

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ: ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

Σύνθετα υλικά με θερμοπλαστική μήτρα

Χρήση καινούργιου και παλαιωμένου φύλλου κάλυψης θερμοκηπίων ως μήτρα συνθέτου υλικού

Ευθύμιος Καβελάκης

Επιβλέπων: Αλέξανδρος Δ. Γκότσης





ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ «ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ, ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ



ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΗ ΜΗΤΡΑ

Χρήση καινούργιου και παλαιωμένου φύλλου κάλυψης θερμοκηπίων ως μήτρα συνθέτου υλικού

Ευθύμιος Καβελάκης

Διπλωματική διατριβή υποβληθήσα στα πλαίσια των απαιτήσεων για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στο πρόγραμμα

«ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»

του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης

4 Νοεμβρίου, 2010

4 Νοεμβρίου, 2010 ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

Ευθύμιος Καβελάκης, αρ. μητρώου: 2006040153

e-mail: kavelase@hotmail.com

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

- 1. Αναπληρωτής Καθηγητής Αλέξανδρος Δ. Γκότσης, επιβλέπων
- 2. Καθηγητής Κωνσταντίνος Προβιδάκης
- 3. Αναπληρωτής Καθηγητής Ιωάννης Τσομπανάκης

Εικόνα εξωφύλλου:

Το αεροπλάνο A380 της Airbus, το οποίο έχει πολλά εξαρτήματα φτιαγμένα από σύνθετα υλικά με θερμοπλαστική μήτρα (με κίτρινο χρώμα στο σχήμα).

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ:

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ, ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής

Κτήριο Επιστημών, Πανεπιστημιούπολη, Κουνουπιδιανά, 73100 Χανιά

τηλ. 2821037259 fax. 2821037672 e-mail: gotsis@science.tuc.gr

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια των απαιτήσεων του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στη «Μηχανική και Τεχνολογία Υλικών και Κατασκευών» του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ο σκοπός της εργασίας ήταν να μελετηθεί η παρασκευή και οι ιδιότητες των συνθέτων υλικών με συνεχείς ίνες και θερμοπλαστικό πολυμερές ως μήτρα. Τα περισσότερα υλικά που χρησιμοποιούνται ως μήτρα σε σύνθετα υλικά με συνεχείς (μακριές) ίνες είναι θερμοσκληρυνόμενα. Αυτό οφείλεται στον τρόπο παρασκευής του συνθέτου υλικού: αφού οι μακριές ίνες τοποθετούνται έτσι ώστε να προκύψει το σχήμα του προϊόντος, κατόπιν η (ρευστή) μήτρα πρέπει να εισχωρήσει ανάμεσα στις ίνες και να τις διαβρέξει πριν στερεοποιηθεί. Τα συστατικά στα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή έχουν χαμηλό ιξώδες και αυτή η διείσδυση/διαβροχή είναι τεχνολογικά εύκολη. Τα θερμοπλαστικά, απ' την άλλη, πρέπει να τηχθούν για να γίνουν ρευστά, αλλά το ιξώδες των τηγμάτων τους είναι συνήθως υψηλό. Έτσι η ροή ανάμεσα στις ίνες είναι αργή και οι διεργασίες παρασκευής συνθέτων υλικών με θερμοπλαστική μήτρα είναι πολύπλοκες. Τα υλικά αυτά όμως έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα θερμοσκληρυνόμενα. Η παρούσα εργασία εντάσσεται στις προσπάθειες να βρεθούν τρόποι να παρακάμψουμε αυτήν τη δυσκολία στην παρασκευή των συνθέτων υλικών με θερμοπλαστική μήτρα. Ένας δεύτερος στόχος είναι να εξεταστεί η δυνατότητα χρήσης ανακυκλωμένου πολυμερούς για το υλικό της μήτρας. Φυσικά, για τον σκοπό αυτό μόνο τα θερμοπλαστικά πολυμερή είναι κατάλληλα.

Ευθύμης Καβελάκης

Περιεχόμενα

1	Θερ	μοπλα	στικά σύνθετα υλικά	1			
	1.1	νθετα υλικά	1				
	1.2	1.2 Συστατικά συνθέτων υλικών					
		1.2.1	Πολυμερικές μήτρες	4			
		1.2.2	Θερμοσκληρυνόμενες μήτρες	5			
		1.2.3	Θερμοπλαστικές μήτρες	6			
		1.2.4	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα θερμοπλαστικής μήτρας	7			
	1.3	Ι.3 Πολυαιθυλένιο					
		1.3.1	Βιομηχανική παραγωγή	9			
		1.3.2	Χαρακτηριστικά και εφαρμογές	9			
		1.3.3	Παραγωγή φιλμ από πολυαιθυλένιο	11			
		1.3.4	Η ανακύκλωση του πολυαιθυλενίου	11			
	1.4	ενίσχυσης	13				
		1.4.1	Σύνθετα υλικά με τεμαχίδια	13			
		1.4.2	Σύνθετα υλικά με δομή πολυστρώματος	13			
		1.4.3	Σύνθετα υλικά με ινώδη μέσα ενίσχυσης	14			
	1.5	Υλικά	ινών	17			
		1.5.1	Ίνες γυαλιού	17			
		1.5.2	Παραγωγή ινών γυαλιού	20			
		1.5.3	Ιδιότητες σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή	21			
	1.6	Διεπιφάνεια μήτρας - ενίσχυσης					
	1.7	Χρήσεις					
2	Διερ	ογασίες	παρασκευής	25			
	2.1	Ημι-αι	υτόματες διεργασίες	25			
		2.1.1	Τεχνική μορφοποίησης με συμπίεση	25			
		2.1.2	Τεχνική χύτευσης με μεταφορά ρητίνης	26			
		2.1.3	Τεχνική με αυτόκλειστο φούρνο	26			
	2.2	Αυτομ	ιατοποιημένες διεργασίες	26			
		2.2.1	Εξώθηση	26			
		2.2.2	Περιστρεφόμενοι κύλινδροι	26			
		2.2.3	Περιέλιξη ταινιών	28			
	2.3	Μορφ	οποίηση με συμπίεση	28			

	2.4	Διεργα	ισίες συγκόλλησης	28			
3	Μηχ	Μηχανικές ιδιότητες 31					
	3.1	Μέτρο ελαστικότητας					
		3.1.1	Αξονική τάση	32			
		3.1.2	Εγκάρσιες τάσεις	33			
		3.1.3	Μέτρο διάτμησης	34			
		3.1.4	Λόγος του Poisson	36			
		3.1.5	Ιδιότητες σε ενδιάμεσες γωνίες μεταξύ 0^0 και 90^0	37			
	3.2	Θραύσ	ση και αντοχές	38			
		3.2.1	Αστοχία σε αξονική φόρτιση	38			
		3.2.2	Αστοχία σε εγκάρσια εφελκυστική παραμόρφωση	41			
		3.2.3	Αστοχία σε γωνία, φ, ως προς την κατεύθυνση των ινών	41			
	3.3	Ανθεκτ	πκότητα	42			
		3.3.1	Γενική θεωρία	42			
		3.3.2	Διεπιφανειακή θραύση και διάδοση ρωγμών στα σύνθετα υλικά	43			
		3.3.3	Ερπυσμός	44			
		3.3.4	Κόπωση	44			
4	Πειρ	αματικ	ή διαδικασία	47			
	4.1	Περιγρ	ραφή δοκιμίων	47			
		4.1.1	Υλικό μήτρας	47			
		4.1.2	Ενισχυτικό μέσο	47			
		4.1.3	Διαδικασία παρασκευής δειγμάτων	47			
		4.1.4	Χαρακτηρισμός των δοκιμίων	49			
		4.1.5	Δοκιμές εφελκυσμού	50			
5	Ανά	\υση ατ	τοτελεσμάτων	53			
	5.1	Διαγρά	άμματα τάσης–παραμόρφωσης	53			
	5.2	Μέτρο	ελαστικότητας	53			
		5.2.1	Εξάρτηση του μέτρου ελαστικότητας από το κλάσμα όγκου των				
			ινών	57			
		5.2.2	Εξάρτηση του Ε από το πάχος των ινών	64			
	5.3	Ολκιμά	ότητα, αντοχή και δυσθραυστότητα	64			
		5.3.1	Ολκιμότητα	64			
		5.3.2	Αντοχή	67			
		5.3.3	Ανθεκτικότητα	69			
	5.4	Γενική	συζήτηση	70			
		5.4.1	Υαλοϋφάσματα ως ενίσχυση συνθέτων	70			
		5.4.2	Σύνθετα υλικά με θερμοπλαστική μήτρα	71			
		5.4.3	Παλαιωμένο και καινούργιο πολυμερές στη μήτρα	73			
	5.5	Πλεονε	εκτήματα & εφαρμογές	74			
		5.5.1	Πλεονεκτήματα	74			
		5.5.2	Προτεινόμενες εφαρμογές	74			
	5.6	Προτά	σεις για βελτίωση του υλικού	75			
		•					

6 Συμπεράσματα	77	
Α Ελαστικοί συντελεστές	83	
Β Ευχαριστίες	87	
Γ Σύντομο βιογραφικό σημείωμα	89	
Δ English Abstract	91	
Κατάλογος Πινάκων		
Κατάλογος Σχημάτων 95		
Κατάλογος συμβόλων		
Ευρετήριο	105	

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή: Θερμοπλαστικά σύνθετα υλικά

1.1 Τα σύνθετα υλικά

Τα σύνθετα υλικά αποτελούν μια ευρεία και σημαντική κατηγορία υλικών με πολλές τεχνικές εφαρμογές. Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί η χρήση ενισχυμένων υλικών με ίνες σε πολλές εφαρμογές και υπάρχουν πολλές ενδείξεις ότι κάτι τέτοιο θα συνεχιστεί. Η ραγδαία ανάπτυξη οφείλεται κυρίως στην αντικατάσταση των παραδοσιακών υλικών και κυρίως των μετάλλων. Αυτό οφείλεται στο ότι τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν βελτιωμένες ιδιότητες (όπως ακαμψία, σκληρότητα, χαμηλή πυκνότητα κλπ.) σε σχέση με τις ιδιότητες των παραδοσιακών υλικών τα οποία αντικαθιστούν. Οι ιδιότητες αυτές δεν μπορούν να επιτευχθούν από τη χρήση των μεμονωμένων συστατικών τους [3].

