διαμορφωμένη (κλειδωμένη) θερμογραφία ή θερμογραφία λέιζερ, αντίστοιχα.

Δεύτερον, επαγωγική θερμογραφία, η οποία μοιράζεται παρόμοια αρχές του ECT, που χρησιμοποιεί ηλεκτρονικά ή μαγνητικά ρεύματα για την πρόκληση ενεργειακών κυμάτων. θερμογραφία με υπερήχους που προσελκύει αυξανόμενο ενδιαφέρον. Οι Yang και He έχουν παρουσιάσει μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση των μεθόδων οπτικών και μη οπτικών IRT και των εφαρμογών τους NDT σε σύνθετα υλικά. Ο αναγνώστης παραπέμπει στο πρότυπο ASTM E2582 για τυπική πρακτική σχετικά με τη χρήση IRT με σύνθετα πάνελ και επιδιορθώσεις μπαλωμάτων σε αεροδιαστημικές εφαρμογές.



**Εικόνα 6.3:** Σχηματική απεικόνιση μέτρησης για ένα σύστημα υπέρυθρης θερμογραφίας σε λειτουργία ανάκλασης [47].

#### 6.4.2 Μέθοδος δοκιμής με την χρήση κυμάτων THz (Terahertz tech)

Η μέθοδος δοκιμής με χρήση κυμάτων THz βρίσκονται εντός του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από 100 GHz έως 30 THz, που ανήκουν σε μη ιοντίζουσα ακτινοβολία και δεν είναι επιβλαβή για τους βιολογικούς ιστούς (Εικόνα 6.4). Υπάρχουν πολλές πηγές κυμάτων THz στη φύση, αν και στο παρελθόν ήταν δύσκολο να δημιουργηθούν και ανιχνεύουν κύματα THz, έτσι για πολλά χρόνια, υπήρχαν λίγες εφαρμογές. Λόγω των σημαντικών ανακαλύψεων σε τεχνολογία λέιζερ και τεχνολογίες κατεργασίας σε μέγεθος νανομέτρου κατά τη δεκαετία του 1980, υπήρξε μια ταχεία επέκταση των εφαρμογών για την επιστήμη και την τεχνολογία THz.

Η τεχνολογία NDT που βασίζεται σε THz έχει επίσης αρχίσει να είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική για σύνθετες επιθεωρήσεις, προσφέροντας πλεονεκτήματα όσον αφορά υψηλότερη ανάλυση και καλύτερη διείσδυση στα περισσότερα υλικά σε σύγκριση με άλλες τεχνικές.

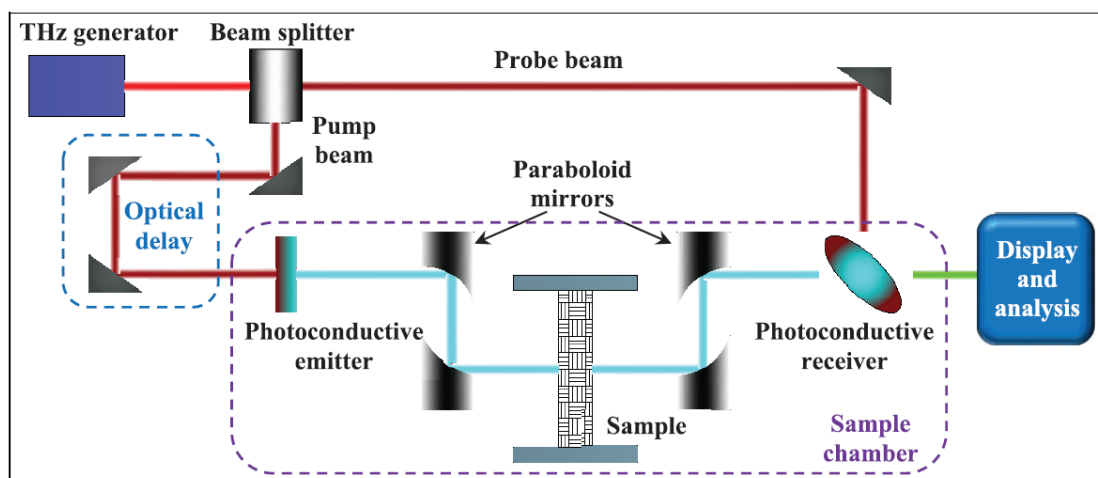
Τα κύματα THz έχουν καλή διεισδυτική ισχύ για μη μεταλλικά, μη πολικά υλικά, συμπεριλαμβανομένων αφρών, κεραμικών, γυαλιού, ρητίνης, χρώματος, καουτσούκ και σύνθετων υλικών. Οι τεχνικές NDT που βασίζονται σε THz χρησιμοποιούν τα χαρακτηριστικά κύματος για την ανίχνευση, ανάλυση και αξιολόγηση υλικών συστημάτων, η οποία έχει προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον σε διάφορους τομείς, οδηγώντας σε ταχεία επέκταση. Το σύστημα προκαλεί βραχεία κύματα THz σε ένα

υλικό, το οποίο αλληλοεπιδρά με διαφορετικές φάσεις, εγκλείσματα, ελαττώματα ή βλάβες.

