



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*Η επίδραση μηχανισμών triggering στη συμπεριφορά
κατάρρευσης υβριδικών sandwich σύνθετων κατασκευών*

ΚΑΖΑΣΙΔΗΣ ΜΑΡΙΟΣ

Επίβλεπων καθηγητής:

Δ. Μανωλάκος

ΑΘΗΝΑ

ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2012

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θεωρώ ευτυχία την δυνατότητα που μου δόθηκε να σπουδάσω σε ένα δημόσιο (ακόμα) ανώτατο εκπαιδευτικό ίδρυμα της Ελλάδας σε μία δύσκολη περίοδο ,όπου τα δημόσια αγαθά καταργούνται. Τη στήριξη κατά τη διάρκεια των σπουδών μου την οφείλω αποκλειστικά στην οικογένειά μου την οποία είμαι πραγματικά τυχερός που την έχω. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου και ιδίως των κ. Μανωλάκο που μου εμπιστεύτηκε προς εκπόνηση την παρούσα διπλωματική, καθώς και τον κ. Κωστάζο για τις συμβουλές και την αμέριστη επιστημονική βοήθεια που μου παρείχε.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
2	ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ	9
2.1	Γενικά.....	9
2.2	Ιστορική ανασκόπηση.....	10
2.3	Πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών.....	15
2.4	Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών.....	19
2.4.1	Σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων.....	19
2.4.2	Στρωματικά σύνθετα υλικά.....	21
2.4.3	Ινοπλισμένα ή Ινώδη Σύνθετα υλικά.....	22
2.5	Μήτρες.....	28
2.5.1	Οργανικές μήτρες.....	29
2.5.2	Μεταλλικές μήτρες.....	30
2.5.3	Κεραμικές μήτρες.....	31
3	ΙΝΕΣ ΥΑΛΙΟΥ.....	32
3.1	Είδη υαλονημάτων.....	32
3.2	Παραγωγή υαλονημάτων.....	34
3.3	Εφαρμογές των GRP.....	35
3.4	Διαστρωμάτωση και προσανατολισμός ίνας.....	37
4	ΥΛΙΚΑ ΠΥΡΗΝΑ SANDWICH ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ.....	41
4.1	Μηχανικές ιδιότητες αφρών	41
4.2	Ποικιλίες αφρών.....	43
4.2.1	Πολυουρεθάνη /πολυσουκυανικό (PUR/PIR).....	44
4.2.2	Αφρώδες πολυστυρένιο.....	45
4.2.3	Φαινολικός αφρός.....	47
4.2.4	Αφρός χλωριούχου πολυβινυλίου (PVC).....	48

5	ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ SANDWITCH ΥΛΙΚΑ	49
5.1	Εισαγωγή.....	49
5.1.1	Αποδοτικότητα και κόστος υλικών.....	51
5.1.2	Η Αξία εξοικονόμησης βάρους.....	52
5.2	Δομή.....	52
5.2.1	Πυρήνες	52
5.2.2	Επιλογή του υλικού του πυρήνα.....	57
5.2.3	Εξωτερικές επιφάνειες.....	58
5.3	Συγκολλητικές ουσίες και ιδιότητές τους.....	61
5.3.1	Εποξιδικές ρητίνες.....	61
5.3.2	Τροποποιημένες εποξιδικές ενώσεις.....	61
5.3.3	Φαινολικές ουσίες	61
5.3.4	Πολυουρεθάνες.....	62
5.3.5	Αιθυλουρεθάνη.....	62
5.4	Παραγωγική διαδικασία.....	62
5.4.1	Μορφοποίηση σύνθετου οργανικής μήτρας	63
6	ΑΣΤΟΧΙΑ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	69
6.1	Μορφες αστοχίας.....	69
6.2	Μέθοδοι κατάρρευσης σύνθετων υλικών.....	72
6.3	Χαρακτηριστικά ενεργειακής απορρόφησης.....	77
6.3.1	Επιρροή ινών.....	79
6.3.2	Επιρροή Ρητίνης.....	84
6.3.3	Σχεδίαση στρώσεων.....	85
6.3.4	Ταχύτητα	85
6.3.5	Περιβάλλον	86

7	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	88
7.1	Περιγραφή πειραματικής διάταξης.....	88
7.2	Περιγραφή πειραματικών δοκιμών.....	89
	7.2.1 Υλικά και Δομή.....	89
	7.2.2 Ονοματολογία μάζα και διαστάσεις.....	96
7.3	Δοκίμιο S01.....	97
	7.3.1 Δομικές ατέλειες του S01.....	99
	7.3.2 Εκτέλεση πειράματος.....	100
	7.3.3 Αποτελέσματα και συζήτηση.....	106
7.4	Δοκίμιο S02.....	109
	7.4.1 Δομικές ατέλειες του S02	111
	7.4.2 Εκτέλεση πειράματος.....	113
	7.4.3 Αποτελέσματα και συζήτηση.....	118
7.5	Δοκίμιο S03.....	121
	7.5.1 Δομικές ατέλειες του S03	123
	7.5.2 Εκτέλεση πειράματος.....	125
	7.5.3 Αποτελέσματα και συζήτηση.....	130
8	ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	133
8.1	Πρόλογος.....	133
8.2	Παρατηρήσεις.....	134
8.3	Μηχανισμοί απορρόφησης ενέργειας.....	134
8.4	Συμπεράσματα.....	135
8.5	Παρουσίαση αποτελεσμάτων θλίψης άλλων τύπων μηχανισμών triggering.....	136
	8.5.1 Περιγραφή των πειραματικών δοκιμών.....	136
	8.5.2 Σχόλια επί των διαγραμμάτων.....	137
9	Βιβλιογραφία	140

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διεθνής έρευνα συνεχώς αναζητά νέα ,βελτιωμένα και αποδοτικά κατασκευαστικά υλικά .Ο βασικός στόχος αυτής της προσπάθειας είναι να βελτιωθεί η ανθεκτικότητα ,οι επιδόσεις και οι ιδιότητες των δομών σε κλάδους όπως η αυτοκινητοβιομηχανία ,η κατασκευή κτηρίων, η ναυπηγική και αεροναυπηγική βιομηχανία. Το πεδίο των σύνθετων υλικών προσφέρει νέες και καινοτόμες μεθόδους για τη κατασκευή προϊόντων υψηλής τεχνολογίας με τη δημιουργία πολυστρωματικών δομών οι οποίες συνδυάζουν πολλαπλές στρώσεις υλικών ,ανάλογα με της ιδιότητες που θέλουμε να προσδώσουμε στη κατασκευή.

Τα υβριδικά κελύφη χρησιμοποιούνται ευρέως στην προστασία οχημάτων έναντι σύγκρουσης (crashworthiness) καθώς και τη διαχείριση –απορρόφηση της ενέργειας αυτής. Η μείωση του βάρους των κατασκευών δεν πρέπει να επιτυγχάνεται ,αδιαφορώντας για της πιθανές επιπτώσεις που μπορεί να υπάρξουν σε τομείς όπως είναι η ασφάλεια των επιβατών. Πρέπει δηλαδή να επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων ενός πιθανού ατυχήματος στους επιβάτες και στο φορτίο του οχήματος. Προκειμένου να προσδιορίσουμε με επιστημονική ακρίβεια τις ιδιότητες που εμφανίζουν οι σύνθετες κατασκευές έναντι καταπονήσεων , τις εξετάζουμε τόσο σε συνθήκες εργαστηρίου μέσω διαφόρων πειραματικών καταπονήσεων (κρούση ,θλίψη, εφελκυσμός, στρέψη) ,όσο και μέσω μοντελοποίησης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.

Ένας άλλος καθοριστικός παράγοντας ο οποίος πρέπει να εξετάζεται ως προς τις επιπτώσεις που έχει στη απορρόφηση ενέργειας των κατασκευών είναι η διαμόρφωση του άκρου –μετώπου πρόσκρουσης (μηχανισμός triggering) .Η μορφή αυτή μπορεί να έχει δημιουργηθεί από το τρόπο που κατασκευάστηκε το κέλυφος ή μπορεί να έχει διαμορφωθεί κατάλληλα, ανάλογα με τις ανάγκες του πειράματος, σε κάποια εργαλειομηχανή.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την εξέταση της συμπεριφοράς τριών sandwich δομών με εγκάρσια ενισχυμένο πυρήνα και με διαφορετικούς μηχανισμούς triggering ,σε οιονεί -στατική θλίψη (quasi-static compression) .Τα δοκίμια αυτά είναι τρία κοίλα πάνελς τετραγωνικής διατομής με ίδια σύσταση υλικών (αφρός πυρήνα, είδος και προσανατολισμός των ινών των σύνθετων περιβλημάτων) ενώ διαφέρουν ως προς τη διαμόρφωση του άκρου/μετώπου πρόσκρουσης (μηχανισμός triggering).Συγκεκριμένα οι τέσσερις ακμές του άκρου των κοίλων sandwich κελύφων έχουν διαμορφωθεί σε τριγωνική ,τραπεζοειδή και ορθογωνική μορφή.

Στα πλαίσια του παρόντος πονήματος γίνεται και μία προσπάθεια να παρουσιαστούν βασικά στοιχεία της εξάρτησης του τρόπου κατάρρευσης του κάθε δοκιμίων συναρτήσει της διαμόρφωσης που έχουμε προσδώσει στο άκρο του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

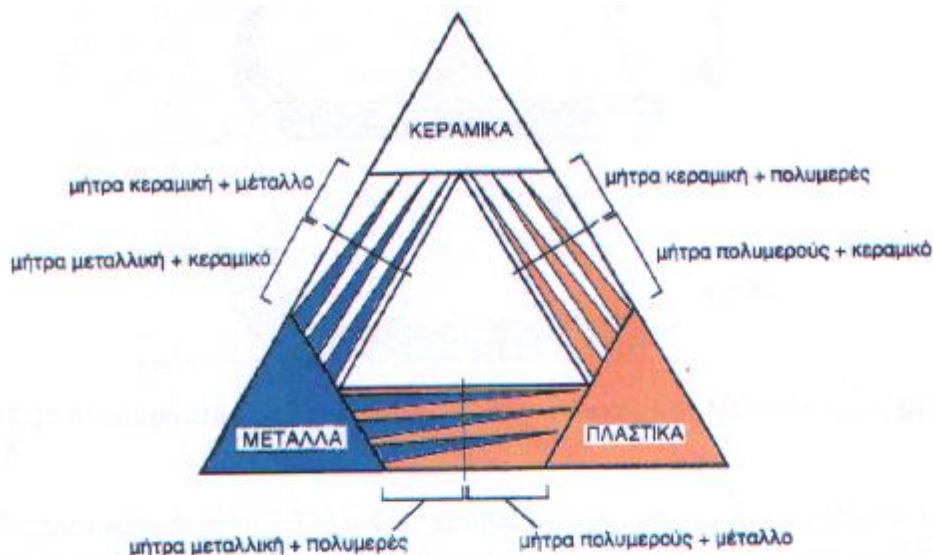
2.1 Γενικά ¹³

Ως σύνθετο υλικό ορίζεται το υλικό που αποτελείται από δύο ή περισσότερα συστατικά ,τα οποία συνδυάζονται για να επιτευχθούν ειδικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά, που κανένα από τα συμμετέχοντα συστατικά δε μπορεί να επιτύχει μόνο του.

Τα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται από τη συνύπαρξη δύο τουλάχιστον μακροσκοπικά διακρινόμενων συστατικών, από τα οποία το ένα ,χαρακτηριζόμενο ως συστατικό ενίσχυσης, προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές ,κυρίως , ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό ,το οποίο καλείται μήτρα ,είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης .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%).

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

Το σχήμα 2.1 παρουσιάζει τους συνδυασμούς ανά δύο των τριών βασικών κατηγοριών υλικών και οι οικογένειες των συνθέτων που προκύπτουν.



Σχήμα 2.1 Κατηγορίες σύνθετων υλικών

2.2 Ιστορική ανασκόπηση.

Η Επιστήμη των σύνθετων υλικών άρχισε να αναπτύσσεται σταθερά κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Παρόλα αυτά, τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται εδώ και πολλά χρόνια. Πρόσφατοι, οικονομικοί κυρίως λόγοι καθώς και κάποια έλλειψη φυσικών υλικών οδήγησαν σε μια αυξανόμενη δημοτικότητα των σύνθετων. Πέρα από αυτούς τους λόγους, η δημοτικότητα των σύνθετων υλικών οφείλεται και σε μία σειρά άλλων λόγων όπως είναι το μικρό τους βάρος σε συνδυασμό με τη μεγάλη τους αντοχή, το σχετικά χαμηλό κόστος τους και η μεγάλη ελευθερία στο σχεδιασμό.

Τα πρώτα ενισχυμένα πολυμερή υλικά φαίνεται να έχουν χρησιμοποιηθεί από τους Βαβυλώνιους κατά την περίοδο 4000-2000 π.Χ. Γύρω στο 3000 π.Χ. στοιχεία από διάφορες άλλες πηγές μας πληροφορούν ότι στην Αίγυπτο και στη Μεσοποταμία είχαν κατασκευαστεί σχεδίες από καλάμια παπύρου που προηγουμένως είχαν εμβαπτιστεί σε πίσσα. Αυτές οι σχεδίες θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι ο πρόδρομος των σύγχρονων πλαστικών σκαφών που είναι ενισχυμένα με ίνες γυαλιού.

Στη Μεσοποταμία περί το 2500 π.Χ. , λύθηκε το πρόβλημα της επικάλυψης των τούβλινων τοίχων με την ενσωμάτωση πέτρας ή κώνων από πηλό σε κρίσιμα σημεία του τοιχίου ,ενώ ταυτόχρονα τα διακοσμούσαν.

Το χαρτί είναι και αυτό ένα φυσικό ινώδες σύνθετο υλικό με πολύ ενδιαφέρουσα ιστορία ανάπτυξης και εξέλιξης. Ο πάπυρος υπήρξε η πιο διαδεδομένη γραφική ύλη σε όλη την αρχαιότητα ,μέχρι και το τέλος της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας. Αυτό το φυτό δύο ως τεσσάρων μέτρων ,αφθονούσε ιδιαίτερα στις όχθες του Νείλου στην Αίγυπτο ,αλλά και στη Σικελία.

Οι κατασκευαστές χώριζαν το παχύ τριγωνικό του στέλεχος σε φύλλα ,τα οποία αποτελούσαν τους κυλίνδρους του παπύρου. Έπειτα ,εφάρμοζαν αυτές τις λωρίδες σταυροειδώς, τη μία με την άλλη ,τις κολλούσαν και τις χτυπούσαν μ' ένα ξύλινο σφυράκι ,ώστε να δημιουργηθεί μία επιφάνεια όσο το δυνατόν πιο ενιαία. Με ένα ελαφρό κολλάρισμα ,μπορούσε κανείς να γράψει στον πάπυρο ,ο οποίος είχε μεγάλη αντοχή και διάρκεια.

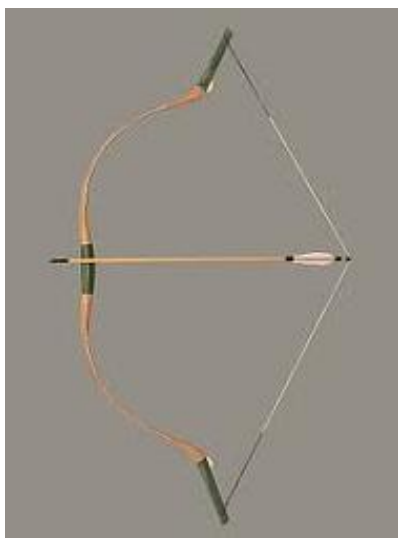
Η περγαμνή φαίνεται πως χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 197 π.Χ. από τον βασιλιά της Περγάμου ,Ευμένη Β΄.Η μικρασιατική αυτή πόλη έδωσε το όνομά της στο νέο υλικό .Η περγαμνή κατασκευάζονταν από δέρμα ζώου (αρνιού ή μοσχαριού) που ο τεχνίτης κατεργαζόταν και το έκανε τόσο λεπτό όσο ένα φύλλο χαρτιού .Η λεπτή αυτή διαδικασία απαιτούσε μεγάλη προσοχή και πολύ χρόνο.

Επειδή η περγαμνή ήταν σπάνια και δαπανηρή ,τον 8^ο αιώνα αρχίζουν έρευνες για να βρεθεί νέα γραφική ύλη. Χρειάστηκε να περάσουν πολλοί αιώνες, μέχρι να ανακαλυφθεί τυχαία και να χρησιμοποιηθεί στην Ευρώπη το χαρτί, τη μέθοδο κατασκευής του οποίου οι Κινέζοι γνώριζαν αιώνες πριν (220-210 π.Χ.).Οι Κινέζοι τελειοποίησαν τη μέθοδο κατασκευής και μετά τρεις αιώνες περίπου ,ο Καιλούν ,ανώτερος υπάλληλος του υπουργείου Γεωργίας και Βιομηχανίας, θα συστηματοποιήσει πρώτος την “τέχνη ” κατασκευής του χαρτιού. Αντικατέστησε το παραδοσιακό ράβδισμα του μπαμπού (με τη μέθοδο αυτή αποκτούσαν ίνες μακριές που τις έξαιναν ,τις άπλωναν σε ένα τραπέζι και τις κολλούσαν με κομιούχο καολίνη),με κοπάνισμα στο γουδί που γινόταν από ανθρώπινο χέρι .Η μέθοδος στη συνέχεια βελτιώθηκε. Οι Κινέζοι έμαθαν να πλένουν τις ίνες και να κατασκευάζουν το φύλλο χρησιμοποιώντας μία “φόρμα” που τη βουτούσαν στην πολτοποιημένη ζύμη ,ενώ παλαιότερα άπλωναν τη ζύμη με πινέλο σε μια πορώδη επιφάνεια. Συγχρόνως με την προετοιμασία των φύλλων που γινόταν με βάση το μπαμπού και την άσπρη μουριά ,ο Καιλούν πειραματίστηκε ακόμη και με φλοιό ιτιάς, βρύων, άχυρα ρυζιού και τσάι και ακόμη με παλιά ψαράδικα δίχτυα που τα έπλεναν και τα έβραζαν .Οι Κινέζοι δοκίμασαν επίσης να κατασκευάσουν ένα ειδικό χαρτί από μακριές ίνες ,με λεία και ανθεκτική επιφάνεια.

Περνώντας από τους Ασιάτες στους Άραβες Αβασίδες ,η κατασκευή του χαρτιού επρόκειτο να υποστεί μία ακόμη μεταβολή, όσον αφορά στη χρησιμοποιούμενη πρώτη ύλη. Οι φλοιοί των δέντρων αντικαταστάθηκαν από προϊόντα του ντόπιου υφαντικού πλούτου ,το λινάρι και τη κάνναβη. Η καινοτομία αυτή εγκαινίασε την εποχή του σύγχρονου χαρτιού. Αντικαταστάθηκε επίσης το ξύσιμο των φλοιών που γινόταν με το χέρι ,με μηχανική ενέργεια χρησιμοποιώντας πέτρινες μύλοπετρες τις και βαρείς οδοντωτούς τροχούς .Τον 12^ο αιώνα η επινοήση του χαρτιού περνάει στους Ιταλούς και εντέλει το 15^ο αιώνα όλες οι ευρωπαϊκές πόλεις προμηθεύονται με σχετική ευκολία το χαρτί.

Η τέχνη της μουμιοποίησης που αναπτύχθηκε στην αρχαία Αίγυπτο είναι ένα άλλο παράδειγμα μιας σύνθετης κατασκευής .Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, τα νεκρά σώματα μετά από κατάλληλη επεξεργασία, τυλίγονταν με ταινίες λινού και στη συνέχεια εμποτιζόταν με υγρή ρητίνη που χρησίμευε για εξωτερική προστασία.

Είναι γνωστό επίσης ότι το 1000 π.Χ. οι Ασσύριοι κατασκεύασαν πλωτές γέφυρες χρησιμοποιώντας σανίδες εμποτισμένες σε αδιάβροχη άσφαλτο. Αυτές οι βάρκες γνωστές με το όνομα gufas , χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα στην Αίγυπτο. Την ίδια περίπου εποχή ,στη Δυτική Ασία και την Κίνα κατασκευάστηκε ένα σύνθετο τόξο με αλληπάλληλες στρώσεις κεράτου. Το τόξο των Μογγόλων λέγεται ότι ήταν κατασκευασμένο από μεγαλύτερη ποικιλία υλικών, όπως τένοντες ζώων, ξύλο, μετάξι και άλλα υλικά που ήταν στερεά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Τα τελετουργικά σπαθιά των Ιαπώνων είχαν και αυτά σύνθετη πολυστρωματική δομή.



Εικόνα 2.1 Απεικόνιση σύνθετου Μογγολικού τόξου

Στην αρχαία Ελλάδα οι ασπίδες που κατασκευάζονταν ήταν ένα από τα πιο τεχνολογικά προηγμένα οπλικά συστήματα της εποχής της για αμυντική και επιθετική χρήση. Συνδύαζε την υψηλή δυσκαμψία σχήματος με την υψηλή αντοχή σε διάτρηση από τα εχθρικά δόρατα και βέλη. Η ασπίδα μπορεί να συγκριθεί με τα σημερινά αλεξίσφαιρα γιλέκα των οποίων η δομή είναι πολυστρωματική διαφορετικών υλικών (υφάσματα ινών αραμιδίου και πολυεστερικών φιλμ).

Σημαντική είναι όμως και η συνεισφορά των Ρωμαίων στις κατασκευές με σύνθετα υλικά με την ανάπτυξη του σύνθετου τούβλου και της ασπίδας από τσιμέντο. Κατά βάση πρόκειται για μια ασπίδα από τούβλα ενισχυμένη με τσιμέντο (που από μόνο του είναι σύνθετο υλικό), οποία ομογενοποιούνταν όταν έπηζε.

Η εξέλιξη των συνθέτων υλικών δεν παρουσιάζει τον ίδιο ρυθμό ανάπτυξης διαμέσου των αιώνων. Μέχρι τον 19ο αιώνα μ.Χ. η εξέλιξη αυτή είναι πολύ μικρή και τα σύνθετα υλικά του 19^{ου} αιώνα δεν διαφέρουν πολύ από αυτά των Αρχαίων Αιγυπτίων, Αρχαίων Ελλήνων, κ.λ.π. ούτε σε ποιότητα ούτε σε τεχνική κατασκευής.

Η πραγματική εκρηκτική εξέλιξη των συνθέτων υλικών σημειώνεται των 20^ο αιώνα. Τη δεκαετία του 1920, εμφανίστηκε το πρώτο πλήρως σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού. Επρόκειτο, για μείγμα ινιδίων ξύλου με φαινολική φορμαλδεΐδη, γνωστό αργότερα εμπορικά ως βακελίτης, προς τιμήν του Βέλγου επιστήμονα Leo H. Baekeland.

Η ίνα γυαλιού (fiberglass) παρασκευάστηκε, σχεδόν τυχαία στα 1930, όταν ένας μηχανικός παρατήρησε τη δημιουργία μιας ίνας κατά την εφαρμογή ετικέτας σε ένα γυάλινο μπουκάλι γάλακτος. Το 1935 η Owens Corning, η οποία προήλθε από την ένωση των Owens-Illinois και Corning Glass Works, εισήγαγε την πρώτη καθαρή ίνα γυαλιού. Η Douglas Aircraft, αγόρασε τον πρώτο ρόλο ινών γυαλιού, προκειμένου να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της εύκολης και φθηνής παραγωγής καλουπιών για την κατασκευή των εξαρτημάτων της. Σε συνεργασία με την Owens Corning, παράχθηκαν καλούπια με χρήση του νέου υλικού fiberglass και φαινολικής ρητίνης (της μόνης διαθέσιμης ρητίνης την περίοδο αυτή). Το αποτέλεσμα ήταν επιτυχές. Σύντομα, τα ενισχυμένα πλαστικά επεκτάθηκαν και σε άλλες εφαρμογές της αεροναυπηγικής.

Ο ρυθμός εξέλιξης των σύνθετων, ήδη ταχύς, επιταχύνθηκε κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Αναπτύχθηκαν ακόμα περισσότερα αεροσκάφη στα οποία πλέον χρησιμοποιούνται και δομικά μέρη από σύνθετα. Για παράδειγμα, στις ζοφερές μέρες του πολέμου, από τα τελευταία μέρη του αεροσκάφους που σχεδιάζονταν ήταν οι σωλήνες. Αφού όλα τα υπόλοιπα συστήματα ήταν ήδη ετοιμασμένα, οι σωληνώσεις απαιτούνταν να περάσουν από δύσκολες διαδρομές με γωνίες, συστροφές κτλ. Οι μεταλλικοί σωλήνες ήταν δύσκολο να κατασκευαστούν σε αυτά τα απαιτητικά σχήματα. Τα σύνθετα ήταν η απάντηση.

Άλλες εφαρμογές περιελάμβαναν ατρακτίδια κινητήρων (χρησιμοποιήθηκαν για την ελάφρυνση του αεροπλάνου A-20) και θόλους προστασίας εξοπλισμών ραντάρ ,οι οποίοι έδωσαν τόσο κατασκευαστική αντοχή όσο και διαπερατότητα (“διαφάνεια”) στα ραντάρ .Σήμερα πολλά δομικά μέρη του αεροσκάφους κατασκευάζονται με τη χρήση σύνθετων υλικών.



Εικόνα 2.2 Χρήση των σύνθετων υλικών στα εξωτερικά καλύμματα του AIRBUS A380

Μετά το τέλος του πολέμου ,η όλη δυναμική και τεχνογνωσία που είχε αναπτυχθεί κατευθύνθηκε σε εμπορικές εφαρμογές ,όπως πολυεστερικές ενισχυμένες με ίνες γυαλιού βάρκες .Μέχρι το 1948 πολλές χιλιάδες βάρκες τέτοιου είδους διατέθηκαν στο εμπόριο. Πολλές καινοτομικές μέθοδοι παραγωγής αναπτύχθηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1940 και στη δεκαετία του 1950 ,συμπεριλαμβανομένων της μορφοποίησης με εμβάπτιση από τον Goldsworthy και την μεγάλης κλίμακας περιέλιξης νήματος (large-scale filament winding)

Το 1961 καταχωρήθηκε μία πατέντα για την πειραματική κατασκευή της πρώτης ίνας άνθρακα (γραφίτη),αλλά η Courtaulds Limited του Ηνωμένου Βασιλείου ήταν η πρώτη που παρήγαγε εμπορικά βιώσιμες ίνες άνθρακα μερικά χρόνια αργότερα .Οι ίνες αυτές βελτίωσαν το λόγο δυσκαμψίας προς βάρος και τυγχάνουν ευρείας χρήσης στις εφαρμογές αεροδιαστημικής.

Οι ίνες αραμιδίου (Kevlar) διατέθηκαν στο εμπόριο το 1971 από την DuPont . Ίνες από πολύ υψηλού μοριακού βάρους πολυαιθυλένιο (ultra high molecular weight polyethylene) κατασκευάστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1970.Οι

παραπάνω προηγμένης απόδοσης ίνες, μαζί με της ίνες γυαλιού και άνθρακα ,έχουν οδηγήσει σε ραγδαίες εξελίξεις στους τομείς της αεροδιαστημική ,της θωράκισης (δομικής και σωματικής), του εξοπλισμού αθλητισμού, των ιατρικών μηχανημάτων και πολλών άλλων εφαρμογών υψηλής απόδοσης.

Η ειδική αντοχή (λόγος αντοχής προς πυκνότητα) και η ειδική δυσκαμψία (λόγος δυσκαμψίας προς πυκνότητα) των ενισχυτικών ινών βαίνουν συνεχώς αυξανόμενες τα τελευταία 30 χρόνια ,π.χ. η ειδική αντοχή και η ειδική δυσκαμψία των ινών γυαλιού ,άνθρακα αραμιδίου και βορίου έχουν φθάσει στο 10-14πλάσιο των αντίστοιχων τιμών του αλουμινίου (ελαφρό μέταλλο).Στην εποχή μας, η βιομηχανία των συνθέτων έχει εισέλθει σε μία ώριμη φάση. Τα προϊόντα, οι διεργασίες και οι εφαρμογές είναι καθορισμένα , με τη πρόοδο να είναι μάλλον εξελικτική ,παρά επαναστατική .Παρά ταύτα συνεχώς εμφανίζονται νέοι τομείς της αγοράς για τα σύνθετα ,επί παραδείγματι τα πτερόγια ανεμοστρόβιλου – μία εφαρμογή αφάνταστη πριν από 20 χρόνια.

2.3 Πλεονεκτήματα των Συνθέτων Υλικών¹⁴

Οι ιδιότητες κάθε υλικού ,κοινού ή σύνθετου μπορούν να διακριθούν σε μηχανικές και μη μηχανικές .Τα σύνθετα υλικά έχουν το μεγάλο πλεονέκτημα ότι διαθέτουν συνήθως τις βέλτιστες ιδιότητες των υλικών που τα αρχικά υλικά δεν διέθεταν .Έτσι ,οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών που τα καθιστούν ανώτερα από τα κοινά υλικά είναι :

I. Άριστες μηχανικές ιδιότητες

Αρκετοί τύποι ινών έχοντας τη προαπαιτούμενη αντοχή και δυσκαμψία εντάσσονται στην κατηγορία των προηγμένων ινών και έχουν αποτελέσει υλικά κατασκευής σε αεροδιαστημικές εφαρμογές. Οι ίνες βορίου και γραφίτη με τη μορφή λεπτών νημάτων έχουν λάβει από τους ερευνητές την μεγαλύτερη προσοχή εξαιτίας της μεγαλύτερης αντοχής και δυσκαμψίας τους .Το βόριο υπερίσχυσε στις εφαρμογές του γραφίτη εξαιτίας μερικών μειονεκτημάτων που παρουσίαζε ο γραφίτης όπως μικρή διαστρωματική διατμητική αντοχή και χαμηλή αντοχή σε θλίψη. Οι δύο παραπάνω ιδιότητες οφείλονται στη χαμηλή αντοχή του υλικού σε διεύθυνση κάθετη με αυτή των ινών και στη δυσκολία επίτευξης ενός ισχυρού δεσμού στη διεπιφάνεια μεταξύ μήτρας και ίνας.

II. Ανάληψη φορτίου μετά την αστοχία

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των συνθέτων υλικών είναι τα μεγάλα φορτία που εξακολουθούν να αναλαμβάνουν μετά από πιθανή αστοχία τους. Το παραπάνω χαρακτηριστικό παρατηρήθηκε αρκετές φορές σε στατικές δοκιμές συνθέτων

υλικών. Για παράδειγμα παρατηρήθηκε ότι τα ινώδη σύνθετα υλικά που είναι ενισχυμένα με ίνες γυαλιού μετά τη διαρροή τους εξακολουθούν να αναλαμβάνουν φορτία που φθάνουν το 85% της τάσης αστοχίας τους .Σε άλλες περιπτώσεις ,το παραπάνω ποσοστό μπορεί να φθάσει στο 110% ή και 150% του ορίου διαρροής. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μετά την αστοχία του υλικού συμβαίνει θραύση ινών και έτσι η τάση μεταβιβάζεται σε πολλαπλές κατευθύνσεις μέσα στη μάζα του υλικού.

III. Μικρή ευαισθησία σε εγκοπές-Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής

Τα ινώδη σύνθετα υλικά παρουσιάζουν σχετικά μικρή ευαισθησία στην ύπαρξη εγκοπών ενώ η διάδοση των ρωγμών είναι περιορισμένη. Το γεγονός αυτό βελτιώνει την αντοχή του υλικού σε κόπωση .Αυτό επιβεβαιώθηκε και σε δοκιμές κόπωσης που έγιναν σε πραγματικές κατασκευές από σύνθετα υλικά όπου παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της διάρκειας ζωής σε σχέση με αυτή των αντίστοιχων μεταλλικών κατασκευών .Τέλος ,αν συγκρίνουμε την ανά μονάδα βάρους διάρκεια ζωής σε κόπωση των ινωδών συνθέτων υλικών με εκείνη των παραδοσιακών υλικών θα παρατηρήσουμε ότι τα ινώδη σύνθετα υλικά παρουσιάζουν πολύ αυξημένες τιμές σε σχέση με το τιτάνιο που είναι το ανθεκτικότερο από όλα τα μέταλλα σε κόπωση.

IV. Μείωση του αριθμού των τμημάτων της κατασκευής

Ένα άλλο πλεονέκτημα των συνθέτων υλικών είναι ο ελάχιστος αριθμός τμημάτων που απαιτούνται για μια κατασκευή από σύνθετα υλικά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ανάδειξη παράλληλων πλεονεκτημάτων, όπως χαμηλότερο κόστος επισκευής, παραγωγής και κατεργασίας, ενώ η κατασκευή παρέχει μεγαλύτερη αξιοπιστία η οποία και αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα στην αεροδιαστημική τεχνολογία.

V. Βέλτιστες αεροδυναμικές επιφάνειες

Με την χρήση των συνθέτων υλικών τύπου sandwich μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν βέλτιστες αεροδυναμικές επιφάνειες που χαρακτηρίζονται από την διατήρηση του σχήματος τους ακόμα και κάτω από την επίδραση υψηλών φορτίων.

VI. Αντίσταση στη διάβρωση

Η απόλυτη αντίσταση στη διάβρωση είναι ένα ασυνήθιστο χαρακτηριστικό των μεταλλικών κατασκευών. Αντίθετα ,στα ενισχυμένα πλαστικά δεν παρατηρούνται φαινόμενα ηλεκτροχημικής διάβρωσης .Μόνο η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να

προκαλέσει μία υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους που όμως μπορεί να ελεγχθεί με την κατάλληλη προστασία του υλικού.

VII. Απόσβεση σε ταλαντώσεις

Τα σύνθετα υλικά και ειδικά οι τύποι sandwich παρουσιάζουν μεγάλη απορρόφηση ενέργειας με αποτέλεσμα να αποσβάνουν τις μηχανικές ταλαντώσεις ενώ παράλληλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σαν ηχομονωτικά υλικά

VIII. Αντοχή σε κρούσεις υψηλής ενέργειας

Η υψηλή αντοχή των συνθέτων υλικών σε κρουστικά φορτία υψηλής ενέργειας έχει σαν αποτέλεσμα την περιορισμένη καταστροφή της κατασκευής και την διατήρηση του περιγράμματος στις περιοχές γύρω από την καταστροφή. Η διάτρηση που προκύπτει από την βαλλιστική κρούση περιορίζεται σε μία περιοχή του υλικού που είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτή του βλήματος. Η συγκέντρωση των τάσεων γύρω από την περιοχή της καταστροφής στα μέταλλα είναι εξαιρετικά υψηλή ενώ αντίθετα στα ινώδη υλικά είναι σχετικά μικρή και στην περιοχή της διάτρησης δεν εμφανίζονται φαινόμενα διάδοσης ρωγμών.

IX. Χαμηλό κόστος κατασκευής

Από τις διάφορες εφαρμογές των συνθέτων υλικών και ιδιαίτερα τις αεροναυπηγικές, έχει υπολογιστεί μια σημαντική μείωση του κόστους των κατασκευών. Μεγαλύτερη μείωση κόστους παρατηρείται σε περιπτώσεις όπου απαιτείται υψηλή δυσκαμψία.

X. Μείωση του βάρους της κατασκευής

Από τις πρώτες εφαρμογές των συνθέτων υλικών, προέκυψαν σημαντικές μειώσεις του βάρους των κατασκευών. Οι μειώσεις αυτές μπορούν να φθάσουν μέχρι το 50% ενώ στις περισσότερες εφαρμογές κυμαίνονται μεταξύ 20-80%. Η μεγαλύτερη μείωση βάρους παρατηρείται στα πιο απλά κατασκευαστικά στοιχεία, όπως είναι οι άξονες, οι άτρακτοι, τα πλαίσια κ.α. Με την πρόοδο της έρευνας γύρω από την εξοικονόμηση βάρους αποδείχθηκε ότι σημαντική μείωση βάρους μπορούμε να πετύχουμε στις πτέρυγες των αεροσκαφών. Λόγω της υψηλής τιμής των ειδικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών, μπορούν να κατασκευαστούν πτέρυγες με πολύ μικρότερο πάχος από εκείνο των παραδοσιακών από αλουμίνιο χωρίς επιπρόσθετα σχεδιαστικά σφάλματα.

Από τα παραπάνω πλεονεκτήματα που αναφέραμε είναι προφανές ότι τα σύνθετα υλικά πράγματι αποτελούν μία επανάσταση και οι προοπτικές που διαγράφονται για την εφαρμογή και παραπέρα ανάπτυξη τους στο άμεσο και απώτερο μέλλον είναι λαμπρές.

Άλλες σημαντικές ιδιότητες θερμική μόνωση και η θερμική αγωγιμότητα.

Φυσικά ,ένα σύνθετο δεν μπορεί να διαθέτει ταυτόχρονα όλες τις παραπάνω ιδιότητες ,αφού στην πράξη δεν υπάρχει ποτέ τέτοια απαίτηση και μάλιστα μερικές από τις ιδιότητες είναι ασυμβίβαστες μεταξύ τους (π.χ. θερμική μόνωση και θερμική αγωγιμότητα).Κάθε σύνθετο υλικό κατασκευάζεται έτσι ώστε να διαθέτει μερικές από αυτές τις ιδιότητες. Για παράδειγμα, τα ινώδη υλικά είναι σημαντικά για την ακαμψία, την αντοχή , το βάρος και το κόστος τους.

Ένα από τα βασικά κριτήρια αξιολόγησης των υλικών είναι οι “ειδικές ιδιότητες” (specific properties) τους .Ονομάζουμε ειδική ιδιότητα τον λόγο της τιμής της ιδιότητας προς την πυκνότητα του υλικού .Όσο μεγαλύτερη τιμή έχει η ιδιότητα τόσο ελαφρύτερο είναι το υλικό ενώ συγχρόνως διαθέτει υψηλότερη τιμή της συγκεκριμένης ιδιότητας.

Η ειδική δυσκαμψία και η ειδική αντοχή μαζί με το κόστος αποτελούν σημαντικά κριτήρια για την αποτελεσματικότητα των συνθέτων υλικών .Ο λόγος κόστος/πυκνότητα ενός υλικού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες ,όπως π.χ. την εμπειρία στη μέθοδο κατασκευής του υλικού, την διαδικασία κατασκευής του. Εκτός τούτου ,η τιμή του λόγου αυτού δεν μπορεί από μόνη της να αποτελέσει κριτήριο για την αποτελεσματικότητα ενός υλικού από άποψη κόστους ,επειδή πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι ποσότητες των αποβλήτων που παράγονται κατά τη χρήση του υλικού. Απόβλητα ,είναι το μέρος του υλικού που περισσεύει μετά από την κατεργασία για τη διαμόρφωση του τελικού προϊόντος .Για τα περισσότερα κοινά υλικά το ποσοστό των αποβλήτων αποτελεί ένα μεγάλο μέρος του βάρους του τελικού προϊόντος και παρόλο που μπορεί να ανακυκλωθεί και να ξαναχρησιμοποιηθεί ,η ωφελιμότητα αυτής της ανακύκλωσης αντισταθμίζεται πολλές φορές από το κόστος της επεξεργασίας των αποβλήτων κατά την ανακύκλωση.

Τα σύνθετα υλικά εν τούτοις παρόλο που τα απόβλητα τους δεν μπορούν να ανακυκλωθούν γενικά ,παρουσιάζουν πολύ μειωμένο ποσοστό αποβλήτων επειδή μπορούν να διαμορφωθούν όσο το δυνατόν πλησιέστερα προς την τελική τους μορφή .Ένα απλό παράδειγμα πάνω στο θέμα των αποβλήτων είναι και το παρακάτω .Οι δοκοί και γενικότερα πολλά στοιχεία των πλαισίων των αεροσκαφών διαμορφώνονται με μεγαλύτερες οπές για να παρουσιάζουν μικρότερο βάρος. Όταν λοιπόν το πλαίσιο κατασκευάζεται από συμβατικά υλικά ,όπως π.χ. κράματα αλουμινίου ,οι οπές αυτές έχουν σαν συνέπεια τη δημιουργία αποβλήτων που

μπορούν να φτάσουν μέχρι και το 60% κατά βάρος .Αντίθετα ,αν το ίδιο πλαίσιο κατασκευαστεί από σύνθετα υλικά, το ποσοστό των αποβλήτων μπορεί να φτάσει μόλις το 10% κατά βάρος .Το παράδειγμα αυτό δεν είναι υποθετικό ,αλλά έχει επιτευχθεί στη πράξη σε πολλές περιπτώσεις κατασκευής τμημάτων πλαισίων αεροσκαφών και δείχνει φανερά την ανωτερότητα των ινωδών σύνθετων υλικών σε σχέση με τα παραδοσιακά υλικά.

Σε μερικές περιπτώσεις ,μπορεί ο λόγος κόστους/πυκνότητα των κοινών υλικών να είναι μικρότερος από την τιμή του αντιστοιχούν λόγου των συνθέτων υλικών .Το γεγονός όμως ότι τα κοινά υλικά παρουσιάζουν γενικά μεγάλο ποσοστό αποβλήτων ,αυξάνει την ποσότητα των υλικών αυτών που πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε μία συγκεκριμένη κατασκευή και κατά συνέπεια το συνολικό κόστος της κατασκευής είναι σημαντικά μεγαλύτερο. Με βάση το κριτήριο του κόστους μπορούμε να πούμε ότι τα σύνθετα υλικά έχουν αποδειχτεί σε πολλές περιπτώσεις αποτελεσματικότερα των παραδοσιακών.