Οφισμός : Σύνθετο υλικό είναι ένα σύστημα που συνίσταται από ένα μείγμα ή συνδυασμό μιγμάτων δύο ή περισσότερων διαφορετικών υλικών (που διαφέρουν είτε στη συγκεκριμένη κατάσταση που βρίσκονται, είτε στη χημική σύσταση) και που είναι αδιάλυτα το ένα στο άλλο. Οι ιδιότητες του συνθέτου είναι διαφορετικές από εκείνες των συστατικών του και διαφοροποιούνται εντονότερα όταν ένα από τα συστατικά: (1) είναι σε ινώδη μορφή, (2) έχει κ.ο. περιεκτικότητα μεγαλύτερη από 10% και (3) παρουσιάζει ιδιότητες με τιμές σημαντικά υψηλότερες (> 5 φορές) του άλλου [3].

Ένα σύνθετο υλικό που προορίζεται για κατασκευαστικές εφαρμογές θα πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- 1. Να περιέχει δύο η περισσότερα φυσικά και μηχανικά διαχωριζόμενα υλικά.
- 2. Να μπορεί να δημιουργηθεί από την ανάμειξη διαφορετικών υλικών με τρόπο τέ-

Βιομηχανία	Εφαρμογές
Αεροναυπηγική	Φτερά, φλάπς, πτερύγια ελίκων, έλικες ελικοπτέρων, συστήματα προσγείωσης
Αυτοκίνητα	καροσερί, μέρη προφυλακτήρων, αναρτήσεις, spoilers, άξονες, θήκες για θερμοστάτες
Ναυπηγική	σκαριά, καταστρώματα, υπερδομές, κατάρτια
Οικοδομές	επενδύσεις, οροφές, αντιπυρική προστασία
Χημική	σωληνώσεις, δοχεία πίεσης, δεξαμενές
Εξόρυξη πετρελαίου	υπερδομές σε πλατφόρμες, αντιπυρική προστασία, σωληνώσεις
Business	έπιπλα, ντουλάπια
Ηλεκτρικά/Ηλεκτρονικά	PC boards, διακόπτες, μονωτές, πάνελ, κουτιά, ντουλάπια
Οικιακά	έπιπλα, ψυγεία, πλυντήρια, κουτιά μετρητών

Πίνακας 1.1: Μερικές εφαρμογές σύνθετων υλικών [2].

τοιο, ώστε η διασπορά του ενός στο άλλο υλικό να είναι ελεγχόμενη, με φυσικό επακόλουθο την επίτευξη των βέλτιστων ιδιοτήτων.

 Οι ιδιότητες του να είναι ανώτερες και σε μερικές περιπτώσεις μοναδικές σε σχέση με τις ιδιότητες των μεμονωμένων συστατικών.

Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται μερικές από τις εφαρμογές των σύνθετων υλικών.

Τα σύνθετα υλικά αποτελούντα συνήθως από μία μήτρα και το μέσο ενίσχυσης ή το πληρωτικό υλικό. Η μήτρα είναι το κύριο συστατικό που χρησιμεύει στο να συγκρατηθεί το σύνθετο και του δίνει την κύρια μορφή του. Το μέσο ενίσχυσης αποτελεί το δομικό συστατικό και καθορίζει τη δομή και τη μηχανική αντοχή του συνθέτου. Άλλα συστατικά όπως ο καταλύτης, ο σταθεροποιητής και κάποια άλλα πρόσθετα χρησιμοποιούνται σε μικρές ποσότητες.

Τα σύνθετα κατατάσσονται αναλόγως της φύσης της μήτρας σε τρεις κύριες κατηγορίες, ως ακολούθως:

- Σύνθετα με μεταλλική μήτρα.
- Σύνθετα με πολυμερική μήτρα.
- Σύνθετα με κεραμική μήτρα.

Ανάλογα με το μέσο ενίσχυσης τα σύνθετα υλικά χωρίζονται σε 4 ακόμα κατηγορίες:

- Σύνθετα ενισχυμένα με τεμαχίδια (particulate fillers).
- Σύνθετα ενισχυμένα με ίνες (fibres).



Σχήμα 1.1: Ταξινόμηση των διαφόρων ειδών των σύνθετων υλικών, [4]

- Σύνθετα ενισχυμένα με φύλλα (laminar fillers).
- Σύνθετα ενισχυμένα με δομικά στοιχεία (π.χ. δομικό αφρό ή κυψελλωτά στρώματα honeycomb panels).

Το Σχήμα 1.1 παρουσιάζει τη ταξινόμηση των διαφόρων ειδών σύνθετων υλικών.

Η συμπεριφορά καθώς και οι ιδιότητες του συνθέτου καθορίζονται από τα υλικά από τα οποία αποτελείται, από τη μορφή των συστατικών και τη διευθέτηση τους, καθώς και από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συστατικών, γι' αυτό και οι ιδιότητες κάθε συστατικού που συμμετέχει στο σύνθετο είναι κρίσιμης σημασίας. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των συστατικών οδηγεί σε νέες ιδιότητες, οι οποίες συνήθως διαφέρουν από εκείνες του καθενός συστατικού ξεχωριστά.

Εξίσου σημαντικό φόλο στις τελικές ιδιότητες του συνθέτου παίζουν τα χαφακτηφιστικά τόσο της δομής όσο και της γεωμετφίας των συστατικών. Το σχήμα και το μέγεθος των φάσεων, η διευθέτηση και η κατανομή τους, αλλά και το σχετικό ποσοστό του καθενός είναι ιδιαίτεφα σημαντικοί παφάγοντες και συνεισφέφουν κατά ένα μεγάλο ποσοστό στη συνολική απόδοση του συνθέτου. Τα συστατικά των συνθέτων υλικών μποφούν να επιλεγούν κατά τφόπο που να δίνουν στο σύνθετο υλικό ασυνήθιστους συνδυασμούς σκληφότητας, αντοχής, βάφους, αντοχής σε υψηλές θεφμοκφασίες, αντοχής σε διάβφωση ή αγωγιμότητας και άλλες ιδιότητες.

Πολλά υλικά είναι στη πραγματικότητα σύνθετα, και ας μην φαίνονται έτσι από πρώτης όψεως. Αυτό συμβαίνει, π.χ., στα φυσικά πολυμερή, τα οποία συχνά αποτελούνται από τουλάχιστον δύο συστατικά. Πλήθος υλικά συχνά αποτελούν συνδυασμό μετάλλου με μέταλλο, μετάλλου με κεραμικό, μετάλλου με πολυμερές, κεραμικού με πολυμερές, κεραμικού με κεραμικό ή πολυμερές με πολυμερές.

1.2 Συστατικά συνθέτων υλικών

1.2.1 Πολυμερικές μήτρες

Ο ορισμός της μήτρας σε ένα σύνθετο υλικό μπορεί να δοθεί λαμβάνοντας υπ' όψη το ρόλο της στο υλικό. Η μήτρα αποτελεί το συνδετικό μέσο που περικλείει το πιο σημαντικό στοιχείο του συνθέτου υλικού, δηλαδή το μέσο ενίσχυσης, μεταφέροντας το φορτίο σε αυτό. Μπορεί να θεωρηθεί όμως και ως η πρωτεύουσα φάση του συνθέτου που είναι συνδεδεμένη με τη δευτερεύουσα φάση (την ενίσχυση).

Ο πρώτος ορισμός είναι και ο πιο διαδεδομένος γιατί στα περισσότερα σύνθετα υλικά χρησιμοποιείται μια μήτρα με σχετικά χαμηλές αντοχές, όπως ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές. Η αντοχή σε τέτοια σύνθετα οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στο μέσο ενίσχυσης, και για λόγους υψηλής απόδοσης είναι επιθυμητή η μεγιστοποίηση της περιεκτικότητας του συνθέτου στο τελευταίο. Σύμφωνα λοιπόν με αυτήν την προσέγγιση, κυρίαρχης σημασίας είναι η βελτίωση των χαρακτηριστικών κατεργασίας της μήτρας και της συνάφειας της με το μέσο ενίσχυσης, ενώ μικρότερης αξίας είναι οι βελτιώσεις στις ιδιότητες δομής του συνθέτου που σχετίζονται με τη μήτρα.

Ο λιγότερο σημαντικός ρόλος της δομής της μήτρας στη λειτουργία της ως συνεκτικού μέσου δεν πρέπει να επισκιάζει την ανάγκη της διατήρησης της δομικής της ακεραιότητας, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου η διεπιφανειακή (μήτρας-μέσου ενίσχυσης) αντοχή σε διάτμηση και εφελκυσμό μπορούν να αποδειχθούν κρίσιμες. Η σημασία της ακεραιότητας της μήτρας γίνεται εμφανής όταν ληφθεί υπ' όψη το γεγονός ότι οι συνεχείς ίνες που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο ως μέσα ενίσχυσης δεν παραμένουν άθικτες υπό συνήθη καταπόνηση. Έτσι, μικρές ατέλειες οδηγούν σε τοπικές αστοχίες. Οι αστοχίες αυτές δεν θα εξασθενήσουν σημαντικά την ικανότητα ανάληψης φορτίου από το σύνθετο υλικό, εφόσον τα φορτία μπορούν να μεταφερθούν αποτελεσματικά, μέσω της μήτρας, σε άλλες ίνες.

Οι εφαρμογές που απαιτούν σημαντικές βελτιώσεις των ιδιοτήτων της μήτρας είναι εκείνες στις οποίες τα υλικά υπόκεινται σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες, κυρίως ως προς την θερμοκρασία. Εφαρμογές που απαιτούν αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως, π.χ., σε πυραύλους, απαιτούν για μήτρες υλικά με υψηλό βαθμό θερμικής αντοχής.

Τέλος, η επιλογή της μήτρας για ένα σύνθετο υλικό είναι στενά περιορισμένη όχι μόνο από τις μηχανικές ιδιότητές της άλλα και από το βάρος της. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το βάρος του συνθέτου υλικού χωρίς να θυσιαστεί η δομική ακεραιότητα του, το ποσοστό του υλικού της μήτρας συνήθως διατηρείται στην ελάχιστη τιμή που μπορεί να δώσει επαρκή αντοχή σε διάτμηση και χαμηλό περιεχόμενο σε κενά (φυσαλίδες) [3].

