



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗΣ  
ΘΡΑΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ  
ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ  
ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ  
ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.

---

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΠΑΠΑΔΟΥΡΟΣ  
Α.Μ.: 6693

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:  
Σ.ΤΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ  
Σ.ΤΣΙΡΚΑΣ  
Σ.ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ

ΠΑΤΡΑ  
2019

---

## ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ

---

Δηλώνω ότι είμαι ο συγγραφέας της παρούσας εργασίας με τίτλο ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗΣ ΘΡΑΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ που παραδόθηκε το μήνα ΝΟΕΜΒΡΙΟ του 2019. Η αναφερόμενη εργασία δεν αποτελεί αντιγραφή ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται σαφώς στη βιβλιογραφία και στο κείμενο ενώ κάθε εξωτερική βοήθεια, αν υπήρξε, αναγνωρίζεται ρητά.

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ	Α.Μ.	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ
ΠΑΠΑΔΟΥΡΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ	6693	25/11/2019

---

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

---

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Στέφανο Τσινόπουλο για την καθοδήγησή του κατά την συγγραφή της εργασίας. Θερμές ευχαριστίες επίσης στον καθηγητή Βασίλη Κωστόπουλο του τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, τον Δρ Σπύρο Ψαρρά αλλά και τα παιδιά του εργαστηρίου Τεχνικής Μηχανικής και Ταλαντώσεων για την βοήθειά τους στην παραγωγή των πλακών και την πραγματοποίηση των πειραμάτων.

---

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Η παρούσα πτυχιακή εργασία, ασχολείται με τον υπολογισμό της διαστρωματικής αντοχής σε θραύση των σύνθετων υλικών. Αναλύονται δύο εκ των τριών τύπων εφαρμογής φορτίου σε ρωγμή: ο τύπος I, γνωστός και ως ανοικτός ή εφελκυστικός τύπος, χρησιμοποιώντας το δείγμα DCB (Double Cantilever Beam) και ο τύπος II, γνωστός και ως τύπος ολίσθησης, χρησιμοποιώντας το δείγμα ENF (End Notched Flexure).

Στο **πρώτο κεφάλαιο**, γίνεται αναφορά σε ιστορικά στοιχεία και στην εξέλιξη των σύνθετων υλικών.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο**, έχουμε κατηγοριοποίηση των σκελών που αποτελούν ένα σύνθετο υλικό, τις ίνες, τη μήτρα και τη ρητίνη.

Στο  **τρίτο κεφάλαιο**, παρουσιάζονται μέθοδοι και μοντέλα data reduction και περιγράφονται οι τεχνικές μελέτης των μηχανισμών αποκόλλησης για τον τύπο I.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο**, αναλύεται η πειραματική διαδικασία για τον τύπο I και γίνεται υπολογισμός του  $G_{Ic}$ .

Στο **πέμπτο κεφάλαιο**, παρουσιάζονται μέθοδοι και μοντέλα data reduction και περιγράφονται οι τεχνικές μελέτης των μηχανισμών αποκόλλησης για τον τύπο II.

Στο **έκτο κεφάλαιο**, αναλύεται η πειραματική διαδικασία για τον τύπο II και γίνεται υπολογισμός του  $G_{IIc}$ .

Στο **έβδομο κεφάλαιο**, γίνεται ανάλυση της πειραματικής διαδικασίας με πεπερασμένα στοιχεία και γίνεται ταύτιση της υπολογιστικής καμπύλης με την πειραματική, για τα αποτελέσματα των τύπων I και II.

---

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

Λίστα εικόνων.....	ix
Λίστα πινάκων.....	xii

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> – ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

1.1 Ορισμός.....	1
1.2 Ιστορικά στοιχεία.....	2
1.3 Ιστορική εξέλιξη.....	3
1.4 Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα.....	4
1.5 Ταξινόμηση.....	5

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> – ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

2.1 Ίνες.....	6
2.1.1 Ίνες γυαλιού (glass fibers).....	6
2.1.2 Ίνες άνθρακα (carbon fibers).....	8
2.1.3 Ίνες πολυμερούς (polymer fibers).....	10
2.1.4 Μεταλλικές ίνες.....	11
2.1.5 Κεραμικές ίνες.....	12
2.1.6 Τριχίτες (whiskers).....	13
2.1.7 Ίνες φυσικών ορυκτών.....	14
2.1.8 Σύγκριση ενισχυτικών ινών.....	14
2.2 Μήτρα.....	15
2.2.1 Οργανικές μήτρες.....	16
2.2.2 Μεταλλικές μήτρες.....	17
2.2.3 Κεραμικές μήτρες.....	18
2.3 Επιλογή ινών και μήτρας στην κατασκευή ινωδών σύνθετων.....	18
2.3.1 Γεωμετρία ινών.....	18
2.3.2 Ποσοστό ινών.....	19
2.3.3 Προσανατολισμός ινών.....	20
2.3.4 Συνάφεια ινών – μήτρας.....	20
2.3.5 Τελική επιλογή υλικών.....	21
2.4 Μέθοδοι μορφοποίησης.....	22

2.5 Ρητίνες.....	25
2.5.1 Είδη ρητινών.....	25

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> – ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ Ι**

3.1 Περίληψη.....	29
3.2 Εισαγωγή.....	29
3.3 Ιστορικό υπόβαθρο.....	30
3.4 Σημαντικότητα του πειράματος.....	30
3.5 Ορισμοί και σύμβολα.....	31
3.6 Μέθοδοι <i>data reduction</i> και μοντέλα.....	32
3.6.1 Μέθοδοι ενδοτικότητας <i>data reduction</i> .....	32
3.6.2 Συγκριτικές μελέτες.....	36
3.6.3 Η μέθοδος εμβαδών.....	38
3.6.4 Η προσέγγιση <i>J-Integral</i> .....	39
3.6.5 Σταθερότητα της διάδοσης στο δείγμα <i>DCB</i> .....	39
3.7 Αποτελέσματα του πειράματος.....	40
3.7.1 Σύνθετα υλικά θερμοσκληρυνόμενης μήτρας.....	40
3.7.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα του πειράματος <i>DCB</i> .....	41
3.7.3 Θερμοπλαστικά σύνθετα.....	44
3.8 Η επιρροή των πειραματικών παραμέτρων.....	46
3.8.1 <i>Layup</i> του δείγματος.....	46
3.8.2 Ρυθμός φόρτισης.....	47
3.8.3 Θερμοκρασία πειράματος.....	48
3.9 Μηχανισμοί αποκόλλησης υπό φόρτιση τύπου <i>I</i> .....	49
3.9.1 Γενικά.....	49
3.9.2 Ενοργάνιση ακμής ρωγμής.....	50
3.10 Κόπωση τύπου <i>I</i> .....	55
3.11 Τυποποίηση της δοκιμής αποκόλλησης τύπου <i>I</i> .....	55

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> – ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ Ι – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

4.1 Περιγραφή της πειραματικής μεθόδου.....	57
4.2 Παρεμβολές.....	57
4.2.1 Εφαρμογή σε άλλα υλικά, <i>layup</i> και αρχιτεκτονικές.....	59
4.3 Δειγματοληψία και πειραματικά δείγματα.....	59

4.3.1 Διαστάσεις δειγμάτων.....	60
4.3.2 Δειγματοληψία.....	61
4.3.3 Εφαρμογή φορτίου.....	61
4.3.4 Ριάνο hinge tabs.....	61
4.3.5 Μπλοκ φόρτισης.....	62
4.3.6 Προετοιμασία επιφανειών του δείγματος.....	62
4.3.7 Προετοιμασία επιφανειών των tabs ή των μπλοκ φόρτισης.....	62
4.4 Διαδικασία.....	63
4.4.1 Αρχική φόρτιση.....	64
4.4.2 Επαναφόρτιση.....	65
4.4.3 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων.....	66
4.5 Υπολογισμοί.....	67
4.5.1 Υπολογισμοί IFT.....	67

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> – ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ II**

5.1 Περίληψη.....	71
5.2 Εισαγωγή.....	72
5.3 Ιστορικό υπόβαθρο.....	73
5.4 Σημαντικότητα του πειράματος.....	76
5.5 Ορισμοί και σύμβολα.....	76
5.6 Αναλυτικές προσεγγίσεις.....	78
5.7 Ανάλυση θεωρίας δοκών.....	79
5.7.1 Ενδοτικότητα.....	80
5.7.2 Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης.....	81

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup> – ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ II – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

6.1 Περιγραφή της πειραματικής μεθόδου.....	83
6.2 Παρεμβολές.....	84
6.3 Δειγματοληψία και πειραματικά δείγματα.....	85
6.3.1 Δειγματοληψία.....	85
6.3.2 Δείγμα και διαμόρφωση του πειράματος.....	85
6.3.3 Κατασκευή.....	86
6.3.4 Τιτλοφόρηση.....	88
6.4 Διαδικασία.....	88

6.4.1	Παράμετροι που πρέπει να καθορίσουμε πριν από το πείραμα.....	88
6.4.2	Προετοιμασία δειγμάτων.....	88
6.4.3	Περιβάλλον του πειράματος.....	89
6.4.4	NPC και PC δυσθραυστότητα από το ίδιο δείγμα.....	89
6.4.5	NPC δυσθραυστότητα μόνο.....	92
6.4.6	PC δυσθραυστότητα μόνο.....	92
6.5	Υπολογισμοί.....	92
6.5.1	Υπολογισμοί IFT.....	92
6.5.2	Συντελεστές βαθμονόμησης ενδοτικότητας.....	93
6.5.3	Προσδιορισμός της candidate δυσθραυστότητας.....	94
6.5.4	Εκτίμηση της candidate δυσθραυστότητας.....	95
6.5.5	Καθορισμός της δυσθραυστότητας.....	96
6.5.6	Καθορισμός του $\alpha_{calc}$ .....	96

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup> – ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

7.1	Γενικά.....	97
7.2	Διαδικασία ανάλυσης.....	97
7.3	Ανάλυση mode I.....	98
7.3.1	Σχεδιασμός.....	98
7.3.2	Παράμετροι υλικών.....	99
7.3.3	Assembly.....	101
7.3.4	Βήμα ανάλυσης.....	101
7.3.5	Συνοριακές συνθήκες.....	101
7.3.6	Mesh.....	102
7.3.7	History Output Request.....	104
7.3.8	Job.....	104
7.3.9	Αποτελέσματα.....	105
7.4	Ανάλυση mode II.....	106
7.4.1	Σχεδιασμός.....	106
7.4.2	Παράμετροι υλικών.....	107
7.4.3	Assembly.....	107
7.4.4	Βήμα ανάλυσης.....	107
7.4.5	Interaction.....	108
7.4.6	Συνοριακές συνθήκες.....	109
7.4.7	Mesh.....	110
7.4.8	History Output Request.....	111
7.4.9	Job.....	111
7.4.10	Αποτελέσματα.....	111
	Βιβλιογραφία.....	102



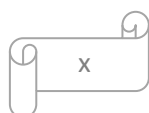
---

## ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

---

<i>Εικόνα 1: Κατηγορίες σύνθετων υλικών.....</i>	<i>2</i>
<i>Εικόνα 2: Τύποι διάταξης των ινών: (α) μονοδιευθυντικές ίνες, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και (δ) ίνες σε τρισσορθογώνια πλέξη.....</i>	<i>5</i>
<i>Εικόνα 3: Παραγωγή ενισχυτικών ινών γυαλιού.....</i>	<i>7</i>
<i>Εικόνα 4: Παραγωγή ενισχυτικών ινών άνθρακα.....</i>	<i>9</i>
<i>Εικόνα 5: (α) Χαρακτηριστικές καμπύλες σ-ε, (β) Συσχετισμός ειδικής αντοχής και ειδικής ακαμψίας για διάφορα υλικά ενισχυτικών ινών.....</i>	<i>14</i>
<i>Εικόνα 6: Επίδραση του προσανατολισμού των ινών στην αντοχή σε εφελκυσμό σύνθετου υλικού εποξειδικής μήτρας με ίνες E-γυαλιού.....</i>	<i>20</i>
<i>Εικόνα 7: Ασυνεχής μορφοποίηση σύνθετου: (α) χειροποίητη στρώση, (β) χύτευση θαλάμου πίεσης, (γ) χύτευση σε διαιρετό καλούπι.....</i>	<i>23</i>
<i>Εικόνα 8: Δοκός σε μοντέλο ελαστικού θεμελίου του δείγματος DCB.....</i>	<i>36</i>
<i>Εικόνα 9: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης το οποίο δείχνει την αρχή της μεθόδου εμβαδών, τον καθορισμό μιας τιμής διάδοσης του <math>G_{Ic}</math>.....</i>	<i>38</i>
<i>Εικόνα 10: Περιοχές του ανθρακοεποξικού IM6/6376, οι οποίες δείχνουν την κατανομή των ινών σε δύο παρτίδες ενός ονομαστικά πανομοιότυπου υλικού.....</i>	<i>42</i>
<i>Εικόνα 11: Καμπύλες R για τις δύο παρτίδες του IM6/6376 που φαίνονται στην εικόνα 10.....</i>	<i>44</i>
<i>Εικόνα 12: Καμπύλες R που λήφθησαν για τα πάχη των δύο υαλο-εποξικών δειγμάτων του πίνακα 1, με την μέθοδο του Berry. α) πάχος 4.6 mm και β) πάχος 20 mm.....</i>	<i>45</i>
<i>Εικόνα 13: Ερμηνεία των αποτελεσμάτων DCB για carbon/PEEK υλικά. Πάνω: καμπύλη φορτίου-μετατόπισης. Κάτω: καμπύλη R η οποία έχει ληφθεί με την μέθοδο του Berry.....</i>	<i>47</i>

<i>Εικόνα 14: Δημοσιευμένα αποτελέσματα από διαφορετικές πηγές, συναρτήσει του πάχους των δειγμάτων σε carbon/PEEK υλικά.....</i>	<i>48</i>
<i>Εικόνα 15: Θέσεις των μετρητών παραμόρφωσης σε ένα παχύ δείγμα DCB και αποκρίσεις τους για UD υαλοεποξικά σύνθετα.....</i>	<i>52</i>
<i>Εικόνα 16: Αναγνώριση μικροσκοπικής και μακροσκοπικής έναρξης από ακουστική εκπομπή και μετρητές διάδοσης ρωγμής για υαλοεποξικά σύνθετα.....</i>	<i>53</i>
<i>Εικόνα 17: Αποκρίσεις των μετρητών παραμόρφωσης κατά την διάρκεια φόρτισης υαλοεποξικού σύνθετου.....</i>	<i>53-54</i>
<i>Εικόνα 18: Δείγμα δοκού διπλού προβόλου.....</i>	<i>61</i>
<i>Εικόνα 19: Καμπύλη φορτίου – μετατόπισης από το πείραμα DCB.....</i>	<i>64</i>
<i>Εικόνα 20: Μέθοδος MBT.....</i>	<i>68</i>
<i>Εικόνα 21: Μέθοδος CC.....</i>	<i>69</i>
<i>Εικόνα 22: Μέθοδος MCC.....</i>	<i>70</i>
<i>Εικόνα 23: Δοκιμαστικό εξάρτημα ENF και νομενκλατούρα δείγματος.....</i>	<i>71</i>
<i>Εικόνα 24: Κοινά κατασκευαστικά στοιχεία, τα οποία δημιουργούν συγκέντρωση διαστρωματικής τάσης.....</i>	<i>72</i>
<i>Εικόνα 25: Τρόποι διάδοσης διαστρωματικής ρωγμής.....</i>	<i>73</i>
<i>Εικόνα 26: Γεωμετρία δείγματος ENF.....</i>	<i>74</i>
<i>Εικόνα 27: Δείγματα κάμψης για την δοκιμή IFT τύπου II.....</i>	<i>74</i>
<i>Εικόνα 28: Εναλλακτικά δείγματα κάμψης.....</i>	<i>75</i>
<i>Εικόνα 29: Μηχανισμοί της οδηγού δύναμης ρωγμής τύπου II.....</i>	<i>79</i>
<i>Εικόνα 30: Νομενκλατούρα του δείγματος ENF: θεωρία δοκών διατμητικής παραμόρφωσης.....</i>	<i>81</i>
<i>Εικόνα 31: Δείγμα ENF, σταθερό εξάρτημα και διαστάσεις.....</i>	<i>84</i>
<i>Εικόνα 32: Δείγμα - Πείραμα ENF (μονάδες στο SI).....</i>	<i>86</i>



<b>Εικόνα 33:</b> Διαμόρφωση του δείγματος για την δοκιμή PC, όταν το ίδιο δείγμα χρησιμοποιείται για την δοκιμή NPC και PC.....	91
<b>Εικόνα 34:</b> Απεικόνιση της ενδοτικότητας και προσδιορισμός του σημείου μέγιστης φόρτισης.....	93
<b>Εικόνα 35:</b> Δείγμα DCB.....	98
<b>Εικόνα 36:</b> Αρχική ρωγή και έναρξη του <i>cohesive element</i> .....	99
<b>Εικόνα 37:</b> Κριτήριο <i>Quads Damage</i> .....	100
<b>Εικόνα 38:</b> Εφαρμογή συνοριακών συνθηκών.....	102
<b>Εικόνα 39:</b> Το <i>Sweep Path</i> για το <i>cohesive element</i> .....	103
<b>Εικόνα 40:</b> Περιοχή με και χωρίς πλέγμα.....	104
<b>Εικόνα 41:</b> Εικόνα του δοκιμίου (παραμορφωμένου και μη) στο τέλος της ανάλυσης ( <i>mode I</i> ).....	105
<b>Εικόνα 42:</b> Ταύτιση της υπολογιστικής καμπύλης με την πειραματική για το <i>mode I</i> .....	106
<b>Εικόνα 43:</b> Δείγμα ENF.....	106
<b>Εικόνα 44:</b> Επιλογή <i>master surface</i> (με κόκκινο).....	108
<b>Εικόνα 45:</b> Επιλογή <i>slave surface</i> (με κόκκινο).....	108
<b>Εικόνα 46:</b> Οι δύο κόμβοι (οι κόκκινες τελείες) όπου εφαρμόζεται η συνθήκη κύλισης.....	109
<b>Εικόνα 47:</b> Ο κεντρικός κόμβος (με κόκκινο), όπου μπαίνει η κάθετη μετατόπιση....	110
<b>Εικόνα 48:</b> Εικόνα του δοκιμίου (παραμορφωμένου και μη) στο τέλος της ανάλυσης ( <i>mode II</i> ).....	112
<b>Εικόνα 49:</b> Ταύτιση της υπολογιστικής καμπύλης με την πειραματική για το <i>mode II</i> .....	112
<b>Εικόνα 50:</b> Νόμος <i>traction – separation</i> . Στη ουσία, πρόκειται για την απόκριση του <i>cohesive element</i> . Φαίνονται τα μεγέθη που μπαίνουν ως παράμετροι στο πρόγραμμα.....	113

---

## ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

---

<i>Πίνακας 1: Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού.....</i>	<i>6</i>
<i>Πίνακας 2: Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών άνθρακα.....</i>	<i>10</i>
<i>Πίνακας 3: Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών Kevlar.....</i>	<i>10</i>
<i>Πίνακας 4: Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων ινών SiC (μέσες τιμές).....</i>	<i>13</i>
<i>Πίνακας 5: Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων ινών και τριχιτών από SiC και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.....</i>	<i>13</i>
<i>Πίνακας 6: Σύγκριση θερμικής ευστάθειας ινών.....</i>	<i>15</i>
<i>Πίνακας 7: Σύγκριση παραμόρφωσης θραύσης ινών.....</i>	<i>15</i>
<i>Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά παραδείγματα σύνθετων υλικών οργανικής μήτρας.....</i>	<i>21</i>
<i>Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά παραδείγματα σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας.....</i>	<i>22</i>
<i>Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά παραδείγματα σύνθετων υλικών κεραμικής μήτρας.....</i>	<i>22</i>
<i>Πίνακας 11: Σύγκριση χαρακτηριστικών ανθρακονήματος και ατσαλιού.....</i>	<i>24</i>
<i>Πίνακας 12: Ιδιότητες εποξικής, πολυεστερικής και βινυλεστερικής ρητίνης.....</i>	<i>26</i>
<i>Πίνακας 13: Σύγκριση τιμών από διαφορετικά μοντέλα ενδοτικότητας, με πειραματικά μοντέλα για υαλοεποξικά (<math>E = 46000 \text{ MPa}</math>, <math>B = 20 \text{ mm}</math>, <math>G = 5000 \text{ MPa}</math>) και ανθρακοεποξικά σύνθετα (<math>E = 130000 \text{ MPa}</math>, <math>B = 20 \text{ mm}</math>, <math>G = 5300 \text{ MPa}</math>) για λεπτά και παχιά δείγματα και για διαφορετικά μήκη ρωγμής.....</i>	<i>37</i>
<i>Πίνακας 14: Τιμές <math>G_{Ic}</math> (<math>\text{J/m}^2</math>) κατά την έναρξη από starter film για δύο UD σύνθετα υλικά, χρησιμοποιώντας διαφορετικά μοντέλα ενδοτικότητας.....</i>	<i>37</i>
<i>Πίνακας 15: Δημοσιευμένες τιμές <math>G_{Ic}</math> από δοκιμές DCB σε μονοδιεύθυνα CFRP. Ονομαστική περιεκτικότητα ινών 60%. Τιμές διάδοσης εκτός αν οριστεί διαφορετικά.....</i>	<i>41</i>

**Πίνακας 16:** Δημοσιευμένες τιμές  $G_{Ic}$  από δοκιμές DCB σε μονοδιεύθοντα CFRP θερμοπλαστικής μήτρας.....45

**Πίνακας 17:** Επιρροή της διαστρωματικής διατμητικής παραμόρφωσης στην ενδοτικότητα και στον ρυθμό απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης του δείγματος ENF.....82

**Πίνακας 18:** Διαστάσεις δείγματος σύμφωνα με την εικόνα 31.....86

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

---

### 1.1 Ορισμός

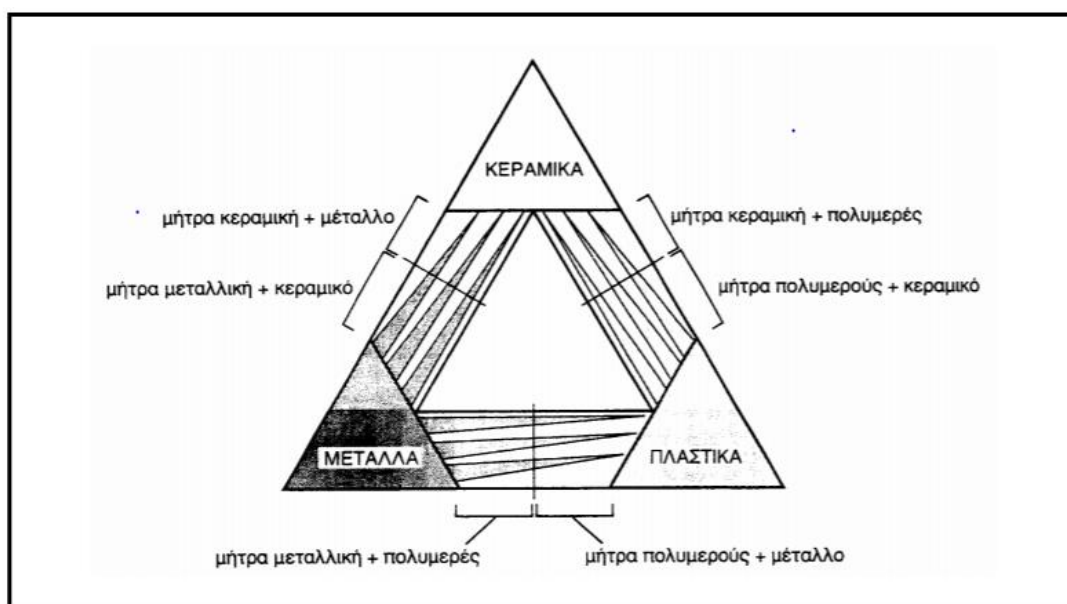
Για ένα σύστημα ο όρος “σύνθετο” σημαίνει ότι τούτο αποτελείται από δύο ή περισσότερα διακριτά μέρη. Από γενική άποψη, λοιπόν, ένα υλικό αποτελούμενο από δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά ή φάσεις, μπορεί να χαρακτηριστεί ως σύνθετο υλικό (composite material).

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

Για να καταταχθεί ένα υλικό στην κατηγορία των σύνθετων, θα ακολουθείται ο εξής κανόνας: Το υλικό πρέπει να προκύπτει ως συνδυασμός συστατικών μερών, στα οποία οι ιδιότητες του ενός από τα μέρη αυτά να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από του άλλου (τουλάχιστον 5πλάσιες) και η κατ’ όγκο περιεκτικότητα του ενός να μην είναι πολύ μικρή (> 10 %).

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

Το ένα, από τα συστατικά μέρη, χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης. Στην εικόνα 1 παρουσιάζεται ο συνδυασμός ανά δύο των βασικών οικογενειών υλικών (μεταλλικά, πολυμερικά και κεραμικά υλικά) και οι ομάδες σύνθετων που προκύπτουν.



*Εικόνα 1: Κατηγορίες σύνθετων υλικών.*

## 1.2 Ιστορικά στοιχεία

Το ανθρακόνημα -όπως το ξέρουμε τώρα- εφευρέθηκε από Άγγλους χημικούς, αμέσως μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, αλλά δεν ήταν ευρέως διαδεδομένο. Πιο συγκεκριμένα: Οι ιδιότητες του carbon και η διαδικασία δημιουργίας του, είναι γνωστές πριν από το 1900, ωστόσο χρειάστηκαν σχεδόν 60 χρόνια για να βρεθεί τρόπος να παραχθεί σύνθετο υλικό με υψηλή πυκνότητα σε carbon. Ένα από τα άλματα στην πρόοδο οφείλεται στον Ιάπωνα Akio Shindo αλλά τελικά ήταν η αμερικάνικη εταιρία HITCO που λίγα χρόνια αργότερα κατασκεύασε πρώτη υλικό με 99% περιεκτικότητα σε carbon. Η εταιρία αυτή είναι μέχρι και σήμερα πρωτοπόρος στην παραγωγή σύνθετων υλικών, ωστόσο στις αρχές τις δεκαετίας του '60, ήταν τελικά η Βρετανική Αεροπορία που βρήκε την καλύτερη χρήση για το carbon fiber και κατοχύρωσε τις αντίστοιχες πατέντες, τις οποίες στην συνέχεια παραχώρησε με συμβόλαια σε αγγλικές βιομηχανίες.

Εκείνη την εποχή, έπρεπε να τελειοποιηθεί η διαδικασία συνδυασμού του προπανίου (ή του προπυλενίου) και της αμμωνίας -η προηγούμενη διαδικασία περιλάμβανε τη χρήση κυανιδίων υδρογόνου, με προφανή προβλήματα και όχι ιδιαίτερα καλά αποτελέσματα. Αυτό το υλικό, μετά πολυμερίζεται, με τις ίνες να μεγαλώνουν και να οξειδώνονται επιπλέον πριν ψηθούν στους 2.500°C, μέσα σε ένα πλούσιο σε άζωτο περιβάλλον ώστε να μετατραπεί το πλαστικό σε άνθρακα ή γραφίτη. Τα νήματα στη συνέχεια πλέκονται μεταξύ τους, για να σχηματίσουν το ανθρακόνημα ή απλώνονται ώστε να σχηματιστούν λωρίδες παράλληλων ιών, γνωστές και ως UD (Uni-Directional). Αυτά αποτελούν τη βάση για την κατασκευή εξαρτημάτων όταν οι ίνες

συνδυάζονται με διαμορφωμένες ρητίνες. Οι ρητίνες είναι κυρίως εποξικές, καθώς οι ιδιότητές τους ταιριάζουν καλύτερα με τις ιδιότητες των ινών -αν και χρησιμοποιείται μερικές φορές πολυεστέρας ή βινύλιο.

Η πρώτη ύλη του ανθρακονήματος είναι από την Κίνα. Οι ανθρακονημάτινες ίνες είναι φτιαγμένες συνήθως από ένα υλικό το οποίο ονομάζεται πολυακρυλονιτρίλιο (PAN). Το υλικό αυτό ψήνεται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, όπου και καίγονται όλα τα μη-ανθρακικά υλικά και μένουν μόνο πολύ λεπτές και μακριές ίνες. Όσο περισσότερο επεξεργάζεται αυτό το υλικό, τόσο αυξάνεται η ακαμψία του. Πρόκειται για διαδικασίες αρκετά περίπλοκες όπου μόνο μερικές εταιρίες παγκοσμίως μπορούν να πραγματοποιήσουν ώστε να παράξουν το ανθρακόνημα ως πρώτη ύλη. Το 2010 σύμφωνα με μια έρευνα του Υπουργείου Ενέργειας των Η.Π.Α. περισσότερο από το 90% της πρώτης ύλης ανθρακονήματος παγκοσμίως προέρχεται από μόλις έξι εταιρίες. Toray, TohoTenax, Mitsubishi Rayon, Zoltek, Hexcel, και Cytex, με την Toray, Toho, και την Mitsubishi να καλύπτουν περίπου τα 2/3 της παγκόσμιας ζήτησης. Οι Zoltek, Hexcel, και Cytex εδράζονται στις Ηνωμένες Πολιτείες και παράγουν λιγότερο από το 1/3 της πρώτης ύλης παγκοσμίως.

### 1.3 Ιστορική εξέλιξη

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

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

Στη Μεσοποταμία (1000 π.Χ.) εφαρμόστηκε η τεχνική του βερνικώματος των τούβλων και των πλακιδίων με σκοπό τον περιορισμό της επιφανειακής φθοράς, ενώ, κατά τους Ρωμαϊκούς χρόνους, η οδοποιία στηρίχθηκε στην ενίσχυση του οδοστρώματος με τρίμματα κεραμιδιών.

Η χρήση της σιδηρόβεργας για προεντεταμένο σκυρόδεμα, που χρησιμοποιείται στις οικοδομές της σύγχρονης εποχής, δεν είναι παρά η μετεξέλιξη της τεχνικής της ανάμιξης γύψου με ζωικό τρίχωμα, η οποία ήταν μια πρακτική μέθοδος ενίσχυσης εύθραυστων υλικών κατασκευής στους αναπτυσσόμενους πολιτισμούς.

Το πρώτο σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1920 και επρόκειτο για μίγμα ινιδίων ξύλου με φαινολική φορμαλδεΐδη, γνωστό αργότερα ως βακελίτης προς τιμή του Βέλγου επιστήμονα Leo Baekeland.

Η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών κατά την διάρκεια των τελευταίων 30 ετών υπήρξε ραγδαία και συνδυάστηκε με την προηγούμενη ανάπτυξη των



υψηλής αντοχής ινών γυαλιού και των υψηλής δυσκαμψίας ινών βορίου (1960) και την έντονη τάση της αεροδιαστημικής βιομηχανίας για μεγαλύτερη απόδοση με παράλληλη μείωση βάρους αεροσκαφών και διαστημοπλοίων.

Το 1964 διατέθηκαν στην αγορά, αρχικά σε μικρές ποσότητες, οι ίνες άνθρακα (carbon fibers), οι οποίες τελευταία αποτελούν τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες ενισχύσεις στις αεροδιαστημικές κατασκευαστικές εφαρμογές.

Το 1971 διατέθηκαν στο εμπόριο οι ίνες αραμιδίου, οι οποίες τώρα χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα ελαστικά αυτοκινήτων, καθώς και σε αρκετές αεροδιαστημικές και ναυπηγικές κατασκευές.

### **1.4 Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα**

#### **Πλεονεκτήματα:**

- Υψηλή αντοχή
- Μικρό βάρος
- Μεγάλη δυσκαμψία
- Υψηλή αντοχή σε διάβρωση
- Αντίσταση σε φθορά
- Πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση και κρούση
- Καλή θερμική αγωγιμότητα
- Ουδέτερα σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία
- Θερμική μόνωση
- Ακουστική μόνωση
- Χαμηλό κόστος συντήρησης

#### **Μειονεκτήματα:**

- Υψηλό κόστος
- Παντελής έλλειψη ολκιμότητας
- Χαμηλή αντίσταση σε υψηλές και μέτριες θερμοκρασίες
- Η εφελκυστική αντοχή των υλικών μειώνεται σημαντικά όταν βρίσκονται σε μόνιμη τάση
- Υψηλά επίπεδα ερπυσμού
- Ευαίσθητη συμπεριφορά σε δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος (πχ. θαλάσσιο και χημικό περιβάλλον)

## 1.5 Ταξινόμηση

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

- Ινώδη σύνθετα (fibrous composites): Με ενίσχυση ινών εμποτισμένων σε υλικό μήτρας
- Στρωματικά σύνθετα (laminated composites): Με επάλληλες στρώσεις υλικών
- Κοκκώδη σύνθετα (particulate composites): Με ενίσχυση σωματιδίων διασκορπισμένων στο υλικό της μήτρας

Τα ινώδη σύνθετα υλικά διακρίνονται περαιτέρω ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διάταξη των ινών μέσα στη μήτρα. Σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή τα ινώδη σύνθετα διακρίνονται σε:

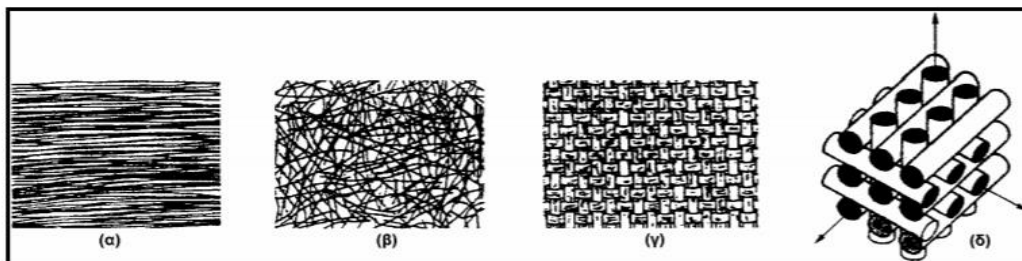
- Μονοδιευθυντικά σύνθετα, στα οποία οι ίνες έχουν όλες την ίδια διεύθυνση
- Πολυδιευθυντικά σύνθετα, στα οποία, οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις

Η ιδιότητα αυτή, οδηγεί άμεσα σε ταξινόμηση των πολυδιευθυντικών σύνθετων στις ακόλουθες υπο-ομάδες, βλ. εικ. 2:

- Σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης
- Σύνθετα με ίνες σε πλέξη ύφανση
- Σύνθετα με ίνες σε τρισσορθογώνια ύφανση

Μία επιπλέον διάκριση των ινωδών σύνθετων, στηρίζεται στο λόγο μήκους προς διάμετρο ( $A/d$ ) των ινών, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως:

- Συνεχείς ή μεγάλου μήκους ίνες (continuous fibers), όταν είναι  $A/d \geq 100$
- Ασυνεχείς ή κοντές ίνες (discontinuous fibers), όταν είναι  $A/d < 100$
- Νηματίδια ή τριχίτες (whiskers): Με  $d < 1$  μμ και  $A \cong 100$  μμ (πρόκειται για λεπτούς μονοκρυστάλλους κεραμικού υλικού)



**Εικόνα 2:** Τύποι διάταξης των ινών: (α) μονοδιευθυντικές ίνες, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και (δ) ίνες σε τρισσορθογώνια πλέξη.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

#### 2.1 Ίνες

##### 2.1.1 Ίνες γυαλιού (glass fibers)

Οι ίνες γυαλιού χρησιμοποιήθηκαν στα σύνθετα πρώτης γενιάς (1940) και η χρήση τους συνεχίζεται επιτυχώς μέχρι σήμερα. Είναι από τους πλέον διαδεδομένους τύπους ενισχυτικών ινών στα σύνθετα πολυμερικής μήτρας. Η δομική τους βάση είναι τα οξείδια πυριτίου, ασβεστίου, βορίου, αλουμινίου κ.ά.. Θεωρούνται από τα πιο φθηνά ενισχυτικά υλικά.

Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση οι ίνες γυαλιού χαρακτηρίζονται ως τύπου E, C και S, των οποίων οι κύριες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες παρουσιάζονται στον Πίν.1.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΥΠΟΣ			
	E	C	S	SiO <sub>2</sub> καθαρή
Χημική σύσταση (%)				
SiO <sub>2</sub>	54	60	65	>99,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16	25	25	-
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8	-	-	-
CaO	17	9	-	-
MgO	5	6	10	-
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	75	80	84	72
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2100-3400	2500-4400	2800-4800	3500-8800
Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	2,54	2,50	2,48	2,20
Θερμοκρασία τήξης ( °C)	900-1200	1400-1600	1400-1600	1720
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης ( °C)	550	650	650	750

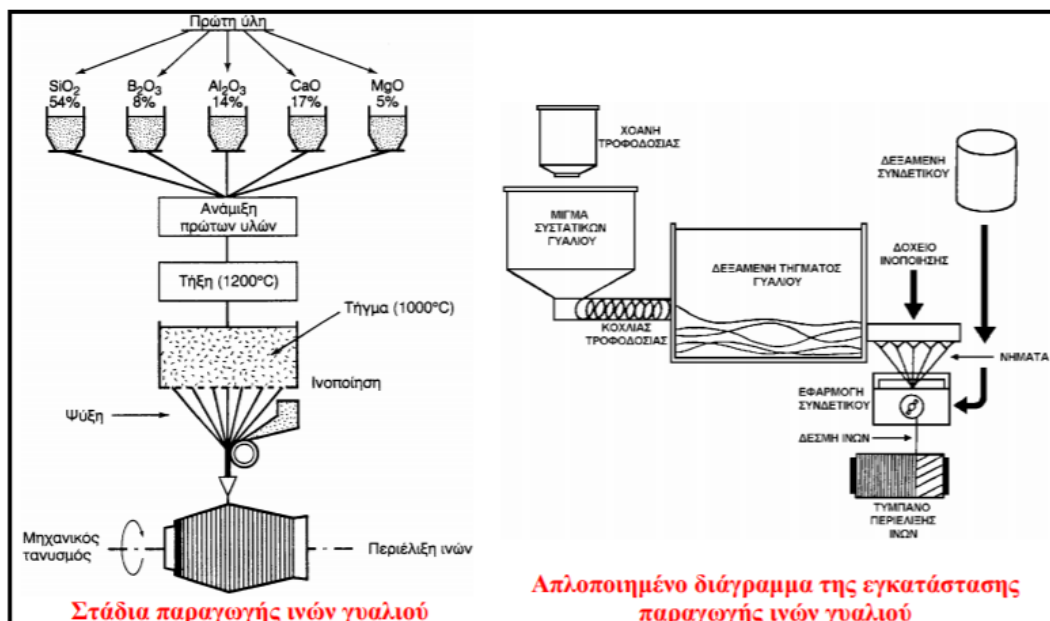
Πίνακας 1: Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού.

- E-glass (E=electrical): Πρόκειται για τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα υαλονήματα με καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, αντοχή και δυσκαμψία, καθώς και πολύ καλή συμπεριφορά στην αλλαγή των καιρικών συνθηκών, αλλά με μέτρια αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια.
- C-glass (C=corrosion): Υαλονήματα με υψηλή αντίσταση στη χημική διάβρωση, αλλά και με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις ίνες τύπου E, από τις οποίες όμως είναι ακριβότερες.
- S-glass (S=stiffness): Ακριβότερο υλικό από το E-glass, αλλά με υψηλότερη δυσκαμψία και θερμική αντοχή. Χρησιμοποιείται κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία.

Όταν περιέχονται μεγάλα ποσοστά  $\text{SiO}_2$  (>99,5%) παρατηρούνται αυξημένες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων της ίνας και της μέγιστης θερμοκρασίας χρήσης του σύνθετου. Γι' αυτό το λόγο, σε ειδικές εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλές μηχανικές ιδιότητες κάτω από υψηλή θερμοκρασία, χρησιμοποιούνται ίνες από 100% καθαρή πυριτία.

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

Η παραγωγή των ινών γυαλιού γίνεται με εκβολή τήγματος γυαλιού διαμέσου μήτρας με διάτρητο πυθμένα (εικ. 3) και περιλαμβάνει τις ακόλουθες φάσεις:



Εικόνα 3: Παραγωγή ενισχυτικών ινών γυαλιού.

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

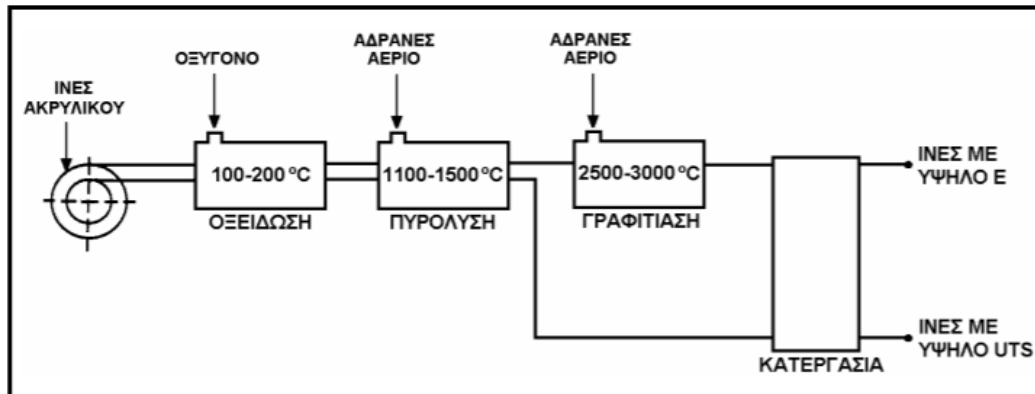
### 2.1.2 Ίνες άνθρακα (carbon fibers)

Οι ίνες άνθρακα είναι η επικρατέστερη ενίσχυση υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας, η οποία χρησιμοποιείται για την παρασκευή υψηλών επιδόσεων σύνθετων υλικών ρητινικής μήτρας. Γενικά, όταν απαιτείται ο βέλτιστος συνδυασμός μηχανικής συμπεριφοράς και ελάττωσης του βάρους, οι χρησιμοποιούμενες ίνες είναι συνήθως ίνες άνθρακα.

Επίσης, οι ίνες άνθρακα προτιμούνται όταν η θερμική διαστολή ενός υλικού πρέπει να συγκρατηθεί σε χαμηλό επίπεδο ή όταν απαιτείται συμβατότητα των χαρακτηριστικών διαστολής δύο συνενωμένων διαφορετικών υλικών. Η υπεροχή αυτή των ανθρακονημάτων οφείλεται στη φύση του άνθρακα (ως στοιχείου) και τους ενδοατομικούς δεσμούς που σχηματίζει με άλλα άτομα άνθρακα. Ο γραφίτης αποτελείται από ανισότροπους πολυκρυσταλλίτες, των οποίων η ανισοτροπία εξαρτάται από τις συνθήκες παρασκευής τους.

Αποτέλεσμα του ισχυρού προσανατολισμού των κρυσταλλιτών παράλληλα στο διαμήκη άξονα των ανθρακονημάτων είναι η υψηλή στιβαρότητα και αντοχή σε θραύση και ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής κατά τη διεύθυνση αυτή. Στη γραφιτική δομή τα άτομα C διατάσσονται πολύ πυκνά με τη μορφή εξαγωνικών επιπέδων. Ο ισχυρός δεσμός μεταξύ των ατόμων C στις επίπεδες αυτές εξαγωνικές στρώσεις οδηγεί σε εξαιρετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Αντίθετα, ο ασθενής τύπου Van Der Waals δεσμός που υφίσταται μεταξύ γειτονικών στρώσεων, έχει ως αποτέλεσμα ένα χαμηλότερης τιμής μέτρο ελαστικότητας σε αυτή τη διεύθυνση.

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



*Εικόνα 4: Παραγωγή ενισχυτικών ινών άνθρακα.*

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

Στον Πίν. 2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά ινών άνθρακα που έχουν παραχθεί σε δύο στάδια (οξείδωση και πυρόλυση) και σε τρία στάδια (οξείδωση, πυρόλυση, θέρμανση σε υψηλή θερμοκρασία), αντίστοιχα.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΙΝΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	ΙΝΕΣ ΥΨΗΛΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	180-230	350-420
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2500-3400	1900-2300
% περιεκτικότητα άνθρακα	95-98	99
Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	1,8	1,9
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	2000	2500

*Πίνακας 2: Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών άνθρακα.*

### 2.1.3 Ίνες πολυμερούς (polymer fibers)

Οι πιο διαδεδομένες ίνες πολυμερούς είναι οι ίνες από Nylon, πολυαιθυλένιο και Kevlar. Τα νήματα Nylon και πολυεστέρα παράγονται με φυγοκεντρική περιδίνηση τήγματος, ενώ ακρυλικά και κυτταρινικά νήματα παρασκευάζονται με φυγοκεντρική περιδίνηση διαλύματος και συνακόλουθες τεχνικές καθίζησης ιζήματος. Η αντοχή τους δεν ξεπερνά τα 10 Pa, ενώ το μέτρο ελαστικότητας πλησιάζει τα 1000 Pa. Παρόλο που από μηχανικής άποψης δεν κατατάσσονται στις 10 ίνες υψηλής απόδοσης, εντούτοις το χαμηλό κόστος παραγωγής τους τις καθιστά δημοφιλείς στην αγορά.

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

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

Η πυκνότητα και των τριών τύπων είναι ίδια (1.45 g/cm<sup>3</sup>), ενώ η διαφορετική ελαστικότητα οφείλεται στο γεγονός της βελτιωμένης ευθυγράμμισης των μοριακών αλυσίδων, που αυξάνει την δυσκαμψία στη διεύθυνση του άξονα της ίνας. Στον Πίν. 3 παρατίθενται οι βασικές ιδιότητες των ινών Kevlar.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	Kevlar 29	Kevlar 49
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	60	130
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2700	3600
Επιμήκυνση θραύσης (%)	4.5	2
Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	1.45	1.45
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	200	200
Θερμοκρασία αστοχίας (°C)	400	425

*Πίνακας 3: Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών Kevlar.*

Οι υψηλές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων του Kevlar οφείλονται στο γεγονός ότι οι πολυμερικές δομικές αλυσίδες του υλικού είναι αυτές καθ' αυτές πιο ισχυρές και συντάσσονται έτσι, ώστε να δημιουργούν ένα σταθερότερο πλέγμα, σε μορφή επίπεδης ταινίας. Ο κυλινδρικός φλοιός της ίνας περικλείει και συγκρατεί το υλικό του πυρήνα αποδίδοντας στο προϊόν ιδιαίτερα υψηλές επιδόσεις κατά την αξονική διεύθυνση, αλλά φτωχή συμπεριφορά κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Επιπλέον, ενώ στην εφελκυστική καταπόνηση το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά με παραμόρφωση έως και 2%, η μεγάλη του αδυναμία εμφανίζεται στη θλίψη, όπου σε 0,3 % θλιπτική παραμόρφωση αναπτύσσεται πλαστικού τύπου αστοχία. Αξιοσημείωτο, όμως, είναι ότι η αστοχία αυτή δεν είναι καταστροφική, αλλά έχει τη μορφή πτυχώσεων (kinkbands).