2.4 Ταξινόμηση των Συνθέτων Υλικών

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

2.4.1. Σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων (particulate composites)

Η αλλιώς κοκκώδη σύνθετα υλικά τα οποία αποτελούνται από κόκκους ενός υλικού μέσα σε μήτρα ενός άλλου .Οι κόκκοι μπορεί να είναι μεταλλικοί ή μη όπως και η μήτρα .Σε αυτή τη κατηγορία οι συνδυασμοί υλικών που προκύπτουν είναι οι παρακάτω :

i. Υλικά μη μεταλλικού εγκλείσματος σε μη μεταλλική μήτρα

Το πιο κοινό παράδειγμα ενός τέτοιου υλικού είναι το σκυρόδεμα (όχι οπλισμένο).Το σκυρόδεμα αποτελείται από κόκκους άμμου και πέτρας δεμένους με ένα μίγμα τσιμέντου και νερού το οποίο έχει αντιδράσει χημικά και έχει σκληρύνει .Η αντοχή του σκυροδέματος αποδίδεται στην ύπαρξη των κόκκων πέτρας .Η αντοχή αυτή ποικίλλει και εξαρτάται πολύ από τον τύπο του τσιμέντου που χρησιμοποιείται. Επίσης ,φολίδες μη μεταλλικών υλικών όπως η μίκα ή το γυαλί μπορούν να αποτελέσουν το κοκκώδες εγκλείσμα μιας γυάλινης ή πλαστικής μήτρας αντίστοιχα και έτσι να προκύψει ένα σύνθετο υλικό αυτού του τύπου.

ii. Υλικά μεταλλικού εγκλείσματος σε μη μεταλλική μήτρα

Πολλά υλικά αυτού του είδους έχουν κατασκευαστεί με σκοπό την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας, την αύξηση του συντελεστή θερμικής διαστολής και την μείωση της φθοράς της μήτρας. Έτσι, μεταλλική σκόνη σαν εγκλείσμα μέσα σε μήτρα θερμοσκληρυνόμενης ρητίνης έχει σαν συνέπεια την δημιουργία ενός συνθέτου υλικού το οποίο είναι πιο ισχυρό και ανθεκτικό και άγει πιο εύκολα την θερμότητα και τον ηλεκτρισμό από ότι η ρητίνη μόνη της π.χ. εγκλείσμα σκόνης χαλκού μέσα σε εποξειδική ρητίνη αυξάνει πάρα πολύ την ηλεκτρική αγωγιμότητα της ρητίνης.

Επίσης είναι συνήθη τα σύνθετα υλικά με μεταλλικό εγκλείσμα υπό μορφή φολίδας. Τα χρώματα αργιλίου π.χ. είναι φολίδες μετάλλου σε αιώρηση μέσα στο χρώμα. Με την επίστρωση, οι φολίδες αυτές παραλληλίζονται με την επιφάνεια που βάφεται και αποτελούν ένα πολύ αποτελεσματικό κάλυμμα γι' αυτήν.

iii. Υλικά μεταλλικού εγκλείσματος σε μεταλλική μήτρα

Τα υλικά αυτού του τύπου δεν είναι κράματα. Το μεταλλικό εγκλείσμα έχει την μορφή κόκκων μέσα στην μήτρα και δεν είναι διαλυμένο μέσα σ' αυτήν όπως είναι στα κράματα. Ένα παράδειγμα υλικού αυτής της κατηγορίας είναι τα κράματα χαλκού ή χάλυβα που περιέχουν κόκκους μολύβδου. Η ύπαρξη των κόκκων του μολύβδου καθιστά το υλικό κατεργάσιμο στις εργαλειομηχανές. Επίσης, πολλά μέταλλα που έχουν πολύτιμες ιδιότητες αλλά είναι εύθραυστα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, όπως είναι το χρώμιο, το βολφράμιο, το μολυβδαίνιο κλπ., μπορούν να αποτελέσουν το κοκκώδες εγκλείσμα άλλων μετάλλων που παρουσιάζουν όγκιμη συμπεριφορά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το σύνθετο υλικό που προκύπτει είναι όγκιμο στη θερμοκρασία αυτή και διαθέτει μερικές από τις ιδιότητες του εύθραυστου εγκλείσματος.

iv. Υλικά μη μεταλλικού εγκλείσματος σε μεταλλική μήτρα

Μη μεταλλικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μορφή εγκλείσματος μέσα σε μεταλλική μήτρα. Τα σύνθετα υλικά που προκύπτουν ονομάζονται κεραμομέταλλα. Τα κεραμομέταλλα μπορεί να είναι δύο ειδών ανάλογα με το εγκλείσμα. Το πρώτο είναι κεραμομέταλλο με κόκκους οξειδίου ενός μετάλλου μέσα σε μεταλλική μήτρα τα οποία χρησιμοποιούνται στην κατασκευή εργαλείων και σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας όπου η αντίσταση στη διάβρωση είναι σημαντική. Το δεύτερο είδος είναι τα κεραμομέταλλα με κόκκους καρβιδίου ενός μετάλλου μέσα σε μεταλλική μήτρα. Έτσι το καρβίδιο του βολφραμίου μέσα σε

μήτρα κοβαλτίου χρησιμοποιείται σε τμήματα μηχανών τα οποία απαιτούν πολύ υψηλή σκληρότητα. Το καρβίδιο του χρωμίου μέσα σε μήτρα κοβαλτίου έχει μεγάλη αντοχή στην οξειδωση και στην διάβρωση ,ενώ έχει συντελεστή θερμικής διαστολής παραπλήσιο με αυτόν του χάλυβα και έτσι είναι κατάλληλο για χρήσεις σε βαλβίδες κ.λ.π. Τέλος το καρβίδιο του τιτανίου μέσα σε μήτρα νικελίου ή κοβαλτίου χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας όπως π.χ. σε διάφορα μέρη στροβιλομηχανών. Τα κεραμομέταλλα χρησιμοποιούνται επίσης σε πυρηνικούς αντιδραστήρες σαν καύσιμα όπως π.χ. κόκκοι οξειδίου μέσα σε ανοξειδωτο χάλυβα ,και σαν ράβδοι ελέγχου ,όπως π.χ. κόκκοι καρβιδίου του βορίου μέσα σε ανοξειδωτο χάλυβα.

2.4.2.Στρωματικά σύνθετα υλικά (laminar composites)

Σε αυτού του τύπου τα υλικά τόσο η μήτρα όσο και το έγκλεισμα έχουν τη μορφή φύλλων .Ο συνδυασμός τους μπορεί να δώσει ένα σύνθετο υλικό με εξαιρετικές ιδιότητες που συνήθως μπορεί να είναι η αντοχή ,η ακαμψία ,η αντίσταση στη διάβρωση ,η αντίσταση στη φθορά ,η εμφάνιση ,η ακουστική και θερμική μόνωση κ.λ.π. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τα κυριότερα είδη των υλικών που ικανοποιούν αυτές τις απαιτήσεις.

a. Διμέταλλα

Τα διμέταλλα είναι συνδεδεμένα φύλλα δύο μετάλλων με σημαντικά διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής. Αυτή η διαφορά στους συντελεστές θερμικής διαστολής τα καθιστά ικανά να κάμπτονται κατά ένα προκαθορισμένο τρόπο σε κάθε αλλαγή της θερμοκρασίας. Τα υλικά αυτά βρίσκουν εφαρμογή σαν εξαρτήματα μέτρησης θερμοκρασίας ,σαν θερμοστάτες κτλ.

b. Επιμεταλλωμένα μέταλλα

Η επιμετάλλωση ενός μετάλλου με ένα άλλο γίνεται για να προκύψει ένα σύνθετο υλικό που να συνδυάζει τις καλύτερες ιδιότητες και των δύο υλικών .Έτσι ,π.χ. τα υψηλής αντοχής κράματα αργιλίου δεν είναι ανθεκτικά στη διάβρωση ,εν τούτοις ,το καθαρό αργίλιο και μερικά κράματά του είναι ανθεκτικά στην διάβρωση αλλά δεν έχουν υψηλή αντοχή .Ένα κράμα υψηλής αντοχής του αργιλίου επιμεταλλωμένο με ένα κράμα αργιλίου ανθεκτικό στην διάβρωση αποτελεί ένα σύνθετο υλικό που διαθέτει και τις δύο ιδιότητες ,δηλαδή υψηλή αντοχή και αντοχή στη διάβρωση.

c. Ύαλος ασφαλείας

Η ύαλος ασφαλείας αποτελείται από ένα στρώμα ενός πλαστικού που ονομάζεται "polyvinyl butyral" συμπιεσμένο ανάμεσα σε δύο στρώματα συνήθους

υαλού. Η συνήθης υαλός είναι αρκετά ανθεκτική και διατηρεί την διαφάνειά της κατά την αλλαγή των συνθηκών περιβάλλοντος. Είναι όμως πολύ εύθραυστη ,γεγονός που την καθιστά επικίνδυνη σε πολλές εφαρμογές. Το πολυβινύλιο από την άλλη πλευρά είναι πολύ εύκαμπτο και χαράζεται εύκολα .Έτσι ,στην ύαλο ασφαλείας η ύαλος προστατεύει το πλαστικό από την χάραξη και του δίνει ακαμψία, ενώ το πλαστικό μειώνει τη ψαθυρότητα της υάλου και δίνει ανθεκτικότητα της όλης κατασκευής.

d. Υλικά με επίστρωση πλαστικού

Πολλά υλικά μπορούν αν διαβραχούν με διάφορα πλαστικά και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για διάφορους σκοπούς. Έτσι ,φύλλα γυαλιού και αμιάντου μπορούν να διαβραχούν με σιλικόνες και να παραχθεί ένα υλικό που έχει σημαντικές πυριμαχικές ιδιότητες. Επίσης ,γυαλί ή νάιλον μπορούν να διαβραχούν με διάφορες ρητίνες και να προκύψουν υλικά ανθεκτικά στην κρούση με υψηλή σκληρότητα ,τα οποία λόγω του μικρού βάρους τους είναι κατάλληλα για θωρακίσεις.

Εδώ πρέπει να επισημάνουμε ότι πάρα πολλά σύνθετα υλικά ανήκουν σε περισσότερες από μία από τις παραπάνω κατηγορίες. Ένα απλό παράδειγμα είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα που αποτελείται από ινώδες έγκλεισμα (χάλυβας) μέσα σε μία μήτρα /,που είναι ένα κοκκώδες σύνθετο υλικό (σκυρόδεμα).Έτσι ,μπορούμε να πούμε ότι κάθε ταξινόμηση των σύνθετων υλικών είναι αυθαίρετη και ατελής.

2.4.3. Ινοπλισμένα ή ινώδη σύνθετα υλικά¹⁴

Τα ινώδη σύνθετα υλικά αποτελούνται από έγκλεισμα υπό μορφή ινών μέσα σε μια συνεχή μήτρα .Η μήτρα μπορεί να είναι ένα οποιοδήποτε υλικό από τα μία μεγάλη ποικιλία φυσικών ή τεχνικών υλικών.

Μία ίνα χαρακτηρίζεται από έναν πολύ μεγάλο λόγο μήκος/διάμετρος (aspect ratio) .Έχει παρατηρηθεί ότι οι ίνες των διαφόρων υλικών είναι πολύ πιο άκαμπτες και ανθεκτικές από τα αντίστοιχα υλικά που όμως βρίσκονται σε συνήθη μορφή. Για παράδειγμα ,τα συνηθισμένα φύλλα γυαλιού έχουν τάση θραύσεως μόνο μερικών MPa ,ενώ οι ίνες γυαλιού του εμπορίου μπορούν να έχουν αντοχή θραύσεως της τάξεως των 2,8-4,8 GPa και όταν αυτές παρασκευάζονται σε εργαστήρια ή τάση θραύσεως μπορεί να φθάσει το 7,0 GPa. Αυτό προφανώς δείχνει ότι η γεωμετρία μίας ίνας είναι αποφασιστικής σημασίας για τον υπολογισμό της αντοχής της ίνας και θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψιν στις σχετικές εφαρμογές.

Το παράδοξο γεγονός ότι οι ίνες έχουν διαφορετικές ιδιότητες από αυτές που έχει το υλικό όταν δεν είναι διαμορφωμένο σε μορφή ίνας οφείλεται στην τελειότητα της δομής της ίνας .Πιο συγκεκριμένα ,οι κρύσταλλοι του υλικού της ίνας

είναι ευθυγραμμισμένοι κατά τον διαμήκη άξονα της ίνας, ενώ υπάρχουν λιγότερες εσωτερικές ατέλειες στην ίνα σε σχέση με αυτές που υπάρχουν στο ίδιο το υλικό που όμως δεν είναι διαμορφωμένο σε μορφή ίνας.

Οι ίνες μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το μήκος:

a. Μακρυές ίνες (long fibers)

Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει ίνες με πάρα πολύ μεγάλο λόγο μήκους/ διαμέτρου και με διάμετρο της τάξης μεγέθους των κρυστάλλων .Στον Πίνακα 2.1 δίνεται η αντοχή και η ακαμψία διαφόρων ινών μεγάλου μήκους που χρησιμοποιούνται ευρύτατα σαν ενισχυτικά υλικά .Στον ίδιο πίνακα σημειώνεται επίσης η πυκνότητα του κάθε υλικού καθώς και οι λόγοι ακαμψίας/πυκνότητα (ειδική ακαμψία) και αντοχής/πυκνότητα (ειδική αντοχή) οι οποίοι είναι ενδεικτικοί της αποτελεσματικότητας της ίνας κυρίως σε κατασκευές ευαίσθητες σε βάρος όπως π.χ. σε αεροσκάφη και διαστημόπλοια.

Υλικό ίνας	ρ (kN/m ³)	T_s (GPa)	T_s/ρ (Mm)	E (GPa)	E/ ρ (Mm)
Αργίλιο	26.3	0.62	24	73	2.8
Τιτάνιο	46.1	1.90	41	115	2.5
Χάλυβας	76.6	4.10	54	207	2,7
E-γυαλί	25,0	3,40	136	72	2,9
S-γυαλί	24,4	4,80	197	86	3,5
Άνθρακας	13,8	1,70	123	190	14,0
Βηρύλλιο	18,2	1,70	93	300	16,0
Βόριο	25,2	3,40	137	400	16,0
Γραφίτης	13,8	1,70	123	250	18,0

Όπου : ρ =πυκνότητα, T_s = αντοχή σε εφελκυσμό, T_s/ρ = ειδική αντοχή σε εφελκυσμό, E = μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό, E/ ρ = ειδικό μέτρο ελαστικότητας.

Πίνακας 2.1 Ιδιότητες μακρών ινών

Για παράδειγμα ,υλικά όπως ο χάλυβας έχουν θεωρητική αντοχή 20 GPa που υπολογίζεται από την κρυσταλλική τους δομή ,ενώ ο κοινός δομικός χάλυβας έχει στην πράξη αντοχή που κυμαίνεται μεταξύ 0,52 GPa και 0,69 GPa .Η ασυμφωνία αυτή οφείλεται στις ατέλειες που παρουσιάζει η κρυσταλλική δομή του χάλυβα ,οι

οποιές αποτελούν ασυνέχειες αυτής της δομής (dislocations) από τις οποίες αρχίζει η διαρροή του χάλυβα σε τάσεις πολύ μικρότερες από τις θεωρητικές.

b. Ίνες μικρού μήκους

Η δεύτερη κατηγορία των ινών έχει ακριβώς το χαρακτηριστικό ότι οι ασυνέχειες αυτές περιορίζονται σε ελάχιστο. Έτσι η αντοχή, αν και δεν φθάνει την θεωρητική, υπερβαίνει κατά πολύ την αντοχή του αντίστοιχου υλικού που έχει τυχαία διαμόρφωση. Για παράδειγμα, για τον χάλυβα η αντοχή αυτή μπορεί να φθάσει μέχρι τα 13 GPa. Στον Πίνακα 2.2 φαίνονται οι τιμές μερικών ιδιοτήτων ινών μικρού μήκους.

Υλικό ίνας	ρ (kN/m ³)	S(t) (Gpa)	S(e) (GPa)	S(e)/ ρ (Mm)	E (GPa)	E/ ρ (Mm)
Χαλκός	87.4	12	3.0	34	124	1.4
Νικέλιο	87.9	21	3.9	44	215	2.4
Χάλυβας	76.8	20	13.0	170	200	2.6
B ₄ C	24.7	45	6.7	270	450	18.0
SiC	31.2	83	11.0	350	840	27.0
Al ₂ O ₃	38.8	41	19.0	490	410	11.0
C	16.3	98	21.0	1300	980	60.0

Πίνακας 2.2 Ιδιότητες ινών μικρού μήκους

Οι ίνες είναι πρακτικά άχρηστες αν δεν είναι τέλεια ενσωματωμένες μέσα σε μία μήτρα σε μορφή συνθέτου υλικού. Η μήτρα προστατεύει τις ίνες από το περιβάλλον ενώ παράλληλα μεταφέρει τις τάσεις. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε μήτρες έχουν συνήθως σημαντικά μικρότερη πυκνότητα, αντοχή και ακαμψία από τα υλικά που χρησιμοποιούνται σαν ενισχυτικές ίνες.

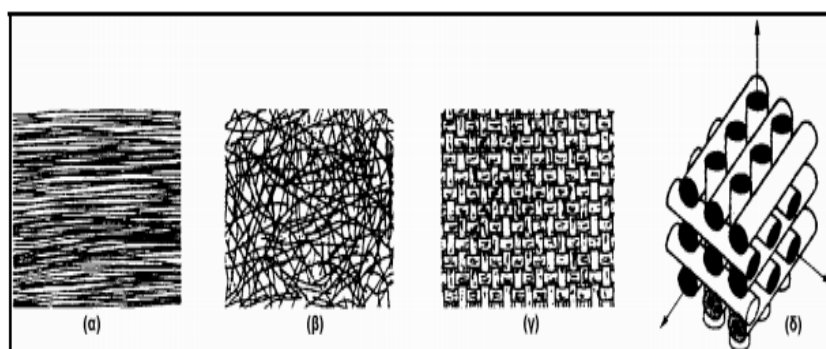
Η πιο συνήθης εμπορική μορφή ενός ινώδους υλικού είναι εκείνη του πολύστρωτου σύνθετου υλικού. Η στρωμάτωση αυτή μπορεί να έχει επίπεδη ή καμπύλη μορφή. Οι ίνες στο πολύστρωτο σύνθετο υλικό μπορεί να είναι διατεταγμένες με διάφορους τρόπους, δηλαδή, μπορεί να έχουν όλες την ίδια διεύθυνση ή μπορεί να υπάρχουν διάφορες ομάδες ινών με διαφορετικές διευθύνσεις.

Η μηχανική αντοχή των σύνθετων υλικών, που δεν ισούται πάντοτε με το μέσο όρο των αντοχών των δύο συστατικών εξαρτάται από το υλικό της ενίσχυσης,

το υλικό της μήτρας, τη μηχανική συμπεριφορά των δύο , αλλά και τη μεταξύ τους “συμβατότητα” ,αφού η καλή συνάφεια ινών –μήτρας είναι καίριας σημασίας για την αντοχή σύνθετου. Καθοριστικό ,επίσης ,παράγοντα για την αντοχή του συνθέτου αποτελεί η κατ’όγκο αναλογία των ινών και ο προσανατολισμός τους ως προς τη διεύθυνση της επιβαλλόμενης τάσης.

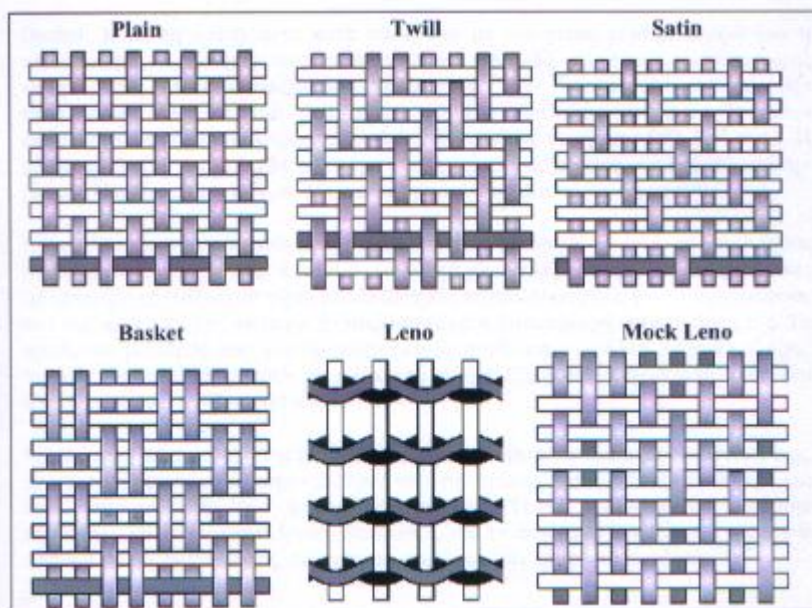
Ενδεικτικό της σπουδαιότητας των ινών είναι το γεγονός ότι ο προσανατολισμός και η διάταξη τους στη μάζα της μήτρας ,αποτελεί κριτήριο για την ταξινόμηση των συνθέτων αυτής της κατηγορίας.

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



Εικόνα 2.3 Τέσσερις τύποι διάταξης των ινών :α) μονοδιευθυντικές ίνες (μονοαξονικό ύφασμα β) ίνες άτακτων διευθύνσεων (πίλημα) γ) πλέξη ύφανσης (ύφασμα) δ) ίνες σε τρισδιάστατη πλέξη (πεπλεγμένο ύφασμα)

Ειδικότερα ,η διάταξη πλέξης ύφανσης διαθέτει πολυάριθμα πρότυπα (μοτίβα) πλέξης .Σε αυτά παρατηρούνται οι ίνες οριζόντιας (κατά μήκος) διεύθυνσης (warp) και κατακόρυφης διεύθυνσης (weft ή fill) .Υπάρχουν και περιπτώσεις όπου οι δεύτερες ίνες είναι υπό γωνία όχι 90° (συνήθως $22,5^\circ$ ή 45°) .Ο τύπος της πλέξης επηρεάζει την απόδοση του υφάσματος με πολλούς τρόπους ,συμπεριλαμβανομένων της σταθερότητας, της προσαρμοστικότητας ,του πορώδους, της αντοχής και της δυσκαμψίας .Σχεδόν κάθε δυνατή πλέξη μπορεί να πλεχθεί ,αλλά για κατασκευαστικούς λόγους έχουν επικρατήσει οι εξής έξι .



Εικόνα 2.4 Τυπικές πλέξεις ύφανσης

Plain: κάθε οριζόντια ίνα περνά εναλλάξ κάτω και πάνω από κάθε κατακόρυφη .Το ύφασμα είναι συμμετρικό ,με καλή σταθερότητα και λογικό πορώδες .Όμως ,είναι το πιο δύσκολο να απλωθεί ,και ο υψηλός βαθμός κυμάτωσης των ινών οδηγεί σε σχετικά χαμηλές μηχανικές ιδιότητες σε σύγκριση με άλλα πρότυπα πλέξης .Τείνει να μη χρησιμοποιείται σε πολύ βαριές υφάνσεις, λόγω του υπέρμετρου πλισαρίσματος.

Twill:Μία ή περισσότερες οριζόντιες ίνες πλέκονται εναλλάξ πάνω και κάτω από δύο ή περισσότερες κατακόρυφες ίνες με έναν τακτικό επαναλαμβανόμενο τρόπο .Τούτο παράγει την οπτική εντύπωση μιας ευθείας ή τεθλασμένης διαγώνιας “ράβδωσης” στο ύφασμα .Σε σχέση με την plain πλέξη παρατηρείται καλύτερη δυνατότητα εμποτισμού και μικρότερη κυμάτωση ,με μία μικρή μόνο μείωση της σταθερότητας .Με μειωμένο πλισάρισμα ,το ύφασμα δίνει επίσης μία ομαλότερη επιφάνεια και ελαφρώς υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες.

Satin:Οι πλέξεις satin είναι ουσιαστικά πλέξεις twill τροποποιημένες ώστε να παράγουν λιγότερες διασταυρώσεις οριζόντιων και κατακόρυφων ινών .Ο αριθμός “harness” που χαρακτηρίζει τη πλέξη (τυπικά 4,5 και 8) είναι ο συνολικός αριθμός των ινών που περνούν πρώτου το μοτίβο αρχίζει να επαναλαμβάνεται .Τα υφάσματα αυτών των πλέξεων είναι πολύεπίπεδα ,επιδεικνύουν καλό εμποτισμό και ,λόγω της μικρής κυμάτωσης έχουν καλές μηχανικές ιδιότητες .Τα πρότυπα αυτά επιτρέπουν στις ίνες να πλέκονται με τη μεγαλύτερη εγγύτητα και παράγουν υφάσματα με μία “σφιχτή ” πλέξη .Ωστόσο ,η χαμηλή σταθερότητα τους και η

ασυμμετρία τους πρέπει να ληφθεί υπόψη (η ασυμμετρία οδηγεί στη μία όψη του υφάσματος να δεσπόζουν οι ίνες οριζόντιας κατεύθυνσης ,ενώ στην άλλη να δεσπόζουν οι κατακόρυφης κατεύθυνσης)

Basket: Η πλέξη τούτη είναι κατά βάση ίδια με την plain ,μόνο που εδώ δύο ή περισσότερες οριζόντιες ίνες συνυφαίνονται εναλλάξ με δύο ή περισσότερες κατακόρυφες .Μια διάταξη δύο οριζοντίων που διασταυρώνονται με δύο κατακόρυφες ίνες καλείται 2x2 basket ,αλλά οι διατάξεις των ινών δεν είναι απαραίτητο να είναι συμμετρικές. Συνεπώς ,είναι πιθανό να έχουμε 8x2,5x4 ,κ.τ.λ..Η πλέξη αυτή είναι πιο επίπεδη και λόγω λιγότερου πλισαρίσματος ,πιο δυνατή από την plain ,αλλά λιγότερο σταθερή. Πρέπει να χρησιμοποιείται σε βαριές υφάνσεις.

Leno: Η πλέξη τούτη βελτιώνει τη σταθερότητα σε “ανοιχτά” υφαντά ,τα οποία έχουν μικρό περιεχόμενο σε ίνες .Αποτελεί μία μορφή plain πλέξης στην οποία οι γειτονικές οριζόντιες ίνες τυλίγονται γύρω από διαδοχικές κατακόρυφες ίνες για να σχηματίσουν ένα ελικοειδές ζεύγος, το οποίο σταθεροποιεί κάθε κατακόρυφη ίνα στη θέση τους .Τα υφάσματα με πλέξη leno χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με άλλα πρότυπα πλέξης ,διότι αν χρησιμοποιηθεί μόνη της η ανοιχτή αυτή πλέξη δε θα μπορούσε να δώσει ένα αποτελεσματικό σύνθετο προϊόν.

Mock Leno: Μία εκδοχή της plain πλέξης στην οποία περιστασιακές οριζόντιες ίνες , σε τακτικά διαστήματα ,παρεκκλίνουν από την τυπική κάτω-πάνω εναλλαγή και εναλλάσσονται κάθε δύο ή περισσότερες ίνες. Τούτο συμβαίνει με παρόμοια συχνότητα και στη κατακόρυφη διεύθυνση ,και το συνολικό αποτέλεσμα είναι ένα ύφανση με αυξημένο πάχος ,πιο τραχεία επιφάνεια και πρόσθετο πορώδες.

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

- Συνεχείς ή μεγάλου μήκους ίνες (continuous fibers) ,όταν είναι $l/d \geq 100$
- Ασυνεχείς ή κοντές ίνες (discontinuous fibers),όταν είναι $l/d < 100$
- Νηματίδια ή τριχίτες (whiskers) :Με $d < 1 \mu\text{m}$ και $l \sim 100 \mu\text{m}$ (πρόκειται για λεπτούς μονοκρυστάλλους κεραμικού υλικού)

Σημείωση :Οι κοντές ίνες ,λόγω του μικρού μήκους τους ,δεν χρησιμοποιούνται ως μονοδιευθυντική ενίσχυση ,αλλά εφαρμόζονται συνήθως με τη μορφή πλέγματος ινών τυχαίας διεύθυνσης

Προκειμένου οι ίνες να προσφέρουν ικανοποιητική ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας ,το υλικό κατασκευής τους επιλέγεται έτσι ώστε να παρουσιάζει υψηλή στιβαρότητα (υψηλό μέτρο ελαστικότητας ,E),υψηλή τιμή τάσης θραύσης και επιπλέον να έχει μικρή πυκνότητα (ρ).

Στα προηγμένα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ενισχυτικές ίνες από γυαλί, άνθρακα ,πολυμερές, φυσικά ορυκτά ,ή ακόμα και μεταλλικές ή κεραμικές ίνες.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα αναλύσουμε διεξοδικά τις ίνες γυαλιού

2.5 Μήτρες

Αν οι ίνες συνεισφέρουν στην υψηλή αντοχή του σύνθετου υλικού ,η μήτρα την εξασφαλίζει .Ο ρόλος της μήτρας είναι πολύπλευρος και συνίσταται στα εξής:

- Συγκρότηση των ινών μεταξύ τους
- Προστασία των ινών έναντι δυσμενούς περιβάλλοντος
- Μεταβίβαση ή διανομή των μηχανικών τάσεων που ασκούνται συνολικά στο σύνθετο υλικό προς τις ίνες
- Παραλαβή της διαστρωματικής διάτμησης (interlaminar shear)
- Ανακοπή της διάδοσης των ρωγμών που ξεκινούν από θραύση ινών
- Έλεγχος των ηλεκτρικών και χημικών ιδιοτήτων του συνθέτου

Για να εκπληρώνει το ρόλο με το ρόλο με τον οποίο είναι επιφορτισμένη , η μήτρα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ολκιμότητα, ανθεκτικότητα ,σχετική ευκαμψία , διαστατική σταθερότητα (να διατηρεί το σχήμα της) και φυσικά θα πρέπει το σημείο τήξης της να είναι υψηλότερο της μέγιστης θερμοκρασίας του σύνθετου υλικού .Οι ιδιότητες αυτές πρέπει να παρουσιάζουν “συμβατότητα” με αυτές των ενισχυτικών ινών. Συνήθως ,το υλικό της μήτρας έχει χαμηλότερη πυκνότητα ,αντοχή και δυσκαμψία από τις ίνες .Τέλος ,για τη σωστή λειτουργία του σύνθετου υλικού ,καθοριστικός παράγοντας είναι η καλή πρόσφυση ίνας-μήτρας.

Ανάλογα με το υλικό τους ,οι μήτρες διακρίνονται στις ακόλουθες ομάδες:

- Οργανικές , με τα αντίστοιχα σύνθετα να καλούνται Πολυμερικής Μήτρας (Polymer Matrix Composite-PMC)
- Μεταλλικές ,με τα αντίστοιχα σύνθετα να καλούνται Μεταλλικής Μήτρας (Metal Matrix Composite-MMC)
- Κεραμικές ,με τα αντίστοιχα σύνθετα να καλούνται Κεραμικής Μήτρας (Ceramic Matrix Composite –CMC)

Η επιλογή της κατάλληλης μήτρας εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το περιβάλλον χρήσης του συνθέτου .Μία γενική οδηγία σχετικά με τα θερμοκρασιακά όρια για κάθε ομάδα παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 2.5 Θερμοκρασιακά όρια χρήσης των υλικών

Τα αντίστοιχα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται με τις ακόλουθες συντμήσεις:

PMC: Polymer Matrix Composite

MMC: Metal Matrix Composite

CMC: Ceramic Matrix Composite

2.5.1 Οργανικές μήτρες

Οι οργανικές μήτρες διακρίνονται σε :

α) **Θερμοπλαστικές** :Πρόκειται για πολυμερή με γραμμικές αλυσίδες .Παρουσιάζουν δομή ,όπου οι μοριακές αλυσίδες διασυνδέονται με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals,που λύονται με την αύξηση της θερμοκρασίας με αντιστρεπτή όμως διαδικασία, καθιστώντας το υλικό μαλακότερο σε υψηλές θερμοκρασίες.

Λόγω του χαμηλού κόστους ,χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ευρείας κατανάλωσης .Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αποτελούν οι μήτρες πολυαιθελενίου (PE) και πολυστερενίου (PS).

Ως ενισχυτικά υλικά θερμοπλαστικών μητρών χρησιμοποιούνται φθηνά υλικά (αμίαντος , μαραμαρυγιές ,κ .α),ώστε το τελικό προϊόν να είναι χαμηλής τιμής.

β) **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

2.5.2 Μεταλλικές Μήτρες

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

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεταλλικών μητρών (έναντι των οργανικών μητρών)

Πλεονεκτήματα

- Μεγαλύτερη ολκιμότητα και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες
- Βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων του συνθέτου σε καταπονήσεις ασκούμενες σε διευθύνσεις διαφορετικές από αυτές του προσανατολισμού των ινών
- Βελτίωση της ακαμψίας και αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του συνθέτου
- Μείωση της ευαισθησίας του συνθέτου στην παρουσία διαλυτών και διερεύνηση των θερμοκρασιακών ορίων χρήσης του συνθέτου
- Βελτίωση της θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας του συνθέτου για ειδικές εφαρμογές
- Ευκολότερη σύνδεση τεμαχίων του συνθέτου 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 SiO₂ σε μήτρα Al).
- Ασυνέχεια της καμπύλης εφελκυσμού των συνθέτων υλικών στο όριο διαρροής της μήτρας
- Δύσκολη παραγωγή συνθέτου υλικού και μεγαλύτερο κόστος

2.5.3 Κεραμικές Μήτρες

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

Στη 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 γυαλού και αμιάντου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ

3.1 Είδη υαλονημάτων

Η βιομηχανική παραγωγή υάλινων ινών ξεκίνησε το 1930 για χρήση σε φίλτρα και μονώσεις. Πλέον χρησιμοποιούνται σε πάνω από το 90% των σύνθετων πολυμερών.

Προκειμένου οι ίνες να προσφέρουν ικανοποιητική ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας ,το υλικό κατασκευής τους επιλέγεται έτσι ώστε να παρουσιάζει υψηλή στιβαρότητα (υψηλό μέτρο ελαστικότητας ,E),υψηλή τιμή τάσης θραύσης και επιπλέον να έχει μικρή πυκνότητα (ρ).

Στα σύνθετα υλικά πρώτης γενιάς (1940) ως ενισχυτικά χρησιμοποιήθηκαν ίνες γυαλιού. Η χρήση τους συνεχίζεται επιτυχώς και σήμερα και γενικά ,θεωρούνται από τα πιο φθηνά ενισχυτικά υλικά .Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση ,οι ίνες γυαλιού χαρακτηρίζονται ως τύπου E,R και S,των οποίων οι κύριες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες φαίνονται στο πίνακα 3.1

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΥΠΟΣ			
	E	C	S	SiO ₂ καθαρή
Χημική σύσταση (%)				
SiO ₂	54	60	65	>99,5
Al ₂ O ₃	16	25	25	-
B ₂ O ₃	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 ³)	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 3.1 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 και 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 είναι ακριβότερες.

S-glass (S=stiffness): Ακριβότερο υλικό από το E-glass, αλλά με υψηλότερη δυσκαμψία και θερμική αντοχή .Χρησιμοποιείται κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία.

Οι συχνότερα χρησιμοποιούμενες ίνες γυαλιού είναι τύπου E .Αυτές παρουσιάζουν καλές μηχανικές ιδιότητες ,καλά χαρακτηριστικά διαμόρφωσης, καλή αντοχή στην υγρασία και μέτρια ανθεκτικότητα σε χημικά αντιδραστήρια.

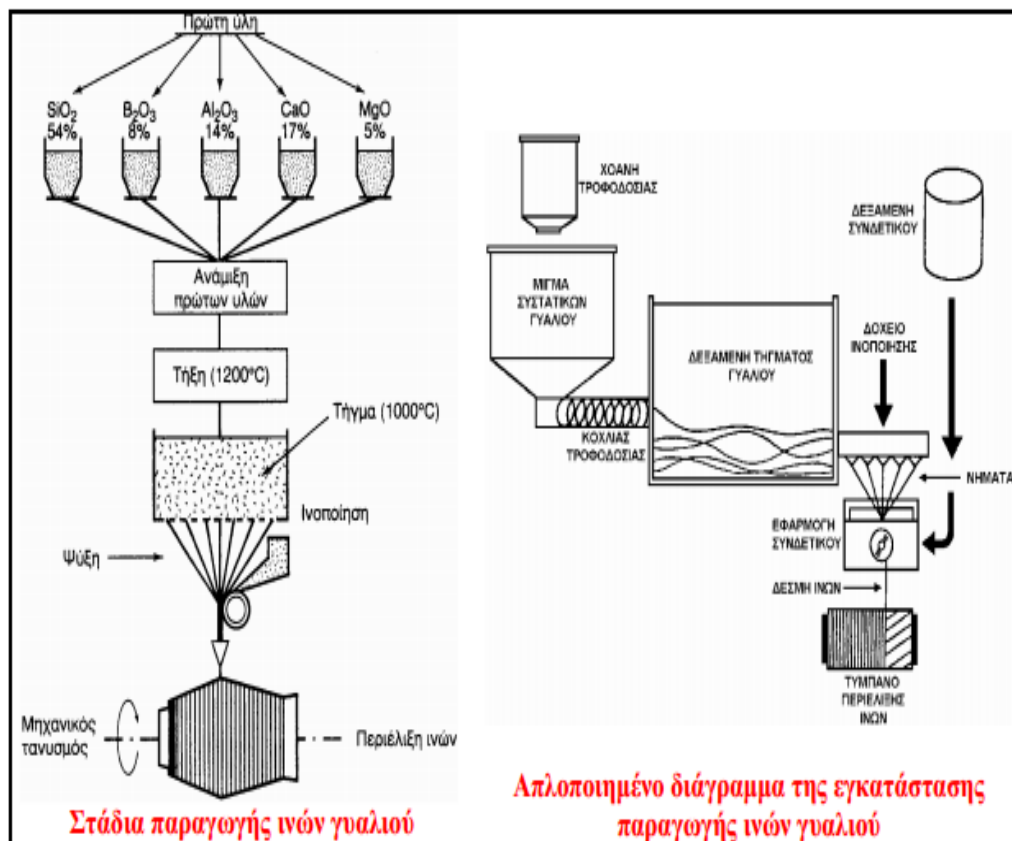
Οι ίνες τύπου R και τύπου S έχουν κάνει πρόσφατα την εμφάνισή τους .Έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις ίνες τύπου E και παρουσιάζουν χημική αδράνεια , είναι όμως ακριβότερες.

Για μεγάλα ποσά σε SiO_2 (>99,5%) αυξάνονται οι μηχανικές ιδιότητες της ίνας ,καθώς και η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης συνθέτου. Γι 'αυτό και χρησιμοποιούνται ίνες από 100% καθαρή πυριτία, σε ειδικές συνθήκες, όπου απαιτούνται υψηλές μηχανικές ιδιότητες κάτω από υψηλή θερμοκρασία.

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα των ινών γυαλιού είναι η μεγάλη τους ευαισθησία σε λύσεις της συνέχειας της επιφάνειάς τους .Χαράξεις και γρατζουνιές δημιουργούν στην επιφάνεια της ίνας περιοχές συγκέντρωσης τάσεων με αποτέλεσμα την ταχεία υποβάθμιση των μηχανικών τους ιδιοτήτων.

3.2. Παραγωγή υαλονημάτων

Η παραγωγή των ινών γίνεται με διέλαση τήγματος γυαλιού διαμέσου μήτρας με διάτρητο πυθμένα



Σχήμα 3.1 Παραγωγή ενισχυτικών ινών γυαλιού τύπου E

Η πρώτη ύλη τοποθετείται σε δεξαμενή ,όπου τήκεται .Το τήγμα τροφοδοτείται σε σειρά κυλινδρικών δοχείων με διάτρητους πυθμένες (διάμετρος οπών 1-2 mm).Κάτω από την επίδραση της βαρύτητας ,το γυαλί ρέει μέσα από τις οπές του πυθμένα και οι παραγόμενες ίνες εξολκεύονται με μηχανική μέθοδο ,μέχρι τελικής διαμέτρου 1-15 μm και ακολουθεί ελαφρός ψεκασμός τους με νερό (ψύξη).Ακολουθώντας οι ίνες διέρχονται από μάντα που επιβάλλει σ' αυτές προστατευτικό λιπαντικό συνδετικό υλικό (binder) ή ειδικά κολλοειδή πρόσθετα (sizes) που δρουν ως προστατευτικές επικαλύψεις και συνεισφέρουν στη καλύτερη πρόσφυση ινών-μήτρας .Εν συνεχεία ,οι ίνες περιτυλίγονται ανά δέσμες των 204 νηματιών (τυπική τιμή) γύρω από το κυλινδρικό τύμπανο ,το οποίο περιστρέφεται με υψηλή ταχύτητα (της τάξης των 50 m/s). Τέλος , τα ρολά υαλονήματος

υφίστανται ξήρανση πριν υποβληθούν σε οποιαδήποτε περαιτέρω διεργασία μορφής.

Παρατηρήσεις

- Ο έλεγχος της διαμέτρου των ινών γίνεται με ρύθμιση της στάθμης του τήγματος μέσα στη δεξαμενή ,της πυκνότητας του ,της διαμέτρου των οπών ,καθώς επίσης ,και της ταχύτητας περιστροφής του τυμπάνου.
- Κατά τη διάρκεια της παραγωγής τους ,θα πρέπει να αποφεύγεται η επαφή των ινών μεταξύ τους ,καθώς και με άλλα αντικείμενα τα οποία πιθανόν να προκαλέσουν επιφανειακές κακώσεις στην ίνα.
- Πολλές φορές την παραγωγή ινών κατάλληλης διαμέτρου ακολουθεί η επίστρωση τους με προστατευτικές επικαλύψεις. Τα χημικά πρόσθετα (sizes) διακρίνονται σε προσωρινά και συμβατά .Τα προσωρινά πρόσθετα έχουν κύριο στόχο αφενός την προστασία της ίνας έναντι της μείωσης της αντοχής λόγω τριβής της με τις άλλες ίνες και αφετέρου τη σύνδεση των ινών μεταξύ τους στην περίπτωση που διαμορφωθούν σε πλέξη ύφανσης και ακόμη προσδίδουν στην ίνα αντιστατικές ιδιότητες. Συνήθως χρησιμοποιούνται αμυλέλαια που διευκολύνουν αποτελεσματικά την πρόσφυση ίνας και ρητίνης εμποτισμού .Τα προσωρινά πρόσθετα απομακρύνονται εύκολα με θέρμανση των ινών σε κλιματιζόμενο περιβάλλον σε θερμοκρασία ≥ 340 °C για χρονικό διάστημα 15-20 h.Τα συμβατά πρόσθετα έχουν στόχο τη βελτίωση της αρχικής πρόσφυσης ρητίνης-γυαλιού και τη μείωση των δυσάρεστων επιπτώσεων της υγρασίας ή άλλων περιβαλλοντικών επιδράσεων
- Η αντοχή και η δυσκαμψία του γυαλιού προσδιορίζεται από τη τρισδιάστατη δομή και διάταξη των συστατικών οξειδίων του. Λόγω αυτής της δομής τα υαλονήματα είναι ισότροπα υλικά και παρουσιάζουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά.

3.3 Εφαρμογές των GFRP (Glass fiber reinforced plastic)

Τα υλικά GFRP είναι υλικά που διαθέτουν συνήθως πολυεστερική μήτρα και βρίσκουν εφαρμογές στους παρακάτω κυρίως τομείς της βιομηχανίας.