Ιδιότητες της μήτρας

Η μήτρα ως συστατικό του συνθέτου εξυπηρετεί δύο πολύ σημαντικές λειτουργίες. Αφ' ενός διατηρεί την ινώδη φάση στη θέση της, αφ' ετέρου κάτω από τη εφαρμογή δύναμης

παραμορφώνεται και διανέμει την τάση στο υψηλού μέτρου ελαστικότητας ινώδες συστατικό. Η επιλογή της μήτρας για την κατασκευή συνθέτου που θα χρησιμοποιηθεί ως δομικό υλικό περιορίζεται από την απαίτηση ότι η μήτρα θα πρέπει να έχει μεγαλύτερη επιμήκυνση στη θραύση από ότι η ίνα. Επίσης, η μήτρα θα πρέπει να μεταφέρει τις τάσεις στις ίνες και να αλλάζει σχήμα, ώστε να επιταχύνει τη μεταφορά των τάσεων και να ασκεί μόνο εφελκυστική φόρτιση στις ίνες. Εξάλλου, κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας, η μήτρα πρέπει να περικλείει την ινώδη φάση χωρίς υπερβολική συρρίκνωση, η οποία θα μπορούσε να οδηγήσει στη συσσώρευση εσωτερικών τάσεων στις ίνες.

Ο τύπος της μήτρας επηρεάζει συχνά τις χημικές θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες του συνθέτου. Επηρεάζει επίσης τη μηχανική συμπεριφορά του υλικού και συγκεκριμένα τη διαστρωματική αντοχή σε διάτμηση, την αντοχή σε κάμψη και τις αντοχές σε εγκάρσια φόρτιση κατά τον εφελκυσμό, την κάμψη και τη θλίψη. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που η ρητίνη χρησιμοποιείται για μήτρα, είναι αυτή που καθορίζει τη θερμοκρασία λειτουργίας και τις παραμέτρους της παραγωγικής διαδικασίας για την κατασκευή του συνθέτου [3, 2].

Είδη πολυμερικών μητρών

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως μήτρες στα σύνθετα υλικά διαφέρουν ανάλογα με τις επιθυμητές ιδιότητες. Οι κυριότερες κατηγορίες υλικών είναι τα μέταλλα, τα κεραμικά και τα πολυμερή. Ειδικότερα, οι πολυμερικές μήτρες διακρίνονται σε θερμοπλαστικές και θερμοσκληρυνόμενες. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε θερμοπλαστική μήτρα (πολυαιθυλένιο). Παραδοσιακά όμως τα πολυμερή υλικά που χρησιμοποιούνται για μήτρα ινοπλισμένων συνθέτων υλικών είναι οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες. Ο λόγος αυτής της προτίμησης είναι είναι η κατάσταση του υλικού στο στάδιο παρασκευής του συνθέτου και η ευκολία διαβροχής του ενισχυτικού μέσου σε αυτό το στάδιο [3, 2].

1.2.2 Θερμοσκληρυνόμενες μήτρες

Ο όφος θεφμοσκληφυνόμενα αποδίδεται στα πολυμεφή τα οποία στην τελική φάση επεξεφγασίας αποκτούν σταυφοδεσμούς και σχηματίζουν ένα δικτύωμα με την επίδφαση της θεφμότητας. Τα μόφια δηλαδή στο τελικό πφοϊόν συνδέονται σταθεφά με κύφιους δεσμούς μεταξύ τους κι έτσι επιτυγχάνεται τέτοια συνοχή στο πλέγμα, ώστε δεν μποφεί πλέον το πολυμεφές να μεταβεί στην πλαστική κατάσταση με θέφμανση. Τέτοιου είδους δικτυώματα συνιστούν εξαιφετικά κατασκευαστικά υλικά, λόγω της διαστατικής τους σταθεφότητας σε υψηλές θεφμοκφασίες και το υψηλό μέτφο ελαστικότητάς τους. Η παφουσία των σταυφοδεσμών παφεμποδίζει τη πλαστική παφαμόφωση και τον εφπυσμό του υλικού, καθώς αναστέλλει την ελευθεφίας κινήσεως των μακφομοφιακών αλυσίδων. Με αυτόν τον τφόπο η πλαστική παφαμόφφωση του υλικού γίνεται αδύνατη χωφίς τη θφαύση των σταυφοδεσμών. Επίσης, τα υλικά αυτά παφαμένουν αδιάλυτα από τους διαλύτες, που δεν μπορούν να καταστφέψουν τους σταυφοδεσμούς. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή - πλέγματα παρασκευάζονται με την χημική αντίδραση ανάμεσα σε μοριακές μονάδες (μονομερή) που διαθέτουν πολλαπλά σημεία αντίδρασης, ή από πολυμερή, τα μόρια των οποίων συνδέονται μεταξύ τους μέσω πολυδραστικών αντιδραστηρίων. Οι μηχανικές ιδιότητες του προϊόντος εξαρτώνται από τη φύση των μοριακών μονάδων που συνθέτουν το πλέγμα και από την πυκνότητα των σημείων διασταύρωσης. Η δομή του τελικού δικτυώματος καθορίζεται από το είδος των αρχικών αντιδρώντων/πολυμερών/πολυδραστικών αντιδραστηρίων, και από τις συνθήκες δικτύωσης (χρόνος, θερμοκρασία).

Έτσι, για παφάδειγμα, σύνθετα με μήτρα φαινολικής ρητίνης και ενίσχυση από ίνες γυαλιού έχουν πολύ καλή συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες για μεγάλο χρονικό διάστημα (μηδενικό ερπυσμό). Οι ρητίνες μελαμίνης χαρακτηρίζονται από σκληρότητα, καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, αντοχή σε θερμική προσβολή και αντοχή στη φθορά. Η χρήση σιλικόνων ως μήτρα οδηγεί σε σύνθετα με εξαιρετική αντοχή σε θερμική προσβολή και υψηλού επιπέδου ηλεκτρικές (μονωτικές) ιδιότητες. Η εφαρμογή τους, όμως, περιορίζεται λόγω των υποβαθμισμένων μηχανικών τους ιδιοτήτων. Οι πολυεστέρες, λόγω της ποικιλίας της σύστασης τους και των πολλών δυνατών μεθόδων παραγωγής, είναι εύχρηστοι και από τις πιο διαδεδομένες μήτρες σε σύνθετα υλικά. Οι περισσότερες βάρκες και σκάφη κάτω από 20 μέτρα μήκους είναι φτιαγμένες από σύνθετο υλικό με πολυεστερική μήτρα και υαλονήματα ως ενίσχυση.

Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή ως μήτρες είναι οι φαινολικές ρητίνες, οι ρητίνες μελαμίνης και ουρίας, οι σιλικόνες, οι ακόρεστοι πολυεστέρες κλπ. [3, 2].

1.2.3 Θερμοπλαστικές μήτρες

Ο όρος θερμοπλαστικά καλύπτει τα πολυμερή υλικά τα οποία υπό την επίδραση θερμότητας και πίεσης καθίστανται εύπλαστα και ρέουν. Κατ' αυτόν τον τρόπο, τα περισσότερα θερμοπλαστικά μπορούν να μορφοποιηθούν πολλές φορές (ανακύκλωση), αν και η εμφάνιση φαινομένων αποπολυμερισμού μειώνει σε πολλές περιπτώσεις το δυνατό αριθμό των κύκλων μορφοποίησης. Από άποψη δομής, θερμοπλαστικές ιδιότητες παρουσιάζουν τα γραμμικά ή διακλαδωμένα πολυμερή, στα οποία μία αύξηση της θερμοκρασίας ή η επίδραση ενός διαλύτη επιτρέπει μια σημαντική αναβάθμιση της κινητικότητας των μακρομορίων, ώστε να επιτρέπεται τελικά μια πλήρης ανεξαρτησία κινήσεως του ενός σε σχέση με το άλλο. Με άλλα λόγια, ανάμεσα στα μακρομόρια των θερμοπλαστικών πολυμερών δεν υπάρχουν χημικοί δεσμοί και οι θερμικές κινήσεις τους είναι αρκετές ώστε να παρουσιάζονται ως τήγματα σε υψηλές θερμοκρασίες. Σε αυτές τις θερμοκρασίες, λοιπόν, γίνονται οι διεργασίες μορφοποίησής τους σε χρήσιμα προϊόντα. Σε αυτές τις θερμοκρασίες, στην κατάσταση τήγματος, γίνεται και η παρασκευή των συνθέτων υλικών που χρησιμοποιούν τα θερμοπλαστικά πολυμερή ως μήτρα.

Τα σύνθετα υλικά θερμοπλαστικής πολυμερικής μήτρας παρουσιάζουν καλές μηχα-

νικές ιδιότητες. Συγκεκριμένα έχουν μεγάλες ενέργειες θραύσης, γιατί έχουν διαθέσιμο ελεύθερο όγκο που απορροφά την ενέργεια που συνδέεται με μετάδοση ρωγμής. Γενικά τα υλικά αυτής της κατηγορίας οφείλουν την αντοχή και την ακαμψία τους στις ιδιότητες των μονομερών, από τα οποία παρασκευάστηκαν, και στο μεγάλο μοριακό βάρος τους, και όχι στη δημιουργία ενός πλέγματος (cross-linking).

Όλα τα θερμοπλαστικά πολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μήτρες. Από πλευράς όμως βιομηχανικής παραγωγής χρησιμοποιούνται ορισμένα πολυμερή τα οποία επιδέχονται ενίσχυση και παρουσιάζουν δυνατότητες εφαρμογής ως κατασκευαστικά υλικά. Ανάμεσα στα θερμοπλαστικά πολυμερή που χρησιμοποιούνται ως μήτρες είναι το πολυστυρένιο υψηλής αντοχής σε κρούση (High Impact Polystyrene – HIPS), το πολυ-(μεθακρυλικό μεθύλιο) (PMMA), το συμπολυμερές ακουλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου (ABS), το πολυπροπυλένιο (PP), το πολυαιθυλένιο (PE) κ.α.

Όσον αφορά τις εφαρμογές τους ως δομικά υλικά, τα θερμοπλαστικά πολυμερή συγκεντρώνουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες, όπως η μεγάλη διάρκεια ζωής τους, η δυνατότητα ανακύκλωσης, και οι ευκολότερες διεργασίες μορφοποίησής τους. Στα μειονεκτήματα τους συγκαταλέγονται οι περιορισμοί στις μεθόδους παραγωγής, το υψηλό ιξώδες του τήγματος στις διεργασίες μορφοποίησης, οι υψηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται, ο ερπυσμός που μπορεί να παρουσιάσουν κ.α. [3].