### 2.1.4 Μεταλλικές ίνες

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

#### Αναγωγή από αλογονίδιο του βορίου

Αλογονίδιο του βορίου (συνήθως  $\text{BCl}_3$ ) ανάγεται από υδρογόνο σε έναν κλειστό θάλαμο υψηλής θερμοκρασίας (1100 °C) και αποτίθεται σε πολύ λεπτό νήμα βολφραμίου, διαμέτρου 10-15  $\mu\text{m}$ . Η διάμετρος των παραγόμενων ινών με αυτήν την τεχνική κυμαίνεται μεταξύ 100÷200  $\mu\text{m}$ , ενώ οι ίνες παρουσιάζουν εξαιρετική δυσκαμψία και μηχανική αντοχή.

#### Απόθεση με τεχνική CVD

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

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



ίνας - μήτρας και οι αντιδράσεις σε στερεά κατάσταση που οδηγούν στο σχηματισμό εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων και αστοχία του σύνθετου.

### 2.1.5 Κεραμικές ίνες

Οι κεραμικές ίνες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή, στιβαρότητα και θερμική ευστάθεια. Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες κεραμικές ίνες είναι οι ίνες καρβιδίου του πυριτίου (SiC) και αλούμινας (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), ενώ σπανιότερα συναντώνται και ίνες Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, BeO, B<sub>4</sub>C και ZrO<sub>2</sub>.

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

#### Μέθοδοι παραγωγής

- ❖ Με χημική εναπόθεση ατμών (CVD) χλωριούχου σιλανίου σε ίνες άνθρακα. Οι παραγόμενες ίνες έχουν πυρήνα διαμέτρου 10÷25 μm και εξωτερική διάμετρο 100÷150 μm.
- ❖ Από πολυμερικές ίνες (Nicalon). Θέρμανση σε κενό σε θερμοκρασία 850 °C μετατρέπει την πολυμερική ίνα σε ανόργανο SiC, ενώ θέρμανση σε υψηλότερη θερμοκρασία (>1000 °C) προκαλεί κρυστάλλωση σε β-SiC. Οι παραγόμενες ίνες έχουν διάμετρο 10÷15 μm.
- ❖ Τριχίτες SiC από φλοιό ρυζιού. Ο φλοιός του ρυζιού περιέχει ~15% κ.β. SiO<sub>2</sub>. Θέρμανση σε θερμοκρασία 700÷900 °C οδηγεί σε υπόλειμμα SiO<sub>2</sub> και ελεύθερο άνθρακα. Θέρμανση του υπολείμματος σε θερμοκρασία ~1500 °C και σε περιβάλλον αζώτου ή αμμωνίας οδηγεί στο σχηματισμό SiC. Οι παραγόμενοι τριχίτες έχουν διάμετρο ~0.1÷1 μm και μήκος ~50 μm.

Συγκριτικός πίνακας των ιδιοτήτων των ινών που παράγονται από κάθε μέθοδο, παρουσιάζεται αμέσως παρακάτω (Πίν. 4). Γενικά, οι μέθοδοι παρασκευής κεραμικών ινών είναι ιδιαίτερα δαπανηρές.

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

**Πίνακας 4:** Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων ινών SiC (μέσες τιμές).

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

Οι μονοκρυσταλλικές ίνες αλούμινας (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) διαμέτρου 250  $\mu$ m έχουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Λόγω της ισχυρής φύσεως των χημικών δεσμών, η σταθερότητα των μηχανικών τους ιδιοτήτων διατηρείται ως τους 800 °C. Οι μονοκρυσταλλικές ίνες αλούμινας είναι εξαιρετικά ευαίσθητες έναντι επιφανειακής φθοράς που οδηγεί ταχύτατα σε αστοχία.

### 2.1.6 Τριχίτες (whiskers)

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

Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι τριχίτες είναι από αλούμινα, γραφίτη, καρβίδιο του πυριτίου, βηρυλλία και νιτρίδιο του πυριτίου. Η παραγωγή τριχιδίων σε βιομηχανική κλίμακα είναι δύσκολη. Στον Πίνακα 5 γίνεται σύγκριση των ιδιοτήτων ινών και τριχιδίων από SiC και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	SiC <sub>INA</sub>	SiC <sub>ΤΡΙΧΙΤΗΣ</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sub>INA</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sub>ΤΡΙΧΙΤΗΣ</sub>
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	480	840	500	755
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2300	21000	2000	19500
Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	3,2	3,2	4,0	4,0
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης ( °C)	900	1600	800	1300

**Πίνακας 5:** Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων ινών και τριχιδίων από SiC και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

### 2.1.7 Ίνες φυσικών ορυκτών

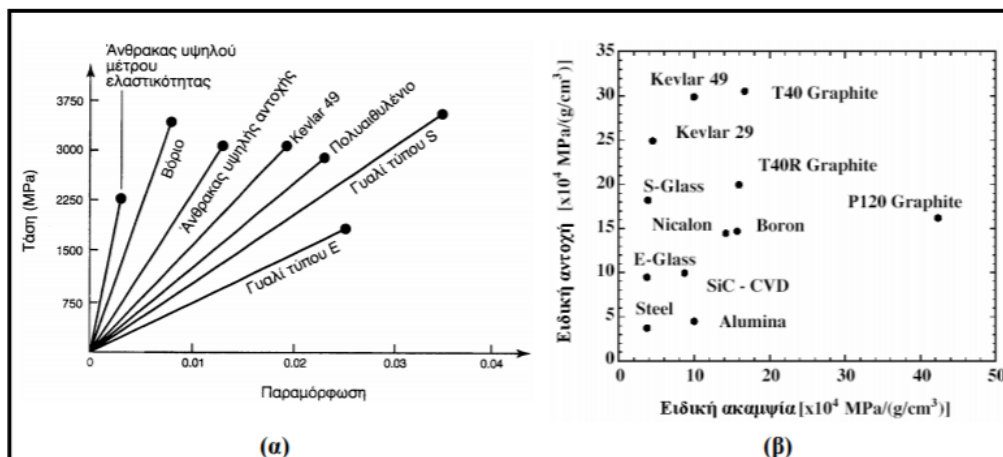
Αρκετά ορυκτά που βρίσκονται σε ινώδη ή φυλλώδη μορφή, μπορούν να αποτελέσουν φθινό ενισχυτικό υλικό, αλλά χαμηλών προδιαγραφών. Ευρύτερα χρησιμοποιούμενα τέτοια ορυκτά είναι ο αμιάντος και η μαρμαρυγία (mica).

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

Οι μαρμαρυγίες ανήκουν στην κατηγορία των φυλλοπυριτικών ορυκτών, χαρακτηρίζονται από τέλειο σχισμό και αποχωρίζονται εύκολα από το πέτρωμα με μορφή φυλλιδίων, τα οποία χρησιμοποιούνται ως συστατικό ενίσχυσης του σύνθετου υλικού. Η αντοχή σε εφελκυσμό μπορεί να φτάσει μέχρι 2500 MPa (τέλεια φυλλίδια), ενώ λόγω ατελειών στις άκρες των φυλλιδίων, οι 14 συνήθεις τιμές της αντοχής κυμαίνονται στην περιοχή 700÷900 MPa. Το μέτρο ελαστικότητας των μαρμαρυγιών είναι περίπου 220 GPa και η πυκνότητα τους 2.8 g/cm<sup>3</sup>.

### 2.1.8 Σύγκριση ενισχυτικών ινών

- Ως προς την ειδική αντοχή και ειδική ακαμψία



Εικόνα 5: (α) Χαρακτηριστικές καμπύλες σ-ε, (β) Συσχετισμός ειδικής αντοχής και ειδικής ακαμψίας για διάφορα υλικά ενισχυτικών ινών.

- Ως προς την θερμική ευστάθεια

Ίνα	T <sub>max</sub> (°C)
Spectra	150
Kevlar	250
Glass	800
SiC	1000
Alumina	1370
Carbon	2000*

\* Παρουσία οξυγόνου: T<sub>max</sub>=500 °C

*Πίνακας 6: Σύγκριση θερμικής ευστάθειας ινών.*

- Ως προς την παραμόρφωση θραύσης

Ίνα	Παραμόρφωση θραύσης (%)
Kevlar	3-4
Glass	2
Carbon	1
Ceramic	<1

*Πίνακας 7: Σύγκριση παραμόρφωσης θραύσης ινών.*

## 2.2 Μήτρα

Ο ρόλος της μήτρας συνίσταται σε:

- Συγκράτηση των ινών μεταξύ τους.
- Προστασία των ινών από περιβαλλοντικές φθορές και προσβολές.
- Μεταβίβαση των μηχανικών τάσεων που ασκούνται συνολικά στο σύνθετο υλικό προς τις ίνες.
- Ανακοπή της διάδοσης των ρωγμών, που ξεκινούν από θραύση των ινών.

Για να ικανοποιεί το ρόλο, με τον οποίο είναι επιφορτισμένη η μήτρα, πρέπει να χαρακτηρίζεται από:

- Ολκιμότητα.
- Ανθεκτικότητα.
- Σχετική ευκαμψία.
- Σημείο τήξης μεγαλύτερο από τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του σύνθετου υλικού.

Οι ιδιότητες αυτές πρέπει επίσης να παρουσιάζουν “συμβατότητα” με τις αντίστοιχες ιδιότητες των ενισχυτικών ινών. Συνήθως, το υλικό της μήτρας έχει χαμηλότερη πυκνότητα, αντοχή και δυσκαμψία από τις ίνες. Τέλος, για τη σωστή λειτουργία του συνθέτου υλικού, καθοριστικός παράγοντας είναι η καλή πρόσφυση ίνας – μήτρας.

Ανάλογα με το υλικό της μήτρας, διακρίνουμε τις ακόλουθες ομάδες υλικών μήτρας για σύνθετα υλικά:

- Οργανικές.
- Μεταλλικές.
- Κεραμικές.

Η επιλογή κατάλληλης μήτρας εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το περιβάλλον χρήσης του σύνθετου.

### 2.2.1 Οργανικές μήτρες

Οι οργανικές μήτρες διακρίνονται σε:

- **Θερμοπλαστικές:** Πρόκειται για πολυμερή με γραμμικές αλυσίδες. Παρουσιάζουν δομή, όπου οι μοριακές αλυσίδες διασυνδέονται με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals, που λύνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας με αντιστρεπτή όμως διαδικασία, καθιστώντας το υλικό μαλακότερο σε υψηλές θερμοκρασίες. Λόγω του χαμηλού τους κόστους, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ευρείας κατανάλωσης. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αποτελούν οι μήτρες πολυαιθυλενίου (PE) και πολυστυρενίου (PS). Ως ενισχυτικά υλικά θερμοπλαστικών μητρών χρησιμοποιούνται φθηνά υλικά (αμιάντος, μαρμαρυγίες, κ.α.), ώστε και το τελικό προϊόν να είναι χαμηλής τιμής.
- **Θερμοσκληρυνόμενες:** Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή παρουσιάζουν τρισδιάστατη δομή πλέγματος από πρωτογενείς ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των μοριακών αλυσίδων. Αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει το πλήθος των διαμοριακών δεσμών καθιστώντας τα υλικά αυτά σκληρότερα και ψαθυρότερα. Τέτοιες μήτρες είναι:
  - Πολυεστερικές ρητίνες που ενισχύονται με ίνες γυαλιού.
  - Εποξειδικές ρητίνες με μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους 200 °C, καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις προηγούμενες και χρήση στη αεροναυπηγική.
  - Φαινολικές ρητίνες, οι οποίες έχουν χαμηλή πλαστικότητα και μέτριες μηχανικές ιδιότητες. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους φτάνει τους 400 °C.

## 2.2.2 Μεταλλικές μήτρες

Μέταλλα, όπως το αλουμίνιο, το τιτάνιο και το νικέλιο, χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο ως υλικά μήτρες προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα. Για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών επιβάλλεται η χρήση μεταλλικών ή κεραμικών μήτρων, αφού η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρήσης οργανικών μήτρων είναι πολύ χαμηλή (~300 °C), ενώ οι ανθρακούχες μήτρες οξειδώνονται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από 500 °C.

Σε σχέση με τις οργανικές μήτρες, οι μεταλλικές παρουσιάζουν πλεονεκτήματα, αλλά και μειονεκτήματα, τα σπουδαιότερα των οποίων είναι:

### Πλεονεκτήματα:

- Μεγαλύτερη ολκιμότητα και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες.
- Βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων του σύνθετου σε καταπονήσεις ασκούμενες σε διευθύνσεις διαφορετικές από αυτές του προσανατολισμού των ινών.
- Βελτίωση της ακαμψίας και αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του σύνθετου.
- Βελτίωση της θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας του σύνθετου για ειδικές εφαρμογές υλικού (συγκόλληση, κόλληση).
- Μείωση της ευαισθησίας του σύνθετου στην παρουσία διαλυτών και διεύρυνση των θερμοκρασιακών ορίων χρήσης του συνθέτου.
- Ευκολότερη σύνδεση τεμαχίων του σύνθετου υλικού (συγκόλληση, κόλληση).

### Μειονεκτήματα:

- Δημιουργία εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων στη διεπιφάνεια μετάλλου - ίνας συμβάλλουν στην αποκόλληση ινών από τη μήτρα που οδηγεί στη μικρορωγμάτωση και τη θραύση των ινών.
- Μεγαλύτερη πυκνότητα και επομένως μεγαλύτερο βάρος της συνολικής κατασκευής.
- Φαινόμενα διάλυσης ινών στη μήτρα, σε υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. διάλυση ινών SiO<sub>2</sub> σε μήτρα Al).
- Ασυνέχεια της καμπύλης εφελκυσμού των συνθέτων υλικών στο όριο διαρροής της μήτρας.
- Δύσκολη παραγωγή συνθέτου υλικού και μεγαλύτερο κόστος.

### 2.2.3 Κεραμικές μήτρες

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

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

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

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

## 2.3 Επιλογή ινών και μήτρας στην κατασκευή ινωδών σύνθετων

Κατά την επιλογή των υλικών ενίσχυσης και μήτρας, κατά το σχεδιασμό ενός σύνθετου υλικού, είναι αναγκαίο να λαμβάνονται υπόψη και άλλες παράμετροι όπως: η διάμετρος, το μήκος, η κατ' όγκο περιεκτικότητα των ινών στο σύνθετο υλικό, η ευθυγράμμιση και χωρική διάταξη των ινών εντός του υλικού της μήτρας και η συμβατότητα των υλικών ινών και μήτρας. Όλες αυτές οι ιδιότητες συντιθέμενες προσδιορίζουν και τις τελικές ιδιότητες του ινώδους σύνθετου υλικού.

### 2.3.1 Γεωμετρία ινών

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ινωδών σύνθετων υλικών εξαρτώνται όχι μόνο από τις ιδιότητες της ίνας, αλλά επίσης και από το βαθμό κατά τον οποίο ένα εφαρμοζόμενο πεδίο μεταφέρεται από τη μητρική φάση στις ίνες. Σημαντικός παράγοντας στον βαθμό μεταφοράς αυτού του φορτίου είναι το μέγεθος του διεπιφανειακού δεσμού μεταξύ της μητρικής και της ινώδους φάσης. Όταν εφαρμόζεται μια εφελκυστική τάση, τότε παύει να υφίσταται ο δεσμός μεταξύ μήτρας –ίνας (στα άκρα της ίνας), με αποτέλεσμα η μήτρα να παραμορφώνεται. Επομένως, δεν υπάρχει μεταφορά φορτίου από τη μήτρα στα άκρα της κάθε ίνας.

Βασική παράμετρος είναι ο συντελεστής σχήματος της ίνας ( $s$ ) (aspect ratio) που είναι ο λόγος του μήκους ( $A$ ) προς την ακτίνα ( $r$ ) των ινών και αποτελεί κριτήριο για το χαρακτηρισμό των ινών ως συνεχών ή ασυνεχών. Οι πρώτες προσδίδουν στο σύνθετο μεγαλύτερη αντοχή από τις δεύτερες. Επίσης, είναι αναγκαίο ένα κρίσιμο μήκος ίνας για την ουσιαστική αύξηση της αντοχής και της δυσκαμψίας του σύνθετου υλικού. Αυτό το κρίσιμο μήκος,  $I_c$ , εξαρτάται από τη διάμετρο της ίνας ( $d$ ), από την τελική (ή εφελκυστική) αντοχή ( $\sigma_f^*$ ) και από την αντοχή του δεσμού μεταξύ μήτρας - ίνας ( $\tau_i$ ):

$$I_c = (\sigma_f d) / (2\tau_i)$$

όπου:  $\sigma_f$  η αντοχή της ίνας σε εφελκυσμό και  $\tau_i$  η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας.

Για ένα συνδυασμό υαλονημάτων και ανθρακονημάτων - μήτρας, αυτό το κρίσιμο μήκος είναι της τάξης του 1 mm, το οποίο αντιστοιχεί μεταξύ 20 και 150 φορές της τιμής της διαμέτρου της ίνας. Όταν μια μηχανική τάση εφαρμόζεται σε μία ίνα που έχει ακριβώς το κρίσιμο μήκος είναι, τότε λαμβάνεται το προφίλ τάσης - απόστασης. Δηλαδή το μέγιστο φορτίο στην ίνα επιτυγχάνεται μόνο στο αξονικό κέντρο της ίνας. Καθώς το μήκος της ίνας, αυξάνεται, η ενίσχυση που προσφέρει η ίνα γίνεται πιο αποτελεσματική.

Για μήκη ινών  $I > 15I_c$ , οι ίνες ονομάζονται συνεχείς. Οι μικρότερου μήκους ίνες ονομάζονται ασυνεχείς ή κοντές. Στην περίπτωση που οι ίνες έχουν μήκος μικρότερο από το κρίσιμο, τότε ουσιαστικά η ενίσχυσή τους είναι πολύ μικρή καθώς δεν μπορεί να γίνει πλήρης μεταφορά του ασκούμενου φορτίου από την μήτρα στην ινώδη ενίσχυση. Ουσιαστικά αυτή είναι η περίπτωση σύνθετων υλικών με ενίσχυση σωματιδίων. Σημαντική βελτίωση της αντοχής του σύνθετου υλικού έχουμε όταν οι ίνες είναι συνεχείς.

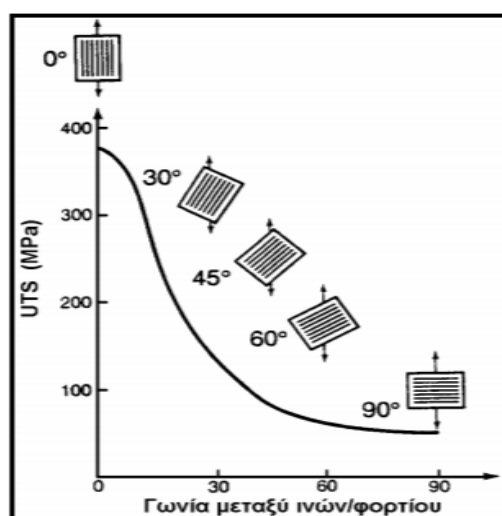
### 2.3.2 Ποσοστό ινών

Η αντοχή και η στιβαρότητα ενός σύνθετου υλικού, αυξάνονται, με αύξηση της κατ' όγκο αναλογίας των περιεχόμενων ινών. Για ποσοστά υψηλότερα του 80%, τίθενται προβλήματα στην κατασκευή του σύνθετου, αφού οι ίνες δεν μπορούν να καλυφθούν πλήρως από το υλικό της μήτρας. Πολλές φορές, για την καλύτερη ενίσχυση της μήτρας δεν χρησιμοποιείται ένας, μόνον, τύπος ινών, αλλά μίγμα δύο ή περισσότερων τύπων. Τα παραγόμενα ονομάζονται υβριδικά σύνθετα (hybrid composites).



### 2.3.3 Προσανατολισμός ινών

Οι συνεχείς, μονοδιευθυντικές ίνες παρουσιάζουν ισχυρή ανισοτροπία και η μηχανική τους αντοχή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διεύθυνση επιβολής του φορτίου. Ίνες διαφόρων προσανατολισμών είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν, ώστε η προσφερόμενη ενίσχυση του σύνθετου να είναι όσο το δυνατόν ισότροπη. Από την εικόνα 6, συνάγεται ότι για σύνθετο υλικό με μονοδιευθυντικές ίνες, η βέλτιστη σιβαρότητα (μέτρο της οποίας είναι το μέτρο ελαστικότητας, E) και η βέλτιστη αντοχή, UTS επιτυγχάνονται εάν η εφαρμοζόμενη τάση είναι πάντοτε παράλληλη προς τον προσανατολισμό των ινών.



**Εικόνα 6:** Επίδραση του προσανατολισμού των ινών στην αντοχή σε εφελκυσμό σύνθετου υλικού εποξειδικής μήτρας με ίνες E-γυαλιού.

Συνήθως, όμως, ένα σύνθετο υλικό δεν είναι μονοστρωματικό, αλλά πολυστρωματικό. Όταν οι ίνες κάθε στρώσης έχουν τον ίδιο προσανατολισμό, το σύνθετο συμπεριφέρεται ως ανισότροπο, ενώ, όταν η ενίσχυση μονοδιευθυντικών ινών βρίσκεται υπό τη μορφή διαδοχικών στρώσεων διαφορετικού προσανατολισμού, το σύνθετο αποκτά ισότροπη συμπεριφορά.

### 2.3.4 Συνάφεια ινών – μήτρας

Η καλή συνάφεια ινών – μήτρας είναι πολύ σημαντική για την καλή λειτουργία του συνθέτου. Η διεπιφάνεια ίνας – μήτρας, ορίζεται ως η κοινή επιφάνεια μεταξύ των δύο συστατικών υλικών, καθώς και η περιοχή στα σύνορα αυτής της επιφάνειας. Οι αναπτυσσόμενοι δεσμοί στη διεπιφάνεια ίνας – μήτρας πρέπει να είναι αρκετά ι-

σχυροί, ώστε να εξασφαλίζεται η μεταφορά των τάσεων μεταξύ των δύο συστατικών του σύνθετου.

Η κακή συνάφεια έχει ως αποτέλεσμα την εκρίζωση (pullout) των ινών από τη μήτρα, που οδηγεί σε ταχύτερη αστοχία του υλικού. Γι' αυτό το λόγο, κατά το σχεδιασμό του σύνθετου, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι συντελεστές θερμικής διαστολής μήτρας και ίνας και η αναγκαιότητα επικάλυψης των ινών με κάποιο συνδετικό υλικό:

- Οι ίνες γυαλιού επενδύονται με ουσίες που εξασφαλίζουν τη συνάφεια με τη μήτρα και την αντίσταση του συνθέτου στην υγρασία.
- Οι ίνες άνθρακα επικαλύπτονται με οργανικές ουσίες, για αύξηση της συνάφειάς τους με τη μήτρα ή με Ni, όταν χρησιμοποιούνται με μεταλλικές μήτρες (Ag, Al).
- Οι ίνες βορίου επικαλύπτονται με BN ή SiC, όταν συνδυάζονται με μήτρα αλουμινίου. Ίνες B με επικάλυψη SiC αναφέρονται ως Borsic.

### 2.3.5 Τελική επιλογή υλικών

Στους Πίν. 8 - 10 δίνονται παραδείγματα των συνηθέστερων συνθέτων υλικών οργανικής, μεταλλικής και κεραμικής μήτρας με ενίσχυση διαφόρων τύπων ινών και οι εφαρμογές τους στην κατασκευαστική βιομηχανία.

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Εποξειδική	Kevlar	Αεροναυπηγική και ναυπηγική βιομηχανία. Βιομηχανία αθλητικών ειδών (ρακέτες τένις, μπάστονια golf, είδη τοξοβολίας, καλάμια ψαρέματος)
Πολυεστερική	Γραφίτη	Αεροναυπηγική και αυτοκινητο - βιομηχανία. Μέρη αεροσκαφών, πλοιαρίων και αυτοκινήτων, μικρού βάρους και υψηλής αντοχής σε διάβρωση.
Πολυμερική	Γυαλιού	Αθλητικός εξοπλισμός

*Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά παραδείγματα σύνθετων υλικών οργανικής μήτρας.*

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Al	Borsic	Πτερύγια στροβιλοκινητήρων αεροσκαφών.
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Εμβόλα μηχανών Diesel.
	SiC	Πτερύγια εκτόξευσης βλημάτων.
	Γραφίτη	Ιστοί κεραίων τηλεσκοπίου Hubble.
Κραμάτων Cu	SiC	Υψηλής αντοχής προπέλες σκαφών.
Κράματα Ti και W	SiC & B <sub>4</sub> N	Πτερύγια και δίσκοι στροβίλων.

*Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά παραδείγματα σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας.*

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Άνθρακα	Άνθρακα	Μέρη αεροσκαφών και διαστημοπλοίων υψηλών προδιαγραφών (επιτρεπτή η λειτουργία ως τους 3000 °C). Δισκόφρενα σε αγωνιστικά αυτοκίνητα
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiC, ZrO <sub>2</sub> , Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> και κεραμικά γυαλιά	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> & SiC	Αγωγοί εναλλακτών θερμότητας, συστήματα θερμομόνωσης.

*Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά παραδείγματα σύνθετων υλικών κεραμικής μήτρας.*

## 2.4 Μέθοδοι μορφοποίησης

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

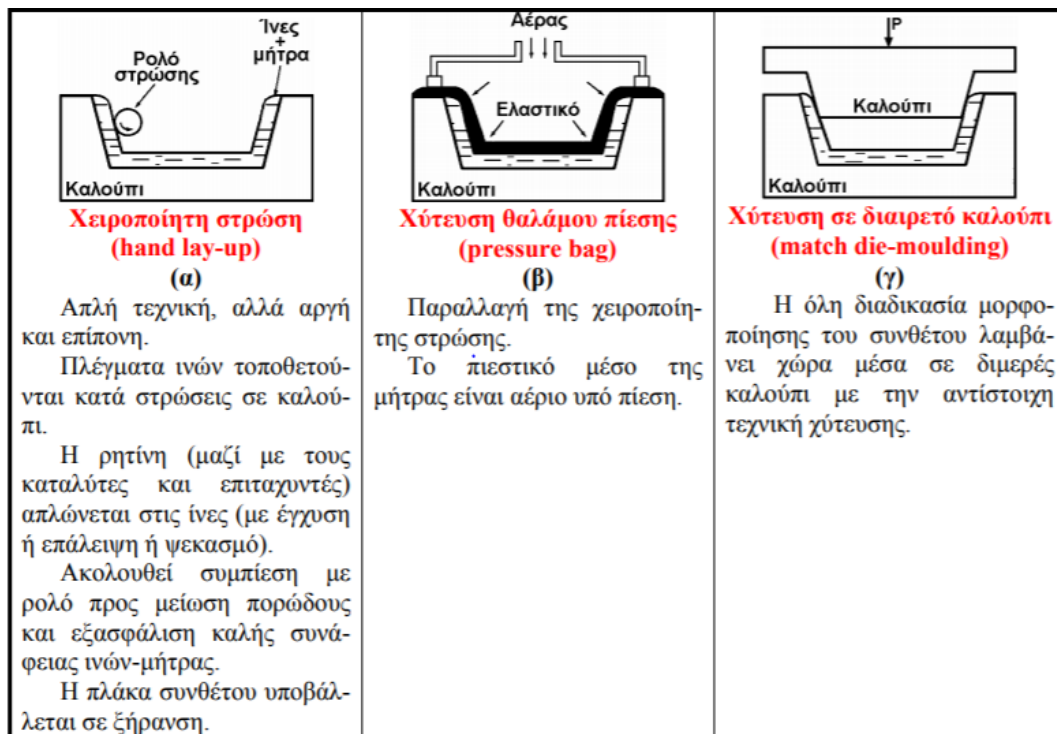
- Παραγωγή των ινών.
- Διάταξη - διεύθυνση των ινών σε ιστό, πλέγμα ή πακέτα (yarn, tow, roving), όπου οι μεμονωμένες ίνες ομαδοποιούνται κατάλληλα ανά 100-100.000.
- Εισαγωγή των ινών στη μήτρα.

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

A. Μορφοποίηση σύνθετου οργανικής μήτρας

A1. Ασυνεχής μορφοποίηση σύνθετου

- Χειροποίητη στρώση (hand lay-up)
  - Χύτευση θαλάμου πίεσης (pressure bag)
  - Χύτευση σε διαιρετό καλούπι (matched die - moulding)
- A2. Συνεχής μορφοποίηση σύνθετου
- Περιέλιξη νήματος (filament winding)
  - Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheet moulding process, SMC)
  - Μορφοποίηση με εμβάπτιση (pultrusion)
- B. Μορφοποίηση σύνθετου μεταλλικής μήτρας
- Συνδιέλαση (co-extrusion)
- Μορφοποίηση με χύτευση (casting process)
  - Συμπίεση σε στερεή κατάσταση
  - Απόθεση υλικού μήτρας
- Γ. Μορφοποίηση σύνθετου κεραμικής μήτρας.



**Εικόνα 7:** Ασυνεχής μορφοποίηση σύνθετου: (α) χειροποίητη στρώση, (β) χύτευση θαλάμου πίεσης, (γ) χύτευση σε διαιρετό καλούπι.

Οι ίνες διατίθενται στην αγορά σε δεσμίδες τυλιγμένες γύρω από ένα κυλινδρικό οδηγό. Μπορεί να είναι ευθυγραμμισμένες ή πεπλεγμένες.

Οι ασυνεχείς (μικρού μήκους) ίνες συνδυάζονται με το υλικό μήτρας είτε σε τυχαία διάταξη, είτε όσο το δυνατόν προσανατολισμένες.

Οι συνεχείς (μεγάλους μήκους) ίνες είτε ευθυγραμμίζονται σε μία διεύθυνση σε μορφή ταινίας είτε διατάσσονται σε πλεγμένα στρώματα (υαλοϋφασμα).

Η απόθεση υλικού μήτρας στις ενισχυτικές ίνες γίνεται με τη μέθοδο της χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD) ή με ηλεκτραπόθεση.

### Παραδείγματα εφαρμογών

Με CVD αποτίθενται Al και Ni σε ίνες C.

Με ηλεκτραπόθεση από διάφορα διαλύματα τους αποτίθενται Al, Cu και Ni σε ενισχυτικές ίνες κάθε τύπου.

Μετά την απόθεση υλικού οι επικαλυμμένες ίνες υποβάλλονται σε έψηση που εξασφαλίζει καλύτερη συνάφεια μεταξύ ινών-μήτρας.

Οι τεχνικές μορφοποίησης συνθέτων κεραμικής μήτρας στηρίζονται στις τεχνικές μορφοποίησης των κεραμικών υλικών με διαδικασίες έψησης.

Η κεραμική μήτρα, υπό τη μορφή σκόνης, το συνδετικό υλικό (για εξασφάλιση καλής πρόσφυσης ινών-μήτρας) και οι ίνες υποβάλλονται σε έψηση σε υψηλή θερμοκρασία. Στην περίπτωση υαλωδών κεραμικών, οι ενισχυτικές ίνες προστίθενται στη μήτρα, η οποία ευρίσκεται υπό μορφή τήγματος.

### Παραδείγματα εφαρμογών

Σύνθετα κεραμικής μήτρας με ενισχυτικές ίνες SiC.

Σύνθετα με μήτρα νιτρίδιο του πυριτίου και ενίσχυση ινών W, SiC ή C.

Όταν το παραγόμενο σύνθετο υλικό πρέπει να λαμβάνει μη επίπεδη μορφή, η στρωματοποίηση επιτελείται μέσα σε καλούπια με ειδικές μεθόδους μορφοποίησης, π.χ. με έγχυση (injection moulding) ή με ψεκασμό (spray moulding).

Πιο πρόσφατα, με την ανάπτυξη 3-D (τριδιάστατων) συνθέτων υλικών, έχουν εξελιχθεί πιο πολύπλοκες διαδικασίες, ελεγχόμενες με υπολογιστή. Αφού το τρισδιάστατο πλέγμα ινών στηθεί, το υλικό της μήτρας διαχέεται με πίεση εντός της διάταξης, όπου τελικά υφίσταται σκλήρυνση και παραδίδεται προς χρήση.

Υπάρχουν επίσης πολλά είδη ρητινών που μπορούν να φτιαχτούν ειδικά για συγκεκριμένες εφαρμογές, οπότε δημιουργείται μια ποικιλία ουσιαστικά άπειρων συνθετικών, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εξειδικευμένες κατασκευές ή σε διακοσμητικές εφαρμογές. Ο λόγος ύπαρξης αυτής της ποικιλίας συνθετικών είναι φυσικά οι ιδιότητες των υλικών, που προσφέρουν σημαντικά οφέλη στο βάρος και στην αντοχή, σε σχέση με τα κράματα αλουμινίου και ατσαλιού, όπως δείχνει κι ο σχετικός πίνακας.

	Όριο θραύσης (kg/mm <sup>2</sup> )	Πυκνότητα (gr/cm <sup>3</sup> )	Ειδική αντοχή
<b>Ανθρακόνημα</b>	3.5	1.75	2
<b>Ατσάλι</b>	1.3	7.9	0.17

*Πίνακας 11: Σύγκριση χαρακτηριστικών ανθρακονήματος και ατσαλιού.*

Όπως φαίνεται, το ανθρακόνημα έχει αντοχή στην θραύση σχεδόν τρεις φορές μεγαλύτερη από το ατσάλι, αλλά παρ' όλα αυτά είναι 4.5 φορές πιο αραιό. Όταν συνδυαστεί με υλικά που έχουν ως χαρακτηριστικό τους την προσχεδιασμένη παραμόρφωση κάτω από φορτίο, το ανθρακόνημα έχει αποδειχθεί ανεκτίμητο στις κατασκευές για απόσβεση κρούσης, ακόμη και σε μικρά τμήματα όπως τα ρύγχι των αεροσκαφών. Η αξία του, λόγω του χαμηλού του βάρους, οδήγησε στην υιοθέτησή του από τις μεγάλες αεροπορικές κατασκευές, όπως το νέο Dreamliner 787 της Boeing και το Airbus 380, δημιουργώντας έλλειψη από το υλικό, παρά τους περιορισμούς και το κόστος της παραγωγής.

## 2.5 Ρητίνες

Οι ρητίνες είναι μία κατηγορία οργανικών πολυμερών ουσιών, είτε φυσικών είτε συνθετικών στην προέλευση, που έχουν κατά κανόνα μεγάλα μοριακά βάρη. Η δομή τους σχηματίζεται επαναλαμβάνοντας χημικές ενώσεις – μονάδες, τα μονομερή. Είναι υλικά που μορφοποιούνται εύκολα και παρασκευάζονται ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις, έτσι ώστε να συνδυάζουν πολλά πλεονεκτήματα όπως: τη δυνατότητα δημιουργίας προϊόντων πολύπλοκης γεωμετρίας, την οπτική διαφάνεια, χαμηλή πυκνότητα, καλές μηχανικές ιδιότητες και συχνά μικρό κόστος.

Οι περισσότερες ρητίνες που διατίθενται για επεξεργασία, είναι σε υγρή μορφή. Όταν καταλύονται μέσω μιας διαδικασίας πολυμερισμού, μεταβαίνουν από την υγρή στη στερεή μορφή. Αρχικά δημιουργείται ένα προπολυμερές (η ρητίνη) αποτελούμενο από αλυσίδες μακρομορίων, και ακολούθως οι αλυσίδες αυτές συνδέονται διασταυρούμενες μεταξύ τους με τη βοήθεια καταλύτη σε θερμοκρασία δωματίου ή υψηλότερη (και μερικές φορές με εφαρμογή επιπρόσθετης πίεσης).

### 2.5.1 Είδη ρητινών

Οι πολυεστερικές, οι βινυλεστερικές και οι εποξικές ρητίνες καταλαμβάνουν στην αγορά περίπου το 90% όλων των άμορφων θερμοσκληρυνόμενων ρητινών που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα δομικά υλικά. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα καθενός από τους παραπάνω τύπους εν συντομία είναι:

- **Πολυεστερικές ρητίνες:** Υλικό εύχρηστο με εξαιρετικές συγκολλητικές και υγρομονωτικές ιδιότητες, με το χαμηλότερο κόστος αλλά έχει γενικά μέτριες μηχανικές ιδιότητες και αντοχές (συγκριτικά με τις υπόλοιπες ρητίνες) .
- **Βινυλεστερικές ρητίνες:** Υλικό με μεγάλη αντίσταση σε χημικά και στις περιβαλλοντικές συνθήκες με καλή μηχανική αντοχή αλλά και υψηλότερο κόστος από τους πολυεστέρες.

- **Εποξικές ρητίνες:** Το υλικό με την υψηλότερη αντοχή. Για αυτό χρησιμοποιείται κυρίως στην κατασκευή αεροσκαφών. Λόγω της απουσίας εστέρων στη μοριακή τους δομή, έχουν εξαιρετική ανθεκτικότητα στο νερό και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Το μεγαλύτερο μειονέκτημά τους, είναι το εξαιρετικά υψηλό κόστος τους συγκριτικά με τις υπόλοιπες ρητίνες.

Είδος Ρητίνης	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Επιμήκυνση θραύσης (%)	Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )
Εποξική	55-130	2.0-4.5	4.0-14.0	1.20-1.30
Πολυεστερική	35-104	2.1-4.1	<5.0	1.10-1.46
Βινυλεστερική	73-81	3.0-3.6	3.5-5.5	1.12-1.32

*Πίνακας 12: Ιδιότητες εποξικής, πολυεστερικής και βινυλεστερικής ρητίνης.*

### Πολυεστερικές ρητίνες

Οι ρητίνες αυτές αποτελούν τον κύριο όγκο των πολυμερών, που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία παραγωγής σύνθετων υλικών. Πρόκειται για ακόρεστους πολυεστέρες, που παράγονται από την αντίδραση γλυκόζης, είτε με διβασικά οξέα είτε με ανυδρίτες. Λόγω της μεγάλης ποικιλίας των συστατικών τους στοιχείων, οι ιδιότητες των πολυεστερικών ρητινών μπορούν να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους.

Η χημική αντίδραση, με την οποία παράγονται οι πολυεστέρες είναι σημαντικά εξώθερμη. Για τον λόγο αυτό απαιτείται μεγάλη προσοχή στη χρήση της ποσότητας της μάζας των αντιδρώντων. Εάν η μάζα είναι μεγάλη, το φύλλο πολυεστέρα μπορεί να αναφλεγεί ή να ρηγματωθεί. Αντίθετα, εάν η μάζα είναι μικρή, η θερμότητα που εκλύεται δεν επαρκεί για την ολοκλήρωση της αντίδρασης.

Οι πολυεστέρες παρουσιάζουν μέτρια ανθεκτικότητα στους διαλύτες και τα οξέα, ενώ είναι ευπαθείς στις βάσεις και στο νερό υψηλής θερμοκρασίας. Είναι γενικά λιγότερο ανθεκτικοί σε κόπωση, συγκριτικά με τις εποξειδικές και τις βινυλεστερικές ρητίνες. Η παραμόρφωση θραύσης είναι κατά κανόνα της τάξης του 1%. Ωστόσο το κυριότερο μειονέκτημα των πολυεστερικών ρητινών, για χρήση τους σε κατασκευές που κατοικούνται, είναι η δυσάρεστη οσμή, λόγω της χημικής τους σύστασης.

### **Βινυλεστερικές ρητίνες**

Όταν αναφερόμαστε σε βινυλεστερικές ρητίνες, πρόκειται για υβριδικές ρητίνες που παράγονται με αλυσιδωτές αντιδράσεις ενός εποξειδικού πολυμερούς, με ακρυλικές ή μεθακρυλικές ενώσεις. Εξαιτίας της παρουσίας του εποξειδικού πολυμερούς, οι βινυλεστερικές ρητίνες, σε σχέση με τις πολυεστερικές, είναι περισσότερο εύκαμπτες, σκληρότερες, πιο ανθεκτικές σε κόπωση και λιγότερο χημικά ενεργές. Οι υδροξυλικές ενώσεις, που περιέχονται στο εποξειδικό πολυμερές, σχηματίζουν δεσμούς υδρογόνου με αντίστοιχες ενώσεις στην επιφάνεια των ινών γυαλιού. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται σημαντικά η σύνδεση της ρητίνης με τις ίνες, αν και δε φτάνει στο επίπεδο της συγκολλησιμότητας των εποξειδικών ρητινών. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μεγάλη απώλεια όγκου των βινυλεστερικών ρητινών, λόγω συστολής ξηράνσεως.

Από την άλλη πλευρά όμως, οι βινυλεστερικές ρητίνες δεν έχουν τόσο υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα σε κόπωση, όσο οι εποξειδικές. Λόγω της χημικής τους σύστασης, αντιμετωπίζουν επίσης το ίδιο πρόβλημα δυσσομίας με τις πολυεστερικές ρητίνες. Η συστολή ξηράνσεως είναι γενικά της τάξεως του 5 με 10%. Το κόστος τους είναι συνήθως μεταξύ του κόστους των εποξειδικών και των πολυεστερικών ρητινών.

### **Εποξικές ρητίνες**

Οι εποξικές ρητίνες είναι ημιδιαφανή ιξώδη υγρά που χρησιμοποιούνται είτε μόνα είτε σε συνδυασμό με ενισχυτικά υφάσματα για την παραγωγή σύνθετων ενισχυμένων δομών. Οι εποξικές ρητίνες είναι θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά (thermosetting plastic ή thermoset), δηλαδή είναι πετροχημικά υλικά που σκληραίνουν μη αντιστρεπτά. Η σκλήρυνση μπορεί να επέλθει με θέρμανση, γενικά υψηλής θερμοκρασίας έως και 200 °C (392 °F), μέσω χημικής αντίδρασης, ή κατάλληλης ακτινοβολήσης. Τα θερμοσκληραινόμενα υλικά είναι συνήθως υγρά ή ελάσιμα πριν τη σκλήρυνση. Όταν μια θερμοσκληραινόμενη ρητίνη σκληρυνθεί δεν μπορεί να επαναθερμανθεί και να λιώσει σε διαφορετικό σχήμα.

Οι εποξικές ρητίνες, εφαρμόζονται είτε μέσα σε καλούπια ή εξωτερικά στις υφιστάμενες δομές για την ενίσχυσή τους.

Υπάρχουν πολλοί τύποι εποξικών ρητινών, ανάλογα με τις απαιτήσεις των αντικειμένων που παράγονται και ανάλογα με τη διαδικασία παραγωγής που πρέπει να ακολουθηθεί.

Το μεγάλο πλεονέκτημα των εποξικών ρητινών σε σύγκριση με τις πολυεστερικές ρητίνες είναι οι πολύ υψηλές μηχανικές αντοχές των συστημάτων καθώς και ότι στις εποξικές ρητίνες δεν υπάρχει συρρίκνωση κατά τον πολυμερισμό. Οι εφαρμογές είναι αμέτρητες και το τελικό αποτέλεσμα πολύ δυνατό, δεν στρεβλώνει, δεν συρρικνώνεται σε βάθος χρόνου. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούνται εξειδικευμένες εποξικές ρητίνες για την κατασκευή στόκου κτλ.



### **Εφαρμογές εποξικών ρητινών**

- Κατασκευές αγωνιστικών σκαφών και αυτοκινήτων
- Κατασκευές αξεσουάρ μοτοσικλετών
- Κατασκευές αεροσκαφών, υποβρυχίων
- Κατασκευές σάντουιτς με Pvc Foam, Coremat, Balsa
- Πλαστικοποίηση ξύλινων σκαφών με υφάσματα cloth (μαντηλάκι)
- Κατασκευές αερομοντελισμών, λεπίδων, ψαροντούφεκων κ.λ.π.
- Εμποτισμός ξύλινων ή άλλων επιφανειών για προστασία από το θαλασσινό περιβάλλον
- Επισκευή - επιδιόρθωση με χρήση υφασμάτων σε επιφάνειες όπου απαιτείται η πιο σίγουρη πρόσφυση
- Πρόσμειξη με διάφορες σκόνες (fillers) για δημιουργία ισχυρού εποξικού στόκου/κόλλας
- Ως υγρή κόλλα πινέλου για ισχυρή συγκόλληση επιφανειών
- Πλαστικοποίηση αντικειμένων από φελιζόλ χωρίς να λιώνουν όπως με τον πολυεστέρα

### **Χαρακτηριστικά**

- Αντιοσμωτική προστασία
- Αντοχή στις χημικές και περιβαλλοντικές προσβολές
- Πολύ υψηλές μηχανικές αντοχές
- Ελάχιστη συντήρηση
- Μεγάλη αντοχή σε σχέση με μικρό βάρος
- Εξαιρετική αντοχή στην διάβρωση
- Ανθεκτικότητα στην παρατεταμένη υγρασία

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ I

---

#### 3.1 Περίληψη

Αυτή η πειραματική μέθοδος, περιγράφει τον τύπο I της διαστρωματικής αντοχής σε θραύση (Interlaminar Fracture Toughness - IFT),  $G_{Ic}$ , των CFRP υλικών με συνεχείς ίνες, με χρήση της δοκού διπλού προβόλου.

Περιορίζεται στην χρήση μονοδιεύθυντων ανθρακονημάτων και υαλονημάτων υλικών, με ψαθυρές και δύσθραυστες μονοφασικές πολυμερικές μήτρες. Πρώτον, γίνεται παρουσίαση και κριτική αξιολόγηση των πειραματικών διαδικασιών και των μεθόδων ανάλυσης δεδομένων. Δημοσιευμένα αποτελέσματα για μονοδιεύθунτα θερμοσκληρυνόμενα και θερμοπλαστικά σύνθετα είναι ταξινομημένα σε πίνακες και παρουσιάζεται η επιρροή ορισμένων πειραματικών παραμέτρων. Αυτά περιλαμβάνουν το layup, τον ρυθμό φόρτισης και τη θερμοκρασία του πειράματος. Στην συνέχεια, περιγράφονται οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη των μηχανισμών αποκόλλησης. Τέλος, συζητούνται ορισμένα από τα προβλήματα που σχετίζονται με το πείραμα DCB, όπως η γεφύρωση των ρωγμών με ίνες και οι συνέπειές τους για την τυποποίηση των πειραμάτων.