Οι εσωτερικές δομές μέσα στο υλικό προσδιορίζονται με ανίχνευση και ανάλυση ανακλώμενων ή μεταδιδόμενων κυμάτων THz. Η πολυφασική και περίπλοκη φύση των σύνθετων υλικών ταιριάζει απόλυτα στο NDT που βασίζεται σε THz-προσφέρει πολύπλευρες, πιο περιεκτικές πληροφορίες για ανίχνευση και αποκάλυψη εσωτερικές δομές και ζημιές μέσα σε ένα σύνθετο. Η τεχνική NDT που βασίζεται σε THz εφαρμόζεται συνήθως μέσω (1) ενός συστήματος φασματοσκοπίας χρονικού πεδίου THz (THz-TDS), επίσης γνωστό ως φασματοσκοπία παλμών, ή (2) σύστημα συνεχούς κύματος (THz-CW).

Η ρύθμιση ανίχνευσης καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο αξιολογούνται οι πληροφορίες μέσα σύνθετα υλικά. Στο σύστημα THz-TDS, τα βραχέως παλμικά κύματα THz δημιουργούνται από οπτική διέγερση μιας κεραίας φωτο-αγωγιμότητας που εκπέμπει παλμό λέιζερ σε femtosecond, μετράτε η χρονικά εξαρτώμενη εξέλιξη του ηλεκτρικού πεδίου THz ενός παλμού, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των πληροφοριών της φάσης μέσα σε ένα σύνθετο.

Για το σύστημα THz-CW, κύματα THz υψηλής ισχύος παράγονται μέσω λέιζερ αερίου, λέιζερ κβαντικού και οι πληροφορίες φάσης μετρούνται καταγράφοντας τη μέση ένταση (που σχετίζεται με το πλάτος του κύματος) του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Ως αναδυόμενη τεχνική NDT, η τυποποιημένη πρακτική για τη χρήση της προσέγγισης THz εξακολουθεί να αναπτύσσεται.



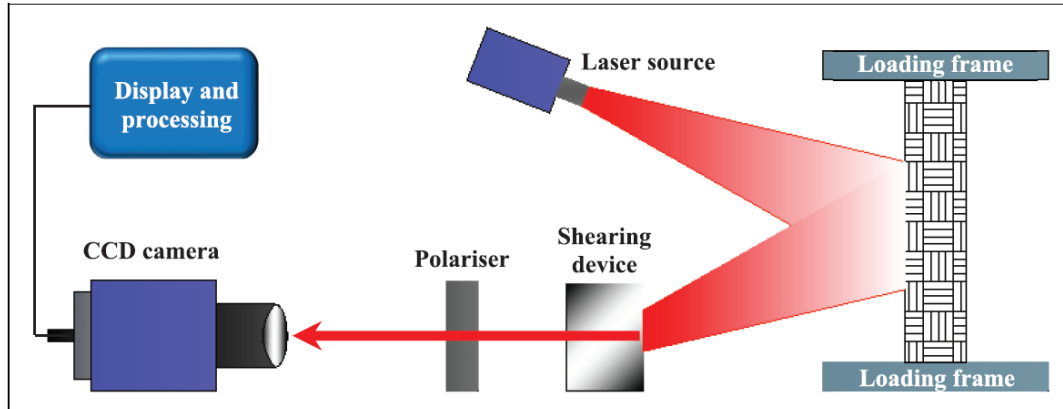
**Εικόνα 6.4** Σχηματική απεικόνιση των αρχών μέτρησης της φασματοσκοπίας χρονικού τομέα THz με χρήση φωτοαγωγιμων κεραιών [47].



### 6.4.3 Shearography

Μια τυπική ρύθμιση της Shearography φαίνεται στην *Εικόνα 6.5*. Μια ακτίνα λέιζερ φωτίζει μια επιφάνεια δείγματος και η δέσμη διασκορπίζεται και ανακλάται. Το προκύπτον μοτίβο απεικονίζεται μέσω συσκευής διάθλασης (συμβολόμετρο Michelson ή διαθλαστικό οπτικό στοιχείο), το οποίο το χωρίζει σε δύο συνεκτικές εικόνες με μία να παρακολουθείται κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης. Μια ελεγχόμενη διαδικασία καταπόνησης είναι απαραίτητη και εφαρμόζεται για την εύρεση, κραδασμών, μικροκυμάτων ή μηχανικής φόρτισης.

Το μοτίβο στη συνέχεια καταγράφεται από μια κάμερα συσκευής (CCD), η οποία παρέχει πληροφορίες για την δομή του δοκίμιου. Έχει υιοθετηθεί για επιθεώρηση και αξιολόγηση σε διάφορα σύνθετα προϊόντα, για παράδειγμα, σωλήνες, δομές σάντουιτς, λεπίδες ανεμογεννητριών, αεροδιαστημικές κατασκευές, καθώς και αγωνιστικά ελαστικά. Ένα παράδειγμα τυπικής πρακτικής με τη χρήση shearography για πολυμερή σύνθετα και σύνθετα τύπου σάντουιτς στον αεροδιαστημικό χώρο αντιπροσωπεύεται από το ASTM E2581.