1.2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα θερμοπλαστικής μήτρας

Τα περισσότερα σύνθετα υλικά με πολυμερική μήτρα και συνεχείς ίνες έχουν σήμερα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές ως μήτρα. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο λόγος είναι ότι τα (ρευστά) συστατικά της μήτρας έχουν χαμηλό ιξώδες πριν τον σχηματισμό του δικτυώματος (πολυμερισμό) και μπορούν έτσι να διαβρέξουν εύκολα τις ενισχυτικές ίνες. Το βασικό τους μειονέκτημα, όμως, είναι ότι ο πολυμερισμός τους, και το υλικό, γίνεται με τη μορφοποίηση του τελικού προϊόντος. Αυτό επιβάλλει αρκετούς περιορισμούς στη μορφή και πολυπλοκότητα του προϊόντος και στη μέθοδο παρασκευής. Επίσης η ανακύκλωση του υλικού είναι πολύ δύσκολη [2].

Τα σύνθετα υλικά με θερμοπλαστική μήτρα και κοντές ίνες γυαλιού είναι ευρέως διαδεδομένα, γνωστά και ως glass fibre reinforced plastics (πλαστικά ενισχυμένα με υαλόνημα — GFRP). Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται οι ίδιες διεργασίες που χρησιμοποιούνται και για τη μορφοποίηση των απλών θερμοπλαστικών (εκβολή, χύτευση με έγχυση, πρέσα κ.λπ.). Τα υλικά αυτά είναι ανακυκλώσιμα, καθώς, μετά τη χρήσιμη ζωή των αντικειμένων, το υλικό μπορεί να ξανατηχθεί και να ξαναμορφοποιηθεί [5].

Το κύριο μειονέκτημα των θερμοπλαστικών πολυμερών ως μήτρα είναι το υψηλό τους ιζώδες. Αυτό δυσκολεύει τον εμποτισμό των δεσμίδων των ινών. Για τον εμποτισμό πρέπει να ελαχιστοποιηθεί η διαδρομή της ροής για το τήγμα του πολυμερούς με το να φέρουμε τα συστατικά πολύ κοντά μεταξύ τους πριν την τήξη, π.χ. με το στοίβαγμα εναλλασσομένων στρωμάτων φύλλου πολυμερούς και ινών, με την χρήση σκόνης (αλεσμένου) πολυμεξούς, ή με την ανάμιξη των ινών του ενισχυτικού υλικού με ίνες του πολυμεξούς. Σύνθετα υλικά με συνεχείς ίνες και θερμοπλαστική μήτρα χρησιμοποιούνται λιγότερο από αυτά με θερμοσκληρυνόμενη μήτρα. Έχουν όμως αρκετά πλεονεκτήματα:

- Γρήγορη παρασκευή τελικού προϊόντος γιατί μπορεί να γίνει χρήση προκατασκευασμένου φύλλου.
- Η ολική παρασκευή του υλικού είναι φιλικότερη προς το περιβάλλον γιατί ο πολυμερισμός έχει γίνει στο εργοστάσιο παραγωγής όπου οι συνθήκες ελέγχου είναι ποιο εύκολες. Οι μόνες διεργασίες που απαιτούνται είναι η θέρμανση, ροή υπό πίεση και ψύξη που δεν περιλαμβάνουν ρύπους.
- Δυνατότητα συγκόλλησης (συνένωσης) κομματιών του υλικού με απλή θέρμανση μετά τη παρασκευή του.
- Το σύνθετο υλικό που παρασκευάζεται είναι εύκολα ανακυκλώσιμο.
- Δυνατότητα να δίνεται η τελική μορφή του προϊόντος σε στάδιο μεταγενέστερο αυτού της παρασκευής του υλικού.

Στη παρούσα εργασία έγινε χρήση φύλλου πολυμερούς για να αντιμετωπισθεί το υψηλό ιξώδους και να επιτευχθεί η κατάλληλη διαβροχή.

1.3 Πολυαιθυλένιο

Το πολυαιθυλένιο είναι σήμερα το πολυμερές με την ευρύτερη εφαρμογή στην παγκόσμια αγορά. Είναι εμπορικά διαθέσιμο σε μεγάλο αριθμό τύπων και ποιοτήτων, σε τρόπο που να καλύπτονται οι απαιτήσεις ενός ευρύτατου φάσματος εφαρμογών [2]. Κατά τη προδιαγραφή ASTM D 1248 οι βασικοί τύποι πολυαιθυλενίου (PE) είναι:

- Τύπος 1: ΡΕ χαμηλής πυκνότητας (low density polyethylene LDPE) ή διακλαδωμένο ΡΕ. Πυκνότητα από 0.91 έως 0.925 g/cm³.
- Τύπος 2: ΡΕ μέσης πυκνότητας (medium density polyethylene, MDPE). Πυκνότητα από 0.926 έως 0.94 g/cm³.
- Τύπος 3: ΡΕ υψηλής πυκνότητας (high density polyethylene, HDPE) ή γραμμικό. Πυκνότητα από 0.941 έως 0.96 g/cm^3 .

Οι παραπάνω τύποι αναφέρονται σε πολυμερές συνήθους μοριακού βάρους (M_w: 100000 - 300000). Οι διαφορετικές πυκνότητες των παραπάνω τύπων πολυαιθυλενίου αντανακλούν τις διαφορετικές τους κρυσταλλικότητες [3]. Το HDPE έχει τον υψηλότερο

βαθμό κουστάλλωσης ενώ το LDPE τον χαμηλότεοο. Οι διαφορετικοί βαθμοί κουστάλλωσης προέρχονται από τις διαφορές στη μοριακή δομή των τριών τύπων. Το LDPE έχει πολλούς μακριούς κλάδους στη μοριακή αλυσίδα. Έτσι δύσκολα μπορεί αυτή η αλυσίδα να διπλώσει και να δημιουργήσει κρυστάλλους κατά την ψύξη από το τήγμα. Το HDPE δεν έχει μακριούς κλάδους στην αλυσίδα και έτσι κρυσταλλώνεται πιο εύκολα. Το πολυαιθυλένιο μεσαίας πυκνότητας έχει συνήθως μόνο κοντούς κλάδους (μήκους 3 - 6 ατόμων άνθρακα) και ενδιάμεση κρυσταλλικότητα. Το τελευταίο λέγεται συνήθως και LLDPE (Linear Low Density Polyethylene).

Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LDPE).

1.3.1 Βιομηχανική παραγωγή

Το ΡΕ παφάγεται με πολυμεφισμό του αιθυλενίου. Ο πολυμεφισμός ακολουθεί τόσο το μηχανισμό ελευθέφων φιζών, όσο και ετεφογενούς κατάλυσης. Από πλευφάς τεχνικής εφαφμόζονται τόσο πολυμεφισμοί μάζας όσο και διαλύματος και γαλακτώματος. Η πυκνότητα του ΡΕ είναι βασικά συνάφτηση της μεθόδου παφαγωγής. Οι συνηθισμένες μέθοδοι παφαγωγής μποφούν να διαχωφιστούν σε:

- 1. Υψηλής πίεσης
 - Πολυμερισμός μάζας
 - Πολυμερισμός γαλακτώματος
- 2. Χαμηλής πίεσης
 - Μέθοδος Ziegler
 - Μέθοδος Phillips
 - Μέθοδος Standard Oil

Οι μέθοδοι υψηλής πίεσης ακολουθούν μηχανισμό ελεύθερων ριζών και δίνουν ΡΕ χαμηλής πυκνότητας (LDPE). Οι μέθοδοι χαμηλής πίεσης ακολουθούν μηχανισμούς ετερογενούς κατάλυσης και δίνουν ΡΕ υψηλής πυκνότητας (HDPE). Τα τελευταία είκοσι χρόνια έχουν αναπτυχθεί τεχνικές πολυμερισμού που χρησιμοποιούν στερεοειδικούς οργανομεταλλικούς καταλύτες και παράγουν πολυαιθυλένια με ελεγχόμενη μοριακή δομή και διακλαδώσεις

1.3.2 Χαρακτηριστικά και εφαρμογές

Το PE άρχισε να εφαρμόζεται σαν ειδικό διηλεκτρικό υλικό με ιδιαίτερη αξία σαν μονωτικό υλικό για υψηλές συχνότητες. Με την αυξανόμενη διαθεσιμότητα του πολυμερούς επεκτάθηκε η εφαρμογή του σε χημικές εγκαταστάσεις και σωλήνες ύδρευσης. Τα χαρακτηριστικά του PE που το οδήγησαν σε εκτεταμένες εφαρμογές μπορούν να συνοψιστούν στα εξής [3]:

- Εύκολη επεξεργασία
- Άριστες ηλεκτρικές ιδιότητες
- Άριστη χημική αντοχή
- Ευκαμψία σε χαμηλές θερμοκρασίες
- Απουσία οσμής και τοξικότητας
- Ικανοποιητικά χαμηλή διαπερατότητα υδρατμών
 Τα χαρακτηριστικά που περιορίζουν την εφαρμογή του PE είναι:
- Χαμηλό σημείο μαλάκυνσης
- Η ευπάθεια των τύπων χαμηλού μοριακού βάρους σε ρηγμάτωση, υπό μηχανική καταπόνηση
- Η ευπάθεια στην οξείδωση
- Η αδιαφάνεια του υλικού σε μεγάλο πάχος
- Η κακή αντοχή σε τριβή
- Η χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό
- Η υψηλή διαπερατότητα αερίων

Σε πολλές περιπτώσεις αυτοί οι περιορισμοί δεν είναι σοβαροί, ενώ σε άλλες η ορθή επιλογή του πολυμερούς, των προσθέτων και των συνθηκών επεξεργασίας μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Ο ευρύτερος τομέας κατανάλωσης του PE είναι η παραγωγή λεπτών φύλλων. Ανεπτυγμένος είναι επίσης ο τομέας παραγωγή αντικειμένων σε μόρφωση με έγχυση για είδη οικιακής χρήσης, παιχνίδια και εξαρτήματα ηλεκτρικών και χημικών εγκαταστάσεων. Σημαντική ακόμα είναι η συμμετοχή του PE στον τομέα της συσκευασίας υγρών. Επίσης εφαρμόζεται ως ηλεκτρικός μονωτής στις επικαλύψεις συρμάτων και καλωδίων.