#### 3.2 Εισαγωγή

Τα τελευταία 15 έτη, υπήρξε ανάπτυξη ενός μεγάλου φάσματος δοκιμών, σχεδιασμένων να ποσοτικοποιήσουν την δυσθραυστότητα των CFRP υλικών συνεχών ινών. Αυτές οι δοκιμές, προσδιορίζονται γενικά από τον τύπο της φόρτισης που εφαρμόζεται (τύπος I, II, III ή μίξη αυτών) και από τον προσανατολισμό του σύνθετου σε σχέση με το επίπεδο διάδοσης της ρωγμής. Για το πείραμα, θα χρησιμοποιηθεί η δοκός διπλός πρόβολος (DCB). Μετά από μια σύντομη περιγραφή της ανάπτυξης του πειράματος τύπου I, θα ασχοληθούμε με πέντε κύρια θέματα:

- Περιγραφή δειγμάτων και διαστασιολόγηση
- Μοντελοποίηση και data reduction
- Πειραματικά αποτελέσματα
- Επιρροή των πειραματικών παραμέτρων
- Μηχανισμοί αποκόλλησης τύπου I

Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με κάποια σχόλια για την κόπωση τύπου I και την τυποποίηση του πειράματος.

### 3.3 Ιστορικό υπόβαθρο

Τα πειράματα cleavage έχουν αποδειχτεί χρήσιμα στη μελέτη ενός μεγάλου εύρους υλικών. Για παράδειγμα, την δεκαετία του '30 ο Obreimoff χρησιμοποίησε ένα τέτοιο πείραμα για να μετρήσει την ενέργεια επιφάνειας της κατηγορίας μαρμαρυγιών μίκα, ενώ ο Gilman όρισε τις επιφανειακές ενέργειες των ιονικών και μεταλλικών κρυστάλλων. Ο Berry παρουσίασε ένα πείραμα cleavage, ώστε να μετρήσει το απαιτούμενο έργο για δημιουργία επιφάνειας θραύσης σε πλέξιγκλας και αυτό το δείγμα υιοθετήθηκε και τροποποιήθηκε από πολλούς άλλους συγγραφείς. Οι Broutman και McGarry, έδωσαν μια λεπτομερή περιγραφή προετοιμασίας ενός τέτοιου δείγματος.

Την ίδια στιγμή, στα μέσα της δεκαετίας του '60, αρκετοί συγγραφείς χρησιμοποιούσαν μια προσέγγιση της θραυστομηχανικής για να εξετάσουν την δυσθραυστότητα (fracture toughness) των συγκολλητικών αρθρώσεων. Τα δείγματα που αποτελούνται από μια συνδετική γραμμή μεταξύ δύο μεταλλικών βραχιόνων, αποδείχθηκαν κατάλληλα για την μέτρηση του  $G_{Ic}$ .

Λαμβάνοντας υπόψη τα προηγούμενα, η εφαρμογή τέτοιων δειγμάτων για να καθορίσει τις ενέργειες θραύσης των CFRP συνεχών ινών, ήταν ένα φυσικό βήμα και διάφορες δημοσιευμένες εκθέσεις τέτοιων εφαρμογών, χρονολογούνται από τις αρχές της δεκαετίας του '70. Οι τιμές του  $G_{Ic}$  είναι πλέον συχνά εισηγμένες στα δελτία δεδομένων των προμηθευτών υλικών, αλλά απαιτείται μεγάλη προσοχή στην ερμηνεία τους, όπως θα φανεί παρακάτω.

### 3.4 Σημαντικότητα του πειράματος

Η ευαισθησία στην αποκόλληση, είναι μία από τις μεγαλύτερες αδυναμίες πολλών σύνθετων κατασκευών. Η γνώση της αντίστασης στην διαστρωματική θραύση αυτών των υλικών, είναι χρήσιμη για την ανάπτυξη προϊόντων και την επιλογή υλικών. Επιπλέον, η μέτρηση της IFT, ανεξάρτητη της γεωμετρίας του κομματιού ή της μεθόδου φόρτισης, είναι χρήσιμη για τον καθορισμό των οριακών μεγεθών που χρησιμοποιού-

νται στην ανάλυση ανοχής βλάβης σύνθετων κατασκευών από τέτοια υλικά. Αυτή η πειραματική μέθοδος εξυπηρετεί τους εξής σκοπούς:

- Να καθιερώσει ποσοτικά την επίδραση της “θεραπείας” στην επιφάνεια των ινών, των τοπικών διακυμάνσεων στην περιεκτικότητα ινών στο υλικό και των περιβαλλοντικών μεταβλητών στο  $G_{Ic}$  ενός συγκεκριμένου σύνθετου υλικού.
- Να συγκρίνει ποσοτικά τις σχετικές τιμές του  $G_{Ic}$  για σύνθετα υλικά με διαφορετικά συστατικά.
- Να αναπτύξει κριτήρια αστοχίας αποκόλλησης για ανοχή σε σύνθετη βλάβη και ανάλυση αντοχής.

### 3.5 Ορισμοί και σύμβολα

- **Τύπος ανοίγματος ρωγμής (Mode I)** = τύπος θραύσης, όπου τα στρώματα αποκολλούνται το ένα από το άλλο.
- **Διαστρωματική αντοχή σε θραύση τύπου I,  $G_{Ic}$**  = η κρίσιμη τιμή του  $G$  για διάδοση της αποκόλλησης, ως αποτέλεσμα ενός φορτίου ανοίγματος της ρωγμής ή μετατόπισης.
- **Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας  $G$**  = η απώλεια ενέργειας  $dU$  στο πειραματικό δείγμα ανά μονάδα πλάτους, για μια απειροελάχιστη αύξηση του μήκους αποκόλλησης  $da$ , για διάδοση αποκόλλησης κάτω από συνεχή μετατόπιση. Σε μαθηματική μορφή:

$$G = - (1/b) * (dU/da) \quad [1]$$

όπου:

$U$  = ολική ελαστική ενέργεια στο πειραματικό δείγμα

$b$  = πλάτος του δείγματος

$a$  = μήκος αποκόλλησης

Σύμβολα:

- $A_1$  = καμπύλη  $a/b$  συναρτήσει του  $C^{1/3}$
- $a$  = μήκος αποκόλλησης
- $a_0$  = αρχικό μήκος αποκόλλησης
- $b$  = πλάτος του δείγματος DCB
- $C$  = ενδοτικότητα  $\delta/P$  του δείγματος DCB
- $CV$  = συντελεστής μεταβολής, %
- $da$  = διαφορική αύξηση του μήκους αποκόλλησης

- $dU$  = διαφορική αύξηση της ενέργειας παραμόρφωσης
- $E_{11}$  = μέτρο ελαστικότητας στην διεύθυνση των ινών
- $E_{1f}$  = μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη στην διεύθυνση των ινών
- $F$  = συντελεστής διόρθωσης μετατόπισης
- $h$  = πάχος του δείγματος DCB
- $L$  = μήκος του δείγματος DCB
- $L'$  = μισό πλάτους των μπλοκ φόρτισης
- $m$  = αριθμός στρωμάτων του δείγματος DCB
- $N$  = συντελεστής διόρθωσης του μπλοκ φόρτισης
- $NL$  = σημείο στο οποίο η καμπύλη φορτίου - μετατόπισης του ανοίγματος γίνεται μη γραμμική
- $n$  = καμπύλη λογάριθμου  $C$  συναρτήσει λογάριθμου  $a$
- $P$  = εφαρμοζόμενη δύναμη
- $P_{max}$  = μέγιστη εφαρμοζόμενη δύναμη κατά την διάρκεια του πειράματος
- $SD$  = τυπική απόκλιση
- $t$  = απόσταση από τον πείρο του μπλοκ φόρτισης μέχρι τον άνω βραχίονα του δείγματος
- $U$  = ενέργεια παραμόρφωσης
- $VIS$  = σημείο στο οποίο η αποκόλληση είναι ορατή στο άκρο του δείγματος
- $V_f$  = ποσοστό περιεκτικότητας ινών κατ'όγκο, %
- $\delta$  = απόκλιση σημείου φόρτισης
- $\Delta$  = αποτελεσματική επέκταση αποκόλλησης για διόρθωση της περιστροφής των βραχιόνων του δείγματος στο μέτωπο αποκόλλησης.
- $\Delta_x$  = σταδιακή αλλαγή του  $Loga$
- $\Delta_y$  = σταδιακή αλλαγή του  $LogC$

### 3.6 Μέθοδοι data reduction και μοντέλα

Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται για ερμηνεία των δεδομένων που καταγράφονται κατά την διάρκεια των πειραμάτων τύπου I, μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: στις μεθόδους ενδοτικότητας και στις μεθόδους “άμεσης ενέργειας”. Πρώτα θα αναλύσουμε τις πρώτες.

#### 3.6.1 Μέθοδοι ενδοτικότητας data reduction

Όλες οι μέθοδοι ενδοτικότητας, βασίζονται στην εξίσωση Erwin – Kies:

$$G_{Ic} = [(P_c^2) / (2B)] * [(dC) / (da)] \quad [2]$$

όπου  $P_c$  είναι το κρίσιμο φορτίο,  $B$  το πλάτος,  $C$  η ενδοτικότητα και  $a$  το μήκος ρωγμής.

Αυτές οι μέθοδοι απαιτούν μια σχέση που συνδέει την ενδοτικότητα με το μήκος ρωγμής. Μπορούν να χωριστούν περαιτέρω σε αυτές που βασίζονται σε σχέσεις της θεωρίας δοκών και σε αυτές που λαμβάνονται πειραματικά.

### 3.6.1.1 Ανάλυση θεωρίας δοκών

Η προσέγγιση της αντοχής των υλικών, επικαλείται μια σειρά από υποθέσεις που είναι απαραίτητες για να καταστεί δυνατή η γρήγορη λήψη χρήσιμων αποτελεσμάτων. Η εφαρμογή μιας τέτοιας προσέγγισης στα σύνθετα υλικά θα απαιτούσε να ικανοποιηθούν τα ακόλουθα:

- ομοιογένεια και ισοτροπία
- εφαρμογή μιας γενικευμένης μορφής του νόμου του Hooke
- τήρηση ορισμένων γεωμετρικών συνθηκών
- εφαρμογή της αρχής του Saint Venant
- τα επίπεδα τμήματα να παραμένουν επίπεδα μετά από τη φόρτιση

Ωστόσο, ορισμένες από αυτές τις υποθέσεις πρέπει να τροποποιηθούν. Λαμβάνοντας τα υπόψη με την ίδια σειρά, τα σύνθετα υλικά:

- είναι ομοιογενή αλλά ορθότροπα
- ικανοποιούν ένα γενικευμένο νόμο του Hooke
- έχουν άκαμπτη μήτρα, η οποία κατά τη φόρτιση, όπως κάμψη ή στρέψη, μπορεί να προωθήσει μεγάλες μετατοπίσεις και μη γραμμική συμπεριφορά
- η μηχανική συμπεριφορά τους εξαρτάται σημαντικά από τις συνθήκες φόρτισης
- η συμπεριφορά τους είναι επίσης ευαίσθητη σε διατμητικά φαινόμενα όπου, π.χ., σε απλή κάμψη, μπορούν να προκαλέσουν παραμόρφωση σε επίπεδα τμήματα. Η επιρροή της εγκάρσιας διατμητικής τάσης συνδέεται στενά με τον λόγο μήκους προς πάχος,  $l/h$

Εάν πρόκειται να σχεδιαστεί μια αναλογία μεταξύ της γεωμετρίας δειγμάτων τύπου I και της περίπτωσης των built – in δοκών, αυτοί οι παράγοντες πρέπει να ληφθούν υπόψη, δεδομένου ότι τα ελαστικά μοντέλα έχουν περιορισμένη δυνατότητα εφαρμογής στα σύνθετα υλικά. Κανένα επί του παρόντος διαθέσιμο μοντέλο, δεν δίνει μια πραγματική αναπαράσταση των συνθηκών στην built - in (ακμή ρωγμής) περιοχή, η οποία υπόκειται σε ένα τασικό πεδίο όπου μόνο η προσέγγιση γραμμικής ελαστικής θραυστομηχανικής (LEFM) μπορεί να μοντελοποιήσει. Οι Sih, Paris και Irwin, έχουν εφαρμόσει LEFM σε ρωγμές σε ορθότροπα υλικά.

Οι Benbow, Roesler και Gilman, λαμβάνοντας υπόψιν την ενέργεια παραμόρφωσης λόγω της ροπής κάμψης, πρότειναν παρόμοιες σχέσεις για την ενδοτικότητα και το  $G_{Ic}$ :

$$C = (8\alpha^3) / (EBh^3), G_{Ic} = (12P_c^2 a^2) / (EB^2 h^3) \quad [3]$$

όπου  $\alpha$  το μήκος ρωγμής,  $E$  το μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό,  $B$  το πλάτος,  $h$  το πάχος και  $P_c$  το κρίσιμο φορτίο. Αυτές οι εξισώσεις μπορούν να τροποποιηθούν, ώστε να περιλαμβάνουν την επίδραση της διατμητικής δύναμης στην ενδοτικότητα και στο  $G_{Ic}$ :

$$C = (8\alpha^3) / (EBh^3) * [(1+0.3 (E/G) (h/\alpha^2))] \quad [4]$$

$$G_{Ic} = (12P_c^2 a^2) / (EB^2 h^3) * [(1+0.1 (E/G) (h/\alpha^2))] \quad [5]$$

Οι Rippling, Mostovoy και Patrick, έδωσαν μια παρόμοια σχέση:

$$G_{Ic} = (12P_c^2 EB^2 h^3) / * [(\alpha+0.6h)^2 + (1/3) h^2] \quad [6]$$

Ωστόσο, είναι φανερό ότι η παρουσία της ακμής ρωγμής σε ένα δείγμα DCB, πρέπει να συμπεριληφθεί στο μοντέλο. Οι Gillis, Gilman, Gross και Srawley, υιοθέτησαν τις προηγούμενες σχέσεις για να λάβουν υπόψη την ακμή ρωγμής, προτείνοντας ένα πολυώνυμο του  $h/\alpha$ . Οι τροποποιημένες σχέσεις τους είναι οι εξής:

$$G_{Ic} = 12.02 * [(P_c^2 a^2) / (EB^2 h^3)] * [1 + 1.335 (h/\alpha) + 0.446 (h^2/\alpha^2)] \quad (\text{Gillis και Gilman})$$

$$G_{Ic} = [(P_c^2 a^2) / (EB^2 h^3)] * [1 + 1.32 (h/\alpha) + 0.542 (h^2/\alpha^2)] \quad (\text{Gross και Srawley})$$

Παρά τις βελτιώσεις αυτές, η εφαρμογή αυτών των σχέσεων στα σύνθετα υλικά δεν είναι εντελώς ικανοποιητική. Παρ' όλα αυτά, για τα ισότροπα υλικά, ο Wiederhorn και άλλοι έχουν επιβεβαιώσει ότι πέρα από ένα περιορισμένο εύρος τιμών του λόγου  $h/\alpha$ , ένα τέτοιο μοντέλο δίνει μια λογική συσχέτιση με μετρηθείσες τιμές.

### 3.6.1.2 Πειραματικά μοντέλα

Η προσέγγιση που παρουσίασε ο Berry, βασισμένη σε εμπειρική παρά σε αναλυτική βαθμονόμηση ενδοτικότητας, φαίνεται να αποφεύγει κάποια προβλήματα της τελευταίας. Ξεκινώντας από το θεωρητικό μοντέλο της απλής δοκού, η απόκλιση της δοκού μπορεί να οριστεί ως:

$$\delta = (P\alpha^3) / (3EI) \quad [7]$$

Οπότε για την δοκό διπλό πρόβολο:

$$\delta = (P\alpha^n) / H \quad [8]$$

Η ενέργεια  $G_{Ic}$  μπορεί λοιπόν να γραφτεί ως εξής:

$$G_{Ic} = (nP_c\delta_c) / (2B\alpha) \quad [9]$$

Να σημειωθεί ότι οι παράμετροι  $n$  και  $H$  συνδέονται, οπότε με την αλλαγή της μιας, αλλάζει αυτόματα και η άλλη. Αυτός ο συσχετισμός δεν υπάρχει στην θεωρία της απλής δοκού, όπου  $n = 3$ . Ένα εναλλακτικό εμπειρικό μοντέλο δύο παραμέτρων, έχει προταθεί από τον Wilkins και άλλους. Αυτοί οι συγγραφείς προτείνουν ότι:

$$C = A_1\alpha^3 \text{ και } P_c = A_2\alpha^{-1} \quad [10]$$

Οπότε:

$$G_{Ic} = (3A_1A_2) / (2B) \quad [11]$$

### 3.6.1.3 Τα μοντέλα του Kanninen

Ο Kanninen έχει προτείνει ένα αναλυτικό μοντέλο, χρησιμοποιώντας την θεωρία δοκών σε ελαστικά θεμέλια, όπως φαίνεται στην εικόνα 8. Αυτή η προσέγγιση δίνει την ακόλουθη σχέση για την ενδοτικότητα:

$$C = (4\alpha^3) / (EBh^3) * \{ [1 + [1.92 (h/\alpha)] + [1.22 (h/\alpha)^2] + [0.39 (h/\alpha)^3] \} \quad [12]$$

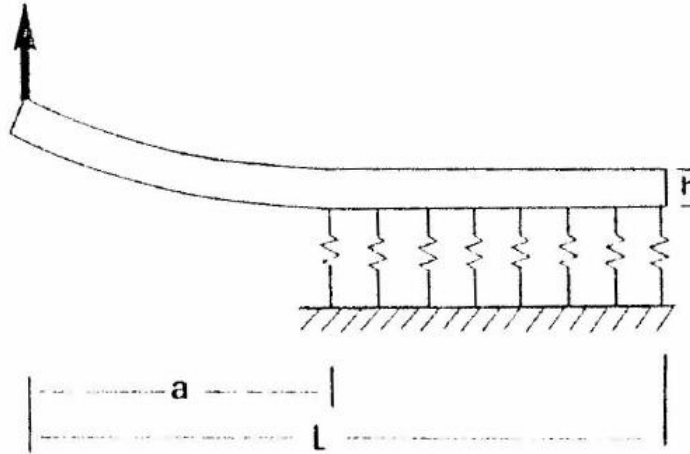
Η μελέτη περιλαμβάνει μια εκτίμηση της επιρροής της σχέσης  $L - \alpha$ , όπως επίσης και τον τύπο της φόρτισης. Ο Kanninen ταυτίστηκε με τ' αποτελέσματα των Gross – Srawley και του Wiederhorn και άλλων, για λεπτά αλλά και παχιά δείγματα ( $\alpha/h$  από 10 σε λιγότερο από 1) για ισότροπα υλικά. Σε μια άλλη μελέτη, παρουσιάστηκε ένα βελτιωμένο μοντέλο και αυτή η προσέγγιση επεκτάθηκε σε ταχεία διάδοση ρωγμής και η διατμητική παραμόρφωση όπως και η επίδραση της κινητικής ενέργειας, λήφθηκαν υπόψιν. Η βελτιωμένη εξίσωση για την ενδοτικότητα, είναι η εξής:

$$C = (4\alpha^3) / (EBh^3) * \{ 1 + [(3/4) * \text{sqrt}(5) * (h/\alpha)] + [(2/3) * (h/\alpha)^2] + [(3/16) * \text{sqrt}(5) * (h/\alpha)^3] \} \quad [13]$$

Τα μοντέλα του Kanninen, δίνουν μια καλή αναπαράσταση της συμπεριφοράς των ισότροπων υλικών. Ωστόσο, ο Ashizawa, πρότεινε μια τροποποίηση για την εφαρμογή τους στα σύνθετα υλικά. Πρότεινε να συμπεριλαμβάνεται ο λόγος του μέτρου ελαστικότητας στην διαμήκη προς την εγκάρσια διεύθυνση. Έτσι, για  $L - \alpha > h$ , η τροποποιημένη ενδοτικότητα ισούται με:



$$C = (8\alpha^3) / (EBh^3) * \{ [1 + [1.92 (h/\alpha) * (E_x/E_y)^{(1/4)}] + [1.22 (h/\alpha)^2 * (E_x/E_y)^{(1/2)}] + [0.39 (h/\alpha)^3 * (E_x/E_y)^{(3/4)}] \} \quad [14]$$



Εικόνα 8: Δοκός σε μοντέλο ελαστικού θεμελίου του δείγματος DCB.

### 3.6.2 Συγκριτικές μελέτες

Στον πίνακα 13, παρουσιάζεται μια συγκριτική μελέτη διαφορετικών μεθόδων για τον υπολογισμό της ενδοτικότητας των UD υαλοεποξικών και ανθρακοεποξικών σύνθετων. Λαμβάνουμε δύο πάχη δειγμάτων DCB και διαφορετικά αρχικά μήκη ρωγμής και για τα δύο υλικά.

Στον πίνακα 14, οι τιμές του  $G_{Ic}$  που υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις διαφορετικές βαθμονομήσεις ενδοτικότητας, με το πειραματικό κρίσιμο φορτίο, συγκρίνονται με τιμές που λήφθηκαν από την εμπειρική μέθοδο του Berry. Δίνονται επίσης αποτελέσματα από μια βαθμονόμηση ενδοτικότητας πεπερασμένων στοιχείων. Αυτοί οι πίνακες δείχνουν ότι για λεπτά δείγματα υπάρχει λογική ταύτιση μεταξύ των διαφορετικών μοντέλων και των πειραματικών τιμών. Ο Guedra και οι Rouchon - Lapailliere, επίσης κατέγραψαν ταύτιση μεταξύ τιμών για ψαθυρά ανθρακοεποξικά σύνθετα, υπολογισμένων χρησιμοποιώντας διαφορετικά μοντέλα. Ωστόσο, για παχιά δείγματα υπάρχουν σημαντικές διαφορές.

	Glass epoxy (E Glass/DGEBA M 10)						Carbon/epoxy (T 300/914)					
	Thin (4.6 mm)			Thick (20 mm)			Thin (5.2 mm)			Thick (20 mm)		
	51.5	71	101	41	56	91	38	55	71	40	55	80
Crack length (mm)=	51.5	71	101	41	56	91	38	55	71	40	55	80
Experiment	11.67	30.17	86.4	0.155	0.324	1.131	1.42	3.90	7.60	0.064	0.138	0.322
Theory												
Finite element [29]	-	-	-	0.131	0.278	0.975	-	-	-	0.063	0.123	0.290
Gilman [2]	9.76	25.85	73.63	0.059	0.152	0.655	0.96	2.91	6.25	0.020	0.051	0.158
Timoshenko [20]	9.81	25.92	73.73	0.069	0.165	0.677	0.99	2.95	6.32	0.029	0.064	0.176
Ripling et al. [5]	10.58	27.40	76.73	0.088	0.212	0.801	1.08	3.16	6.69	0.031	0.072	0.198
Kanninen [26]	10.62	27.48	76.90	0.093	0.211	0.800	1.09	3.17	6.70	0.031	0.071	0.198
Kanninen [27]	10.50	27.27	73.66	0.087	0.201	0.780	1.07	3.14	6.65	0.029	0.068	0.192

**Πίνακας 13:** Σύγκριση τιμών από διαφορετικά μοντέλα ενδοτικότητας, με πειραματικά μοντέλα για υαλοεποξικά ( $E = 46000 \text{ MPa}$ ,  $B = 20 \text{ mm}$ ,  $G = 5000 \text{ MPa}$ ) και ανθρακοεποξικά σύνθετα ( $E = 130000 \text{ MPa}$ ,  $B = 20 \text{ mm}$ ,  $G = 5300 \text{ MPa}$ ) για λεπτά και παχιά δείγματα και για διαφορετικά μήκη ρωγμής.

	Glass/epoxy (E Glass/DGEBA M 10)						Carbon/epoxy (T 300/914)					
	Thin (4.6 mm)			Thick (20 mm)			Thin (5.2 mm)			Thick (20 mm)		
	51.5	71	101	41	56	91	38	55	71	40	55	80
Crack length (mm)=	51.5	71	101	41	56	91	38	55	71	40	55	80
Berry [24]	267	258	228	245	222	216	190	175	175	168	181	175
Finite element [29]	-	-	-	211	195	190	-	-	-	172	169	169
Gilman [2]	228	225	197	115	128	152	147	153	165	65	85	109
Gillis and Gilman [21]	241	235	203	156	160	174	161	162	174	88	107	127
Timoshenko [20]	228	225	198	121	132	154	149	154	166	75	92	113
Ripling et al. [5]	240	234	203	154	158	174	159	162	173	88	106	126
Kanninen [26]	241	234	203	154	159	175	160	162	173	88	106	127
Kanninen [27]	239	233	202	148	154	172	158	161	172	84	103	124

**Πίνακας 14:** Τιμές του  $G_{Ic}$  ( $J/m^2$ ) κατά την έναρξη από starter film για δύο UD σύνθετα υλικά, χρησιμοποιώντας διαφορετικά μοντέλα ενδοτικότητας.

### 3.6.3 Η μέθοδος εμβαδών

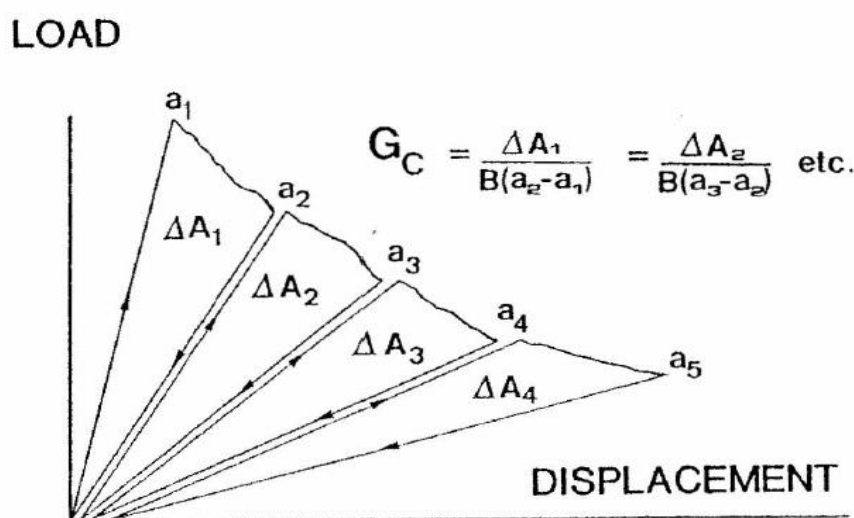
Μία εναλλακτική των μεθόδων ενδοτικότητας που συζητήθηκαν παραπάνω, η οποία αποδείχθηκε πολύ δημοφιλής, είναι η μέτρηση άμεσης ενέργειας, γνωστή και ως μέθοδος εμβαδών. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε από τους Yeung και Broutman και πιο πρόσφατα από τον Whitney και άλλους. Η επέκταση της ρωγμής σχετίζεται άμεσα με το εμβαδόν το οποίο περικλείεται από τις καμπύλες φόρτισης και αποφόρτισης, όπως φαίνεται στην εικόνα 9. Ο ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης τύπου I, προσδιορίζεται ως εξής:

$$G_{Ic} = (\Delta A) / (Bda) \quad [15]$$

όπου  $\Delta A$  είναι το εμβαδόν το οποίο περικλείεται από το μονοπάτι φόρτισης – αποφόρτισης.

Αυτή η μέθοδος είναι έγκυρη ακόμα και αν η απόκριση φορτίου - μετατόπισης που θα παρατηρηθεί, είναι μη γραμμική ελαστική, εν αντιθέσει με τις μεθόδους ενδοτικότητας όπου μόνο η γραμμική ελαστική απόκριση μπορεί να αντιμετωπιστεί. Ωστόσο, η μέθοδος εμβαδών είναι εφαρμόσιμη μόνο για σταθερή διάδοση. Εάν υπάρξουν μεγάλα ασταθή άλματα ρωγμής, όπως στα carbon/PEEK για παράδειγμα, οι παραπάνω τύποι δεν ισχύουν πλέον, διότι πρέπει να συμπεριληφθεί και όρος κινητικής ενέργειας.

Ο Whitney και άλλοι, σύγκριναν τις μεθόδους εμβαδών και ενδοτικότητας για ένα ανθρακοεποξικό υλικό και βρήκαν συσχετισμό μεταξύ των τιμών  $G_{Ic}$  χρησιμοποιώντας την μέθοδο εμβαδών και τις μεθόδους του Berry. Για τα λεπτά ανθρακοεποξικά δείγματα που εξετάζονται στον πίνακα 14, λήφθηκε μια μέση τιμή  $177 \text{ J/m}^2$  με την μέθοδο εμβαδών, με τυπική απόκλιση  $17 \text{ J/m}^2$  για 20 τιμές.



Εικόνα 9: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης το οποίο δείχνει την αρχή της μεθόδου εμβαδών, τον καθορισμό μιας τιμής διάδοσης του  $G_{Ic}$ .

### 3.6.4 Η προσέγγιση J-Integral

Εάν κατά την διάρκεια του πειράματος DCB καταγραφεί μη γραμμική απόκριση φορτίου - μετατόπισης, η προσέγγιση της ελαστικής θραυστομηχανικής δεν είναι πλέον εφαρμόσιμη. Τότε είναι αναγκαίο να γίνει διόρθωση για μεγάλες εκτροπές, εάν η μη γραμμικότητα είναι γεωμετρική, ή να χρησιμοποιήσουμε μια τεχνική η οποία μπορεί να εξηγήσει την πλαστικότητα στην ακμή της ρωγμής εάν η κατανεμημένη βλάβη είναι υπεύθυνη για την απόκλιση από την γραμμικότητα. Δεν υπάρχουν πολλές δημοσιεύσεις σχετικά με την χρήση των μεθόδων J-Integral για τον τύπο I, λόγω του ότι οι καταγραφές φορτίου – μετατόπισης σε παχιά δείγματα είναι συνήθως γραμμικές.

Ο Keary και άλλοι, σε μια λεπτομερή μελέτη για πειράματα τύπου I σε λεπτά δείγματα DCB (2 mm πάχος), έδειξαν ότι η απλή θεωρία δοκών και οι πειραματικές βαθμονομήσεις ενδοτικότητας, έδιναν υψηλότερες τιμές  $G_c$  στην διάδοση από την  $J_c$ . Αυτή η διαφορά αποδόθηκε στην μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού και η μέθοδος J – Integral προτάθηκε ως η πιο κατάλληλη μέθοδος.

Ο Schapery και άλλοι, παρουσίασαν μια μέθοδο για καθορισμό της J-Integral στα δείγματα DCB. Αυτή η μέθοδος απαιτεί βαθμονόμηση δοκού προβόλου (single cantilever beam). Για τρία διαφορετικά layup, έγινε σύγκριση των  $J_c$  και  $G_c$  και η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των δύο, παρατηρήθηκε για το layup το οποίο δεν περιείχε  $0^\circ$ .

### 3.6.5 Σταθερότητα της διάδοσης στο δείγμα DCB

Ένα πλεονέκτημα του πειράματος DCB, είναι το ότι με φόρτιση υπό έλεγχο μετατόπισης, η διάδοση είναι συνήθως σταθερή, δίνοντας την δυνατότητα σε πολλές τιμές διάδοσης να καθοριστούν από μία δοκιμή. Ο καθορισμός του  $dG/da$ , δίνει μια ένδειξη του εάν το δείγμα θα ενθαρρύνει την σταθερή διάδοση. Χρησιμοποιώντας τη σχέση της θεωρίας δοκών για το  $G_{Ic}$ , ο λόγος  $dG/da$  είναι πάντα αρνητικός για το DCB υπό έλεγχο μετατόπισης, οπότε είναι πιθανό η διάδοση να είναι σταθερή. Ωστόσο, αυτή είναι απαραίτητη αλλά όχι επαρκής συνθήκη. Ο Gurney και οι συνεργάτες του μελέτησαν λεπτομερώς το πρόβλημα της σταθερότητας ρωγμής και πιο πρόσφατα οι May και Atkins συνόψισαν τις συνθήκες σταθερότητας διάδοσης για ένα εύρος πειραματικών δειγμάτων. Η σταθερότητα διάδοσης ρωγμής εξαρτάται από τις συνθήκες φόρτισης, π.χ. υπό έλεγχο φόρτισης ή μετατόπισης, στον τύπο της μηχανής και στην απόκριση του υλικού.

### 3.7 Αποτελέσματα του πειράματος

Αυτή η παράγραφος διαιρείται σε τρία μέρη: Πρώτον, θα ασχοληθούμε με σύνθετα θερμοσκληρυνόμενης μήτρας. Στη συνέχεια, συζητάμε παράγοντες (εκτός από τις μεθόδους ανάλυσης δεδομένων) που μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα που λήφθηκαν και ειδικότερα, το φαινόμενο της γεφύρωσης της ενίσχυσης και την επιρροή της στο πείραμα τύπου I. Τέλος, παρουσιάζονται αποτελέσματα για ένα εύρος θερμοπλαστικών σύνθετων. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται εδώ αφορούν δοκιμές σε δείγματα με ενίσχυση μονής κατεύθυνσης. Μερικά αποτελέσματα είναι διαθέσιμα για πολυδιεύθυνα υλικά. Για λόγους απλούστευσης, θεωρούμε μόνο σύνθετα με ίνες άνθρακα. Οι αεροδιαστημικές εφαρμογές αυτών των υλικών επιβάλλουν τις αυστηρές συνθήκες κατασκευής, έτσι ώστε οι διαφορές των υλικών μεταξύ των εργαστηρίων να ελαχιστοποιούνται. Επιπλέον, οι πειραματικές συνθήκες είναι γενικά καθορισμένες. Ένας μεγάλος αριθμός πειραμάτων τύπου I έχουν επίσης πραγματοποιηθεί σε σύνθετα ενισχυμένα με γυαλί και αραμίδιο, αλλά συχνά με λιγότερο γνωστούς τύπους μητρών, κάνοντας τις συγκρίσεις δύσκολες.

#### 3.7.1 Σύνθετα υλικά θερμοσκληρυνόμενης μήτρας

Ο πίνακας 15 παρουσιάζει τιμές  $G_{Ic}$  για ένα εύρος θερμοσκληρυνόμενων CFRP. Η περιεκτικότητα σε ίνες είναι ονομαστικά 60% και η ενίσχυση είναι μονοδιεύθυντη. Για τα highly cross-linked εποξικά, οι υψηλότερες τιμές  $G_{Ic}$  είναι γύρω στα 450 J/m<sup>2</sup>. Τιμές υψηλότερες από αυτές, λαμβάνονται για rubber-toughened ή λιγότερο highly cross-linked μήτρες, αλλά συνήθως με κόστος την απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες.

Για συγκεκριμένα υλικά, δείχνονται επίσης και τιμές οι οποίες λαμβάνονται από διαφορετικά εργαστήρια. Σε αυτές τις περιπτώσεις, έχει παρατηρηθεί μια λογική ταύτιση, κυρίως όταν κάποιος λαμβάνει υπόψιν τις πιθανές πηγές της μη ταύτισης μεταξύ αποτελεσμάτων για δείγματα ονομαστικά πανομοιότυπου υλικού. Αυτά συζητούνται παρακάτω και βρίσκουν εφαρμογή σε σύνθετα θερμοσκληρυνόμενης αλλά και θερμοπλαστικής μήτρας.

Fibre/Matrix	$G_{Ic}$ (J/m <sup>2</sup> )	Ref.	Comments
T300/V378A	70	[33]	BMI
Carbon/polyimide	180	[45]	Rubber toughened BMI
IM6/5245C	125/215	[46]	Initiation/propagation, dry
<b>Carbon/epoxies</b>			
AS1/3501-6	126/218	[47]	Initiation/propagation
AS4/3501-6	203	[48]	
	190-200	[49]	
	123-246	[50]	Max.-Min. values
	200	[37]	Width tapered DCB
	214	[51]	
AS1/3502	120-150	[33]	Different data reductions
	155	[52]	
	140	[53]	
AS4/3502	160	[33]	
	225	[52]	Extensive bridging noted
AS4/907	400	[54]	
T300/5208	88	[25]	
	60	[55]	Initiation
	103	[56]	
	85-102	[30]	Comparison exercise
T300/914	200	[57]	
	110	[55]	Initiation, dry
	185	[58]	Initiation
	141-156	[31]	Propagation, 4 data analyses
T300/934	90	[44]	
	103	[59]	
T300/BP907	368	[60]	Mean, different interfaces
AS4/1808	231	[54]	
AS4/1808 + Interleaf	366	[54]	Thermoplastic interleaf
IM7/8551-7	450	[61]	
T300/F185	1690	[62]	DGEBA + CTBN

**Πίνακας 15:** Δημοσιευμένες τιμές του  $G_{Ic}$  από δοκιμές DCB σε μονοδιεύθοντα CFRP. Ονομαστική περιεκτικότητα ινών 60%. Τιμές διάδοσης, εκτός αν οριστεί διαφορετικά.

### 3.7.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα του πειράματος DCB

#### 3.7.2.1 Πειραματικές συνθήκες

Για τα περισσότερα δημοσιευμένα αποτελέσματα, ο ρυθμός φόρτισης είναι μεταξύ 1 και 5 mm/min και τα πειράματα εκτελούνται σε θερμοκρασία δωματίου. Ωστόσο, οι συνθήκες υγρασίας δεν ελέγχονται πάντα ούτε και αναφέρονται.

#### 3.7.2.2 Η μήτρα

Η αντίσταση σε αποκόλληση τύπου I, εξαρτάται από τη μήτρα του υλικού και είναι ευαίσθητη σε συνθήκες cure και postcure. Οι Rouchon και Laparriere δοκίμασαν δείγματα T300/914 υπό επτά διαφορετικές συνθήκες. Το πιο σημαντικό που σημειώθηκε, ήταν μια αύξηση 20% του  $G_{Ic}$ , από 133 σε 160 J/m<sup>2</sup> μετά το postcure.

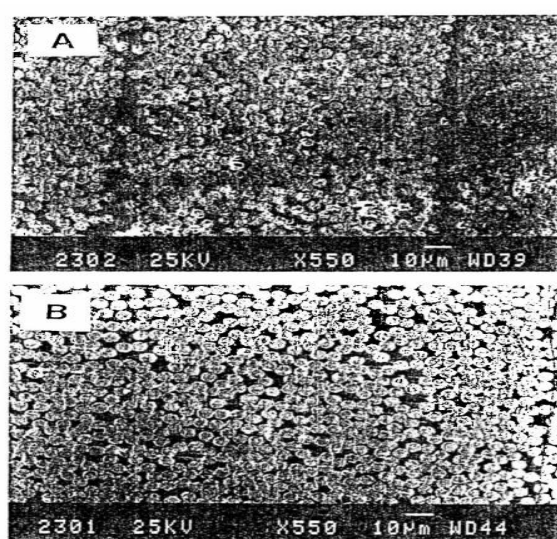
Ανησυχία έχει επίσης εκφραστεί για την επιρροή του ρυθμού ψύξης και την απόπτηση στη μήτρα θερμοπλαστικών σύνθετων. Για carbon/PEEK σύνθετα, έχει ση-

μειωθεί μία πτώση 20% της αντίστασης αποκόλλησης τύπου Ι, όσο ο βαθμός κρυσταλλικότητας αυξάνεται με αργή ψύξη μετά τη μορφοποίηση. Μια παρόμοια πτώση σε τιμές  $G_{Ic}$  έχει σημειωθεί σε carbon/PPS σύνθετα που έχουν ανοπτηθεί μετά τη μορφοποίηση, τα οποία και πάλι ανταποκρίθηκαν σε αύξηση του βαθμού κρυσταλλικότητας.

### 3.7.2.3 Το σύνθετο

Η διαδρομή της αποκόλλησης, συνδέεται άμεσα με την περιεκτικότητα του υλικού σε ίνες και ο Russell, με διακύμανση αυτής στα carbon/εποξικά πολυστρώτα, έδειξε ότι η τιμή του  $G_{Ic}$  η οποία χαρακτηρίζει την διάδοση, είναι πολύ ευαίσθητη σε αυτή την παράμετρο. Αυτή η επίδραση σχετίζεται με την γεφύρωση της ενίσχυσης.

Ωστόσο, ακόμα και τα σύνθετα με ονομαστικά πανομοιότυπη περιεκτικότητα σε ίνες, μπορούν να δείξουν δραματικά διαφορετική συμπεριφορά στη διάδοση, εάν αλλάξει η κατανομή των ινών. Η κατανομή σε δύο παρτίδες του ανθρακοεποξικού IM6/6376 και οι δύο με περιεκτικότητα 61%, φαίνονται στην εικόνα 10. Η ευδιάκριτη matrix-rich διαστρωματική περιοχή ορατή στην παρτίδα Α, δεν φαίνεται στην παρτίδα Β και οι αντίστοιχες καμπύλες R, παρουσιάζονται στην εικόνα 11. Ενώ οι αρχικές τιμές είναι παρόμοιες στις δύο περιπτώσεις, κατά την διάρκεια της διάδοσης στην παρτίδα Β, η αποκόλληση εισχωρεί στα γειτονικά στρώματα οδηγώντας στον σχηματισμό πολλών γεφυρώσεων ενίσχυσης. Αυτές οι γεφυρώσεις “συνδέουν” την ρωγή και αυξάνουν την αντίσταση σε αποκόλληση. Αυτός ο μηχανισμός είναι ένα σημαντικό εμπόδιο στην τυποποίηση του πειράματος τύπου Ι σε μονοδιεύθυντο υλικό και γι’ αυτό απαιτεί περισσότερη μελέτη.



**Εικόνα 10:** Περιοχές του ανθρακοεποξικού IM6/6376, οι οποίες δείχνουν την κατανομή των ινών σε δύο παρτίδες ενός ονομαστικά πανομοιότυπου υλικού.

### 3.7.2.4 Γεφύρωση ενίσχυσης

Οι Sidey και Bradshaw ανέφεραν τον σχηματισμό γεφύρωσης ενίσχυσης σε δείγματα τύπου Ι πριν πολλά χρόνια. Πιο πρόσφατα, μελέτες των Russell, Johnson και Mangalgiri, διευκρίνισαν τους μηχανισμούς που εμπλέκονται. Υπάρχουν δύο λόγοι δημιουργίας γεφύρωσης.

Πρώτον, η “εμφώλευση” ή η ανάμειξη των στρωμάτων, έτσι ώστε κανένα ενδιάμεσο στρώμα δεν είναι διαθέσιμο για διάδοση της ρωγμής, θα οδηγήσει σε δημιουργία γεφυρώσεων. Δεύτερον, κυρίως στα πιο δύσθραυστα σύνθετα, η φόρτιση των ατελειών σε στρώματα πάνω ή κάτω από το επίπεδο της ρωγμής, μπορούν να οδηγήσουν στην διάδοση ρωγμών σε παράλληλα επίπεδα, ακόμα κι αν υπάρχει κάποιο ευδιάκριτο ενδιάμεσο στρώμα. Ίνες ή δέσμες ινών μεταξύ αυτών των επιπέδων, θα γίνουν γεφυρώσεις.

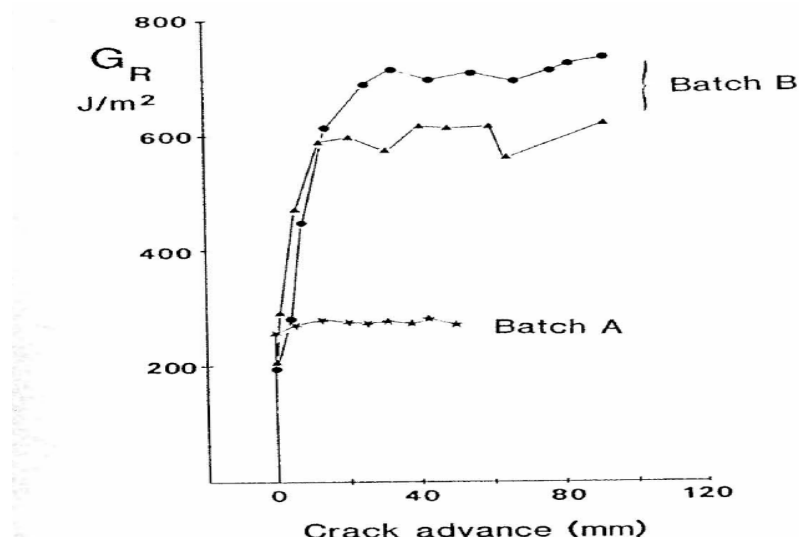
Εάν οι γεφυρώσεις ενίσχυσης σπάσουν σχεδόν με τον ίδιο ρυθμό με τον οποίο δημιουργήθηκαν, λαμβάνεται μια σταθερή τιμή διάδοσης του  $G_{Ic}$ . Αυτή είναι γενικά η περίπτωση στην οποία χρησιμοποιούνται λεπτά δείγματα, αλλά σε πιο παχιά δείγματα, οι μικρές μετατοπίσεις που εμπλέκονται, μπορούν να οδηγήσουν σε συνεχώς αυξανόμενη αντίσταση στην διάδοση.

Ακόμα κι αν ληφθεί μια σταθερή τιμή διάδοσης του  $G_I$ , πρέπει να εξεταστεί το στάτους της ως παράμετρος του υλικού. Προφανώς μια τιμή του  $G_{Ic}$  η οποία εξαρτάται από την γεωμετρία του δείγματος, είναι χαμηλής πρακτικής σημασίας. Ωστόσο, το να την καταστήσουμε ανεξάρτητη πειραματικά, δεν είναι απλό. Ο βαθμός cure, οι εσωτερικές τάσεις και η ανάπτυξη κρυσταλλικότητας, όλα σχετίζονται με το θερμικό ιστορικό και συνεπώς με την γεωμετρία του δείγματος. Παρ’ όλα αυτά, οι Russell και Street έχουν παρουσιάσει αποτελέσματα για ανθρακοεποξικά δείγματα τριών παχών, το οποίο υποδηλώνει ότι η συνεισφορά της γεφύρωσης της ενίσχυσης στην ενέργεια θραύσης, εξαρτάται από το πάχος του δείγματος. Για δείγματα 8, 16 και 24 στρωμάτων, οι τιμές έναρξης αυξήθηκαν ελάχιστα, από 123 σε 126 J/m<sup>2</sup>, αλλά οι τιμές διάδοσης  $G_{Ic}$  αυξήθηκαν από 173 σε 218 J/m<sup>2</sup>.