**Εικόνα 6.5:** Σχηματική απεικόνιση συστήματος για το Shearography testing [47].

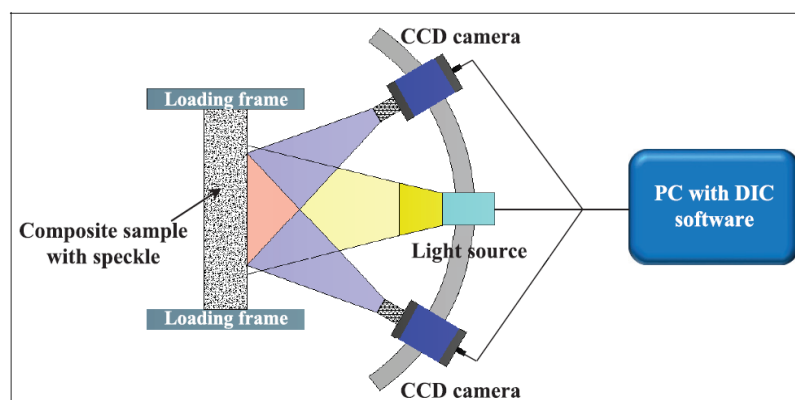
### 6.4.4 DIC Digital image Correlation

Το DIC είναι μια απλή και οικονομικά αποδοτική οπτική τεχνική NDT για τη μέτρηση της καταπόνησης και της μετατόπισης, οι οποίες είναι κρίσιμες παράμετροι σε μηχανικά και κατασκευαστικά έργα. Αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1980 και έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως μόνο τα τελευταία χρόνια λόγω της ταχείας ανάπτυξης

υπολογιστών και μεθόδων απόκτησης εικόνας. Οι εικόνες συνήθως λαμβάνονται μέσω κάμερας CCD, πιθανώς με τη βοήθεια μικροσκοπίας. Το σύστημα DIC παρακολουθεί μπλοκ τυχαίων εικονοστοιχείων σε μια επιφάνεια δείγματος και συγκρίνει ψηφιακές φωτογραφίες σε διαφορετικά στάδια παραμόρφωσης για να δημιουργήσει δισδιάστατα (2D) ή τρισδιάστατα (3D) διανυσματικά πεδία παραμόρφωσης πλήρους πεδίου και χάρτες παραμόρφωσης.

Έτσι, οποιεσδήποτε αλλαγές στη δομή ή την επιφάνεια μπορούν εύκολα να αντικατοπτριστούν για να δώσουν λεπτομέρειες σχετικά με την τάση της επιφάνειας, την παραμόρφωση ή τη διάδοση ρωγμών, καθιστώντας το ιδανικό για μελέτες διάδοσης ρωγμών και παραμόρφωση. Προσφέρει πιο ακριβή παρακολούθηση της καταπόνησης από τα συμβατικά εκτενόμετρα ή μετρητές καταπόνησης, τα οποία συχνά υποφέρουν από ατελή προσάρτηση στη μετρούμενη επιφάνεια και τους περιορισμούς που επιβάλλονται από τιμές που υπολογίζονται κατά μέσο όρο στο μήκος του μετρητή.

Στην *Εικόνα 6.6* δείχνει ένα τυπικό σύστημα DIC για χαρτογράφηση στελέχους ενός σύνθετου δείγματος. εδώ, μπορεί να απαιτείται ειδικός φωτισμός. Το δείγμα ψεκάζεται με λευκό στοχαστικό στίγμα πριν από τη δοκιμή και δύο κάμερες CCD πρέπει να βαθμονομούνται κάθε φορά. Τα δεδομένα απεικόνισης μπορούν να αναλυθούν μέσω λογισμικού για να αποκαλυφθούν αλλαγές με εικόνες αναφοράς και η καταπόνηση ή η παραμόρφωση μπορούν να υπολογιστούν κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Δεδομένης της ευελιξίας συστημάτων DIC, η τυποποίηση της τεχνικής DIC είναι δύσκολο ή ακόμη και αδύνατο να εφαρμοστεί σε κάθε μεμονωμένη κατάσταση.

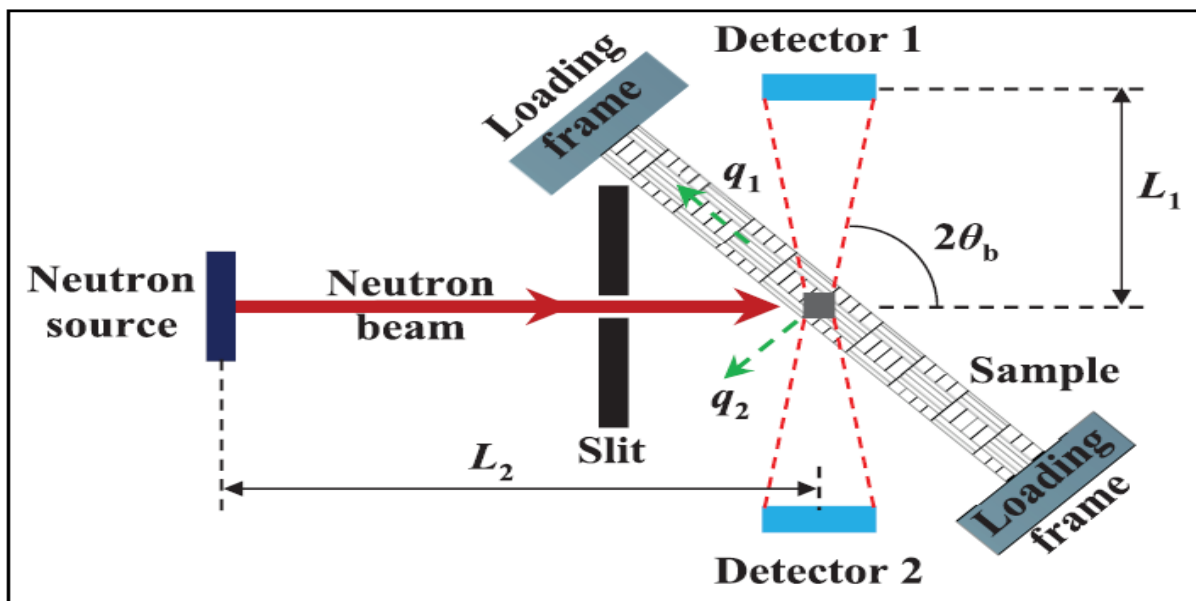


**Εικόνα 6.6:** Σχηματική απεικόνιση μιας τυπικής διάταξης DIC για χαρτογράφηση καταπόνησης ενός σύνθετου δείγματος ψεκασμένου με στοχαστική κηλίδα πρότυπο [47].