- Ναυπηγική:** Ο τομέας της ναυπηγικής αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός τομέα όπου τα σύνθετα GFRP έχουν αντικαταστήσει σχεδόν πλήρως τα παραδοσιακά υλικά και ιδιαίτερα το ξύλο. Η χαμηλή

πυκνότητα ,η μεγάλη αντίσταση σε διάβρωση και η ευκολία παραγωγής ολόσωμων τμημάτων του σκάφους με χύτευση σε καλούπια, είναι οι παράμετροι που οδήγησαν στην ανάπτυξη μικρών βιομηχανιών κατασκευής σκαφών αναψυχής ενώ η μείωση του κόστους των επισκευών οδήγησε στην χρήση των υλικών αυτών στον ευρύτερο τομέα της ναυπηγικής .Σε μικρότερο βαθμό ,τα σύνθετα GFRP λόγω του μαγνητικού τους χαρακτήρα, χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή ναρκαλιευτών. Πρώτη η Μεγάλη Βρετανία χρησιμοποίησε τα GFRP για τη κατασκευή ναρκαλιευτών και το 1972 κατασκεύασε το ναρκαλιευτικό HMS Wilton μήκους 46 m, ενώ πιο πρόσφατα κατασκευάστηκε το ναρκαλιευτικό HMS Brecon μήκους 60 m και εκτοπίσματος 625 tn.

ii. **Οικοδομές :** Η αντοχή σε διάβρωση και το μικρό βάρος των GFRP και επομένως η εύκολη μεταφορά και συναρμολόγηση τους στον τόπο της κατασκευής σε συνδυασμό με την δυνατότητα κατασκευής με χύτευση επιπέδων επιφανειών διαφόρων χρωμάτων, οδήγησε στην χρήση των υλικών αυτών σε οικοδομικές κατασκευές. Μεγάλες ποσότητες GFRP με την μορφή επιπέδων ή καμπυλών ημιδιαφανών επιφανειών χρησιμοποιούνται για την κατασκευή οροφών και θόλων σε μεγάλα οικοδομικά συγκροτήματα όπως είναι τα στάδια .Η κατασκευή οροφών από σύνθετα υλικά έχει σαν αποτέλεσμα ,λόγω του μικρού τους βάρους, την οικονομία στον σχεδιασμό και την κατασκευή των στοιχείων υποστήριξης των οροφών. Στις ΗΠΑ , η κατασκευή προκατασκευασμένων λουτρών και των σχετικών επίπλων που συνοδεύουν τον εξοπλισμό του λουτρού έχει καταστεί μία από τις πλέον προσδοκώμενες βιομηχανίες.

iii. **Μεταφορές :** Στην Δυτική Ευρώπη ,περίπου 60.000 tn GFRP σε διάφορες μορφές χρησιμοποιούνται στις χερσαίες μεταφορές ,ενώ στις ΗΠΑ η αντίστοιχη συνολική κατανάλωση τους στον τομέα των χερσαίων μεταφορών είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη .Ο λόγος της χρήσης των GFRP στις χερσαίες μεταφορές οφείλεται κατά ένα μέρος στη μείωση του κόστους κατασκευής και κατά ένα μέρος στη μείωση του βάρους και άρα στην εξοικονόμηση ενέργειας (καυσίμων).

Η χρήση ενισχυμένων πλαστικών πλαισίων για την κατασκευή αμαξωμάτων, περιορίζεται προς το παρόν σε μικρή κλίμακα και ιδιαίτερα για την κατασκευή αμαξωμάτων αγωνιστικών αυτοκινήτων, για τα οποία οι διάφορες μέθοδοι παραγωγής συνθέτων υλικών επιτρέπουν εύκολες μεταβολές στον σχεδιασμό. Εκτός όμως από την κατασκευή αμαξωμάτων, τα GFRP χρησιμοποιούνται και για την κατασκευή καμπίων στα φορτηγά αυτοκίνητα καθώς και στην κατασκευή προφυλακτήρων. Στην Ευρώπη ,η βιομηχανία RENAULT παράγει περί τους 9.600 προφυλακτήρες από GFRP

ημερησίως. Εκτός όμως από τα παραπάνω ,πολλά εξαρτήματα της αυτοκινητοβιομηχανίας είναι σήμερα κατασκευασμένα από GFRP.Η χρήση των συνθέτων υλικών στις χερσαίες μεταφορές δεν περιορίζεται μόνο στην αυτοκινητοβιομηχανία. Η εφαρμογή τους στους σιδηροδρόμους είναι εξίσου ενδιαφέρουσα. Για παράδειγμα ,στην Μ. Βρετανία ,τα αμαξώματα 125 αμαξοστοιχιών είναι κατασκευασμένα εξολοκλήρου από GFRP.Τα αμαξώματα αυτά είναι σχεδιασμένα να αντέχουν σε κρούσεις μεγάλης ενέργειας.

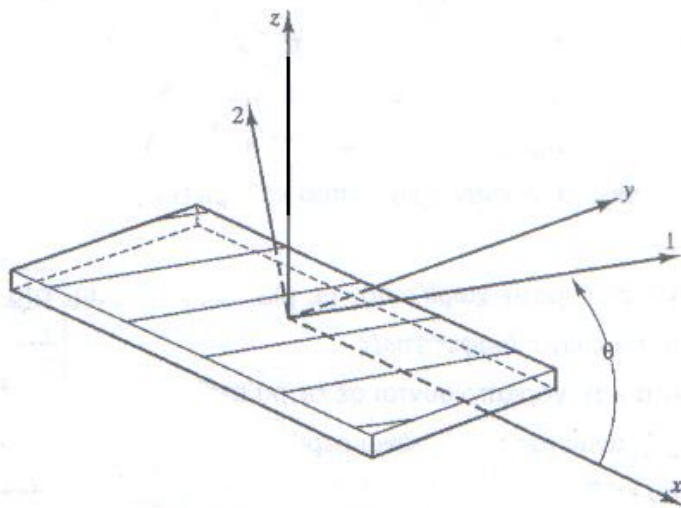
- iv. **Ηλεκτρικά είδη:** Οι ίνες γυαλιού παράγονται σε διαφόρους τύπους .Ένας από αυτούς τους τύπους ινών γυαλιού είναι και ο τύπος E-glass όπου το πρόθεμα E αναφέρεται στον όρο Electrical.Δηλαδή, αυτός ο τύπος γυαλιού έχει κατασκευαστεί ειδικά για ηλεκτρικές εφαρμογές και ιδιαίτερα για εφαρμογή εκεί που απαιτείται ηλεκτρική μόνωση. Έτσι ,αυτός ο τύπος γυαλιού όταν αναμειχθεί με πλαστική μήτρα ,μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ηλεκτρικών εξαρτημάτων πολύπλοκου σχήματος που είναι ηλεκτρικά μονωμένα. Τέτοια είδη είναι οι ηλεκτρικοί διακόπτες, οι ηλεκτρικοί διανομείς ,οι υποδοχείς ηλεκτρικών λαμπτήρων και άλλα προϊόντα .Καλωδιακοί αγωγοί σταθερής διατομής και σχήματος για μονωμένους μετασχηματιστές κατασκευάζονται από GFRP με την μέθοδο Pultrusion που θα αναπτύξουμε σε άλλο κεφάλαιο.

- v. **Εφαρμογές στην παραγωγή αντιδιαβρωτικών:** Γενικά , οι εφαρμογές των GFRP στη γεωργία και στην κατασκευή δεξαμενών και σωλήνων για βιομηχανικούς σκοπούς βασίζεται στον συνδυασμό του χαμηλού ειδικού βάρους και την αντίσταση σε διάβρωση του υλικού αυτού .Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του GRP είναι η κατασκευή δεξαμενών και αναρροφητήρων για την αποθήκευση τοξικών χημικών ουσιών, σωλήνων για την μεταφορά νερού και αποχετευτικών λυμάτων , δεξαμενών αποθήκευσης νερού και κρασιού καθώς και στην κατασκευή εγκαταστάσεων για την παραγωγή χημικών ουσιών όπως π.χ. στην παραγωγή χλωρίου.

3.4 Διαστρωμάτωση και προσανατολισμός ίνας

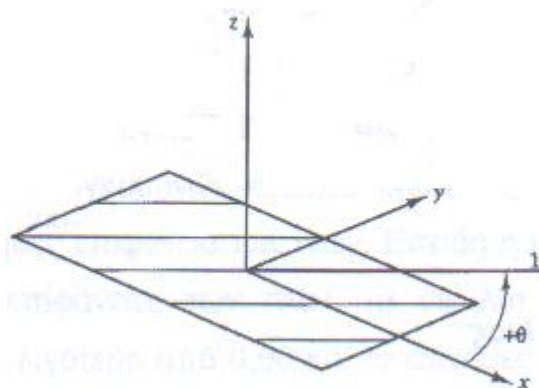
Όταν τοποθετούνται το ένα μονοδιευθυντικό σύνθετο πάνω στο άλλο σύνθετο υπό μορφή επιπέδων ,παράγεται ένα πολύστρωμα .Ανάλογα με το πως τα τοποθετούμε σε σχέση μεταξύ τους ,παράγονται διάφορα είδη πολυστρωμάτων με τελείως διαφορετικές ιδιότητες ,έτσι προκύπτουν τελικά τα πολυστρώματα με τις απαιτούμενες από το σχεδιασμό ιδιότητες.

Πρέπει να ορισθεί η σχέση του προσανατολισμού της ίνας σε σχέση με το στρώμα όπως φαίνεται στο Σχ. 3.2



Σχήμα 3.2 Ορισμός των ορθογώνιων αξόνων X και Y ενός πολυστρώματος σε σχέση με τον άξονα ινών (1 και 2)

Η μακρύτερη διάσταση του πολυστρώματος φαίνεται ως ο άξονας X και το πλάτος ως ο Y άξονας .Ο προσανατολισμός των ινών ,καθώς τοποθετείται κάθε στρώμα σε σχέση με τον επιμήκη άξονα X του πολυστρώματος ,ορίζεται με την γωνία θ . Ανάλογα με την σύμβαση μια γωνία με αντίθετη φορά από του ρολογιού, σε σχέση με τον άξονα X, είναι $+\theta$ και η αντίστροφη $-\theta$, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.3



Σχήμα 3.3 Παραδοχή για τον προσανατολισμό του άξονα των ινών 1, σε σχέση με τον άξονα του πολυστρώματος X .Η στροφή κατά την φορά του ρολογιού είναι $+\theta$ και η αντίθετη με την φορά του ρολογιού $-\theta$.

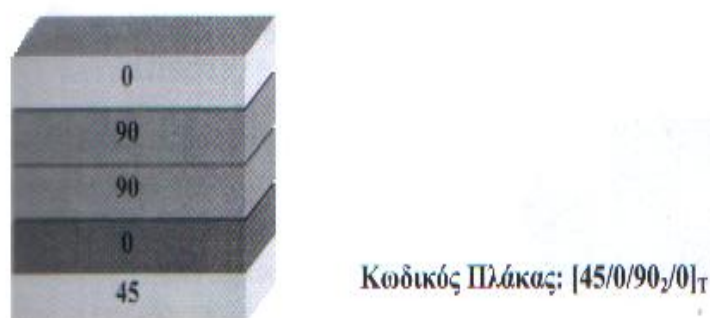
Έτσι ένα στρώμα με τις ίνες παράλληλες στον άξονα X έχει προσανατολισμό 0° , και ένα στρώμα με τις ίνες κάθετες στον άξονα X (δηλαδή παράλληλο στον άξονα Y) έχει προσανατολισμό 90° . Ένα πολύστρωμα με όλα τα επιμέρους στρώματα να έχουν προσανατολισμό 0° , ονομάζεται μονοδιευθυντικό πολύστρωμα.

Ένα πολύστρωμα με εναλλασσόμενα στρώματα προσανατολισμού 0° και 90° , ονομάζεται διασταυρούμενο πολύστρωμα. Ένα πολύστρωμα, με επιμέρους στρώματα προσανατολισμού $\pm \theta$ ονομάζεται πολύστρωμα υπό γωνία. Ο γενικός κώδικας που θα παρουσιαστεί για την ανάλυση είναι ο εξής: Laminate Orientation Code Devised by Air Force Laboratory, Wright –Patterson Air Force Base, Dayton, Ohio, By P.A. Parmley.

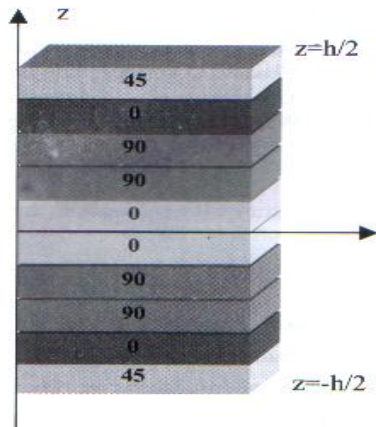
Οι γενικές αρχές του κώδικα είναι οι εξής: Η κάθε στρώση αναπαριστάται από το αζιμούθιο (γωνία) των ινών της ως προς τον X-άξονα της πλάκας (πάχος πλάκας: $[-h/2, h/2]$).

Ως δείκτης στη στρώση μπαίνει ο αριθμός που υποδεικνύει τον αριθμό των στρώσεων ίδιας γωνίας ινών. Γίνεται χρήση της καθέτου διαχωριστικού (/) εάν αλλάζει η γωνία στρώσης. Η αρίθμηση ξεκινά πάντα από την κάτω επιφάνεια της πλάκας ($z=-h/2$). Όλη η διάταξη της πλάκας μπαίνει σε αγκύλες και τοποθετούνται δείκτες ως εξής: «T» εάν η διάταξη εντός των αγκυλών είναι ολοκληρωμένη

«S» εάν η διάταξη εντός των αγκυλών είναι συμμετρική ως προς το επίπεδο $z=0$



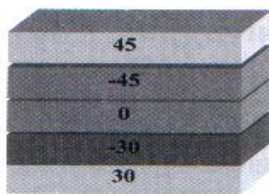
Σχήμα 3.4 Παράδειγμα κωδικού πλάκας σε πολύστρωμα διαφορετικών προσανατολισμού ίνας



ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΗ ΠΛΑΚΑ

Κωδικός Πλάκας: $[45/0/90_2/0]_S$

Σημ: Εάν θέλουμε να έχουμε μια μόνο κεντρική στρώση, στο $z=0$, τότε τη βάζουμε με υπεργράμμιση δηλαδή: $[45/0/90_2/0]_S$. Η στρώση αυτή ανήκει κατα το ήμισυ στο κάθε επίπεδο $[-h/2,0]$, $[0,h/2]$.



Κωδικός Πλάκας: $[\pm 30/0/\mp 45]_S$

Σημ: Κάθε πρόσημο αναπαριστά μια στρώση

Θετικές είναι οι γωνίες ανθρωρολογικά ως προς το x-άξονα της πλάκας.

Σχήμα 3.5 Κωδικός πλάκας συμμετρικού πολυστρώματος

Επαναλαμβανόμενες σειρές στρωμάτων ονομάζονται σετ και κλείνονται σε παρένθεση. Ένα σετ κωδικοποιείται παρόμοια με τα προηγούμενα. Παραδείγματα σετ φαίνονται στο Σχήμα 3.6. Κάθε στρώμα του υβριδιακού – πολυστρώματος κωδικοποιείται, όπως πριν, αλλά προστίθενται δείκτες να υποδείξουν την ένα που χρησιμοποιείται σε κάθε στρώμα.

Laminate	Κώδικας	Laminate	Κώδικας
45°		45°	
0°		0°	
90°		90°	
45°		45°	
0°		0°	
90°	$[(45/0/90)_2]_S$	90°	$[(45/0/90)_4]$
90°	ορ $[45/0/90]_{2r}$	45°	ορ $[45/0/90]_4$
0°		0°	
45°		90°	
90°		45°	
0°		0°	
45°		90°	

Σχήμα 3.6 Παράδειγμα κωδικοποίησης συμμετρικών σετ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΥΛΙΚΑ ΠΥΡΗΝΑ SANDWICH ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

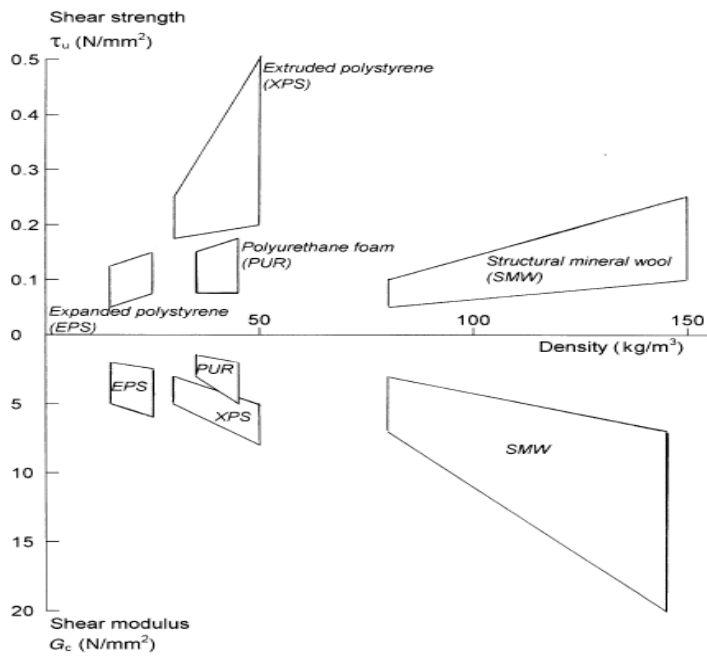
4.1 Μηχανικές ιδιότητες αφρών

Τα υλικά του πυρήνα πρέπει να έχουν τις κατάλληλες ιδιότητες ώστε να συμβαδίζουν με τη μηχανική αντοχή και ακαμψία που θέλουμε να προσδώσουμε στο πάνελ .Οι σχετικές ιδιότητες καθορίζονται από το εάν:

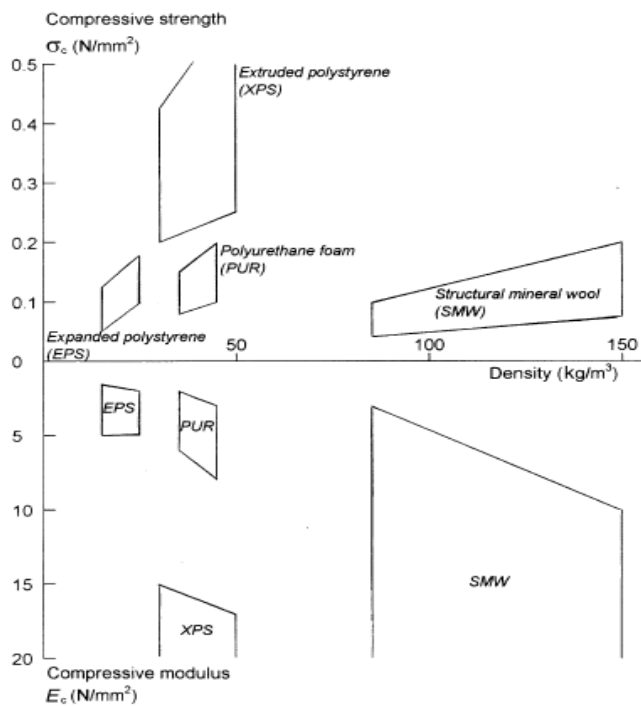
- Οι προκατασκευασμένες πλάκες που χρησιμοποιούνται ,συνδέονται με συγκολλητική ουσία
- Τα συστατικά του υγρού αφρού αναμιγνύονται και αφήνονται να διασταλούν ανάμεσα στα επίπεδα διαμορφώνοντας δεσμούς.

Οι ενδιαφέρουσες μηχανικές ιδιότητες είναι η αντοχή σε εφελκυσμό, θλίψη και διάτμηση. Για όλα τα πολυμερή υλικά αυτές οι ιδιότητες επηρεάζονται από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και την υγρασία .Αυτό γίνεται εμφανές ιδιαίτερα στην απόδοση υπό μακράς διάρκειας φορτίσεις όπου ο σκληρός αφρός εμφανίζει βισκοελαστική συμπεριφορά.

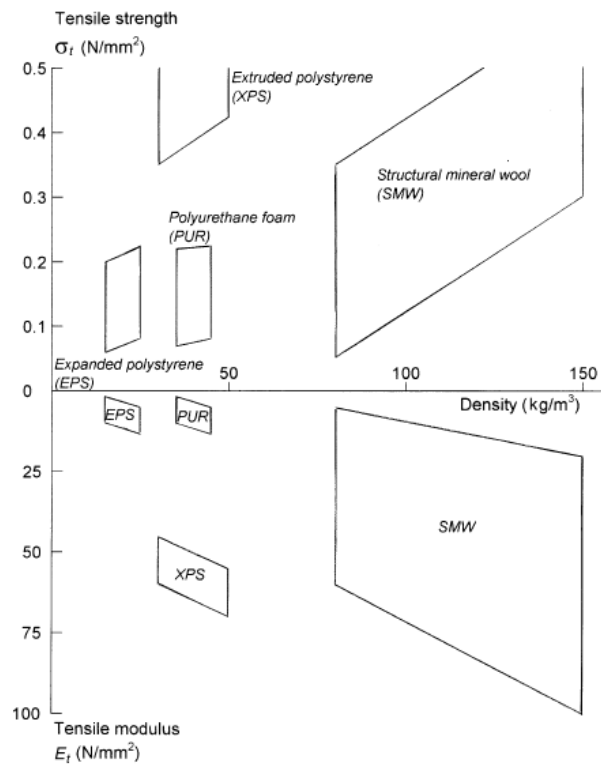
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται το εύρος των βραχυπρόθεσμων μηχανικών ιδιοτήτων διαφόρων υλικών συναρτήσει της πυκνότητας για λόγους σύγκρισης .Σημειώστε ότι για σκληρά αφρώδη πλαστικά ,η δυσκαμψία και η αντοχή εξαρτάται βασικά από τη πυκνότητα. Η συμμετοχή του παράγοντα θερμοκρασία και η διάρκεια της φόρτισης πρέπει να λαμβάνεται επίσης υπ' όψιν , Για ορυκτές ίνες (mineral wools) η πυκνότητα δεν είναι ο βασικός παράγοντας που καθορίζει τις μηχανικές ιδιότητες.



Διάγραμμα 4.1 Εξάρτηση του μέτρου διάτμησης καθώς και της διατμητικής αντοχής από τη πυκνότητα του αφρού.



Διάγραμμα 4.2 Εξάρτηση του μέτρου θλίψης καθώς και της θλιπτικής αντοχής από τη πυκνότητα του αφρού



Διάγραμμα 4.3 Εξάρτηση του μέτρου εφελκυσμού καθώς και της εφελκυστικής αντοχής από τη πυκνότητα του αφρού

Σήμερα τα υλικά που δίνουν υψηλότερες επιδόσεις στη θερμομόνωση είναι από σκληρό πολυμερή αφρό.

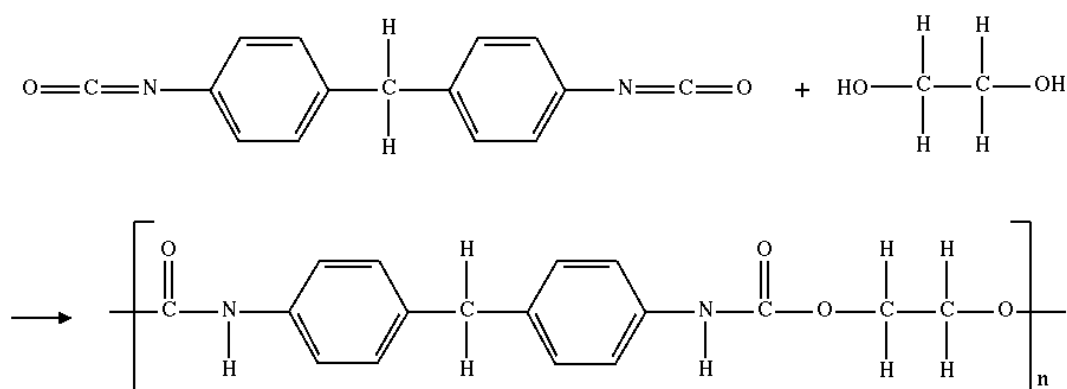
4.2 Ποικιλίες αφρών

Στις επόμενες σελίδες θα περιγραφούν οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες ποικιλίες αφρών που χρησιμοποιούνται για τη πλήρωση του υβριδικού sandwich. Τέτοιες ενώσεις είναι η πολυουρεθάνη, το πολυισοκυανικό, το αφρώδες πολυστυρένιο, ο φαινολικός αφρός, ο αφρός PVC ενώ παράλληλα χρησιμοποιούνται και άλλες όπως αφροί σιλικόνης, αφροί με εποξικές ρητίνες κτλ.

4.2.1 Πολυουρεθάνη /πολυισοκυανικό (PUR/PIR)

Αυτά είναι θερμοσκληρυνόμενα υλικά ,δηλαδή με το που σχηματιστούν ,το σχήμα του δε μπορεί να αλλάξει εξαιτίας των δεσμών που διατηρούν τα μόρια του. Τα δύο υλικά κατατάσσονται μαζί διότι δεν υπάρχει ξεκάθαρος διαχωρισμός μεταξύ τους. Πολυουρεθάνη (η συντομογραφία κατά IUPAC είναι PUR, αλλά συχνά συντέμνεται και ως PU) είναι οποιοδήποτε πολυμερές απαρτίζεται από μια αλυσίδα από οργανικές ομάδες οι οποίες συνενώνονται μέσω συνδέσμων ουρεθάνης (καρβαμιδικά/ carbamates)

Τα πολυμερή πολυουρεθάνης σχηματίζονται μέσω σταδιακού πολυμερισμού, με την αντίδραση ενός μονομερούς που περιέχει τουλάχιστον δύο ισοκυανικές λειτουργικές ομάδες με ένα άλλο μονομερές που περιέχει δύο ομάδες υδροξυλίου (αλκοόλες) παρουσία ενός καταλύτη.



Σχήμα 4.1 : Παράδειγμα σύνθεσης πολυουρεθάνης

Εμπορικά , οι πολυουρεθάνες παράγονται με αντίδραση ενός υγρού ισοκυανικού με ένα υγρό μίγμα από πολυόλες ,καταλύτη και άλλα πρόσθετα. Αυτά τα δύο συστατικά αναφέρονται ως ένα σύστημα πολυουρεθάνης ή απλώς ως ένα σύστημα .Το ισοκυανικό συνήθως αναφέρεται στη Βόρεια Αμερική ως η “πλευρά – Α” ή απλά ως “ίσο “.Το μίγμα των πολυολών και άλλων προσθέτων συνήθως αναφέρεται ως η “ρητίνη” ή μίγμα ρητίνης .Στην Ευρώπη ,οι σημασίες για την “πλευρά – Α” και “την πλευρά Β” είναι αντίστροφες .Τα πρόσθετα του μίγματος ρητίνης μπορεί να περιλαμβάνουν επεκτατικά αλυσίδας, ουσίες για τη σύνδεση μορίων , επιβραδυντές φλόγας, πτητικά , χρωστικές ουσίες και υλικό πληρώσεως.

Οι πολυουρεθάνες χρησιμοποιούνται ευρέως σε υψηλής ελαστικότητας, εύκαμπτα αφρώδη καθίσματα, σε άκαμπτα αφρώδη μονωτικά πάνελ, σε μικροπορώδη αφρώδη παρεμβύσματα και φλάτζες, σε ανθεκτικούς ελαστομερείς τροχούς, σε δακτυλίους ανάρτησης αυτοκινήτων, σε κόλλες υψηλής απόδοσης, σε επιστρώσεις πατωμάτων, σε υποστρώματα ταπήτων και σε σκληρά πλαστικά μέρη (όπως αυτά των ηλεκτρονικών οργάνων). Τα προϊόντα πολυουρεθάνης συχνά αποκαλούνται "ουρεθάνες". Δε θα πρέπει, όμως να συγχέονται με την ειδική ουσία ουρεθάνη.

Οι αφροί PIR χρησιμοποιούνται μόνο για τις υψηλές θερμικές ιδιότητες και για τη συμπεριφορά που παρουσιάζουν κοντά σε φλόγα. Ενώ ο καθαρός αφρός πολυουρεθάνης αποσυντίθεται σε θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 250 °C, ο αφρός PIR είναι ανθεκτικός σε θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 350 °C. Αυτή η βελτίωση στη συμπεριφορά είναι προκύπτει από μία πιο δαπανηρή διαδικασία κατασκευής επειδή η χημική αντίδραση απαιτεί θερμοκρασίες της τάξης των 40-45 °C, περίπου διπλάσιες από αυτές που απαιτούνται για την αντίδραση πολυουρεθάνης. Μετά τη διαδικασία αφροποίησης, η δομή του αφρού αποτελείται από κατά βάση κλειστά κελιά τα οποία διαχωρίζονται από λεπτά τοιχώματα. Τα κελιά αυτά γεμίζονται με ένα αέριο το οποίο είναι συνήθως το διοξείδιο του άνθρακα. Το CO₂ διαπερνά τα τοιχώματα των κελιών πολύ γρήγορα σε σύγκριση με άλλα αέρια με αποτέλεσμα μετά από λίγο να υπάρχουν κλειστά κελιά με αέριο τα οποία έχουν εξαιρετικές μονωτικές ιδιότητες. Μετά από λίγη ώρα ίσως εισχωρήσει μία μικρή ποσότητα αέρα η οποία δεν επηρεάζει όμως ιδιαίτερα τις μονωτικές ιδιότητες.

4.2.2 Αφρώδες πολυστερένιο

Αυτό παράγεται είτε από διαστολή είτε από διέλαση σε κλειστά καλούπια. Και στις δύο περιπτώσεις το πλαστικό αναμιγνύεται με διογκωτικό υλικό το οποίο διαστέλλεται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Το μεγαλύτερο εμπόδιο ήταν το γεγονός ότι γινόταν χρήση χλωροφθορανθράκων ως διογκωτικό υλικό, αλλά πρόσφατα οι αφροί πολυστερενίου άρχισαν να εκτονώνονται χωρίς να γίνεται χρήση των βλαβερών για το περιβάλλον, αερίων χλωροφθορανθράκων. Το αφρώδες πολυστερένιο έχει κλειστές κυψέλες και είναι διαθέσιμο στις πυκνότητες 15-300 kg/m³. Έχει αρκετά καλές μηχανικές και θερμομονωτικές ιδιότητες και είναι φτηνό. Ένα μειονέκτημα του είναι η ευαισθησία στους διαλύτες και ιδιαίτερα στο στερένιο με αποτέλεσμα να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συγκρατούσα ύλη, ουσίες με εστέρα στην σύνθεσή τους και να χρησιμοποιείται πλαστική ρητίνη ή πολυουρεθάνιο.

EPS

Με ειδικές διαδικασίες διόγκωσης σύγχρονων πρώτων υλών, όπως οι πολυμερισμένες στυρόλες, καταλήγουμε στο προϊόν μας, τη γνωστή σε όλο τον τεχνικό κόσμο διογκωμένη πολυστερίνη EPS . Εύχρηστο, ελαφρύ, καθαρό υλικό, που δεν είναι υδρόφιλο, αδρανές και ουδέτερο μετά τη διόγκωση, και εντελώς αβλαβές. Κυρίως όμως, οικονομικά προσιτό υλικό που με τις πολύ καλές θερμομονωτικές αλλά συγχρόνως και ηχομονωτικές ιδιότητες του, αντικατέστησε πολλά θερμομονωτικά υλικά στον κλάδο της οικοδομής. Η δομή των πλακών μας είναι ένα πολυκυτταρικό σύστημα άπειρων φυσαλίδων που κλείνουν ερμητικά αέρα. Σ' αυτό οφείλονται οι άριστες θερμό-ηχομονωτικές ιδιότητες τους, σε συσχέτιση με ελάχιστο βάρος. Αναφέρουμε ότι, σ' ένα κυβικό εκατοστό της ύλης μας αυτής βάρους μόλις 25 χιλιοστών του γραμμαρίου, βρίσκονται περίπου 350.000 κλειστές φυσαλίδες αέρα. Απόδειξη των αυξημένων θερμομονωτικών χαρακτηριστικών του υλικού EPS της παραγωγής μας, αποτελεί το γεγονός ότι άλλα θερμομονωτικά υλικά το χρησιμοποιούν στις γνωστές πλάκες σάντουιτς, γιά να αυξήσουν την δική τους θερμομονωτική ικανότητα.

Η διογκωμένη πολυστερίνη , είναι γνωστή στην Ελλάδα και σαν φελιζόλ, είναι ένα ελαφρύ, θερμομονωτικό υλικό το οποίο χρησιμοποιείται στην οικοδομή και σε άλλες εφαρμογές. Παράγεται από κόκκους πολυστυρολίου , οι οποίοι είναι θερμοπλαστικοί. Με τη διόγκωσή τους, οι κόκκοι μεγαλώνουν και γίνονται σφαιρίδια, τα οποία διογκώνονται περισσότερο και κολλούν μεταξύ τους. Η διογκωμένη πολυστερίνη παράγεται σε μεγάλα μπλοκ, τα οποία κόβονται σε πλάκες .Το προωθητικό αέριο στη διογκωμένη πολυστερίνη είναι το πεντάνιο.

Εκτός από εφαρμογές στην οικοδομική, η διογκωμένη πολυστερίνη χρησιμοποιείται και για παραγωγή προτύπων (καλουπιών) για χύτευση περίπλοκων σχημάτων, αλλά και ως υλικό συσκευασίας.



Εικόνα 4.1 Σφαιρίδια διογκωμένης πολυστερίνης διαμέτρου περίπου 2 χιλιοστών.

XPS

Η εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS - Extruded polystyrene) είναι ελαφρύ, θερμομονωτικό υλικό με βάση την πολυστερίνη. Παράγεται σε πλάκες με την μέθοδο της εξήλασης και έχει μονωτικές ιδιότητες λόγω παγίδευσης αερίου σε κλειστές κυψελίδες. Ένα κύριο χαρακτηριστικό της είναι οι κλειστοί πόροι και η έλλειψη απορρόφησης νερού, κάτι που κάνει την εξηλασμένη πολυστερίνη κατάλληλη για εφαρμογές σε υψηλή υγρασία.

Η παραγωγή της εξηλασμένης πολυστερίνης γίνεται με εξέλαση, κατά τη διάρκεια της οποίας γίνεται πολυμερισμός της θερμοπλαστικής πολυστερίνης. Σημαντικό μέρος του προϊόντος αποτελεί προωθητικό αέριο με χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, το οποίο προσφέρει και επιβραδυντική επίδραση στη φωτιά. Το αέριο αυτό είναι ο χλωροφθοράνθρακας HCFC 142b.

4.2.3 Φαινολικός αφρός

Οι φαινολικοί αφροί ήρθαν στο προσκήνιο στα τέλη της δεκαετίας του 1960 και στις αρχές του 1970 όταν η συμπεριφορά των αφρών πολυουρεθάνης σε φωτιά χρειαζόταν βελτίωση. Αρχικά προέκυπτε ότι οι αφροί PF είχαν ανεπιθύμητες ιδιότητες, όπως η ψαθυρότητά του κατά τη κατεργασία καθώς και η παραγωγή ποσότητας νερού η οποία εμφανιζόταν κατά τη διάρκεια ωρίμανσης.

Πρόσφατες εξελίξεις έχουν βελτιώσει σημαντικά αυτές τις ιδιότητες με αποτέλεσμα οι PF να χρησιμοποιούνται στη κατασκευή πάνελς με συνεχή ελασματοποίηση.

Με την αυξανόμενη προσπάθεια για τη βελτίωση της πυρασφάλειας των πάνελς, ο φαινολικός αφρός προέκυψε σαν ένα θερμοπλαστικό υλικό, άξιο προσοχής. Έχει εξαιρετική απόδοση σε περιβάλλον φλόγας, κάτι που περιλαμβάνει υψηλή αντίσταση στην ανάφλεξη, αργή καύση και πολύ χαμηλό επίπεδο εκπομπής καπνού.

Ο φαινολικός αφρός παράγεται από υγρή φαινολική φορμαλδεύδη που αναμιγνύεται με δραστικές και διογκωτικές ουσίες, καταλύτες (H_3PO_4) και πρόσθετα. Οι μηχανικές του ιδιότητες είναι παρόμοιες με εκείνες των PUR και PIR.

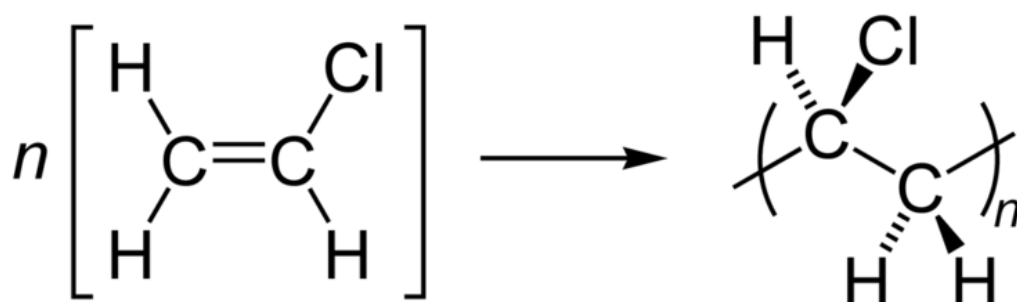
Οι δραστικές ουσίες χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να ελεγχθεί η δομή και η το μέγεθος των κυψελών. Τέτοιες ουσίες είναι τα προϊόντα συμπύκνωσης του καστορελαίου με αλκυλοφαινόλες. Ένα πρόσθετο που χρησιμοποιείται είναι η ουρία η οποία χρησιμοποιείται για την αντίδραση με τη φορμαλδεύδη.

Τα πιο συνηθισμένα διογκωτικά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αφρών PF είναι οργανικά υγρά που έχουν σημεία βρασμού σε εύρος 208 -908 °C. Τα

διογκωτικά μπορεί να είναι HFC, HCFC και υδρογονάνθρακες αποτελούμενοι από 3-10 άτομα άνθρακα (πεντάνιο, εξάνιο).

4.2.4 Αφρός χλωριούχου πολυβινυλίου (PVC)

Δομικά το PVC είναι ένα πολυμερές βινύλιο παρόμοιο με το πολυαιθυλαίνιο αλλά παράγεται από πολυμερισμό του μονομερούς βινιλικού χλωριδίου (VCM), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.2 Παράδειγμα πολυμερισμού του μονομερούς βινιλικού χλωριδίου

Το PVC υπάρχει με δύο διαφορετικές μορφές, μια καθαρώς θερμοπλαστική που αποκαλείται γραμμικός αφρός PVC και μια χιαστής σύνδεσης ισοκυανικού τροποποιημένου τύπου.

Το γραμμικό PVC έχει υψηλή ολκιμότητα και αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες, αλλά μαλακώνει σε υψηλές θερμοκρασίες.

Το χιαστής σύνδεσης PVC είναι πιο σκληρό, έχει υψηλότερη αντοχή και ακαμψία, είναι λιγότερο ευαίσθητο στην θερμότητα, αλλά είναι πιο εύθραυστο. Έχει τελική επιμήκυνση περίπου 10% σε εφελκυσμό, που είναι πολύ μεγαλύτερη από τα περισσότερα αφρώδη υλικά. Ο αφρός χλωριούχου πολυβινυλίου (PVC) είναι διαθέσιμος σε καθορισμένους μεγέθους κομμάτια πυκνότητας από 30 έως 400 kg/m³

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ SANDWICH ΥΛΙΚΑ

5.1 Εισαγωγή

Τα οχήματα παντός εδάφους GRP χρησιμοποιούν σύνθετα πάνελς σε μέρη του αμαξώματος για την επίτευξη μεγαλύτερης δυσκαμψίας και ισχύος ,ενσωματώνοντας και την θερμομόνωση .Το μικρό βάρος της κατασκευής είναι ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα του οχήματος και συμβάλλει στην ικανότητα του να κινείται ακόμη και σε μεγάλο πάχος χιονιού ενώ ταυτόχρονα με την μείωση του βάρους του οχήματος αυξάνεται το ωφέλιμο φορτίο.

Μια παρόμοια με τη κατασκευή φορτηγών εφαρμογή, χρησιμοποιείται για την κατασκευή εμπορευματοκιβωτίων με σύνθετα πάνελς, τα οποία χαρακτηρίζονται από χαμηλό βάρος με υψηλή θερμομόνωση για τη μεταφορά κατεψυγμένων τροφίμων, φρούτων κ.λ.π. Τα σύνθετα πάνελς τύπου σάντουιτς χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα στον τομέα των μεταφορών ,όπως για παράδειγμα στα αυτοκίνητα ,στο μετρό και στα τρένα με στόχο την μείωση του βάρους των οχημάτων που επιφέρει μείωση των εκπομπών και την ενσωμάτωση λεπτομερειών για τη μείωση του παραγωγικού κόστους με αύξηση της θερμοκρασίας και της ηχομόνωσης.

Υπάρχει επίσης μεγάλη ποικιλία σκαφών αναψυχής και πλοίων για την κατασκευή των οποίων χρησιμοποιούνται σύνθετα πάνελς .Στα σκάφη αναψυχής το κατάστρωμα και το κύτος κατασκευάζονται από σύνθετα πάνελ.

Τέλος στην αεροναυπηγική ,τα σύνθετα πάνελς χρησιμοποιούνται τις τελευταίες δεκαετίες για το εξωτερικό κέλυφος του αεροπλάνου αντί για συμπαγή μεταλλικά φύλλα ,γιατί παρέχουν μεγάλη αντοχή σε συνδυασμό με το μικρό βάρος.

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

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

Οι πολυστρωματικές δομές εφαρμόζονται εκτεταμένα σε προβλήματα κρούσης ως μηχανισμός απορρόφησης της μηχανικής ενέργειας. Μια τέτοια τυπική δομή, αποτελείται από αφρώδη ή κυψελοειδή πυρήνα ανάμεσα από δύο μεταλλικές ή πλαστικοποιημένες πλάκες. Ο κύριος μηχανισμός ενεργειακής απορρόφησης είναι η τοπική θλίψη του πυρήνα παράλληλα με το λυγισμό και τη κάμψη των πλακών ενώ η ενέργεια απορροφάται από τοπική κρούση και ολική κατάρρευση του συνόλου του δοκιμίου. Προφανώς στις πολυστρωματικές δομές είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν υλικά τα οποία έχουν υψηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κρούσης, ενώ επίσης επιβάλλεται η μελέτη αυτής της ικανότητας των δομικών συστατικών είτε ως μεμονωμένα υλικά είτε ως συνδυασμός υλικών (πυρήνας- πλάκες). Οι εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες τους, αποδίδονται στις πολλές διεπιφάνειες στο εσωτερικό του συνθέτου οι οποίες εμποδίζουν την κίνηση των διαταραχών.