Ο Prael και άλλοι, δοκίμασαν υαλοεποξικά δείγματα δύο παχών, 4.6 και 20 mm και οι καμπύλες R γι’ αυτό το υλικό φαίνονται στην εικόνα 12. Η αυξανόμενη συνεισφορά της γεφύρωσης της ενίσχυσης στα παχιά δείγματα, θεωρείται ότι είναι ο λόγος αύξησης των τιμών διάδοσης. Οι Phillips και Wells, εντόπισαν και αυτοί μια επίδραση του πάχους στην γεφύρωση της ενίσχυσης. Αυξάνοντας το πάχος του intralaminar DCB δείγματος από 15 σε 55 mm, η συνεισφορά στην γεφύρωση φαινόταν να μειώνεται.

Η προσοχή έχει στραφεί στις τιμές έναρξης. Οι Johnson και Mangalgiri πρόσεξαν ότι η τιμή έναρξης είναι ανεξάρτητη των μικρών γωνιών μεταξύ των στρωμάτων και προσεγγίζει την τιμή που λήφθηκε σε λεπτά συγκολλητικά bond-line πειράματα. Μπορούμε λοιπόν να πούμε ότι οι τιμές του  $G_{Ic}$  οι οποίες χαρακτηρίζουν έναρξη από ένα starter film, είναι πιο χρήσιμη ένδειξη της συμπεριφοράς αποκόλλησης στα δύσθραυστα σύνθετα από τις τιμές διάδοσης.





*Εικόνα 11: Καμπύλες R για τις δύο παρτίδες του IM6/6376 που φαίνονται στην εικόνα 10.*

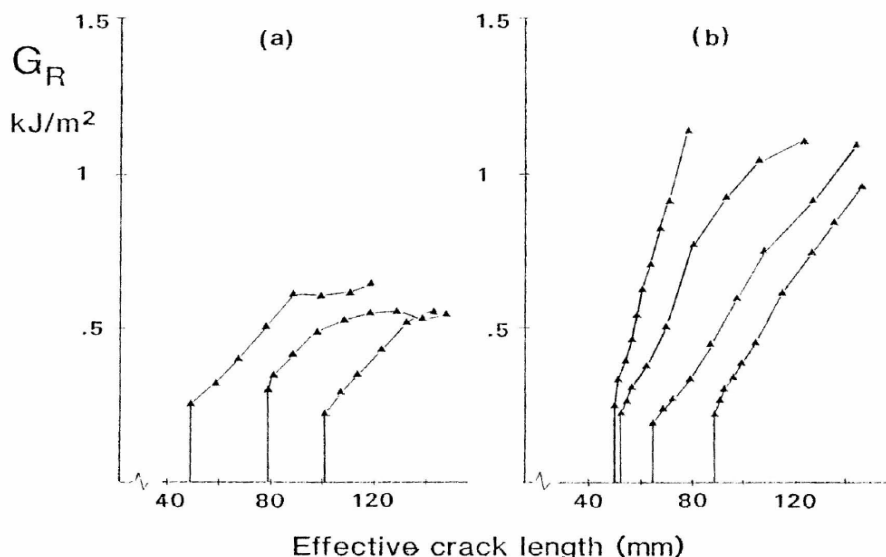
### 3.7.3 Θερμοπλαστικά σύνθετα

Στον πίνακα 16, παρουσιάζονται αποτελέσματα για διάφορα θερμοπλαστικά σύνθετα. Σε ορισμένα από αυτά, κυρίως αυτά που περιλαμβάνουν PEEK και J-polymer, παρατηρήθηκαν περιοχές σταθερής αλλά και ασταθούς διάδοσης από πολλούς συγγραφείς κατά την διάρκεια πειραμάτων σε θερμοκρασία δωματίου. Ένα παράδειγμα μιας τυπικής καμπύλης φορτίου - μετατόπισης για carbon/PEEK υλικά, φαίνεται στην εικόνα 13 μαζί με μια καμπύλη R, η οποία υποδηλώνει ότι χρειάζονται τρεις τιμές  $G_{Ic}$  για να χαρακτηρίσουν πλήρως την διάδοση σε αυτό το υλικό. Στον πίνακα 16, παρουσιάζονται τιμές και για τους δύο τύπους διάδοσης, όπου υπάρχουν.

Οι πολυάριθμες μελέτες για τα carbon/PEEK, δίνουν την ευκαιρία για εκτίμηση της εφαρμογής του πειράματος DCB σε ένα δύσθραυτο σύνθετο. Με μια πρώτη ματιά, τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από διάφορους συγγραφείς, φαίνονται πολύ διαφορετικά. Υπήρχαν διαφορές στην περιεκτικότητα ινών και στην κατανομή, όπως επίσης και στις μεθόδους data reduction αλλά και στις συνθήκες πειράματος. Ωστόσο, το εύρος των τιμών που χαρακτηρίζουν την σταθερή διάδοση, είναι σημαντικό, από 1540 σε 3000 J/m<sup>2</sup>.

Μια λεπτομερέστερη ματιά στην επιρροή του πάχους του δείγματος, μας δείχνει το εξής: οι τιμές διάδοσης φαίνονται να είναι άμεσα εξαρτώμενες από αυτό, ενώ οι τιμές έναρξης ποικίλλουν ελάχιστα όσο το πάχος αυξάνεται. Παρ' όλα αυτά, δεν παρατηρήθηκε τίποτα τέτοιο για περιεκτικότητα ινών από 58% μέχρι 62%. Είναι άγνωστο γιατί υπάρχει τόσο μεγάλη εξάρτηση από το πάχος. Πιθανόν επειδή πιο παχιές γεφυρώσεις ενίσχυσης δαπανούν περισσότερη ενέργεια σε πιο παχιά δείγματα, η επειδή η εγκάρσια διάτμηση επηρεάζει την ανάπτυξη της ζώνης βλάβης στην ακμή της ρωγμής. Ω-

στόσο, εάν αυτή η εξάρτηση για CFRP και GFRP εποξικά επιβεβαιωθεί, τότε προφανώς μια μελλοντική τυποποίηση του πειράματος δεν πρέπει να βασίζεται σε τιμές διάδοσης.



**Εικόνα 12:** Καμπύλες R που λήφθηκαν για τα πάχη των δύο υαλο – εποξικών δειγμάτων του πίνακα 13, με την μέθοδο του Berry. α) πάχος 4.6 mm και β) πάχος 20 mm.

Matrix/Fibre	Method	$G_{Ic}$	Ref.
Polysulfone/AS1	Areas	3340	[33]
Polysulfone/T300	Areas+ Compl.	1130	[70]
PEI/T300	Areas+ Compl.	1020	[70]
Polyamide (J)/AS4	Areas	2720	[71]
Polyimide (K-III)/AS4	-	1800	[72]
Polyimide (K-III)/IM6	-	1300-1700	[72]
PPS/C, Film stacked	Areas	1350	[73]
PPS/AS4	Areas	820	[74]
	Areas+ Compl.	920	[65]
PEEK/XAS (APC-1)	Areas: stable/unst.	3220/1870	[51]
	Areas: stable/unst.	1750/1400	[75]
PEEK/AS4 (APC-2)	Areas: stable/unst.	2890/2410	[76]
	Compliance: unst./arrest	3070/1760	[76]
	R-curve: init.-prop.	1330-1540	[77]
	Compliance: Wilkins-init.	1500-1700	[10]
	Areas: stable/unst.	2420/1610	[78]
	R-curve: init.-prop.	1700-3000	[79]
	R-curve: init.-prop.-arrest	1460-2400-970	[80]
	Compliance: stable-unst.-arrest	1930-1960-725	[81]
	Compliance: propagation	2300-2500	[45]
PEEK/IM6	Areas: stable/unst.	3300/2500	[82]
HTX/AS4	Areas	2200	[83]

**Πίνακας 16:** Δημοσιευμένες τιμές  $G_{Ic}$  από δοκιμές DCB σε μονοδιεύθοντα CFRP θερμοπλαστικής μήτρας.

### 3.8 Η επιρροή των πειραματικών παραμέτρων

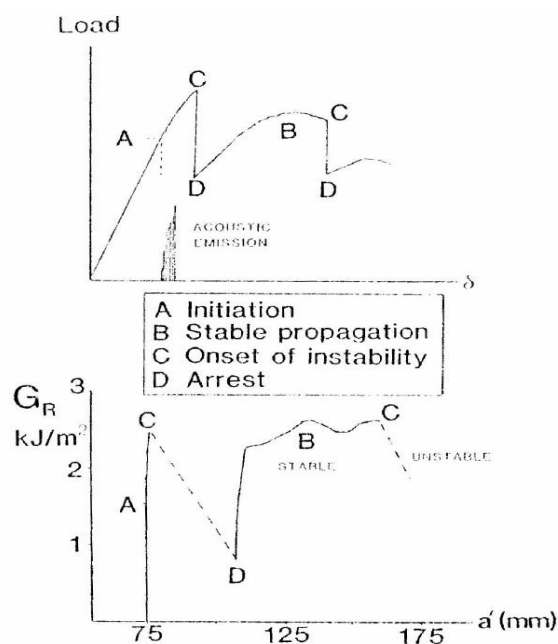
Σε αυτή την παράγραφο, θα εξετάσουμε την επιρροή των παραμέτρων της αντίστασης σε αποκόλληση τύπου I. Οι Hunston και Bascom έχουν μελετήσει τις τρεις παραμέτρους που συζητούνται εδώ: το layup, τον ρυθμό φόρτισης και την θερμοκρασία και οι παρατηρήσεις τους συμπληρώνονται από κάποια πιο πρόσφατα αποτελέσματα.

#### 3.8.1 Layup του δείγματος

Μία κριτική της δοκιμής DCB, είναι το ότι η πλειοψηφία των αποτελεσμάτων χαρακτηρίζουν μονοδιεύθунτα υλικά. Μπορούν να προκύψουν τρία προβλήματα αν δοκιμαστούν διαφορετικά layup. Πρώτον, οι ρωγμές μπορεί να αποκλίνουν από το αρχικό επίπεδο, ακυρώνοντας την προσέγγιση της θραυστομηχανικής. Δεύτερον, η έλλειψη συμμετρίας μπορεί να προκαλέσει στρέβλωση αλλά και φόρτιση μικτού τύπου και τέλος, χαμηλή ακαμψία του δείγματος, μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες μετατοπίσεις και μη γραμμική συμπεριφορά. Παρ' όλα αυτά, έχουν πραγματοποιηθεί κάποιες μελέτες σε διαφορετικά layup.

Αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν από τους Nicholls και Gallagher σε πλάκες με γωνιακά στρώματα, έδειξαν μια ποικιλία διαφορετικών μορφολογιών ρωγμής. Οι τιμές τους που λήφθηκαν από μονοδιεύθунτα ανθρακοεποξικά υλικά, ήταν σημαντικά χαμηλότερες από όλες τους τις τιμές για άλλα layup. Ο Chai, ο οποίος μελετούσε διαφορετικά layup σε ένα πιο δύσθραυστο ανθρακοεποξικό υλικό, βρήκε παρόμοια αποτελέσματα. Τελικά, ο Marom και άλλοι, οι οποίοι μετέβαλλαν την γωνία μεταξύ διεύθυνσης αποκόλλησης και άξονα ιών σε υφασματοεποξικά σύνθετα, επίσης βρήκαν τις χαμηλότερες τιμές  $G_{Ic}$  όταν αυτές οι διευθύνσεις συμπίπταν.

Γι' αυτό τα πειράματα DCB δεν περιορίστηκαν σε μονοδιεύθунτα σύνθετα, αλλά αυτά τα υλικά επιλέγονται γενικότερα λόγω ευκολίας προετοιμασίας και απλότητας ερμηνείας.



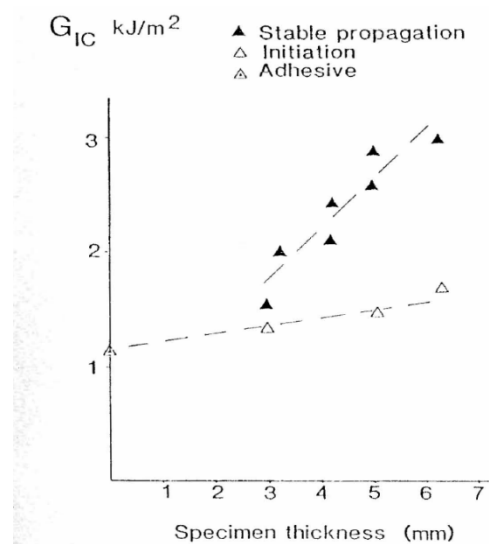
**Εικόνα 13:** Ερμηνεία των αποτελεσμάτων DCB για carbon/PEEK υλικά. Πάνω: καμπύλη φορτίου – μετατόπισης. Κάτω: καμπύλη  $R$  η οποία έχει ληφθεί με την μέθοδο του Berry.

### 3.8.2 Ρυθμός φόρτισης

Η επιρροή του ρυθμού φόρτισης για την αντίσταση αποκόλλησης τύπου Ι, έχει μελετηθεί από πολλούς συγγραφείς. Εάν πρόκειται να συγκριθούν τιμές διάδοσης ή διαφορετικές γεωμετρίες δειγμάτων, είναι απαραίτητο να οριστεί πρώτα μία πραγματική παράμετρος ρυθμού. Η ταχύτητα των κεφαλών είναι συνήθως σταθερή κατά την διάρκεια του πειράματος, αλλά ο ρυθμός φόρτισης στην ακμή της ρωγμής μειώνεται όσο η ρωγή διαδίδεται. Γι' αυτόν τον λόγο, οι Smiley και Pipes έχουν παρουσιάσει σχέσεις της θεωρίας δοκών για τον ρυθμό μετατόπισης ακριβώς πίσω από την ακμή. Μία εναλλακτική προσέγγιση, η οποία χρησιμοποιήθηκε από τον Daniel και από άλλους, είναι να παρουσιάσει τα αποτελέσματα από πλευράς της μετρούμενης ταχύτητας ρωγμής.

Τα δημοσιευμένα αποτελέσματα για την επίδραση του ρυθμού φόρτισης στις τιμές  $G_{Ic}$  ποικίλλουν. Για ένα ψαθυρό ανθρακοεποξικό, το AS4/3501-6, οι Aliyu και Daniel παρατήρησαν μια αύξηση στο  $G_{Ic}$  με ρυθμό φόρτισης μέχρι 1 m/s. Παραπάνω από αυτή την τιμή, σημειώθηκε μείωση. Για ένα πιο δύσθραυστο υλικό, το T300/F185, παρατηρήθηκε μείωση στο  $G_{Ic}$  με ταχύτητα ρωγμής σε όλους τους ρυθμούς φόρτισης. Οι συγγραφείς δηλώνουν ότι μια μήτρα μπορεί να δείξει θετικό ή αρνητικό ρυθμό ευαισθησίας, σύμφωνα με τον εφαρμοζόμενο ρυθμό φόρτισης. Ο Gillespie και άλλοι, δεν παρατήρησαν εξάρτηση του ρυθμού στο ίδιο ψαθυρό carbon/εποξικό, αλλά σε carbon/PEEK υλικά, παρατηρήθηκε μια επίδραση του ρυθμού λόγω υποκρίσιμης α-

νάπτυξης της ρωγμής. Ωστόσο, στην διάδοση, ο Berglund, ο Davies και άλλοι, βρήκαν μικρή επίδραση του ρυθμού στις τιμές του  $G_{Ic}$  αλλά αύξηση της ποσότητας ασταθούς διάδοσης σε υψηλότερους ρυθμούς.



**Εικόνα 14:** Δημοσιευμένα αποτελέσματα από διαφορετικές πηγές, συναρτήσεως του πάχους των δειγμάτων σε carbon/PEEK υλικά.

### 3.8.3 Θερμοκρασία πειράματος

Η εισαγωγή των σύνθετων υλικών θερμοπλαστικής μήτρας, προκάλεσε ενδιαφέρον για την επιρροή της θερμοκρασίας στην συμπεριφορά της αποκόλλησης, αλλά κάποια δημοσιευμένα αποτελέσματα για ανθρακοεποξικά σύνθετα είναι επίσης διαθέσιμα. Για το AS1/3501-6, το οποίο δοκιμάστηκε από τους Russell και Street, οι τιμές έναρξης του  $G_{Ic}$  μειώθηκαν ελαφρώς και οι τιμές διάδοσης αυξήθηκαν σχεδόν 50%, όσο η θερμοκρασία αυξανόταν από τους -50 στους 100 °C. Ωστόσο, σε αυτά τα πειράματα παρατηρήθηκε γεφύρωση της ενίσχυσης και η συνεισφορά αυτού του μηχανισμού ίσως εξαρτάται από την θερμοκρασία. Οι Davies και DeCharentenay, βρήκαν μια παρόμοια αύξηση στις τιμές διάδοσης του T300/914, παρ' όλα αυτά δεν υπήρξε γεφύρωση. Η αύξηση οφειλόταν σε αυξημένη πλαστικότητα της μήτρας. Για το T300/934, οι Garg και Ishaί παρατήρησαν μια αύξηση 20% του  $G_{Ic}$  για αύξηση της θερμοκρασίας στους 100 °C και ελαφρώς μεγαλύτερες αυξήσεις παρατηρήθηκαν από τον Hashemi και άλλους στο IM6/6376.

Από όλες αυτές τις μελέτες στα ανθρακοεποξικά, παρατηρείται μια ξεκάθαρη τάση αύξησης των τιμών  $G_{Ic}$  με αυξανόμενη θερμοκρασία, ενώ μια παρόμοια τάση υπάρχει και στα carbon/PEEK. Για τα τελευταία, οι αυξήσεις που παρατηρήθηκαν είναι υψηλές και οι τιμές  $G_{Ic}$  για σταθερή διάδοση διπλασιάζονται όταν η θερμοκρασία

αυξάνεται από 20 °C σε 120 °C. Επίσης, η διάδοση γίνεται πιο σταθερή με αύξηση της θερμοκρασίας.

### 3.9 Μηχανισμοί αποκόλλησης υπό φόρτιση τύπου I

#### 3.9.1 Γενικά

Ο καλύτερος τρόπος για να μελετήσουμε τους μηχανισμούς αποκόλλησης στον τύπο I, είναι με εξέταση των επιφανειών θραύσης. Το μεγάλο του μειονέκτημα, είναι το ότι είναι post - failure προσέγγιση, ενώ υπάρχουν αρκετές τεχνικές οι οποίες επιτρέπουν στην ανάπτυξη βλάβης να ακολουθείται κατά την διάρκεια της αποκόλλησης. Π.χ.:

- in situ παρατηρήσεις στο μικροσκόπιο scanning electron
- ακουστική εκπομπή
- τεχνικές ακτίνων X
- τομογραφία
- ενοργάνιση της ακμής ρωγμής

Η παρατήρηση των δειγμάτων μινιατούρων τύπου I (και τύπου II) κατά την διάρκεια δοκιμών που πραγματοποιούνται στο μικροσκόπιο scanning electron, είναι μια τεχνική που έχει αναπτυχθεί εκτεταμένα από τον Bradley και τους συνεργάτες του. Είναι μια πολύ καλή μέθοδος, η οποία επιτρέπει την παρατήρηση της ανάπτυξης βλάβης και στην μη ενισχυμένη μήτρα αλλά και στο σύνθετο.

Έχουν εκδοθεί πολυάριθμες μελέτες της ακουστικής εκπομπής από σύνθετα κατά την διάρκεια της φόρτισης. Ο DeCharentenay και άλλοι, χρησιμοποίησαν την ακουστική εκπομπή για να υποδείξουν την έναρξη βλάβης στα δείγματα DCB και αρκετοί συγγραφείς υιοθέτησαν αυτή την προσέγγιση. Ο Benzeggagh ερεύνησε τους μηχανισμούς θραύσης τύπου I σε αρκετά σύνθετα, με ανάλυση σημάτων ακουστικής εκπομπής.

Και οι ακτίνες X και η τομογραφία, επιτρέπουν την οπτικοποίηση της βλάβης ακμής ρωγμής. Οι ακτίνες X συνήθως εμπλέκουν την διείδυση κάποιας χρωστικής για ενίσχυση της ανάλυσης, οπότε οι μικρορωγμές είναι πιθανόν να μην φαίνονται καθαρά. Η τομογραφία αντίθετα, δίνει την δυνατότητα για τρισδιάστατη εικόνα της βλάβης να δημιουργηθεί με ευαίσθητη ανίχνευση των μεταβολών ρωγμής. Ο Laksimi και άλλοι, παρουσίασαν μια μελέτη για την βλάβη τύπου I σε υαλοεποξικά σύνθετα, όπου συσχέτιζε αποτελέσματα από ακουστική εκπομπή, ραδιογραφία X και τομογραφία, ενώ ο Vancon και άλλοι χρησιμοποίησαν τις δύο τελευταίες τεχνικές για να ερευνήσουν την συμπεριφορά πολυδιεύθυντων ανθρακοεποξικών υλικών μεγάλου πάχους.

### 3.9.2 Ενοργάνιση ακμής ρωγμής

Η δουλειά του Sih και άλλων, έχει δείξει την πολυπλοκότητα του τασικού πεδίου κοντά στην ακμή της ρωγμής σε ένα ανισότροπο υλικό. Αυτό το πεδίο, εξαρτάται από τον συντελεστή συγκέντρωσης τάσης  $K$ , τις συντεταγμένες  $R$ ,  $\theta$  και τα στοιχεία της μήτρας ενδοτικότητας  $S$  (I,m).

$$\sigma_i = K_I / [\text{sqrt}(2\pi R)] * F_{ij}(\theta, S_{I,m}) \quad [16]$$

Η μελέτη τους έδειξε ότι για  $\theta = 0^\circ$  στην σχέση [16], η τιμή της διαμήκουσ τάσης  $\sigma_x$  διαφέρει με αυτήν της εγκάρσιας  $\sigma_y$ . Εδώ πρέπει να θυμηθούμε ότι για ισότροπα υλικά και  $\theta = 0^\circ$ ,  $\sigma_x = \sigma_z$ .

Σε ορθότροπα υλικά, η διαμήκης τάση  $\sigma_x$  δείχνει να επικρατεί. Ο λόγος των τάσεων  $\sigma_x/\sigma_z$ , είναι περίπου 2 για τα υαλοεποξικά και 4 για τα ανθρακοεποξικά υλικά του πίνακα 13, όταν  $\theta = 0^\circ$ . Η επιρροή αυτού του λόγου, φαίνεται και στην έναρξη της βλάβης στην ακμή της ρωγμής αλλά και κατά την διάρκεια της ανάπτυξης της διαδικασίας βλάβης. Επομένως, για να μελετήσουμε τους μηχανισμούς που ενεργούν κατά την διάρκεια της αποκόλλησης, έχουν εγκατασταθεί μετρητές παραμόρφωσης στην περιοχή της ακμής της ρωγμής.

Η θέση των μετρητών παραμόρφωσης σε ένα δείγμα DCB (20 mm πάχος), φαίνεται στην εικόνα 15. Μια σειρά από πέντε διαμήκεις μετρητές παραμόρφωσης και πέντε εγκάρσιους, τοποθετούνται κοντά στην ακμή της ρωγμής. Στην εικόνα φαίνονται επίσης τυπικές αποκρίσεις των μετρητών. Τα δεδομένα καταγράφονται ταυτόχρονα με έναν μετατροπέα ακουστικής εκπομπής και ένα μετρητή διάδοσης ρωγμής τοποθετημένο στην άλλη πλευρά του δείγματος. Οι αποκρίσεις τους και η καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, φαίνονται στην εικόνα 16, όπου φαίνονται ξεκάθαρα τα σημεία A και B.

Το σημείο A, αντιπροσωπεύει την έναρξη της μικροσκοπικής θραύσης πριν την αποκόλληση, η οποία ανιχνεύεται με ακουστική εκπομπή και το σημείο B χαρακτηρίζει την μακροσκοπική θραύση (αποκόλληση), που ανιχνεύεται από το μετρητή διάδοσης ρωγμής. Οι αποκρίσεις του μετρητή για τα υαλοεποξικά που φαίνονται στην εικόνα 17, τονίζουν την χρησιμότητα αυτού του τύπου ενοργάνισης της ακμής ρωγμής. Η συμπεριφορά του μετρητή, μπορεί να συσχετιστεί άμεσα με την ανάπτυξη βλάβης. Έτσι, ο πρώτο διαμήκης μετρητής, το νούμερο 3 και ο πρώτος εγκάρσιος μετρητής, το νούμερο 2, επιβεβαιώνουν την ύπαρξη των σημείων A και B ( $A_3B_3$  και  $A_2B_2$ ). Οι διαμήκεις μετρητές, δείχνουν “χαλάρωση” λόγω μικροσκοπικών ζωνών βλάβης. Η γραμμική απόκριση των διαμήκων μετρητών παραμόρφωσης  $A_3B_3$ ,  $B_5C_5$ ,  $C_7D_7$ ,  $D_9E_9$  και των εγκάρσιων  $A_2B_2$ ,  $B_4C_4$ ,  $C_6D_6$ ,  $D_8E_8$  και  $E_{10}F_{10}$ , αντιστοιχεί στη ανάπτυξη αυτής της ζώνης βλάβης πριν την αποκόλληση. Η εφελκυστική εξέλιξη της απόκρισης των διαμήκων μετρητών ταυτόχρονα με την πτώση που καταγράφεται από του εγκάρσιους μετρητές, υποδεικνύει ότι η μικρορωγμάτωση:

- σχετίζεται ιδιαίτερα με την διαμήκη παραμόρφωση

- περιλαμβάνει μια μείωση στην συγκέντρωση τάσης στην ακμή της ρωγμής (η οποία εξηγεί την απόκριση του εγκάρσιου μετρητή) και
- αποτελείται από μικρορωγμές κάθετες στο επίπεδο διάδοσης. Η ανάπτυξή τους, εξηγεί την ακόλουθη ταχεία πτώση της διαμήκους παραμόρφωσης.

Η μέτρηση των  $\epsilon_x$  και  $\epsilon_z$ , δίνει μέσες τιμές σε μια μικρή απόσταση και προφανώς δεν δίνει τις τιμές ακριβώς στην ακμή της ρωγμής. Για να βγάλουμε ποιοτικά συμπεράσματα, είναι επομένως πιο ενδιαφέρον να δουλέψουμε με τους λόγους αυτών των τιμών παραμόρφωσης. Οπότε ορίζουμε:

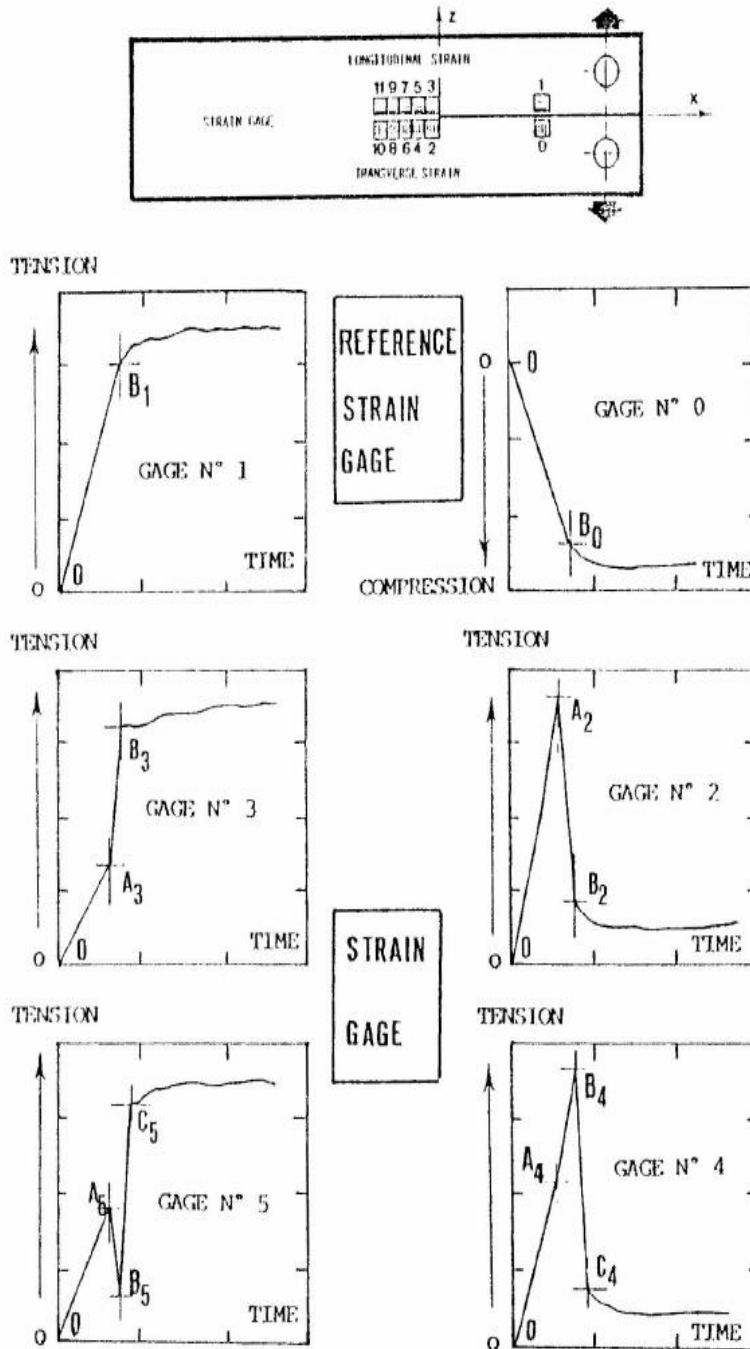
$$F = [\epsilon_x * (A_3)] / [\epsilon_z * (A_2)] \text{ στην μικροσκοπική έναρξη} \quad [17]$$

$$F = [\epsilon_x * (B_3)] / [\epsilon_z * (B_2)] \text{ στην μακροσκοπική αποκόλληση} \quad [18]$$

Αυτοί οι λόγοι μπορούν να προσδιοριστούν κατά την διάρκεια της αποκόλλησης, με την απόκριση των διαδοχικών μετρητών. Η θεωρία των πολυστρωματικών υλικών, μαζί με την ανάλυση των Sih, Paris και Irwin, επιτρέπουν να παραχθεί μια αναλυτική εξίσωση για τον λόγο F, συναρτήσει της πολικής συντεταγμένης  $\theta$ . Αυτή η θεωρητική εξίσωση, μαζί με τους λόγους που λήφθηκαν πειραματικά από τους μετρητές, μας επιτρέπουν να εντοπίσουμε με ακρίβεια την ακμή της ρωγμής και επίσης να προσδιορίσουμε την έκταση της ζώνης βλάβης κατά την διάρκεια της διαδικασίας αποκόλλησης.

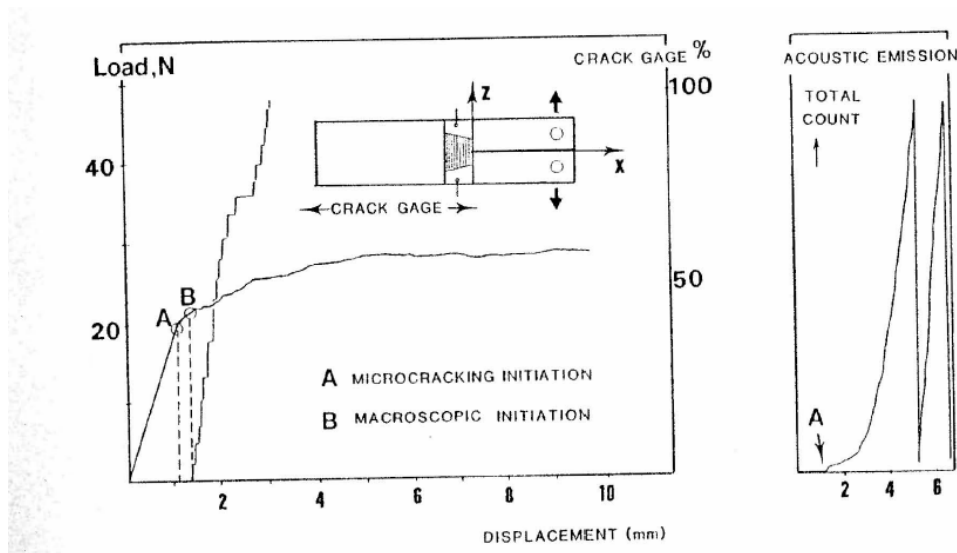


## ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ Ι

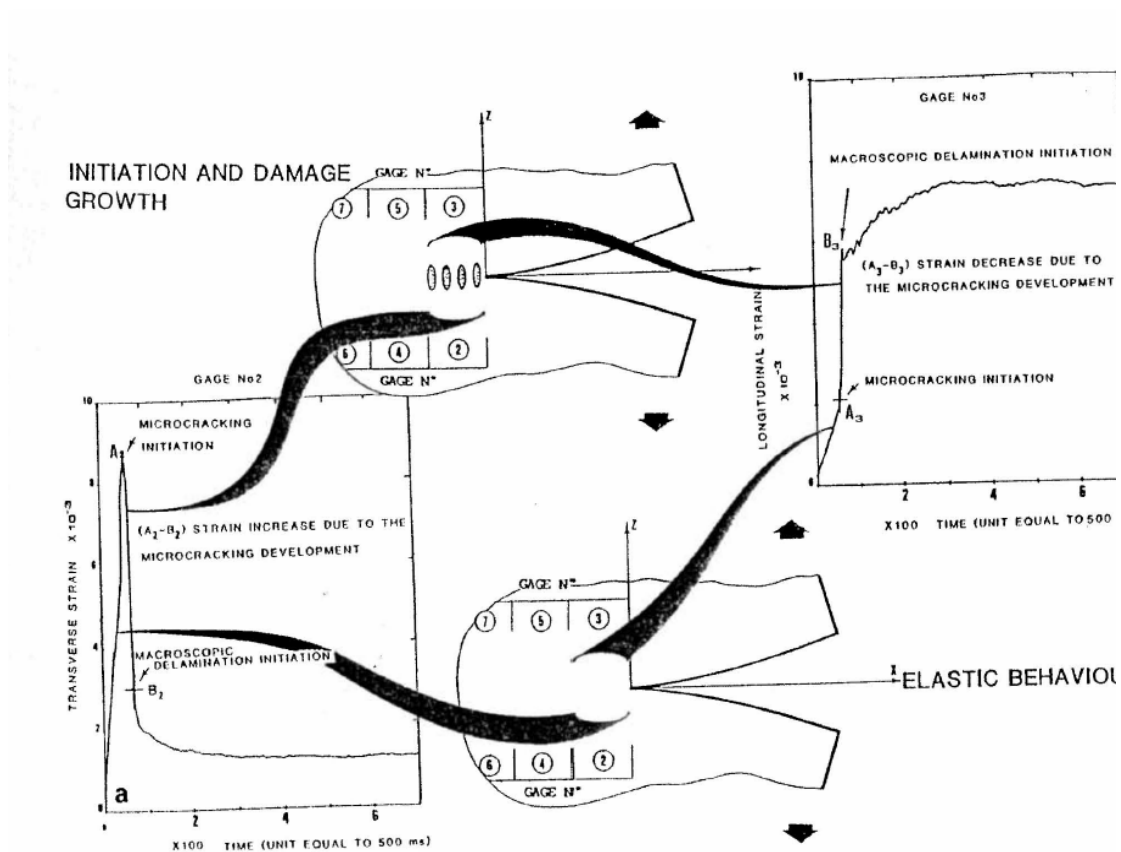


*Εικόνα 15: Θέσεις των μετρητών παραμόρφωσης σε ένα παχύ δείγμα DCB και αποκρίσεις τους για UD βαλοεποξικά σύνθετα.*

## ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ Ι

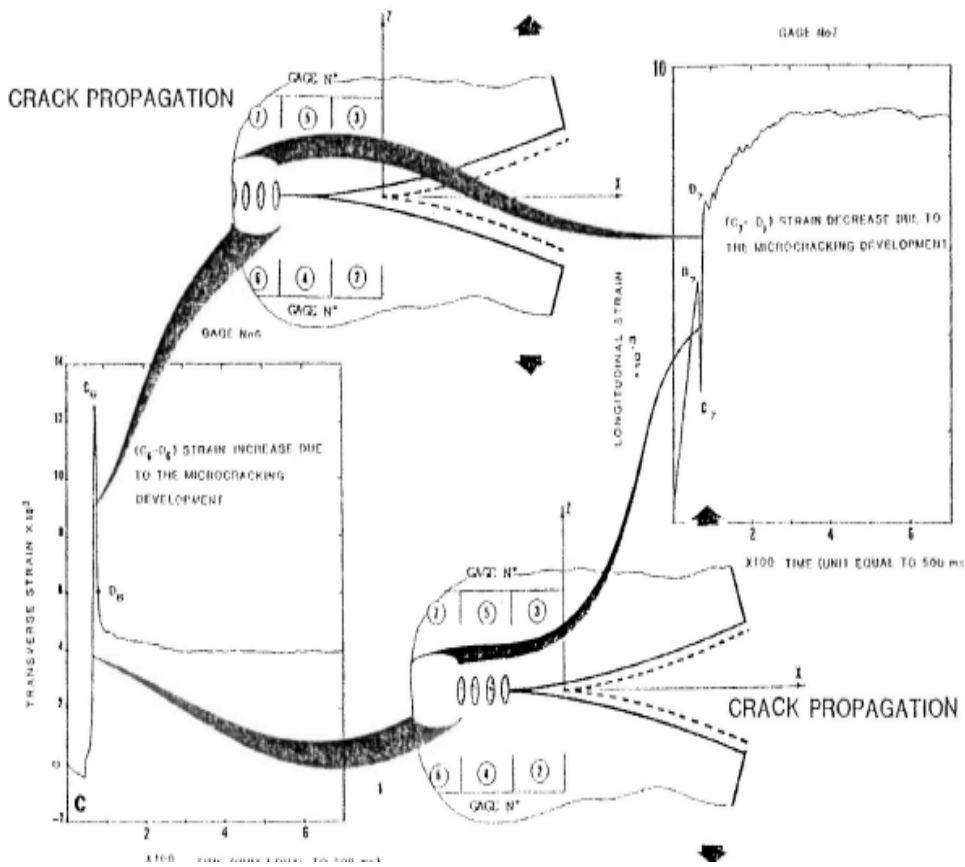
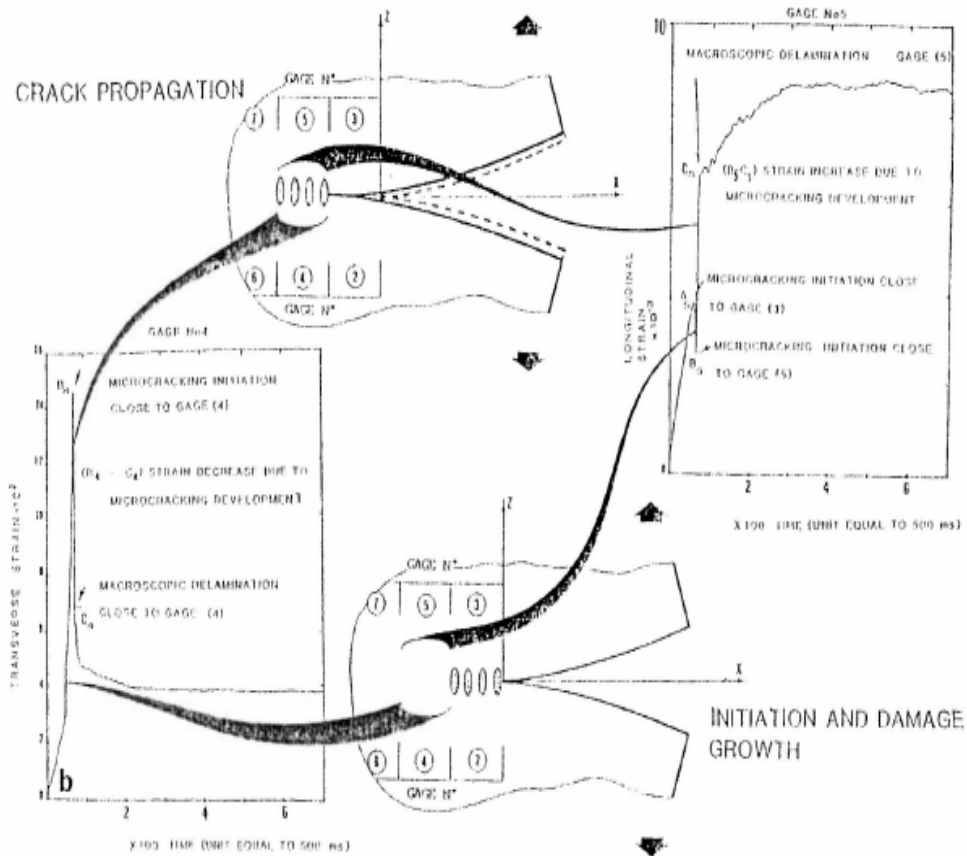


*Εικόνα 16: Αναγνώριση μικροσκοπικής και μακροσκοπικής έναρξης από ακουστική εκπομπή και μετρητές διάδοσης ρωγμής για ναλοεποξικά σύνθετα.*



*Εικόνα 17: Αποκρίσεις των μετρητών παραμόρφωσης κατά την διάρκεια φόρτισης ναλοεποξικού σύνθετου.*

## ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ Ι



**Εικόνα 17: Συνέχεια.**

### 3.10 Κόπωση τύπου Ι

Ελάχιστα αποτελέσματα έχουν δημοσιευτεί για δοκιμές τύπου Ι με φόρτιση κόπωσης, κυρίως λόγω του ότι η αποκόλληση τύπου Ι τείνει να θεωρείται ως ζήτημα στατικού σχεδιασμού. Ο Wilkins και άλλοι και οι Ramkumar και Whitcomb, έδειξαν ότι σε ένα ανθρακοεποξικό, το T300/5208, για  $\Delta G < 0.5G_{Ic}$ , οι αποκολλήσεις θα αναπτυχθούν πολύ αργά. Οι Russell και Street, χρησιμοποιώντας ένα πείραμα novel constant-AG η οποία τους επέτρεψε να μελετήσουν την επιρροή της γεφύρωσης ενίσχυσης στην κόπωση, επιβεβαίωσε αυτό το αποτέλεσμα για το AS1/3501-6. Ωστόσο, στα carbon/PEEK σύνθετα, κατέληξαν ότι μπορεί να υπάρξει σημαντική διάδοση της ρωγμής ακόμα και για  $\Delta G/G_{Ic}$  κοντά στο 0.1. Η σχετική ευαισθησία πιο δύσθραυστων σύνθετων στην διάδοση ρωγμής από κόπωση, υποδείχθηκε επίσης από τα αποτελέσματα του Mall και άλλων.

Η κόπωση τύπου Ι, μπορεί επομένως να είναι κριτήριο σχεδιασμού στα carbon/PEEK κι επίσης σε άλλα σκληρυμένα σύνθετα για τα οποία έχουμε λίγες πληροφορίες.

### 3.11 Τυποποίηση της δοκιμής αποκόλλησης τύπου Ι

Πριν συζητήσουμε λεπτομέρειες για τις πειραματικές διαδικασίες, πρέπει να ξεκαθαριστεί ο σκοπός της δοκιμής τύπου Ι. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι τιμές του  $G_{Ic}$  χρησιμοποιούνται απλά ως ένας ποιοτικός τρόπος μιας γενικής ένδειξης της δυσθραυστότητας στα σύνθετα υλικά, με τον ίδιο τρόπο με τον οποίο παρατίθενται οι τιμές Charpy ή Izod για τα σύνθετα. Η θραύση τύπου Ι στα UD σύνθετα, θεωρείται ότι είναι ο τύπος της χαμηλότερης ενέργειας θραύσης και επομένως ένας καλός οδηγός για βελτίωση των υλικών. Μια τιμή ανεξάρτητη του δείγματος, είναι επομένως πολύ πρακτική. Δυστυχώς, τα αποτελέσματα που δημοσιεύονται στον πίνακα 16, περιπλέκουν τα πράγματα. Πρώτον, στα δύσθραυστα υλικά και η έναρξη και η διάδοση μπορούν να χαρακτηριστούν, οπότε μπορούν να παρατεθούν δύο τιμές. Δεύτερον, η εμφάνιση αστάθειας κατά την διάρκεια της διάδοσης σε κάποια υλικά, αυξάνει τον αριθμό των απαραίτητων τιμών σε τέσσερις, ή σε ολόκληρη καμπύλη R. Τρίτον και σημαντικότερον, υπάρχουν μεγάλες αμφιβολίες για το αν το πάχος του δείγματος είναι ανεξάρτητο αυτών των τιμών, κυρίως στην διάδοση όπου παρεμβαίνει η επιρροή της γεφύρωσης ενίσχυσης.

Εάν επομένως το μόνο που χρειάζεται είναι μια απλή συγκριτική ένδειξη της δυσθραυστότητας, μπορεί να συζητηθεί ότι το πείραμα τύπου ΙI στα UD σύνθετα είναι πιο χρήσιμη. Μια μελέτη από τον Masters, δείχνει ότι υπάρχει ένας πολύ καλός συσχετισμός μεταξύ των αποτελεσμάτων τύπου ΙI και των τιμών θλίψης μετά από πρόσκρουση, ενώ δεν ισχύει κάτι τέτοιο για τα αποτελέσματα τύπου Ι. Όπως η θλίψη μετά από πρόσκρουση έχει γίνει η πρότυπη δοκιμή για την αεροπορική βιομηχανία, έτσι

και οι τιμές τύπου II μπορούν να αποδειχθούν πιο χρήσιμος οδηγός για την δυσθραυστότητα.

Εναλλακτικά, έχει πραγματοποιηθεί δοκιμή σε δείγματα με μικτό τύπο, παρμένα από το ίδιο carbon/PEEK πάνελ από το οποίο κόπηκαν τα δείγματα DCB. Τα δείγματα DCB έδειξαν γεφύρωση ενίσχυσης, αλλά τα δείγματα μικτού τύπου όχι, έτσι ώστε να ληφθεί μια πιο χρήσιμη τιμή  $G_{Ic}$ . Τα πειράματα μικτού τύπου σε UD δείγματα, μπορεί λοιπόν να είναι πιο χρήσιμα στον χαρακτηρισμό δύσθραυστων υλικών. Δεδομένων των περιορισμένων εφαρμογών των UD σύνθετων, ένα πείραμα μικτού τύπου σαν αυτό που προτάθηκε από τον O'Brien, σε ένα πιο ρεαλιστικό layup μπορεί επίσης να προταθεί ως ένας καλύτερος οδηγός για την δυσθραυστότητα.