### 6.4.5 NI (Neutron Radiography)

Το νετρόνιο ανακαλύφθηκε από τον Sir J. Chadwick στο Cambridge το 1932 μέσω της σύγκρουσης του βηρυλλίου από  $\alpha$ -σωματίδια. Τα νετρόνια έχουν χαρακτηρη κύματος, τα μήκη κύματος είναι της τάξης των ατομικών αποστάσεων (0,1nm) και κινητικές ενέργειες κοντά στο ενέργειες ατομικής δόνησης (10-2eV). Έτσι, δημιουργούν τις δυνατότητες μελετών σκέδασης, οι οποίες αποδείχθηκαν πειραματικά το 1946 από τους Wollan και Clifford χρησιμοποιώντας τον Graphite Reactor στο Oak Ridge National Laboratory, στην εποχή του Manhattan Project στις Ηνωμένες Πολιτείες. Σημαντική πρόοδος έγινε με σάρωση νετρονίων (NSS) κατά τη δεκαετία του 1960 και του 1970.

Τεχνικές όπως σκέδαση νετρονίων μικρής γωνίας (SANS), σκέδαση νετρονίων TOF, τεχνικές περιστροφής και η ανακλαστικότητα νετρονίων στη συνέχεια διεύρυναν τις εφαρμογές του NSS σε μεγαλύτερους επιστημονικούς τομείς, όπως χημεία στερεάς κατάστασης, υγρά, μαλακή ύλη, επιστήμη υλικών, γεωεπιστήμες και βιολογία. Ένα σχηματικό παράδειγμα του NSS χρησιμοποιώντας το ENGIN-X (ISIS Neutron and Muon Source, Rutherford Appleton Laboratory, UK) παρουσιάζεται στην εικόνα 6.7. Το NI έχει προχωρήσει ως αξιόπιστη τεχνική NDT, με τη μορφή τοπογραφίας νετρονίων και ακτινογραφίας.

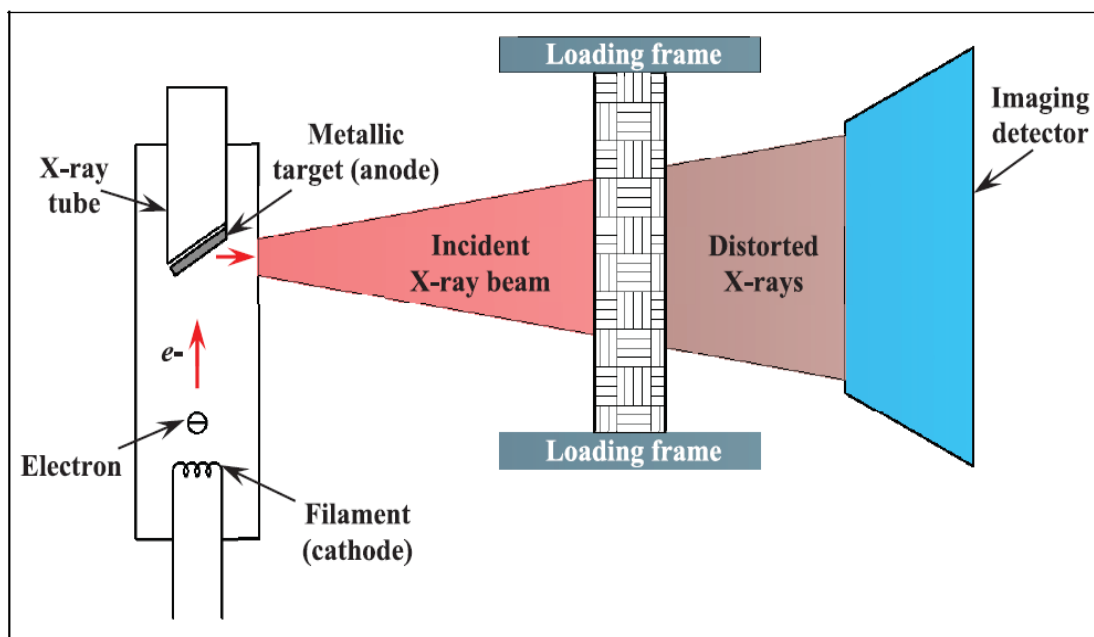


**Εικόνα 6.7:** Σχηματική αναπαράσταση ενός σαρωτή καταπόνησης με ακτίνα νετρονίου στο ENGIN-X. Η ελαστική καταπόνηση μετρείται μαζί με τις κατευθύνσεις της ανταλλαγής παλμών διανύσματα,  $q_1$  και  $q_2$ , μέσω των δύο ανιχνευτών [47].