Παρ' ότι το πολυαιθυλένιο είναι ακατάλληλο για μεταφορά θερμού νερού, οι σωλήνες από ΡΕ έχουν βρει σημαντικές εφαρμογές. Η αντοχή του σε διάρρηξη από παγωμένο νερό και η ασφάλεια που παρέχει από πλευράς υγιεινής οδήγησαν το ΡΕ σε ευρεία εφαρμογή σε σωλήνες ψυχρού νερού και στην άρδευση.

Τα πολυαιθυλένια χρησιμοποιούνται συχνά σε μορφή φύλλων. Τα πολυμερικά φύλλα παρασκευάζονται από θερμοπλαστικά πολυμερή (π.χ. πολυαιθυλένιο χαμηλής, μέσης

και υψηλής πυκνότητας). Μερικές σημαντικές εφαρμογές είναι στη βιομηχανία τυποποίησης, και προϊόντα όπως σακούλες σκουπιδιών, σακούλες μεταφοράς, λεπτά φύλλα για τυποποίηση, φιλμ συσκευασίας (θερμοσυρρικνούμενο ή όχι), για κάλυψη θερμοκηπίων, φύλλα για απολύμανση εδάφους, για κάλυψη λιμνοδεξαμενών, κ.α.

1.3.3 Παραγωγή φιλμ από πολυαιθυλένιο (LDPE)

Το φιλμ που χρησιμοποιείται για την κάλυψη των θερμοκηπίων στην Κρήτη, και το οποίο χρησιμοποιήσαμε στην παρούσα εργασία για να παρασκευάσουμε τα σύνθετα υλικά μορφοποιείται με τη μέθοδο εκβολής με εμφύσηση (Film Blowing). Αυτή είναι μια γρήγορη και οικονομική μέθοδος για τη παραγωγή πολυμερικών φιλμ που χρησιμοποιείται και στα Πλαστικά Κρήτης και παράγει πολυμερικά φύλλα τα οποία είναι λεπτά και διαξονικά προσανατολισμένα [6]. Ο διαξονικός προσανατολισμός των φύλλων είναι ένα από τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της διαδικασίας γιατί μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά σταθερότητας του παραγόμενου φιλμ.

Για να επιτευχθεί αυτή η σταθερότητα το πολυμερικό φιλμ εκβάλλεται συνεχώς προς τα πάνω μέσα από μία δακτυλιοειδή μήτρα εκβολής (die) με στενό διάκενο (gap). Μέσα και γύρω από το φιλμ που δημιουργείται διοχετεύεται αέρας για το τέντωμα και την ψύξη του φιλμ, οπότε αυτό στερεοποιείται σε κάποια απόσταση από το επίπεδο εκβολής του, η οποία ονομάζεται γραμμή ψύξης (freeze line).

Στο πάνω μέρος του το φιλμ έλκεται και συλλέγεται από περιστρεφόμενους κυλίνδρους. Η γραμμική ταχύτητα των κυλίνδρων ισούται με την ταχύτητα συλλογής του φιλμ. Οι κύλινδροι αυτοί είναι σχεδόν εφαπτόμενοι και δημιουργούν έτσι ένα αεροστεγώς σφραγισμένο ασκό (Bubble) από το πολυμερικό φιλμ. Η πίεση στο εσωτερικό του ασκού καθορίζεται από τη μάζα του διοχετευόμενου αέρα.

Η θεφμοκρασία του πολυμερικού τήγματος είναι περίπου 475-525 K στη μήτρα εκβολής (die) και έχει πέσει κατά 100 K από την αρχική θεφμοκρασία όταν φθάσει τη γραμμή ψύξης. Η ακτίνα του ασκού παραμένει σταθερή πάνω από τη γραμμή ψύξης ενώ η θεφμοκρασία του πέφτει άλλους 100 K μέχρι τη τελική περισυλλογή του φιλμ. Στο φιλμ δημιουργούνται κρυσταλλικές δομές στο LDPE, που σχετίζονται με το ρυθμό ψύξης. Αυτό αλλάζει τον δείκτη διάθλασης του φιλμ στη γραμμή ψύξης και μπορεί να παρατηρηθεί με γυμνό μάτι. Πάνω από τη γραμμή ψύξης δεν έχει παρατηρηθεί σημαντική παραμόρφωση. Στο σχήμα 1.2 φαίνεται η διαδικασία παραγωγής φύλλων LDPE με τη μέθοδο αυτή, καθώς και η μορφή του ασκού κατά τη διεργασία.

1.3.4 Η ανακύκλωση του πολυαιθυλενίου

Το πολυαιθυλένιο, ως θερμοπλαστικό μπορεί να ανακυκλωθεί από τα απορρίμματα μετά τη χρήση με δευτερογενή ανακύκλωση: τα πλαστικά απορρίμματα πλένονται για να απομακρυνθούν οι ρύποι/ακαθαρσίες που πιθανόν να περιέχουν, κονιορτοποιούνται, λιώνονται και ανα-μορφοποιούνται σε νέα πλαστικά προϊόντα [7, 8].



Σχήμα 1.2: Η διεργασία της εκβολής φιλμ με εμφύσηση [6].

Η δευτερογενής ανακύκλωση χρησιμοποιεί κλασσική δοκιμασμένη τεχνολογία για τα πλαστικά που ευρίσκονται σε μεγάλες ποσότητες, όπως τα πολυαιθυλένια. Τεράστιες ποσότητες πολυαιθυλενίου χρησιμοποιείται σε πλαστικές σακούλες και σε μπουκάλια υγρών σαπουνιών και τροφίμων. Το υλικό αυτό ανακυκλώνεται σε σακούλες σκουπιδιών, σωλήνες, και σακούλες super market, φιλμ κάλυψης θερμοκηπίων κ.λπ. Η δευτερογενής ανακύκλωση μπορεί να εφαρμοσθεί μόνο σε θερμοπλαστικά πολυμερή – όχι σε θερμοσκληρυνόμενα!

Από τεχνολογική άποψη υπάρχουν δύο επιφυλάξεις για αυτήν τη μορφή ανακύκλωσης: Πρώτον τα πολυμερή (πολυαιθυλένια) είναι οργανικά υλικά και η αναθέρμανσή τους για την δευτερογενή ανακύκλωση μπορεί να οδηγήσει σε μερική αποσύνθεση (υποβάθμιση με μείωση του μέσου μοριακού βάρους) και χειροτέρευση των ιδιοτήτων τους. Δεύτερον, διαφορετικά πολυμερή δεν μπορούν να αναμειχθούν εύκολα και τα απλά κράματά τους παρουσιάζουν χειρότερες ιδιο-Γητες από τα συστατικά τους. Καθώς υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι πολυμερών που χρησιμοποιούνται (και απορρίπτονται) το πολυαιθυλένιο πρέπει να μπορεί να διαχωρισθεί και να ταυτοποιηθεί με ακρίβεια, ταχύτητα και χαμηλό κοστος, ώστε η δευτερογενής ανακύκλωσή του να είναι οικονομικά κερδοφόρα ως διεργασία.

Το πρόβλημα του διαχωρισμού είναι πολύ μικρότερο σε συγκεκριμένες ειδικές πε-

ριπτώσεις απορριμμάτων. Π.χ. τα περισσότερα μπουκάλια νερού και αναψυκτικών είναι φτιαγμένα από PET. Αν υπάρχει δυνατότητα συλλογής των μπουκαλιών αυτών ξεχωριστά, τότε ένα επόμενο στάδιο διαλογής δεν χρειάζεται και το ανακυκλωμένο προϊόν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έχει για, π.χ., κατασκευή πολυεστερικών ινών και fleece. Παρομοίως, τα (ημι)διαφανή φιλμ που σκεπάζουν τα θερμοκήπια στην Κρήτη είναι αποκλειστικά φτιαγμένα από LDPE. Η συλλογή τους, λοιπόν, μετά το τέλος της χρήσιμης ζωής τους ξεχωριστά από τα άλλα γεωργικά απορρίμματα γίνεται ευρέως. Η μόνη διεργασία που χρειάζεται κατόπιν για την ανακύκλωση τους και τη δημιουργία νέου LDPE υλικού είναι ο καθαρισμός τους. Το νέο αυτό (ανακυκλωμένο) LDPE μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε νέο φιλμ, σωλήνες, κ.λπ., και ως μήτρα για σύνθετα υλικά.

Το χρησιμοποιημένο LDPE φύλλο από τα θερμοκήπια έχει ακόμη ένα πλεονέκτημα: μπορεί να χρησιμοποιηθεί μετά το πλύσιμο ως έχει (ως φιλμ) μαζί με υαλοϋφάσματα για την παρασκευή συνθέτου υλικού με τη μέθοδο της συμπίεσης που περιγράφεται στο κεφάλαιο 2.3.

1.4 Μέσα ενίσχυσης

Τα μέσα ενίσχυσης είναι στερεά υλικά σε διάφορες μορφές που ενσωματώνονται στη μάζα του πολυμερούς προκειμένου να αυξηθούν οι μηχανικές ιδιότητες. Τα μέσα ενίσχυσης μπορεί να βρίσκονται σε μορφή κόκκων, νιφάδων, ασυνεχών ινών, συνεχών ινών και κυψελωδών φύλλων κ.α. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν:

1.4.1 Σύνθετα υλικά με τεμαχίδια

Αυτά τα υλικά αποτελούνται από τεμαχίδια ενός ή και πολλών υλικών που βρίσκονται διάχυτα σε μια μήτρα διαφορετικού υλικού. Τα σωματίδια αυτά έχουν ασυνεχή μορφή και μικρές διαστάσεις. Μπορεί να είναι μεταλλικά η αμέταλλα. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις τέτοιων υλικών είναι το σκυρόδεμα (αμέταλλα σωματίδια σε αμέταλλο υλικό), τα καύσιμα των πυραύλων που αποτελούνται από σκόνη αλουμινίου και άλλες οξειδωτικές ουσίες μέσα σε εύκαμπτη οργανική μήτρα, χρώματα και κόλλες με αιωρήματα μετάλλων, κράματα μετάλλων και τέλος η περίπτωση αμέταλλων σωματιδίων όπως κεραμικά υλικά σε μεταλλικές μήτρες,που κυρίως προορίζονται για κατασκευή εργαλείων.