Ωστόσο, ενώ αυτές οι εναλλακτικές δοκιμές δείχνουν να προσφέρουν την προοπτική μιας πιο συνοπτικής ένδειξης της μεταφοράς της αντίστασης αποκόλλησης από ένα δείγμα σε μια κατασκευή, δύο πράγματα πρέπει να σημειωθούν: πρώτον και οι δύο εναλλακτικές δοκιμές έχουν τα προβλήματά τους στην ερμηνεία των δεδομένων, κυρίως όταν εφαρμόζονται σε δύσθραυστα υλικά. Δεύτερον και σημαντικότερον, τα δεδομένα τύπου I δεν προορίζονται αποκλειστικά για materials' suppliers data sheets. Υπάρχουν επίσης και προσπάθειες για εφαρμογή της θραυστομηχανικής σε προβλήματα ανάπτυξης ρωγμής σε κατασκευές. Υπάρχει επομένως ανάγκη για χρήση αξιόπιστων δεδομένων τύπου I σε κριτήριο θραύσης και η πειραματική τυποποίηση είναι ουσιαστική.

Από αυτό προκύπτει το ερώτημα του ποια πειραματική διαδικασία να χρησιμοποιήσουμε. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παραπάνω, υποδηλώνουν ότι οι τιμές διάδοσης θα υπερτιμήσουν την αντίσταση αποκόλλησης τύπου I των δύσθραυστων σύνθετων, αν οι τιμές μπορούν να διπλασιαστούν με τον διπλασιασμό του πάχους του δείγματος. Είναι επομένως προτιμότερο να καθορίσουμε τιμές έναρξης  $G_{Ic}$ , οι οποίες θα δώσουν χαμηλότερο όριο στην αντίσταση αποκόλλησης. Αυτή η προσέγγιση δεν είναι απόλυτα ικανοποιητική, διότι υπάρχουν ανεπαρκή δεδομένα για εκτίμηση της σημαντικότητας οι οποίες λαμβάνονται κατά την έναρξη από starter films. Η επιρροή των παραμέτρων όπως το πάχος του film δεν έχουν μελετηθεί, αλλά αυτό το πρόβλημα υπάρχει επίσης και στα bond-line πειράματα, όπου ένα “επαρκώς μικρό” συγκολλητικό στρώμα πρέπει να δοκιμαστεί. Επιπλέον, οι τιμές έναρξης για παχιά carbon/PEEK δείγματα, μπορούν να ληφθούν σύμφωνα με το αν η ρωγμή ξεκινάει μέσα ή πάνω από το matrix-rich στρώμα.

Συνοψίζοντας, για να αποφύγουμε τα περισσότερα από αυτά τα προβλήματα, χρειάζεται μια τεχνική η οποία επιτρέπει την διάδοση μιας προωγμάτωσης επαρκώς μακριά από την matrix-rich ζώνη (500  $\mu\text{m}$ ), κατά προτίμηση στην κόπωση, για μείωση της βλάβης στην ακμή της ρωγμής. Δυστυχώς, ο προσδιορισμός μιας τέτοιας ενέργειας σε ένα πρότυπο θα ήταν εγγύηση ότι το πρότυπο δεν χρησιμοποιήθηκε ποτέ.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ Ι – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

---

#### 4.1 Περιγραφή της πειραματικής μεθόδου

Το δείγμα DCB είναι στην ουσία ένα ορθογώνιο κομμάτι ομοιόμορφου πάχους, μονοδιεύθυντων ινών, όπου περιέχει ένα επιπλέον κομμάτι στο κέντρο του (insert), το οποίο θα χρησιμεύσει για την έναρξη της αποκόλλησης. Οι δυνάμεις θα εφαρμοστούν στην πλάκα μέσω μπλοκ φόρτισης, τα οποία θα κολληθούν στο ένα άκρο του δείγματος. Τα άκρα του δείγματος θα ανοιχτούν ελέγχοντας είτε την μετατόπιση του ανοίγματος ή την κίνηση των κεφαλών, καταγράφοντας παράλληλα το φορτίο και το μήκος αποκόλλησης.

Μία καταγραφή της εφαρμοζόμενης δύναμης συναρτήσει της μετατόπισης λόγω ανοίγματος πρόκειται να ληφθεί χρησιμοποιώντας ένα όργανο καταγραφής x-y ή μια παρόμοια συσκευή πραγματικού χρόνου, ειδάλτως μπορεί να ληφθεί και να αποθηκευτεί ψηφιακά. Η IFT τύπου I, υπολογίζεται με τη μέθοδο βαθμονόμησης ενδοτικότητας.

#### 4.2 Παρεμβολές

Υποθέτουμε γραμμική ελαστική συμπεριφορά στον υπολογισμό του G που χρησιμοποιείται σε αυτήν την πειραματική μέθοδο. Αυτή η υπόθεση ισχύει όταν η ζώνη της βλάβης ή της μη γραμμικής παραμόρφωσης στο μέτωπο αποκόλλησης, ή και των δύο, είναι μικρή σχετική με τη μικρότερη διάσταση του δείγματος, η οποία είναι τυπικά το πάχος για το πείραμα DCB.

Στη δοκιμή DCB, δεδομένου ότι η αποκόλληση αυξάνεται από το insert, μια συμπεριφορά θραύσης τύπου αντίστασης τυπικά αναπτύσσεται όπου το υπολογισμένο

## ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ Ι – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

$G_{IC}$  αυξάνει πρώτα μονοτονικά, και σταθεροποιείται έπειτα με περαιτέρω αύξηση αποκόλλησης. Σε αυτήν την πειραματική μέθοδο, μια καμπύλη αντίστασης (καμπύλη R) που απεικονίζει το  $G_{IC}$  ως συνάρτηση του μήκους αποκόλλησης, θα δημιουργηθεί για να χαρακτηρίσει την έναρξη και τη διάδοση μιας αποκόλλησης σε ένα μονοδιεύθυντο δείγμα. Ο κύριος λόγος για την παρατηρηθείσα αντίσταση στην αποκόλληση, είναι η ανάπτυξη της γεφύρωσης ενίσχυσης.

Αυτός ο μηχανισμός γεφύρωσης ενίσχυσης, είναι αποτέλεσμα της ανάπτυξης αποκόλλησης μεταξύ δύο μονοδιεύθυντων στρωμάτων των  $0^\circ$ . Επειδή οι περισσότερες αποκολλήσεις που σχηματίζονται σε πολύστρωτα σύνθετα συμβαίνουν μεταξύ στρωμάτων ανόμοιου προσανατολισμού, δεν υπάρχει γεφύρωση ενίσχυσης. Ως εκ τούτου, η γεφύρωση ενίσχυσης θεωρείται ως artifact της δοκιμής DCB σε μονοδιεύθοντα υλικά. Επομένως, η γενική σημασία των τιμών διάδοσης του  $G_{IC}$  που υπολογίζονται πέρα από το άκρο του εμφυτευμένου insert είναι αμφισβητήσιμη και προτιμάται μια τιμή έναρξης του  $G_{IC}$  που μετριέται από το εμφυτευμένο insert. Λόγω της σημασίας του σημείου έναρξης, το insert πρέπει να εμφυτευτεί σωστά και να επιθεωρηθεί.

Τρεις ορισμοί για μια τιμή έναρξης της  $G_{IC}$  έχουν αξιολογηθεί κατά τη διάρκεια της δοκιμής round-robin. Αυτοί περιλαμβάνουν τιμές  $G_{IC}$  που προσδιορίζονται με χρήση του μετρούμενου φορτίου και της εκτροπής (1) στο σημείο απόκλισης από τη γραμμικότητα στην καμπύλη φορτίου - μετατόπισης (NL), (2) στο σημείο στο οποίο παρατηρείται οπτικά η αποκόλληση στην άκρη (VIS) που μετράται με μικροσκόπιο, και (3) στο σημείο στο οποίο η ενδοτικότητα έχει αυξηθεί κατά 5% ή το φορτίο έχει φθάσει σε μέγιστη τιμή (5% max). Η τιμή NL  $G_{IC}$ , η οποία είναι συνήθως η χαμηλότερη από τις τρεις τιμές έναρξης  $G_{IC}$ , συνίσταται για τη δημιουργία κριτηρίων αστοχίας αποκόλλησης σε αντοχή και αναλύσεις ανοχής βλάβης πολύστρωτων κατασκευών. Ωστόσο, τα φυσικά αποδεικτικά στοιχεία δείχνουν ότι η τιμή έναρξης που αντιστοιχεί στην έναρξη της μη γραμμικότητας (NL) στην καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, αντιστοιχεί στη φυσική εμφάνιση της αποκόλλησης από το insert στο εσωτερικό του πλάτους του δείγματος. Σε δοκιμές round-robin AS4/PEEK θερμοπλαστικής μήτρας, οι τιμές NL  $G_{IC}$  ήταν 20% χαμηλότερες από το VIS και 5% max τιμές.

Η ανάπτυξη αποκόλλησης μπορεί να προχωρήσει με έναν από τους δύο τρόπους: (1) με αργή αλλά σταθερή επέκταση ή (2) μια επέκταση run-arrest, κατά την οποία το μπροστινό μέρος της αποκόλλησης “πηδάει” απότομα μπροστά. Μόνο ο πρώτος τύπος ανάπτυξης μας ενδιαφέρει για αυτήν την πειραματική μέθοδο. Ένα ασταθές άλμα από το insert μπορεί να είναι ένδειξη προβλήματος με αυτό. Παραδείγματος χάριν, το insert μπορεί να μην είναι εντελώς αποσυνδεδεμένο από την πλάκα, ή μπορεί να είναι πάρα πολύ παχύ, με συνέπεια μια μεγάλη neat resin pocket, ή μπορεί να περιέχει σκίσιμο ή να διπλώσει. Επιπλέον, η ταχεία ανάπτυξη αποκόλλησης μπορεί να εισάγει δυναμικές επιδράσεις τόσο στο πειραματικό δείγμα όσο και στη μορφολογία της θραύσης. Η επεξεργασία και η ερμηνεία αυτών των επιπτώσεων είναι πέρα από το πεδίο εφαρμογής αυτής της μεθόδου. Εντούτοις, επειδή το άλμα ρωγμών έχει παρατηρηθεί σε τουλάχιστον ένα υλικό στο οποίο οι οδηγίες για τα insert δεν παραβιάστηκαν, τα δείγματα αποφορτίζονται μετά από την πρώτη αύξηση της ανάπτυξης αποκόλλησης και ξαναφορτίζονται για να συνεχιστεί το πείραμα. Αυτή η διαδικασία

## ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ Ι – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

προκαλεί μια φυσική προρωγμάτωση τύπου Ι στο δείγμα DCB. Η πρώτη τιμή διάδοσης  $G_{Ic}$  αναφέρεται ως  $G_{Ic}$  προρωγμάτωσης τύπου Ι.

### 4.2.1 Εφαρμογή σε άλλα υλικά, layup και αρχιτεκτονικές

Οι τιμές δυσθραυστότητας που μετρούνται στα μονοδιεύθунτα υλικά με πολυφασικές μήτρες, μπορούν να ποικίλουν, ανάλογα την τάση της αποκόλλησης να “περιπλανιέται” μεταξύ των διάφορων φάσεων της μήτρας. Τα σύνθετα με ψαθυρή μήτρα με σκληρές συγκολλητικές διασυνδέσεις μεταξύ των στρώσεων, μπορεί να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε αυτό το φαινόμενο με αποτέλεσμα δύο φαινομενικές τιμές διαστρωματικής αντοχής σε θραύση: μία που συνδέεται με μια συνεκτικού τύπου αστοχία εντός της διασύνδεσης και μία που συνδέεται με μια συγκολλητικού τύπου αστοχία μεταξύ του σκληρού πολυμερικού film και της πιο ψαθυρής σύνθετης μήτρας.

Μη μονοδιεύθυντες διαμορφώσεις DCB, ενδέχεται να εμφανίσουν διακλάδωση της αποκόλλησης μακριά από το ενδιάμεσο επίπεδο μέσω ρωγμών μήτρας σε στρώματα εκτός άξονα. Εάν η αποκόλληση διαδοθεί πέρα από το ενδιάμεσο επίπεδο, ίσως δεν επιτευχθεί καθαρή θραύση τύπου Ι, ως αποτέλεσμα της δομικής ζεύξης που μπορεί να υπάρχει στα ασύμμετρα υποστρώματα που σχηματίζονται καθώς αναπτύσσεται η αποκόλληση. Επιπλέον, τα μη μονοδιεύθунτα δείγματα ενδέχεται να εμφανίσουν σημαντικά αντικλαστικά καμπτικά αποτελέσματα, που έχουν ως αποτέλεσμα την ανομοιόμορφη ανάπτυξη αποκόλλησης κατά μήκος του πλάτους του δείγματος, επηρεάζοντας ιδιαίτερα τις παρατηρούμενες τιμές έναρξης. Τα υφασμάτινα σύνθετα μπορούν να αποφέρουν σημαντικά μεγαλύτερη διασπορά και μοναδικές καμπύλες R που συνδέονται με μεταβλητή δυσθραυστότητα εντός και μακριά από διαστρωματικές resin rockets, όσο η αποκόλληση μεγαλώνει. Σύνθετα με σημαντική αντοχή ή δυσθραυστότητα μέσω του πάχους τους, όπως σύνθετα με μεταλλικές μήτρες ή 3D ενίσχυση ίνας, μπορεί να εμφανίσουν αστοχίες των βραχιόνων της δοκού αντί για τις προβλεπόμενες διαστρωματικές αστοχίες.

### 4.3 Δειγματοληψία και πειραματικά δείγματα

Οι πλάκες πρέπει να αποτελούνται από ίσο αριθμό στρωμάτων, να είναι μονοδιεύθунτες και με διάδοση της αποκόλλησης στις  $0^\circ$ .

Ένα μη συγκολλητικό insert θα μπει στο κέντρο της πλάκας, με σκοπό να ξεκινήσει την διαδικασία της αποκόλλησης. Το πάχος του film δεν θα είναι μεγαλύτερο από 13  $\mu\text{m}$ . Δεν πρέπει να γίνει προρωγμάτωση στις πλάκες πριν το πείραμα. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να πάρουμε μια τιμή έναρξης χωρίς την επιρροή της γεφύρωσης ενίσχυσης και να την προσθέσουμε στην καμπύλη R. Ένα πολυμερικό film απαιτείται για το insert, ώστε να αποφύγουμε την περίπτωση δίπλωσης στο άκρο της κοπής, ό-



## ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ Ι – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

πως παρατηρήθηκε σε insert αλουμινοχαρτου, κατά την διάρκεια πειραμάτων round-robin. Για σύνθετα εποξικής μήτρας σκληρυμένα (cured) σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, 177 °C ή λιγότερο, συνίσταται ένα λεπτό film πολυτετραφθοροαιθυλενίου (PTFE). Για σύνθετα με μήτρα από πολυϊμίδιο, βισμαλεϊμίδιο, ή θερμοπλαστική που κατασκευάζεται σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες, μεγαλύτερες από 177 °C, συνίσταται ένα λεπτό film πολυϊμιδίου. Για υλικά εκτός του πεδίου εφαρμογής αυτής της πειραματικής μεθόδου, μπορεί να απαιτούνται διαφορετικά υλικά film. Εάν χρησιμοποιηθεί film πολυϊμιδίου, πρέπει να χρωματιστεί ή να ψεκάσσει με αποκολλητική προτού να εισαχθεί στην πλάκα. Σε αυτό το σημείο, πρέπει να αναφέρουμε ότι τα αποκολλητικά καλουπιού που περιέχουν σιλικόνη μπορούν να μολύνουν την πλάκα από τη “μετανάστευση” μέσω των στρωμάτων. Είναι συχνά χρήσιμο να επαλείψουμε το film τουλάχιστον μία φορά και στη συνέχεια να το ψήσουμε προτού το εισάγουμε στο σύνθετο. Αυτό θα αποτρέψει την διάδοση της σιλικόνης μέσα στο σύνθετο. Παρ’ όλο που η προωγμάτωση δεν συνίσταται, υπό συγκεκριμένες συνθήκες μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια εναλλακτική διαδικασία wedge precracking.

### 4.3.1 Διαστάσεις δειγμάτων

Το μήκος των δειγμάτων πρέπει να είναι 125 – 150 mm και το πλάτος 20 – 25. Το απαιτούμενο μήκος, εξαρτάται από την χρησιμοποιούμενη μέθοδο data reduction. Θα δημιουργηθούν πάνελ και θα κοπούν από αυτά δείγματα, τέτοια ώστε το μήκος του insert να είναι περίπου 63 mm. Αυτή η απόσταση αντιστοιχεί σε περίπου 50 mm μήκους αποκόλλησης συν άλλα 13 που απαιτούνται ώστε να συνδεθούν τα μπλοκ φόρτισης. Το άκρο του insert, πρέπει να είναι σημειωμένο επακριβώς στο πάνελ προτού κόψουμε τα δείγματα.

Το πάχος της πλάκας θα είναι μεταξύ 3 και 5 mm. Η διακύμανση του πάχους για κάθε δείγμα, δεν θα ξεπερνά το 0.1 mm. Το αρχικό μήκος αποκόλλησης, μετρούμενο από τη γραμμή φόρτισης μέχρι το άκρο του insert, θα είναι περίπου 50 mm. Εάν χρησιμοποιηθούν μπλοκ φόρτισης, δεν συνιστώνται πολύ χαμηλές τιμές του λόγου  $a/h$ . Για τιμές μικρότερες του 10, πιθανόν οι διαδικασίες data reduction να μην είναι ακριβείς.

Για υλικά με χαμηλό μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη ή υψηλή αντοχή σε διαστρωματική θραύση, ίσως χρειαστεί να αυξήσουμε τον αριθμό των στρωμάτων. Πιο συγκεκριμένα, αύξηση του πάχους της πλάκας ή μείωση του μήκους αποκόλλησης, ώστε να αποφύγουμε μεγάλες αποκλίσεις των βραχιόνων του δείγματος. Το πάχος του δείγματος και το αρχικό μήκος αποκόλλησης  $a_0$ , θα σχεδιαστούν ώστε να ικανοποιούν τα παρακάτω κριτήρια:

$$a_0 \leq 0.042 * \sqrt{(h^3 * E_{11}) / G_{1c}} \quad [1]$$

$$h \geq 8.28 * \sqrt[3]{(G_{1c} * a_0^2) / E_{11}} \quad [2]$$

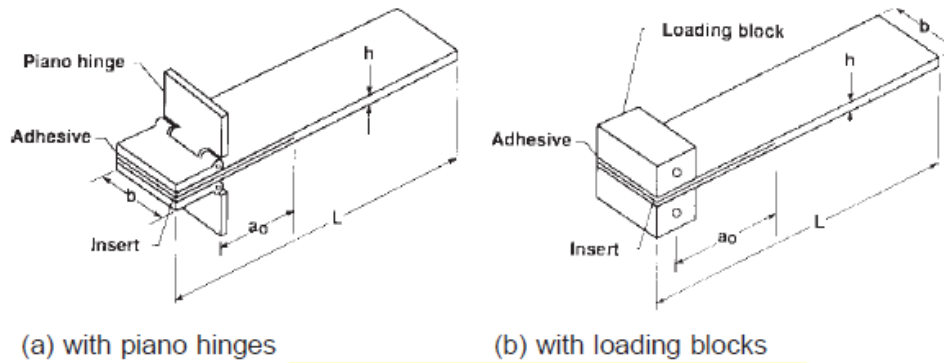
## ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ Ι – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

όπου:

$a_0$  = αρχικό μήκος αποκόλλησης

$h$  = πάχος δείγματος

$E_{11}$  = μέτρο ελαστικότητας στρώματος στην διεύθυνση της ίνας



Εικόνα 18: Δείγμα δοκού διπλού προβόλου.

### 4.3.2 Δειγματοληψία

Δοκιμάζουμε τουλάχιστον πέντε δείγματα ανά συνθήκες πειράματος, εκτός εάν μπορούν να ληφθούν έγκυρα αποτελέσματα μέσω της χρήσης λιγότερων δειγμάτων.

### 4.3.3 Εφαρμογή φορτίου

Το πλάτος των μπλοκ φόρτισης (ή tabs), θα είναι τουλάχιστον όσο το πλάτος του δείγματος.

### 4.3.4 Piano hinge tabs

Δύο tabs θα συνδεθούν στο άκρο κάθε δείγματος, όπως φαίνεται στην εικόνα 18α. Θα είναι μεταλλικά και θα είναι ικανά να υποστηρίξουν το εφαρμοζόμενο φορτίο χωρίς να υφίστανται βλάβη. Το μέγιστο φορτίο που αναμένεται κατά την διάρκεια μιας δοκιμής DCB υλικού με γνωστό μέτρο ελαστικότητας και η αναμενόμενη τιμή του  $G_{Ic}$  μπορούν να εκτιμηθούν από τον τύπο:

$$P_{\max} = (b/\alpha) * \text{sqrt}[(h^3 E_{11} G_{Ic}) / 96] \quad [3]$$

#### **4.3.5 Μπλοκ φόρτισης**

Η απόσταση από τον πείρο των μπλοκ φόρτισης μέχρι την κεντρική γραμμή του άνω βραχίονα του δείγματος θα είναι όσο γίνεται μικρότερη, ώστε να περιοριστούν τα σφάλματα ως αποτέλεσμα του εφαρμοζόμενου moment arm. Αυτές οι επιδράσεις θα μειωθούν επαρκώς, αν επιλεγεί απόσταση  $t$  τέτοια ώστε:

$$t \leq (h/4) + 0.01 * \text{sqrt}[(0.0434h^3 E_{11}) / G_{Ic} + \alpha^2] \quad [4]$$

Οι επιφάνειες συγκόλλησης (μπλοκ φόρτισης και δείγματος) θα καθαριστούν καλά πριν γίνει η συγκόλληση, ώστε να σιγουρευτεί η μεταφορά του φορτίου χωρίς να αποκολληθεί το μπλοκ κατά την διάρκεια του πειράματος. Εάν συμβεί αποκόλληση του μπλοκ φόρτισης, το δείγμα δεν πρέπει να ξαναχρησιμοποιηθεί, εάν έχει υπάρξει έναρξη αποκόλλησης στο σημείο που ξεκόλλησε το μπλοκ, ή εάν παρατηρείται αυξημένη ενδοτικότητα κατά την επαναφόρτιση.

#### **4.3.6 Προετοιμασία επιφανειών του δείγματος**

Η επιφάνεια συγκόλλησης του δείγματος, καλό είναι να τριφθεί ελαφρά με ένα γυαλόχαρτο και έπειτα να καθαριστεί με διαλύτη, όπως ακετόνη ή μεθυλεθυλκετόνη (MEK), ώστε να αποφευχθεί η όποια μόλυνση.

#### **4.3.7 Προετοιμασία επιφανειών των tabs ή των μπλοκ φόρτισης**

Η επιφάνειά τους, μπορεί να καθαριστεί με τον ίδιο τρόπο όπως η επιφάνεια του δείγματος. Εάν αυτή η διαδικασία οδηγήσει σε αποκόλληση των δύο επιφανειών, ίσως είναι απαραίτητο να εφαρμοστεί μια πιο πολύπλοκη διαδικασία καθαρισμού, βασισμένη στην απολίπανση και στην χημική χάραξη.

Η συγκόλληση τους στο δείγμα, θα γίνει αμέσως μετά την προετοιμασία των επιφανειών. Το υλικό που προτείνεται για την συγκόλληση, είναι κόλλα που στεγνώνει σε θερμοκρασία δωματίου. Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί και κυανοακρυλική. Η κόλλα μπορεί να ωφεληθεί από ένα postcure, εάν τα δείγματα στεγνώσουν μετά την κόλληση των μπλοκ/tabs. Σε κάποιες κόλλες, ίσως χρειαστεί να προστεθούν χάντρες από γυαλί, ώστε να έχουμε ομοιόμορφο πάχος κόλλησης.

## ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ Ι – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

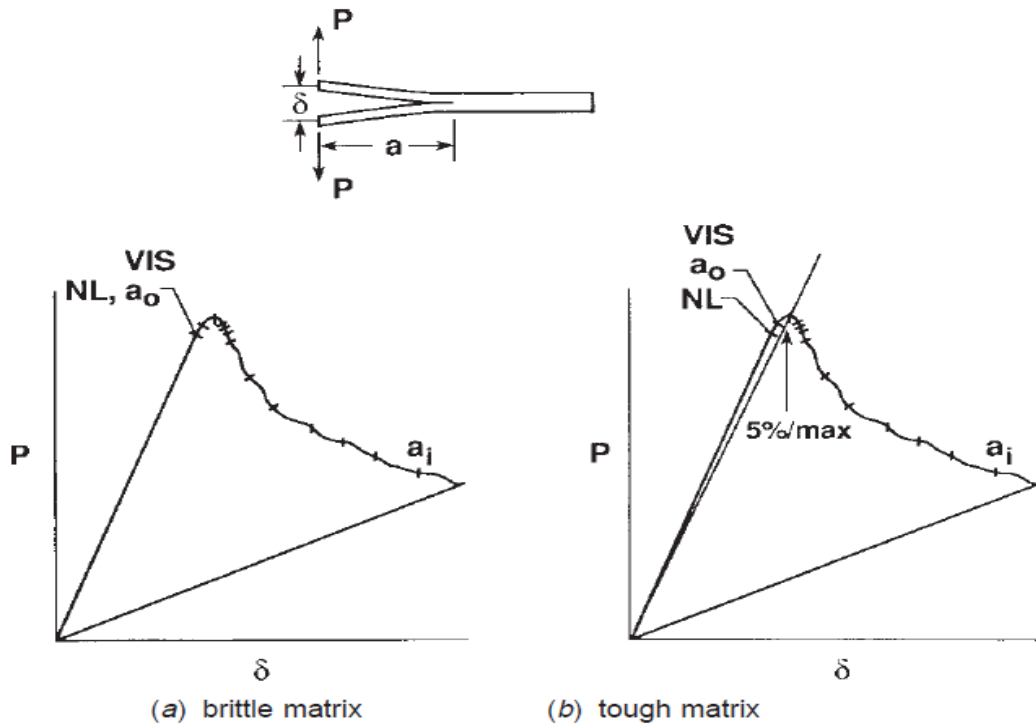
Τα μπλοκ/tabs θα ευθυγραμμιστούν παράλληλα με το δείγμα αλλά και μεταξύ τους και θα συγκρατηθούν με σφιγκτήρες όσο η κόλλα στεγνώνει.

### 4.4 Διαδικασία

- 1) Μετράμε το πλάτος και το πάχος κάθε δείγματος **to the nearest 0.05 mm** στο κέντρο και σε 25 mm από κάθε άκρο. Η διακύμανση του πάχους κατά μήκος του δείγματος δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 0.1 mm. Πρέπει να καταγράφονται οι μέσες τιμές των μετρήσεων πλάτους και πάχους.
- 2) Επαλείφουμε και τα δύο άκρα του δείγματος λίγο πριν από το insert με ένα λεπτό στρώμα διορθωτικού υγρού με βάση το νερό, ή ισοδύναμο, ως βοήθεια στην οπτική ανίχνευση της έναρξης αποκόλλησης. Μαρκάρουμε τα πρώτα 5 mm από το insert σε κάθε άκρο με λεπτές κατακόρυφες γραμμές κάθε 1 mm. Μαρκάρουμε τα υπόλοιπα 20 mm με λεπτές κατακόρυφες γραμμές κάθε 5 mm. Το μήκος αποκόλλησης είναι το άθροισμα της απόστασης από τη γραμμή φόρτισης μέχρι το τέλος του insert συν την αύξηση της διάδοσης που προσδιορίζεται από τα σημάδια υποδιαίρεσης.
- 3) Τοποθετούμετα μπλοκ φόρτισης στις λαβές της μηχανής φόρτισης, σιγουρεύοντας ότι το δείγμα είναι ευθυγραμμισμένο και κεντραρισμένο.
- 4) Όσο το φορτίο εφαρμόζεται, μετράμε το μήκος αποκόλλησης  $a$  στη μια πλευρά του δείγματος. Το αρχικό μήκος αποκόλλησης  $a_0$ , είναι η απόσταση από τη γραμμή φόρτισης μέχρι το τέλος του insert. Δεν προσπαθούμε να εντοπίσουμε το τέλος του insert ανοίγοντας το δείγμα. Εάν είναι δύσκολο να δούμε το τέλος του insert στο άκρο του δείγματος, ή να το εντοπίσουμε από το αρχικό σημάδι στο πάνελ, δοκιμάζουμε τα εξής:
  - I. Τρίβουμε την άκρη του δείγματος στην τοπική περιοχή κοντά στο insert με ένα μαλακό μολύβι και
  - II. Γυαλίζουμε την άκρη του δείγματος. Εάν καμία από τις παραπάνω μεθόδους δεν είναι κατάλληλη, μαρκάρουμε **graduations** στο άκρο του δείγματος από το κέντρο του πείρου φόρτισης. Όταν το δείγμα φορτίζεται, το μήκος της αρχικής αποκόλλησης μπορεί να καθοριστεί από αυτά τα σημάδια **graduation**. Όταν η αποκόλληση αυξάνεται από το insert, παίρνουμε την πρώτη ανάγνωση στην επόμενη ολόκληρη σήμανση 1 mm. Κατόπιν, παίρνουμε τις αναγνώσεις για τις επόμενες τέσσερις αυξήσεις 1 mm της ανάπτυξης αποκόλλησης και των επόμενων αυξήσεων 5 mm, όπως διευκρινίζεται ανωτέρω.
- 5) Το άκρο του δείγματος απέναντι από τις λαβές πρέπει να στηρίζεται πριν από τη φόρτιση, όπως φαίνεται σχηματικά στην εικ. 19. Το υποστηριζόμενο άκρο μπορεί να φύγει από την στήριξη, όσο το φορτίο εφαρμόζεται. Για τα δείγματα που είναι υπερβολικά μεγάλα σε μήκος, ίσως χρειαστεί να υποστηριχθούν κατά την διάρκεια της φόρτισης.

## ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ Ι – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

- 6) Θέτουμε ένα οπτικό μικροσκόπιο ή μια ισοδύναμη μεγεθυντική συσκευή, σε θέση να παρατηρήσει την κίνηση του μετώπου αποκόλλησης καθώς αναπτύσσεται κατά μήκος μιας άκρης. Αυτή η συσκευή πρέπει να είναι ικανή να εντοπίσει το μέτωπο αποκόλλησης με ακρίβεια τουλάχιστον  $\pm 0.5$  mm.



Εικόνα 19: Καμπύλη φορτίου – μετατόπισης από το πείραμα DCB.

### 4.4.1 Αρχική φόρτιση

- 1) Φορτίζουμε το δείγμα σε σταθερή ταχύτητα κεφαλών μεταξύ 1 και 5 mm/min.
- 2) Καταγράφουμε το φορτίο και τις τιμές μετατόπισης, συνεχόμενα αν είναι δυνατόν. Καταγράφουμε την θέση της αποκόλλησης με ακρίβεια τουλάχιστον  $\pm 0.5$  mm.
- 3) Κατά την διάρκεια της φόρτισης, καταγράφουμε το σημείο στην καμπύλη φόρτισης - μετατόπισης, ή τις τιμές δεδομένων φορτίου - μετατόπισης, στις οποίες η οπτική έναρξη της κίνησης αποκόλλησης παρατηρήθηκε στο άκρο του δείγματος.
- 4) Η φόρτιση θα διακοπεί μετά από αύξηση της διάδοσης της ρωγμής αποκόλλησης από 3 έως 5 mm. Εάν παρατηρηθεί ασταθής ανάπτυξη αποκόλλησης από το insert, το σημειώνουμε στην αναφορά και η φόρτιση πρέπει να συνεχιστεί μέχρι το μήκος της αποκόλλησης να αυξηθεί κατά 3 έως 5 mm πέρα από

## ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ Ι – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

το arrest point. Σημειώνουμε στην πειραματική αναφορά εάν η αύξηση του μήκους αποκόλλησης είναι έξω από το εύρος των 3 έως 5 mm.

- 5) Αποφορτίζουμε το δείγμα με σταθερή ταχύτητα κεφαλών μέχρι 25 mm/min.
- 6) Μετά την αποφόρτιση, μαρκάρουμε τη θέση της ακμής της προρωγμάτωσης και στα δύο άκρα του δείγματος. Σημειώνουμε στην πειραματική αναφορά εάν η θέση στα δύο άκρα διαφέρει κατά περισσότερο από 2 mm και εάν το δείγμα αφαιρείται από το σταθερό εξάρτημα για αυτήν την διαδικασία. Ασυμφωνία μεταξύ των δύο θέσεων που είναι μεγαλύτερη από 2 mm, μπορεί να αποτελεί ένδειξη ασύμμετρης φόρτισης.
- 7) Εάν το insert είχε εμφυτευτεί σωστά και επιθεωρήθηκε, αλλά η καμπύλη R δείχνει μείωση της φαινομενικής δυσθραυστότητας με το μήκος αποκόλλησης, η αρχική διαδικασία φόρτισης μπορεί να αντικατασταθεί από την wedge precracking. Η χρήση της wedge precracking δεν συνίσταται και πρέπει να αναφερθεί.

### 4.4.2 Επαναφόρτιση

- 1) Το δείγμα θα επαναφορτιστεί με την ίδια σταθερή ταχύτητα κεφαλών από 1 έως 5 mm/min όπως η αρχική φόρτιση, χωρίς διακοπή ή αποφόρτιση, μέχρι να επιτευχθεί η τελική αύξηση του μήκους αποκόλλησης. Το φορτίο και οι τιμές μετατόπισης καταγράφονται, συμπεριλαμβανομένου του κύκλου αποφόρτισης. Η θέση της αποκόλλησης πρέπει να επισημανθεί με ακρίβεια τουλάχιστον  $\pm 0.5$  mm στο άκρο του δείγματος.
- 2) Καταγράφουμε το φορτίο και τις τιμές μετατόπισης, στις οποίες η έναρξη της κίνησης αποκόλλησης από την προρωγμάτωση παρατηρείται στην άκρη του δείγματος.
- 3) Στη συνέχεια της φόρτισης, καταγράφουμε τις τιμές φορτίου και μετατόπισης σε όσες το δυνατόν περισσότερες αυξήσεις μήκους αποκόλλησης στα πρώτα 5 mm, ιδανικά κάθε 1 mm. Στη συνέχεια, καταγράφουμε αυτά τα δεδομένα φορτίου και μετατόπισης σε κάθε 5 mm, έως ότου η ρωγμή αποκόλλησης έχει διαδοθεί τουλάχιστον 45 mm από την άκρη της προρωγμάτωσης και πάλι σε κάθε 1 mm αύξησης της διάδοσης ρωγμής για τα τελευταία 5 mm της διάδοσης αποκόλλησης, μέχρι το συνολικό μήκος αποκόλλησης 50 mm πέρα από την ακμή της προρωγμάτωσης.
- 4) Τέλος, αποφορτίζουμε το δείγμα με σταθερή ταχύτητα κεφαλών μέχρι 25 mm/min.
- 5) Επισημαίνουμε τις θέσεις της ακμής της ρωγμής αποκόλλησης μετά την αποφόρτιση και στα δύο άκρα του δείγματος. Σημειώνουμε στην αναφορά εάν αυτές οι θέσεις διαφέρουν περισσότερο από 2 mm. Ασυμφωνία μεταξύ των δύο θέσεων που είναι μεγαλύτερες από 2 mm, μπορεί να είναι ένδειξη ασύμμετρης φόρτισης.

## ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ Ι – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

- 6) Κάθε μόνιμη παραμόρφωση του δείγματος μετά την αποφόρτιση, σημειώνεται στην έκθεση. Οι αποκλίσεις της αποκόλλησης από το ενδιάμεσο επίπεδο της πλάκας θα ακυρώσουν τα αποτελέσματα των δοκιμών και θα αναγραφούν στην αναφορά. Έπειτα, θα δοκιμαστεί ένα υποκατάστατο δείγμα.

Εάν χρησιμοποιείται μια εναλλακτική μέθοδος για την παρακολούθηση της ανάπτυξης αποκόλλησης, όπως οι μετρητές ανάπτυξης ρωγμής που συνδέονται με τα άκρα των δειγμάτων, θα πρέπει να συλλέγει δεδομένα σύμφωνα με τις αρχές, την ακρίβεια και τη μεγέθυνση όπως ορίζονται λεπτομερώς παραπάνω.

### 4.4.3 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Αρκετές τιμές έναρξης  $G_{Ic}$  μπορούν να προσδιοριστούν από τις καμπύλες φορτίου – μετατόπισης και να χρησιμοποιηθούν μαζί με τις μεταγενέστερες τιμές διάδοσης για τη δημιουργία της καμπύλης R. Οι τιμές  $G_{Ic}$  που αντιστοιχούν στα σημεία που απαριθμούνται κατωτέρω, καθορίζονται για τη δοκιμή από το starter film και από την προρωγμάτωση τύπου I για κάθε δείγμα. Αυτές οι τιμές έναρξης υποδεικνύονται σε μια τυπική καμπύλη R και περιγράφονται παρακάτω. Για κάθε μία από αυτές τις τεχνικές, το αρχικό μήκος αποκόλλησης,  $a_0$ , θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του  $G_{Ic}$ .

#### 4.4.3.1 Απόκλιση από την γραμμικότητα (NL)

Η τιμή έναρξης για το  $G_{Ic}$  θα υπολογιστεί από το φορτίο και τη μετατόπιση στο σημείο απόκλισης από τη γραμμικότητα ή από την εμφάνιση μη γραμμικότητας (NL). Ο υπολογισμός αυτός προϋποθέτει ότι η αποκόλληση αρχίζει να αυξάνεται από το insert στο εσωτερικό του δείγματος σε αυτό το σημείο. Η τιμή NL αντιπροσωπεύει μια χαμηλότερη οριακή τιμή για το  $G_{Ic}$ . Για τα σύνθετα ψαθυρής μήτρας, αυτό είναι συνήθως το ίδιο σημείο στο οποίο η αποκόλληση παρατηρείται να αυξάνεται από το insert στα άκρα του δείγματος. Ωστόσο, για σύνθετα δύσθραυστης μήτρας, μια περιοχή μη γραμμικής συμπεριφοράς μπορεί να προηγείται της οπτικής παρατήρησης της εμφάνισης αποκόλλησης στα άκρα των δειγμάτων, ακόμα και αν η καμπύλη αποφόρτισης είναι γραμμική.

#### **4.4.3.2 Οπτική παρατήρηση (VIS)**

Μια οπτική τιμή έναρξης για το  $G_{Ic}$  πρέπει να καταγράφεται, η οποία αντιστοιχεί στο φορτίο και τη μετατόπιση για το πρώτο σημείο, στο οποίο η αποκόλληση παρατηρείται οπτικά να αυξάνεται από το insert σε καθεμία άκρη, χρησιμοποιώντας το μικροσκόπιο ή τον καθρέφτη, ή και τα δύο.

#### **4.4.3.3 5 % offset/μέγιστο φορτίο (5%/max)**

Μια τιμή  $G_{Ic}$  μπορεί να υπολογιστεί με τον προσδιορισμό της τομής της καμπύλης φορτίου - εκτροπής, μόλις γίνει μη γραμμική, με μία γραμμή που προέρχεται από την αρχή των αξόνων και offset κατά 5% αύξηση της ενδοτικότητας από την αρχική γραμμική περιοχή της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης. Εάν η τομή συμβεί μετά το σημείο μέγιστο φόρτισης, το μέγιστο φορτίο θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό αυτής της τιμής.

## **4.5 Υπολογισμοί**

### **4.5.1 Υπολογισμοί IFT**

Τρεις μέθοδοι data reduction έχουν εκτιμηθεί για τον υπολογισμό των τιμών  $G_{Ic}$  κατά την διάρκεια των δοκιμών round-robin: η θεωρία τροποποιημένου δοκού (Modified Beam Theory - MBT), η μέθοδος βαθμονόμησης ενδοτικότητας (Compliance Calibration - CC) και η τροποποιημένη μέθοδος βαθμονόμησης ενδοτικότητας (Modified Compliance Calibration - MCC). Λόγω του ότι οι τιμές  $G_{Ic}$  που καθορίστηκαν από τις τρεις μεθόδους δεν διέφεραν περισσότερο από 3.1 %, καμία από τις τρεις δεν κυριαρχούσε των άλλων δύο. Ωστόσο, η MBT έδωσε τις πιο συντηρητικές τιμές  $G_{Ic}$  για το 80% των δειγμάτων που δοκιμάστηκαν. Έτσι, συνίσταται η MBT. Η μέθοδος εμβαδών δεν συνίσταται, διότι δεν θα δώσει τιμή έναρξης του  $G_{Ic}$  ή καμπύλη αντίστασης αποκόλλησης.

#### **4.5.1.1 Μέθοδος MBT**

Η σχέση θεωρίας δοκών για τον ρυθμό απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης μιας τέλει built – in δοκού διπλού προβόλου, είναι η εξής:

$$G_I = (3P\delta) / (2b\alpha) \quad [5]$$



## ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ Ι – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

όπου:

P = φορτίο

d= μετατόπιση σημείου φόρτισης

b = πάχος δείγματος

a = μήκος αποκόλλησης

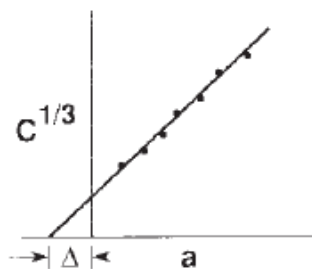
Στην πράξη, αυτή η σχέση θα υπερτιμήσει το  $G_I$ , επειδή η δοκός δεν είναι εντελώς built-in (μπορεί να υπάρξει περιστροφή στο μέτωπο αποκόλλησης). Ένας τρόπος διόρθωσης αυτής της περιστροφής, είναι να λογαριάσουμε το DCB σαν να είχε μια ελάχιστα μεγαλύτερη αποκόλληση,  $a + |\Delta|$ , όπου το  $\Delta$  μπορεί να καθοριστεί πειραματικά με δημιουργία καμπύλης ελαχίστων τετραγώνων της κυβικής ρίζας της ενδοτικότητας,  $C^{1/3}$ , συναρτήσεως του μήκους αποκόλλησης. Η ενδοτικότητα C, είναι ο λόγος της μετατόπισης του σημείου αποκόλλησης προς το εφαρμοζόμενο φορτίο,  $d/P$ . Οι τιμές που χρησιμοποιούνται για να παράγουν αυτήν την καμπύλη, πρέπει να είναι το φορτίο και οι μετατοπίσεις που αποκρίνονται στην ορατή έναρξη της αποκόλλησης στο άκρο και όλες οι τιμές διάδοσης. Η IFT τύπου I, υπολογίζεται ως εξής:

$$G_I = (3P\delta) / [2b(a+|\Delta|)] \quad [6]$$

Με αυτή την προσέγγιση, το μέτρο ελαστικότητας  $E_{If}$  υπολογίζεται ως εξής:

$$E_{If} = [64 (a + |\Delta|)^3 * P] / (\delta b h)^3 \quad [7]$$

Οι τιμές του  $E_{If}$  που λαμβάνονται, πρέπει να είναι ανεξάρτητες του μήκους αποκόλλησης. Ωστόσο, το  $E_{If}$  μπορεί να αυξηθεί με το μήκος αποκόλλησης, λόγω της γεφύρωσης ενίσχυσης.



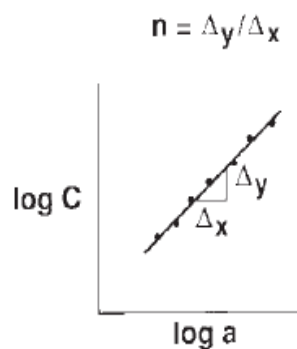
Εικόνα 20: Μέθοδος MBT.

## ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ Ι – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 4.5.1.2 Μέθοδος CC

Παράγουμε μια καμπύλη ελαχίστων τετραγώνων του  $\log (\delta_i/P_i)$  συναρτήσει του  $\log(a_i)$  χρησιμοποιώντας τις τιμές της ορατής έναρξης αποκόλλησης και όλες τις τιμές διάδοσης. Τραβάμε μια ευθεία γραμμή στα δεδομένα που οδηγεί στην καλύτερη δυνατή γραμμή ελαχίστων τετραγώνων. Υπολογίζουμε το  $n$  από την καμπύλη αυτής της γραμμής σύμφωνα με την σχέση  $n = \Delta y / \Delta x$ , όπου τα  $\Delta x$  και  $\Delta y$  προσδιορίζονται στην εικόνα 21. Υπολογίζουμε την IFT τύπου I ως εξής:

$$G_I = (nP\delta) / (2ba) \quad [8]$$



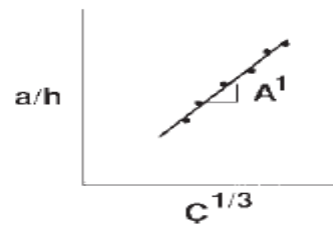
Εικόνα 21: Μέθοδος CC.

### 4.5.1.3 Μέθοδος MCC

Παράγουμε μια καμπύλη ελαχίστων τετραγώνων του μήκους αποκόλλησης ομαλοποιημένης από το πάχος του δείγματος,  $a/h$ , συναρτήσει της κυβικής ρίζας της ενδοτικότητας,  $C^{1/3}$ , όπως φαίνεται στην εικόνα 22, χρησιμοποιώντας τις τιμές της ορατής έναρξης αποκόλλησης και όλες τις τιμές διάδοσης. Η καμπύλη αυτής της γραμμής, συμβολίζεται ως  $A_1$ . Υπολογίζουμε την IFT τύπου I ως εξής:

$$G_I = (3P^2C^{2/3}) / (2A_1bh) \quad [9]$$

ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ Ι – ΠΕΙ-  
ΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



*Εικόνα 22: Μέθοδος MCC.*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

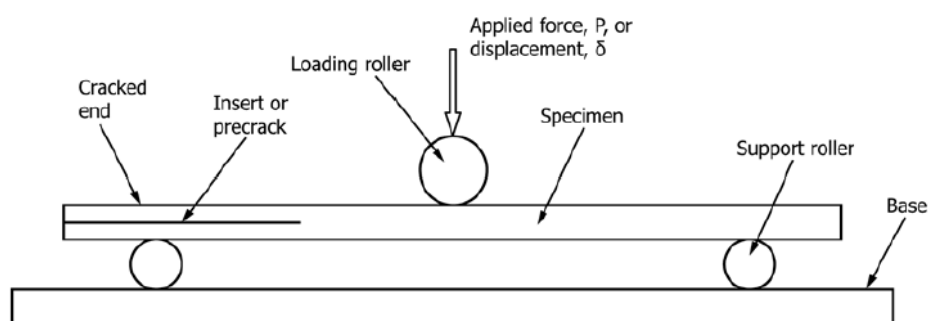
### ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ ΙΙ

#### 5.1 Περίληψη

Αυτή η πειραματική μέθοδος περιγράφει τον προσδιορισμό του τύπου ΙΙ της αντοχής σε διαστρωματική θραύση,  $G_{IIC}$ , των μονοδιεύθυντων πολύστρωτων υλικών πολυμερικής μήτρας υπό διατμητική φόρτιση, χρησιμοποιώντας τη δοκιμή end-notched flexure (ENF).