#### 6.4.6 XRI (X-ray actinography)

Μια συνήθως χρησιμοποιούμενη εργαστηριακή πηγή ακτίνων X για απεικόνιση είναι ο σωλήνας ακτίνων X, όπως απεικονίζεται σχηματικά στην *Εικόνα 6.8*. Μια τάση πόλωσης 30-60 kV εφαρμόζεται μεταξύ του νήματος και της μεταλλικού δοκού σε έναν εκκενωμένο σωλήνα ακτίνων X, προκαλώντας ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από το νήμα να συγκρουστούν με την μεταλλική δοκό με μεγάλη ταχύτητα (ενέργεια) και να ακτινοβολήσουν ακτίνες X. Ένα σημαντικό μειονέκτημα των εργαστηριακών συστημάτων XRI είναι η έλλειψη ικανότητας να διεισδύσουν βαθιά σε υλικά μηχανικής, η οποία εξαρτάται από την ενέργεια των ακτίνων X και το μήκος κύματος. πηγή, η οποία δεν μπορεί να απενεργοποιηθεί και είναι δύσκολο να υιοθετηθεί ως συμπαγής πηγή για να παρέχει ροή φωτονίων συγκρίσιμη με σωλήνα ακτίνων X.

Έτσι, η αποδοτικότητα ανίχνευσης είναι αρκετά χαμηλή και απαιτούνται μεγάλοι χρόνοι μέτρησης. Το XRI μπορεί επίσης να εφαρμοστεί μέσω διαφορετικών μεθόδων όπως παρουσιάστηκε πρόσφατα από τους Liu et al. Garcea et al. Ανασκόπησε τις εφαρμογές της αξονικής τομογραφίας (CT) σε σύνθετα πολυμερή. Η συνήθης πρακτική στη χρήση ακτινογραφίας (ακτίνες X ή ακτίνες γ) για μεταλλικά και μη μεταλλικά υλικά συνιστάται στο πρότυπο ASTM E2033, το πρότυπο ASTM E2662 παρέχει καθοδήγηση σχετικά με την ακτινογραφική εξέταση επίπεδων σύνθετων πάνελ και υλικών πυρήνα σάντουιτς για αεροδιαστημικές εφαρμογές.



**Εικόνα 6.8:** Σχηματική αναπαράσταση εργαστηριακής ακτινογραφίας [47].

**Πίνακας 8:** με πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μη καταστροφικών δοκιμών (NDT)

Μη καταστροφικοί Μέθοδοι	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
VI	Απλή , γρήγορη, μικρό κόστος , εύκολη στο χειρισμό	Μικρο-Ελλωματα είναι δύσκολο να ανιχνευτούν
AE	Προσφέρει παρακολούθηση σε αληθινό χρόνο σε θραύση Υψηλά ευαίσθητη σε κύματα τάσης Καλύπτει μεγάλο φάσμα μετρήσεων	Η ευαισθησία του οργάνου επηρεάζεται από τον θόρυβο στο χώρο πειραματισμού . δεν συνιστάτε για δοκίμια μεγάλου πάχους .
UT	Ικανό να ανίχνευση εσωτερικά ελαττώματα . Μικρός εξοπλισμός κι εύκολος στη μεταφορά Χαμηλό κόστος	Χρειάζεται χειριστή με αρκετή εμπειρία . Ευαίσθητο σε παράγοντες του χώρου πειράματος . Χρειάζεται εξελιγμένος υπολογιστής
IRT	Εύκολη και ασφαλής δοκιμή Παραγωγικό κι οικονομικό Μη-ιονιστική ακτινοβολία	Μικρή ακρίβεια σε δοκίμια πολύπλοκης γεωμετρίας
THz	Υψηλή ακρίβεια Υψηλή Ανάλυση Υψηλή ευαισθησία	Ακριβό Συνιστάται για μη αγώγιμα υλικά
ST	Πιο αξιόπιστο σε περιβαλλοντικές αναταραχές Κατάλληλο για δοκιμές σε μεγάλα σύνθετα	Μικρή ανοχή σε δύσκαμπτά υλικά Δύσκολη ανίχνευση στην εύρεση θραύσης σε εσωτερικό επίπεδο
DIC	Οικονομική Εύκολη στην υλοποίηση	Χρειάζεται μεγάλη ακρίβεια όσων αφορά την διάταξη σε σύνθετα ενισχυμένα με κόκκους
XRI	Υψηλή απόδοση Υψηλή ευκρίνεια όσων αφορά την εντόπιση και εικόνας (σχήμα) των ελαττωμάτων Προσφέρει 2D και 3D εικόνα	Δεν συνιστάτε για μεγάλου μεγέθους δοκίμια Επικίνδυνη ακτινοβολία Συνιστάται μόνο σε συγκεκριμένα εργαστήρια
NI	Ειδική και υψηλή ανάλυση σε εικόνα Υψηλή ικανότητα Επεξεργασίας εικόνας Προσφέρει 2D και 3D εικόνα	Επικίνδυνη ακτινοβολία Συνιστάται μόνο σε συγκεκριμένα εργαστήρια



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### “ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ”

Η Τεχνολογία δοκιμών στα σύνθετα υλικών έχει αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό με την πάροδο του χρόνου και συνεχίζει να αναπτύσσεται όπως φαίνεται λόγω των καινούργιων μεθόδων που ανακαλύπτονται όπου δεν καταστρέφουν το σύνθετο υλικό κατά την διάρκεια μια δοκιμής. Αυτό οφείλεται λόγω της μεγαλύτερης ζήτησης σε αεροδιαστημικές κατασκευές, αθλητικό εξοπλισμό και κατασκευών στις αυτοκινητοβιομηχανίες.