Έχει αποδειχθεί ότι ένα πολυστρωματικό σύνθετο τύπου A/B, όπου το μέταλλο A έχει διαταραχές υψηλής ενέργειας και το μέταλλο B διαταραχές χαμηλής ενέργειας, παρουσιάζει υψηλότερο όριο ελαστικότητας από τα καθαρά μέταλλα A και B. Πρόσφατες έρευνες απέδειξαν ότι η μικροσκληρότητα πολυστρωματικών (A/B, όπου A= μέταλλο και B =κεραμικό) επιστρωμάτων μικρού πάχους είναι συνάρτηση του πάχους της μεταλλικής στρώσης, ή, ορθότερα, της απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών στρωμάτων (B).

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

σύστασης .Γενικά, πρόκειται για νέα υλικά ,των οποίων η μηχανική συμπεριφορά δεν έχει πλέον διασαφηνιστεί και θεωρητικά τεκμηριωθεί.

Δομικό στοιχείο από sandwich υλικό προκύπτει από τη σύνδεση ,κόλληση ή συγκόλληση ,δύο λεπτών επιδερμίδων (skin) υλικού υψηλών μηχανικών ιδιοτήτων πάνω σε μία “καρδιά” ή “ψίχα” ελαφρού υλικού χαμηλών μηχανικών ιδιοτήτων που καλείται υλικό πλήρωσης και εξασφαλίζει τη διατήρηση της απόστασης μεταξύ των επιδερμίδων .Το υλικό πλήρωσης είναι είτε κάποιο αφρώδες πολυμερές ,συνηθέστερα πολυουρεθάνη , είτε κάποιο ελαφρύ μέταλλο ,συνηθέστερα Al, το οποίο είναι διαμορφωμένο σε κυψελοειδή γεωμετρία.

5.1.1. Αποδοτικότητα και κόστος υλικών

Η αποδοτικότητα των υλικών καθορίζεται από την ικανότητα μιας δομής να αντέχει φορτία με ελάχιστο βάρος. Αν το γεωμετρικό σχήμα ,η φόρτιση και ο τύπος στήριξης δεν αλλάξουν (π.χ. ο συντελεστής των δυναμικών τάσεων είναι σταθερός) η αποδοτικότητα όλης της δομής εξαρτάται από την αποδοτικότητα των υλικών. Η αποδοτικότητα ενός υλικού συνήθως προσδιορίζεται ως μηχανικές επιδόσεις προς βάρος .Στον **πίνακα 5.1** αναφέρονται οι ιδιότητες κάποιων από τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως για την κατασκευή σύνθετων πάνελς τύπου σάντουιτς και ενδεικτικό κόστος των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους ,αλλά και το κέρδος που προκύπτει από το κόστος που εξοικονομείται χάρις στο ελαφρύ βάρος τους.

$$\frac{1}{\text{συνολικό κόστος}} = \frac{1}{\text{κόστος υλικού σε όγκο} + \text{κόστος υλικού που εξοικονομείται σε όγκο}} = \frac{1}{\text{κόστος υλικού} \times \rho + \text{εξοικονόμηση βάρους} \times \rho}$$

	Υλικά	Συντελεστής ελαστικότητας E (GPa)	Πυκνότητα υλικού ρ (kg/dm ³)	Κόστος υλικού που εξοικονομείται σε βάρος (€/kg)	Κόστος του υλικού κατασκευής των πάνελ ανά όγκο (€/dm ³)	Κόστος του υλικού που εξοικονομείται με 2€/kg σε όγκο (€/dm ³)	Συνολικό κόστος (€/dm ³)
εξωτερική επιφάνεια (δέρμα)	Χάλυβας	210	7,8	0,6	4,68	15,60	20,28
	Αλουμίνιο	72	2,7	2,0	5,40	5,40	10,80
	Ενισχυμένο με υαθόνημα πλαστικό	20	1,7	3,3	5,61	3,40	9,01
	Ενισχυμένο με φυσικές ίνες πλαστικό	6	1,0	1,1	1,10	2,20	3,30
πυρήνας	Πολυπροπιλένιο	1,2	0,9	1,0	0,90	1,80	2,70
	Ξύλο από μπάλσα	0,15	0,15	10,0	1,50	0,30	1,80
	Κυψελωτό πολυπροπιλένιο	0,03	0,08	4,0	0,32	0,16	0,48
	Κυψελωτό χαρτί	0,02	0,08	2,0	0,16	0,16	0,32

Πίνακας 5.1 Ιδιότητες και ενδεικτικό κόστος κάποιων υλικών

5.1.2. Η αξία της εξοικονόμησης βάρους

Τα σύνθετα πάνελς επιτρέπουν την μείωση του κόστους κατασκευής τους χάρις στη μείωση βάρους των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται. Το μειωμένο βάρος των σάντουιτς πάνελς μειώνει και το κόστος λειτουργίας των παραγωγικών μονάδων, εκτός από την μείωση του κόστους τοποθέτησης ενώ επίσης, προκύπτει μεγάλο όφελος από το μειωμένο κόστος των οικολογικών επιπτώσεων. Για να μπορούν να ενσωματωθούν και αυτά τα κόστη στη σύγκριση της απόδοσης των υλικών βάση κόστους πρέπει να προσδιοριστεί το κέρδος που απορρέει από το πλεονέκτημα της εξοικονόμησης βάρους σε ευρώ/kg. Αυτή η τιμή εξαρτάται από πολλές παραμέτρους και από την εφαρμογή για την οποία θα χρησιμοποιηθεί το πάνελ. Όπως και να έχει, σε γενικές γραμμές η αξία της εξοικονόμησης του υλικού που χρησιμοποιείται, ενδεικτικά για τη σύγκριση που γίνεται παίρνουμε την τιμή των 2 E/ kg. Η αξία που προκύπτει από την εξοικονόμηση υλικού σε όγκο μπορεί να υπολογιστεί με τον πολλαπλασιασμό των τιμών πυκνότητας (ρ) των υλικών. Αυτό υπολογίζεται με την εξίσωση και αναφέρεται στον πίνακα 5.1 στη στήλη: Συνολικό κόστος (E/dm^3)

5.2 Δομή

Τυπικά ένα σύνθετο πάνελ αποτελείται από τρία κύρια μέρη: δύο λεπτά σκληρά και ανθεκτικά φύλλα αποτελούν τις εξωτερικές επιφάνειες (περίβλημα) που ανάμεσά τους υπάρχει ένας ελαφρής συμπαγής και χαμηλής πυκνότητας πυρήνας. Με τη συγκόλληση των φύλλων με τον πυρήνα επιτυγχάνεται η μεταφορά φορτίων μεταξύ των στοιχείων που συνθέτουν το πάνελ.

5.2.1 Πυρήνες

Ο πυρήνας μίας πολυστρωματικής δομής, πρέπει να πλήρει μερικές προϋποθέσεις ώστε να συνεισφέρει στη απορρόφηση ενέργειας σε περίπτωση κρούσης:

- Πρέπει να είναι δύσκαμπτος κατά τη κατεύθυνση κάθετη στις πλάκες για να αποφευχθεί εκτεταμένη παραμόρφωση των τοιχωμάτων κατά την θλίψη.
- Πρέπει να έχει αυξημένη αντοχή σε διάτμηση ώστε να αποφευχθεί σχετική ολίσθηση των πλακών όταν εφαρμόζεται καμπτική τάση.
- Πρέπει να είναι αρκετά δύσκαμπτος ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλότητα της επιφάνειας και για να αποφεύγεται η πτύχωση των άθικτων τμημάτων των πλακών κατά τη διάρκεια της θλιπτικής πειραματικής διαδικασίας.

Ο πολυμερής αφρός είναι υλικό το οποίο μπορεί να συνεισφέρει στην ανθεκτικότητα της σύγκρουσης .Η υβριδική φύση της πολυστρωματικής δομής εντοπίζεται στο γεγονός ότι μπαίνουν εσωτερικοί σωλήνες ή αυλακώσεις οι οποίες ελέγχουν τα φορτία αστοχίας.

Το υλικό του πυρήνα πρέπει να έχει χαμηλή πυκνότητα προκειμένου να προσθέτει το λιγότερο δυνατόν στο συνολικό βάρος της κατασκευής του πάνελ .Ο πυρήνας είναι αυτός που υποβάλλεται κατά κύριο λόγο σε διάτμηση και η παραμόρφωσή του λόγω διάτμησης προκαλεί ολικές παραμορφώσεις και διατμητικές καταπονήσεις στο πάνελ .Κατά συνέπεια ,το υλικό του πυρήνα πρέπει να επιλέγεται με κριτήριο την ανθεκτικότητα σε εγκάρσια φορτία και το μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση να είναι αρκετά υψηλό ,ώστε να είναι δύσκολο να υποστεί διάτμηση .Το κρίσιμο φορτίο ρυτίδωσης εξαρτάται από τον συντελεστή ελαστικότητας και από το μέτρο διάτμησης του πυρήνα .Οι άλλες ιδιότητες του πάνελ ,όπως η θερμική και ακουστική μόνωση ,εξαρτώνται κυρίως από το υλικό του πυρήνα και το πάχος του .Οι βασικές ιδιότητες λοιπόν του πυρήνα είναι η πυκνότητα ,το μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση ,η κάθετος ακαμψία στις εξωτερικές επιφάνειες και η θερμική και ακουστική μόνωση.

Οι πυρήνες των σύνθετων πάνελς που χρησιμοποιούνται για μετάδοση της φόρτισης μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κύριες κατηγορίες:

a) αφρός ή στερεός πυρήνας (foam core sandwich),

Η σχετικά πρόσφατη ανάπτυξη υψηλής ποιότητας και πυκνότητας κυψελοειδών αφρών είχε σημαντική επίδραση στην αντίληψη κατασκευής και χρήσης του σύνθετου πάνελ .Οι κυψελοειδής αφροί δεν προσφέρουν την ίδια με τους κυψελωτούς πυρήνες ,υψηλή σκληρότητα και αναλογία σχέσης αντίστασης-βάρους .Είναι γενικά λιγότερο ακριβοί από τους κυψελωτούς πυρήνες ,αλλά το πιο σημαντικό είναι ένα στερεό σε μακροσκοπικό επίπεδο υλικό ,που κάνει τη κατασκευή του πάνελ ,πολύ πιο εύκολη.

Η αφρώδης επιφάνεια είναι εύκολα κατεργάσιμη για την παραγωγή του συμπαγούς πυρήνα και την διαμόρφωση του, ενώ η συγκόλληση του πυρήνα με τα φύλλα των εξωτερικών επιφανειών γίνεται με κόλλα. Επιπλέον ,τα αφρώδη υλικά προσφέρουν υψηλή θερμική μόνωση και η συμπαγής κυψελοειδής μάζα τους ,όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για παράδειγμα στην ναυπηγική ,εγγυάται την επιπλευσιμότητά τους.

Τέλος είναι σχετικά ανέξοδοι και δύνανται να αποτελούνται από ξύλο , ή από μία τεράστια ποικιλία αφρών και πλαστικών υλικών με πολύ ευρύ πεδίο πυκνοτήτων και συντελεστών μηχανικής συμπεριφοράς.



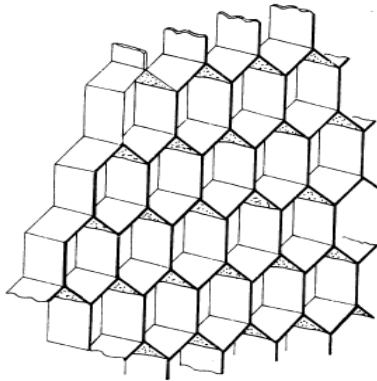
Εικόνα 5.1 Απεικόνιση κυψελοειδούς αφρού

b) κυψελωτός πυρήνας (honeycomb core)

Οι πιο δεδομένοι κυψελωτοί πυρήνες είναι κατασκευασμένοι από αλουμίνιο ή από ψάθα εμποτισμένου υαλονήματος ή ινών αραμίντ. Λόγω των διαφορετικών μεθόδων παραγωγής ,οι περισσότεροι κυψελωτοί πυρήνες δεν έχουν μόνο διαφορετικές εκτός επιπέδου ιδιότητες, αλλά και οι ιδιότητες επιπέδου είναι διαφορετικές από τον έναν στον άλλο. Αυτό διαφαίνεται εύκολα ,καθώς τόσο η διαδικασία ρυτίδωσης όσο και διαστολής προκαλεί είναι διπλό τοίχωμα προς μία κατεύθυνση και μονά τοιχώματα προς την άλλη. Υπερτεταμένες “κυψέλες” δημιουργούν πρόσθετη ανισοτροπία.

Οι ιδιότητες του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένοι οι περισσότεροι κυψελωτοί πυρήνες σχετίζονται με τρεις κατευθύνσεις: το πλάτος (W) ,το μήκος (L) και την εγκάρσια (T) .Οι κυψελωτοί πυρήνες έχουν άριστες ιδιότητες όπως πολύ υψηλή, κάθετα προς τις εξωτερικές επιφάνειες σκληρότητα , τη μεγαλύτερη αντοχή στην διάτμηση και την μεγαλύτερη αντοχή στην διάτμηση και την μεγαλύτερη ως προς το βάρος σχέση ,αντίσταση σε ολικό φορτίο θραύσης από

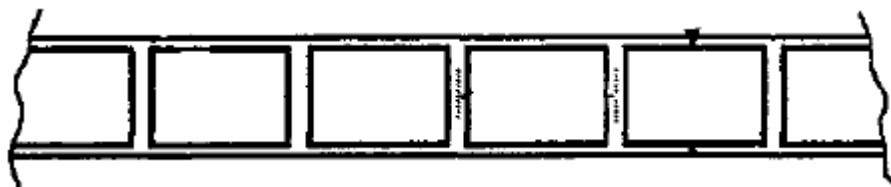
σχεδόν όλους τους υπάρχοντες πυρήνες. Τα κύρια μειονεκτήματα είναι το υψηλό κόστος, ο δύσκολος χειρισμός κατά τη διάρκεια της παραγωγής του (στρώσιμο και συνένωση του πυρήνα με τις εξωτερικές επιφάνειες),και το γεγονός ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαζί με υγρή στρώση προεμποτισμού στην κατασκευή.



Εικόνα 5.2 Ενδεικτική απεικόνιση κυψελωτού πυρήνα

c) πυρήνας ιστού (web core sandwich)

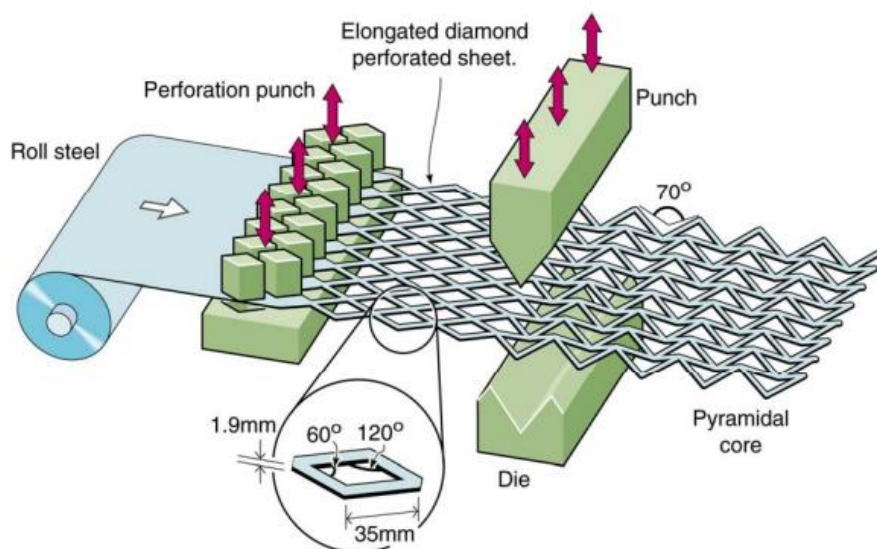
Στον πυρήνα ιστού ,το πάνελ έχει δύο απέναντι επίπεδα τα οποία συνδέονται κατακόρυφα .Η ένωση αυτή συνήθως γίνεται με συγκόλληση laser.Ο “ιστός” τοποθετείται προς μία κατεύθυνση και άρα η κατακόρυφη σε αυτή κατεύθυνση αποκαλείται αδύναμη κατεύθυνση.



Εικόνα 5.3 Απεικόνιση πυρήνα ιστού

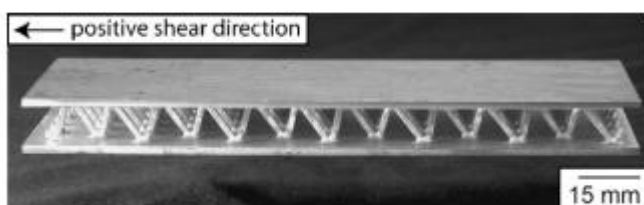
d) Πτυχωτός πυρήνας (truss core)

Έχει τρισδιάστατη δομή σε μορφή δικτυώματος και κατασκευάζεται έπειτα από κατεργασία επιπέδων μετάλλου σε μηχανικό εξολκέα. Έχει πυραμιδοειδή μορφή με διαστάσεις οι οποίες μπορούν να καθοριστούν αναλόγως τη χρήση του πυρήνα.



Εικόνα 5.4 Παράδειγμα διαμόρφωσης μεταλλικού πυρήνα truss

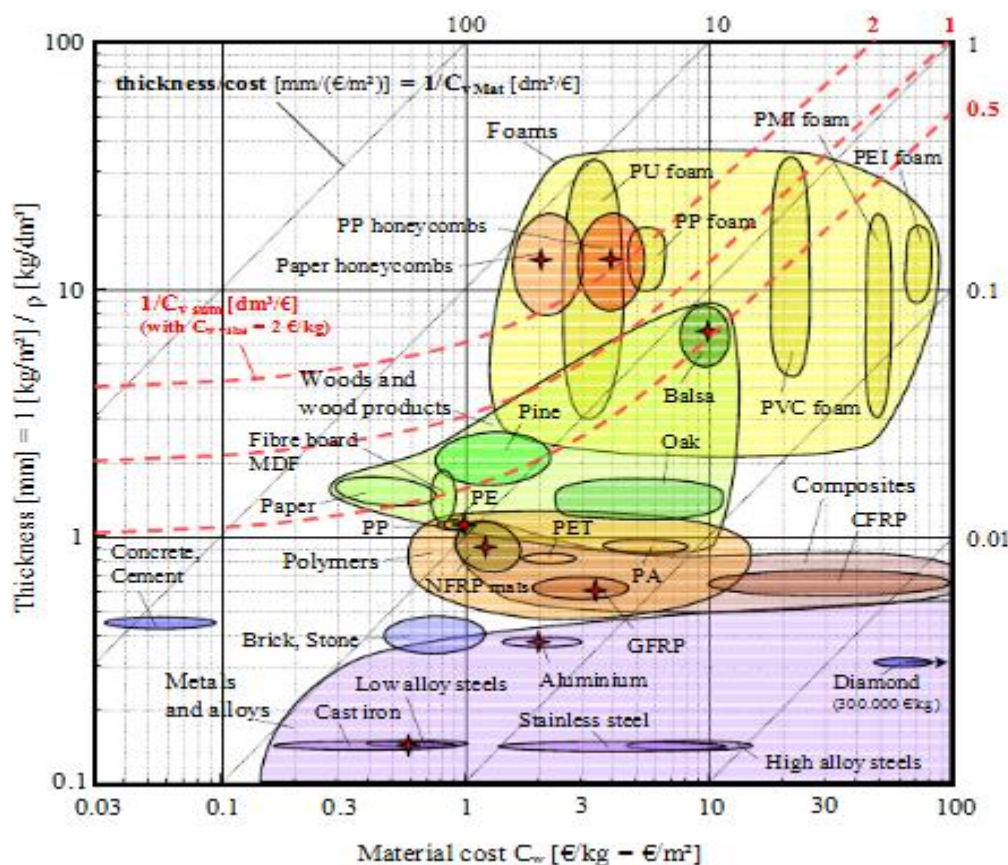
Ο πυρήνας truss έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους υπόλοιπους πυρήνες όπως αυξημένη ακαμψία, αντοχή και χαμηλότερο κόστος κατασκευής



Εικόνα 5.5 Απεικόνιση μη μεταλλικού πτυχωτού πυρήνα (truss)

5.2.2 Επιλογή του υλικού του πυρήνα

Η ποικιλία αφρών που χρησιμοποιείται εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες, την πυκνότητα που θέλουμε να προσδώσουμε στον πυρήνα καθώς και το κόστος. Το πάχος ενός πάνελ με βάρος ανά μονάδα επιφάνειας μπορεί να υπολογιστεί διαιρώντας το βάρος ανά μονάδα επιφάνειας με τη πυκνότητα ρ . Αυτό το πάχος του 1 kg/m^3 των πάνελς μπορεί να ληφθεί ως συνάρτηση του κόστους του υλικού.



Διάγραμμα 5.1 Η αποδοτικότητα του υλικού σε συνάρτηση με την αναλογία πάχους

Στο διάγραμμα 5.1 φαίνονται όλα τα υλικά με ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες, με τα πιο ελαφρά να εμφανίζονται στο επάνω μέρος του διαγράμματος, ενώ τα υλικά με χαμηλότερο κόστος εμφανίζονται στο αριστερό μέρος του διαγράμματος. Αν για μια εφαρμογή είναι σημαντικά τόσο το χαμηλό κόστος όσο και το χαμηλό βάρος, μια άριστη επιλογή υλικού μπορεί να γίνει υπολογίζοντας και την πρόσθετη αξία που επιφέρει το βάρος που εξοικονομείται. Οι καμπύλες με τις διακεκομμένες κόκκινες γραμμές που εμφανίζονται στο διάγραμμα, δείχνουν το αντίστοιχο σύνολο του κόστους του υλικού και του κόστους βάρους σε 0,5, 1 και $2 \text{ dm}^3/\text{€}$ για τιμή εξοικονόμησης βάρους 2 E/Kg . Μπορεί να γίνει σύγκριση του πάχους

και του κόστους ενός κιλού πάνελς ανά τετραγωνικό μέτρο. Για παράδειγμα ,ένα φύλλο πολυπροπυλαινίου ενός τετραγωνικού μέτρου και ενός κιλού βάρους είναι περίπου 1,1 mm παχύ και το κόστος του είναι 1 €. Μπορεί να γίνει σύγκριση του παχύτερου ή λεπτότερου φύλλου κάθε υλικού κατά μήκος των γραμμών με το αντίστοιχο πάχος ανά κόστος.

Το κόστος κάθε υλικού ανάλογα με το πάχος του μπορεί να βρεθεί και κατά μήκος των διαγώνιων μαύρων γραμμών στο διάγραμμα του διαγράμματος 5.1 .Για παράδειγμα ,συγκρίνοντας δύο στρώσεις υλικών σε στερεά μορφή η μία από πολυπροπυλαίνιο και η άλλη από ξύλο μπάλα με το ίδιο πάχος ,φαίνεται ότι το πολυπροπυλαίνιο κοστίζει 60% περισσότερο από την μπάλα και ότι είναι 6 φορές βαρύτερο. Επίσης δίνεται η δυνατότητα σύγκρισης βάρους και κόστους διαφόρων υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πυρήνων των σύνθετων πάνελς. Πρέπει όμως να λαμβάνονται πάντα υπόψη και οι ιδιότητες του κάθε υλικού για μια αντικειμενική σύγκριση .Αφού γίνει η επιλογή με βάση τις ιδιότητες των υλικών για τον πυρήνα και το περίβλημα , μπορεί να βρεθεί και το ιδανικό πάχος του σάντουιτς .

5.2.3 Εξωτερικές επιφάνειες

Σχεδόν οποιοδήποτε από τα γνωστά υλικά που διατίθεται σε μορφή λεπτού φύλλου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις εξωτερικές επιφάνειες (περίβλημα) ενός σύνθετου πάνελ. Οι ιδιότητες πρωταρχικού ενδιαφέροντος που πρέπει να πληρούν οι εξωτερικές επιφάνειες είναι :

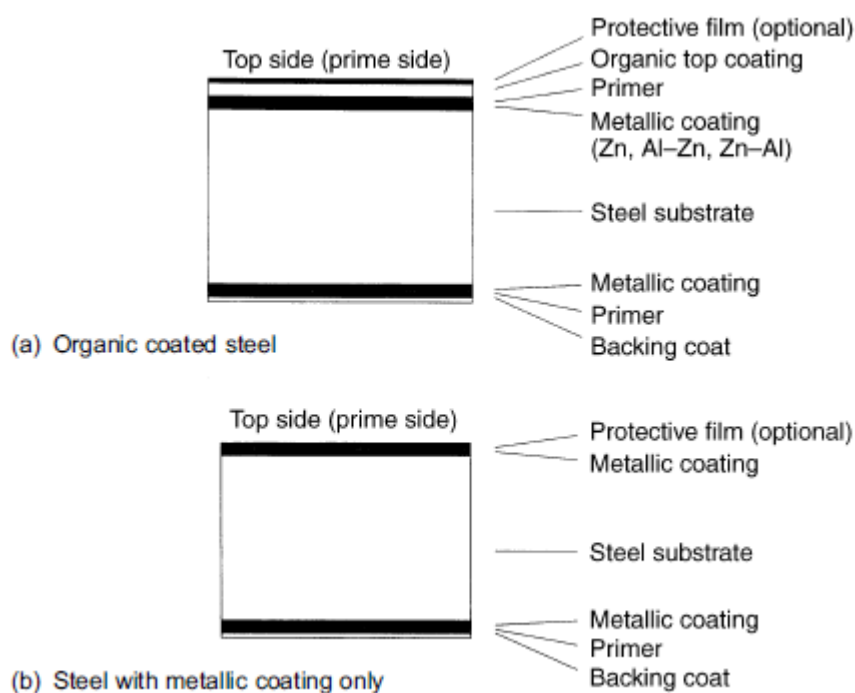
- Υψηλός βαθμός σκληρότητας που δίνει μεγάλη αντοχή στη κάμψη
- Υψηλή αντίσταση στον εφελκυσμό και αντοχή στην συμπίεση
- Αντοχή σε κρούση
- Επιφανειακό φινίρισμα
- Αντοχή στις περιβαλλοντικές συνθήκες
- Αντίσταση στη φθορά

Επιφάνειες από ατσάλι

Λεπτά φύλλα από ατσάλι είναι αυτά που χρησιμοποιούνται πιο συχνά σαν εξωτερική επιφάνεια του πάνελ. Γενικά μόνο φύλλα με μεταλλικές και πλαστικές επιστρώσεις πρέπει να χρησιμοποιούνται .Φύλλα με μόνο πλαστικές επιστρώσεις χωρίς μεταλλική επιφάνεια προστασίας δε πρέπει να χρησιμοποιούνται.Στην εικόνα 5.6 φαίνονται δύο πιθανοί τρόποι επίστρωσης των φύλλων .Το φύλλο χάλυβα συνήθως επιστρώνεται με ένα μεταλλικό στρώμα ψευδαργύρου ή κράμα ψευδαργύρου-αλουμινίου. Η στρώση αυτή δε δίνει επαρκή αντίσταση στη διάβρωση .Αμέσως μετά τοποθετείται μία γόμωση πάχους 5-10 μm η οποία συνδέει

τη μεταλλική επίστρωση με την οργανική η οποία με τη σειρά της διαφυλάσσει τις μηχανικές και τις χημικές ιδιότητες των φύλλων .Συνήθως το πάχος της επίστρωσης είναι 7-15 μm για την “κάτω” ή και περισσότερο για την “πάνω” .Μπορεί να υπάρχουν και άλλες ακόμα στρώσεις ή γόμωση στη συνέχεια (προαιρετικά).

Ο εναλλακτικός τρόπος είναι η τοποθέτηση της μεταλλικής επίστρωσης στην άνω πλευρά ενώ για την κάτω τοποθετείται γόμωση και επιπλέον στρώση προκειμένου να διασφαλιστεί ένας ισχυρός δεσμός ανάμεσα στο πυρήνα και στο επίπεδο.



Εικόνα 5.6 Πιθανοί τρόποι επίστρωσης μεταλλικών φύλλων

Φύλλα από αλουμίνιο

Πάνελς τα οποία αποτελούνται από φύλλα από αλουμίνιο χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με ειδικές απαιτήσεις για αντίσταση στη διάβρωση ή στη υγιεινή. Για παράδειγμα στη κατασκευή συσκευασιών για τρόφιμα .Το πάχος του υλικού είναι συνήθως του εύρους 0.7 -1.2 mm.Τα συνήθη κράματα που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως AlMn (κράμα μαγγανίου στο αλουμίνιο),AlMg (κράμα μαγνησίου στο αλουμίνιο) ή AlMgMn (κράμα μαγνησίου και μαγγανίου στο αλουμίνιο).

Ένα τυπικό κράμα πρέπει να έχει αντοχή σε εφελκυσμό της τάξης των 200-250 N/mm². Τα φύλλα από αλουμίνιο συνήθως επιστρώνονται με τα ίδια υλικά όπως τα φύλλα από χάλυβα για αισθητικούς λόγους κυρίως.

Άλλα υλικά

Τα επίπεδα των πάνελ μπορούν να κατασκευαστούν από παράγωγα ξυλείας ή κόντρα πλακέ. Τα υλικά αυτά πρέπει να χρησιμοποιούνται σε περιβάλλον όπου δεν υπάρχουν μεγάλες εναλλαγές στη υγρασία του αέρα ενώ κάτω από τη δράση φόρτισης μακράς διάρκειας πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν ο ερπυσμός τόσο των επίπεδων πλακών, όσο και του υλικού του πυρήνα.

Σανίδες με παχιά εξωτερικά επίπεδα από χαρτόνι και με πυρήνα γύψου έχουν ήπιες μηχανικές ιδιότητες αλλά καλές ιδιότητες πυροπροστασίας. Το συνολικό πάχος των επιπέδων αυτών είναι το εύρος 6±15 mm. Η σανίδα είναι από μόνη της είναι ένα πάνελ. Οι γυψοσανίδες δεν επηρεάζονται γενικά από μικρές εναλλαγές στην υγρασία, παρόλα αυτά καλό είναι να χρησιμοποιούνται σε ξηρές συνθήκες. Μπορεί επίσης να είναι ενισχυμένες με ίνες χαρτιού σε ποσότητα 15-20 % κατά βάρος.

	Gypsum boards with			Cement based boards with paper/pulp fibres
	cardboard faces only	glass fibres	paper/pulp fibres	
Density (kg/m ³)	1100	1100	1200	1100
Tensile strength (N/mm ²)	1.5		3.5	2.5
Tensile modulus (N/mm ²)	2		3	
Compressive strength (N/mm ²)	6		9.5	20
Compressive modulus (N/mm ²)	2		3	

Note that the mechanical values are given for the longitudinal direction of the boards and that different values are obtained in the transverse direction.

Πίνακας 5.2 Παρουσίαση των μηχανικών ιδιοτήτων των γυψοσανίδων

Τα επίπεδα του πάνελ μπορούν επίσης να κατασκευαστούν από πλαστικό ενισχυμένο με υαλόνημα. Η κύρια χρήση αυτών είναι η κατασκευή πλαστικών σκαφών και σε μικρότερο βαθμό για υπεράκτιες εξέδρες άντλησης πετρελαίου και φυσικού αερίου.

5.3 Συγκολλητικές ουσίες και ιδιότητές τους

Υπάρχει μια ποικιλία συγκολλητικών υλικών που χρησιμοποιούνται για την συνένωση των υλικών (εξωτερικές επιφάνειες ,πυρήνας και η ίδια η κόλλα) που αποτελούν ένα σύνθετο πάνελ τύπου σάντουιτς. Η κόλλα πρέπει να ικανοποιεί τις μηχανικές απαιτήσεις της δομής προσφέροντας ταυτόχρονα καλή συγκόλληση μεταξύ των υλικών και διασφαλίζοντας την λειτουργία του πάνελ όσον αφορά στην καταπόνηση ,την αντοχή στην θερμότητα ,την σκληρότητα την γήρανση και τον ερπυσμό. Παρακάτω παρουσιάζονται οι διάφορες κόλλες που χρησιμοποιούνται:

5.3.1 Εποξικές ρητίνες

Είναι χαμηλής θερμοκρασίας σκληρυντικές ρητίνες ,συνήθως μεταξύ των 20 και 90 °C ,αλλά κάποια παρασκευάσματα είναι κατασκευασμένα για σκλήρυνση σε υψηλές θερμοκρασίες (130-200 °C).Έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς διαλύτες και χωρίς τη δημιουργία πτητικών υπο-προϊόντων και γι' αυτό έχουν μικρή συστολή. Η απουσία διαλυτών κάνει τα εποξικά προϊόντα κατάλληλα για όλα σχεδόν τα υλικά κατασκευής πυρήνων .Τα εποξικά είναι διαθέσιμα σε παχύρρευστη μορφή, μεμβράνη ,σκόνη ή σε στερεά μορφή. Η τυπική αντοχή διάτμησης των εποξικών είναι περίπου 20-25 Mpa

5.3.2 Τροποποιημένες εποξικές ενώσεις

Οι εποξικές ενώσεις με θερμική σκλήρυνση είναι όμοιες με τις κοινές εποξικές ενώσεις, αλλά αναμεμιγμένες με συνθετικό καουτσούκ ,όπως ελαστομερές πολυσουλφίδιο το οποίο βελτιώνει πολύ την αντοχή στην αποφλοίωση. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό των ελαστομερών τόσο αυξάνεται η ολκιμότητα και ο ερπυσμός ενώ αντίστοιχα μειώνεται η αντοχή στην θερμότητα. Ακόμη εμπεριέχει νάιλον που βελτιώνει τις ιδιότητες συγκόλλησης

5.3.3 Φαινολικές ουσίες

Παρουσιάζουν θερμική και μηχανική αντοχή, καλές μονωτικές ιδιότητες και είναι απρόσβλητα στην επίδραση των διαλυτών και των χημικών αντιδραστηρίων. Τα κύρια μειονεκτήματα είναι ότι αναδίδουν μια υδάτινη ουσία κατά την θερμοσκλήρυνση καθιστώντας απαραίτητο τον αερισμό και το ιξώδες είναι αρκετά υψηλό, λόγος για τον οποίο πρέπει να χρησιμοποιούνται συγκολλητικά φιλμς. Αυτά τα χαρακτηριστικά έχουν περιορίσει την χρήση των φαινολικών ουσιών κυρίως στην κατασκευή των σάντουιτς πάνελ με κυψελοειδή πυρήνα ,όπου ο αερισμός δεν είναι εμπόδιο και απαιτείται υψηλή θερμοκρασία για τη διαδικασία συγκόλλησης .Η έκλυση των αερίων καθιστά τις φαινολικές ουσίες ακατάλληλες για τη δημιουργία

σύνθετων πάνελς για χρήση στην εσωτερική δόμηση ,αλλά να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές όπου ο αερισμός είναι εφικτός.

5.3.4. Πολυουρεθάνες

Οι κόλλες πολυουρεθάνης είναι μάλλον αυτές που χρησιμοποιούνται περισσότερο για τη συνένωση των στοιχείων που αποτελούν το σύνθετο πάνελ. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι παρέχουν άριστη πρόσφυση στα περισσότερα υλικά .Μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τη μορφή κρέμας ή σε υγρή μορφή σε ένα μεγάλο φάσμα ιξώδων μπορεί να έχουν μεγάλο ή σύντομο χρόνο σκλήρυνσης, μπορούν να γίνουν επιβραδυντικά φωτιάς και ανθεκτικά στο νερό .Οι πολυουρεθάνες σχεδόν δεν εμπεριέχουν διαλύτες και γι αυτό είναι φιλικές προς το περιβάλλον και η λιγότερο τοξική ουσία όλων των ρητινών.

5.3.5 Αιθυλουρεθάνη

Η αιθυλουρεθάνη είναι μια ρητίνη συμβατή με τους πολυεστέρες και τους βινυλαιθέρες. Στην πραγματικότητα οι ακρυλικές ενώσεις είναι τόσο συμβατές, που μπορούν να ενσωματωθούν ,για παράδειγμα σε ένα εμποτισμένο πολυεστερικό φύλλο. Οι ακρυλικές ουρεθάνες είναι πολύ ανθεκτικές και δεν παρουσιάζουν σχεδόν καμία συστολή κατά την διαδικασία σκλήρυνσης. Ένας τρόπος για να ενδυναμωθεί η πρόσφυση της εξωτερικής επιφάνειας (του περιβλήματος) με τον πυρήνα ,είναι η χρήση ρητίνης ακρυλικής ουρεθάνης για πρώτη ενισχυμένη επίστρωση που είναι κοντά στον πυρήνα .Μετά η συγκόλληση χρησιμοποιείται για παράδειγμα ρητίνη πολυεστέρα πάνω από την ακρυλική επίστρωση επιτυγχάνοντας μια άριστη αντοχή συγκόλλησης.

5.4 Παραγωγική διαδικασία

Συνήθως η μορφοποίηση σύνθετων υλικών με ίνες περιλαμβάνει τρία διακεκριμένα στάδια :την παραγωγή των ινών, τη διάταξη-διεύθυνση των ινών σε ιστό ,πλέγμα ή πακέτα και την εισαγωγή των ινών στη μήτρα .Η παραγωγή των ινών έχει ήδη παρουσιαστεί .Σε δεύτερο στάδιο ,οι εξαιρετικές ίνες του πρώτου σταδίου ,ομαδοποιημένες ανά 100 ως 100.000 σχηματίζουν με ή χωρίς περιστροφή ενισχυτικά νήματα ή πλεξίδες .Συνεχείς ίνες ,μεγάλου μήκους ,μπορούν να προστεθούν είτε ως ενισχυτικές στρώσεις διαφόρων προσανατολισμών ,είτε ως δισδιάστατες και τρισδιάστατες πλέξεις .Η παραγωγή σύνθετων με μονοδιευθυντικές ίνες επιβάλλει την εκ των προτέρων διεύθυνση των ινών σε ταινίες με πάχος το πάχος μιας ίνας και με καθορισμένη τη μεταξύ τους απόσταση .

Οι ίνες με μήκος μικρότερο του 1 cm αναμειγνύονται με το υλικό της μήτρας ,το οποίο βρίσκεται σε ρευστή κατάσταση ή σε κατάσταση αυξημένης πλαστικότητας. Το εύπλαστο μείγμα ινών-μήτρας μορφοποιείται με κλασικές τεχνικές όπως χύτευση και ψεκασμός. Σε αυτήν την περίπτωση ,η ενίσχυση του παραγόμενου σύνθετου έχει τυχαίο προσανατολισμό .Οι μέθοδοι μορφοποίησης μπορούν να καταταγούν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα το υλικό της μήτρας (οργανική,μεταλλική,κεραμική), παρακάτω όμως θα αναλύσουμε τη μορφοποίηση συνθέτου οργανικής μήτρας :

5.4.1. Μορφοποίηση σύνθετου οργανικής μήτρας

α) Ασυνεχής μορφοποίηση σύνθετων

- **Χειροποίητη στρώση (hand lay-up)**

Αποτελεί την απλούστερη τεχνική παραγωγής ενός σύνθετου ,αλλά ταυτόχρονα είναι αργή και επίπονη. Οι ίνες ,με μορφή πλεγμάτων ,τοποθετούνται στο καλούπι σε στρώσεις. Η πολυμερική ρητίνη αφού αναμιχθεί με τους κατάλληλους καταλύτες και επιταχυντές ,απλώνεται πάνω στην ενίσχυση με απλή έγχυση (pouring),επάλειψη (brushing) ή ψεκασμό (spraying).Εν συνεχεία ,η ελεύθερη επιφάνεια του σύνθετου υφίσταται συμπίεση με ρολό ,ώστε να επιτευχθεί καλή επαφή ινών-μήτρας και να εξαλείφει το εναπομείναν πορώδες. Προκειμένου να αυξηθεί το πάχος των τοιχωμάτων του αντικειμένου επαναλαμβάνεται η περιγραφείσα διαδικασία (εικόνα 5.7α).Ακολουθεί ξήρανση.

- **Χύτευση θαλάμου πίεσης (pressure bag)**

Αποτελεί παραλλαγή της προηγούμενης μεθόδου .Για την καλύτερη στρώση της οργανικής μήτρας, χρησιμοποιείται αέριο υπό πίεση. Ακολουθεί ξήρανση (σχήμα 5.7.β)

- **Χύτευση σε διαιρετό καλούπι (matched die –moulding)**

Η μορφοποίηση επιτυγχάνεται με το “κλείσιμο” ενός διαιρετού καλουπιού.(σχήμα 5.7.γ)

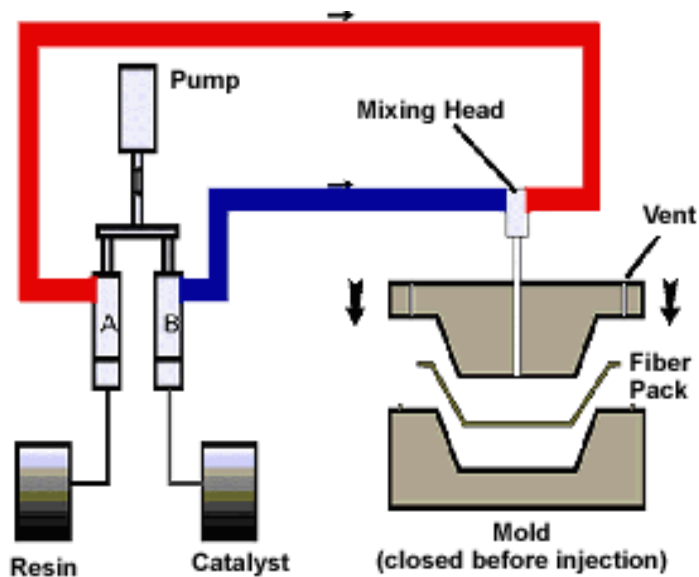


Εικόνα 5.7 Ασυνεχής μορφοποίηση σύνθετων : (α) χειροποίητη στρώση (β) χύτευση θαλάμου πίεσης, (γ) και χύτευση σε διαιρετό καλούπι

- **Χύτευση μεταφοράς ρητίνης (RTM)**

Είναι μία διαδικασία χαμηλής πίεσης για μέσες ποσότητες όγκου παραγωγής η οποία βρίσκεται ανάμεσα στις αργές διαδικασίες χύτευσης και τις γρηγορότερες που απαιτούν υψηλότερο κόστος οργάνων. Συνεχές ινώδες ,ξηρό πλέγμα τοποθετείται στο κάτω μέρος του καλουπιού. Οι ίνες συνήθως είναι από γυαλί, άνθρακα ,arimid ή συνδυασμός αυτών . Προδιαμορφωμένες ενισχύσεις από γυαλί χρησιμοποιούνται συχνά για σύνθετα σχήματα καλουπιών. Το καλούπι κλείνεται και παραμένει σταθερό καθώς ρητίνη χαμηλού ιξώδους αντλείται στο εσωτερικό αντικαθιστώντας τον αέρα μέσω αεραγωγών τοποθετημένων σε στρατηγικά σημεία.Χρησιμοποιείται επίσης ένας μετρητής για να ελέγχει τους λόγους ρητίνης /καταλύτη που χρησιμοποιούνται .Οι κοινές μήτρες ρητίνης περιλαμβάνουν συνήθως πολυεστέρα , βινυλεστέρα .Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι το ομοιόμορφο πάχος του υλικού που διαμορφώνεται .Για ακόμα καλύτερο τελείωμα στην επιφάνεια ,μία επίστρωση από ζελέ μπορεί να τοποθετηθεί στην επιφάνεια του καλουπιού πριν τη

διαδικασία. Τεμάχια που μπορούν να παραχθούν με αυτή τη διαδικασία είναι τεχνητά μέλη ανθρωπίνου σώματος, μανιέρες και εμπορευματοκιβώτια.