1.4.2 Σύνθετα υλικά με δομή πολυστρώματος

Τα πολυστρώματα αποτελούνται από στρώματα δύο τουλάχιστον διαφορετικών υλικών σε επαφή και συνεργάζονται μεταξύ τους. Είναι διφασικά υλικά και αποτελούνται από δύο συνεχείς φάσεις, μια του πολυμερούς και μια του μέσου ενίσχυσης, που εναλλάσσονται κανονικά, η μία επί της άλλης, στη κατά το ύψος οργάνωση του υλικού. Οι ιδιότητες που βελτιώνονται μέσω ενός πολυστρώματος είναι η αντοχή στη θραύση, η ακαμψία, οι ειδικές ιδιότητες, η αντοχή στη διάβρωση, η αντοχή στην τριβή, η αντοχή σε εφελκυσμό κ.α. Βέβαια, οι ιδιότητες κάθε κατασκευής επηρεάζονται από τις ιδιότητες των υλικών που την αποτελούν.

1.4.3 Σύνθετα υλικά με ινώδη μέσα ενίσχυσης

Από τις διάφορες μορφές ενίσχυσης, αυτή της ίνας δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την αύξηση των μηχανικών αντοχών. Έτσι εξηγείται και η μεγάλη προτίμηση προς τα ινώδη μέσα ενίσχυσης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν, σε αυτή την κατεύθυνση οι αποκαλούμενες ίνες υψηλής τεχνολογίας, οι οποίες διαθέτουν πολύ υψηλή αντοχή και πολύ υψηλή ακαμψία σε συνδυασμό με χαμηλή πυκνότητα.

Μία διάκριση των ινωδών συνθέτων στηρίζεται στο λόγο μήκους προς διάμετρο (l/d) των ινών, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως [9]:

- Συνεχείς μεγάλου μήκους ίνες (continuous fibers). Όταν $l/d \ge 100$.
- Ασυνεχείς ή κοντές ίνες (discontinuous fibers). Όταν l/d < 100
- Νημάτια ή τριχίτες (whiskers). Με d < 1 μm και l περίπου ίσο με 100 μm (λεπτοί μονοκρύσταλλοι κεραμικού υλικού).

Βάση του προσανατολισμού των ινών υπάρχουν δύο γενικές κατηγορίες ινοπλισμένων σύνθετων υλικών [3].

- Προσανατολισμένα (directional), των οποίων οι ίνες είναι συνεχείς και έχουν όλες την ίδια διεύθυνση (Σχήμα 1.3α).
- Μη προσανατολισμένα (random), των οποίων οι ίνες είναι τυχαία τοποθετημένες στο συνδετικό υλικό (Σχήμα 1.3β).

Οι ίνες των σύνθετων υλικών τοποθετούνται με διάφορους τρόπους ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής. Η ανάπτυξη της κατηγορίας των σύνθετων υλικών με ενίσχυση τύπου υφάσματος προέκυψε εξαιτίας της απλούστερης διαδικασίας κατασκευής τους. Βάσει του τρόπου τοποθέτησης (ύφανση) και του συνδυασμού των ινών στο συνδετικό υλικό, τα σύνθετα υλικά ινών κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες [2]:

- Υφασμένες ίνες (woven mat), τα οποία αποτελούν συνεχές σώμα χωρίς επιμέρους στρώματα, οπότε και δε παρουσιάζουν πιθανότητες αποκόλλησης (Σχήμα 1.3γ).
 Η γωνία ανάμεσα στις δύο κυρίαρχες κατευθύνσεις των νημάτων είναι 90⁰.
- Συνεχείς ίνες πλεγμένες με διάφορους τρόπους που χρησιμοποιούνται και στην υφαντουργία. Ο προσανατολισμός του νήματος αλλάζει συνεχώς (knitted fabrics)
- Μη υφασμένα συνεχή νήματα χωρίς προσανατολισμό (non-woven mats)

- Στρώματα ασυνεχών ινών (chopped strand fiber), τα οποία έχουν κοντές ίνες διάσπαρτες μέσα σε συνδετικό υλικό και μη προσανατολισμένες (Σχήμα 1.3δ). Οι μηχανικές τους αντοχές είναι κατά κανόνα κατώτερες των αντίστοιχων με συνεχείς ίνες.
- Υβριδικά (hybrid), τα οποία αποτελούνται είτε από συνεχείς και ασυνεχείς ίνες (Σχήμα 1.3ε) είτε από περισσότερους του ενός τύπους ινών (π.χ. ύαλο και γραφίτη).
 Χρησιμοποιούνται όταν το σύνθετο υλικό ινών μόνο του δεν έχει τις επιθυμητές ιδιότητες.
- Συνεχών ινών (continuous fiber) όπου στρώματα συνεχών ινών–ρητίνης τοποθετούνται στην επιθυμητή διεύθυνση και συνδέονται αποτελώντας ένα σώμα (Σχήμα 1.3στ). Παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή, αλλά αποκόλληση μεταξύ των στρωμάτων είναι πιθανή.

Μία κατηγοριοποίηση των συνθέτων υλικών με ενίσχυση υφάσματος γίνεται αρχικά σε δισδιάστατα, 2D, και τρισδιάστατα, 3D, ανάλογα με το αν η υφασμένη δομή απουσία της μήτρας μπορεί να παραλάβει φορτία σε δύο ή τρεις διαστάσεις. Στη συνέχεια τα 2D



Σχήμα 1.3: Τύποι συνθέτων υλικών με ινώδη μέσα ενίσχυσης [10].



Σχήμα 1.4: Είδη υαλοϋφασμάτων



Σχήμα 1.5: Δισδιάστατη απλή ύφανση (2D plain).

χωρίζονται ανάλογα με το πρότυπο της ύφανσης σε plain, satin, triaxial, ή uniweave, ενώ τα 3D ανάλογα με τη γωνία ενίσχυσης στην z-διεύθυνση [12].

Για την παραγωγής του υφάσματος, το πρώτο στάδιο είναι ο σχηματισμός των δεσμών ινών (yarns). Ακολούθως οι δεσμίδες ινών υφαίνονται ώστε να σχηματισθεί η δομή υφάσματος. Η ομάδα ινών κατά το μήκος της ύφανσης ονομάζεται στημόνι (warp) ενώ κατά το πλάτος ονομάζεται υφάδι (weft ή fill). Τελικά το σύνθετο μορφοποιείται μετά την εμβάπτιση της ενίσχυσης στο μητρικό υλικό σε ειδικά καλούπια. Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήσαμε ινώδη μέσα ενίσχυση και ειδικότερα υαλοϋφάσματα (E-glass 2-D woven fibers) με απλή (plain) ύφανση 1.5.

1.5 Υλικά ινών

Οι τρεις συνηθέστεροι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται σε σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών είναι τα υαλονήματα, τα ανθρακονήματα και οι ίνες του πολυαραμιδίου (Kevlar ή Twaron). Προκειμένου οι ίνες να προσφέρουν ικανοποιητική ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας, το υλικό κατασκευής τους επιλέγεται, έτσι ώστε να παρουσιάζει υψηλό μέτρο ελαστικότητας (Ε), υψηλή τάση θραύσης σε εφελκυσμό (σ^{*}), μεγάλη ακαμψία (stiffness), χαμηλή δυσθραυστότητα (toughness) και επιπλέον να έχει χαμηλή πυκνότητα (ρ). Τα περισσότερα ενισχυτικά υλικά βασίζονται κυρίως σε στοιχεία που βρίσκονται στη 2η και 3η περίοδο του Περιοδικού Συστήματος. Στα προηγμένα σύνθετα υλικά, οι ενισχυτικές ίνες είναι κατασκευασμένες είτε από ανόργανα υλικά (γυαλί, άνθρακας, μέταλλα, κεραμικά) είτε από οργανικά υλικά (πολυμερή).

1.5.1 Ίνες γυαλιού

Τα υαλονήματα εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στο εμπόριο το 1939. και η χρήση τους συνεχίζεται επιτυχώς μέχρι και σήμερα. Είναι από τους πλέον διαδεδομένους τύπους



Σχήμα 1.6: Η άμορφη δομή του κοινού γυαλιού

ενισχυτικών ινών στα σύνθετα πολυμερικής μήτρας. Η δομική τους βάση είναι τα οξείδια πυριτίου, ασβεστίου, βορίου, αλουμινίου, κ.α. . Θεωρούνται από τα πιο φθηνά ενισχυτικά υλικά. Χαρακτηριστική δομή του γυαλιού παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.6 [13].

Οι ίνες γυαλιού παράγονται με μηχανικό τρόπο από ύαλο που τήκεται. Το κύριο χαρακτηριστικό της υάλου είναι ότι δεν παρουσιάζει ούτε πλήρως κρυσταλλική δομή, αλλά ούτε και ιδιότητες ρευστού. Ανάλογα με το είδος της εφαρμογής για το οποίο αναπτύχθηκαν, υπάρχουν έξι διαφορετικοί τύποι υαλονημάτων με μικρές διαφορές στη χημική τους σύσταση, τα τρία από τα οποία είναι τα κάτωθι. Οι κύριες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των υάλων πυριτίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.2.

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

Οι δύο τύποι που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση κατασκευών είναι η ὑαλος-Ε και η ὑαλος-S. Αν και, ὁπως φαίνεται στον Πίνακα 1.3, η ὑαλος-S ἐχει μεγαλὑτερη αντοχή και μέτρο ελαστικότητας από την ὑαλο-Ε, λόγω του υψηλοὑ της κόστους ἐχει η ὑαλος-S περιορισμένη εφαρμογή σε σχέση με την ὑαλο-Ε. Τα βασικά πλεονεκτήματα των υάλων αυτών είναι το σχετικά χαμηλό κόστος και η υψηλή αντοχή, ενώ στα κὑρια μειονεκτήματα Πίνακας 1.2: Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΥΠΟΣ			
	E	С	s	SiO2 καθαρή
Χημική σύσταση (%)				
SiO ₂	54	60	65	>99,5
Al ₂ 0 ₃	16	25	25	-
B ₂ O ₃	8	-	-	-
CaO	17	9	-	-
MgO	5	б	10	-
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	75	80	84	72
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2100-3400	2500-4400	2800-4800	3500-8800
Πυκνότητα (g/cm³)	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

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού.