Από τις πρώτες μεθόδους οι που εξελίχθηκαν όπως αναφέρεται παραπάνω είναι οι μεταλλικές τεχνικές οι οποίες αναπτύχθηκαν στις καταστροφικές μεθόδους. Οι καταστροφικές μεθόδους δοκιμής όπως αναφέρουμε στην αρχή με την μέθοδο εφελκυσμού είναι ευρέως χρησιμοποιημένη σε πολλά ερευνητικά κέντρα και πανεπιστήμια αυτό είναι λόγω της απλότητας του χειρισμού που έχουν και του οικονομικού εξοπλισμού που έχουν.

Στην δοκιμή εφελκυσμού παρατηρήσαμε δυο τύπους μηχανών που χρησιμοποιούν για την καταπόνηση συνθέτων σε εφελκυστικές τάσεις. Τα δοκίμια που δοκιμάζονται είναι κατασκευασμένα με συγκεκριμένες διαστάσεις οι οποίες παρουσιάζονται από τα πρότυπα όπως το ASTM. Παρατηρούμε επίσης ότι τα σύνθετα ενισχυμένα με ίνες και τα σύνθετα τύπου sandwich παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά στο πείραμα αυτό, βλέπουμε ότι επίσης ότι και τα πρότυπα αλλάζουν σε σχέση με το τι είδους συνθέτου δοκιμάζουμε. Όπως το πρότυπο CRAG το οποίο μας δίνει πολλά στοιχεία για το τι διαστάσεις να χρησιμοποιήσουμε για πολυστρωματικά σύνθετα. Στις δυο τύπου μηχανών που υπάρχουν για το πείραμα σε εφελκυσμό παρατηρούμε ότι η Σερβο-υρδανλικη μηχανή μας δίνει πιο ακριβείς μετρήσεις αλλά έχει μεγαλύτερο κόστος ενώ η μηχανή βιδωτού τύπου είναι καλύτερη στον οικονομικό τομέα.

Στην δοκιμή Διάτμησης παρατηρούμε διαφορετικές μεθόδους για διαφορετικά ειδών συνθέτων, όχι συνθέτων υλικών που έχουν μόνο μια μορφολογία όπως πλάκες αλλά σύνθετα με διαφορετικές γεωμετρίες όπως δοκούς. Οπού και εκεί υπάρχει για κάθε διαφορετική μορφολογία συνθέτου και η ανάλογη προδιαγραφή.

Στην δοκιμή της Θλίψης παρατηρούμε ότι παρατηρούμε ότι χρησιμοποιείτε για να προσδιοριστεί η μεγίστη αντοχή σε θλίψη όχι για όλες των ειδών ενισχύσεις αλλά

συγκεκριμένα για πολυστρωματικά σύνθετα και για σύνθετα ενισχυμένα με ίνες γυαλιού. Αυτό πρέπει να οφείλεται στο ότι άλλων ενισχύσεις με ίνες παρουσιάζουν λυγισμό. Επίσης υπάρχουν πολλές διαφορετικές εκδοχές των εξαρτημάτων που συσφίγγουν το σύνθετο υλικό αυτό οφείλεται γιατί τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν πολλών ειδών αστοχίας στην επιφάνεια τους από τα θλιπτικά φορτία. Οπού για κάθε συγκεκριμένη εκδοχή του εξαρτήματος για την δοκιμή θλίψης που υπάρχει να υπάρχουν και διαφορετικά πρότυπα ,κάνοντας την μια δύσκολη δοκιμή και χρονοβόρα.

Σε αντίθεση με την Δοκιμή Κάμψης η οποία υλοποιείται πιο ευκολά αλλά δυστυχώς έχει συγκεκριμένα τύπου δοκίμια τα οποία μπορούν να δοκιμαστούν με μια συγκεκριμένη γεωμετρικά .Παρατηρείτε επίσης ότι ο μεγαλύτερος αριθμός συνθέτων που δοκιμάζεται είναι σύνθετα ενισχυμένα με ίνες. Σε γενικές γραμμές τα πρότυπα ASTM έχουν μεγαλύτερο εύρος σε σχέση με τα αλλά στις περισσότερες μη καταστροφικές δοκιμές αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι είναι από τα πιο παλιά πρότυπα τα οποία φτιάχτηκαν.

Οι μη καταστροφικές δοκιμές (NDT) είναι σαφέστατα οι καλύτερες κατά επιστημονικής απόψεις δοκιμές όχι επειδή δίνουν τρομερή ακρίβεια σε μετρήσεις αλλά επειδή δεν έχουν ιδιαίτερη επίδραση στο σύνθετο υλικό που δοκιμάζουμε . Μπορούμε να τις χρησιμοποιήσουμε για οποιαδήποτε κατασκευή όσο πολύπλοκη και να είναι ,αλλά υπάρχει ένα μεγάλο μειονέκτημα ,το κόστος της δοκιμής , όχι μόνο από θέμα εξοπλισμού από και από θέμα εξειδικευμένου προσωπικού . Κάνοντας την χρήση των μην καταστροφικών δοκιμών όχι τόσο προσιτές. Επίσης οι μη καταστροφικές δοκιμές χρησιμοποιούνται περισσότερο για επιθεωρήσεις ενός συνθέτου υλικού ή μιας ολόκληρης κατασκευής μετά από κάποια συγκεκριμένη χρήση.