Η μέθοδος αυτή περιορίζεται στη χρήση με μονοδιεύθунτα CFRP και GFRP υλικά. Αυτό το περιορισμένο πεδίο εφαρμογής αντικατοπτρίζει την εμπειρία που έχει αποκτηθεί στις δοκιμές round - robin. Αυτή η πειραματική μέθοδος μπορεί να αποδειχθεί χρήσιμη για άλλους τύπους και κατηγορίες σύνθετων υλικών. Ωστόσο, έχουν παρατηρηθεί ορισμένες **παρεμβολές**.

Οι τιμές που δηλώνονται είτε στις μονάδες SI είτε στις μονάδες ίντσας - λιβρών πρόκειται να θεωρηθούν χωριστά ως πρότυπα. Οι τιμές που δηλώνονται σε κάθε σύστημα μπορεί να μην είναι ακριβώς ισοδύναμες. Ως εκ τούτου, κάθε σύστημα πρέπει να χρησιμοποιείται ανεξάρτητα από το άλλο. Ο συνδυασμός τιμών από τα δύο συστήματα, μπορεί να οδηγήσει σε μη τήρηση του προτύπου.



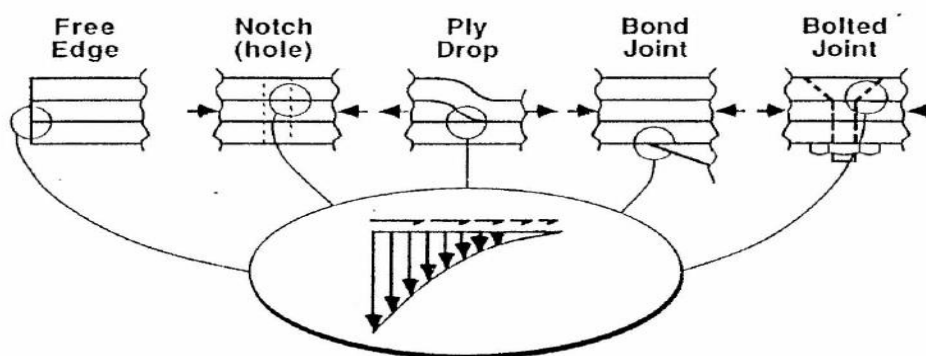
Εικόνα 23: Δοκιμαστικό εξάρτημα ENF και νομενκλατούρα δείγματος.

## 5.2 Εισαγωγή

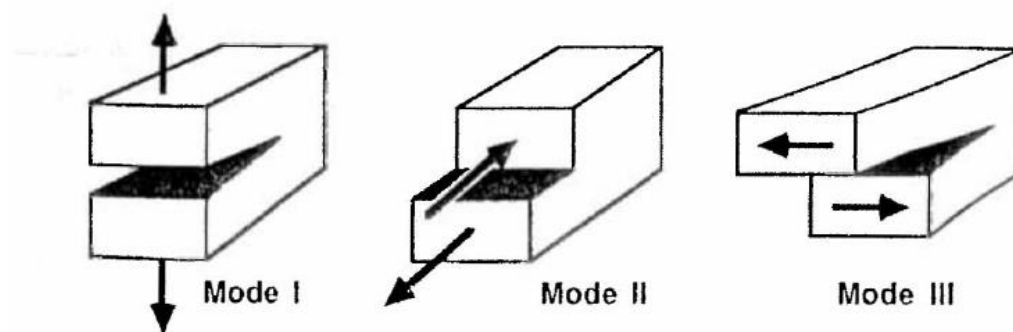
Η ανώτερη ειδική αντοχή και ακαμψία σε συνδυασμό με την ικανότητα του σχεδιαστή να ενισχύει επιλεκτικά “μονοπάτια” κρίσιμου φορτίου, έκαναν τα σύνθετα υλικά ιδανικά για weight critical κατασκευές. Τα πολύστρωτα CFRP ωστόσο, είναι ευαίσθητα σε έναρξη και διάδοση ρωγμής στο resin - rich στρώμα μεταξύ των υπόλοιπων στρωμάτων. Αυτές οι ρωγμές, που συνήθως αναφέρονται ως αποκολλήσεις, είναι μία από τους επικρατέστερους τρόπους περιορισμού ζωής των πολύστρωτων κατασκευών. Οι αποκολλήσεις μπορούν να συμβούν κατά την επεξεργασία ή κατά την διάρκεια μεταγενέστερων συνθηκών λειτουργίας. Κοινά κατασκευαστικά στοιχεία, τα οποία φαίνονται στην εικόνα 24, παράγουν συγκεντρώσεις διαστρωματικής τάσης οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν αποκόλληση μέσω στατικών φορτίσεων ή φορτίσεων κόπωσης. Η ανάπτυξη της ρωγμής, μπορεί να προκαλέσει σημαντική μείωση στην ακαμψία και την αντοχή και πιθανότατα να οδηγήσει σε καταστροφή της κατασκευής. Αυτός είναι ένας σημαντικός λόγος που εξηγεί γιατί η χρήση των σύνθετων στο παρελθόν έχει περιοριστεί σημαντικά σε δευτερεύοντα δομικά στοιχεία.

Οι τωρινές εφαρμογές ωστόσο, περιλαμβάνουν την χρήση πολυμερών σύνθετων σε στοιχεία που φέρουν φορτίο. Αυτές οι κατασκευές θα υποβληθούν σε τρισδιάστατα “μονοπάτια φόρτισης”, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν ανάπτυξη της ρωγμής. Η διαστρωματική θραυστομηχανική, αντιπροσωπεύει μια προσέγγιση για εκτίμηση για ανοχή βλάβης σε σύνθετες κατασκευές. Γενικά, μια αποκόλληση θα υποβληθεί σε μια μίξη δυνάμεων διάδοσης ρωγμής (τύπου I, II και III), όπως φαίνεται στην εικόνα 25.

Ιστορικά, η περισσότερη προσοχή έχει δοθεί στην ανάπτυξη αποκόλλησης τύπου I για εκτίμηση της κρισιμότητας ελαττωμάτων. Τα σύνθετα πρώτης γενιάς, επέδειξαν χαμηλή δυσθραυστότητα σε θραύση τύπου I και ήταν ευαίσθητα σε αποκόλληση κυρίως όταν υπόκεινταν σε διαστρωματικές normal τάσεις. Το δείγμα DCB χρησιμοποιήθηκε εκτεταμένα για εκτίμηση του κρίσιμου ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης τύπου I.



**Εικόνα 24:** Κοινά κατασκευαστικά στοιχεία, τα οποία δημιουργούν συγκέντρωση διαστρωματικής τάσης.

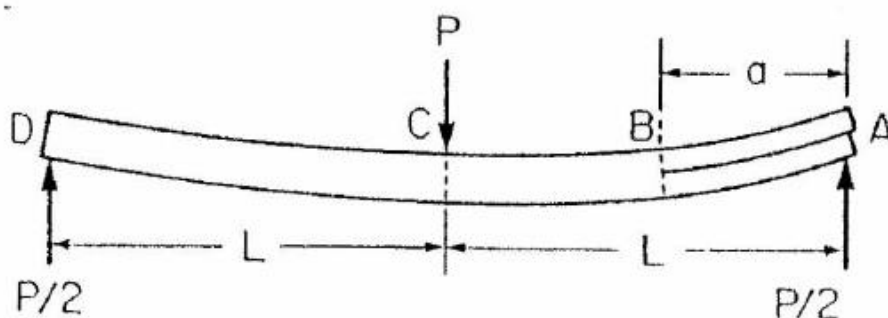


Εικόνα 25: Τρόποι διάδοσης διαστρωματικής ρωγμής.

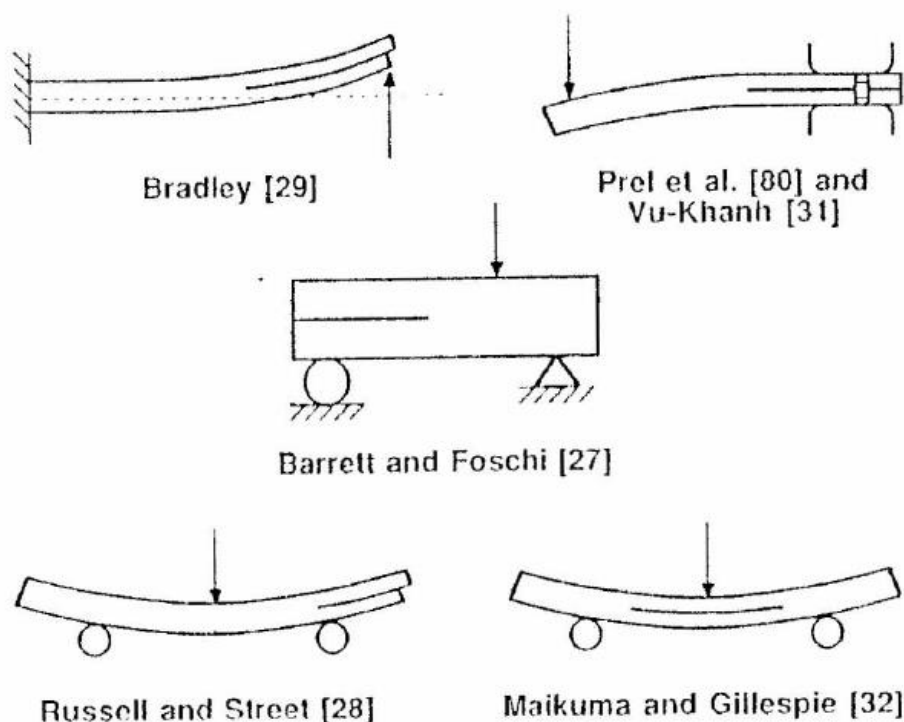
### 5.3 Ιστορικό υπόβαθρο

Από ιστορικής πλευράς, η πειραματική μέθοδος SBS (Short Beam Shear), ήταν ίσως η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για να μελετήσει την αντοχή σε διαστρωματική θραύση. Παρουσιάστηκε την δεκαετία του '60 και είναι μέχρι σήμερα σημαντική μέθοδος ποιοτικού ελέγχου. Ωστόσο, έχει και κάποιους περιορισμούς. Ο χαμηλός λόγος μήκους/πάχους, σε συνδυασμό με διαταραχές στην κατανομή των τάσεων λόγω εισαγωγής φορτίου το οποίο δεν φθίνει γρήγορα στα ορθότροπα υλικά, παραβιάζει τη θεωρία δοκών με βάση το σχέδιο data reduction και προωθεί εναλλακτικούς τρόπους αστοχίας. Κατά συνέπεια, η μέθοδος SBS μετρά την προφανή διαστρωματική αντοχή σε διάτμηση του σύνθετου.

Η κλασική γραμμική ελαστική θραυστομηχανική (LEFM) έχει χρησιμοποιηθεί πιο πρόσφατα για να χαρακτηρίσει την αντοχή σε διαστρωματική θραύση των σύνθετων υλικών. Σε αντίθεση με την πειραματική μέθοδο SBS, οι καλά καθορισμένες αποκολλησεις ενσωματώνονται ή κατεργάζονται στο πειραματικό δείγμα. Οι Barrett και Foschi χρησιμοποίησαν το δείγμα ENF για να χαρακτηρίσουν την IFT τύπου ΙΙ ραγισμένων ξύλινων δοκών το 1977. Το 1982, οι Russell και Street χρησιμοποίησαν το δείγμα για να χαρακτηρίσουν τους κρίσιμους ρυθμούς απελευθέρωσης ενέργειας των προηγμένων σύνθετων. Η γεωμετρία του δείγματος ENF, είναι ουσιαστικά ένα δείγμα κάμψης τριών σημείων με ενσωματωμένη αποκόλληση διά μέσου του πλάτους στην μέση επιφάνεια της πλάκας. Η αποκόλληση τοποθετείται στο τέλος του δείγματος για να “φιλοξενήσει” την ολισθαίνουσα παραμόρφωση των υποστρωμάτων που προκύπτουν από την καμπτική φόρτιση. Ένα τυπικό δείγμα ENF είναι 25 mm πλάτος, 100 mm μήκος και 3 - 4 mm πάχος.



Εικόνα 26: Γεωμετρία δείγματος ENF.

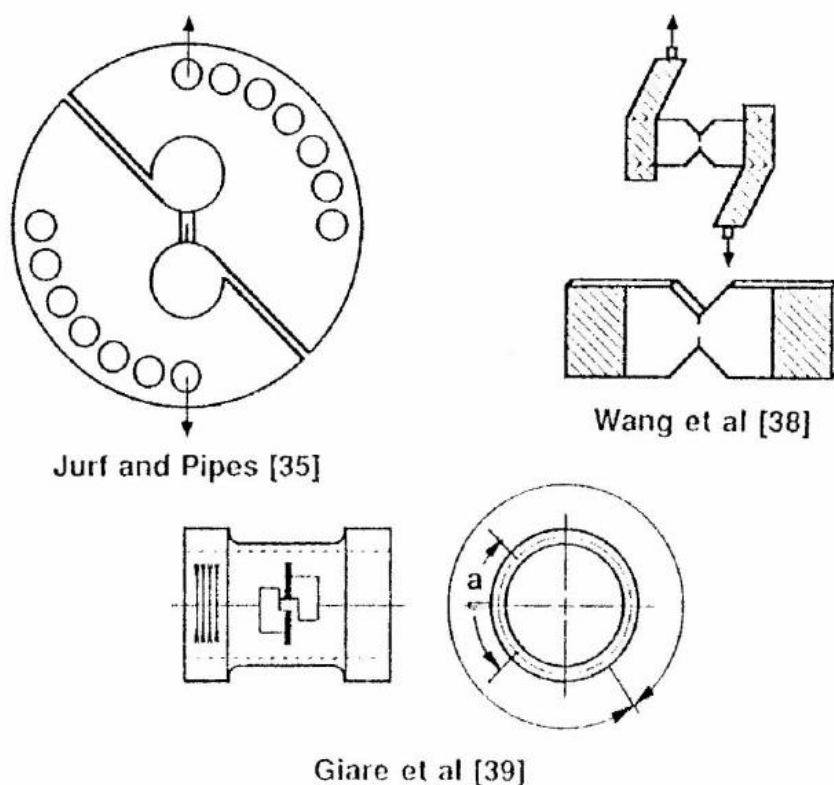


Εικόνα 27: Δείγματα κάμψης για την δοκιμή IFT τύπου ΙΙ.

Πρέπει να σημειωθεί, ότι έχουν προταθεί διάφορα εναλλακτικά δείγματα για το πείραμα τύπου ΙΙ. Το '86, ο Bradley, παρουσίασε το End – Loaded Split (ELS). Ο Prel και άλλοι, παρουσίασαν το Candilever Beam Enclosed Notch (CBEN) το '85. Ο Vu-Khanh επίσης χρησιμοποίησε το CBEN το '87, όταν διεξήγαγε τη μελέτη crack-arrest study τύπου ΙΙ. Ο Maikuma και άλλοι, εισήγαγαν το δείγμα Center Notch Flexural (CNF) το '88, ώστε να μελετήσουν την IFT τύπου ΙΙ υπό στατικά και κρουστικά φορτία. Τα δείγματα κάμψης είναι όλα γεωμετρικά παρόμοια, όπως φαίνεται στην εικόνα 27.

Η δοκιμή θραύσης τύπου II, δεν έχει περιοριστεί σε γεωμετρίες καμπτικών δειγμάτων. Η μέθοδος Arkan η οποία χρησιμοποιήθηκε για μελέτες διαξονικών τάσεων, τροποποιήθηκε από τους Jurf και Pipes για να διερευνήσει απλή και μικτή IFT. Τροποποιήσεις της δοκιμής διάτμησης Ioserescu για την παραγωγή δεδομένων θραύσης, προτάθηκαν το '84 από τον Wang και άλλους. Το '87, ο Giare και άλλοι, ερεύνησαν την IFT τύπου II των UD σύνθετων γραφίτη/εποξικών, χρησιμοποιώντας ένα λεπτό κυλινδρικό δείγμα που υπόκειται σε στρέψη.

Αν και αυτά τα δείγματα έχουν πλεονεκτήματα σε σχέση με το δείγμα ENF σε ορισμένες περιπτώσεις, το ENF έχει αναδειχθεί ως το καταλληλότερο για το πείραμα τύπου II. Είναι εύκολο να κατασκευαστεί, η test fixturing είναι απλή όπως και η μεθοδολογία data reduction. Για τους λόγους αυτούς, το δείγμα ENF αξιολογείται ως πρότυπο από το ASTM D-30. Κατά συνέπεια, το υπόλοιπο του παρόντος κεφαλαίου θα ασχολείται αποκλειστικά με την θραύση και την πειραματική μηχανική που σχετίζονται με το δείγμα ENF.



**Εικόνα 28:** Εναλλακτικά δείγματα κάμψης.



## 5.4 Σημαντικότητα του πειράματος

Η ευαισθησία στην αποκόλληση των στρωμάτων, είναι μία από τις μεγαλύτερες αδυναμίες πολλών σύνθετων κατασκευών. Η γνώση της αντίστασης στην διαστρωματική θραύση αυτών των υλικών, είναι χρήσιμη για την ανάπτυξη προϊόντων και την επιλογή υλικών. Επιπλέον, η μέτρηση της διαστρωματικής αντοχής σε θραύση, ανεξάρτητη της γεωμετρίας του κομματιού ή της μεθόδου φόρτισης, είναι χρήσιμη για τον καθορισμό των οριακών μεγεθών που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση ανοχής βλάβης σύνθετων κατασκευών από τέτοια υλικά. Η γνώση της προραγισμένης αλλά και της μη προραγισμένης δυσθραυστότητας, μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε την κατάλληλη τιμή για την εφαρμογή που μας ενδιαφέρει.

Αυτή η πειραματική μέθοδος εξυπηρετεί τους εξής σκοπούς:

- Να καθιερώσει ποσοτικά την επίδραση της επίδραση της “θεραπείας” στην επιφάνεια των ινών, των τοπικών διακυμάνσεων στην περιεκτικότητα ινών στο υλικό και των περιβαλλοντικών μεταβλητών σε  $G_{Ic}$  ενός συγκεκριμένου σύνθετου υλικού.
- Να συγκρίνει ποσοτικά τις σχετικές τιμές του  $G_{Ic}$  για σύνθετα υλικά με διαφορετικά συστατικά.
- Να συγκρίνει ποσοτικά τις τιμές του  $G_{Ic}$ , οι οποίες έχουν ληφθεί από διαφορετικές παρτίδες ενός συγκεκριμένου σύνθετου, για παράδειγμα για χρήση ως κριτήριο ελέγχου υλικού και
- Να αναπτύξει κριτήρια αστοχίας αποκόλλησης για ανοχή σε σύνθετη βλάβη και ανάλυση αντοχής (durability).

## 5.5 Ορισμοί και σύμβολα

- **Μέθοδος βαθμονόμησης ενδοτικότητας (CC)** = η μέθοδος data reduction όταν η σχέση μεταξύ της ενδοτικότητας του δείγματος [ $T^2/M$ ] και του μήκους αποκόλλησης [ $L$ ] προσδιορίζεται πριν από το πείραμα με τη μέτρηση της ενδοτικότητας του δείγματος [ $T^2/M$ ] σε πολλαπλά προσομοιωμένα μήκη αποκόλλησης.
- **Διαστρωματική αντοχή σε θραύση τύπου II,  $G_{Ic}$  [ $M/T^2$ ]** = η κρίσιμη τιμή του ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης,  $G$ , [ $M/T^2$ ] για διάδοση αποκόλλησης [ $L$ ] λόγω μιας επίπεδης διατμητικής δύναμης [ $M/T^2$ ] ή μετατόπισης [ $L$ ] προσανατολισμένη κάθετα προς το μέτωπο αποκόλλησης.
- **Μη προραγισμένη (NPC) δυσθραυστότητα [ $M/T^2$ ]** = μια τιμή δυσθραυστότητας σε διαστρωματική θραύση, που καθορίζεται από το προεμφυτευμένο insert.

- **Προραγισμένη (PC) δυσθραυστότητα**  $[M/T^2]$  = μια τιμή δυσθραυστότητας σε διαστρωματική θραύση, που καθορίζεται αφού η αποκόλληση έχει προχωρήσει από το προεμφυτευμένο insert.
- **Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης,  $G[M/T^2]$**  = η απώλεια ενέργειας παραμόρφωσης,  $dU [ML^2/T^2]$ , στο πειραματικό δείγμα ανά μονάδα πλάτους δείγματος  $[L]$  για μια απειροελάχιστη αύξηση του μήκους αποκόλλησης,  $da, [L]$ , για μια αποκόλληση που αναπτύσσεται self – similarly κάτω από σταθερή μετατόπιση  $[L]$ . Σε μαθηματική μορφή:

$$G = - (1/B) * (dU/da) \quad [1]$$

όπου:

U = ολική ελαστική παραμόρφωση στο δείγμα

$a$  = μήκος αποκόλλησης

B = πλάτος δείγματος

**Σύμβολα:**

- A = τομή της γραμμικής προσαρμογής της ενδοτικότητας συναρτήσει των δεδομένων του κυβικού μήκους ρωγμής
- $a$  = μήκος αποκόλλησης
- $a_i$  = μήκος insert στο τριμαρισμένο δείγμα
- $a_j$  = το μήκος ρωγμής  $j^{th}$  που χρησιμοποιείται κατά τη βαθμονόμηση ενδοτικότητας ( $j=1,2$ )
- $a_0$  = μήκος αποκόλλησης που χρησιμοποιείται στο πείραμα θραύσης
- $a_{calc}$  = μήκος ρωγμής υπολογισμένο από μια καμπύλη αποφόρτισης μετά το πείραμα NPC
- $a_{vis}$  = οπτικά καθορισμένο μήκος ρωγμής μετά το πείραμα NPC
- B = πλάτος δείγματος
- C = ενδοτικότητα δείγματος
- $C_0$  = ενδοτικότητα δείγματος κατά την φόρτιση του πειράματος θραύσης
- $C_u$  = ενδοτικότητα δείγματος από την αποφόρτιση μετά το πείραμα NPC
- $\delta$  = μετατόπιση του κυλίνδρου φόρτισης κατά την διάρκεια του πειράματος, κάθετου στο επίπεδο του δείγματος
- $E_{If}$  = μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη του δείγματος
- G = ολικός ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης
- $G_{iic}$  = διαστρωματική αντοχή σε θραύση τύπου II
- $G_Q$  = candidate διαστρωματική αντοχή σε θραύση τύπου II
- %  $G_Q$  = μέγιστο ποσοστό που επιτεύχθηκε κατά την βαθμονόμηση ενδοτικότητας
- h = μισό πάχος του δείγματος
- L = μισό μήκος του δείγματος

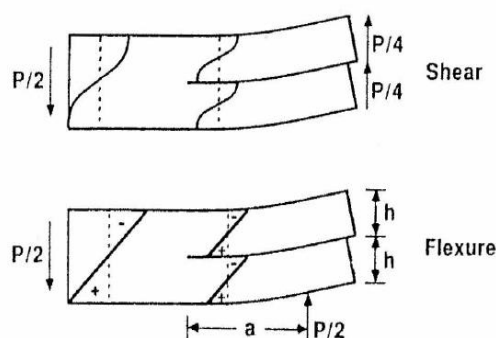
- $L_c$  = απόσταση από το κέντρο του κυλίνδρου στήριξης στο ραγισμένο άκρο του δείγματος μέχρι το ραγισμένο άκρο
- $L_u$  = απόσταση από το κέντρο του κυλίνδρου στήριξης στο μη ραγισμένο άκρο του δείγματος μέχρι το μη ραγισμένο άκρο
- $m$  = καμπύλη
- $P$  = δύναμη που εφαρμόζεται στον κεντρικό κύλινδρο φόρτισης κάθετη στο επίπεδο του δείγματος
- $P_c$  = κρίσιμο φορτίο για την θραύση τύπου II
- $P_j$  = η δύναμη βαθμονόμησης ενδοτικότητας που χρησιμοποιείται σε μήκος ρωγμής  $a_j$
- $P_{max}$  = μέγιστη τιμή φορτίου στην καμπύλη φορτίου – μετατόπισης
- $r_1$  = ακτίνα του κυλίνδρου φόρτισης
- $r_2$  = ακτίνα των κυλίνδρων στήριξης
- $r^2$  = συντελεστής συσχέτισης γραμμικής προσέγγισης ενδοτικότητας συναρτήσει του κυβικού μήκους ρωγμής
- $\Delta s$  = μέγιστη μετρούμενη διαφορά στο μήκος ρωγμής κατά μήκος του μετώπου αποκόλλησης της προρωγμάτωσης
- $U$  = ολική ελαστική ενέργεια στο δείγμα

## 5.6 Αναλυτικές προσεγγίσεις

Το δείγμα ENF που φαίνεται στην εικόνα 26, υποβάλλεται σε εγκάρσια διάτμηση και σε καμπτικές φορτίσεις. Κάθε τύπος φόρτισης, ανταποκρίνεται σε έναν σημαντικό μηχανισμό που παράγει οδηγούς δυνάμεις ρωγμής στο άκρο της ρωγμής. Στην εικόνα 29, φαίνεται η αποκολλημένη περιοχή του δείγματος. Η παρουσία των εγκάρσιων διατμητικών δυνάμεων, παράγει διαστρωματικές διατμητικές τάσεις που αλλοιώνουν την διατομή της δοκού. Αυτή η αλλοίωση φαίνεται στην εικόνα 29 και συνεισφέρει στην οδηγό δύναμη ρωγμής. Ωστόσο, ο κυρίαρχος μηχανισμός ανταποκρίνεται στην σχετική ολισθητική παραμόρφωση (εμπρόσθια διάτμηση) μεταξύ των αποκολλημένων υποστρωμάτων, η οποία επάγεται από το πλευρικό φορτίο που ασκείται στο κέντρο. Εναλλακτικά, σημειώνουμε ότι οι καμπτικές τάσεις στην διεπιφάνεια, είναι εφελκυστικές στο άνω μέρος της δοκού και θλιπτικές στο κάτω. Στην ακμή της ρωγμής, αυτή η ασυνέχεια της τάσης εξαλείφεται από την παρουσία της singularity διαστρωματικής διατμητικής τάσης συσχετισμένης με την διάδοση ρωγμής τύπου II.

Ο καμπτικός μηχανισμός, ευαίσθητος στις παραμέτρους που αυξάνουν την καμπτική παραμόρφωση, σχετίζεται σημαντικά με το μήκος ρωγμής, το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη και το πάχος του δείγματος. Ο μηχανισμός της εγκάρσιας διατμητικής δύναμης, εξαρτάται σημαντικά από τον λόγο πάχος δείγματος/μήκος ρωγμής και από το μέτρο ελαστικότητας σε διαστρωματική διάτμηση του υλικού.

Η μηχανική της γεωμετρίας ENF, είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη, λόγω της παρουσίας ρωγμής σε ένα πεπερασμένο πεδίο ορισμού.



Εικόνα 29: Μηχανισμοί της οδηγού δύναμης ρωγμής τύπου II.

## 5.7 Ανάλυση θεωρίας δοκών

Η ανάλυση θεωρίας δοκών που περιγράφεται σε αυτήν την παράγραφο, βασίζεται στο μοντέλο των Carlsson, Gillespie και Pipes. Το μοντέλο βασίζεται σε μια θεωρία διατμητικής παραμόρφωσης στην μη ραγισμένη περιοχή του δείγματος και σε μια λύση προσεγγιστικής ελαστικότητας μιας end loaded δοκού προβόλου. Ένα από τα μοναδικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα αυτού του προτύπου, είναι ότι τα άκρα των αποκολλημένων δοκών υποτίθεται ότι στρεβλώνουν ελεύθερα με την εφαρμογή των διατμητικών τάσεων. Αυτός είναι ένας ιδεαλισμός που μοντελοποιεί την παραμόρφωση που συνδέεται με stress singularity, με τον μηχανισμό εγκάρσιας διατμητικής δύναμης και την elastic built in διατομή στα άκρα των αποκολλημένων δοκών.

Η τριβή μπορεί να είναι μηχανισμός σκέδασης ενέργειας σε συνδυασμό με την δημιουργία νέας επιφάνειας ρωγμής. Όπως φαίνεται στην εικ. 26, το φορτίο πρέπει να μεταφέρεται από το κάτω μέρος της δοκού στο άνω μέρος της περιοχής αποκόλλησης στη δεξιά υποστήριξη. Η κάμψη της δοκού, προκαλεί την ολίσθηση των επιφανειών ρωγμής και σημαντική τριβή μεταξύ των επιφανειών αυτών μπορεί να σκεδάσει ενέργεια η οποία πρέπει να ληφθεί υπόψιν στην ανάλυση. Η μεταφορά φορτίων μεταξύ των δοκών, είναι ένα αρκετά πολύπλοκο πρόβλημα. Θα επιδιωχθεί μια απλουστευμένη προσέγγιση στην ανάλυση θεωρίας δοκών που παρουσιάζεται σε αυτήν την ενότητα. Επίσης συζητούνται η σταθερότητα της ανάπτυξης ρωγμών και προϋποθέσεις σχεδιασμού δειγμάτων βασισμένων στο μοντέλο.

### 5.7.1 Ενδοτικότητα

Απαιτείται μια αναλυτική σχέση για την ενδοτικότητα του δείγματος ENF για τον προσδιορισμό του ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης, με διαφόριση ως προς το μήκος ρωγμής. Η αρχική ανάλυση θεωρίας δοκών της γεωμετρίας ENF, δεν ενσωμάτωσε την διατμητική παραμόρφωση στην διατύπωση. Η ενσωμάτωση της εγκάρσιας διατμητικής παραμόρφωσης, παρέχει ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο για προηγμένα σύνθετα που τυπικά έχουν μικρή διαστρωματική διατμητική ακαμψία. Εδώ θα παρουσιαστεί το μοντέλο των Carlsson, Gillespie και Pipes. Η ενδοτικότητα του δείγματος ENF, ορίζεται ως ο λόγος της μετατόπισης  $\delta$  στον κεντρικό πείρο φόρτισης προς το εφαρμοζόμενο φορτίο  $P$ . Με βάση την εικόνα 30, το  $\delta$ , μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\delta = \frac{1}{2} (\Delta_{AB} + \Delta_{BC} + \Delta_{CD}) \quad [2]$$

Οι δοκοί BC και CD, μοντελοποιούνται ως δοκοί πρόβολοι, με βάση την υπόθεση ότι η διατομή στο C δεν στρεβλώνει, λόγω του ότι είναι προσεγγιστική γραμμή συμμετρίας. Κάθε δοκός έχει μέτρο ελαστικότητας  $E_1$ , μέτρο ελαστικότητας σε διαστρωματική διάτμηση  $G_{13}$ , πάχος  $2h$  και πλάτος  $w$ . Οι εξισώσεις για τις  $\Delta_{BC}$  και  $\Delta_{CD}$ , μπορούν να ληφθούν από τη θεωρία δοκών του Timoshenko.

Για την αποκολλημένη περιοχή AB, η μετατόπιση  $\Delta_{AB}$  έχει δύο στοιχεία: ένα λόγω των καμπτικών και διατμητικών παραμορφώσεων των δοκών και το άλλο λόγω της περιστροφής του άκαμπτου σώματος της διατομής στο σημείο B. Σε αυτή την ανάλυση, τα άκρα των παράλληλων δοκών υποτίθεται ότι μπορούν να παραμορφώνονται ελεύθερα, υπό την δράση της διατμητικής τάσης.

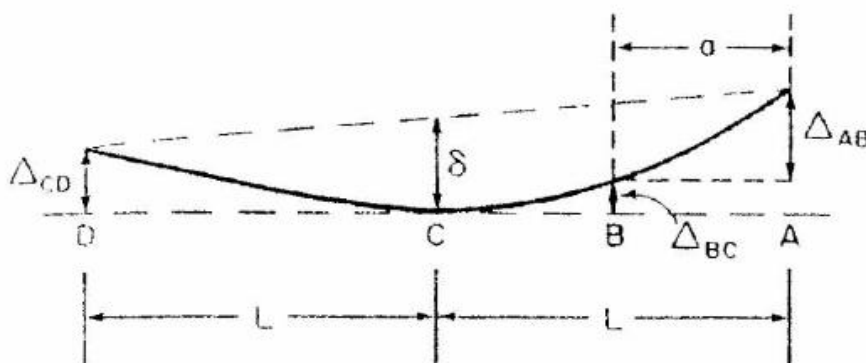
Με βάση την υπόθεση της μικρής εκτροπής, όλες οι πηγές μετατόπισης μπορούν να αντικατασταθούν στην εξίσωση [3], ώστε να πάρουμε την ενδοτικότητα  $C_{SH} = \delta/P$  του δείγματος ENF, συμπεριλαμβανομένου της διατμητικής παραμόρφωσης.

$$C_{SH} = (2L^3 + 3\alpha^3) / (8E_1wh^3) * \{1 + [2(1.2L + 0.9\alpha) h^2E_1] / [(2L^3 + 3\alpha^3) G_{13}]\} \quad [3]$$

Για υλικά με μεγάλη διατμητική ακαμψία και μικρό λόγο πάχους/μήκος ρωγμής, η εξίσωση [3] απλοποιείται στην εξίσωση της κλασικής θεωρίας δοκών για την ενδοτικότητα  $C_{BF}$ , που δίνεται από τους Russell και Street:

$$C_{BF} = (2L^3 + 3\alpha^3) / (8E_1wh^3) \quad [4]$$

όπου  $L$  είναι το μισό μήκος.



**Εικόνα 30:** Νομενκλατούρα του δείγματος ENF: θεωρία δοκών διατμητικής παραμόρφωσης.

### 5.7.2 Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης

Όταν ληφθεί η σχέση της ενδοτικότητας, ο ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης εκτιμάται με διαφόριση της σχέσης ως προς το μήκος ρωγμής:

$$G = (P^2/2w) * (dC/da) \quad [5]$$

$$G_{II}^{SH} = [(9\alpha^2 P^2) / (16E_1 w^2 h^3)] * [1 + 0.2 (E_1/G_{13}) (h/\alpha)^2] \quad [6]$$

όπου το II σημαίνει ότι το πείραμα ENF είναι καθαρά δοκιμή τύπου II. Το SH δηλώνει ότι στον ρυθμό απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης συμπεριλαμβάνεται και η διατμητική παραμόρφωση (shear deformation).

Για υλικά και γεωμετρίες που καταλήγουν σε μικρές τιμές της ποσότητας  $(E_1/G_{13}) * (h/\alpha)^2$ , η εξίσωση [6] απλοποιείται στην μορφή των Russell και Street:

$$G_{II}^{BT} = [(9\alpha^2 P^2) / (16E_1 w^2 h^3)] \quad [7]$$

όπου το BT σημαίνει κλασσική θεωρία δοκών.

Οι εξισώσεις [4] και [7] που βασίζονται στην κλασσική θεωρία δοκών, δίνουν την δυνατότητα για μη - διαστασιοποίηση των σχέσεων ενδοτικότητας ([3]) και ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης ([6]), επιτρέποντας την ποσοτικοποίηση της διατμητικής παραμόρφωσης. Έτσι:

$$C_{SH} / C_{BT} = 1 + [2(1.2L + 0.9\alpha) h^2] / (2L^3 + 3\alpha^3) (E_1 / G_{13}) \quad [8]$$

$$G_{II}^{SH} / G_{II}^{BT} = 1 + 0.2 (E_1/G_{13}) (h/\alpha)^2 \quad [9]$$

Ο πίνακας 17 δείχνει την επιρροή της διαστρωματικής διάτμησης στην ενδοτικότητα και στον ρυθμό απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης για τυπικές γεωμετρίες ENF ( $\alpha/L = 0.5$ ). Το λάθος που επάγεται με παραμέληση της διατμητικής παραμόρφωσης, μπορεί να είναι σημαντικό για παχιές δοκούς με χαμηλή διατμητική ακαμψία. Η επιρροή της διατμητικής παραμόρφωσης, γίνεται αυξανόμενα σημαντική για μικρότερα μήκη ρωγμής ([9]).

$L$ (mm)	$a$ (mm)	$h$ (mm)	$E_1/G_{13}$	$C_{SH}/C_{BT}$	$G_{II}^{SH}/G_{II}^{BT}$
50.8	25.4	1.52	18.3	1.023	1.013
50.8	25.4	1.52	26.9	1.034	1.019
38.1	19.3	1.52	18.3	1.041	1.023
38.1	19.3	1.52	26.9	1.060	1.033
38.1	19.3	2.61	12.8	1.084	1.047
38.1	19.3	2.61	25.7	1.168	1.094

**Πίνακας 17:** Επιρροή της διαστρωματικής διατμητικής παραμόρφωσης στην ενδοτικότητα και στον ρυθμό απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης του δείγματος ENF.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>**

### *ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ ΙΙ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ*

---

#### **6.1 Περιγραφή της πειραματικής μεθόδου**

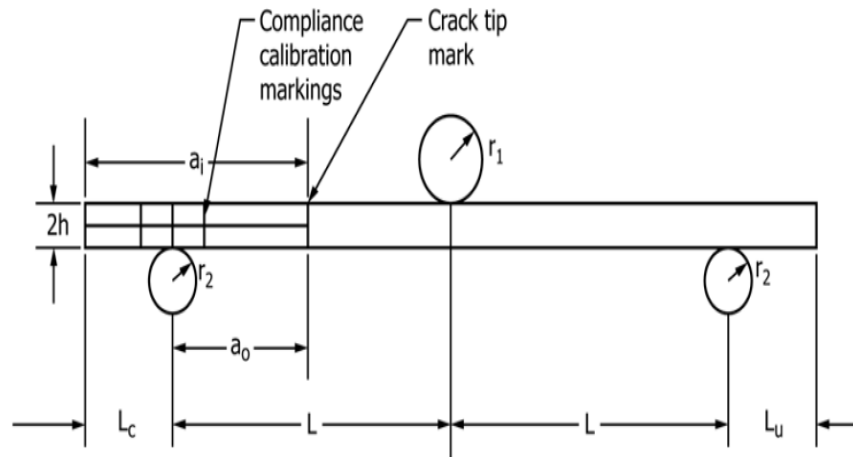
Το δείγμα ENF είναι στην ουσία ένα ορθογώνιο κομμάτι ομοιόμορφου πάχους, μονοδιεύθυντων ινών, όπου περιέχει ένα έξτρα κομμάτι στο κέντρο του (insert), το οποίο θα χρησιμεύσει για την έναρξη της αποκόλλησης. Οι δυνάμεις θα εφαρμοστούν στην πλάκα μέσω ενός εξαρτήματος ENF, μέσω φόρτισης με έλεγχο μετατόπισης.

Η ανάπτυξη αποκόλλησης δεν είναι σταθερή στο πείραμα ENF. Μια μέθοδος παρουσιάζεται, έτσι ώστε οι τιμές έναρξης της διαστρωματικής αντοχής σε θραύση τύπου ΙΙ, λαμβάνονται από το προεμφυτευμένο insert καθώς επίσης και από μία προρωγμάτωση.

Μία καταγραφή της μετατόπισης του κεντρικού κυλίνδρου πρόκειται να ληφθεί χρησιμοποιώντας ένα όργανο καταγραφής x-y ή μια παρόμοια συσκευή πραγματικού χρόνου, ειδάλλως μπορεί να ληφθεί και να αποθηκευτεί ψηφιακά. Η διαστρωματική αντοχή σε θραύση τύπου ΙΙ,  $G_{IIc}$ , επιτυγχάνεται με τη μέθοδο βαθμονόμησης ενδοτικότητας (CC). Αυτή είναι η μόνη αποδεκτή μέθοδος data reduction για το πείραμα αυτό.

Το πρότυπο αυτό αναλύει την εκτέλεση της προρωγμάτωσης τύπου ΙΙ και περιγράφεται μια συνιστώμενη μέθοδος. Άλλες μέθοδοι προρωγμάτωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν, υπό τον όρο ότι μια καταγραφή του σχήματος του προραγισμένου μετώπου αποκόλλησης λαμβάνεται πριν από τη δοκιμή PC. Οι μέθοδοι προρωγμάτωσης που αφήνουν συνήθως τα μπροστινά σημάδια ρωγμών για την αξιολόγηση μετά το πείραμα αυτών των τιμών, περιλαμβάνουν τον τύπο Ι και τον τύπο κόπωσης ΙΙ.





Εικόνα 31: Δείγμα ENF, σταθερό εξάρτημα και διαστάσεις.

## 6.2 Παρεμβολές

Υποθέτουμε γραμμική ελαστική συμπεριφορά στον υπολογισμό του  $G$  που χρησιμοποιείται σε αυτή τη μέθοδο. Αυτή η υπόθεση είναι έγκυρη, όταν η ζώνη βλάβης ή η μη γραμμική παραμόρφωση στο μέτωπο αποκόλλησης, ή και τα δύο, είναι μικρή σχετικά με την μικρότερη διάσταση του δείγματος, η οποία τυπικά είναι το πάχος για το πείραμα ENF.

Το  $G_{IIc}$  λαμβάνεται και για τα προραγισμένα αλλά και για τα μη προραγισμένα δείγματα, με βάση το σημείο μέγιστης φόρτισης. Αν επιθυμούμε, μπορούμε να λάβουμε το  $G_{IIc}$  με βάση το μη γραμμικό σημείο φόρτισης ή άλλες μετρήσεις, όπως το compliance offset.

Οι τρεις μύτες φόρτισης στο σταθερό εξάρτημα του πειράματος, μπορεί να είναι σταθερές, περιστρεφόμενες ή κυλιόμενες. Συνιστώνται σταθερές μύτες ή πείροι στηριζόμενοι σε v-groove. Οι μύτες φόρτισης πρέπει να έρχονται σε επαφή με το δείγμα ομοιόμορφα κατά την διεύθυνση του πλάτους του. Ανομοιόμορφη επαφή, μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα, κυρίως λόγω ανομοιόμορφης φόρτισης κατά πλάτος του δείγματος. Οι φόρμουλες που χρησιμοποιούνται σε αυτό το πρότυπο, υποθέτουν ομοιόμορφη γραμμική φόρτιση κατά πλάτος όλου του δείγματος στη μύτη φόρτισης και στις στηρίξεις του δείγματος.

Για πολύ δύθραυστα σύνθετα, μεγάλες παραμορφώσεις στην αρχή της διάδοσης αποκόλλησης μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια του πειράματος ENF. Για τυπικά μονοδιεύθοντα CFRP και GFRP σύνθετα, έχειδειχθεί ότι η συνδυασμένη επίδραση της τριβής και των γεωμετρικών μη-γραμμικοτήτων, θα επηρεάσει την ακρίβεια της συνιστώμενης προσέγγισης κατά περίπου 2.5% ή λιγότερο για τα GFRP με δυσθραυστότητες μέχρι  $1.45 \text{ kJ/m}^2$  και 3% για τα CFRP με δυσθραυστότητες μέχρι  $2.10 \text{ kJ/m}^2$ . Η δοκιμή σύνθετων με μεγαλύτερη δυσθραυστότητα, μπορεί να παράγει μεγάλα σφάλματα. Ένας τρόπος ελέγχου για μη γραμμικότητες, είναι η εξέταση της δια-

## ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ ΙΙ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

φοράς μεταξύ του μη γραμμικού σημείου και του σημείου μέγιστης φόρτισης. Εάν διαπιστωθεί ότι αυτό υπερβαίνει το 5% περίπου της  $P_{Max}$ , μπορεί να υπάρξουν περαιτέρω έρευνες για να προσδιοριστεί ο λόγος της διαφοράς, για παράδειγμα, η υλική μη γραμμικότητα, η γεωμετρική μη γραμμικότητα ή η υποκρίσιμη διάδοση της ρωγμής. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επιλογή μιας νέας γεωμετρικής δοκιμής, για παράδειγμα για την εξάλειψη των γεωμετρικών μη γραμμικοτήτων, ή για την επιλογή ενός ορισμού του κρίσιμου φορτίου που είναι διαφορετικό από το  $P_{Max}$ , για παράδειγμα στην περίπτωση της υποκρίσιμης διάδοσης της ρωγμής.

Μία μέθοδος προρωγμάτωσης που παράγει μόνο ένα μικρό "άλμα" ρωγμής π.χ., τοποθετώντας ένα δείγμα με ακμή ρωγμής κοντά στον κεντρικό κύλινδρο φόρτισης, μπορεί να προκαλέσει τιμές προραγισμένης δυσθραυστότητας που είναι σημαντικά υψηλότερες από εκείνες που θα παραχθούν για ένα μεγάλο άλμα ρωγμής ακολουθώντας τη συνιστώμενη διαδικασία (2, 3).

Η δυσθραυστότητα που μετράται με τη χρήση αυτής της μεθόδου, είναι ευαίσθητη σε όγκο ενίσχυσης και void content. Κατά συνέπεια, τα αποτελέσματα της δοκιμής μπορεί να αντικατοπτρίζουν την ποιότητα της παραγωγής όσο και τις ιδιότητες του υλικού.