Πίναμας 1.3: Ιδιότητες υάλου-Ε μαι υάλου-S [4]

Είδος	Εφελκυστική	Μέτρο	Επιμήκυνση	Πυκνότητα
υαλονήματος	αντοχή	ελαστικότητας	θραύσης	
	(MPa)	(GPa)	(%)	(gr/cm ³)
Ύαλος – Ε	2000-3000	70-75	3.0-4.5	2.54
Ύλαλος – S	3500-4800	85-90	4.5-5.5	2.48

τους εντάσσονται το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας και η μικρή αντοχή τους έναντι φθοράς από τριβή (λύση της συνέχειας της επιφάνειας τους).

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

Οι ίνες υάλου, αν και ανθεκτικές στους περισσότερους διαλύτες, αντιδρούν με ορισμένες αλκαλικές ενώσεις και ισχυρά οξέα. Η ύαλος παρέχει εξαιρετική θερμική και ηλεκτρική μόνωση. Τα φύλλα υάλου έχουν μικρότερη αντοχή σε κόπωση από τα φύλλα άνθρακα ή πολυαραμιδίου, αλλά μεγαλύτερη από τα περισσότερα μέταλλα. Όπως και ο άνθρακας, η ύαλος δεν παρουσιάζει ερπυσμό, είναι όμως ευπαθής σε διάβρωση. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω ιδιότητες επηρεάζονται σημαντικά από τις περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς, και τη μήτρα που επιλέγεται για την παραγωγή του σύνθετου υλικού.



Σχήμα 1.7: Διεργασίες παραγωγής υαλονημάτων [13]

1.5.2 Παραγωγή ινών γυαλιού

Η παραγωγή ινών γυαλιού γίνεται με εκβολή τήγματος γυαλιού μέσα από μήτρα με διάτρητο πυθμένα (Σχήμα 1.7) και περιλαμβάνει τις ακόλουθες φάσεις:

- 1. Η πρώτη ύλη τοποθετείται σε δεξαμενή, όπου και τήκεται.
- Το τήγμα τροφοδοτείται σε σειρά κυλινδρικών δοχείων με διάτρητο πυθμένα (διάμετρος οπών 1-2 mm). Το γυαλί ρέει μέσα από τις οπές του πυθμένα υπό την επίδραση της βαρύτητας.
- Οι παραγόμενες ίνες συγκεντρώνονται σε ένα σύνολο και τανύζονται μηχανικά μέχρι να αποκτήσουν την κατάλληλη διάμετρο και ακολουθεί η ψύξη τους.
- 4. Ακολούθως οι ίνες διέρχονται από ιμάντα που επιβάλλει σε αυτές προστατευτικό λιπαντικό συνδετικό υλικό (binder) ή ειδικά κολλοειδή πρόσθετα (sizings) που δρουν ως προστατευτικές επικαλύψεις για την καλύτερη πρόσφυση στη διεπιφάνεια ινών-μήτρας,
- 5. Τέλος περιτυλίσσονται ανά δέσμες γύρω από τύμπανο που περιστρέφεται και τα ρολά ινών υφίστανται ξήρανση πριν υποβληθούν σε οποιαδήποτε περαιτέρω διεργασία μορφής.

1.6. ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΗΤΡΑΣ - ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

1.5.3 Ιδιότητες σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή

Όπως προαναφέρθηκε, οι τυπικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών περιλαμβάνουν το χαμηλό ειδικό βάρος, τον υψηλό λόγο αντοχής προς βάρος και τον υψηλό λόγο μέτρου ελαστικότητας προς βάρος. Επίσης τα περισσότερα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή είναι εξαιρετικά ανθεκτικά σε ηλεκτροχημική διάβρωση.

Ένα άλλο χαφακτηφιστικό των σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμεφή είναι η σχεδόν γφαμμική καμπύλη έντασης – παφαμόφφωσης έως την αστοχία τους. Παφόλο που τα υλικά που συνθέτουν τις μήτφες επιδέχονται πλαστική παφαμόφφωση, οι ίνες γενικά συμπεφιφέφονται μόνο ελαστικά. Καθώς όμως η συμπεφιφοφά του σύνθετου υλικού καθορίζεται κυφίως από τη συμπεφιφοφά των ινών, οι οποίες αποτελούν και τον κύφιο φοφέα μεταφοφάς του φοφτίου, πολύ σπάνια τα ινοπλισμένα πολυμεφή παφουσιάζουν πλαστική παφαμόφφωση η έστω διαφφοή. Αντίθετα η θφαύση είναι η τυπική μοφφή αστοχίας ενός σύνθετου υλικού που καταπονείται από οφιακή τιμή τάσης.

1.6 Διεπιφάνεια μήτρας - ενίσχυσης

Η ανάπτυξη των μηχανικών ιδιοτήτων, στα ενισχυμένα πολυμερή, μέχρι των μεγίστων δυνατών τιμών, είναι δυνατή μόνο όταν εξασφαλίζεται η πλήρης συνεργασία των συστατικών τους [3]. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η πλήρης συνεργασία μεταξύ της μήτρας και του μέσου ενίσχυσης είναι απαραίτητο να επιτυγχάνονται:

- Πλήρης επαφή
- Ανάπτυξη ισχυρού συγκολλητικού δεσμού

Η δυνατότητα για πλήρη επαφή ελέγχεται από την ικανότητα του τήγματος του πολυμερούς να διαβρέξει πλήρως την επιφάνεια του μέσου ενίσχυσης. Αυτή η ικανότητα εξαρτάται από τη διεπιφανειακή τάση μεταξύ των δύο υλικών. Μεταβολή της επιφανειακής τάσεως, ώστε να λάβει τιμές που να πληρούν τις απαιτήσεις για πλήρη διαβροχή, είναι δυνατή με τη χρήση ειδικών τασιενεργών (διαβρέκτες). Αυτά χρησιμοποιούνται στην επιφάνεια του μέσου ενίσχυσης η στη μάζα του τήγματος του πολυμερούς.

Η μη πλήρης επαφή έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία φυσαλίδων αέρα στη μάζα του υλικού με αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής. Η πλήρης διαβροχή επιτυγχάνεται όταν εξαφανισθούν οι φυσαλίδες, που οφείλονται στα σημεία μη επαφής των υλικών, και απαιτεί ένα χρονικό διάστημα για να συμπληρωθεί. Ο ρυθμός διαβροχής είναι συνάρτηση του ιξώδους του τήγματος, της επιφανειακής τάσης, της τυχόν επεξεργασίας και της μορφής της επιφάνειας του μέσου ενίσχυσης.

Η ισχύς του συγκολλητικού δεσμού, που είναι δυνατό να αναπτυχθεί ανάμεσα στη μήτρα και το μέσο ενίσχυσης, εξαρτάται βασικά από τη φύση του. Η ισχυροποίηση του συγκολλητικού δεσμού επιτυγχάνεται με:

- Αύξηση της επιφάνειας επαφής: Πρόκειται για μια επεξεργασία του μέσου ενίσχυσης που έχει ως αποτέλεσμα την τράχυνση της. Ανάλογα με το βαθμό τράχυνσης η αρχικά λεία επιφάνεια αποκτά ένα πολύ μεγαλύτερο ανάπτυγμα.
- Τροποποίηση της επιφάνειας επαφής: Έχει ως σκοπό τη δημιουργία μιας νέας επιφάνειας που μπορεί να αναπτύξει έναν ισχυρότερο συγκολλητικό δεσμό με το πολυμερές.

Σε πολλά σύνθετα, το μέσο ενίσχυσης αποτελείται από ανεξάρτητα στρώματα από ίνες που ενώνονται μεταξύ τους. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να ελεγχθεί όχι μόνο η σύνδεση μεταξύ ίνας-μήτρας αλλά και η σύνδεση μεταξύ των ίδιων των στρωμάτων, μια και έλλειψη καλής σύνδεσης τους μπορεί να προκαλέσουν αστοχία. Για τη αποφυγή του φαινομένου μια λύση είναι η τριαξονική ύφανση που χρησιμοποιείται για να προσανατολίσει τις ίνες, η οποία ταυτόχρονα συγκρατεί τα διάφορα στρώματα των ινών.

1.7 Χρήσεις σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες γυαλιού (GRP, glass reinforcement plastics)

- Ναυπηγική Ο τομέας της ναυπηγικής αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός τομέα όπου τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (GRP, glass reinforcement plastics) 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 [14].
- Μεταφοφές Περίπου 60.000 tn/year GRP σε διάφορες μορφές χρησιμοποιούνται στις χερσαίες μεταφορές στη δυτική Ευρώπη, ενώ στις ΗΠΑ η αντίστοιχη συνολική κατανάλωση GRP στον τομέα των χερσαίων μεταφορών είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη. Ο λόγος της χρήσης των GRP στις χερσαίες μεταφορές οφείλεται κατά ένα μέρος στην μείωση του βάρους και άρα στην εξοικονόμηση ενέργειας (καυσίμων).

Η χρήση ενισχυμένων πλαστικών πλαισίων για την κατασκευή αμαξωμάτων (αυτοκινήτων), περιορίζεται προς το παρόν σε μικρή κλίμακα και ιδιαίτερα για την κατασκευή αμαξωμάτων αγωνιστικών αυτοκινήτων. Εκτός όμως από την παρασκευή αμαξωμάτων, τα GRP χρησιμοποιούνται και για την κατασκευή καμπινών στα φορτηγά αυτοκίνητα, στην κατασκευή προφυλακτήρων και σε πολλά άλλα εξαρτήματα της αυτοκινητοβιομηχανίας [14].