Η επιλογή των δοκιμών και των προδιαγραφών που χρησιμοποιούνται εξαρτάται από την χρήση που θέλουμε για ένα σύνθετο υλικό και από το κατά ποσό οικονομική ευελιξία και χρόνο έχουμε για να κάνουμε την δοκιμή που θέλουμε. Όσο περνάει ο χρόνος οι δοκιμές και οι προδιάγραφες γίνονται πιο προσβασιμες από όλους, παράδειγμα η δημιουργία των γυαλιών ηλίων και οι οθόνες “touch screen” οι συνθέτες κατασκευές αυτές πρώτα φτιάχτηκαν για διαστημικές αποστολές από την NASA αλλά αργότερα.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

### “ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ”

1. Γ. Παπανικολάου και Δ. Μουζάκης, Σύνθετα Υλικά, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2007
2. Aero Space Applications of GFRP Composites: Review' - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: [https://www.researchgate.net/figure/Some-Composite-Material-Types-Fiber-reinforced-composites-are-usually-used-in-the-forms\\_fig1\\_259568833](https://www.researchgate.net/figure/Some-Composite-Material-Types-Fiber-reinforced-composites-are-usually-used-in-the-forms_fig1_259568833) accessed 9 Jan, 2022]
3. Moisture Transport Process in Vegetable Fiber Composites: Theory and Analysis for Technological Applications - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: [https://www.researchgate.net/figure/Classification-and-types-of-composite-materials-a-Dispersed-particle-reinforced-b\\_fig1\\_280599538](https://www.researchgate.net/figure/Classification-and-types-of-composite-materials-a-Dispersed-particle-reinforced-b_fig1_280599538) [accessed 9 Jan, 2022
4. M E Tuttle and H F Brinson, Resistance Foil Gauge Technology as Applied to Composite Materials, Report No. VPI-E-83-19, Department of Engineering Science and Mechanics, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA24061, USA, June 1983.
5. Mechanical testing of advanced fibre composites, J.M. Hodgkinson, Woodhead Publishing Limited, Cambridge2000
6. *Proceedings of the First Conference on Composite Materials: Testing and Design*, ASTMSTP460, New Orleans, LA,11–13February,1969
7. ASTM D3039 M, 'Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials', American Society for Testing and Materials, one hundred BarrHarbor Drive, West Conshohocken, PA 19428, USA, Vol 15.03,1997.
8. BS 2782: Part 3: Method 320A-F, British Standards Institution, UK, 1976.
9. P T Curtis (ed), *CRAG Test Methods for the Measurement of the Engineering Properties of Fibre Reinforced Plastics*, Royal Aircraft Establishment, Farnborough, UK, Technical Report 88012, 1988.
10. BS EN ISO 527 Part 5, Tensile Test for Unidirectional FRP Composites, 1997.
11. *Proceedings of the First Conference on Composite Materials: Testing and Design*, ASTM STP 460, New Orleans, LA, 11–13 February 1969.
12. K Bultheel, 'Factors influencing the behavior of tensile tests,' *Eupoco MSc Dissertation*, The Centre for Composite Materials, Imperial College, London, UK, June 1999.
13. N R Sottos, J M Hodgkinson and F L Matthews, 'A practical comparison of standard test methods using carbon fiber reinforced epoxy,' *Proceedings of the Sixth International Conference on Composite Materials and Second European Conference on Composite Materials*, London, Elsevier Applied Science, 1987.
14. C Zweben, W S Smith, and M W Wardle, 'Test methods for fiber tensile strength, composite flexural modulus, and properties of fabric-reinforced laminates,' *Proceedings of the Fifth Conference on Composite Materials: Testing and Design*, ASTM STP 674, New Orleans, LA, ed SW Tsai, 1979
15. <http://laryee.com/Tesnile-Testing-Machine/Computer-Servo-Hydraulic/139.html>