Εικόνα 5.8 Παρουσίαση μεθόδου χύτευσης RTM

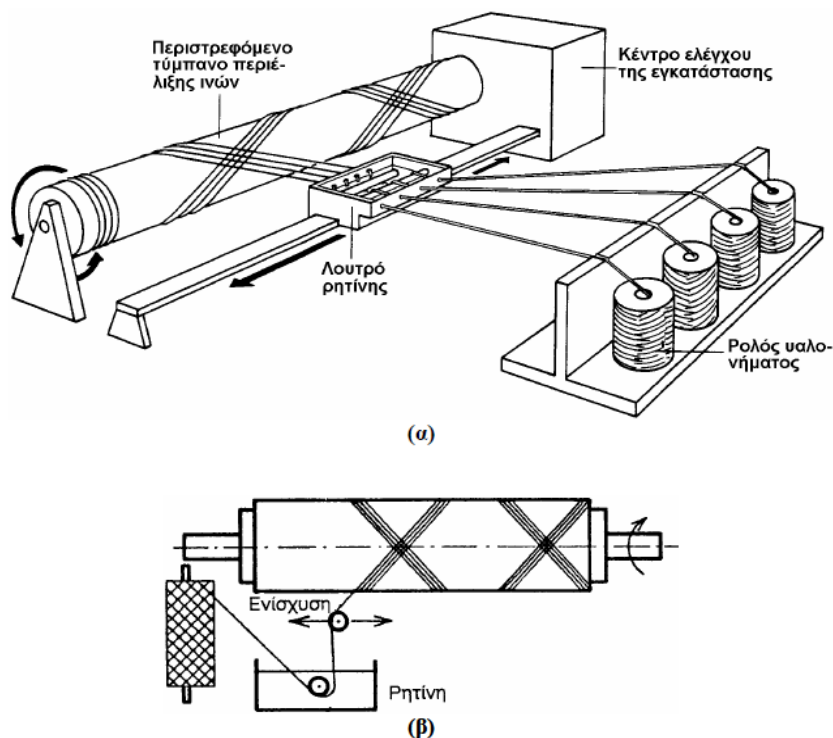
(β) Συνεχής μορφοποίηση σύνθετων

Με τις τεχνικές συνεχούς μορφοποίησης μπορεί να ληφθεί σύνθετο υλικό απλής γεωμετρίας και μεγάλου μήκους (νήμα ,μπάρα, πλάκα, φύλλο)

- **Περιέλιξη νήματος (filament winding)**

Αποτελεί σημαντική τεχνική για την παραγωγή κοίλων κυλίνδρων ,υψηλών προδιαγραφών .Οι ενισχυτικές ίνες μετά την εμβάπτιση τους σε λουτρό ρητίνης ,περιτυλίγονται σε καλούπι του επιθυμητού σχήματος (εικόνα 5.9).Πολλές φορές ο εμποτισμός σε ρητίνη γίνεται ταυτόχρονα ή έπεται της στρώσης του ενισχυτικού. Ακολουθεί ξήρανση στον αέρα ή σε κλίβανο.

Ο ισχυρός προσανατολισμός της ενίσχυσης δίνει κελύφη σύνθετων υλικών ,με υψηλή μηχανική αντοχή. Η τεχνική βρίσκει εφαρμογή στην κατασκευή δεξαμενών καυσίμων και χημικών ,αγωγών υψηλών πιέσεων κ.λ.π



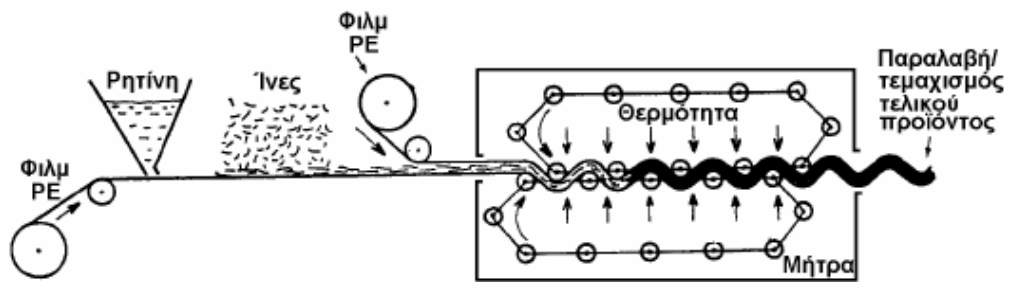
Εικόνα 5.9 Συνεχής μορφοποίηση συνθέτου με περιέλιξη νήματος α)διάταξη μορφοποίησης β)Σχηματική παράσταση διαδικασίας

- **Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheet moulding process, SMC)**

Είναι μια νέα σχετικά τεχνική με μεγάλη εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία .Τα προϊόντα έχουν μεγάλες διαστάσεις αλλά και υψηλή ομοιογένεια ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες.

Συνεχείς ίνες γυαλιού τεμαχίζονται σε ίνες μικρού μήκους (5 cm) και αποτίθενται απευθείας σε στρώμα ρητίνης ,το οποίο κινείται σε υμένιο πολυαιθυλενίου .Ένα δεύτερο στρώμα ρητίνης εναποτίθεται πάνω στο πρώτο. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα πάνελ ,μέσα στο οποίο έχουν εγκλωβιστεί οι ενισχυτικές ίνες γυαλιού (εικόνα 5.10)

Το σύνθετο τυλίγεται σε ρολά και αφήνεται να ωριμάσει από μία έως τέσσερις ημέρες ,ώστε να αναπτυχθεί καλή συνάφεια μεταξύ ινών –μήτρας. Το έλασμα του συνθέτου κόβεται στο επιθυμητό μέγεθος και γεωμετρία και τοποθετείται σε θερμό μεταλλικό καλούπι (149 °C).Με την εφαρμογή υδραυλικής πίεσης ,το αρχικό έλασμα μορφοποιείται σε τελικό προϊόν.



Εικόνα 5.10 Σχηματική παράσταση διαδικασίας συνεχούς μορφοποίησης ελάσματος

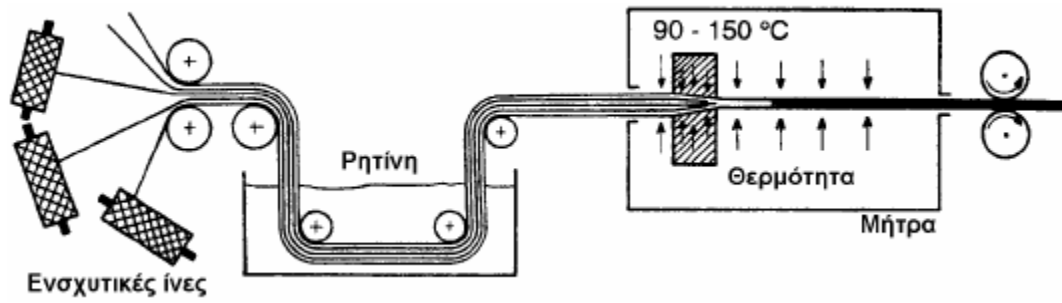
Ένα μεγάλο ενδιαφέρον έχει εκδηλωθεί για τη SMC ,και έχουν εξασφαλιστεί ειδικές ενέργειες που προσεγγίζουν τα 60 KJ/kg. Η ανάπτυξη ελαττωμάτων εξαιτίας της ανεπαρκούς διείσδυσης της ρητίνης στις ίνες (wetting of the fibers) και του εγκλωβισμένου αέρα παρατηρήθηκε με υψηλού περιεχομένου σε γυαλί σύνθετες κατασκευές προκαλώντας διαφορές στα αποτελέσματα. Οι κοντές δεσμίδες ινών (chopped strand mat) προκάλεσαν λιγότερο εγκλωβισμό αέρα από τα κοντά προνήματα (chopped rovings). Έχει επίσης βρεθεί ότι η μέθοδος παραγωγής θα μπορούσε να επηρεάσει τα αποτελέσματα και μέσω του βαθμού διείσδυσης της ρητίνης στις ίνες χειροποίητα SMC υλικά με χαμηλότερες περιεκτικότητες σε γυαλί από τα παραγόμενα από μηχανές παρείχαν υψηλότερες ειδικές ενέργειες χάρις στη καλύτερη διείσδυση της ρητίνης.

- **Μορφοποίηση με εμβάπτιση (pultrusion)**

Εφαρμόζεται σε περιπτώσεις στις οποίες απαιτείται σταθερή διατομή: σωλήνες, δοκοί, αγωγοί κ.λ.π.

Κατά τρόπο συνεχή, ίνες μεγάλου μήκους, διευθετημένες παράλληλα μεταξύ τους ,εμβαπτίζονται σε λουτρό ρητίνης και οδηγούνται σε θερμαινόμενη μήτρα χάλυβα ,η οποία καθορίζει και τη διατομή του τελικού προϊόντος.

Το προϊόν έχει υψηλή μηχανική αντοχή ,λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης ινών και του ισχυρού προσανατολισμού τους ,παράλληλα στον επιμήκη άξονα του προϊόντος.



Εικόνα 5.11 Σχηματική παράσταση διαδικασίας μορφοποίησης με εμβάπτιση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΣΤΟΧΙΑ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

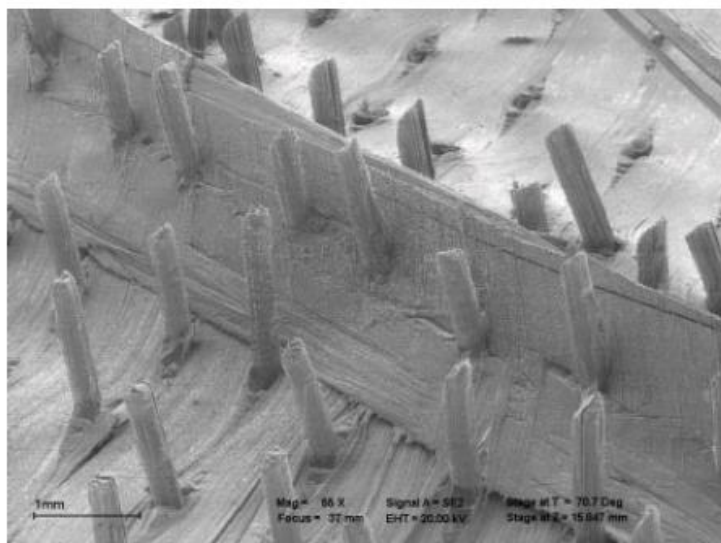
6.1 ΜΟΡΦΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

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

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

- a) Θραύση /σπάσιμο των ινών (fibre breakage)
- b) Παραμόρφωση και θραύση των μήτρας (matrix deformation and cracking)
- c) Αποχωρισμός των ινών από τη μήτρα
- d) Λόγω εμφάνισης και διάδοσης ρωγμών στην διεπιφάνεια ίνας μήτρας (debonding)
- e) Λόγω θραύσης, των ινών και εκρίζωσης τους από τη μήτρα (pull-out)
- f) Διαχωρισμός μιας στρώσης από την άλλη σ' ένα πολύστρωτο σύνθετο υλικό που καλείται διαστρωματική αποκόλληση (delamination).

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



Εικόνα 6.1 Μικροσκοπική αποτύπωση σύνθετου ινώδους υλικού¹⁶

Θραύση ινών

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

Παραμόρφωση και θραύση της μήτρας

Το υλικό της μήτρας που περιβάλλει τις ίνες πρέπει να θραυστεί για να ολοκληρωθεί η θραύση του σύνθετου υλικού. Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες, όπως εποξειδικές και πολυεστερικές, ανήκουν στα ψαθυρά υλικά και επιδέχονται περιορισμένη συνολική παραμόρφωση μέχρι την θραύση τους, ενώ αντίθετα οι μεταλλικές μήτρες μπορούν να υποστούν εκτεταμένη πλαστική παραμόρφωση. Ο μηχανισμός απορρόφησης ενέργειας στην περίπτωση μητρών από πολυμερές υλικό χαρακτηρίζεται από θραύση και μικρή παραμόρφωση της μήτρας και συνεπώς η

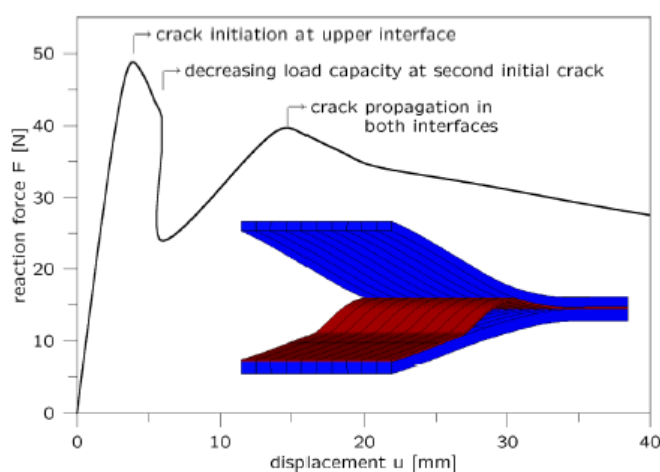
συνεισφορά του στην συνολική απορροφούμενη ενέργεια είναι σχετικά πολύ μικρή σε σύγκριση με αυτή των σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας.

Αποκόλληση ινών από μήτρα (debonding)

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

Διαστρωματική αποκόλληση (delamination)

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



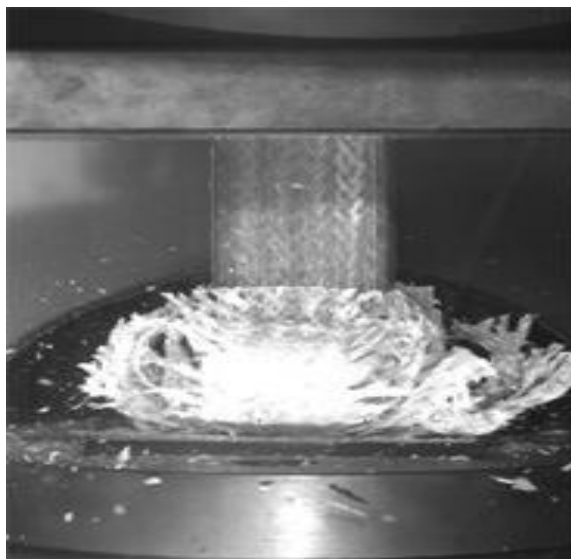
Διάγραμμα 6.1 Διάγραμμα φορτίου –μετατόπισης με τελικό αποτέλεσμα τη εμφάνιση διαστρωματικής αποκόλλησης ανάμεσα στις στρώσεις¹⁶

6.2 Μέθοδοι κατάρρευσης σύνθετων υλικών

Οι προηγούμενες έρευνες σχετικά με την αξονική συμπίεση των σύνθετων δομών υπό μορφή κυλινδρικών ή τετραγωνικών σωλήνων έδειξαν όταν αυτά τα σύνθετα κελύφη παραμορφώνονται κατά τρόπο διαφορετικό από παρόμοιες δομές φτιαγμένες από συμβατικά υλικά .Η πλαστική παραμόρφωση εδώ δεν είναι ο κυβερνώντας μηχανισμός της κατάρρευσης ,αλλά η εκτενής ανάπτυξη μικρορωγμών που μπορεί να ελεγχθεί εύκολα ανάλογα με τις ιδιότητες των ινών και των ρητινών, καθώς επίσης και με τον προσανατολισμό των ινών .Οι τρόποι κατάρρευσης επομένως εξαρτώνται από τη γεωμετρία ,τα υλικά και τις παραμέτρους του πειράματος, στοιχεία που θα αναλυθούν σε παρακάτω παράγραφο.

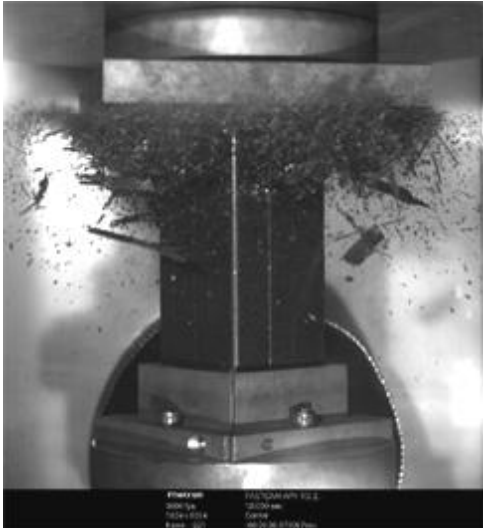
Σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρήθηκε ότι σύνθετοι σωλήνες ,που καταρρέουν κατά τρόπο σταθερό ,προοδευτικό και ελεγχόμενο ,μπορούν να απορροφήσουν ένα μεγάλο ποσό ενέργειας. Από την ευρεία πειραματική διαδικασία των αξονομετρικών σύνθετων σωλήνων ενισχυμένων με ίνες παρατηρήθηκαν οι ακόλουθοι κύριοι τρόποι αστοχίας κατά τη διάρκεια της αξονικής συμπίεσης τους.

Προοδευτική συντριβή με μικρορωγμές του συνθέτου που συνδέεται με μεγάλα ποσά ενέργειας σύνθλιψης (τρόπος Ι)

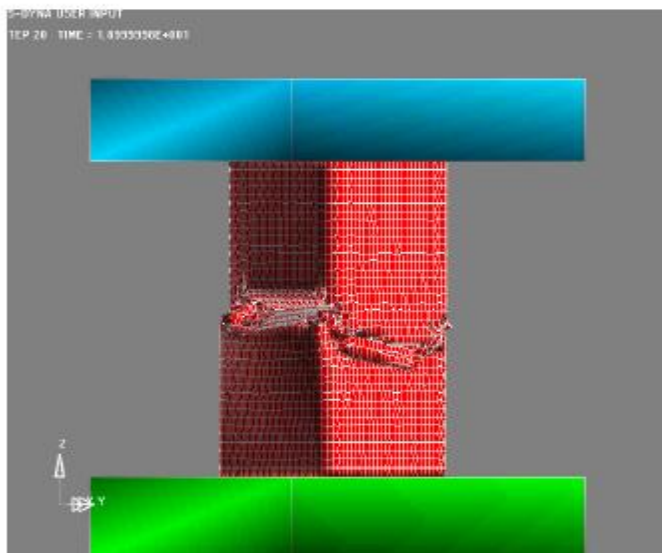


Εικόνα 6.2 Κατάρρευση συνθέτου με τη συνεχή δημιουργία μικρορωγμών κατά τη διάρκεια θλιπτικής διαδικασίας¹⁶

Ψαθυρό σπάσιμο της δομής με συνέπεια την καταστροφική αστοχία με χαμηλή ενεργειακή απορρόφηση (τρόπος II και III ανάλογα από τη μορφή των ρωγμών)



Εικόνα 6.3 Απότομη ψαθυρή αστοχία δοκιμίου κατά τη διάρκεια θλίψης στο άνω μέρος του δοκιμίου¹⁶



Εικόνα 6.4 Μοντελοποίηση της αστοχίας δοκιμίου με ψαθυρό τρόπο στο μέσο του κατά τη διάρκεια θλίψης¹⁶



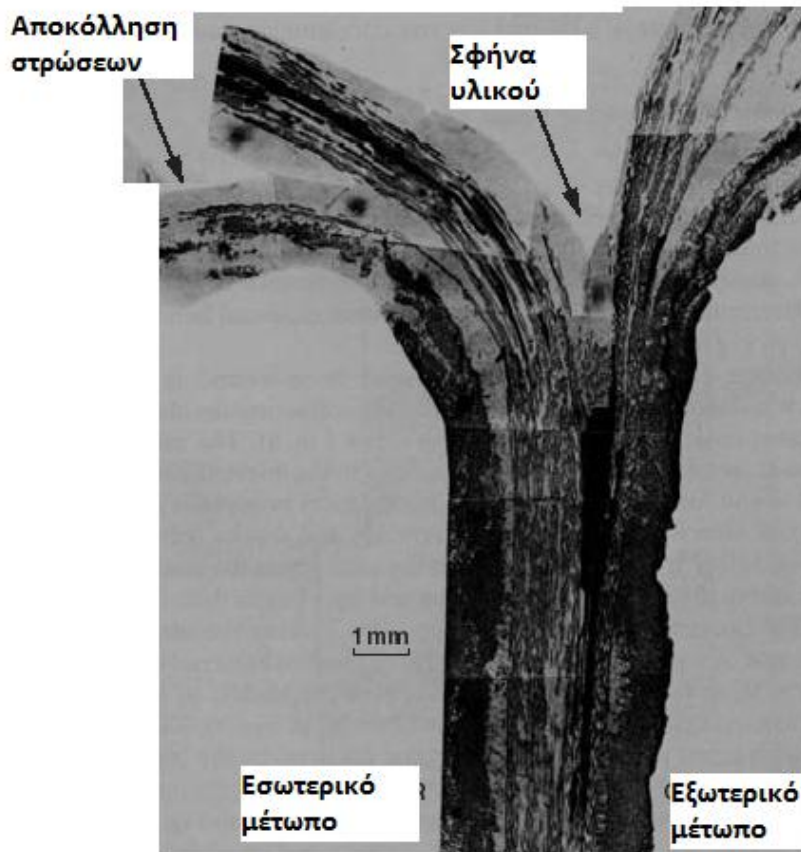
Εικόνα 6.5 Τελική μορφή σωλήνα μετά τη θλιπτική διαδικασία με την εμφάνιση πολλαπλών πτυχώσεων¹⁶

Πιο συγκεκριμένα :

Τρόπος κατάρρευσης I

Χαρακτηρίζεται κυρίως από την σταθερή και σταδιακή κατάρρευση του δοκιμίου καθώς και τον συνεχή θρυμματισμό του υλικού στην ζώνη παραμόρφωσής του .Αυτός ο τρόπος κατάρρευσης παρατηρείται σε τρεις διαφορετικές μορφές:

- Η πρώτη μορφή κατάρρευσης ,η οποία λόγω ομοιότητας αναφέρεται και σαν μορφή αστοχίας “μανιτάρι” (mushrooming failure),χαρακτηρίζεται κυρίως από την σταδιακή κατάρρευση του κελύφους μέσω του σχηματισμού συνεχών μετώπων τα οποία εκτείνονται εσωτερικά και εξωτερικά και με την ταυτόχρονη ανάπτυξη ενός αριθμού αξονικών διαρηγματώσεων (axial splits) στο εξωτερικό μέτωπο.



Εικόνα 6.6 Παρουσίαση του τρόπου δημιουργίας μανιταροειδούς δομής ¹⁶

- Η δεύτερη μορφή κατάρρευσης χαρακτηρίζεται από προοδευτική στροφή του διαρρέοντος θρυμματιζόμενου υλικού προς τα μέσα .Η στροφή αυτή του παραμορφωθέντος υλικού προς τα μέσα εξελίσσεται σε όλη τη περιφέρεια και καθ'όλο το πάχος του τοιχώματος. Δεν εμφανίζονται αξονικές διαρηγματώσεις.
- Η τρίτη μορφή κατάρρευσης χαρακτηρίζεται από την ολική στροφή του παραμορφωθέντος υλικού προς τα έξω .Οι αξονικές διαρηγματώσεις αποτελούν βασικό χαρακτηριστικό της μορφής αυτής .Η ζώνη παραμόρφωσης εκτείνεται στη βάση του κελύφους.

Τρόπος κατάρρευσης II

Ο τρόπος κατάρρευσης II χαρακτηρίζεται κυρίως από εκτεταμένη ψαθυρή θραύση που οδηγεί σε καταστροφική αστοχία του κελύφους. Στην περίπτωση των κωνικών κελύφων ο τρόπος αυτός χαρακτηρίζεται από την ανάπτυξη μίας ελικοειδούς ή διαμήκους ρωγμής διαδιδόμενης στην περιφέρεια του κελύφους ,ενώ

στην περίπτωση των τετραγωνικών πυραμίδων κύριο χαρακτηριστικό του τρόπου αυτού είναι η εμφάνιση διαμήκων ρωγμών στις τέσσερις γωνίες της βάσης του κελύφους.

Τρόπος κατάρρευσης III

Ο τρόπος κατάρρευσης III χαρακτηρίζεται από την καταστροφική αστοχία του υλικού με την εμφάνιση περιφερειακής θραύσης περίπου στο μέσο ύψος του κελύφους η οποία προκαλεί τον διαχωρισμό του σε ακανόνιστα σχήματα.



Εικόνα 6.7 Μικρογραφική απεικόνιση της δομής υλικού μετά από αστοχία.¹⁶

Τρόπος κατάρρευσης IV

Χαρακτηρίζεται βασικά από την εμφάνιση σχεδόν με την έναρξη της φόρτισης γραμμών πτυχώσεως (κατά το ορθότερο ,γραμμών θραύσεως) ομοίων με αυτές που εμφανίζονται στους μεταλλικούς και PVC σωλήνες. Πρόκειται για καθαρά καταστροφική μορφή κατάρρευσης των κελύφων.

Πρέπει να τονιστεί ότι από τους τέσσερις τρόπους κατάρρευσης μόνο ο πρώτος δίνει την δυνατότητα στην κατασκευή να απορροφήσει σημαντικά ποσά ενέργειας κατά την διαδικασία εξέλιξης του μηχανισμού κατάρρευσης .Η ενέργεια αυτή διαχέεται στους επιμέρους μηχανισμούς αστοχίας του υλικού.

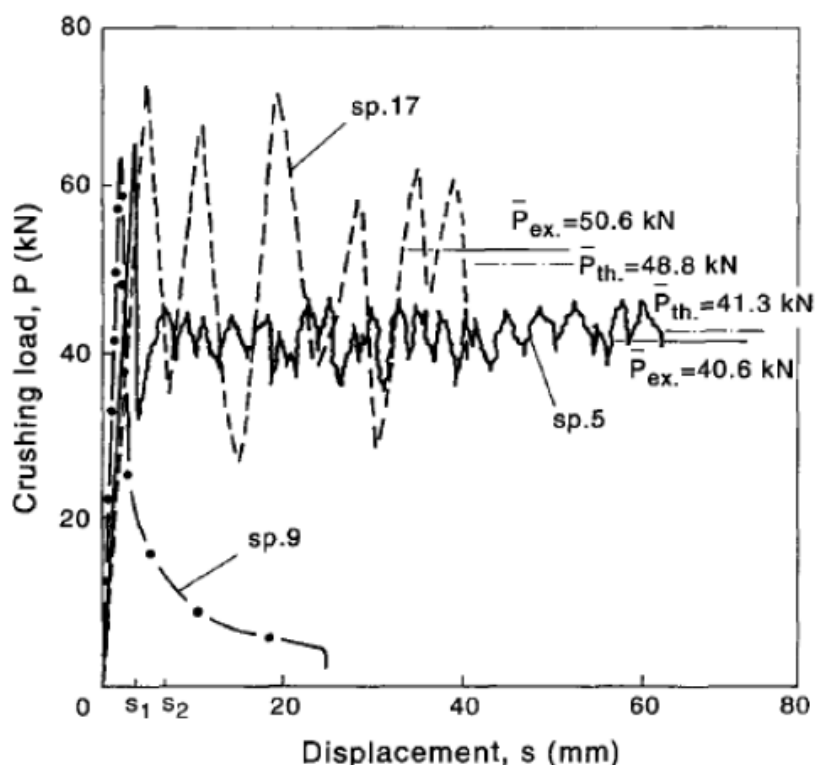
Αν και σημαντική πειραματική εργασία έχει εκτελεσθεί στην στατική κατάρρευση δομών, μελέτες στη δυναμική συντριβή είναι αρκετά περιορισμένες σε αριθμό. Γενικώς αναφέρεται ότι τα αποτελέσματα αξιολόγησης ενέργειας κατά τη διάρκεια της δυναμικής δοκιμής ήταν χαμηλότερα σε σχέση με τις στατικές ,για λεπτότοιχους σωλήνες πολυεστέρα ενισχυμένου με υαλονήματα .Παρατηρείται

ακόμη γενικά ότι οι κυλινδρικοί σωλήνες παρουσιάζουν υψηλότερη ειδική ενέργεια απορρόφησης από τους τετραγωνικούς σωλήνες.

Όταν το φορτίο εφαρμόζεται στις άκρες ενός σωλήνα ,εμφανίζεται τοπική αστοχία του υλικού και διαστρωματικές μικρές ρωγμές .Το μήκος των ρωγμών αυτών και το εάν οι στρωματώσεις του σύνθετου υλικού συσσωρεύσουν αστοχία καθορίζουν το εάν ο προκύπτων τρόπος συντριβής θα είναι εγκάρσια διάτμηση ,κάμψη του υλικού ,ή ένας συνδυασμός των τρόπων αυτών (ψαθυρό σπάσιμο).Δύο ευδιάκριτοι τρόποι κατάρρευσης που ταξινομούνται ως τρόπος I και II ,αντίστοιχα παρατηρούνται στις περισσότερες από τις αξονικές στατικές και δυναμικές δοκιμές. Τα μικρού μήκους δείγματα ακολουθούν προοδευτική κατάρρευση (τρόπος I) ενώ τα σχετικά μακρόστενα δείγματα χαρακτηρίζονται από τον τρόπο αστοχίας II.

6.3 Χαρακτηριστικά ενεργειακής απορρόφησης

Χαρακτηριστικές καμπύλες φορτίων/μετατοπίσεων για κάθε τρόπο κατάρρευσης (στατική και δυναμική φόρτιση) παρουσιάζονται στο εκατέρωθεν σχήμα .Αρχικά το κέλυφος συμπεριφέρεται ελαστικά και το φορτίο ανελκύεται με σταθερό ρυθμό σε μια τιμή κορύφωσης , P_{max} ,και μειώνεται έπειτα απότομα.



Διάγραμμα 6.2 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης για τετράγωνους σωλήνες για στατική και δυναμική φόρτιση για διάφορους τύπους κατάρρευσης (— τύπος I στατική (sp.5); — . — τύπος II ,στατική (sp.9);τύπος I ,δυναμική (sp.17).¹⁶

Καθώς η παραμόρφωση προχωρεί η μορφή της καμπύλης φορτίων/μετατοπίσεων ,εξαρτάται κυρίως από τον τρόπο κατάρρευσης .Για τα λεπτότοιχα σύνθετα κελύφη που υποβάλλονται σε αξονική φόρτιση παρατηρείται ότι η συμπεριφορά θραύσης του δοκιμίου εμφανίζεται να έχει επιπτώσεις στη σταθερότητα της φόρτισης καθώς επίσης και στο μέγεθος του φορτίου συντριβής (crush load) και την ενεργειακή απορρόφηση κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κατάρρευσης .Στο στάδιο που το φορτίο σύνθλιψης φθάνει την τιμή P_{max} ,και για τον τρόπο κατάρρευσης I ,ρωγμές διαμορφώνονται σε κάθε γωνία του δοκιμίου (για τετραγωνικό δοκίμιο) συνοδευόμενες από το σχηματισμό περιφερειακής εσωτερικής ρωγμής .Η περιοχή του διαγράμματος μετά την σύνθλιψη χαρακτηρίζεται από ταλαντώσεις γύρω από ένα μέσο φορτίο P.

Οι δυναμικές καμπύλες φορτίων/μετατοπίσεων παρουσιάζουν εντονότερες διακυμάνσεις σε σχέση με τις αντίστοιχες στατικές .Κατά τη διάρκεια δυναμικών δοκιμών είναι πιο δύσκολο να διαπιστωθεί ο τρόπος κατάρρευσης.Αντίθετα ,κατά τη διάρκεια της στατικής δοκιμής είναι εμφανής από το σχέδιο της καμπύλης φορτίων/μετατοπίσεων.Επιπλέον,λόγω της δυναμικής φύσης του φαινομένου (σημειώστε ότι η διάρκεια του φαινομένου κυμαίνεται στο 20ms) η ακολουθία του σχηματισμού μικρορωγμών σε σχέση με τη μορφή της αποκτηθείσας καμπύλης ,δεν μπορεί να ακολουθηθεί ευδιάκριτα.

Λαμβάνοντας υπόψη τις άνωθεν παρατηρήσεις ,δύο διαφορετικοί μηχανισμοί σπασίματος μπορούν να προταθούν στην εξήγηση της μορφής των καμπύλων ,που αντιστοιχούν στις δυναμικές φορτίσεις.

Οι προτεινόμενοι μηχανισμοί είναι βασισμένοι στις παρατηρήσεις σχετικά με τη διάδοση ρωγμών στα σύνθετα υλικά ,αμελώντας τις δυνάμεις τριβής και την κάμψη ,καθώς επίσης και τις μικροσκοπικές παρατηρήσεις σχετικά με τον τρόπο κατάρρευσης των κελύφων.Εντούτοις ,η δυναμική φύση της διαδικασίας δεν πρέπει να αγνοηθεί ,επομένως φαινόμενα όπως οι ταλαντώσεις που συνδέονται με τα προβλήματα αδράνειας πρέπει να ληφθούν υπ όψη τα εξής:

Σύμφωνα με τον πρώτο μηχανισμό ,η ρωγμή αναπτύσσεται ταυτόχρονα με την τριβή και την κάμψη ,εντούτοις διαδίδεται γρηγορότερα από τα μηχανικά φαινόμενα.Οι ρωγμές και οι αποκολλήσεις αναπτύσσονται απότομα σε ένα ορισμένο διάστημα και ακολουθούνται από τριβή και κάμψη ,ενώ αυτή η διαδοχή επαναλαμβάνεται μέχρι την τελική κατάρρευση του κελύφους.

Οι καμπύλες φορτίων /μετατοπίσεων που αντιστοιχούν στον τρόπο κατάρρευσης II παρουσιάζουν τυπική συμπεριφορά πριν από τη σύνθλιψη ,αλλά η αρχική ελαστική απόκριση ακολουθείται από πολύ απότομη πτώση στο φορτίο.Παρατηρείται επίσης ότι για τους φορτισμένους σωλήνες ,το μεγαλύτερο

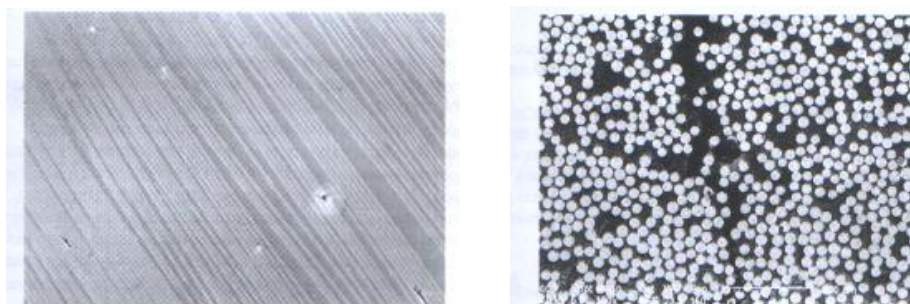
μέρος του φορτίου φέρεται στις άκρες τους, ενώ στην περίπτωση των τετραγωνικών δοκιμίων αυτό συμβαίνει στις γωνίες τους.

Όσον αφορά στην αρχική μέγιστη τιμή στην ελαστική περιοχή, P_{max} , πρέπει να σημειωθεί ότι αυτό το μέγεθος, επηρεάζεται πολύ από το πάχος και τη μέση περιφέρεια των κελύφων και για τη στατική αλλά και για τη δυναμική κατάρρευση. Από την καμπύλη φορτίου παρατηρείται επίσης ότι το αξονικό μήκος των σωλήνων δεν έχει καμία επίδραση στο μέσο φορτίο P_{max} . Για ένα δεδομένο υλικό το μέγεθος της περιοχής ελαστικής παραμόρφωσης είναι μεγαλύτερο για τους σωλήνες με μεγαλύτερο πάχος. Αυτό μπορεί ακόμη να επηρεαστεί από το πόσο παράλληλες είναι η μία ως προς την άλλη οι πλευρές του τετραγωνικού σωλήνα. Το φορτίο που επιτυγχάνεται στο τέλος της ελαστικής περιοχής, για το κέλυφος που υποβάλλεται στον τρόπο κατάρρευσης I, είναι συνήθως το μέγιστο φορτίο που το κέλυφος μπορεί να στηρίξει. Πρέπει να σημειωθεί ότι το μέγιστο φορτίο έχει πολύ λίγη επίδραση στο μέσο φορτίο και τη συνολική ενέργεια που απορροφάται.

6.3.1 Επιρροή ινών

ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΙΝΩΝ¹³

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο λόγος (s) του μήκους (l) προς την ακτίνα των ινών (r) των ινών είναι ο συντελεστής σχήματος της ίνας και αποτελεί κριτήριο για το χαρακτηρισμό τους ως μακριές –συνεχείς ή κοντές-ασυνεχείς (εικόνα 6.8). Οι πρώτες προσδίδουν στο σύνθετο μεγαλύτερη αντοχή από τις δεύτερες.



Εικόνα 6.8 Ίνες γυαλιού σε εποξειδική μήτρα :α) διαμήκης τομή β) εγκάρσια τομή

Γενικά η αντοχή των ινών αυξάνεται με το μήκος τους και τη μείωση της διαμέτρου της. Για ασυνεχή ίνα, υπάρχει ένα κρίσιμο μήκος (l_c), για δεδομένη διάμετρο ίνας (d), το οποίο ορίζεται από τη σχέση :

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_i}$$

όπου (σ_f) η αντοχή της ίνας σε εφελκυσμό

τι η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας

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

Ποσοστό ινών

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

Πολλές φορές, για την καλύτερη ενίσχυση της μήτρας δε χρησιμοποιείται ένας, μόνον τύπος ινών, αλλά μείγμα δύο ή περισσότερων τύπων. Τα υλικά αυτά λέγονται υβριδικά σύνθετα (hybrid composites). Ίνες Kevlar αναμειγνυόμενες με ανθρακονήματα βελτιώνουν τη στιβαρότητα ενός δύσκαμπτου συνθέτου, ενώ αναμειγνυόμενες με υαλονήματα βελτιώνουν τη δυσκαμπτότητα του. Υβριδικά σύνθετα ειδικών χρήσεων μπορούν να παραχθούν με τον έλεγχο του ποσοστού και που προσανατολισμού κάθε τύπου ινών.

Προσανατολισμός ινών

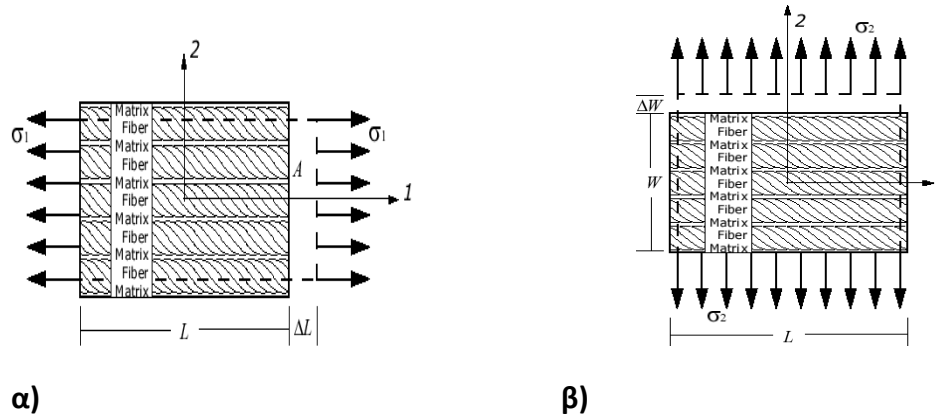
Ίνες διαφόρων προσανατολισμών είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν, ώστε η προσφερόμενη ενίσχυση του συνθέτου να είναι όσον το δυνατόν ισότροπη. Οι συνεχείς, μονοδιευθυντικές ίνες για παράδειγμα, παρουσιάζουν ισχυρή ανισοτροπία. Η μηχανική τους αντοχή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διεύθυνση επιβολής φορτίου. Σε μία δοκιμή εφελκυσμού όταν οι ίνες είναι παράλληλες της φόρτισης (σχήμα 6.9) η παραμόρφωση των ινών (ϵ_f) ισούται με αυτής της μήτρας (ϵ_m) και του συνθέτου υλικού (ϵ_c). Πρόκειται για περίπτωση προσανατολισμού υψηλού μέτρου ελαστικότητας, για την οποία ισχύει η ισότητα:

$\epsilon_c = \epsilon_f = \epsilon_m$ (ίσες παραμορφώσεις)

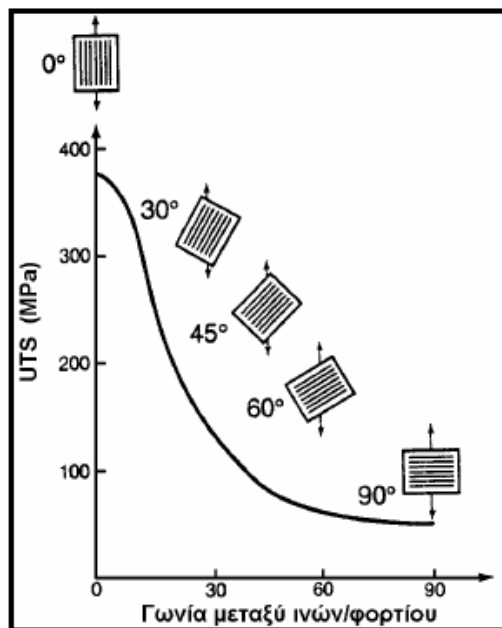
Όταν οι ίνες είναι κάθετες στη διεύθυνση της φόρτισης (εικόνα 6.9β) τότε το φορτίο που προσλαμβάνει η ενίσχυση (σ_f) ισούται με αυτό που παίρνει η μήτρα

(σ_m) και το σύνθετο υλικό (σ_c). Πρόκειται για περίπτωση προσανατολισμού χαμηλού μέτρου ελαστικότητας για την οποία ισχύει η ισότητα:

$$\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m \text{ (ίσα φορτία)}$$



Εικόνα 6.9 α) Φόρτιση παράλληλα στη διεύθυνση των ινών β) Φόρτιση κάθετα στη διεύθυνση των ινών



Διάγραμμα 6.3 Επίδραση του προσανατολισμού των ινών στην αντοχή σε εφελκυσμό σύνθετου υλικού εποξειδικής μήτρας με ίνες E-γυαλιού

Γενικά για το σύνθετο υλικό με μονοδιευθυντικές ίνες, η βέλτιστη στιβαρότητα-μέτρο της είναι το E- και αντοχή-μέτρο της το σ_{TS} —επιτυγχάνεται εάν η εφαρμοζόμενη τάση είναι πάντοτε παράλληλη προς τον προσανατολισμό των ινών. (διάγραμμα 6.3).