### 6.3 Δειγματοληψία και πειραματικά δείγματα

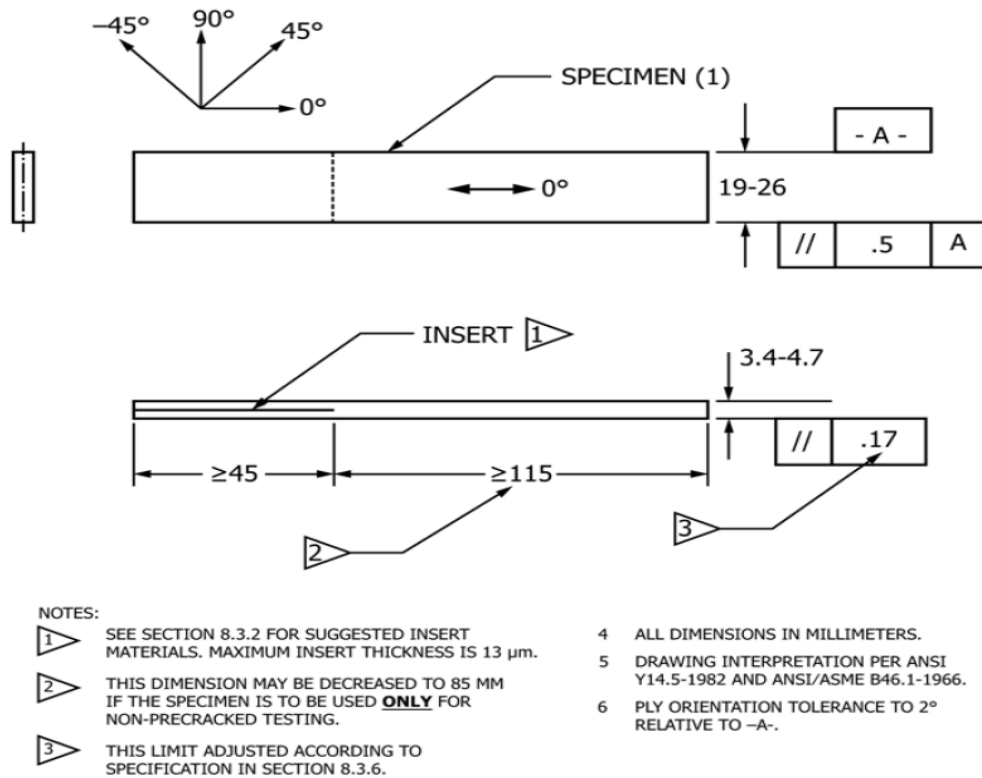
#### 6.3.1 Δειγματοληψία

Δοκιμάζουμε τουλάχιστον πέντε δείγματα ανά πειραματικές συνθήκες, εκτός εάν μπορούν να αποκτηθούν έγκυρα αποτελέσματα μέσω της χρήσης λιγότερων δειγμάτων, όπως η περίπτωση ενός σχεδιασμένου πειράματος. Η μέθοδος δειγματοληψίας πρέπει να αναφέρεται.

#### 6.3.2 Δείγμα και διαμόρφωση του πειράματος

Οι πειραματικές πλάκες πρέπει να αποτελούνται από ίσο αριθμό στρωμάτων και πρέπει να είναι μονής κατεύθυνσης, με την ανάπτυξη αποκόλλησης να εμφανίζεται στις  $0^\circ$ . Οι διαστάσεις του δείγματος πρέπει να είναι σύμφωνες με εκείνες που παρουσιάζονται στην εικ. 32 οι οποίες επιλέγονται έτσι ώστε η τοποθέτηση του δείγματος εντός του σταθερού εξαρτήματος να είναι όπως ορίζεται στον πίνακα 18 και στην εικ. 31.

## ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ ΙΙ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



**Εικόνα 32:** Δείγμα - Πείραμα ENF (μονάδες στο SI).

Parameter	Value or Range
$L$	50 mm [2.0 in.]
$L_c$	$\geq 15$ mm [ $\geq 0.6$ in.] $\geq 45$ mm [ $\geq 1.8$ in.] <i>when the same specimen is to be used for non-precracked and precracked testing.</i>
$L_u$	<i>Otherwise:</i> $\geq 15$ mm [ $\geq 0.6$ in.]
$a_o$	30 mm [1.2 in.]

**Πίνακας 18:** Διαστάσεις δείγματος σύμφωνα με την εικόνα 31.

### 6.3.3 Κατασκευή

Θα κατασκευαστεί μια επίπεδη σύνθετη πλάκα με προεμφυτευμένο μη συγκολλητικό film insert. Τα δείγματα θα κοπούν από αυτές τις πλάκες όπως φαίνεται στην εικ. 32.

Ένα μη συγκολλητικό film insert θα εμφυτευτεί στο μέσο της πλάκας κατά τη διάρκεια του layup για να σχηματιστεί μια θέση έναρξης για την αποκόλληση (εικ.

## ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ II – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

32). Το πάχος της μεμβράνης δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 13  $\mu\text{m}$ . Ένα πολυμερές film συνίσταται για το insert, ώστε να αποφύγουμε προβλήματα με δίπλωση ή τσάκισμα στο κομμένο άκρο του insert. Για τα σύνθετα εποξικής μήτρας που ψήνονται στους 177  $^{\circ}\text{C}$  ή λιγότερο, συνίσταται ένα λεπτό film από πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE). Για σύνθετα με μήτρα από πολυϊμίδιο, βισμαλεϊμίδιο, ή θερμοπλαστική που κατασκευάζονται σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες, δηλαδή μεγαλύτερες από 177  $^{\circ}\text{C}$ , συνιστάται ένα λεπτό film από πολυϊμίδιο. Εάν χρησιμοποιηθεί film από πολυϊμίδιο, πρέπει να χρωματιστεί ή να ψεκαστεί με αποκολλητική ουσία πριν εισαχθεί στην πλάκα. Χρειάζεται προσοχή διότι το αποκολλητικό το οποίο περιέχει σιλικόνη μπορεί να “μολύνει” τα γειτονικά στρώματα. Είναι συχνά χρήσιμο να επαλείψουμε το film τουλάχιστον μια φορά και μετά να το ψήσουμε πριν το εισάγουμε στο σύνθετο. Αυτό θα αποτρέψει τη “μετανάστευση” σιλικόνης μέσα στο σύνθετο. Επίσης, είναι συχνά απαραίτητο να “διαλύσουμε” τον δεσμό που μπορεί να δημιουργηθεί μεταξύ του insert και του σύνθετου. Για τα υλικά εκτός του πεδίου εφαρμογής αυτού του προτύπου, μπορεί να απαιτούνται διαφορετικά υλικά film και διαδικασίες.

Η πλάκα θα δημιουργηθεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να επιτευχθούν οι διαστάσεις του δείγματος που παρουσιάζονται στην εικ. 32. Συνίσταται η κατασκευή μεγάλων πάνελ με insert πλήρους πάχους για την αποφυγή διακυμάνσεων του πάχους στα δοκίμια. Μετά την κατασκευή, αυτά τα πάνελ θα κοπούν κατά πλάτος και κατά μήκος της κεντρικής γραμμής του insert ώστε να δημιουργηθούν δύο πλάκες, όπως φαίνεται στην εικ. 32. Ένα τυπικό πάνελ θα έχει μήκος 400 mm στην διεύθυνση 0 $^{\circ}$  με ένα insert 100 mm. Ανάλογα με την λάμα πριονιού και το ποσό που περικόπτεται στις άκρες, αυτό θα αποφέρει δύο πλάκες με μήκος περίπου 200 mm με ένα insert αρχικού μήκους 50 mm.

Πριν από την κοπή του plate σε δείγματα, το τέλος του insert θα πρέπει να έχει εντοπιστεί με ακρίβεια και να σημειωθεί και θα γίνουν σημάδια πάνω στο plate, ώστε η θέση του κάθε δείγματος σε σχέση με την γεωμετρία του αρχικού plate να είναι αναγνωρίσιμα μετά την κοπή.

Μεμονωμένα δείγματα θα κοπούν, ώστε να εμπίπτουν στο εύρος των επιτρεπόμενων μηκών και πλατών που καθορίζονται στην εικ. 32.

Μετά από την κοπή, μετράμε το πλάτος, B στα τρία σημεία κάθε δείγματος που θα αντιστοιχούν στις θέσεις επαφής των τριών κυλίνδρων όταν δοκιμάζεται το δείγμα στη μη προραγισμένη διαμόρφωση. Μετράμε το πάχος, 2h, κάθε δείγματος σε έξι σημεία, με δύο μετρήσεις πάχους σε κάθε ένα από τα σημεία όπου το πλάτος μετρήθηκε: ένα στην αριστερή πλευρά και ένα στην δεξιά. Θα καταγραφούν οι ατομικές και μέσες τιμές των τριών μετρήσεων πλάτους και των έξι μετρήσεων πάχους. Η μεταβολή του πλάτους του δείγματος μεταξύ όλων των μετρήσεων, δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0.5 mm και η μεταβολή του πάχους δεν πρέπει να υπερβαίνει το 5% της μέσης τιμής.

### **6.3.4 Τιτλοφόρηση**

Τιτλοφορούμε τα δείγματα έτσι ώστε να διαφέρουν μεταξύ τους και να είναι ανιχνεύσιμα πίσω στην πρώτη ύλη, με τρόπο που να μην επηρεάζονται από το πείραμα και να μην επηρεάζεται το ίδιο το πείραμα.

## **6.4 Διαδικασία**

### **6.4.1 Παράμετροι που πρέπει να καθορίσουμε πριν από το πείραμα**

- Τη μέθοδο δειγματοληψίας, τη γεωμετρία των δειγμάτων και τους conditioning travelers (εάν απαιτείται)
- Τις ιδιότητες και το data reporting format που επιθυμούμε
- Τις πειραματικές παραμέτρους λόγω περιβαλλοντολογικών συνθηκών και
- Τις πειραματικές παραμέτρους που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της πυκνότητας και των όγκων των συστατικών.

Αποθηκεύουμε τα δείγματα σε κλιματιζόμενο περιβάλλον μέχρι την ώρα του πειράματος, εάν το περιβάλλον του πειράματος είναι διαφορετικό από το περιβάλλον κλιματισμού.

### **6.4.2 Προετοιμασία δειγμάτων**

- 1) Μετράμε και καταγράφουμε το πλάτος και το πάχος κάθε δείγματος όπως καθορίζεται στην υποενότητα 6.3.3.
- 2) Ένα ελαφρύ επίστρωμα λευκού ή ασημένιου χρώματος ψεκασμού, ή ισοδύναμου, θα εφαρμοστεί στα άκρα των δειγμάτων. Αυτό γίνεται για να βοηθήσει στην οπτική ανίχνευση του άκρου αποκόλλησης και στην πραγματοποίηση σημάνσεων βαθμονόμησης ενδοτικότητας (CC). Μόλις στεγνώσει το χρώμα, η ακμή του insert θα σημειωθεί με μια λεπτή κάθετη γραμμή με μολύβι. Στη συνέχεια, τα άκρα θα επισημαίνονται με τρεις κατακόρυφες σημάνσεις βαθμονόμησης ενδοτικότητας, εντός της ρωγματομένης περιοχής, σε αποστάσεις 20, 30 και 40 mm από την ακμή του insert.
- 3) Εάν συγκεκριμένη βαρύτητα, πυκνότητα, όγκος ενίσχυσης, ή void volume , ή συνδυασμός τους, πρόκειται να αναφερθεί, λαμβάνουμε αυτά τα δείγματα από τα ίδια πάνελ από τα οποία έχουν δοκιμαστεί.

### **6.4.3 Περιβάλλον του πειράματος**

Εάν είναι δυνατόν, δοκιμάζουμε το δείγμα κάτω από το ίδιο επίπεδο έκθεσης σε ρευστό που χρησιμοποιείται για την προετοιμασία. Εντούτοις, οι περιπτώσεις όπως η δοκιμή σε ανυψωμένη θερμοκρασία ενός υγρού δείγματος, τοποθετούν μη ρεαλιστικές απαιτήσεις στις δυνατότητες των κοινών environmental chambers μηχανών δοκιμής. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το μηχανικό περιβάλλον δοκιμής πρέπει να τροποποιηθεί, π.χ., με τη δοκιμή σε ανυψωμένη θερμοκρασία χωρίς έλεγχο έκθεσης σε ρευστό, αλλά με ένα καθορισμένο όριο εγκαίρως στην αστοχία από την απόσυρση από το conditioning chamber. Καταγράφουμε οποιεσδήποτε τροποποιήσεις στο πειραματικό περιβάλλον.

Το δείγμα θα τοποθετηθεί στο σταθερό εξάρτημα, έτσι ώστε η διαμήκης διεύθυνσή του να είναι κάθετη προς τους κυλίνδρους φόρτισης.

Η φόρτιση για όλα τα πειράματα CC και θραύσης, θα πραγματοποιηθεί με έλεγχο μετατόπισης σε ονομαστική τιμή 0.5 mm/min, αν και τα ποσοστά μεταξύ 0.10 και 0.80 mm/min είναι αποδεκτά. Εκτός εάν ορίζεται διαφορετικά, η αποφόρτιση θα συμβεί επίσης με έλεγχο μετατόπισης με ρυθμό μεταξύ 0.10 και 1.6 mm/min.

Οι μέγιστες δυνάμεις κατά την διάρκεια του CC, είναι ίσες με το 50% της αναμενόμενης τιμής του κρίσιμου φορτίου ( $P_c$ ) στο συγκεκριμένο μήκος ρωγμής: αυτές επιλέγονται για να αντιστοιχούν σε περίπου 25% του  $G_{IIc}$ . Δηλαδή, η μέγιστη δύναμη CC ποικίλλει με το μήκος ρωγμής.

Τα πειράματα βαθμονόμησης ενδοτικότητας, εκτελούνται με τη φόρτιση του δείγματος με την μέγιστη δύναμη CC και στην συνέχεια αποφόρτιση. Τα δεδομένα δύναμης και εκτροπής πρέπει να καταγράφονται συνεχώς ή σε τακτά χρονικά διαστήματα μόνο κατά την διάρκεια της φόρτισης. Συνιστάται ρυθμός δειγματοληψίας 5 Hz ή μεγαλύτερος και ελάχιστος στόχος 500 σημείων δεδομένων ανά πείραμα.

Οι τιμές του  $G_{IIc}$  θα ληφθούν από το insert και από την προρωγμάτωση. Όλες οι τιμές δυσθραυστότητας, λαμβάνονται με τη χρήση της μεθόδου CC. Η παράγραφος 6.4.4 πρόκειται να χρησιμοποιηθεί εάν οι τιμές NPC και PC δυσθραυστότητας πρόκειται να ληφθούν από το ίδιο δείγμα και η συνιστώμενη διαδικασία προφύλαξης πρόκειται να υιοθετηθεί: διαφορετικά, θα χρησιμοποιηθούν οι παράγραφοι 6.4.5 και 6.4.6.

### **6.4.4 NPC και PC δυσθραυστότητα από το ίδιο δείγμα**

Στην προσέγγιση που ακολουθεί, η ανάπτυξη ρωγμής κατά την διάρκεια του πειράματος NPC, δημιουργεί την προρωγμάτωση που χρησιμοποιείται για το πείραμα PC. Η προσέγγιση έχει αποδειχθεί ότι παράγει ακριβείς NPC και PC δυσθραυστότητες με μια τιμή PC  $G_{IIc}$  που είναι εντός ή πλησιάζει το "minimum toughness plateau" Η προσέγγιση εξασφαλίζει επίσης ότι οποιεσδήποτε διαφορές μεταξύ της θέσης της

## ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ Π – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

αληθινής και υπολογισμένης ακμής ρωγμής, δεν έχουν επιπτώσεις στην ακρίβεια του  $G_{Ic}$ .

### 6.4.4.1 NPC CC

Με αναφορά στην εικόνα 31, το δείγμα τοποθετείται στο σταθερό εξάρτημα έτσι ώστε η σήμανση CC που είναι μακρύτερα από το ραγισμένο άκρο, ευθυγραμμίζεται με το κέντρο του κυλίνδρου στήριξης στο ραγισμένο άκρο. Η πρώτη δοκιμή CC, πραγματοποιείται στη συνέχεια με ένα μήκος ρωγμής  $a = 20$  mm, σύμφωνα με τη διαδικασία που ορίζεται στην παράγραφο 6.4.3. Το δείγμα στη συνέχεια επανατοποθετείται έτσι ώστε  $a = 40$  mm, δηλαδή, έτσι ώστε η σήμανση CC που είναι πιο κοντά στο ραγισμένο άκρο να ευθυγραμμιστεί με το κέντρο του κυλίνδρου στήριξης στο ραγισμένο άκρο. Στη συνέχεια, η δεύτερη δοκιμή CC πραγματοποιείται όπως ορίζεται στην υποενότητα 6.4.3.

### 6.4.4.2 NPC δοκιμή θραύσης

Μετά από την δοκιμή NPC CC, το δείγμα πρέπει να επανατοποθετηθεί στο σταθερό εξάρτημα έτσι ώστε  $a = 30$  mm. Αυτό πρέπει να αντιστοιχεί στην τοποθέτηση της κεντρικής σήμανσης CC πάνω από το κέντρο του κυλίνδρου στήριξης που βρίσκεται στο ραγισμένο άκρο. Το δείγμα φορτίζεται έπειτα μέχρι να αναπτυχθεί η αποκόλληση, όπως φαίνεται από οπτική αξιολόγηση στο δείγμα, ή από μια μικρή πτώση του φορτίου στην καμπύλη φορτίου - μετατόπισης. Το δείγμα θα αποφορτιστεί με ονομαστικό ρυθμό 0.5 mm/min, αν και οι ρυθμοί μεταξύ 0.10 και 0.80 mm/min είναι αποδεκτοί (προκειμένου να μειωθεί ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για το πείραμα). Τα δεδομένα δύναμης και μετατόπισης πρέπει να καταγράφονται συνεχώς ή σε τακτά χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια όλου του πειράματος. Συνιστάται ρυθμός δειγματοληψίας 5 Hz ή μεγαλύτερος και ελάχιστος στόχος 1000 σημείων δεδομένων ανά δοκιμή.

### 6.4.4.3 Προσδιορισμός του μήκους ρωγμής για την δοκιμή PC

Τα δεδομένα αποφόρτισης από το πείραμα θραύσης NPC της προηγούμενης παραγράφου, χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί μια τιμή  $a_{calc}$  χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της παραγράφου 6.5.6. Αυτή η τιμή του  $a_{calc}$  μετριέται από την υπάρχουσα κεντρική σήμανση CC. Μια νέα “σήμανση PC ακμής ρωγμής”, θα τοποθετηθεί σε αυτή την θέση. Έπειτα, θα τοποθετηθούν τρεις νέες σημάνσεις PC CC στα 20, 30 και 40 mm από την σήμανση PC ακμής ρωγμής, όπως φαίνεται στην εικόνα 33. Η κε-

## ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ ΙΙ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

ντρική σήμανση, με απόσταση από την ακμή της ρωγμής ίση με 30 mm, είναι για το πείραμα θραύσης και τα άλλα δύο για τα πειράματα CC.

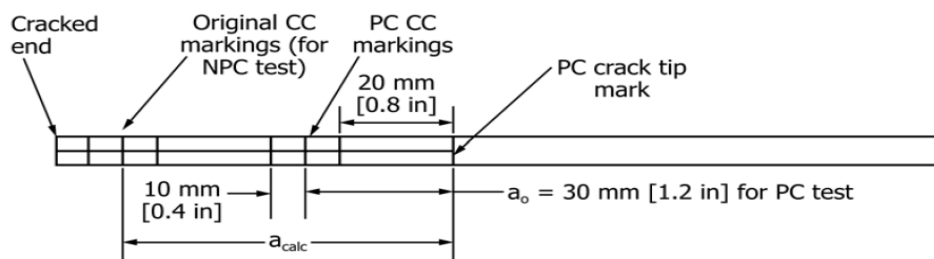
Αν επιθυμούμε, η θέση της ακμής της ρωγμής μπορεί να καθοριστεί οπτικά από την μέση τιμή των θέσεων που βρήκαμε στα δύο άκρα. Αν το οπτικά καθορισμένο άκρο της ρωγμής  $a_{vis}$  είναι στα δεξιά του κυλίνδρου φόρτισης και δεύτερον μεγαλύτερο από το  $a_{calc}$ , τότε το  $a_{vis}$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην θέση του  $a_{calc}$  για την τοποθέτηση της σήμανσης ακμής ρωγμής PC.

### 6.4.4.4 PC CC

Πριν από το πείραμα θραύσης PC, οι ενδοτικότητες από δύο διαφορετικά μήκη ρωγμών λαμβάνονται από κατάλληλη τοποθέτηση του δείγματος στο σταθερό εξάρτημα. Το πρώτο πείραμα CC, πραγματοποιείται με  $a = 20$  mm και το δεύτερο με  $a = 40$  mm. Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας τις σημάνσεις PC CC της παραγράφου 6.4.4.3 και ακολουθώντας την διαδικασία της 6.4.4.1.

### 6.4.4.5 PC δοκιμή θραύσης

Μετά από το PC CC, το δείγμα θα επανατοποθετηθεί στο σταθερό εξάρτημα, έτσι ώστε  $a = 30$  mm. Αυτό θα αντιστοιχηθεί στην τοποθέτηση της κεντρικής σήμανσης PC CC πάνω από το κέντρο του κυλίνδρου στήριξης που βρίσκεται στο ραγισμένο άκρο. Ύστερα, το δείγμα φορτίζεται μέχρι να αναπτυχθεί η αποκόλληση, όπως φαίνεται από οπτική εκτίμηση του δείγματος ή από μια μικρή πτώση του φορτίου στην καμπύλη φορτίου – μετατόπισης. Έπειτα, το δείγμα αποφορτίζεται. Η δύναμη και τα δεδομένα εκτροπής, πρέπει να καταγράφονται συνεχόμενα, ή ανά τακτά χρονικά διαστήματα, μόνο κατά την διάρκεια της φόρτισης. Συνίσταται ρυθμός δειγματοληψίας 5 Hz ή μεγαλύτερος και στόχος τουλάχιστον 750 σημείων δεδομένων ανά πείραμα.



*Εικόνα 33: Διαμόρφωση του δείγματος για την δοκιμή PC, όταν το ίδιο δείγμα χρησιμοποιείται για την δοκιμή NPC και PC.*



#### **6.4.5 NPC δυσθραυστότητα μόνο**

Αυτή η δοκιμή πραγματοποιείται όπως περιγράφεται στις παραγράφους 6.4.4.1 και 6.4.4.2. Τα δεδομένα αποφόρτισης και ο καθορισμός του  $\alpha_{calc}$ , δεν είναι απαραίτητα.

#### **6.4.6 PC δυσθραυστότητα μόνο**

Η μέθοδος που ακολουθεί είναι έγκυρη, υπό τον όρο ότι μπορεί να ληφθεί μια καταγραφή του προραγισμένου μετώπου αποκόλλησης πριν από το πείραμα PC. Αυτή η καταγραφή πρέπει να είναι αρκετά λεπτομερής ώστε, να ληφθούν ποσοτικές μετρήσεις του μήκους ρωγμής συναρτήσει της θέσης σε πέντε σημεία στην διεύθυνση του πλάτους. Αυτά τα πέντε σημεία θα αποτελούνται από τα δύο άκρα, 50 % της απόστασης από το κάθε άκρο προς το κέντρο του δείγματος και στο κέντρο του.

Μετά από την προρωγμάτωση και πριν από το πείραμα, η θέση του μετώπου αποκόλλησης θα καθοριστεί από μια κατάλληλη μέθοδο και θα σημειωθεί στο άκρο του δείγματος. Αυτό συμπεριλαμβάνει και την σήμανση ακμής ρωγμής PC.

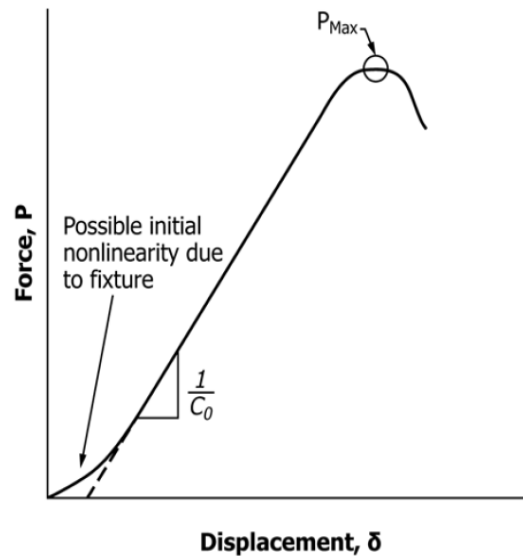
Τρεις σήμανσεις PC CC θα τοποθετηθούν σε απόσταση 20, 30 και 40 mm από την σήμανση ακμής ρωγμής PC.

Το PC CC και το πείραμα θραύσης PC, εκτελούνται σύμφωνα με τις διαδικασίες του πειράματος NPC.

### **6.5 Υπολογισμοί**

#### **6.5.1 Υπολογισμοί IFT**

Οι τιμές έναρξης NPC και CC του  $G_{IIc}$ , θα ληφθούν από το μέγιστο φορτίο  $P_{max}$  (εικόνα 34).



Εικόνα 34: Απεικόνιση της ενδοτικότητας και προσδιορισμός του σημείου μέγιστης φόρτισης.

## 6.5.2 Συντελεστές βαθμονόμησης ενδοτικότητας

Οι συντελεστές CC από τα πειράματα NPC και PC, θα προσδιοριστούν χρησιμοποιώντας την μέθοδο που περιγράφεται στις παραγράφους 6.5.2.1 και 6.5.2.2.

### 6.5.2.1 Συντελεστές NPC CC

Φτιάχνουμε τις καμπύλες των τριών ενδοτικότητων του πειράματος NPC, συναρτήσει του κυβικού μήκους ρωγμής. Οι δύο ενδοτικότητες είναι από τα πειράματα CC (για  $a = 20$  και  $a = 40$  mm) και η τρίτη από το πείραμα θραύσης, με  $a_0 = 30$  mm. Σε κάθε μήκος ρωγμής, η ενδοτικότητα προσδιορίζεται από μια γραμμική regression ανάλυση ελαχίστων τετραγώνων, ώστε να ληφθεί η καμπύλη μετατόπισης – φορτίου. Για τις δύο δοκιμές CC, αυτή η ανάλυση παλινδρόμησης θα περιλαμβάνει όλα τα δεδομένα για τα οποία η δύναμη θα είναι μεγαλύτερη ή ίση με 90 N, συμπεριλαμβανομένου και της μέγιστης δύναμης που χρησιμοποιείται σε αυτή την δοκιμή. Η δύναμη των 90 N, επιλέγεται να είναι αρκετά μεγάλη, έτσι ώστε η καμπύλη προσαρμογής να αποκλείει τυχόν δεδομένα τα οποία έχουν επηρεαστεί από μια αρχική μη γραμμικότητα. Για το πείραμα θραύσης, η regression ανάλυση θα περιλαμβάνει όλα τα δεδομένα για τα οποία η δύναμη θα είναι μεγαλύτερη ή ίση με 90 N και μικρότερη ή ίση με το 50% της μέγιστης δύναμης από το πείραμα θραύσης. Οι συντελεστές CC A και m, θα προσδιοριστούν χρησιμοποιώντας μια γραμμική ανάλυση regression ελαχίστων τε-

## ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ ΙΙ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

τραγώνων της ενδοτικότητας  $C$ , συναρτήσει των δεδομένων κυβικού μήκους ρωγμής ( $a^3$ ), της μορφής:

$$C = A + ma^3 \quad [1]$$

όπου τα  $A$  και  $m$  είναι οι συντελεστές  $CC$  και πιο συγκεκριμένα  $A$  είναι η intercept και  $m$  είναι η καμπύλη που λήφθηκε από την ανάλυση παλινδρόμησης. Θα προσδιοριστεί επίσης ο συντελεστής συσχέτισης  $r^2$  για την καμπύλη προσέγγισης,

### 6.5.2.2 Συντελεστές PC CC

Οι συντελεστές PC CC, θα προσδιοριστούν με τον ίδιο τρόπο όπως οι NPC CC, με την διαφορά ότι θα χρησιμοποιηθούν οι τρεις ενδοτικότητες από την δοκιμή PC και τα συσχετισμένα μήκη ρωγμής.

### 6.5.3 Προσδιορισμός της candidate δυσθραυστότητας

Πρώτα καθορίζεται μια candidate δυσθραυστότητα  $G_Q$  και ελέγχεται για εγκυρότητα. Εάν είναι έγκυρη, τότε  $G_{IIc} = G_Q$ . Διαφορετικά, τα αποτελέσματα από το πείραμα απορρίπτονται. Η NPC candidate δυσθραυστότητα, καθορίζεται χρησιμοποιώντας την μέθοδο της παραγράφου 6.5.3.1. Εάν χρησιμοποιηθεί η συνιστώμενη μέθοδος προρωγμάτωσης της υποενότητας 6.4.4, τότε η PC candidate δυσθραυστότητα καθορίζεται παρομοίως. Διαφορετικά, καθορίζεται όπως περιγράφεται στην παράγραφο 6.5.3.2.

#### 6.5.3.1 NPC δοκιμές και PC δοκιμές από την παράγραφο 6.4.4

Η candidate δυσθραυστότητα καθορίζεται σύμφωνα με την σχέση:

$$G_Q = (3mP_{Max}^2 a_0^2) / (2B) \quad [2]$$

όπου  $m$  ο συντελεστής  $CC$ ,  $P_{Max}$  το μέγιστο φορτίο από την δοκιμή θραύσης, όπως προσδιορίζεται στην παράγραφο 6.5.1,  $a_0$  το μήκος ρωγμής που χρησιμοποιείται στην δοκιμή θραύσης (30 mm) και  $B$  το πάχος του δείγματος. Όταν καθορίζουμε την NPC  $G_Q$ , αυτές οι παράμετροι λαμβάνονται από τις δοκιμές NPC CC και θραύσης. Λαμβάνονται από δοκιμές του προραγισμένου δείγματος, όταν καθορίζεται η PC  $G_Q$ .

### 6.5.3.2 Προρωγάτωση με μέθοδο διαφορετική από την παράγραφο 6.4.4

#### Αξιολογήσεις του μετώπου ρωγμής

Μετά τη ολοκλήρωση της δοκιμής PC, τα πραγματικά μήκη ρωγμής στις πέντε κατά πλάτος περιοχές που διευκρινίζονται στην παράγραφο 6.4.6 θα καθοριστούν από κατάλληλα μέσα, για παράδειγμα, από εικόνες c – scan προ – δοκιμής, ή εάν χρησιμοποιηθεί μια μέθοδος προρωγάτωσης η οποία αφήνει οπτικά εμφανείς σημάνσεις μετώπου ρωγμής, με κόψιμο του δείγματος στην μέση και παίρνοντας κατάλληλες μετρήσεις. Το μικρότερο από αυτά τα πέντε μήκη, θα αφαιρεθεί από το μεγαλύτερο για να καθοριστεί το  $\Delta s$ , ένα μέτρο της απόκλισης από την ευθύτητα. Το πραγματικό μήκος ρωγμής το οποίο χρησιμοποιείται για την δοκιμή PC,  $a_{PC}$ , θα καθοριστεί από την ισοδύναμη μέθοδο εμβადών. Αυτή η μέθοδος προσδιορίζει ένα εμβαδό ανάπτυξης ισοδύναμο με αυτό που δημιουργήθηκε, αλλά με **straight front to the edges** και η θέση αυτού του μετώπου προσδιορίζει το μέγεθος της ρωγμής. Αυτή η μέθοδος **employed** με χρήση του σχήματος της προρωγάτωσης για προσδιορισμό του εμβαδού που οριοθετείται από το μέτωπο αποκόλλησης, τα δύο διαμήκη άκρα και την θέση του κυλίνδρου στήριξης στο ραγισμένο άκρο κατά την διάρκεια της δοκιμής PC κι έπειτα διαιρούμε αυτό το εμβαδό με το πλάτος του δείγματος.

Η candidate δυσθραυστότητα προσδιορίζεται με την σχέση:

$$G_Q = (3mP_{Max}^2 \alpha_{PC}^2) / (2B) \quad [3]$$

### 6.5.4 Εκτίμηση της candidate δυσθραυστότητας

Η candidate δυσθραυστότητα NPC εκτιμάται με τη χρήση της μεθόδου του παραγράφου 6.5.4.1. Εάν χρησιμοποιηθεί η συνιστώμενη μέθοδος προρωγάτωσης της παραγράφου 6.4.4, τότε η εκτίμηση της candidate δυσθραυστότητας πραγματοποιείται πανομοιότυπα. Διαφορετικά, πραγματοποιείται όπως περιγράφεται στην υποενότητα 6.5.4.2.

#### 6.5.4.1 Δοκιμές NPC και PC δυσθραυστότητας από την παράγραφο 6.4.4

Τα ποσοστά του  $G_Q$  ( $\%G_Q$ ) που επιτεύχθηκαν κατά την βαθμονόμηση της ενδοτικότητας υπολογίζονται με τη σχέση:

$$\%G_{Q,j} = (100P_j \alpha_j)^2 / (P_{Max} \alpha_0)^2; j = 1,2 \quad [4]$$

## ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ – ΤΥΠΟΣ ΙΙ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

όπου  $\%G_Q$ , είναι οι δύο τιμές της  $G_Q$  που σχετίζονται με τις δύο δοκιμές ενδοτικότητας, το  $P_{Max}$  λαμβάνεται από την δοκιμή θραύσης όπως προσδιορίζεται στην παράγραφο 6.5.1. Το  $P_j$  είναι η max τιμή της δύναμης που επιτεύχθηκε κατά την διάρκεια της CC στο  $a_j$  και  $a_j$  είναι το  $j^{th}$  μήκος ρωγμής που χρησιμοποιείται κατά την διάρκεια του CC. Για κάθε δοκιμή NPC και PC, οι δύο τιμές της  $\%G_Q$  υπολογίζονται στα  $a_1 = 20$  mm και  $a_2 = 40$  mm. Αν και οι δύο τιμές ικανοποιούν την ανίσωση  $15 \leq G_Q \leq 35$ , τότε η candidate δυσθραυστότητα είναι αποδεκτή. Διαφορετικά, συνίσταται τα αποτελέσματα από αυτήν την δοκιμή να απορριφθούν και εάν είναι απαραίτητο, οι δυνάμεις CC να τροποποιηθούν κατάλληλα για επιπλέον δοκιμές.

### 6.5.4.2 Προωγμάτωση με μέθοδο διαφορετική από την παράγραφο 6.4.4

Τα ποσοστά του  $G_Q$  που επιτεύχθηκαν κατά την διάρκεια της PC βαθμονόμησης ενδοτικότητας, υπολογίζονται από την προσέγγιση που περιγράφεται στην παράγραφο 6.5.4.1, με την διαφορά ότι στην θέση του  $a_0$  στην σχέση [4] χρησιμοποιείται το  $a_{PC}$ . Εάν όλες οι τιμές του  $G_Q$  ικανοποιούν την σχέση  $15 \leq \%G_Q \leq 60$  και  $\Delta s \leq 4$  mm, τότε η candidate δυσθραυστότητα είναι αποδεκτή. Διαφορετικά, τα αποτελέσματα αυτού του πειράματος απορρίπτονται και εάν είναι απαραίτητο, οι δυνάμεις CC τροποποιούνται κατάλληλα για επιπλέον δοκιμές.

### 6.5.5 Καθορισμός της δυσθραυστότητας

Για κάθε δείγμα όπου η candidate δυσθραυστότητα είναι αποδεκτή (NPC ή PC):

$$G_{PC} = G_Q \quad [5]$$

### 6.5.6 Καθορισμός του $a_{calc}$

Για τον καθορισμό του  $a_{calc}$ , η ενδοτικότητα της γραμμής αποφόρτισης στο τέλος της δοκιμής NPC, υπολογίζεται από μια γραμμική regression ανάλυση ελαχίστων τετραγώνων της μετατόπισης συναρτήσεως του φορτίου. Η ενδοτικότητα της γραμμής αποφόρτισης της δοκιμής NPC, χρησιμοποιείται στην σχέση:

$$a_{calc} = [(C_u - A) / m]^{1/3} \quad [6]$$

όπου A και m είναι οι συντελεστές CC από την δοκιμή NPC.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>

### ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

---

#### 7.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται ταύτιση των πειραματικών αποτελεσμάτων για τους τύπους I και II, με χρήση πακέτου πεπερασμένων στοιχείων. Μετά την πραγματοποίηση των πειραμάτων και τη λήψη της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης, θα γίνει ταυτοποίησή της και με υπολογιστική μέθοδο.

Η ρητίνη μας παριστάνεται στο μοντέλο με το cohesive element, κατάλληλο για αναλύσεις αποκόλλησης.

Το πρόγραμμα δεν χρησιμοποιεί διαστάσεις, οπότε οι τιμές που θα χρησιμοποιήσουμε πρέπει να συμφωνούν μεταξύ τους. Οι μονάδες που θα αντιστοιχούν στις τιμές μας θα είναι οι εξής:

**Μήκος:** mm, **δύναμη:** N, **μάζα:** tonne, **χρόνος:** s, **τάση:** MPa, **ενέργεια:** MJ, **πυκνότητα:** tonne/mm<sup>3</sup>

#### 7.2 Διαδικασία ανάλυσης

Η ανάλυση θα πραγματοποιηθεί με τα εξής βήματα:

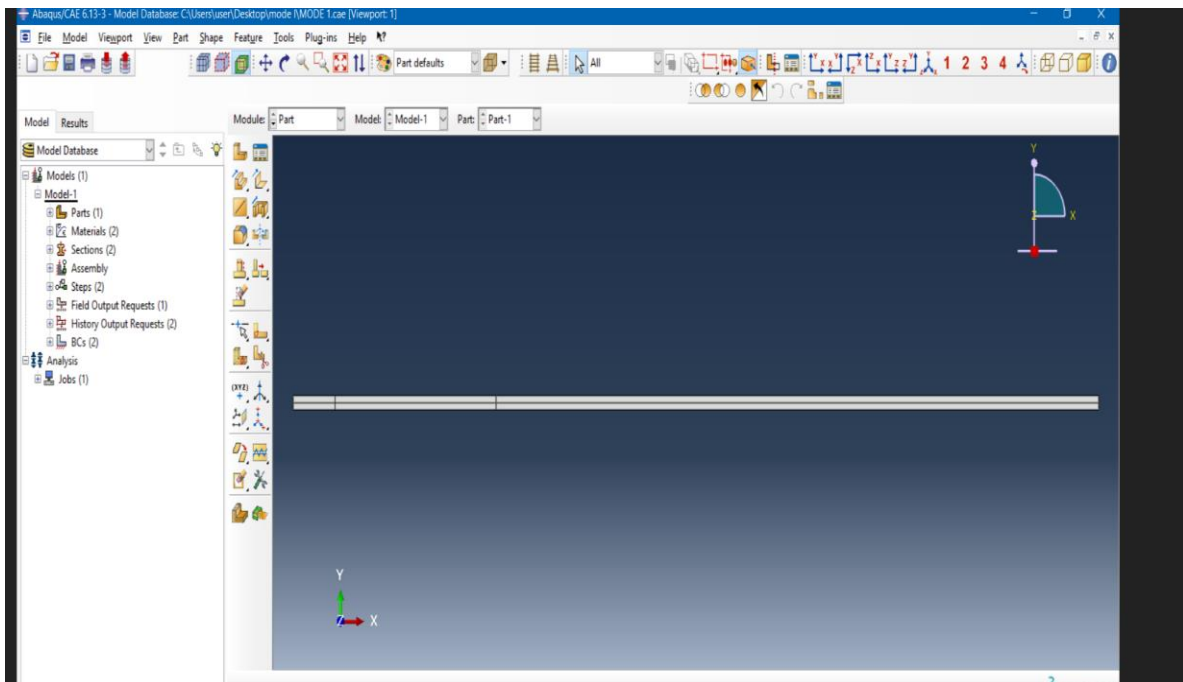
- Σχεδιασμός του μοντέλου.
- Εισαγωγή των παραμέτρων του υλικού. Πρώτα για το σύνθετο και ύστερα για το cohesive (ρητίνη).
- Assembly.
- Βήμα ανάλυσης.
- Meshing.
- Συνοριακές συνθήκες.
- Λήψη των αποτελεσμάτων.

Για το mode II, θα γίνει ένα επιπλέον βήμα, η δημιουργία contact ανάμεσα στα δύο composite arms.

## 7.3 Ανάλυση mode I

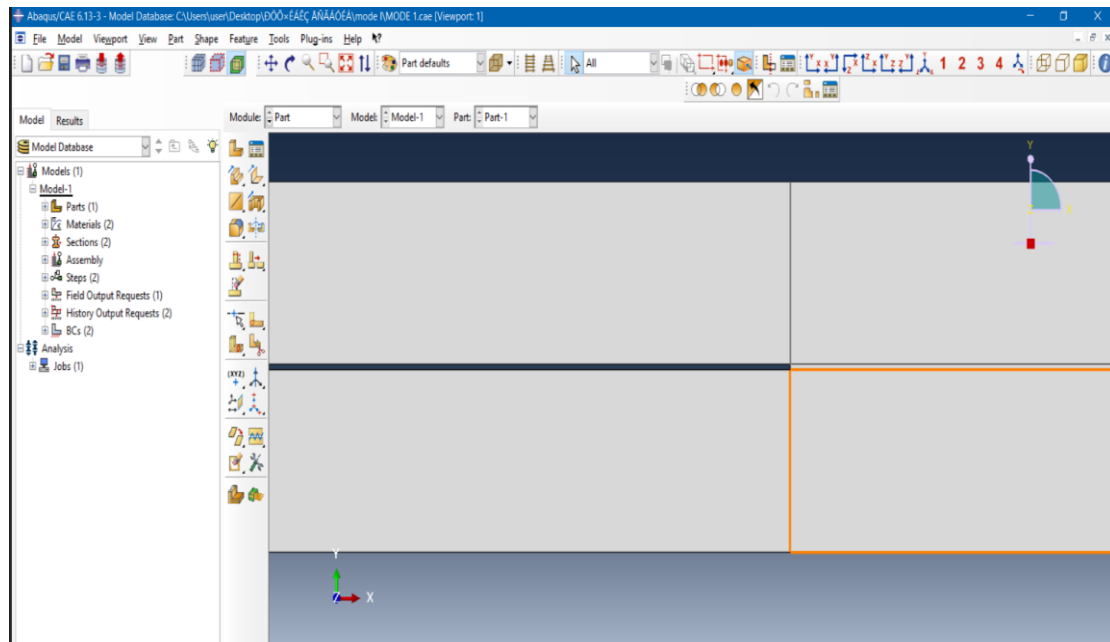
### 7.3.1 Σχεδιασμός

Ξεκινάμε με το module “**Part**” και το πλήκτρο **Create Part**. Το μοντέλο μας θα γίνει 2D (shell elements), με διαστάσεις μήκους – πάχους 250 και 3 mm αντίστοιχα. Το crack length είναι 63 mm από το άκρο (13 για το μπλοκ φόρτισης συν 50 για το insert). Το πάχος του cohesive element είναι 0.05 mm, δηλαδή αμελητέο.



*Εικόνα 35: Δείγμα DCB.*

Μόλις ολοκληρωθεί η σχεδίαση του ορθογωνίου, κάνουμε **Partition Face: Sketch** κι έπειτα **Create Lines: Connected**, για να σχεδιάσουμε τις κάθετες γραμμές που φαίνονται στην εικόνα (η αριστερή για να εφαρμοστούν αργότερα οι συνοριακές συνθήκες και η δεξιά απλά για να δείχτεί που ξεκινάει το cohesive element). Έπειτα κάνουμε **Remove Faces** για να δείξουμε την αρχική ρωγμή.



Εικόνα 36: Αρχική ρωγμή και έναρξη του cohesive element.

### 7.3.2 Παράμετροι υλικών

Μόλις ολοκληρωθεί η σχεδίαση, πάμε στο module “**Property**” και εισάγουμε τις παραμέτρους των υλικών: του σύνθετου και της ρητίνης.

**Σύνθετο:** Πάμε στο **Create Material -> General -> Density** και βάζουμε πυκνότητα 2E-009. Έπειτα, **Mechanical -> Elasticity -> Elastic -> Type: Isotropic** και εισάγουμε:

- Μέτρο ελαστικότητας:

$$E_1 = 27700$$

- Λόγος Poisson:

$$\varepsilon = 0.25$$

**Cohesive:** Κάνουμε δεύτερο **Create Material -> General -> Density** και βάζουμε πυκνότητα 1E-009. Μετά, **Mechanical -> Elasticity -> Elastic -> Type: Traction** και βάζουμε τιμές:

$$E = 3000$$

$$G_1 = 2500$$

$$G_2 = 2500$$



Επόμενο βήμα: **Mechanical -> Damage for Traction Separation Laws** και επιλέγουμε κριτήριο έναρξης αποκόλλησης. Διαλέγουμε το **Quads Damage**, το οποίο φαίνεται στην αποκάτω εικόνα.

$$\left( \frac{\langle \sigma_n \rangle}{N_{\max}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_t}{T_{\max}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_s}{S_{\max}} \right)^2 = 1$$

*Εικόνα 37: Κριτήριο Quads Damage.*

Οι τρεις τιμές τάσεων που εισάγουμε εδώ, οι τιμές έναρξης αποκόλλησης, είναι στην ουσία η αντοχή της διεπιφάνειας, η τιμή στην οποία ξεκινάει να ανοίγει η ρητίνη (μία ορθή τάση και δύο διατμητικές). Συμπληρώνουμε τιμές:

Normal = 30

First Direction = 60

Second Direction = 60

Μετά την έναρξη αποκόλλησης, συνεχίζουμε με την διάδοση. Πατώντας στο **Suboptions -> Damage Evolution**, στο κουτί **Type** έχουμε δύο επιλογές, displacement και energy. Το displacement είναι η μέγιστη μετατόπιση, δηλαδή το μέγιστο άνοιγμα των δύο μπλοκ φόρτισης. Εμείς επιλέγουμε **energy**, δηλαδή τις τιμές fracture energy, τα  $G_c$  για τα τρία modes. Οι τιμές είναι:

Normal = 0.95

Shear First Direction = 1.16

Shear Second Direction = 1.16

Συνεχίζουμε με **Create Section**. Εδώ δίνουμε πληροφορίες για τα properties του υλικού, για όλο το κομμάτι ή μέρος του.

Σύνθετο:

Solid -> Homogeneous -> Material: Comp

Cohesive:

Other -> Cohesive -> Material: Cohesive και Response: Traction Separation

Επόμενο βήμα, **Assign Section**, όπου αποδίδουμε τα δύο sections σε συγκεκριμένα κομμάτια του δοκιμίου. Επιλέγουμε με τον κέρσορα τα δύο composite arms και αποδίδουμε το composite section. Κάνουμε το ίδιο για το cohesive element και το cohesive section.

### 7.3.3 Assembly

Στο module “**Assembly**”, δημιουργούμε ένα global σύστημα συντεταγμένων για το δοκίμιό μας. Κάνουμε **Create Instance -> Create Instances from Parts και Instance Type -> Dependent**.