16. [https://www3.nd.edu/~jott/Solids/Solids\\_lab/Lab1/S17\\_Lab1\\_tensile\\_test.pdf](https://www3.nd.edu/~jott/Solids/Solids_lab/Lab1/S17_Lab1_tensile_test.pdf)
17. W Manders and I M Kowalski, 'The effect of small angular fiber misalignments and tabbing techniques on the tensile strength of carbon fiber composites,' *32nd International SAMPE Symposium*, Anaheim, CA, eds R Carson, M Burg, K J Kjoller and F J Riel, SAMPE Covina, CA 1987
18. Carved above the door of Kirkaldy's Testing and Experimenting Works, 99 Southwark Street, London, 1873.
19. BS EN ISO 14,129: *Fiber-reinforced Plastic Composites – Determination of In-plane Shear Modulus and Strength by 45° Tension Test Method*, 1997.
20. ASTM D 3518: 'Standard test method for in-plane shear response of polymer matrix composite materials by tensile test of a 45° laminate', *Annual Book of ASTM Standards*, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428, USA, Vol 15.03, 1997
21. C C Chamis and J H Sinclair, 'Ten-deg off-axis test for shear properties in fiber composites,' *Experimental Mechanics*, 1977
22. ISO 527: *Plastics – Determination of Tensile Properties. Part 5 – Test Conditions for Unidirectional Fiber-reinforced Plastic Composites*, 1994.
23. ASTM D 4255: 'Standard guide for testing in-plane shear properties of composite laminates', *Annual Book of ASTM Standards*, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428, USA, Vol 15.03, 1997
24. N Iosipescu, 'New accurate procedure for single shear testing of metals' *Journal of Materials*, 1967
25. ASTM D 5488: 'Standard test method for in-plane shear properties of hoop wound polymer matrix composite cylinders', *Annual Book of ASTM Standards*, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428, USA, Vol 4.10, 1998
26. ISO 15,310: *Fibre-Reinforced Plastic Composites – Determination of In-plane Shear Modulus by the Plate Twist Method*, 1999
27. ASTM D 3044, 'Standard test method for shear modulus of wood-based structural panels', *Annual Book of ASTM Standards*, one hundred Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428, USA, Vol 4.10, 1998
28. E M Odom, D M Blackketter, and B Suratno, 'Experimental and analytical investigation of the modified Wyoming shear test fixture,' *Experimental Mechanics*, 1994
29. C Soutis and N A Fleck, 'Static compression failure of carbon fibre T800/924C composite plate with a single hole', *Journal of Composite Materials*, 1990
30. ASTM D 695M-91, 'Standard test method for compressive properties of rigid plastics', Vol 8.01, *Annual Book of ASTM Standards*, one hundred Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428, USA, Vol 8.01, 1994.
31. P T Curtis, *Crag Test Methods for the Measurement of the Engineering Properties of Fibre-reinforced Plastics*, Royal Aircraft Establishment, Farnborough, UK, Technical Report 88012, 1988.

32. ASTM D 5467–93, 'Standard test method for compressive properties of unidirectional polymer matrix composites using a sandwich beam', *Annual Book of ASTM Standards*, one hundred Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428, USA, Vol 15.03, 1997.
33. K E Hofer and P N Rao, 'A new static compression fixture for advanced composite materials,' *Journal of Testing and Evaluation*, 1977
34. R P Pendleton and M E Tuttle, *Manual on Experimental Methods for Mechanical Testing of Composites*, Society for Experimental Mechanics, Bethel, CT, USA, 1989.
35. D F Adams and E Q Lewis, 'Influence of specimen gage length and loading method on the axial compression strength of a unidirectional composite materials,' *Experimental Mechanics*, 1991
36. P T Curtis, *CRAG Test Methods for the Measurement of the Engineering Properties of Fibre-reinforced Plastics*, Royal Aircraft Establishment, Farnborough, UK, Technical Report 88012, 1988.
37. J M Hodgkinson, *An Experimental Comparison of ASTM, BSI and CRAG Standard Test Methods for the Determination of Mechanical Properties of Composite Materials*, The Centre for Composite Materials, Technical Report 90/02, Imperial College, London, 1990.
38. ASTM D790M-93, 'Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials', American Society for Testing and Materials, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 08.01, 1993.
39. P T Curtis (ed), *CRAG Test Methods for the Measurement of the Engineering Properties of Fibre-reinforced Plastics*, Royal Aircraft Establishment, Technical Report 88012, February 1988.
40. International Standards Organisation (ISO-14125), *Fibre Reinforced Plastic Composite – Determination of Flexural Properties*, 1998.
41. British Standards Institute, BS 2782, British Standard Methods of Testing Plastics, Part 10, Glass reinforced plastics, Method 1005, *Determination of Flexural Properties. Three Point Method*, 1977.
42. N R Sottos, J M Hodgkinson and F L Matthews, 'A practical comparison of standard test methods using carbon fibre reinforced epoxy,' *Proceedings of the Sixth International Conference on Composite Materials and Second European Conference on Composite Materials*, Imperial College, London, Elsevier Applied Science, 1987.
43. P Francotte, J M Hodgkinson and R Keunings, *Experimental and Theoretical Analysis of the General and Micromechanical Behaviour of Composite Materials*, Report of joint project between Imperial College and Université Catholique de Louvain, 1993.
44. R Grothaus, J M Hodgkinson and K Kocker, 'Interpretation of flexural tests using Weibull strength theory,' *Proceedings of the 3rd International Conference on Deformation and Fracture of Composites*, The Institute of Materials, Guildford, UK, March 1995
45. S Mespoulet, *Through-thickness Test Methods for Laminated Composite Materials*, PhD Thesis, Centre for Composite Materials, Imperial College, London University, UK, January 1998.
46. A Morley, *Strength of Materials*, 9th Edition, Longmans, London, 1940.
47. Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state-of-the-art review Bing Wang, Department of Engineering, University of Cambridge ,2020

48. Hamstad MA. A review: acoustic emission, a tool for composite-materials studies. *Exp Mech* 1986; 26: 7–13.
49. Rose JL. A baseline and vision of ultrasonic guided wave inspection potential. *J Press Vessel Technol* 2002
50. Kaiser J. An investigation into the occurrence of noises in tensile tests or a study of acoustic phenomena in tensile tests. PhD Dissertation, Technische Hochschule Munchen, Munich, 1950.
51. ASTM E2582:2019. Standard practice for infrared flashthermography of composite panels and repair patches used in aerospace applications.
52. shearography Hung YY and Ho HP. Shearography: an optical measurement technique and applications. *Mater Sci Eng R Reports* 2005
53. Liu Y, Nelson J, Holzner C, et al. Recent advances insynchrotron-based hard X-ray phase contrast imaging. *J Phys D Appl Phys* 2013
54. Σημειώσεις σύνθετων υλικών eclass. teipat