Συνήθως ένα σύνθετο υλικό δεν είναι μονοστρωματικό, αλλά πολυστρωματικό. Αν οι ίνες κάθε στρώσης έχουν τον ίδιο προσανατολισμό, το

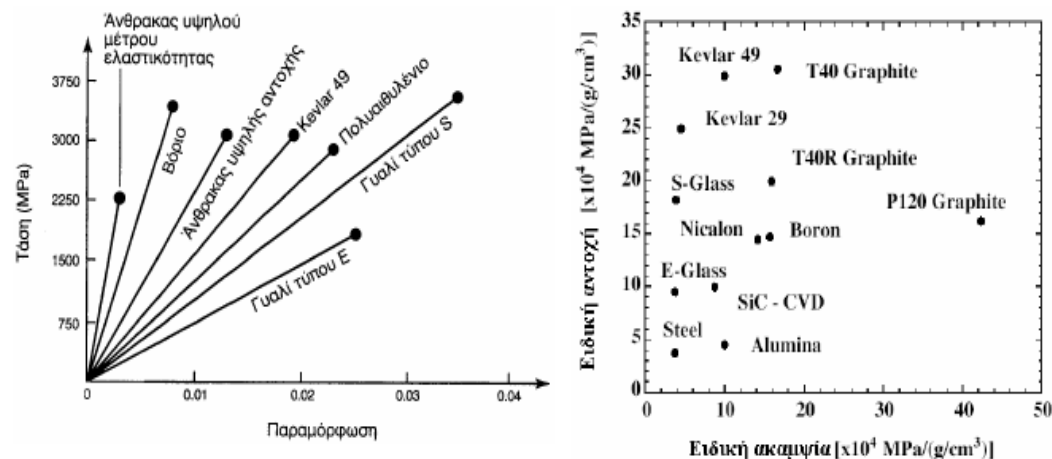
σύνθετο είναι ανισότροπο. Ισότροπο σύνθετο λαμβάνεται στην περίπτωση κατά την οποία η ενίσχυση μονοδιευθυντικών ινών βρίσκεται υπό τη μορφή διαδοχικών στρώσεων διαφορετικού προσανατολισμού.

Ιδιότητες ινών

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

Τη μέγιστη ειδική αντοχή (σ_{TS}/ρ) παρουσιάζουν οι ίνες πολυαιθυλαινίου και Kevlar ,ενώ το μέγιστο ειδικό μέτρο ελαστικότητας (E/ρ) παρουσιάζουν οι ίνες C και B,λόγω του μικρού ατομικού αριθμού και της ύπαρξης ομοιοπολικών δεσμών.

Το πολυαιθυλαίνιο παρουσιάζει μεγαλύτερο λόγο σ/ρ σε σχέση με το Kevlar ,λόγω της μικρότερης πυκνότητας του, αλλά υπάρχει πρόβλημα για τη χρήση του σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 300 °C .Τα γυαλιά παρουσιάζουν καλή αντοχή (σ_{TS}) και υψηλό μέτρο ελαστικότητας (E) ,αλλά έχουν συγκριτικά μεγάλη πυκνότητα ,με αποτέλεσμα οι ίνες γυαλιού να εμφανίζουν χαμηλότερη ειδική αντοχή από άλλες ίνες.



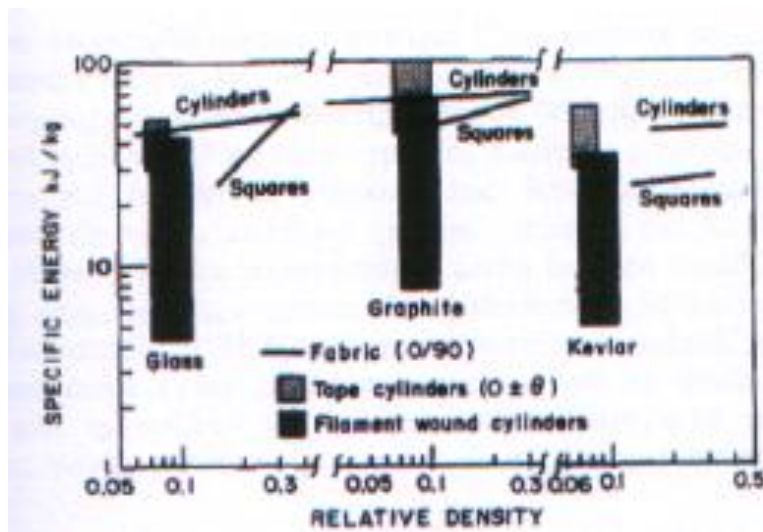
Διάγραμμα 6.4 α) Καμπύλες εφελκυσμού (τάσεων-παραμορφώσεων) χαρακτηριστικών τύπων ενισχυτικών ινών.β) Σύγκριση διαφόρων ινών ως προς την ειδική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας τους.

Συνάφεια ινών-μήτρας

Η καλή συνάφεια ινών-μήτρας είναι κεφαλαιώδους σημασίας για τη καλή λειτουργία του συνθέτου. Οι αναπτυσσόμενοι δεσμοί στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας, θα πρέπει να είναι αρκετά ισχυροί, ώστε να εξασφαλίζεται η μεταφορά των τάσεων μεταξύ των δύο συστατικών του σύνθετου. Κακή συνάφεια έχει, εξάλλου σαν αποτέλεσμα την εκρίζωση των ινών από τη μήτρα, που οδηγεί σε ταχύτερη αστοχία του υλικού. Κατά το σχεδιασμό του σύνθετου θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι συντελεστές θερμικής διαστολής μήτρας –ίνας και η αναγκαιότητα επικάλυψης των ινών με κάποιο συνδετικό υλικό:

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

Παρότι ο τύπος της ίνας επηρεάζει την ενέργεια απορρόφησης σε ένα σημαντικό βαθμό, το πράττει με έναν τρόπο που δεν απορρέει άμεσα από τις ιδιότητες των ινών. Οι ίνες γραφίτη έχουν σημαντικά υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας και εκτατές ιδιότητες από τις ίνες γυαλιού, όμως η ειδική ενέργεια απορρόφησης των σωλήνων γραφίτη FRP δεν είναι αντιστοίχως μεγαλύτερη από αυτήν των σωλήνων γυαλιού FRP όμοιων διαστρωματώσεων. Η διαφορά μεταξύ των δύο είναι μόνο της τάξης του 25% (βλέπε σχήμα 6.4). Έρευνες έχουν δείξει ότι για τις ίνες γραφίτη η ειδική ενέργεια μειώνεται έντονα για ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας και έχει προταθεί ότι η ειδική ενέργεια μπορεί να σχετίζεται με τη μέγιστη παραμόρφωση των ινών. Για τη χρήση στην αυτοκίνηση, το γυαλί είναι πιθανώς το πιο προσιτό υλικό ίνας για οικονομικούς λόγους. Επομένως για την απορρόφηση ενέργειας, ο μείζων παράγοντας είναι η μορφή και η κατανομή των ινών. Μειωμένη περιεκτικότητα σε ίνες, όπως επίσης και μικρότερη διάμετρος ίνας μειώνει τη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας. Σε πραγματικές σχεδιάσεις τα συνεχή νήματα πρέπει να ενσωματώνονται στη κατασκευή. Αυτά τα νήματα δεν παρέχουν μόνο κατασκευαστική ακαμψία και αντίσταση στη κόπωση, ανθεκτικότητα και άλλα κατασκευαστικά προτερήματα, αλλά συνεισφέρουν και στην ακεραιότητα της κατασκευής κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης, αφού οι συνεχείς ίνες συχνά υφίστανται διαχωρισμό χωρίς θραύση.



Διάγραμμα 6.5 Ειδικές ενέργειες για μία ποικιλία σύνθετων FRP σωλήνων

Ο βέλτιστος συνδυασμός κομμένων (κοντών) και συνεχών ινών είναι ακόμα ανοιχτός προς συζήτηση, όπως επίσης η καλύτερη μορφή κομμένων ινών γυαλιού. Υπάρχουν κάποιες αποδείξεις ότι οι μακριές ίνες, 5 cm (2 in.), παρέχουν υψηλότερη ειδική ενέργεια από τις κοντύτερες, 2,5 cm (1 in.), αλλά προσπάθειες για αύξηση της ειδικής ενέργειας με αύξηση της περιεκτικότητας σε γυαλί δεν ήταν επιτυχείς, εξαιτίας προβλημάτων διείδυσης της ρητίνης σε πολύ υψηλές περιεκτικότητες γυαλιού. Υπάρχει ένα διαδεδομένο ενδιαφέρον στη χρήση του Kevlar στην αεροδιαστημική βιομηχανία για τη βελτίωση της προστασίας έναντι σύγκρουσης των ελικοπτέρων. Τούτο προκύπτει μερικώς επειδή οι κατασκευές από Kevlar συμπεριφέρονται αρκετά όμοια με τις μεταλλικές κατασκευές κατά τη συμπίεση, λόγω των εύπλαστων χαρακτηριστικών της ίνας. Για εφαρμογές αυτοκίνησης η χρήση του Kevlar σε συνδυασμό με ίνες άλλων τύπων μπορεί να είναι εφικτή για κάποιες εφαρμογές, μολονότι οι παρατηρήσεις στη διατήρηση της ακεραιότητας συντεθλιμμένων κατασκευών με τέτοια υβριδικά είναι μάλλον διφορούμενες.

6.3.2 Επιρροή Ρητίνης

Ζητήματα οικονομικά και κατεργασιών πιθανώς θα περιορίζουν τις επιλογές ρητινών σε ρητίνες πολυεστέρα και βινυλ-εστέρα, ρόλος της ρητίνης στην απορρόφηση ενέργειας δεν είναι πλήρως σαφής, αλλά η πλαστική παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σύνθλιψης μπορεί να είναι ένας σημαντικός παράγοντας στο ενεργειακό ισοζύγιο. Έχει δειχθεί ότι η ειδική ενέργεια αυξάνει με τη σειρά των ρητινών φαινόλες < πολυεστέρες < εποξειδικές για σωλήνες FRP γυαλιού και ότι η ειδική ενέργεια απορρόφησης δεν εξαρτάται από την σκληρότητα της ρητίνης, αλλά εξαρτάται με ένα γραμμικό τρόπο από την αντοχή και το μέτρο

ελαστικότητας της ρητίνης. Έχουν βρεθεί επίσης αντικρουόμενες τάσεις σχετικά με την επίδραση της παραμόρφωσης αστοχίας της μήτρας στην ειδική ενέργεια. Για ίνες γραφίτη, η αλλαγή της μήτρας από μία ρητίνη χαμηλής σε μία ρητίνη υψηλής παραμόρφωσης αστοχίας με χαμηλής παραμορφωσιμότητας ίνες συνοδεύεται από μία αύξηση στην ειδική ενέργεια, αλλά αυτή η αλλαγή μήτρας με υψηλής παραμορφωσιμότητας ίνες παράγει μία μείωση στην ειδική ενέργεια. Με ίνες Kevlar, παρατηρήθηκαν μόνο στην ειδική ενέργεια αλλάζοντας τη ρητίνη της μήτρας με αυτόν το τρόπο.

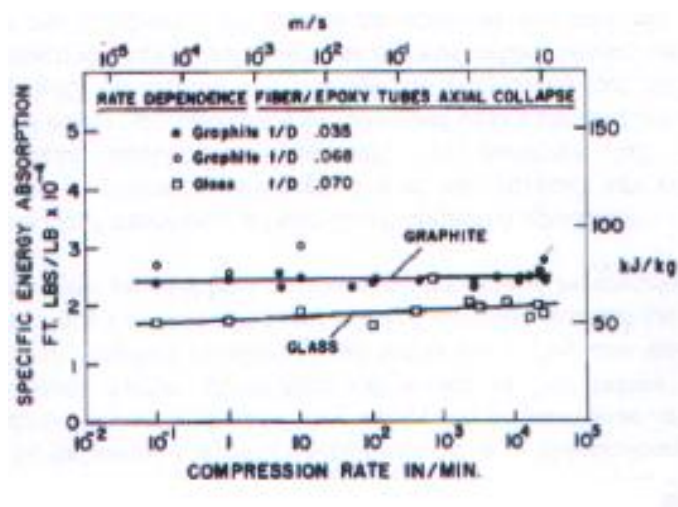
6.3.3 Σχεδίαση στρώσεων

Ενώ η ανάλυση της αντοχής διαστρωμάτωσης για δοσμένη κατάσταση φόρτισης είναι περίπλοκη, δεν υπάρχει προς το παρόν, άλλος τρόπος για τον προσδιορισμό του βέλτιστου προσανατολισμού και διεύθυνσης των ινών για μία δοσμένη περίπτωση απορρόφησης ενέργειας. Τούτο συμβαίνει λόγω της έλλειψης θεωρητικής ανάλυσης της διαδικασίας αστοχίας στη σχεδίαση των FRP. Τα πειραματικά αποτελέσματα είναι επίσης κάπως διφορούμενα τάση στην αλλαγή της ειδικής ενέργειας με αύξηση της περιεκτικότητας σε ίνες 90° μπορεί να είναι αυξητική ή μειωτική, εξαρτώμενη από το μηχανισμό κατάρρευσης-trigger. Σύνθετα υλικά με ίνες γυαλιού ή γραφίτη με προσανατολισμό (0/90) έχουν μεγαλύτερη ειδική ενέργεια από αυτά με προσανατολισμό (45/45).

6.3.4 Ταχύτητα

Οι σύνθετες κατασκευές μπορούν να απορροφήσουν σημαντικά ποσά ενέργειας υπό συνθήκες δυναμικής φόρτισης αν η διαδικασία σύνθλιψης έχει κατάλληλη διαμόρφωση για να αποφευχθεί συνολική αστοχία. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6, σε μία περιοχή ταχυτήτων θλίψης 10^{-4} -10 m/s, η ειδική ενέργεια ινωδών FRP σωλήνων εποξειδικής μήτρας/γυαλιού με διαστρωμάτωση 0/90 βρέθηκε ότι αυξάνεται έως 20%, ενώ αυτή ομοίων FRP σωλήνων γραφίτη αυξήθηκε μόνο έως 2%. Αντιθέτως, έχουν παρατηρηθεί σημαντικές μειώσεις έως 30% σε δυναμικές δοκιμές για διαστρωμάτωση (0₂/+45) η σωλήνων γυαλιού, γραφίτη και Kevlar. Σε σωλήνες εποξειδικής μήτρας/Kevlar παρατηρήθηκε μικρή διαφορά μεταξύ οιονεί στατικής και δυναμικής απορρόφησης ενέργειας. Μία μείωση του ~30% στην ειδική ενέργεια έχει επίσης διαπιστωθεί με FRP σωλήνες πολυεστέρα/γυαλιού, μολονότι αυτοί οι σωλήνες διαφορετικά έχουν αποδώσει ικανοποιητικά σε δυναμικές δοκιμές. Η σωλήνες διαφορετικά έχουν αποδώσει διαφορετικά σε δυναμικές δοκιμές. Η κατάρρευση εδώ εμφανίζεται να σχετίζεται με το διαχωρισμό των

πλευρών των σωλήνων στις γωνίες ,αφού το φαινόμενο δε σημειώθηκε σε σωλήνες κυκλικής διατομής.



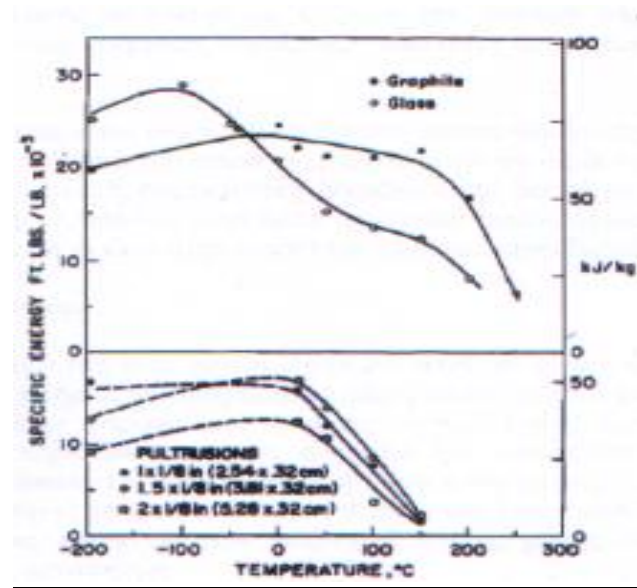
Διάγραμμα 6.6 Εξάρτηση της ειδικής ενέργειας από τη ταχύτητα για σωλήνες FRP γυαλιού και γραφίτη.

6.3.5 Περιβάλλον

Οι υψηλές θερμοκρασίες επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά σύνθλιψης των συνθέτων, πρωταρχικών μέσω αλλαγών στις ιδιότητες της ρητίνης. Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.7 αυτές οι αλλαγές προκαλούν μειώσεις στην ειδική ενέργεια ,οι οποίες γίνονται έκδηλες πάνω από 150-200 °C για μήτρες εποξειδικής ρητίνης και 50°C για πολυεστερικές μήτρες .Οι χαμηλές θερμοκρασίες δεν προκαλούν κάποια υποβάθμιση στις ιδιότητες και ,στην πραγματικότητα ,για σωλήνες γυαλιού/ εποξειδικής ρητίνης διακρίθηκε μία σημαντική αύξηση στην απορρόφηση ενέργειας.

Το περιβάλλον του πειράματος μπορεί επίσης να επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό ,μέσω της υγρασίας .Πιο συγκεκριμένα ο συνδυασμός υψηλής υγρασίας και υψηλής θερμοκρασίας μπορεί να είναι ιδιαίτερα επιβλαβής καθώς υπάρχει η

πιθανότητα να προκληθεί αποσύνδεση ίνας και ρητίνης και κατά συνέπεια μείωση της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας.



Διάγραμμα 6.7 Εξάρτηση της ειδικής ενέργειας από τη θερμοκρασία για σωλήνες FRP γυαλιού και γραφίτη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

7.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε η υδραυλική πρέσα που βρίσκεται στο Εργαστήριο (κτίριο Ξ) του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

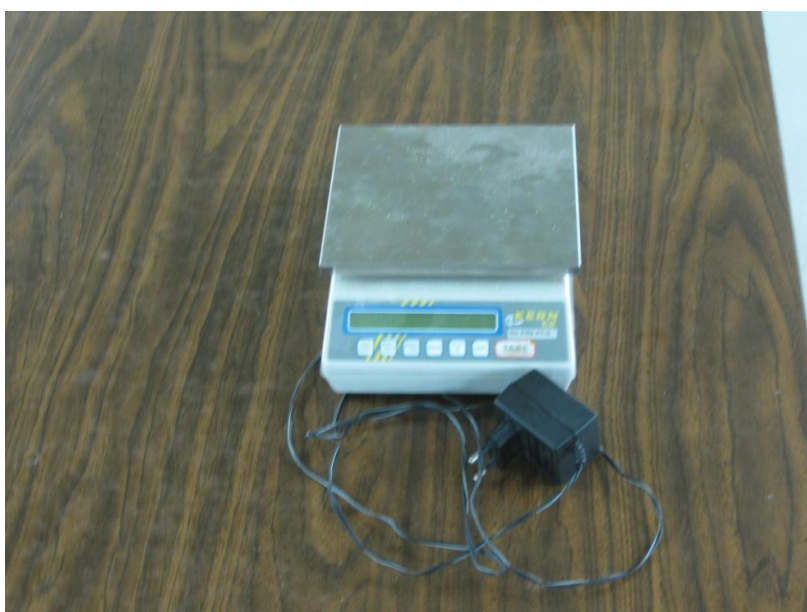
Πρόκειται για υδραυλική πρέσα διπλής ενεργείας και ονομαστικού φορτίου 100 tn (1000 kN) η οποία κατασκευάστηκε από την εταιρεία SMG στη Γερμανία και είναι πρέσα ορθού πλαισίου (τύπου O) και διαθέτει μετασκευή CNC και εξυπηρέτηση από ρομποτικό βραχίονα V. Το κύριο έμβολο στηρίζεται στην κεφαλή της εργαλειομηχανής, κινείται από πάνω προς τα κάτω και έχει μέγιστη διαδρομή 600 mm. Το σεπόρτι της εργαλειομηχανής οδηγείται από ειδικές πρισματικές γλίστρες και διαθέτει μηχανικό εξολκέα. Η πρέσα απεικονίζεται στη παρακάτω εικόνα (7.1).



Εικόνα 7.1 Απεικόνιση της πρέσας όπου διεξήχθη το πείραμα

Η μείωση του μεγέθους των δοκιμίων, δηλαδή το πόσο συμπίεστηκαν κατά αξονική διεύθυνση με εμφάνιση μη εκτατών λοβών, μετρήθηκε και καταγράφηκε σε Η/Υ από ειδική συσκευή καταγραφής και ανάλυσης δεδομένων, η οποία είναι συνδεδεμένη με την πρέσα. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την αριθμητική και γραφική αποτύπωση των αποτελεσμάτων της διαδικασίας είναι το *LabVIEW 8.6* της εταιρείας National Instruments. Η δειγματοληψία του προγράμματος ανέρχεται σε 5 samples/sec.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος χρειάστηκε να μετρηθεί η μάζα των τριών δοκιμίων τα οποία θα υποστούν θλιπτική καταπόνηση . Για τη μέτρηση της μάζας χρησιμοποιήθηκε ζυγός (εικόνα 7.2). Για τη μέτρηση των διαφόρων διαστάσεων χρησιμοποιήθηκε μεζούρα .



Εικόνα 7.2 Ο ζυγός που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της μάζας του δοκιμίου αφού διαμορφώθηκε

7.2. Περιγραφή πειραματικών δοκιμίων

7.2.1 Υλικά και δομή

Τα τρία τεμάχια διαμορφώθηκαν μετά την κοπή του αρχικού τεμαχίου το οποίο είχε αρχικό ύψος 450 mm, το οποίο κατασκευάζεται με τη μέθοδο χύτευσης μεταφοράς ρητίνης (RTM). Η δομή του καθενός αποτελείται από τρία βασικά δομικά στοιχεία διαφορετικής γεωμετρικής και μηχανικής συμπεριφοράς .Τα εξωτερικά περιβλήματα, το πυρήνα και τους εσωτερικούς σωλήνες FRP.

Οι δύο εξωτερικοί φλοιοί είναι οπλισμένοι με υαλονύματα και απέχουν μεταξύ τους απόσταση ίση με το πάχος του πυρήνα .Ο κάθε φλοιός είναι λεπτός και δύσκαμπτος .Είναι εμβαπτισμένος σε φαινολική ρητίνη η οποία δρα σε συνδυασμό με ένα καταλύτη ο οποίος βασίζεται στο οργανικό σουλφονικό οξύ. Κάθε στρώμα θερμαίνεται στους 90 °C για 2 ώρες κάτι που αναγράφεται στις οδηγίες του κατασκευαστή .Το ονομαστικό πάχος του φλοιού είναι 2 mm.

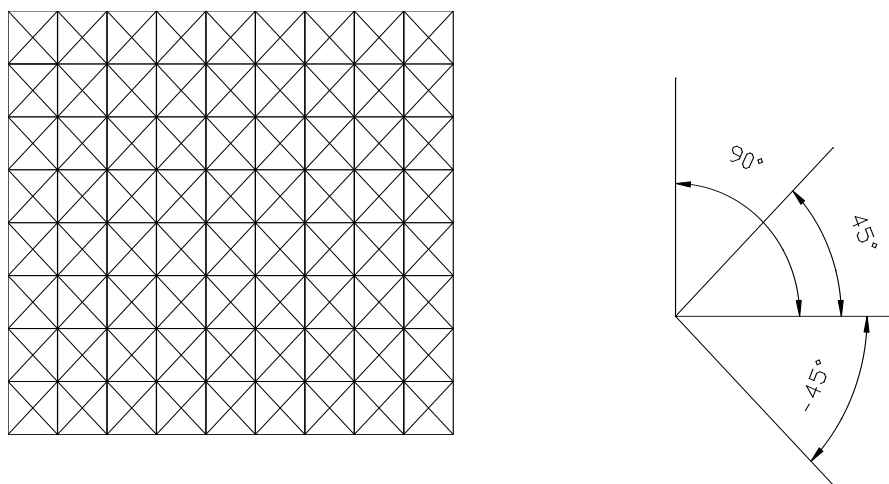
Στις εξωτερικές επιφάνειες τοποθετείται ένα επιφανειακό φινίρισμα πυκνότητας 0,04 kg/m² από βερνίκι το οποίο προσδίδει μια γυαλάδα και στιλπνότητα στην εξωτερική όψη του δοκιμίου.

Ανάμεσα στα εξωτερικά περιβλήματα, παρεμβάλλεται σκληρός φαινολικός αφρός, ο οποίος είναι παχύς και χαμηλής πυκνότητας 130 kg/m³ και δυσκαμψίας. Ο αφρός διαπερνάται από κυλινδρικούς σωλήνες υαλονημάτων οι οποίοι στηρίζονται στα δύο επίπεδα σε συγκεκριμένα σημεία .Οι FRP σωλήνες έχουν τοποθετηθεί προκειμένου να ελέγξουν τον τρόπο κατάρρευσης του δοκιμίου . Το αρχικό πειραματικό δοκίμιο έχει διατομή τετραγωνικής μορφής με τοξοειδείς γωνίες .Η κάτοψη της διάταξης προβάλλεται στην εικόνα 7.3



Εικόνα 7.3 Κάτοψη του τεμαχίου πριν τη διαμόρφωση του μηχανισμού κατάρρευσης

Τα δύο εξωτερικά περιβλήματα ,ο φλοιός δηλαδή έχει επιφανειακή πυκνότητα $1,168 \text{ kg/m}^2$ και είναι ινοπλισμένος σε τέσσερις κατευθύνσεις .Έτσι δημιουργείται συμμετρική διάταξη με κωδικό πλάκας $[0/45/90/-45]_s$.Ο φλοιός δηλαδή αποτελείται από οχτώ συνολικά επίπεδα υαλονυμάτων τα οποία έχουν κλίση των ινών ως προς τον οριζόντιο άξονα με γωνίες κατά σειρά $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, -45^\circ, -45^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 0^\circ$,.Στο παρακάτω σχήμα προβάλλεται ο προσανατολισμός των υαλονημάτων κατά τα πρώτα τέσσερα στρώματα της συμμετρικής δομής.(Σχήμα 7.1)



Σχήμα 7.1 Ενδεικτική παρουσίαση του τρόπου με τον οποίο είναι προσανατολισμένα τα υαλονήματα του φλοιού στο επίπεδο κατά τα πρώτα 4 στρώματα της συμμετρικής δομής.

Οι σωλήνες FRP έχουν κυκλική διατομή διαμέτρου 25 mm ,ενισχυμένοι με υαλονήματα $[+/-45]$ (εικόνα 7.4) εμποτισμένα με την ίδια ρητίνη με τις πλάκες. Ο ρόλος τους είναι να ελέγχουν το φορτίο διαρροής και άρα την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας της πολυστρωματικής δομής.Το πάχος του FRP σωλήνα είναι 0,5 mm.



Εικόνα 7.4 Λεπτομέρεια του FRP σωλήνα όπως προκύπτει από την κάτοψη του δοκιμίου S02 (Σχεδιαστικό σφάλμα)

Τα άκρα των σωλήνων περνάνε μέσα από ένα “ύφασμα” πυκνότητας 0,450 kg/m². Το ύφασμα αποτελείται από συνεχείς ίνες οι οποίες έχουν μικρό μήκος και τυχαίο προσανατολισμό ενώ τοποθετείται και στις δύο πλευρές του αφρώδη πυρήνα , πριν τα επίπεδα, συνεισφέροντας με αυτόν τον τρόπο στο αποτελεσματικότερο δέσιμο με την εσωτερική πλευρά των τοιχωμάτων.

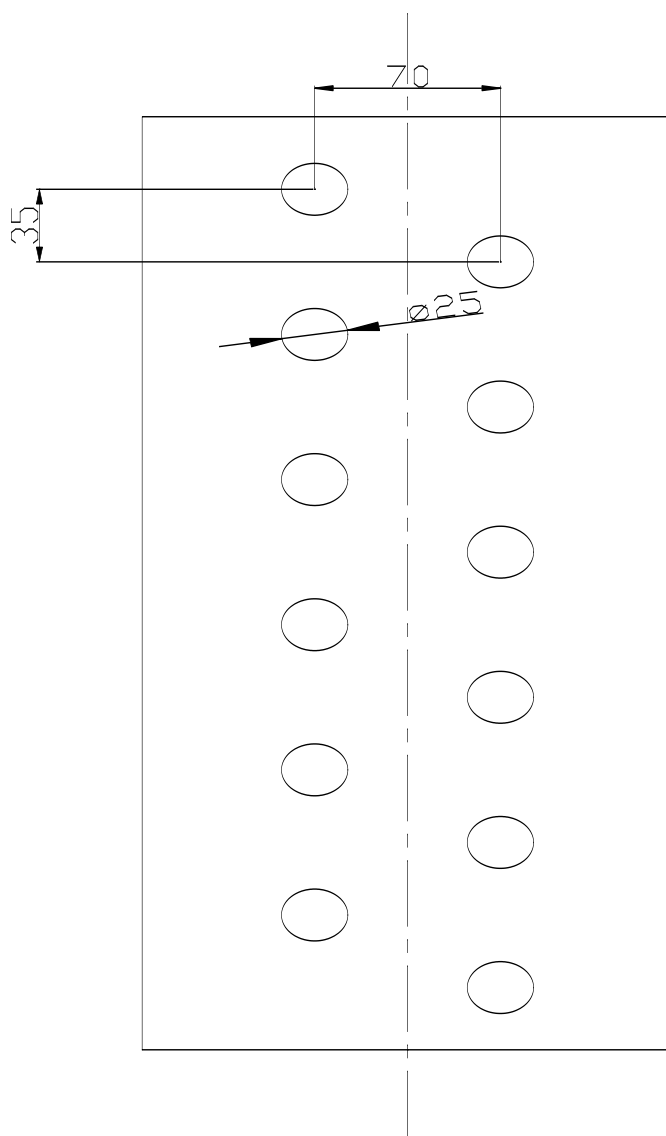


Εικόνα 7.5α Μεγέθυνση της ύφανσης του πέπλου που περιβάλλει τα άκρα των σωλήνων FRP



Εικόνα 7.5.b Ρολό του πέπλου

Οι σωλήνες FRP τοποθετούνται κεντραρισμένοι στο πάχος του τοιχώματος κάθε πλευράς του δοκιμίου ώστε να απέχουν διαμήκη απόσταση 70 mm ο ένας από τον άλλο. Τα ζεύγη τοποθετούνται με τρόπο ώστε τα ενθέματα να απέχουν μεταξύ τους κατακόρυφη απόσταση 35 mm. Το αρχικό τεμάχιο έχει συνολικό ύψος 450 mm. Αυτό σημαίνει πριν τη κοπή του σε 3 ίσα μέρη, διαθέτει 12 σωλήνες FRP δηλαδή 6 ζεύγη των 2 σωλήνων σε κάθε πλευρά.



Σχήμα 7.2 Πλάγια όψη του αρχικού sandwich πάνελ

Κάθε τεμάχιο από τα τρία που προκύπτουν έχει ύψος περίπου 140 mm, δηλαδή έχει 2 ζευγάρια των 2 σωλήνων σε κάθε πλευρά. Το μέγεθος αυτό αποκλίνει τόσο από δοκίμιο σε δοκίμιο, όσο και από κορυφή σε κορυφή. Αυτό σημαίνει ότι χάνονται συνολικά περίπου 10 mm από το αρχικό ύψος. Το γεγονός ότι

τα τρία δοκίμια δεν είναι ισοϋψή προκύπτει από το γεγονός ότι υπάρχουν ατέλειες στη κοπή η οποία δεν έγινε με μεγάλη ακρίβεια.

Για να εξεταστεί η επιρροή του μηχανισμού triggering στη πειραματική διαδικασία, τα σωληνοειδή δοκίμια έχουν διαμορφωθεί με κατάλληλο τρόπο στη κορυφή του άνω επιπέδου θλίψης.

Οι στόχοι διαμόρφωσης του μηχανισμού είναι :

- a) Ο έλεγχος της θλίψης και η προοδευτική κατάρρευση των δοκιμίων
- b) Η μείωση του ενδεχομένου υψηλού αρχικού φορτίου (αρχικό σοκ που έρχεται ο επιβάτης) το οποίο παρουσιάζεται στην αρχή της σύγκρουσης

Η διαμόρφωση αυτή έχει τριγωνική (7.6.1) ,ορθογώνια (7.6.2) και τραπεζοειδή μορφή (7.6.3). και ελέγχονται σε οιονεί στατική αξονική θλίψη.



Εικόνα 7.6.1



Εικόνα 7.6.2



Εικόνα 7.6.3

Εικόνα 7.6 Πλάγια όψη των δοκιμίων που αναδεικνύει την διαμόρφωση του μηχανισμού triggering

Αυτό που προκαλεί ενδιαφέρον και θα μελετηθεί είναι ο τρόπος κατάρρευσης του μηχανισμού triggering καθώς και η μετέπειτα συμπεριφορά του δοκιμίου.

Παρακάτω παρουσιάζουμε συνοπτικά σε τρεις πίνακες τις ιδιότητες του πάνελ.

<i>Ιδιότητα υλικού</i>	<i>Τιμή ιδιότητας</i>
Πάχος φλοιού	2.0 mm
Είδος ρητίνης	Φαινολική ρητίνη
Είδος ίνας ενίσχυσης	E-glass
Κατ'όγκο περιεκτικότητα φλοιού σε ίνα	43%
Τρόπος ενίσχυσης με ίνα	Μη πεπλεγμένη τετραδιευθυντική
Επιφανειακή πυκνότητα στρώσης υαλονήματος	1,168 kg/m ²
Διαστρωμάτωση	[0/45/90/-45] _s
Πυκνότητα μάζας πολύστρωτου υλικού	1728 kg/m ³

Πίνακας 7.1 Ιδιότητες φλοιού, ινών και ρητίνης του σύνθετου υλικού

<i>Ιδιότητα υλικού</i>	<i>Σύμβολο</i>	<i>Τιμή ιδιότητας</i>
Είδος υλικού πυρήνα	Φαινολικός ,κλειστού	
	τύπου ,αφρώδης	
Πυκνότητα αφρού πυρήνα	P	130 kg/m ³
Μέτρο ελαστικότητας	E	135 MPa
Λόγος Poisson	V	0,25

Πίνακας 7.2 Ιδιότητες υλικού του αφρώδους πυρήνα

7.2.2. Ονοματολογία , διαστάσεις και Μάζα

Προκειμένου να αναφερθούμε στο κάθε πάνελ χρησιμοποιούμε τη παρακάτω κωδικοποίηση :

- Αρχικά χρησιμοποιείται το γράμμα S για το συμβολισμό της ιονεί-στατικής θλίψης.
- Με τον αύξοντα αριθμό #01,#02,#03 συμβολίζεται η διαμόρφωση των πλαγίων όψεων του δοκιμίου έτσι ώστε να έχουν τριγωνική, τραπεζοειδή και ορθογωνική μορφή.

Σε κάθε δοκίμιο μετρήθηκε το ύψος ,οι διαστάσεις της κάτοψης και η μάζα του με τη βοήθεια μεζούρας και ζυγού .Η ακρίβεια της μεζούρας είναι ένα χιλιοστό (1 mm) ,ενώ η ακρίβεια του ζυγού είναι δέκατα του γραμμαρίου (0,1 gr).

	S01	S02	S03
H1	140,0	142,0	140,0
H2	141,0	141,5	141,0
H3	140,0	142,0	142,0
H4	140,0	142,5	140,0

Πίνακας 7.3 :Ύψη των τεσσάρων κορυφών των δοκιμίων (mm)

	S01	S02	S03
S1 εξ	199,5	200,0	198,5
S1 ες	132,0	130,0	133,0
S2 εξ	196,0	196,5	198,0
S2 ες	132,0	128,5	132,0

Πίνακας 7.4 : Διαστάσεις της κάτοψης των δοκιμίων (mm)

	S01	S02	S03
M	1211,3	1210,6	1101,0

Πίνακας 7.5:Μάζα δοκιμίων (gr)

7.3 Δοκίμιο S01

Στην πρώτη περίπτωση ο μηχανισμός κατάρρευσης έχει σχήμα ανεστραμμένου ισοσκελούς τριγώνου, το οποίο έχει ύψος 30 mm (βλέπε εικόνα 7.7a).

- Η μάζα του δοκιμίου είναι $m_1=1211,3$ gr
- Τα ύψη των κορυφών είναι αντίστοιχα :
 - $H_1=140$ mm
 - $H_2=141$ mm
 - $H_3=140$ mm
 - $H_4=140$ mm
- Οι διαστάσεις της κάτοψης της διατομής είναι :
 - $S_{1εξ}=199,5$ mm ,
 - $S_{1εσ}=132$ mm,
 - $S_{2εξ}=196$ mm ,
 - $S_{2εσ}=132$ mm (σχήμα 7.3)

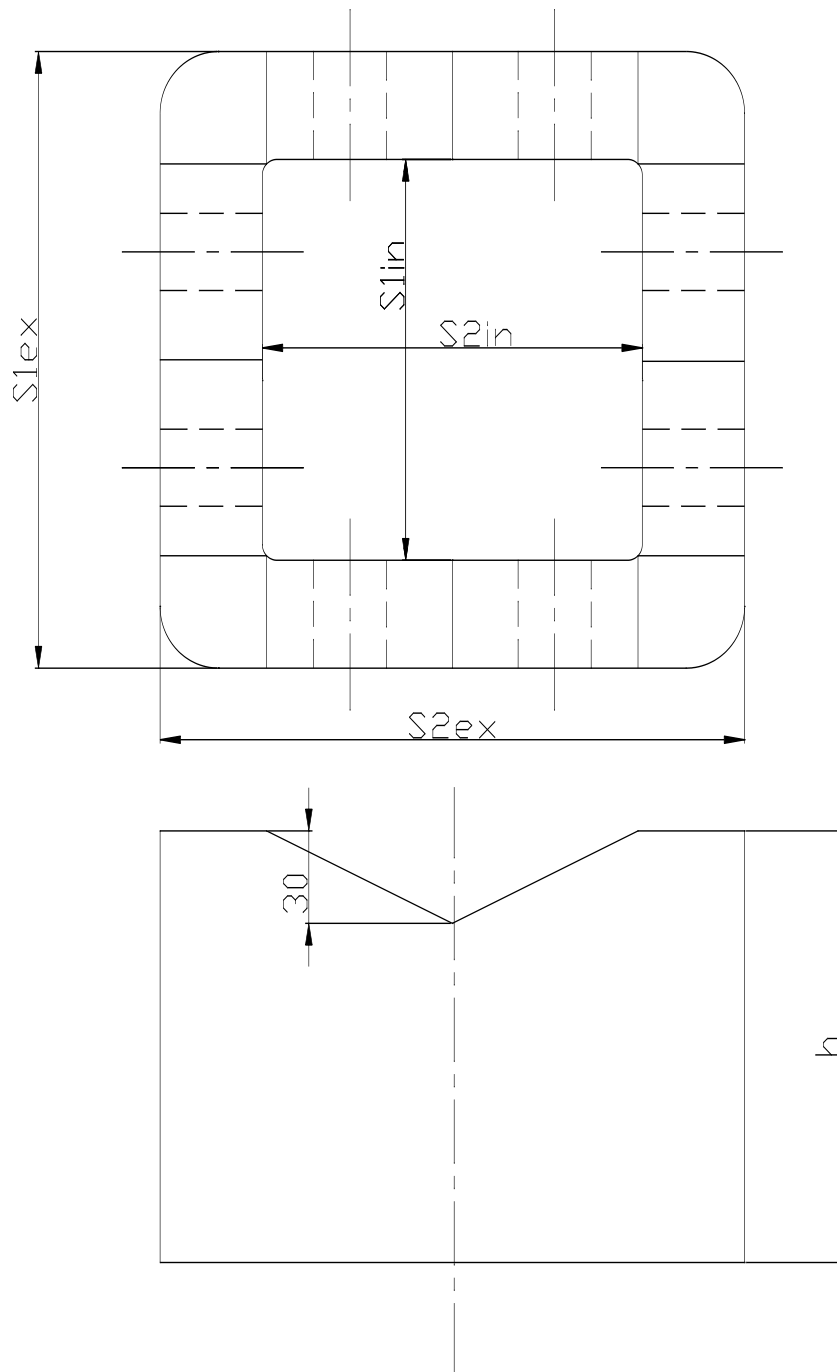
(a)



(b)



Εικόνα 7.7 Πλάγια όψη (a) και κάτοψη (b) του δοκιμίου S01



Σχήμα 7.3 Πλάγια όψη και κάτοψη του δοκιμίου S01

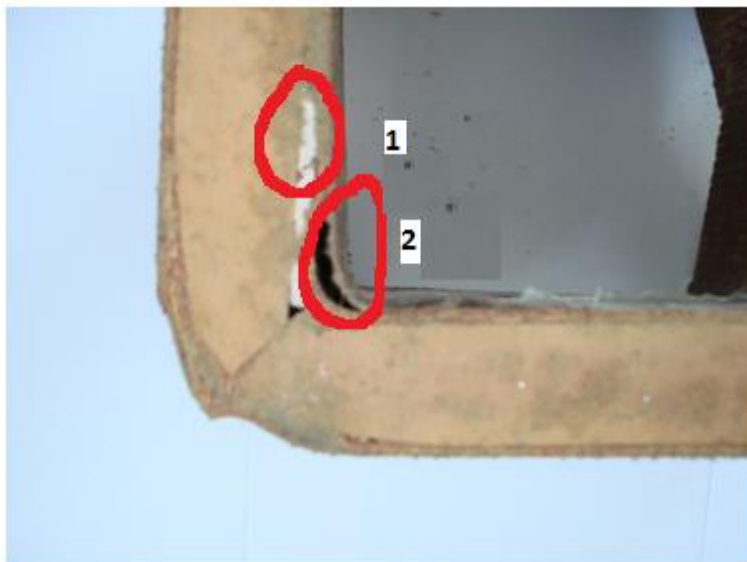
7.3.1 Δομικές ατέλειες του S01

ΛΕΠΤΟΜΕΡΙΕΣ ΚΑΤΟΨΗΣ



Εικόνα 7.8α Ενδεικτική παρουσίαση σφαλμάτων στην κάτοψη του S01

ΛΕΠΤΟΜΕΡΙΕΣ ΑΝΟΨΗΣ



Εικόνα 7.8β Ενδεικτική παρουσίαση σφαλμάτων στην άνοψη του S01

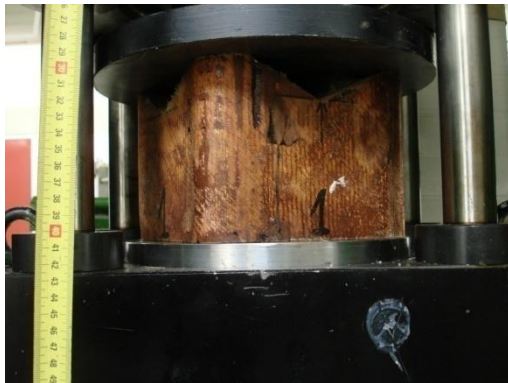
7.3.2 Εκτέλεση του πειράματος

Παρακάτω παρουσιάζεται συνοπτικά η αντιστοιχία της οπτικής αναπαράστασης της θλίψης του δοκιμίου με τη μετατόπιση του εμβόλου της πρέσας. (Πίνακας 7.6 , Εικόνα 7.9).