### 7.3.4 Βήμα ανάλυσης

Στο module “**Step**”, δημιουργούμε ένα ή σειρά βημάτων για την ανάλυση. Κάνουμε **Create Step, Step 1 και Static, General**. Στο **Basic**, επιλέγουμε Nisgeom: On. Όπως γράφει και δίπλα, με αυτήν την επιλογή συμπεριλαμβάνονται στο step μη γραμμικές επιρροές από μεγάλες μετατοπίσεις και επηρεάζονται τα επόμενα steps (εδώ δεν υπάρχουν). Έπειτα, **Incrementation, Type: Automatic, Maximum number of increments: 1000 και Increment size:**

Initial: 0.1

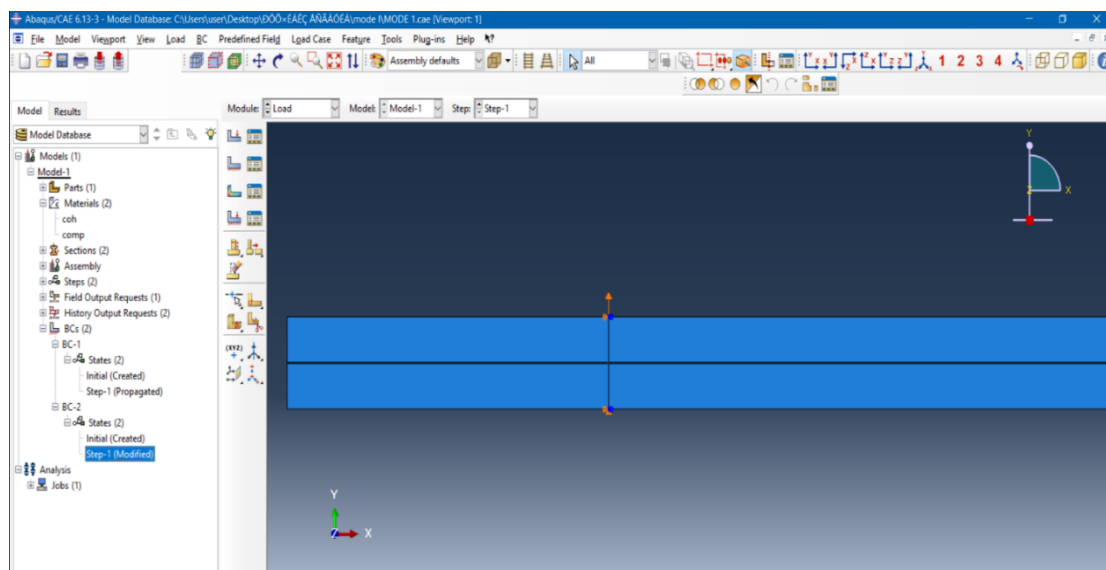
Minimum: 1E-006

Maximum: 1

Σε αυτό το σημείο, στο module “**Step**”, θα κάνουμε ένα επιπλέον βήμα. Πάμε στο πάνω μέρος της οθόνης στο **Other -> General Solutions Control -> Step: Step 1 και Edit και Continue**. Στην συνέχεια, πάμε στο **Time Incrementation**, στο πρώτο **More**, και στο **I<sub>A</sub>** αντί για 5 που είναι η default τιμή, βάζουμε 30. Το βήμα αυτό είναι απαραίτητο για να τρέξει η ανάλυσή μας και να μην βγει error.

### 7.3.5 Συνοριακές συνθήκες

Για τις συνοριακές συνθήκες, κάνουμε: **Create Boundary Condition -> Step:Initial, Category: Mechanical και Types for Selected Step: Displacement/Rotation**.



*Εικόνα 38: Εφαρμογή συνοριακών συνθηκών.*

Επιλέγουμε τον κάτω κόμβο όπως φαίνεται στην εικόνα και πατάμε τικ στα U1, U2 και UR3. Ύστερα, κάνουμε δεύτερο **Displacement/Rotation**, αυτή τη φορά με **Step: Step 1**, επιλέγουμε πάλι τον κάτω κόμβο, πατάμε τικ στα U1, U2, και UR3 και συμπληρώνουμε τιμές 0. Αυτό που κάναμε, είναι να πούμε στο πρόγραμμα πως το κάτω μέρος του δοκιμίου (στο σημείο που βρίσκεται ο κόμβος δηλαδή), θα είναι ακίνητο.

Στην συνέχεια, θα φτιάξουμε την συνοριακή συνθήκη για τον επάνω κόμβο. Κάνουμε τρίτο **Displacement/Rotation** με **Step: Initial** και πατάμε τικ στα τρία κουτιά όπως και πριν. Μετά, με ένα τέταρτο **Displacement/Rotation** αλλά με **Step: Step 1**, κάνουμε κλικ στον επάνω κόμβο αλλά κάνουμε τικ και στο κάτω μέρος της οθόνης αυτή τη φορά, στο **Create Set** και προσέχουμε τον αριθμό του Set (Set 1, 2, 3 κλπ). Αυτό το τικ, θα μας χρειαστεί αργότερα.

Στο **Edit Boundary Condition**, κάνουμε τικ μόνο στο U2 και συμπληρώνουμε την τιμή 100. Τότε παρατηρούμε να εμφανίζεται ένα βέλος που δείχνει προς τα πάνω, όπως παρατηρούμε και στην εικόνα 38. Αυτό που κάναμε, είναι να πούμε στο πρόγραμμα ότι θέλουμε το σημείο που βρίσκεται ο κόμβος να μετατοπιστεί 100 mm (η μέγιστη μετατόπιση που πήραμε από το πείραμα, ήταν 80, εμείς μπορούμε να βάλουμε και 100).

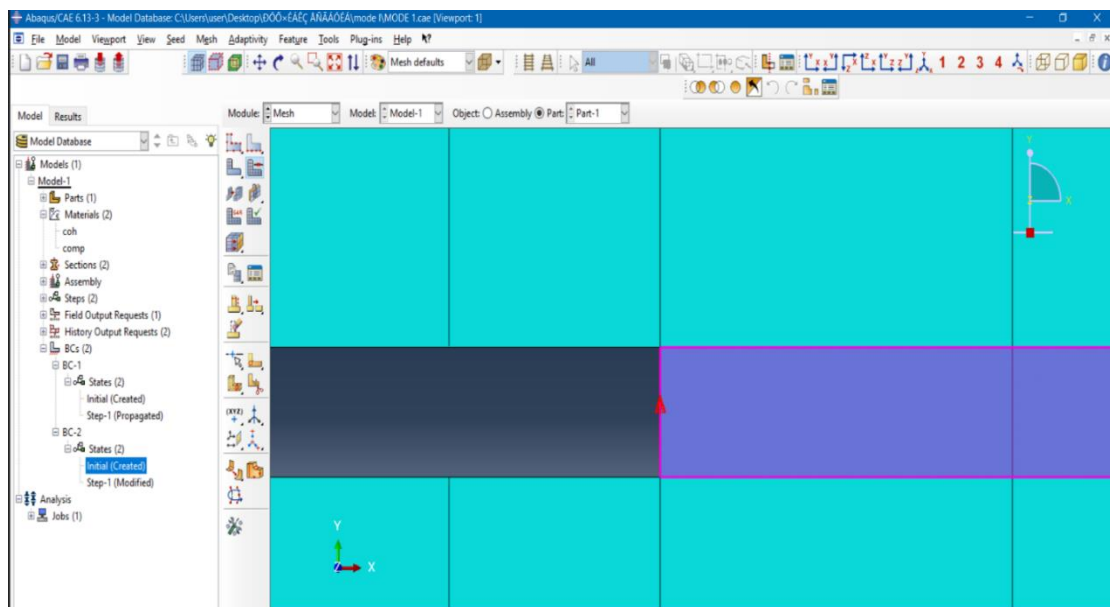
## 7.3.6 Mesh

Στο module “**Mesh**”, δημιουργούμε το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο συνίσταται να είναι αρκετά πυκνό, ώστε να λάβουμε ακριβή αποτελέσματα.

Ακριβώς πάνω από την οθόνη, στο object, επιλέγουμε **Part**. Στην συνέχεια, κάνουμε **Seed Part**, στο **Approximate Global Size** επιλέγουμε 0.1 ή και μικρότερη τιμή αν έχουμε καλό υπολογιστικό σύστημα και πατάμε OK. Εδώ ορίσαμε το πόσο πυκνό θέλουμε να είναι το πλέγμα.

Έπειτα, πατάμε στο **Assign Mesh Controls**, όπου ορίζουμε την μορφή των πεπερασμένων στοιχείων και επιλέγουμε με τον κέρσορα τα δύο arms του δοκιμίου, το σύνθετο, χωρίς το cohesive element δηλαδή. Επιλέγουμε **Quad** και **Structured**.

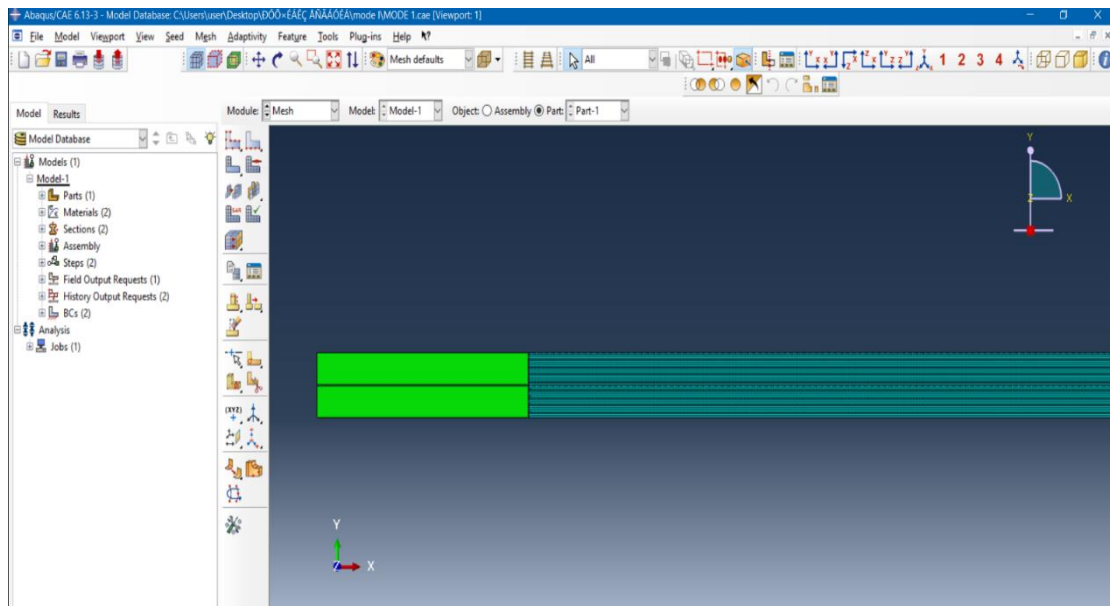
Κάνουμε δεύτερη φορά **Assign Mesh Controls**, αυτή τη φορά για το cohesive element. Το επιλέγουμε και μετά πατάμε **Quads** και **Sweep** αυτή τη φορά (με Structured δεν μπορεί να γίνει meshing). Πριν πατήσουμε OK όμως, κάνουμε **Redefine Sweep Path**. Όπως θα δούμε και στην εικόνα παρακάτω, κάνουμε κλικ στην κάθετη γραμμή στην αρχή του element με το κόκκινο βελάκι να δείχνει προς τα πάνω (αν είναι προς τα κάτω πατάμε **Flip**) και μετά **Accept Highlighted**.



Εικόνα 39: Το Sweep Path για το cohesive element.

Επόμενο βήμα είναι το **Assign Element Type**, όπου ορίζουμε τι συμπεριφορά θέλουμε να έχει το δοκίμιο ή μέρη αυτού. Με τον κέρσορα επιλέγουμε τα δύο composite arms και στο **Family** διαλέγουμε το **Plain Strain**, δίνουμε δηλαδή συμπεριφορά επίπεδης παραμόρφωσης. Κάνουμε το ίδιο για το cohesive element, μόνο που αυτή τη φορά στο **Family** επιλέγουμε **Cohesive**.

Τέλος, στο **Mesh Part** κρατάμε πατημένο το αριστερό κλικ και διαλέγουμε **Mesh Region**. Διαλέγουμε όλο το δοκίμιο πλην του κομματιού αριστερά από τις συνοριακές συνθήκες (λόγω του ότι εκεί μπαίνει το μπλοκ φόρτισης). Αυτό γίνεται για να γλιτώσουμε χρόνο από την ανάλυση. Η εικόνα μας θα είναι η εξής:



*Εικόνα 40: Περιοχή με και χωρίς πλέγμα.*

## 7.3.7 History Output Request

Επιστρέφουμε στο module “**Step**” και πατάμε **Create History Output**. Εδώ λέμε στο πρόγραμμα τι αποτελέσματα θέλουμε να μας βγάλει μετά την ανάλυση. Στο **Domain** επιλέγουμε **Set** και ακριβώς δίπλα διαλέγουμε το set που ανήκει στον επάνω κόμβο όπου δημιουργείται η μετατόπιση, όπως λέγαμε στο 7.3.5. Έτσι λέμε ότι τα αποτελέσματά που θα βγάλει το πρόγραμμα θα είναι για τον συγκεκριμένο κόμβο. Στο **Frequency** διαλέγουμε **Evenly Spaced Time Intervals** και στο **n** συμπληρώνουμε 200. Με αυτήν την κίνηση, δώσαμε 200 σημεία στην ανάλυση.

Στην συνέχεια, στο **Output Variables**, πατάμε **Select from list below** και επιλέγουμε:

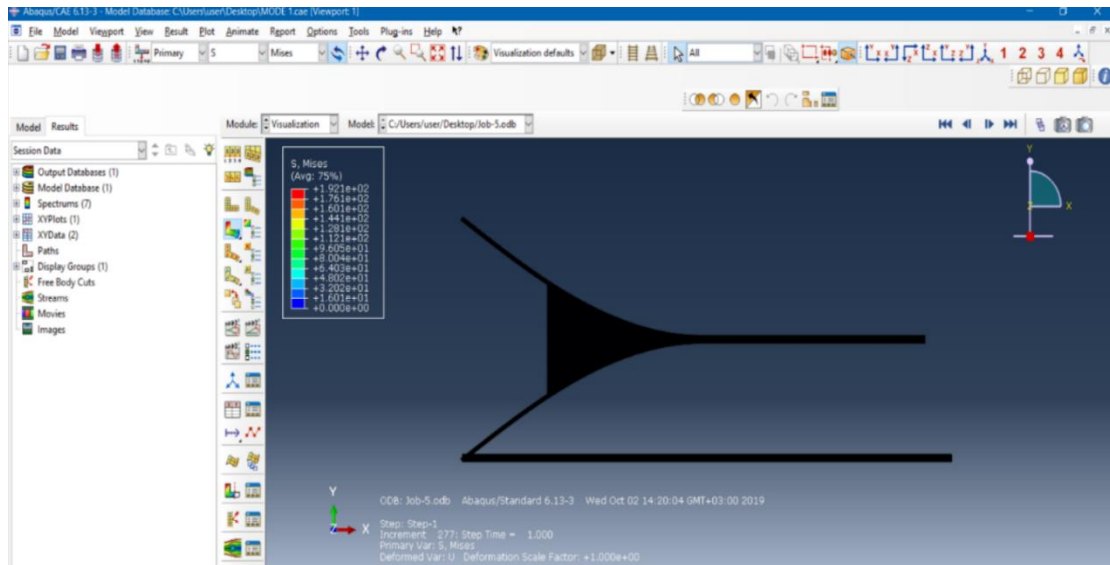
- Displacement/Velocity/Acceleration -> U, Translations and Rotations -> U2
- Forces/Reactions -> RF, Reaction Forces and moments -> RF2

## 7.3.8 Job

Στο module “**Job**”, κάνουμε **Create Job**. Στο **Parallelization**, κάνουμε tick στο **Use Multiple Processors** και επιλέγουμε τον αριθμό των επεξεργαστών του υπολογιστή μας, ώστε να μειώσουμε τον χρόνο της ανάλυσης. Μετά το OK, κάνουμε δεξί κλικ στο **Job** και μετά **Submit** για να ξεκινήσει η ανάλυση.

### 7.3.9 Αποτελέσματα

Στο module “**Visualization**”, βλέπουμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Κρατάμε πατημένο το αριστερό κλικ στο **Plot Contours on Deformed Shape** και πατάμε το **Plot Contours on Both Shapes**. Το πρόγραμμα θα δείξει το παραμορφωμένο και το αρχικό δοκίμιο ταυτόχρονα. Η εικόνα που παίρνουμε, φαίνεται από κάτω:

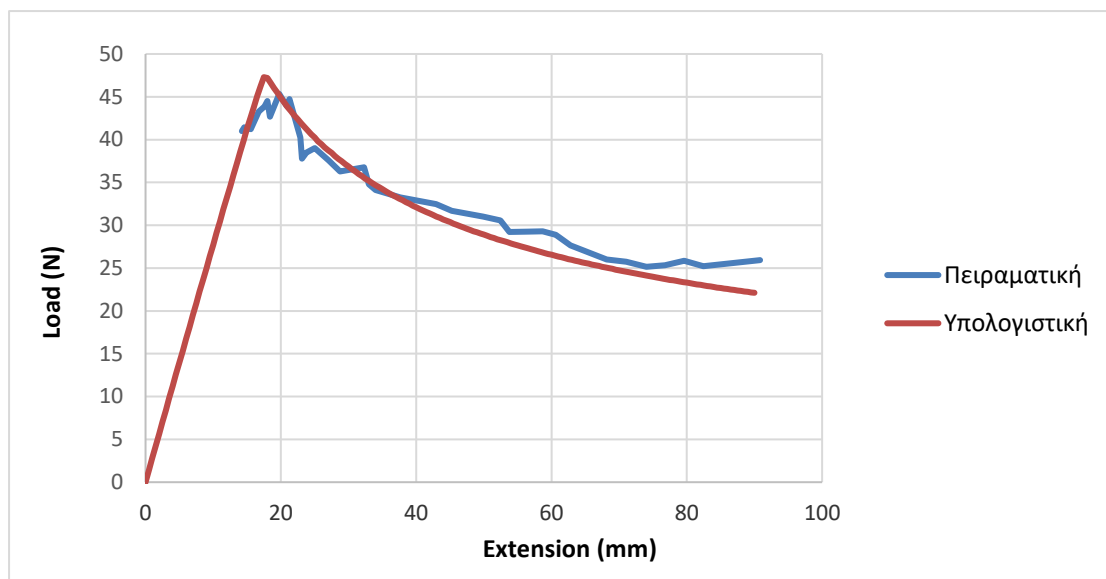


**Εικόνα 41:** Εικόνα του δοκιμίου (παραμορφωμένου και μη) στο τέλος της ανάλυσης (mode I).

Επόμενο βήμα είναι να εξάγουμε την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης στο Excel, όπου εκεί θα την διασταυρώσουμε με την πειραματική.

Κάνουμε **Create XY Data -> ODB History Output**, κάνουμε κλικ στα **Reaction Force RF2** και **Spatial Displacement U2** ταυτόχρονα και πατάμε **Plot**. Η εικόνα που θα μας βγάλει, θα είναι το φορτίο και η μετατόπιση συναρτήσεϊ του χρόνου.

Πατάμε στο πάνω μέρος της οθόνης **Plug – ins -> Tools – Excel Utilities**. Μετά, στο **Object: XY Data**, επιλέγουμε **Transfer Direction: From Abaqus/CAE to Excel** και στο **XY Data to Plot in Excel**, επιλέγουμε **From Current XY Plot**. Τότε μεταφέρεται η καμπύλη φορτίου – μετατόπισης στο Excel, όπου μεταφέρουμε το διάγραμμα μαζί με το πειραματικό και τα συγκρίνουμε. Η ταύτιση των καμπυλών μας, φαίνεται στην εικόνα 42.



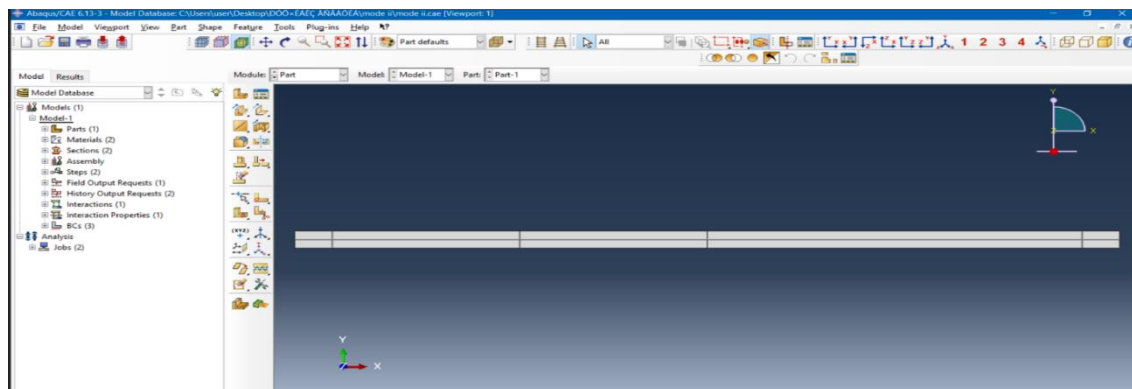
**Εικόνα 42:** Ταύτιση της υπολογιστικής καμπύλης με την πειραματική για το mode I.

Παρατηρούμε ότι υπάρχει πολύ καλή προσέγγιση της υπολογιστικής καμπύλης, άρα η ανάλυσή μας είναι επιτυχής.

## 7.4 Ανάλυση mode II

### 7.4.1 Σχεδιασμός

Το μοντέλο μας θα γίνει 2D, με διαστάσεις span length (απόσταση μεταξύ των δύο κυλίνδρων στερέωσης) – πάχους 100 και 3 mm αντίστοιχα. Το crack length είναι 30 mm από το άκρο, ενώ οι κύλινδροι στερέωσης (που στο δείγμα εισάγονται ως συνοριακή συνθήκη), μπαίνουν στα 5 mm από το άκρο.



**Εικόνα 43:** Δείγμα ENF.

Μόλις ολοκληρωθεί η σχεδίαση του ορθογωνίου, κάνουμε **Partition Face: Sketch** κι έπειτα **Create Lines: Connected**, για να σχεδιάσουμε τις κάθετες γραμμές που φαίνονται στην εικόνα (η αριστερή, η δεξιά και η κεντρική για να εφαρμοστούν αργότερα οι συνοριακές συνθήκες και η δεύτερη από αριστερά απλά για να δείχτεί που ξεκινάει το cohesive element). Έπειτα κάνουμε **Remove Faces** για να δείξουμε την αρχική ρωγμή.

### 7.4.2 Παράμετροι υλικών

Λόγω του ότι το υλικό είναι το ίδιο με το mode I, οι παράμετροι που θα εισαχθούν θα είναι ακριβώς οι ίδιες με πριν. Επίσης, το ίδιο κριτήριο έναρξης αποκόλλησης και τα ίδια sections.

### 7.4.3 Assembly

Κάνουμε **Create Instance -> Create Instances from Parts** και **Instance Type -> Dependent**.

### 7.4.4 Βήμα ανάλυσης

Όπως και στο mode I, κάνουμε πάλι **Create Step, Step 1** και **Static, General**. Στο **Basic**, επιλέγουμε **Nlgeom: On**. Έπειτα, **Incrementation, Type: Automatic, Maximum number of increments: 1000** και **increment size:**

Initial: 0.1

Minimum: 1E-006

Maximum: 1

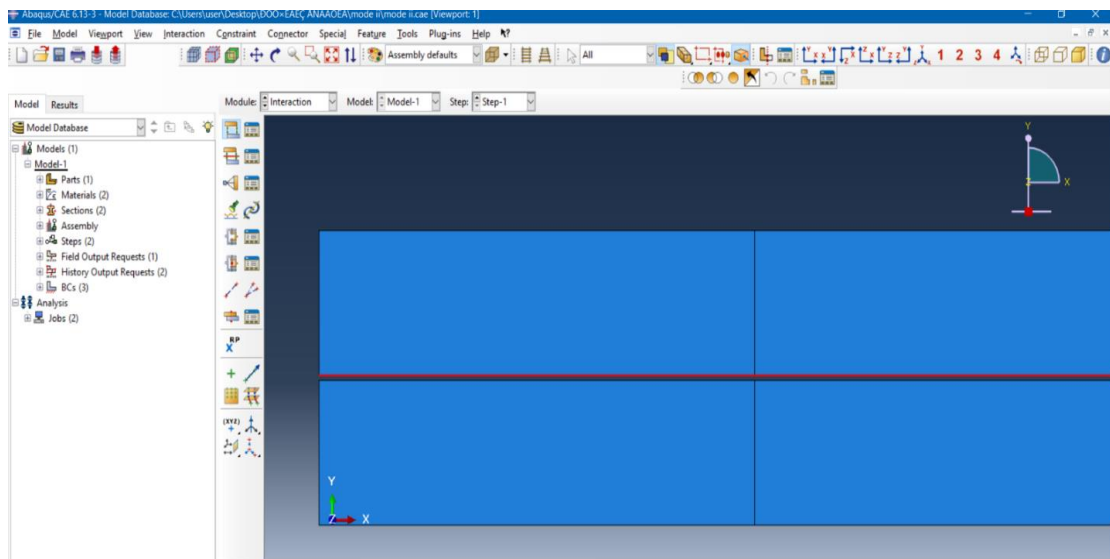
Να πούμε ότι το Minimum που χρησιμοποιούμε είναι πολύ μεγάλο, συνίσταται να χρησιμοποιείται πολύ μικρότερο (της τάξης του 1E-020) για να μειώσουμε την πιθανότητα εμφάνισης error.



### 7.4.5 Interaction

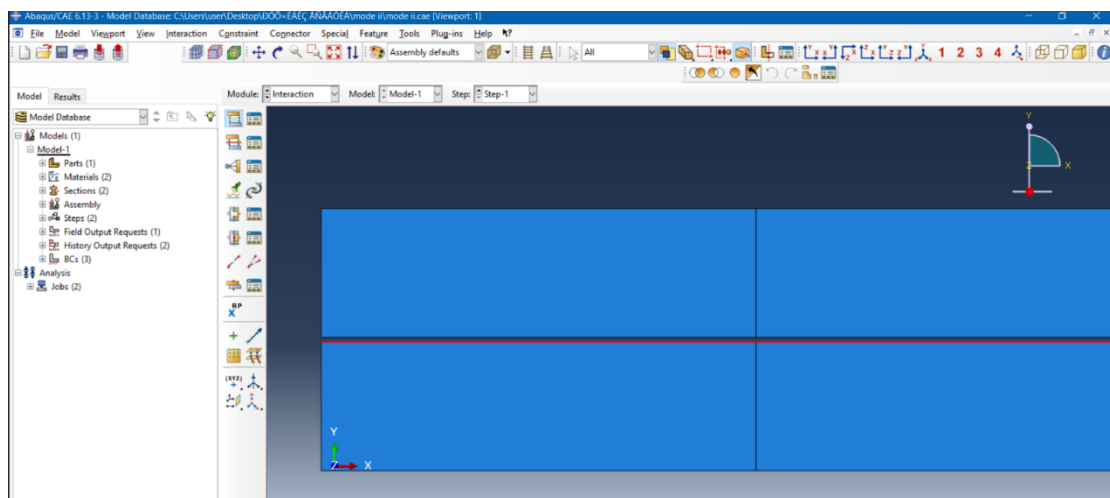
Στο module “**Interaction**”, θα δημιουργήσουμε contact μεταξύ των δύο composite arms ΠΡΙΝ ξεκινήσει το cohesive element, χρησιμοποιώντας συντελεστή τριβής. Ο λόγος που γίνεται αυτό το βήμα, είναι διότι χωρίς contact, το ένα arm θα “μπαίνει” μέσα στο άλλο κατά την ανάλυση.

Κάνουμε **Create Interaction** και επιλέγουμε **Surface-to-surface contact**. Αμέσως μετά, το πρόγραμμα μας ζητάει να επιλέξουμε την **master surface**. Η επιλογή φαίνεται στην αποκάτω εικόνα.



*Εικόνα 44: Επιλογή master surface (με κόκκινο).*

Μετά την **master surface**, το πρόγραμμα μας ρωτάει “**Choose the slave type**”. Πατάμε **Surface** και επιλέγουμε την **slave surface**.

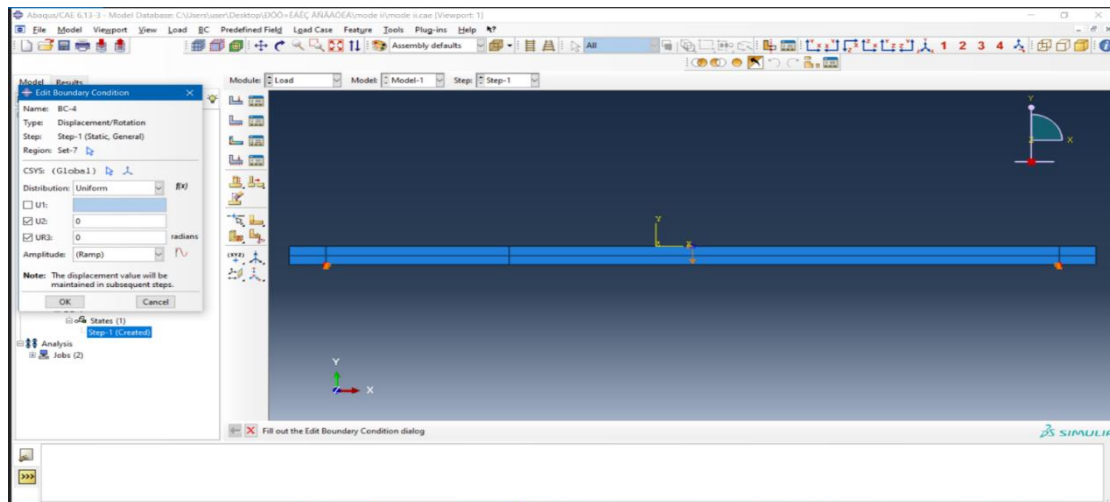


*Εικόνα 45: Επιλογή slave surface (με κόκκινο).*

Ύστερα, στο κουτί **Edit Interaction**, στο κάτω μέρος δεξιά, κάνουμε κλικ στο τετραγωνάκι που γράφει **Create Interaction Property**. Έπειτα, **Mechanical -> Tangential Behavior** και στο **Friction formulation**, επιλέγουμε **Penalty**. Στο **Friction Coeff**, συμπληρώνουμε 0.5. Το Contact είναι έτοιμο.

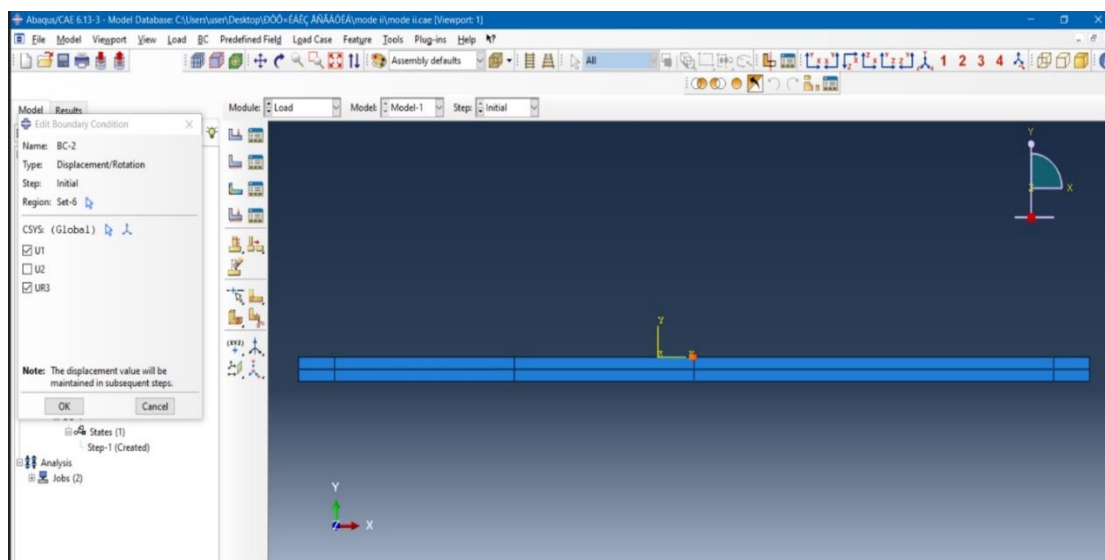
#### 7.4.6 Συνοριακές συνθήκες

Για τις συνοριακές συνθήκες, κάνουμε: **Create Boundary Condition -> Step: Step 1, Category: Mechanical** και **Types for Selected Step: Displacement/Rotation**. Επιλέγουμε τους δύο κόμβους που φαίνονται στην επόμενη εικόνα και πατάμε τικ στα U2 και U3 με τιμές 0. Με αυτό δείξαμε στο πρόγραμμα ότι οι συγκεκριμένοι κόμβοι θα είναι κύλιση, δηλαδή ελεύθεροι να κινούνται στον άξονα X.



*Εικόνα 46: Οι δύο κόμβοι (οι κόκκινες τελείες) όπου εφαρμόζεται η συνθήκη κύλισης.*

Επόμενο βήμα είναι η μετατόπιση του κεντρικού κυλίνδρου. Κάνουμε **Displacement/Rotation** με **initial step**, επιλέγουμε τον επάνω κόμβο στο κέντρο του κυλίνδρου όπου θα δούμε και στην επόμενη εικόνα και κάνουμε τικ στα U1 και U3. Δίνουμε εντολή για κίνηση στον άξονα Y. Με άλλο ένα **Displacement/Rotation** αλλά με **Step 1**, επιλέγουμε πάλι τον κόμβο και κάνουμε τικ στα U1 και U3 με τιμές 0.



*Εικόνα 47: Ο κεντρικός κόμβος (με κόκκινο), όπου μπαίνει η κάθετη μετατόπιση.*

Στο επόμενο **Displacement/Rotation**, με **Step 1**, επιλέγουμε τον ίδιο κόμβο, κάνουμε tick στο U2 και βάζουμε την τιμή 7.5 (δηλαδή η μέγιστη μετατόπιση του κόμβου προς τα κάτω να είναι 7.5 mm). Κάνουμε tick στο **Create Set** για να το εισάγουμε αργότερα στο History Output Request. Με αυτό το βήμα, τελειώνει η εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών.

## 7.4.7 Mesh

Στο module “**Mesh**”, δημιουργούμε το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων. Ακριβώς πάνω από την οθόνη, στο object, επιλέγουμε **Part**. Στην συνέχεια, κάνουμε **Seed Part**, στο **Approximate Global Size** επιλέγουμε 0.1 και πατάμε OK.

Έπειτα, πατάμε στο **Assign Mesh Controls**, όπου ορίζουμε την μορφή των πεπερασμένων στοιχείων και επιλέγουμε με τον κέρσορα τα δύο arms του δοκιμίου, το σύνθετο, χωρίς το cohesive element δηλαδή. Επιλέγουμε **Quad** και **Structured**.

Κάνουμε δεύτερη φορά **Assign Mesh Controls**, αυτή τη φορά για το cohesive element. Το επιλέγουμε και μετά πατάμε **Quads** και **Sweep**. Πριν πατήσουμε OK, κάνουμε **Redefine Sweep Path**. Όπως και στο mode I, κάνουμε **Sweep Path** με το κόκκινο βελάκι να δείχνει προς τα πάνω (αν είναι προς τα κάτω πατάμε **Flip**) και μετά **Accept Highlighted**.

Επόμενο βήμα είναι το **Assign Element Type**, όπου ορίζουμε τι συμπεριφορά θέλουμε να έχει το δοκίμιο ή μέρη αυτού. Με τον κέρσορα επιλέγουμε τα δύο composite arms και στο **Family** διαλέγουμε το **Plain Strain**. Κάνουμε το ίδιο για το cohesive element, μόνο που αυτή τη φορά στο **Family** επιλέγουμε **Cohesive**.

Τέλος, κάνουμε **Mesh Part** και δημιουργείται το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων.

### 7.4.8 History Output Request

Επιστρέφουμε στο module “**Step**” και πατάμε **Create History Output**. Στο **Domain** επιλέγουμε **Set** και ακριβώς δίπλα διαλέγουμε το set που ανήκει στον επάνω κόμβο όπου δημιουργείται η μετατόπιση. Στο **Frequency** διαλέγουμε **Evenly Spaced Time Intervals** και στο **n** συμπληρώνουμε και πάλι 200. Στην συνέχεια, στο **Output Variables**, πατάμε **Select from list below** και επιλέγουμε:

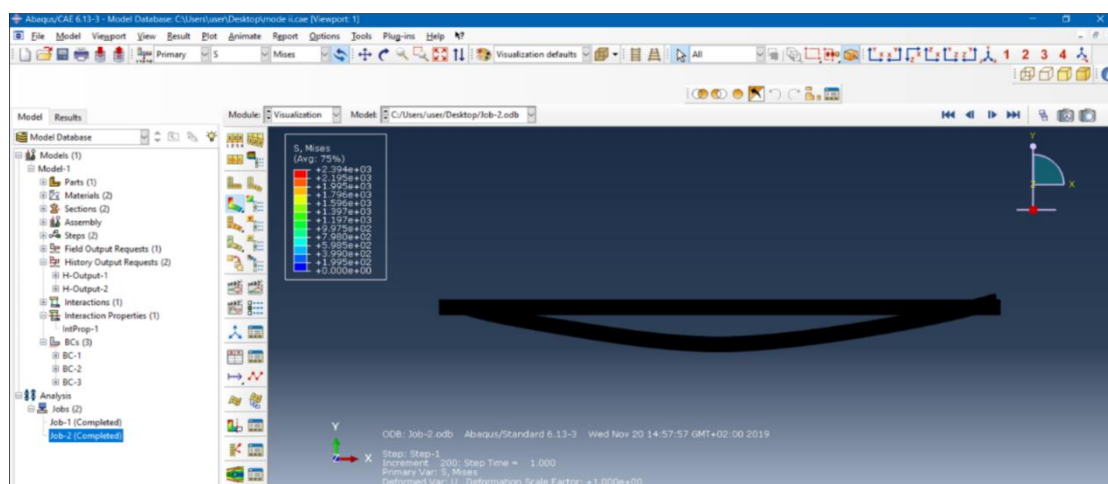
- Displacement/Velocity/Acceleration -> U, Translations and Rotations -> U2
- Forces/Reactions -> RF, Reaction Forces and moments -> RF2

### 7.4.9 Job

Στο module “**Job**”, κάνουμε **Create Job**. Στο **Parallelization**, κάνουμε tick στο **Use Multiple Processors** και επιλέγουμε τον αριθμό των επεξεργαστών του υπολογιστή μας, ώστε να μειώσουμε τον χρόνο της ανάλυσης. Δεξί κλικ στο **Job** και μετά **Submit** για να ξεκινήσει η ανάλυση.

### 7.4.10 Αποτελέσματα

Στο module “**Visualization**”, βλέπουμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Κρατάμε πατημένο το αριστερό κλικ στο **Plot Contours on Deformed Shape** και πατάμε το **Plot Contours on Both Shapes**. Το πρόγραμμα θα δείξει το παραμορφωμένο και το αρχικό δοκίμιο ταυτόχρονα. Η εικόνα που παίρνουμε, φαίνεται από κάτω:

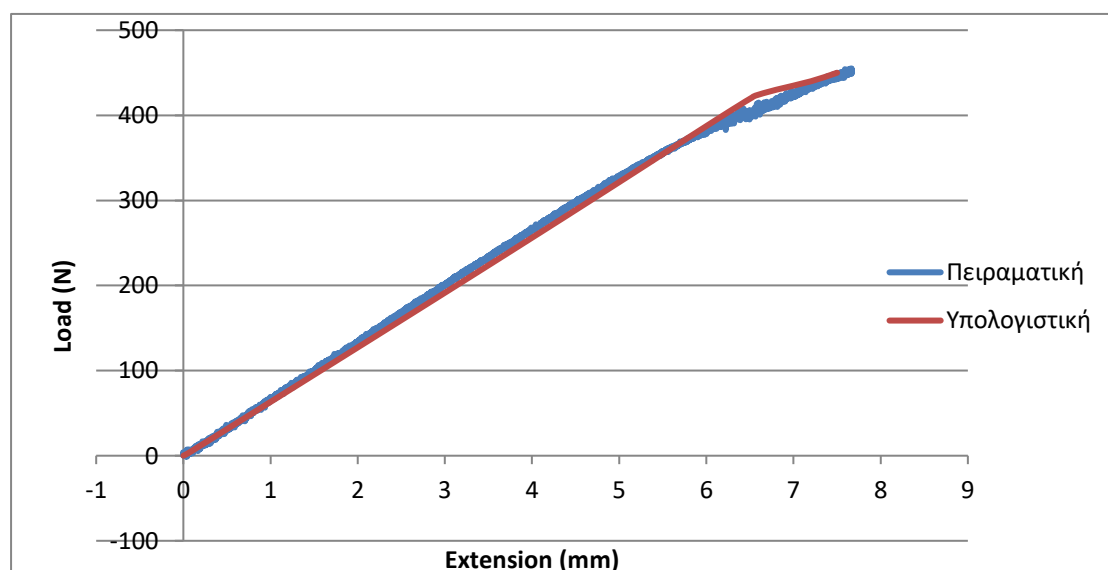


**Εικόνα 48:** Εικόνα του δοκιμίου (παραμορφωμένου και μη) στο τέλος της ανάλυσης (mode II).

Επόμενο βήμα είναι να εξάγουμε την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης στο Excel, όπου εκεί θα την διασταυρώσουμε με την πειραματική.

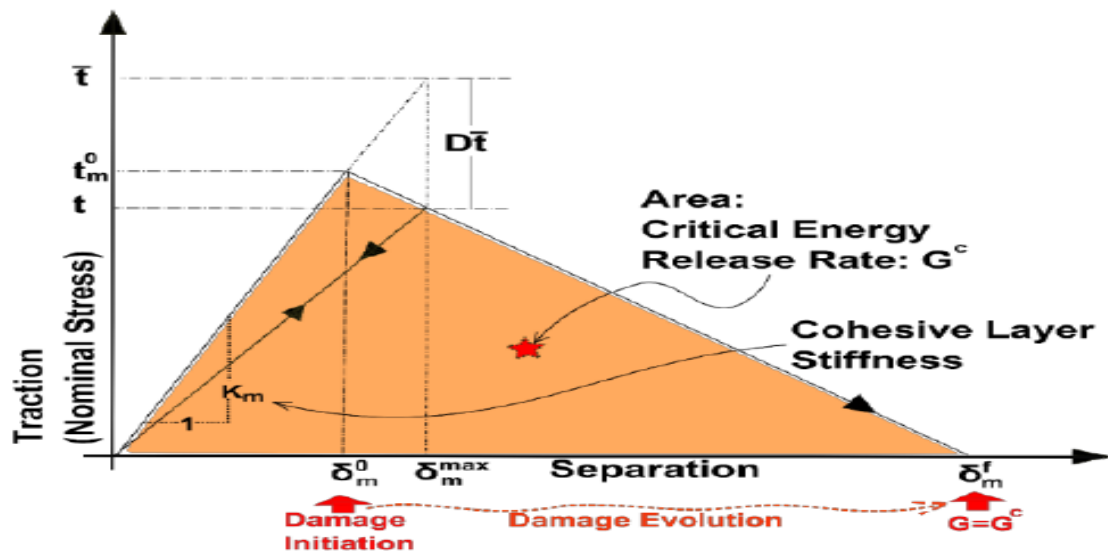
Κάνουμε **Create XY Data -> ODB History Output**, κάνουμε κλικ στα **Reaction Force RF2** και **Spatial Displacement U2** ταυτόχρονα και πατάμε **Plot**. Η εικόνα που θα μας βγάλει, θα είναι το φορτίο και η μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου.

Πατάμε στο πάνω μέρος της οθόνης **Plug – ins -> Tools – Excel Utilities**. Μετά, στο **Object: XY Data**, επιλέγουμε **Transfer Direction: From Abaqus/CAE to Excel** και στο **XY Data to Plot in Excel**, επιλέγουμε **From Current XY Plot**. Τότε μεταφέρεται η καμπύλη φορτίου – μετατόπισης στο Excel, όπου μεταφέρουμε το διάγραμμα μαζί με το πειραματικό και τα συγκρίνουμε. Η ταύτιση των καμπυλών μας, φαίνεται στην εικόνα 45.



**Εικόνα 49:** Ταύτιση της υπολογιστικής καμπύλης με την πειραματική για το mode II.

Παρατηρούμε ότι υπάρχει πολύ καλή προσέγγιση της υπολογιστικής καμπύλης, άρα η ανάλυσή μας είναι επιτυχής.



*Εικόνα 50: Νόμος traction – separation. Στη ουσία, πρόκειται για την απόκριση του cohesive element. Φαίνονται τα μεγέθη που μπαίνουν ως παράμετροι στο πρόγραμμα.*

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

---

- [1] Ε.Μ.Π. - Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών – Μαθήματα - Σύνθετα υλικά
- [2] Πανεπιστήμιο Πατρών – Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών – Μαθήματα – Σύνθετα υλικά – Δρίτσος
- [3] Πανεπιστήμιο Πατρών – Τμήμα Χημείας – Πτυχιακή εργασία – “Παρασκευή και μελέτη ενισχυμένων πολυεστερικών ρητινών” – Μανιταρά Κωνσταντίνα
- [4] Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ – Τμήμα Πολιτικών Δομικών Έργων – Πτυχιακή εργασία – “Χρήση σύνθετων υλικών στην επισκευή κατασκευών” – Δραμηλαράκης Ανδρέας και Αντωνογιαννάκης Ιωάννης
- [5] Ε.Μ.Π. – Σχολή Χημικών Μηχανικών – Διπλωματική εργασία – “Σύνθετα υλικά εποξειδικής ρητίνης – ιών άνθρακα – μεταλλικών κόνεων ψευδαργύρου: κατασκευή, μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες” – Γκερού Ελισάβετ
- [6] Πανεπιστήμιο Πατρών – Τμήμα Φυσικής – Μεταπτυχιακή διατριβή – “Μελέτη της μεταβολής της απόσβεσης πολυμερών και σύνθετων υλικών με την προσθήκη νανοσωματιδίων” – Μητρούση Μαρίνα - Ειρήνη
- [7] ΑΛΦΑΚΕΜ Χημικά προϊόντα - ναυτιλιακά
- [8] Βικιπαίδεια “Σύνθετα Υλικά”
- [9] Τεχνική έκθεση πρακτικής άσκησης  
Φορέας: ΑΔΑΜΑΝΤ ΑΕΡΟΔΙΑΣΤΗΜΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ Ε.Π.Ε.
- [10] “Design Development of an Aircraft Strut in Carbon Fibre Reinforced Plastic” - T. A. Collings - Structures Dept., R.A.E., Farnborough
- [11] “Application of fracture mechanics to composite materials” - K. Friedrich
- [12] “Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites” - ASTM International
- [13] “Standard Test Method for Mode II Interlaminar Fracture Toughness of

Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites” - ASTM  
International