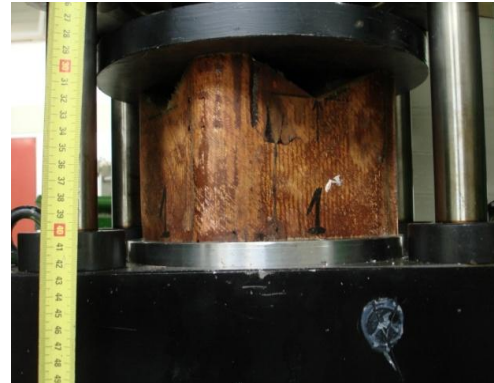
ΔΟΚΙΜΙΟ1	
No φωτογραφίας	μετατόπιση d(mm)
1	0,00
2	1,30
3	2,72
4	4,58
5	8,56
6	12,08
7	15,26
8	18,33
9	22,81
10	29,50
11	32,71
12	36,32
13	40,02
14	43,71
15	47,42
16	50,03
17	55,51
18	63,30
19	67,80
20	71,90
21	73,60

Πίνακας 7.6 Παρουσίαση αντιστοιχίας αριθμού φωτογραφίας και μετατόπισης του εμβόλου πρέσας για το δοκίμιο S01

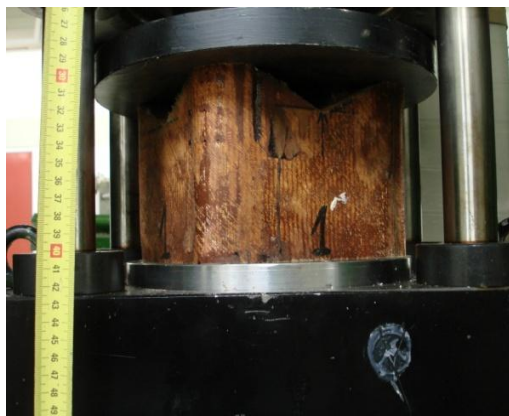
No1 d=0,00 mm



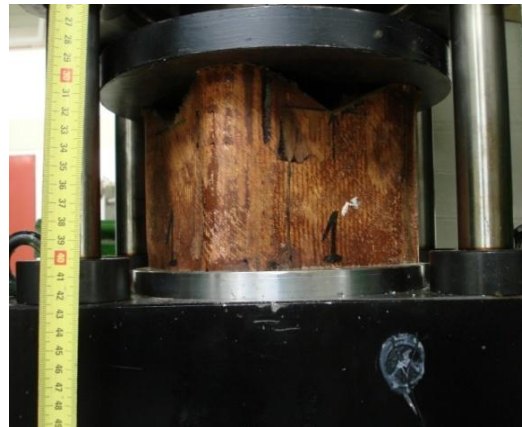
No2 d=1,30 mm



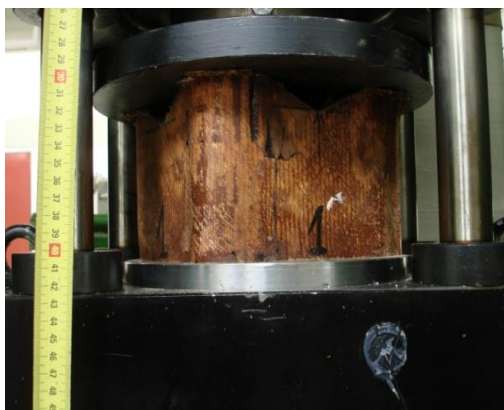
No3 d=2,72 mm



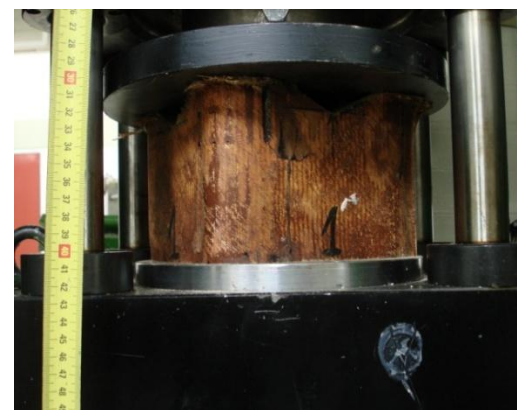
No4 d=4,58 mm



No 5 d=8,56 mm

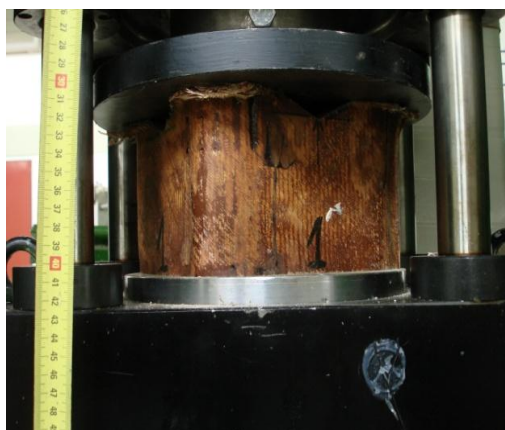


No6 d=12,08 mm

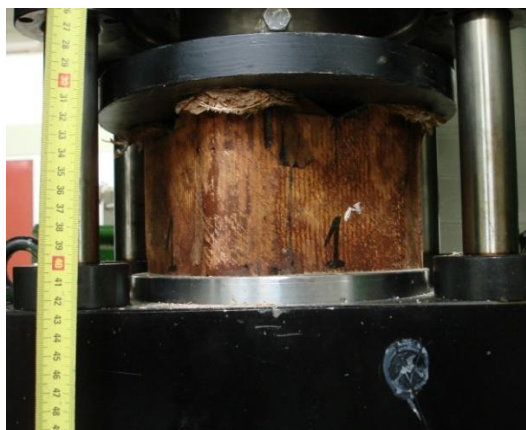


Εικόνα 7.9 Αντιστοιχία οπτικής παραμόρφωσης του δοκιμίου-μετατόπιση του εμβόλου της πρέσας.

No7 d=15,26 mm



No8 d=18,33mm



No9 d=22,81mm



No10 d=29,50 mm



No11 d=32,71 mm

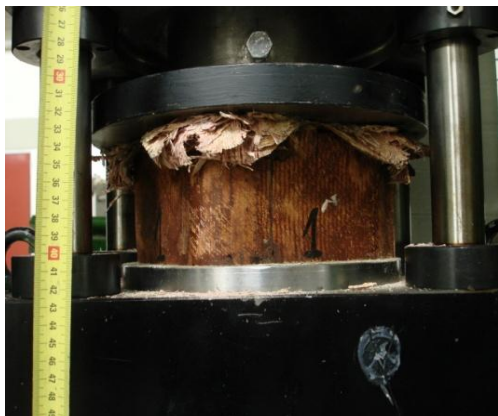


No12 d=36,32 mm

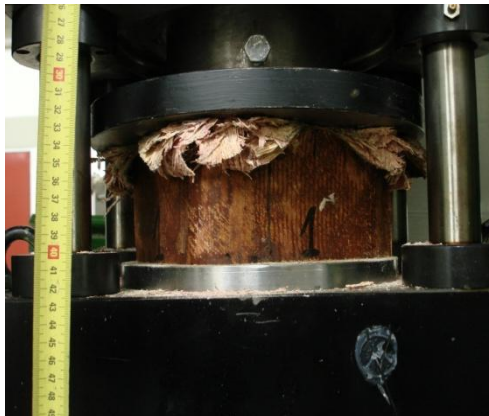


Εικόνα 7.9 Αντιστοιχία οπτικής παραμόρφωσης του δοκιμίου-μετατόπιση του εμβόλου της πρέσας.(συνέχεια)

No 13 $d=40,02$ mm



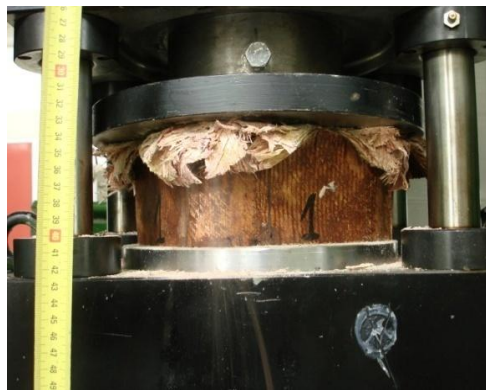
No 14 $d=43,71$ mm



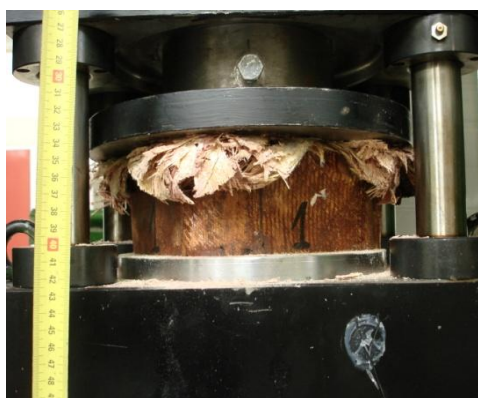
No 15 $d=47,42$ mm



No 16 $d=50,03$ mm



No 17 $d=55,51$ mm

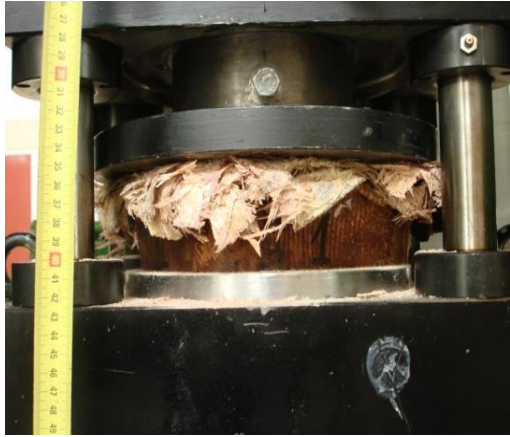


No 18 $d=63,30$ mm



Εικόνα 7.9 Αντιστοιχία οπτικής παραμόρφωσης του δοκιμίου-μετατόπιση του εμβόλου της πρέσας.(συνέχεια)

No 19 d=67,80 mm



No 20 d=71,90 mm



No 21 d=73,60 mm



Εικόνα 7.9 Αντιστοιχία οπτικής παραμόρφωσης του δοκιμίου S01-μετατόπιση του εμβόλου της πρέσας.(συνέχεια)

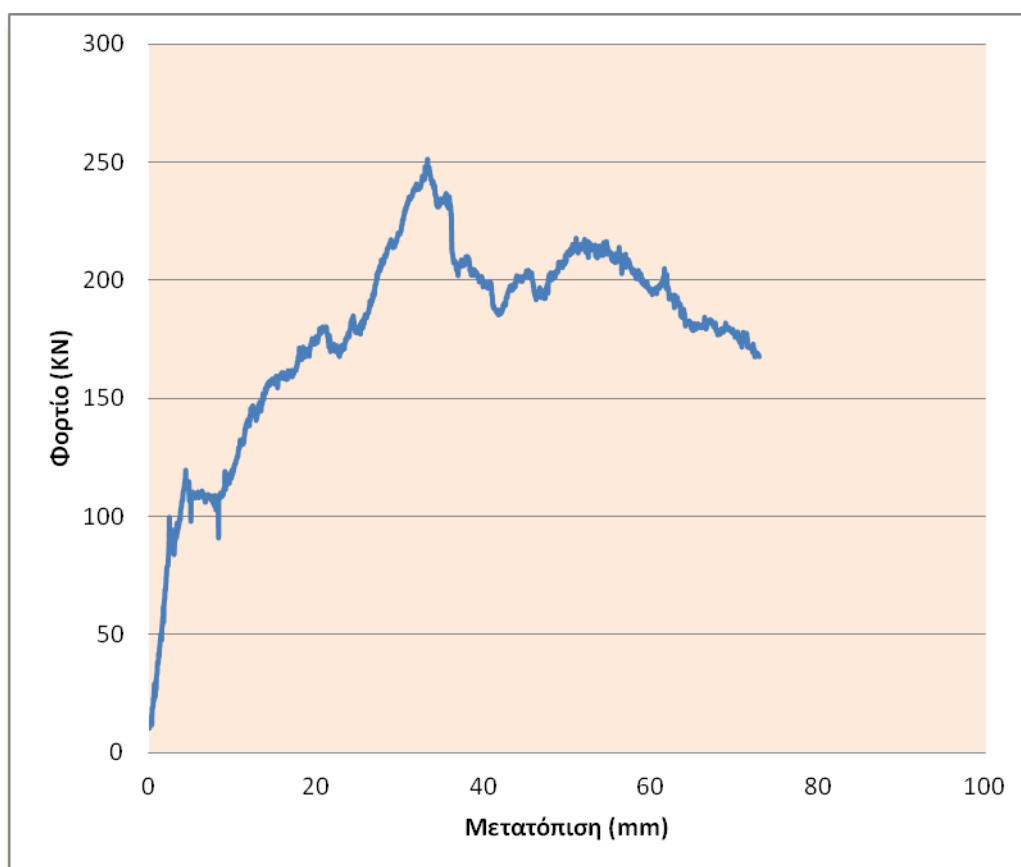


Εικόνα 7.9 Τελική απεικόνιση του τεμαχίου S01 μετά το πέρας της θλιπτικής πειραματικής διαδικασίας

7.3.3. Αποτελέσματα και συζήτηση

Η θλίψη του δοκιμίου S01 χαρακτηρίζεται από σταδιακή κατάρρευση η οποία ξεκινά από το άνω άκρο του δοκιμίου και επεκτείνεται προς τα κάτω. Στο διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης απεικονίζεται τη δύναμη P που ασκεί η κεφαλή της πρέσας στο δοκίμιο κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του πειράματος καθώς αυξάνεται η μετατόπισή της x (mm). Το πεδίο ορισμού της μετατόπισης είναι το σύνολο $[0, 73.6]$ mm Δηλαδή η κεφαλή μετακινείται από το σημείο εκκίνησης συνολικά 73.6 mm.

Ακολουθεί το διάγραμμα φορτίου –μετατόπισης ,όπως αποτυπώθηκε στο λογισμικό του ηλεκτρονικού υπολογιστή:



Διάγραμμα 7.1. Διάγραμμα Φορτίου(N)-Μετατόπισης (mm) για το S01

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη που προκύπτουν από τη πειραματική διαδικασία είναι τα εξής:

- **Μέσο φορτίο:** είναι το άθροισμα των δειγμάτων των φορτίων δια του συνόλου των δειγμάτων, $P_{m1}=178.210,10 \text{ N}$
- **Συνολική απορροφούμενη ενέργεια:** Είναι η ενέργεια η οποία προσδίδεται από τη πρέσα στο πάνελ και παραμορφώνει το δοκίμιο. Η ενέργεια αυτή ισούται με το εμβαδό “κάτω” από το διάγραμμα 7.1 φορτίου - μετατόπισης ή με το γινόμενο του μέσου φορτίου με τη συνολική διαδρομή του εμβόλου $W_{\text{απορ}1} = P_{m1} \cdot d_{o1} = 13.116,26 \text{ J}$
- **Συντεθλιμμένη μάζα :** $m_1 = 1.211,3 \text{ gr}$
- **Ειδική ενέργεια απορρόφησης:** $w_{s1} = 10,83 \text{ J/gr}$
- **Μέση ταχύτητα καθόδου του εμβόλου:** $U_{em} = 10,435 \text{ mm/min}$

ΣΧΟΛΙΑ ΕΠΙ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ TRIGGERING

- Αρχικά , το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά καθώς παρουσιάζει σταθερή-ελαστική συρρίκνωση του μήκους του κατά την αξονική κατεύθυνση καθώς αυξάνεται αναλογικά και το φορτίο που ασκείται μέχρι τα πρώτα 2 mm.
- Ακολουθεί μια μικρή – ασταθής περιοχή στο σημείο όπου αρχίζει να ενεργοποιείται ο μηχανισμός triggering (μορφής ανεστραμμένου ισοσκελούς τριγώνου).
- Στη συνέχεια το φορτίο αυξάνεται ομαλά με μειωμένο όμως ρυθμό ανόδου κατά συνέχιση της συρρίκνωσης του ύψους. Παρατηρείται βέβαια μια ελαφρά πτώση σε σημείο όπου πιθανότατα ενεργοποιείται μία ατέλεια στο εσωτερικό της δομής.
- Το φορτίο αυξάνεται καθώς φτάνουμε στο τέλος του ύψους του ισοσκελούς τριγώνου.

ΜΕΤΑ ΤΟ ΤΕΛΟΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ TRIGGERING

- Το φορτίο μεγιστοποιείται στο $P_{max}=251.213,8$ N για μετατόπιση $d=33,3$ mm. Στο σημείο που μεγιστοποιείται, έχει ήδη τελειώσει ο μηχανισμός κατάρρευσης. Το ύψος του ισοσκελούς τριγώνου ,δηλαδή, έχει ήδη μηδενιστεί.
- Στη συνέχεια ακολουθεί μία απότομη πτώση του φορτίου καθώς αυξάνεται η βράχυνση του ύψους του δοκιμίου.
- Ακολουθεί μία ασταθής περιοχή του διαγράμματος με σκαμπανεβάσματα η οποία οδηγεί σε ένα τοπικό ακρότατο
- Μετά από μία εκτεταμένη παραμόρφωση ,το τελικό στάδιο της διαδικασίας περιλαμβάνει μία ομαλή και ήπια πτώση του φορτίου μέχρι το τέλος της διαδικασίας της κατάρρευσης.

ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Το εξωτερικό περίβλημα αρχίζει να συμμετέχει στη φόρτιση του τεμαχίου μετά από ορισμένη παραμόρφωση και συμμετέχει ενεργά στη διαδικασία με τρόπο ώστε να προκαλεί ασταθή διακύμανση του φορτίου στη συνέχεια.

Από μακροσκοπική σκοπιά η ελαστική συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από δημιουργία ρωγμών οι οποίες δημιουργούνται στις τέσσερις γωνίες του δοκιμίου οι οποίες διαπερνούν τόσο το επίπεδο ,όσο και το πυρήνα του δοκιμίου .Οι ρωγμές αυτές εξαπλώνονται κατά μήκος του κατακόρυφου άξονα και δημιουργούν 4 φύλλα τα οποία με το τέλος του μηχανισμού κατάρρευσης μοιάζουν να ενώνονται με μία ενιαία δομή η οποία εξαπλώνεται ακτινικά με μανιταροειδή μορφή.

Καθώς η παραμόρφωση επεκτείνεται η σταδιακή πτύχωση των οπλισμένων με υαλονήματα πλακών παρουσιάζει σταδιακά ψαθυρή θραύση. Τα σχισίματα εξωτερικά δεν είναι εμφανή, εκτός από τις παραμορφώσεις στις τέσσερις κορυφές του. Λόγω του περιορισμού του εσωτερικού χώρου του πυρήνα , υπάρχει έντονη συμπίεση αφρού καθώς η θλίψη συνεχίζεται , λειτουργώντας έτσι σαν μοχλός πίεσης κάθετα στο επίπεδο των τοιχωμάτων .Το φαινόμενο του λυγισμού εμφανίζεται σε περιορισμένη διάσταση στα εξωτερικά τοιχώματα.

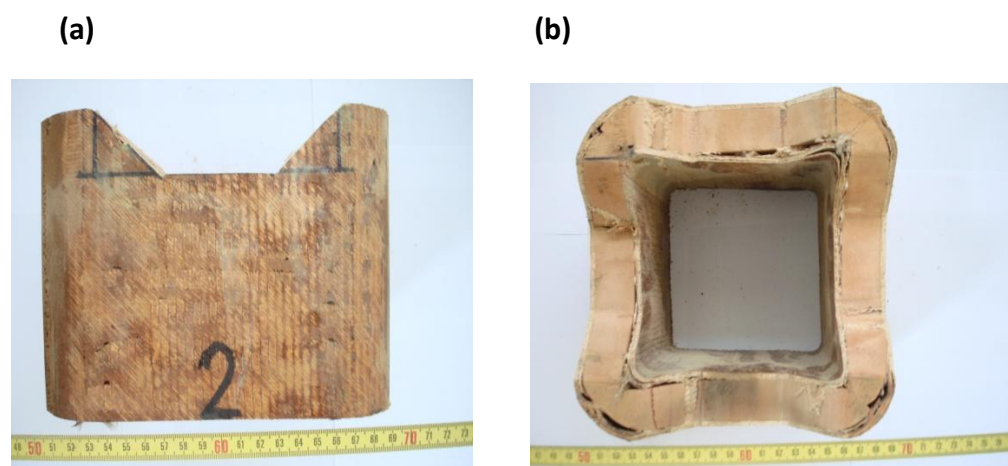
Μετά το τέλος του μηχανισμού κατάρρευσης ,η κατάρρευση του δοκιμίου γενικεύεται καθώς τμήμα του φλοιού αποκολλάται. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι μακροσκοπικά το δοκίμιο καταρρέει με ομοιόμορφο τρόπο παρουσιάζοντας δομή η οποία μπορεί να χαρακτηριστεί επαρκώς συμμετρική κατά το κατακόρυφο επίπεδο.

7.4 Δοκίμιο S02

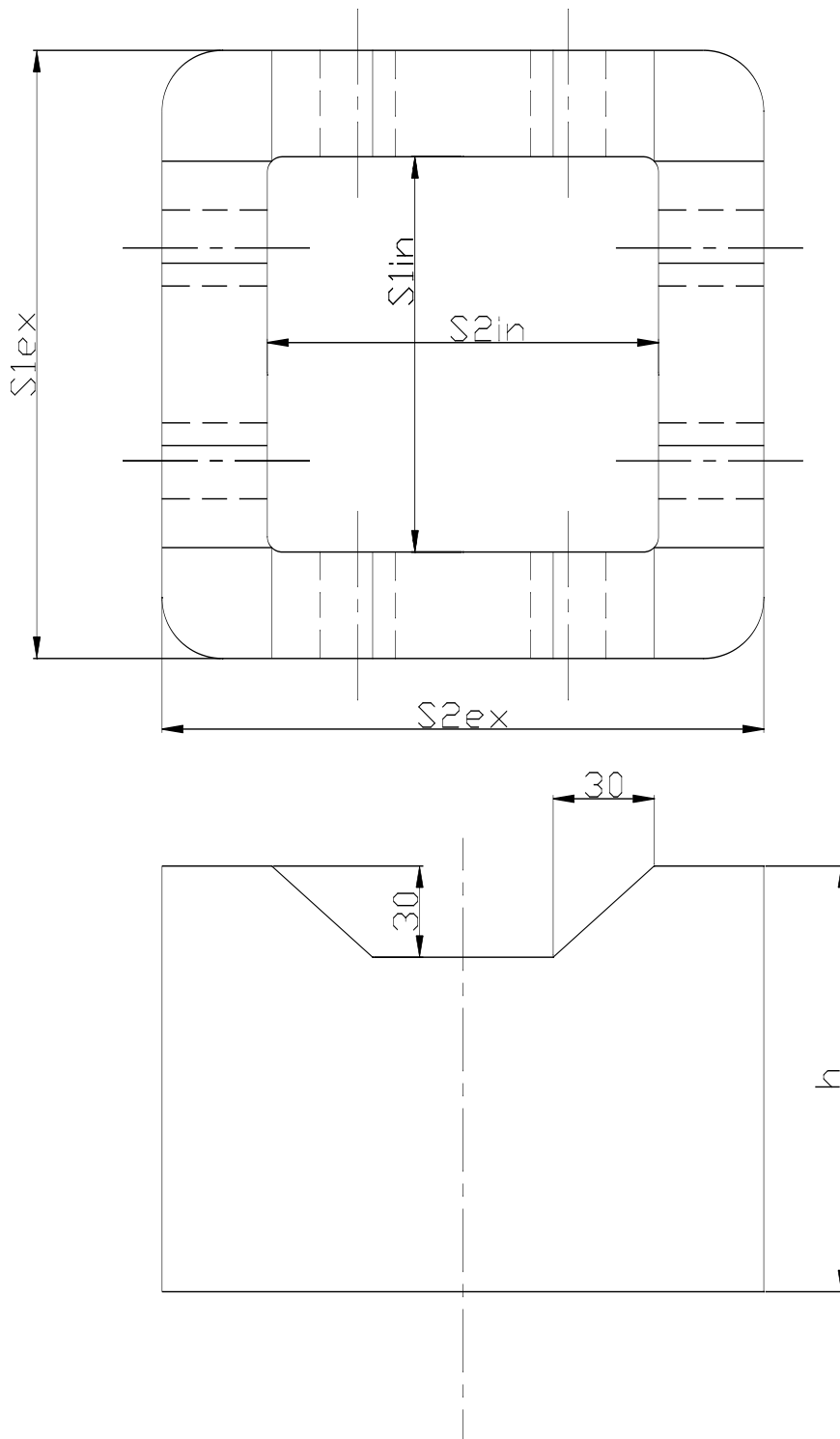
Στην δεύτερη περίπτωση ο μηχανισμός κατάρρευσης έχει σχήμα ανεστραμμένου ισοσκελούς τραπεζίου ,το οποίο έχει ύψος 30 mm (βλέπε σχήμα 7.4).

- Η μάζα του δοκιμίου είναι $m_2=1210,6$ gr
- Ύψη των κορυφών είναι αντίστοιχα
 - $H_1=142$ mm,
 - $H_2=141,5$ mm
 - $H_3=142$ mm
 - $H_4=142,5$ mm.
- Οι διαστάσεις της κάτοψης της διατομής είναι
 - $S_{1εξ}=200$ mm,
 - $S_{1εσ}=130$ mm
 - $S_{2εξ}=196,5$ mm
 - $S_{2εσ}=128,5$ mm

Η φυσική απεικόνιση του τεμαχίου σε πλάγια όψη και κάτοψη απεικονίζεται στην εικόνα 7.10 ,ενώ η απεικόνιση των διαστάσεων στο σχήμα 7.4.



Εικόνα 7.10 (α) πλάγια όψη και (β) κάτοψη του δοκιμίου S02



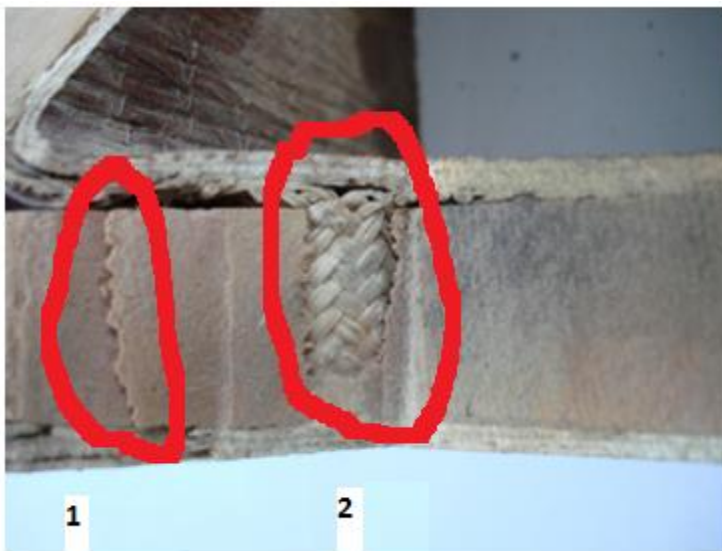
Σχήμα 7.4 Πλάγια όψη και κάτοψη του δοκιμίου S02

7.4.1 Δομικές ατέλειες του S02

ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΚΑΤΟΨΗΣ

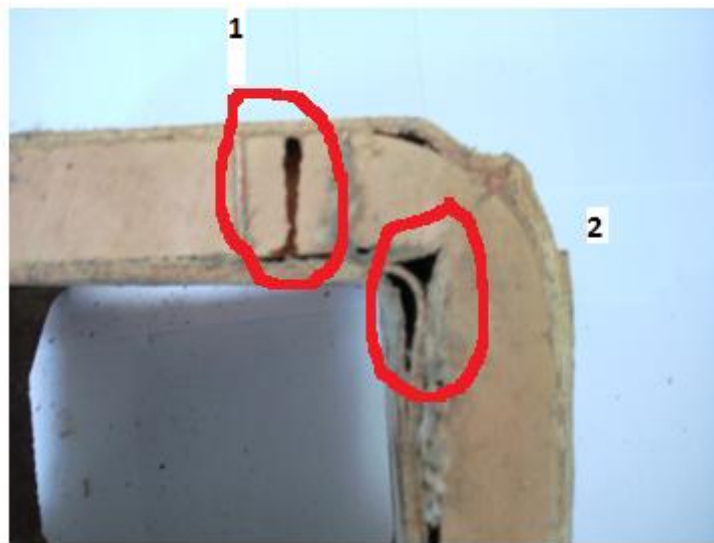


Εικόνα 7.11α Απεικόνιση σφαλμάτων της δομής του δοκιμίου στη γωνία του δοκιμίου S02(κάτοψη)

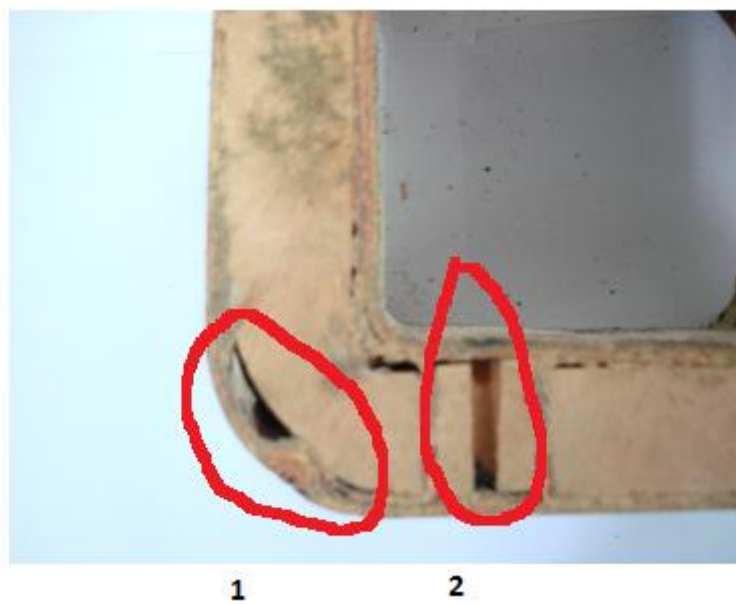


Εικόνα 7.11β Απεικόνιση σφαλμάτων που εμφανίστηκαν κατά τη κοπή του δοκιμίου (κάτοψη)

ΛΕΠΤΟΜΕΡΙΕΣ ΑΝΟΨΗΣ



Εικόνα 7.11γ Απεικόνιση σφαλμάτων της άνοψης του δοκιμίου σε μια γωνία



Εικόνα 7.11δ Απεικόνιση σφαλμάτων της άνοψης του δοκιμίου

7.4.2 Εκτέλεση πειράματος για το S02

Παρακάτω παρουσιάζεται συνοπτικά η αντιστοιχία της οπτικής αναπαράστασης της θλίψης του δοκιμίου S02 με τη μετατόπιση του εμβόλου της πρέσας .(Πίνακας 7.4, Εικόνα 7.12).

ΔΟΚΙΜΙΟ 2	
No φωτογραφίας	μετατόπιση d(mm)
1	0,00
2	1,50
3	3,30
4	6,00
5	9,10
6	13,50
7	16,40
8	22,20
9	25,20
10	29,10
11	31,70
12	33,20
13	37,70
14	41,20
15	44,10
16	51,10
17	56,30
18	60,70
19	65,10
20	69,60
21	72,80
22	75,02

Πίνακας 7.4 Παρουσίαση αντιστοιχίας αριθμού φωτογραφίας και μετατόπισης του εμβόλου πρέσας για το δοκίμιο S02

No 1 $d=0,00$ mm



No 2 $d=1,50$ mm



No 3 $d=3,30$ mm



No 4 $d=6,00$ mm



No 5 $d=9,10$ mm



No 6 $d=13,50$ mm



Εικόνα 7.12 Αντιστοιχία οπτικής παραμόρφωσης του δοκιμίου S02-μετατόπιση του εμβόλου της πρέσας.(συνέχεια)

No 7 d=16,40 mm



No 8 d=22,20 mm



No 9 d=25,20 mm



No 10 d=29,10 mm



No 11 d=31,70 mm

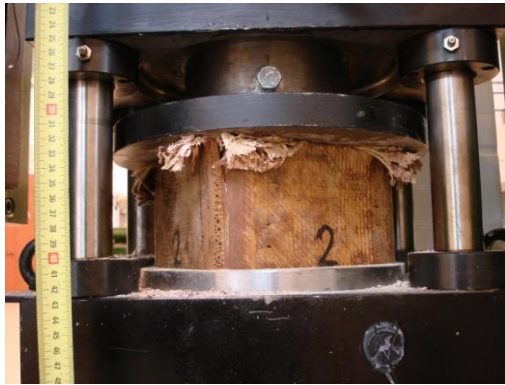


No 12 d=33,20 mm



Εικόνα 7.12 Αντιστοιχία οπτικής παραμόρφωσης του δοκιμίου S02-μετατόπιση του εμβόλου της πρέσας.(συνέχεια)

No 13 $d=37,70$ mm



No 14 $d=41,20$ mm



No 15 $d=44,10$ mm



No 16 $d=51,10$ mm



No 17 $d=56,30$ mm

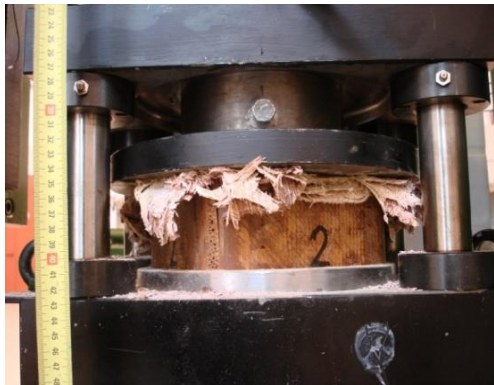


No 18 $d=60,70$ mm

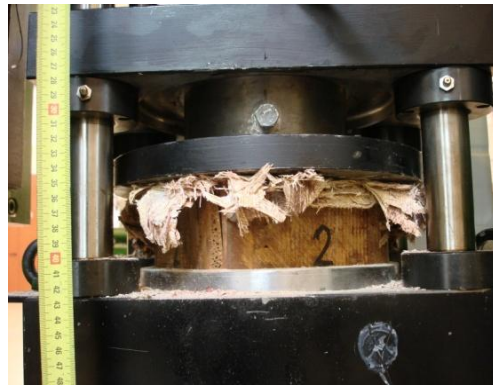


Εικόνα 7.12 Αντιστοιχία οπτικής παραμόρφωσης του δοκιμίου S02-μετατόπιση του εμβόλου της πρέσας.(συνέχεια)

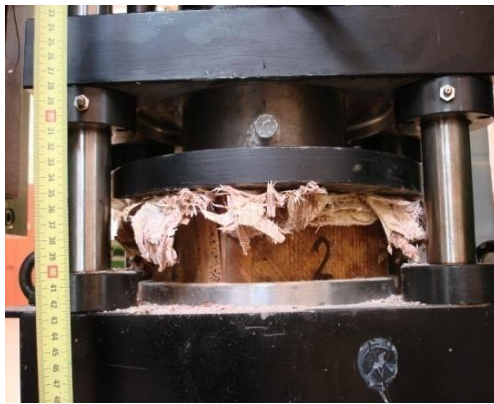
No 19 $d=65,10$ mm



No 20 $d=69,60$ mm



No 21 $d=72,80$ mm



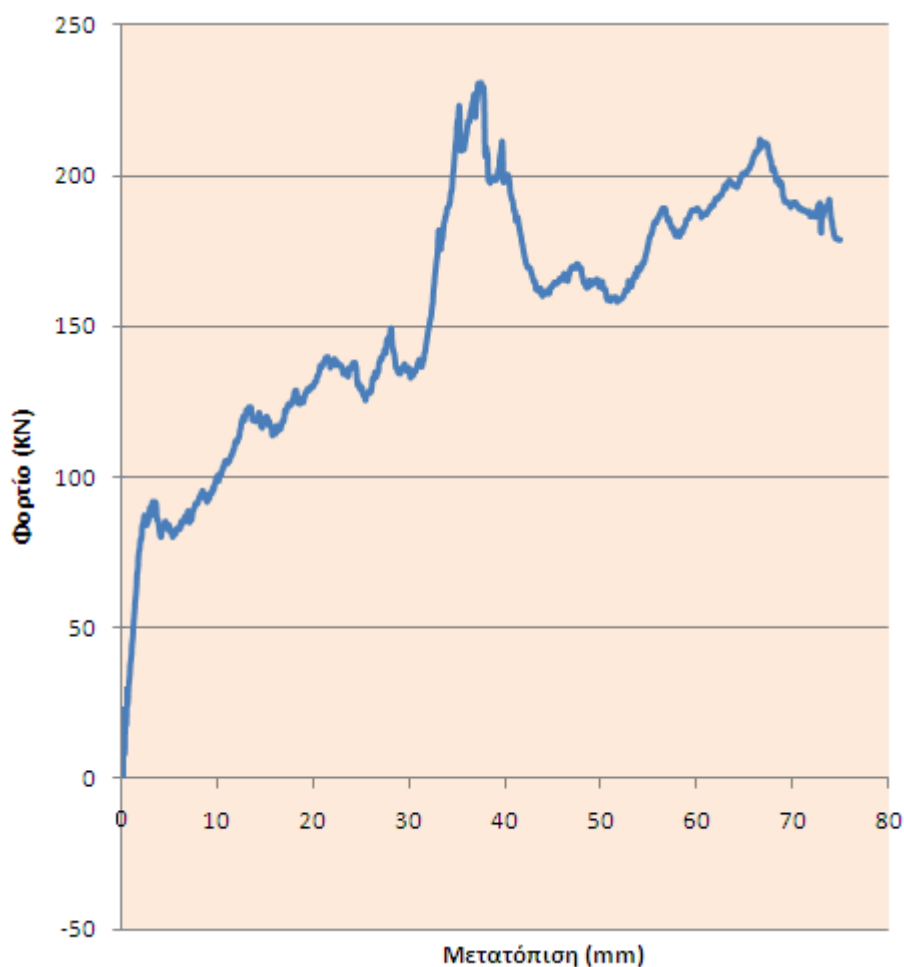
No 22 $d=75,02$ mm



Εικόνα 7.12 Αντιστοιχία οπτικής παραμόρφωσης του δοκιμίου S02-μετατόπιση του εμβόλου της πρέσας.(συνέχεια)

7.4.3. Αποτελέσματα και συζήτηση

Η θλίψη του δοκιμίου S02 χαρακτηρίζεται από σταδιακή κατάρρευση η οποία ξεκινά από το άνω άκρο του δοκιμίου και επεκτείνεται προς τα κάτω .Στο διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης απεικονίζεται η δύναμη P που ασκεί η κεφαλή της πρέσας στο δοκίμιο κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του πειράματος καθώς αυξάνεται η μετατόπισή της d (mm).Το πεδίο ορισμού της μετατόπισης είναι το σύνολο[0, 75.02] mm.Δηλαδή η κεφαλή μετακινείται από το σημείο εκκίνησης συνολικά 75.02 mm.



Διάγραμμα 7.2.Διάγραμμα Φορτίου (N)-Μετατόπισης (mm) για το S02

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη που προκύπτουν από τη πειραματική διαδικασία είναι τα εξής:

- **Μέσο φορτίο:** είναι ο το άθροισμα των δειγμάτων των φορτίων δια του συνόλου των δειγμάτων, $P_{m2} = 154.105,40 \text{ N}$
- **Συνολική απορροφούμενη ενέργεια:** Είναι η ενέργεια η οποία προσδίδεται από τη πρέσα στο πάνελ και παραμορφώνει το δοκίμιο. Η ενέργεια αυτή ισούται με το εμβαδό "κάτω" από το διάγραμμα 7.2 φορτίου - μετατόπισης ή με το γινόμενο του μέσου φορτίου με τη συνολική διαδρομή του εμβόλου $W_{\text{απορ. 2}} = P_{m2} \cdot d_{o12} = 11.560,99 \text{ J}$
- **Συντεθλιμμένη μάζα :** $m_2 = 1.210,6 \text{ gr}$
- **Ειδική ενέργεια απορρόφησης:** $w_{s2} = 9,55 \text{ J/ gr}$
- **Μέση ταχύτητα καθόδου του εμβόλου:** $U_{e 2} = 10,715 \text{ mm/min}$

ΣΧΟΛΙΑ ΕΠΙ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ TRIGGERING

- Αρχικά το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά με μία απότομη άνοδο του φορτίου για τα πρώτα 2 mm. Στη θέση αυτή αρχίζει να ενεργοποιείται ο μηχανισμός κατάρρευσης ο οποίος έχει μορφή ανεστραμμένου τραπεζίου.
- Στη συνέχεια το φορτίο συνεχίζει να αυξάνεται με λιγότερο ταχύ ρυθμό παρουσιάζοντας βέβαια αστάθεια στη άνοδό του. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται λόγω ενεργοποίησης ατελειών του δοκιμίου στο εσωτερικό του δοκιμίου
- Ο μηχανισμός καταρρέει πλήρως ενώ το φορτίο βρίσκεται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα.

ΜΕΤΑ ΤΟ ΤΕΛΟΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ TRIGGERING

- Το διάγραμμα αυξάνεται απότομα αμέσως μετά το τέλος του μηχανισμού κατάρρευσης και φτάνει σε ένα τοπικό ακρότατο.
- Ακολουθεί μία μικρή πτώση και τέλος η μέγιστη τιμή του διαγράμματος όπου $P_{max}=230.419 \text{ N}$ για $d=37,2 \text{ mm}$.
- Ακολουθεί μία πτωτική πορεία του φορτίου και στη συνέχεια άνοδος του φορτίου με συνεχή αστάθεια και μεταπηδήσεις οι οποίες φτάνουν σε ένα τοπικό ακρότατο.
- Τέλος υπάρχει μία μικρή πτώση του φορτίου ,μέχρι το τέλος της θλιπτικής διαδικασίας.

ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Στα πρώτα 2 mm το τεμάχιο παρουσιάζει ελαστική μηχανική συμπεριφορά, καθώς βραχύνεται το ύψος του ,ομοιόμορφα με την αύξηση του φορτίου. Το φαινόμενο του λυγισμού εμφανίζεται σε περιορισμένη διάσταση στα εξωτερικά τοιχώματα.

Στη συνέχεια οι τέσσερις γωνίες , αρχίζουν να φυλλοροούν με την εμφάνιση μικρών – αρχικά κατακόρυφων ρωγμών στον εξωτερικό φλοιό ενώ ταυτόχρονα δημιουργούνται βαθιές αξονικές ρωγμές ,παράλληλα στον άξονα της θλίψης ,εμφανείς στην εξωτερική επιφάνεια του επιπέδου. Αυτές οι ρωγμές εμφανίζονται και στις γωνίες του τεμαχίου ενώ ταυτόχρονα διευκολύνουν την κατάρρευση του δοκιμίου , με την αποκόλληση τμημάτων του εξωτερικού φλοιού .

Έπειτα το δοκίμιο παρουσιάζει ψαθυρή συμπεριφορά με τη δημιουργία μικρορωγμών αρχίζει να φυλλοροεί σε μανιταροειδή μορφή .Αρχικά δημιουργούνται 4 φύλλα σε κάθε μία από τις κορυφές του δοκιμίου .Λόγω του περιορισμού του εσωτερικού χώρου του πυρήνα , υπάρχει έντονη συμπίεση αφρού καθώς η θλίψη συνεχίζεται , λειτουργώντας έτσι σαν μοχλός πίεσης κάθετα στο επίπεδο των τοιχωμάτων. Αυτό προκαλεί και την αποκόλληση του εξωτερικού φλοιού από τον πυρήνα όπως φαίνεται και στις φωτογραφίες

Σε αυτή την περίπτωση η μανιταροειδής μορφή που παίρνει η κατάρρευση είναι λιγότερο ομοιόμορφη και λιγότερο συμμετρική ως προς το κατακόρυφο επίπεδο .

7.5 Δοκίμιο S03

Στην τρίτη περίπτωση ο μηχανισμός κατάρρευσης έχει σχήμα ανεστραμμένου ορθογωνίου παραλληλογράμμου ,το οποίο έχει ύψος 30 mm (βλέπε σχήμα 7.5).

- Η μάζα του δοκιμίου είναι $m_3=1101,0$ gr
- Τα ύψη των κορυφών είναι αντίστοιχα
 - $H_1=140$ mm,
 - $H_2=141$ mm
 - $H_3=142$ mm
 - $H_4=140$ mm
- Οι διαστάσεις της κάτοψης της διατομής είναι
 - $S_{1εξ}=198,5$ mm
 - $S_{1εσ}=133$ mm,
 - $S_{2εξ}=198$ mm
 - $S_{2εσ}=132$ mm

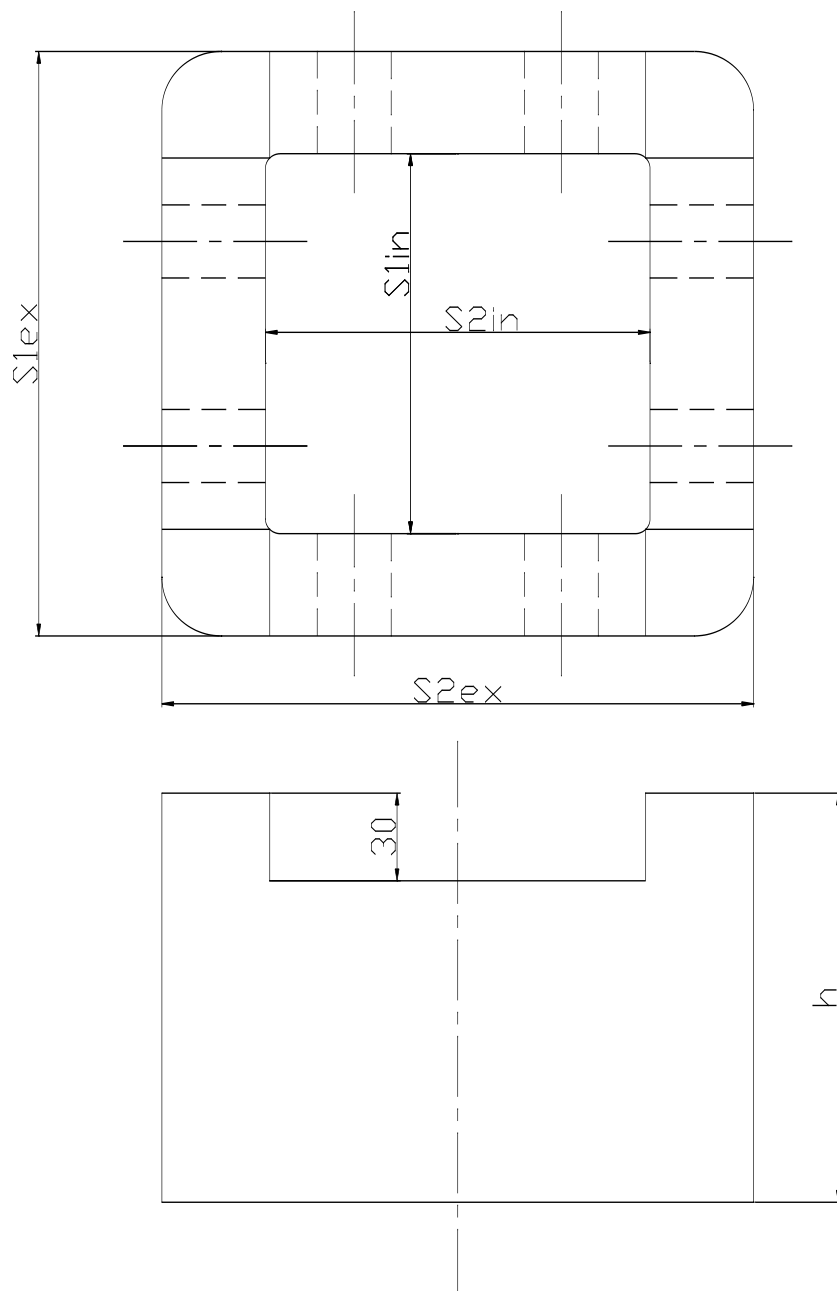
(a)



(b)



Εικόνα 7.13 (a) πλάγια όψη (b) κάτοψη του δοκιμίου S03



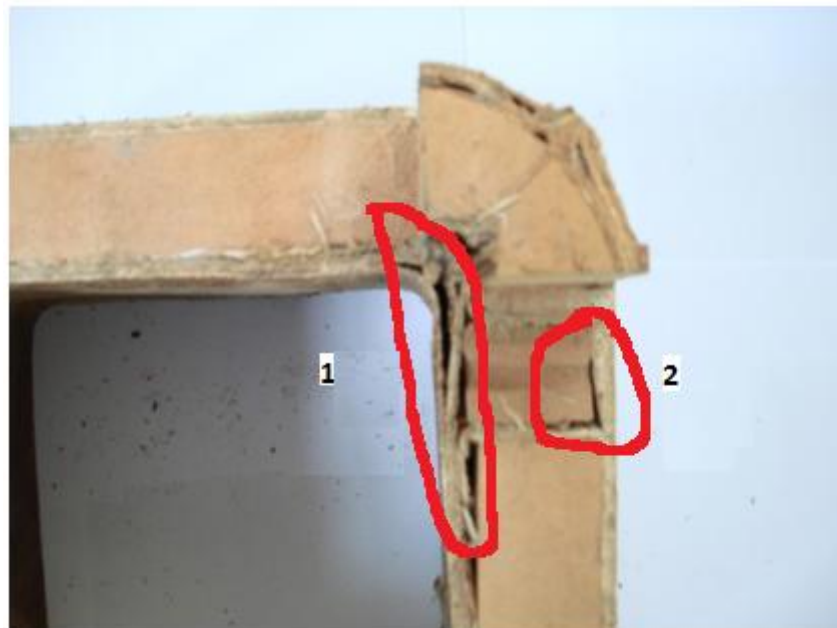
Σχήμα 7.5 Πλάγια όψη και κάτοψη του δοκιμίου S03

7.5.1. Δομικές ατέλειες του S03

ΛΕΠΤΟΜΕΡΙΕΣ ΚΑΤΟΨΗΣ

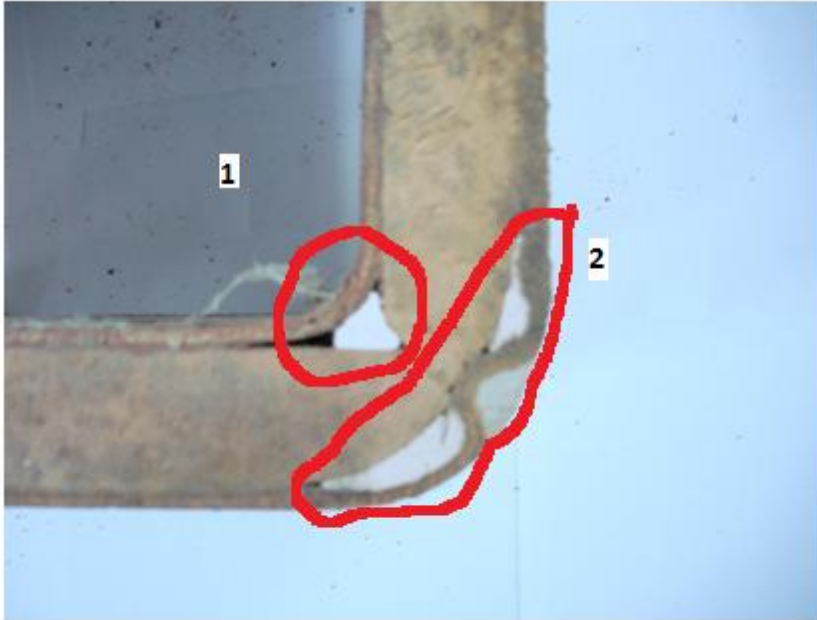


Εικόνα 7.14α. Απεικόνιση δοκιμών ατελειών στη κάτοψη του δοκιμίου S03



Εικόνα 7.14β Απεικόνιση δοκιμών ατελειών στη κάτοψη του δοκιμίου S03

ΛΕΠΤΟΜΕΡΙΕΣ ΑΝΟΨΗΣ



Εικόνα 7.14γ Απεικόνιση δομικών ατελειών στην άνοψη του δοκιμίου S03

7.5.2 Εκτέλεση του πειράματος

Παρακάτω παρουσιάζεται συνοπτικά η αντιστοιχία της οπτικής αναπαράστασης της θλίψης του δοκιμίου S03 με τη μετατόπιση του εμβόλου της πρέσας .(Πίνακας 7.5 , Εικόνα 7.15).

ΔΟΚΙΜΙΟ 3	
No φωτογραφίας	μετατόπιση d(mm)
1	0,00
2	0,80
3	2,00
4	3,50
5	4,50
6	7,40
7	10,30
8	15,10
9	22,60
10	25,90
11	30,20
12	31,80
13	33,70
14	37,20
15	43,00
16	47,40
17	51,60
18	65,90

Πίνακας 7.5 Παρουσίαση αντιστοιχίας αριθμού φωτογραφίας και μετατόπισης του εμβόλου πρέσας για το δοκίμιο S03

No 1 $d=0,0$ mm



No 2 $d=0,8$ mm



No 3 $d=2,0$ mm



No 4 $d=3,5$ mm



No 5 $d=4,5$ mm



No 6 $d=7,4$ mm



No 7 $d=10,3$ mm



No 8 $d=15,1$ mm



Εικόνα 7.15 Αντιστοιχία οπτικής παραμόρφωσης του δοκιμίου S03-μετατόπιση του εμβόλου της πρέσας.(συνέχεια)

No 9 $d=22,6$ mm



No 10 $d=25,9$ mm



No 11 $d=30,2$ mm



No 12 $d=31,8$ mm



No 13 $d=33,7$ mm



No 14 $d=37,2$ mm



Εικόνα 7.15 Αντιστοιχία οπτικής παραμόρφωσης του δοκιμίου S03-μετατόπιση του εμβόλου της πρέσας .(συνέχεια)

No 15 $d=43,0$ mm



No 16 $d=47,4$ mm



No 17 $d=51,6$ mm



No 18 $d=65,9$ mm



Εικόνα 7.15 Αντιστοιχία οπτικής παραμόρφωσης του δοκιμίου S03-μετατόπιση του εμβόλου της πρέσας .(συνέχεια)

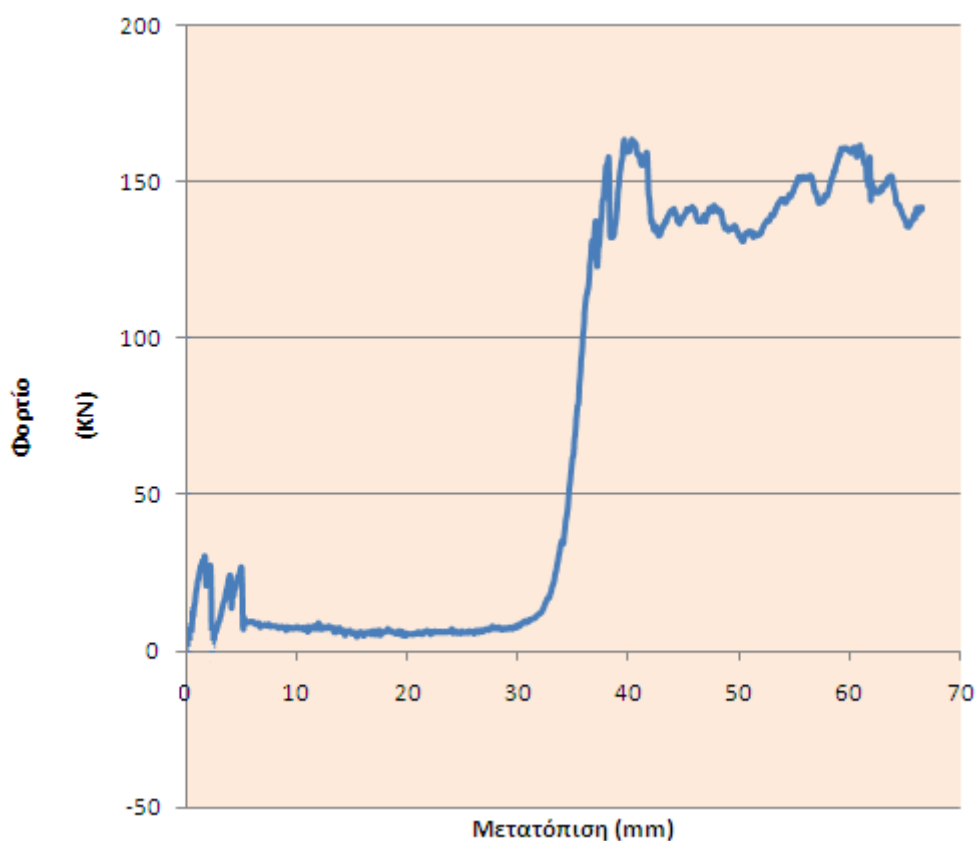


Εικόνα 7.15 Τελική απεικόνιση του δοκιμίου S03 μετά από τη πειραματική διαδικασία

7.5.3 Αποτελέσματα και συζήτηση

Η θλίψη του δοκιμίου S03 χαρακτηρίζεται από σταδιακή κατάρρευση η οποία ξεκινά από το άνω άκρο του δοκιμίου και επεκτείνεται προς τα κάτω. Στο διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης απεικονίζεται η δύναμη P που ασκεί η κεφαλή της πρέσας στο δοκίμιο κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του πειράματος καθώς αυξάνεται η μετατόπισή της x (mm). Το πεδίο ορισμού της μετατόπισης είναι το σύνολο $[0, 66,5]$ mm.

Δηλαδή η κεφαλή μετακινείται από το σημείο εκκίνησης συνολικά 66,5 mm.



Διάγραμμα 7.3 Διάγραμμα Φορτίου(N)-Μετατόπισης (mm) για το S03

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη που προκύπτουν από τη πειραματική διαδικασία είναι τα εξής:

- **Μέσο φορτίο:** είναι ο το άθροισμα των δειγμάτων των φορτίων δια του συνόλου των δειγμάτων, $P_{m3} = 73.034,71 \text{ N}$
- **Συνολική απορροφούμενη ενέργεια:** Είναι η ενέργεια η οποία προσδίδεται από τη πρέσα στο πάνελ και παραμορφώνει το δοκίμιο. Η ενέργεια αυτή ισούται με το εμβαδό "κάτω" από το διάγραμμα 7.3 φορτίου - μετατόπισης ή με το γινόμενο του μέσου φορτίου με τη συνολική διαδρομή του εμβόλου $W_{\text{απορ. 3}} = P_{m3} \cdot d_{013} = 4.856,81 \text{ J}$
- **Συντεθλιμμένη μάζα :** $m_3 = 1.101 \text{ gr}$
- **Ειδική ενέργεια απορρόφησης:** $w_{s3} = 4,41 \text{ J/ gr}$
- **Μέση ταχύτητα καθόδου του εμβόλου:** $U_{e 3} = 9,505 \text{ mm/min}$

ΣΧΟΛΙΑ ΕΠΙ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ TRIGGERING

- Αρχικά το φορτίο παρουσιάζει μία αστάθεια για τα πρώτα 5 mm μέχρι να αρχίσει να "πιάνει" ο μηχανισμός κατάρρευσης.
- Στη συνέχεια το φορτίο παραμένει σχεδόν σταθερό για μεγάλο διάστημα μετατόπισης και ενώ παραμένει με πολύ χαμηλά επίπεδα μέχρι να καταρρεύσουν οι τέσσερις πυργίσκοι

ΜΕΤΑ ΤΟ ΤΕΛΟΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ TRIGGERING

- Στη συνέχεια το φορτίο αυξάνεται πολύ απότομα λίγο μετά από το τέλος του μηχανισμού κατάρρευσης ,μικρή πτώση και απότομη αύξηση μέχρι το ανώτατο φορτίο $P_{\text{max}} = 163.899,3 \text{ N}$ για $d = 40,3 \text{ mm}$
- Ακολουθεί μία πτώση και μία ασταθής πορεία του διαγράμματος του φορτίου
- Η διαδικασία ολοκληρώνεται με το φορτίο να παραμένει σε υψηλά επίπεδα.

ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Από τα πρώτα χιλιοστά της θλίψης παρουσιάζεται ανελαστική- ψαθυρή συμπεριφορά η οποία συνοδεύεται με την αρχή της ρωγμάτωσης του εξωτερικού κελύφους στο ύψος των πυργίσκων καθώς και με αποκόλληση τμημάτων του φλοιού.

Εμφανίζονται επίσης ρωγμές τόσο αξονικά στο επίπεδο της θλίψης ,στις γωνίες του δοκιμίου όσο και κάθετα στο επίπεδο της θλίψης ,στις τέσσερις βάσεις των πυργίσκων του μηχανισμού κατάρρευσης. Η ορθογωνική διαμόρφωση καταρρέει άτακτα καθώς αποκολλούνται τμήματα τους εξωτερικού κελύφους ,ενώ ταυτόχρονα αυτή τη φορά δε εμφανίζεται έντονα η μανιταροειδής διαμόρφωση .Ο βασικός λόγος που δεν φυλλοροεί το δοκίμιο ομοιόμορφα με μανιταροειδή τρόπο ,είναι το γεγονός ότι οι πυργίσκοι καταρρέουν υπό το βάρος της πίεσης της πρέσας παράλληλα με τον άξονα της θλίψης του δοκιμίου ,και "εισέρχονται" στο κυρίως σώμα του δοκιμίου προκαλώντας μία άτακτη διάλυση του κελύφους ,το οποίο σπάει σε συγκεκριμένα σημεία κάθετα στο επίπεδο της θλίψης .Η μορφή των διαμορφωμένων πυργίσκων δηλαδή η καθετότητα τους επιδρά καταπονητικά στο αφρό πλήρωσης του πυρήνα πρώτου καν αρχίσουν να εισχωρούν στο κυρίως "σώμα" του δοκιμίου. Στον εξωτερικό φλοιό του δοκιμίου εμφανίζονται πτυχώσεις που προαναγγέλλουν την επιτάχυνση της διάδοσης της κατάρρευσης.

Η βασική ρωγμάτωση που εμφανίζεται στην γωνία του τεμαχίου βαθαίνει απότομα μετά το τέλος του μηχανισμού κατάρρευσης.Είναι εμφανές επίσης ότι η πλάκα της πρέσας δε "πατάει " ταυτόχρονα στο κυρίως σώμα του τεμαχίου μετά τη πλήρη βράχυνση των πυργίσκων .Αυτό συμβαίνει αφενός γιατί υπάρχουν διαφοροποιήσεις στα ύψη των τεσσάρων κορυφών λόγω κατασκευαστικής αδυναμίας , αφετέρου διότι κατά τη διάρκεια του πειράματος θλίψης, φαίνεται ότι οι πυργίσκοι καταρρέουν με μεγάλη χρονική απόσταση ο ένας με τον άλλον.

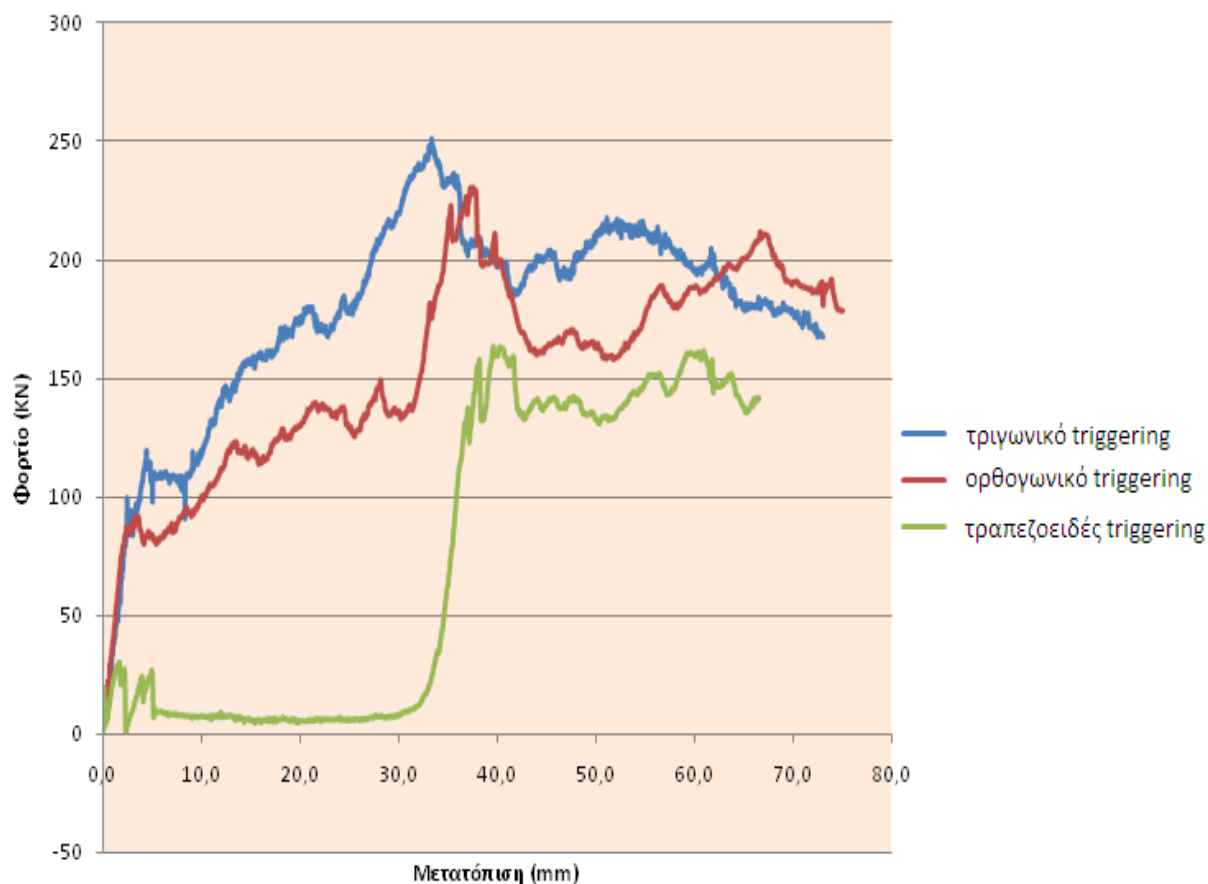
Στη συνέχεια συνεχίζεται η διάδοση της κατακόρυφης ρωγμής στη γωνία του δοκιμίου με ταυτόχρονη πτύχωση του εξωτερικού κελύφους προς τα έξω από την πίεση που ασκείται από το εσωτερικό πυρήνα .Η αποκόλληση τμημάτων του φλοιού γενικεύεται μέχρι το τέλος της θλίψης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

8.1. ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο συνοψίζουμε τα αποτελέσματα του 7^{ου} κεφαλαίου ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζουμε συγκρίνοντας τα διαγράμματα και τα συμπεράσματα του πειράματος



Διάγραμμα 8.1 Συγκριτική παρουσίαση των καμπυλών φορτίου (N) - μετατόπισης (mm) των τριών δοκιμών S01 , S02 , S03

8.2 Παρατηρήσεις

- Οι διατομές των μηχανισμών κατάρρευσης έχουν διαμορφωθεί με τέτοιο τρόπο ώστε η τριγωνική ,η τραπεζοειδής και η ορθογωνική διαμόρφωση των ακμών να έχουν ίδιο ύψος $h=30$ mm .
- Οι βάσεις και οι κορυφές των δοκιμών δε “πατούν” ομοιόμορφα στη βάση και στη κεφαλή της πρέσας με αποτέλεσμα να δημιουργούνται κενά ανάμεσα τους πριν ξεκινήσει η διαδικασία .Αυτό οφείλεται στα σφάλματα της κοπής των τριών τεμαχίων τόσο στην επιπεδότητα τους ,όσο και στη ανισομετρία των υψών των πυργίσκων.
- Τα δοκίμια S01 και S02 αρχικά συμπεριφέρονται ελαστικά ,ενώ το S03 συμπεριφέρεται ανελαστικά κατά τα πρώτα mm της αξονικής θλίψης.
- Στα δοκίμια S01 και S02 μόλις αρχίσει η κατάρρευση το φορτίο κατά βάση αυξάνεται σε αντίθεση με το S03 στο οποίο το φορτίο σε γενικές γραμμές παραμένει σταθερό
- Και στα τρία δοκίμια το μέγιστο φορτίο P_{max} εμφανίζεται **μετά** τη πλήρη βράχυνση του ύψους του μηχανισμού κατάρρευσης.
- Το μέγιστο φορτίο P_{max} καθώς και το μέσο φορτίο P_m είναι μεγαλύτερο στο S01 με τη τριγωνική διατομή .
- Το συνολικό έργο παραμόρφωσης καθώς και το ειδικό έργο που προσδίδει η πρέσα στα δοκίμια είναι μέγιστο στο S01 και ελάχιστο στο S03

8.3 Μηχανισμοί απορρόφησης ενέργειας

Από τη σκοπιά της απορρόφησης ενέργειας , οι βασικοί μηχανισμοί απορρόφησης ενέργειας μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- Σταδιακή αναδίπλωση και κατακερματισμό ή αποκόλληση των ινοπλισμένων φλοιών
- Εσωτερικό ράγισμα των σύνθετων υλικών
- Εμφάνιση ψαθυρής συμπεριφοράς με τη δημιουργία μικρορωγμών
- Ξέφτισμα των υαλονημάτων
- Εκτεταμένη ρωγμάτωση ή /και λυγισμό (πλαστική κατάρρευση και κονιορτοποίηση) του αφρού πολυουρεθάνης του πυρήνα
- Στατική τριβή όλων των επιφανειών που έρχονται σε επαφή (πλάκα-φλοιός, πλάκα- πυρήνας,φλοιός-πυρήνας)
- Τριβή κατά τη διείδυση του συμπιεσμένου αφρού ανάμεσα στον αφρό και στο εξωτερικό κέλυφος.

- Καμπτική καταπόνηση των δοκιμίων και δημιουργία εγκάρσιων ρωγμών σε πολλαπλές κατευθύνσεις
- Διαμήκης ρωγμάτωση στο εσωτερικό των πλακών που δημιουργείται πτυχώσεις στο κορμό των δοκιμίων .Οι πτυχώσεις αυτές σχηματίζουν μία μορφή “ακορντεόν” από τις πολλαπλές πτυχώσεις που δημιουργούνται στο σημείο όπου το υλικό παρουσιάζει όλκιμη συμπεριφορά.

8.4 Συμπεράσματα

- Τα πειραματικά δοκίμια τα οποία αποτελούν δομές πολυστρωματικών – σύνθετων υλικών και εμπεριέχουν FRP σωλήνες , ελέγχονται υπό οιονεί – στατική θλίψη .Βασιζόμενοι στις πειραματικές παρατηρήσεις μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η μορφή του σχηματιζόμενου μηχανισμού triggering (τριγωνική , τραπεζοειδής, ορθογωνική) παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στον τρόπο κατάρρευσης της δομής του
- Τοποθετώντας FRP σωλήνες μέσα στο πυρήνα του πάνελ ,ουσιαστικά ενσωματώνουμε ένα μηχανισμό ο οποίος ελέγχει το τρόπο κατάρρευσης υπό το βάρος της αξονικής θλίψης .Ο βασικός ρόλος τους είναι να συνδέουν τα απέναντι τμήματα του φλοιού και να συνεισφέρουν έτσι στη ακαμψία και στη αντοχή σε διάτμηση.
- Η μανιταροειδής μορφή κατά τη διάρκεια της θλίψης δημιουργείται μόνο στη τριγωνική και τη τραπεζοειδή κάτι που εξηγείται από τη κατανομή των τάσεων οι οποίες κατανέμονται τόσο παράλληλα όσο και κάθετα ως προς τον άξονα θλίψης. Αντιθέτως στο δοκίμιο με τη ορθογωνική διαμόρφωση δημιουργούνται ισχυρές ορθές τάσεις οι οποίες σπρώχνουν τους πυργίσκους με τρόπο ώστε να διεμβολίζουν τον κορμό του δοκιμίου. Αυτό συντελεί στην ευκολότερη και πιο απότομη καταστροφή του δοκιμίου.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα συνολικά αποτελέσματα από τα πειράματα που διενεργήθηκαν.

Δοκίμιο	Μέση ταχύτητα εμβόλου	Βράχυνση	Μέγιστο φορτίο	Μέσο φορτίο	Συνολική απορροφούμενη ενέργεια	Ειδική ενέργεια
	$U_e(\text{mm}/\text{min})$	$d_{ol}(\text{mm})$	$P_{\max}(\text{N})$	$P_m(\text{N})$	$W(\text{J})$	$W_s(\text{KJ}/\text{Kg})$
S01	10,435	73,6	251.213,80	178.210,10	13.116,26 J	10,83
S02	10,715	75,2	230.419,01	154.105,40	11.557,91	9,55
S03	9,505	66,5	163.899,30	73.034,71	4.856,81	4,41

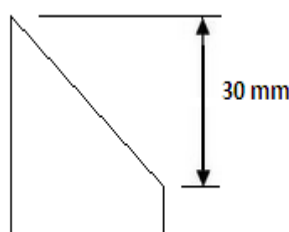
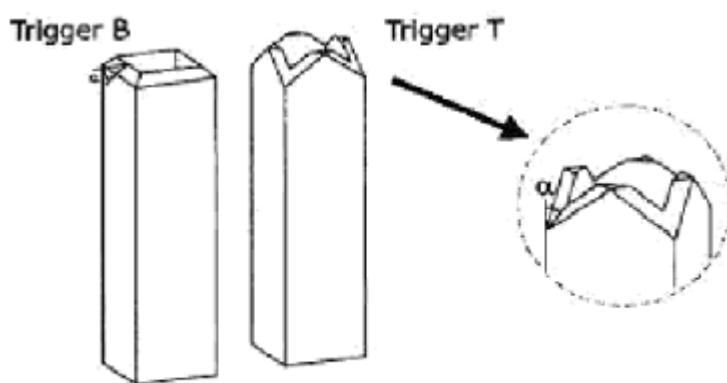
Πίνακας 8.1 Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων

8.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων θλίψης άλλων τύπων μηχανισμών triggering¹

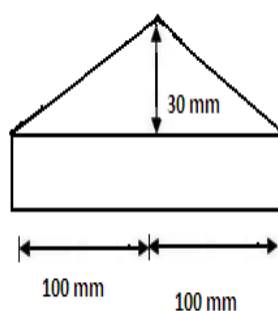
Για λόγους πληρότητας ,στη παρούσα παράγραφο θα παρουσιάσουμε εν συντομία αντίστοιχο πείραμα ,θλίψης προκειμένου να έχουμε συγκριτική εποπτεία του τρόπου που επηρεάζουν άλλες μορφές μηχανισμών triggering , το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης.

8.5.1 Περιγραφή των πειραματικών δοκιμών

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν είχαν διαμόρφωση τύπου chamfer (tigger B) και tulip (trigger T) όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Chamfer



tulip

Σχήμα 8.1 Απεικόνιση των γεωμετρικών λεπτομερειών triggering των δύο πειραματικών δοκιμών

Στο πείραμα υπέστη θλίψη και ακόμα ένα δοκίμιο στο οποίο δεν είχε διαμορφωθεί μηχανισμός κατάρρευσης (untriggered)

Τα τεμάχια προέρχονται από υλικό ίδιας σύστασης και ίδιων διαστάσεων με τα δοκίμια που περιγράφηκαν στη παρούσα διπλωματική. Με αυτό τον τρόπο άλλωστε καθίσταται δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων για τη ασφαλή πρώτη σύγκριση των διαγραμμάτων φορτίου –μετατόπισης των 6 δοκιμίων .Άλλωστε τα ύψη του μηχανισμού κατάρρευσης και σε αυτό το πείραμα έχουν διαμορφωθεί στα 30 mm.Τα ύψη των δοκιμίων ,όμως είναι H=450 mm είναι δηλαδή τα τριπλάσια περίπου των S01,S02,S03.

Οι τρεις θλιπτικές διαδικασίες έλαβαν χώρα επίσης στην ίδια πρέσα η οποία περιγράφηκε στο κεφάλαιο 7.

8.5.2 Σχόλια επί των διαγραμμάτων

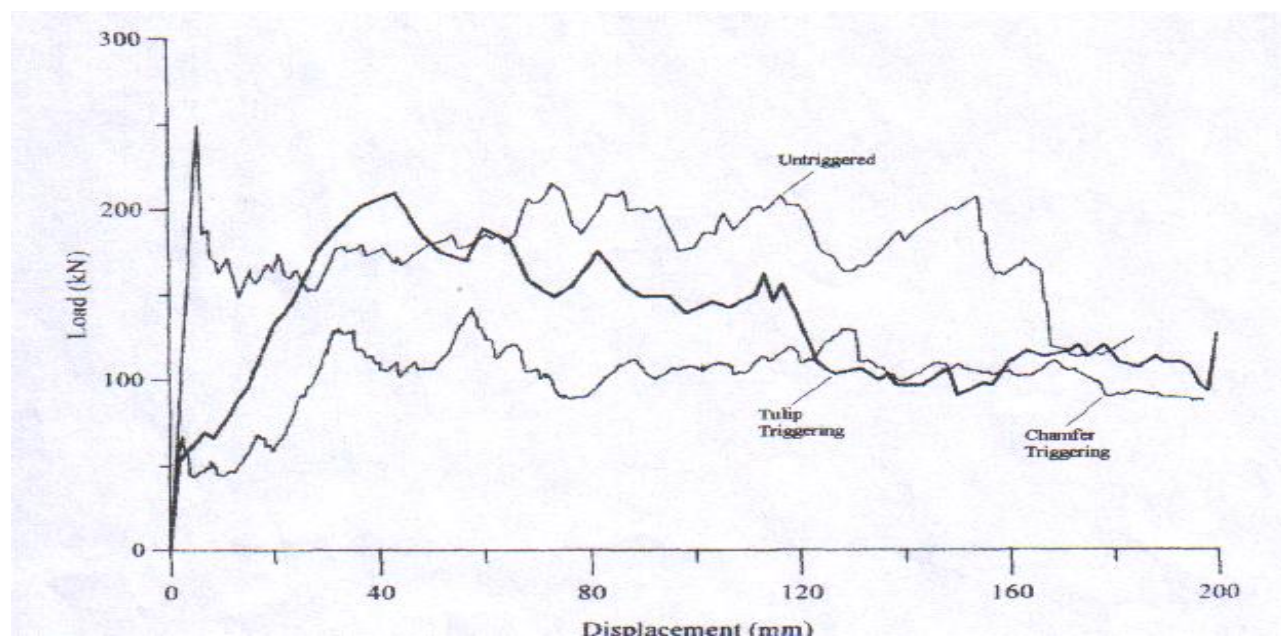
Ονοματολογία των τριών δοκιμίων:

S04→ Δοκίμιο χωρίς μηχανισμό triggering

S05→ Δοκίμιο με tulip triggering

S06 → Δοκίμιο με chamfer triggering

Τα συγκριτικά αποτελέσματα των τριών αυτών πειραμάτων ,παρουσιάζονται στο διάγραμμα 8.1.



Διάγραμμα 8.2 Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης κατά τη θλιπτική πειραματική διαδικασία για δοκίμια χωρίς μηχανισμό κατάρρευσης (untriggered) ,για tulip και chamfer triggering

Από τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής:

- Αρχικά τα δοκίμια συμπεριφέρονται ελαστικά .Το δοκίμιο S04 παρουσιάζει μια σταθερή αύξηση του φορτίου μέχρι τα πρώτα 5 mm και ακολουθεί μια απότομη πτώση.
- Τα άλλα δύο δοκίμια παρουσιάζουν μέγιστη τιμή του φορτίου μετά το πέρας των μηχανισμών κατάρρευσης
- Η συνολική απορροφούμενη ενέργεια είναι μεγαλύτερη για το δοκίμιο S04 ακολουθεί το S05 και το S06 .
- Το μέγιστο φορτίο, το παρουσιάζει το S04 για στην αρχική, ελαστική συμπεριφορά του.
- Το S04 έχει περίπου το ίδιο μέγιστο φορτίο με το S01 καθώς και μεγαλύτερη συνολική απορροφούμενη ενέργεια , κάτι που είναι εμφανές καθώς περικλείει μεγαλύτερο εμβαδό στο διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης. Παρόλα αυτά ,στο S04 η τάση αυξάνεται αρχικά απότομα ,πράγμα που δεν είναι επιθυμητό και επίσης δε μπορεί να ελεγχθεί ο τρόπος κατάρρευσης ούτε το σημείο μεγίστου φορτίου καθώς δεν έχει διαμορφωμένο μηχανισμό triggering .

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, M.B. Ioannidis,
“Axial crushing of hybrid square sandwich composite vehicle hollow
bodysHELLS with reinforced core” (2001)
2. P.K. Sinha “composite materials and structures” (1995)
3. J.M. Davies “Lightweight sandwich construction” (2001)
4. Manas Chanda Salil K. Roy “Plastics Fabrication and Recycling” (2009)
5. Charles a. Harper “Handbook of Plastic Processes” (2006)
6. Ashby, M. F., Materials and Shape, Acta Metall. Mater, vol. 39/6 (1991)
7. Zenkert, D., The handbook of sandwich construction, Chameleon Press Ltd.,
London, 1997
8. Ashby, M. F., Gibson, L. J., Cellular Solids, Cambridge
University Press, Cambridge, 1997
9. Beukers, A., Cost effective composite plate and shell structures for
transports, Proc. of European SAMPE Conference, Hamburg, ed. Brandt et al.,
1992, p.495-506
10. M. WIT Press, 2006 Guarliano ‘Fracture and damage of composites’,
Southampton WIT Press 2006

11. A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, M.B. Ioannidis, D.G. Chronopoulos, P.K. Kostazos "On the crashworthiness of composite rectangular thin-walled tubes internally reinforced with aluminium or polymeric foams: Experimental and numerical simulation " (2009)

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

12. Γεροντάκης Στ. "Μηχανισμοί κατάρρευσης σύνθετου κελύφους διατομής <<κλειψύδρα>> ,με πυρήνα σταθερού αφρού ,σε στατική και δυναμική καταπόνηση (2011)
13. Δημήτρης Ι. Παντελής "Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά" (2008)
14. Παπανικολάου Γιώργος ,Μουζάκης Διονύσης , "Σύνθετα υλικά" (2007)
15. Κ.Θ.Δέρβος ,Παναγιώτα Βασιλείου "Εισαγωγή στα υλικά" (2009)
16. Χρονόπουλος Δημ. "Μελέτη απορρόφησης ενέργειας κατά την αξονική καταστροφική καταπόνηση κελύφων σύνθετου υλικού ορθογωνικής διατομής ενισχυμένων εσωτερικά με μεταλλικό και πολυμερή αφρό, πειραματική και αριθμητική προσομοίωση" (2007)
17. Παπαδόπουλος Χρ. "Σύνθετα υλικά :ιδιότητες κατασκευής –κατεργασίες βελτίωσης" (2009)