- Ηλεκτφικά είδη Οι ίνες γυαλιού παφάγονται σε διάφορους τύπους. Ένας από αυτούς είναι ο τύπος E-glass, όπου το πφόθεμα Ε αναφέφεται στον όφο electrical. Ο τύπος αυτός έχει κατασκευασθεί ειδικά για ηλεκτφικές εφαφμογές και ιδιαίτεφα για εφαφμογές όπου απαιτείται ηλεκτφική μόνωση. Έτσι, αυτός ο τύπος γυαλιού όταν αναμιχθεί με πλαστική μήτφα, μποφεί να χφησιμοποιηθεί για την κατασκευή ηλεκτφικών εξαφτημάτων πολύπλοκου σχήματος που να είναι ηλεκτφικά μονωμένα. Τέτοια είδη είναι οι ηλεκτφικοί διακόπτες, οι ηλεκτφικοί διανομείς, οι υποδοχείς ηλεκτφικών λαμπτήφων και άλλα πφοϊόντα. Καλωδιακοί αγωγοί σταθεφής διατομής και σχήματος για μόνωση μετασχηματιστών κατασκευάζονται από GRP με τη μέθοδο Pultrusion [15].
- Αντιδιαβρωτικές κατασκευές Εφαρμογές στην παραγωγή κατασκευών ανθεκτικών σε χημική διάβρωση. Γενικά, οι εφαρμογές των GRP στην γεωργία και στην κατασκευή δεξαμενών και σωλήνων για βιομηχανικούς σκοπούς (χημική βιομηχανία) βασίζεται στον συνδυασμό του χαμηλού ειδικού βάρους και την αντίσταση σε διάβρωση του υλικού αυτού. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των GRP είναι η κατασκευή δεξαμενών και αναρροφητήρων για την αποθήκευση τοξικών χημικών ουσιών, σωλήνων για την μεταφορά νερού και αποχετευτικών λυμάτων, δεξαμενών νερού και κρασιού καθώς και στην κατασκευή εγκαταστάσεων για τη παραγωγή χημικών ουσιών, όπως στην παραγωγή χλωρίου [15].

Κεφάλαιο 2

Διεργασίες παρασκευής συνθέτων υλικών με συνεχείς ίνες και θερμοπλαστική μήτρα

Γενικά για την μορφοποίηση των θερμοπλαστικών συνθέτων υλικών χρησιμοποιείται ένας μεγάλος αριθμός διεργασιών [1]. Στις διεργασίες αυτές περιλαμβάνονται διεργασίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για θερμοσκληρυνόμενα σύνθετα υλικά. Ο βαθμός αυτοματισμού της κάθε διεργασίας παίζει σημαντικό ρόλο αφενός στην ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος, αφού η έλλειψη αυτοματισμού γενικά οδηγεί σε κομμάτια χα-μηλότερης ποιότητας λόγω της περιορισμένης επαναληψιμότητας της διεργασίας.

2.1 Ημι-αυτόματες διεργασίες

Ημι-αυτόματες χαρακτηρίζονται οι διεργασίες που συνδυάζουν αυτοματοποιημένες φάσεις και ανθρώπινη παρέμβαση.

2.1.1 Τεχνική μορφοποίησης με συμπίεση

Για τη παραγωγή κατασκευαστικών στοιχείων με την τεχνική αυτή το σύνθετο υλικό τοποθετείται μεταξύ «αρσενικού» και «θηλυκού» θερμαινόμενου καλουπιού και στη συνέχεια εφαρμόζεται εξωτερική πίεση ώστε το υλικό να πάρει το σχήμα του καλουπιού και να μορφοποιηθεί το κατασκευαστικό στοιχείο. Η ψύξη του κατασκευαστικού στοιχείου γίνεται στο καλούπι (Σχήμα 2.1α). Καθώς στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η «εν θερμώ» μορφοποίηση με πρέσα, η μέθοδος αυτή παρουσιάζεται παρακάτω στο κεφάλαιο 2.3.

2.1.2 Τεχνική χύτευσης με μεταφορά οητίνης

(Resin Transfer Moulding – RTM) Για τη παραγωγή κατασκευαστικών στοιχείων η ρητίνη αρχικά βρίσκεται σε μια θερμαινόμενη κοιλότητα σε υγρή μορφή. Στη συνέχεια, μέσο ενός ή περισσότερων στομίων, η ρητίνη συμπιέζεται και μεταφέρεται σε ένα κλειστό καλούπι, στο οποίο έχει ήδη τοποθετηθεί το υλικό ενίσχυσης (συνήθως υλικά με πλεγμένες ίνες). Η ψύξη του κατασκευαστικού στοιχείου γίνεται μέσα στο καλούπι (Σχήμα 2.1β).

2.1.3 Τεχνική με αυτόκλειστο φούρνο

Για την παραγωγή στοιχείων σε αυτόκλειστο φούρνο (autoclave) πρώτα προετοιμάζεται το υλικό με συγκεκριμένη σειρά ενεργειών πάνω στο καλούπι (Σχήμα 2.2α). Στη συνέχεια το καλούπι μεταφέρεται μέσα στον φούρνο (Σχήμα 2.2β), με την βοήθεια του οποίου το υλικό λειώνει και στη συνέχεια μορφοποιείται υπό την εξάσκηση πίεσης. Η ψύξη του κατασκευαστικού στοιχείου γίνεται μέσα στον αυτόκλειστο φούρνο. Η τεχνική αυτή χαρακτηρίζεται από μεγάλους χρόνους για την παραγωγή στοιχείων αλλά παράγονται στοιχεία υψηλής ποιότητας.

2.2 Αυτοματοποιημένες διεργασίες

Οι διεργασίες αυτές παράγουν κυρίως προϊόντα από σύνθετα υλικά με συνεχή μορφή (φύλλα, ταινίες, κυλίνδρους, προφίλ, σωλήνες, αλλά εφαρμόζονται και στην παραγωγή κυλινδρικών δοχείων.

2.2.1 Τεχνική συνεχούς παραγωγής με εξώθηση

Για τη παραγωγή στοιχείων με την τεχνική της συνεχούς παραγωγής με εξώθηση (pultrusion) το θερμοπλαστικό υλικό τροφοδοτείται αρχικά στο σύστημα εξώθησης σε μορφή κόκκων ή σκόνης. Στη συνέχεια μέσω μιας θερμαινόμενης κυλινδρικής κάννης μεταφέρεται σε ένα καλούπι, όπου διαμορφώνεται το τελικό προϊόν, και στο τέλος κόβεται στο επιθυμητό μήκος (σχήμα 2.3α).

2.2.2 Τεχνική μορφοποίησης με περιστρεφόμενους κυλίνδρους

Για τη παραγωγή στοιχείων με τη τεχνική μορφοποίησης με περιστρεφόμενους κυλίνδρους (roll forming) το υλικό συνθλίβεται ανάμεσα σε δύο όμοιους θερμαινόμενους κυλίνδρους που περιστρέφονται με αντίθετη φορά (αντιστρεφόμενοι). Τη διάταξη αυτή ακολουθεί μια σειρά από κυλίνδρους διαμόρφωσης και συμπληρωματικά εργαλεία που επιτυγχάνουν τελικά τη μορφοποίηση σε φύλλο. (σχήμα 2.3β).

26


Σχήμα 2.1: Σχηματική αναπαφάσταση της τεχνικής μοφφοποίησης με συμπίεση (α) και της τεχνικής χύτευσης με μεταφοφά φητίνης (β).



Σχήμα 2.2: Προετοιμασία του υλικού για την παραγωγή στοιχείων σε αυτόκλειστο φούρνο (α), αυτόκλειστος φούρνος (β) [1].

2.2.3 Τεχνική της περιέλιξης ταινιών

Για τη παφάγωγη στοιχείων με τη τεχνική αυτή (tape winding) μια δέσμη ταινιών από θερμοπλαστικό υλικό τυλίγεται με την βοήθεια οδηγού γύρο από ένα θερμαινόμενο τύμπανο το οποίο περιστρέφεται (σχήμα 2.3γ).

2.3 Μοgφοποίηση με συμπίεση

Η τεχνική μορφοποίησης με πρέσα (compression moulding) συνίσταται στην χρήση ενός μικτού θερμαινόμενου καλουπιού, μέσα στο οποίο τοποθετείται το σύνθετο υλικό και στην εφαρμογή εξωτερικής πίεσης για την μορφοποίηση του.

Το σύνθετο υλικό μπορεί να έχει θερμοπλαστική η ακόμα και θερμοσκληρυνόμενη μήτρα. Οι ίνες είναι δυνατόν να βρίσκονται σε μορφή υφάσματος, μακρών (roving) ή κοντών ινών (strand), είτε ακόμη και σε συνεχή μορφή. Το δε σύνθετο υλικό όταν έχει θερμοπλαστική μήτρα μπορεί να βρίσκεται σε μορφή ενός φύλλου (laminae) ή σε πολύστρωτη πλάκα.

Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δίνει τη δυνατότητα να κατασκευασθούν σχετικά πολύπλοκα προϊόντα σε μικρούς χρόνους. Έτσι ελαχιστοποιούνται οι δευτερογενείς κατασκευαστικές διαδικασίες όπως τρυπήματα, συνενώσεις κλπ. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την δυνατότητα αυτοματοποίησης της διαδικασίας εισαγωγής των φύλλων στο καλούπι και της απομάκρυνσης από αυτό του κομματιού, κάνουν εφικτή την αυτοματοποίηση της διαδικασίας. Για παράδειγμα στην βιομηχανία αυτοκινήτου πολλά τμήματα κατασκευάζονται με αυτόν τον τρόπο.

Μια παφαλλαγή της μεθόδου αυτής είναι δυνατή όταν το θερμοπλαστικό πολυμερές υπάρχει σε μορφή φύλλων. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να ελαχιστοποιηθεί η διαδρομή ροής του τήγματος του πολυμερούς, με το να φέρουμε τα συστατικά πολύ κοντά μεταξύ τους πριν την τήξη. Αυτό γίνεται με το στοίβαγμα εναλλασσομένων στρωμάτων φύλλου πολυμερούς και ινών ή υαλοϋφάσματος. Κατόπιν η στοίβα θερμαίνεται στην πρέσα, τα φύλλα του LDPE λιώνουν, το τήγμα ρέει ανάμεσα στις ίνες του γυαλιού και τις διαβρέχει. Μετά την ψύξη το σύνθετο υλικό έχει την μορφή του καλουπιού της πρέσας. Στη παρούσα εργασία έγινε χρήση αυτής της μεθόδου, δηλαδή έτοιμου φύλλου πολυμερούς.

2.4 Διεργασίες συγκόλλησης

Ένα από τα πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών με θερμοπλαστική μήτρα είναι η δυνατότητα συγκόλλησης (συνένωσης)κομματιών του υλικού με απλή θέρμανση μετά τη παρασκευή του. Έτσι το υλικό μπορεί να παρασκευασθεί σε διαφορετικό μέρος από εκεί που θα γίνει η παρασκευή του τελικού προϊόντος (αντικειμένου).



Σχήμα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση της παραγωγής με προώθηση (α), της μορφοποίησης με περιστρεφόμενους κυλίνδρους (β) και της παραγωγής με περιέλιξη ταινιών (γ) [1].



Εξάρτημα από flaps αεροπλάνου



πρέσα [16].



Τα μέρη του καλουπιού που χρησιμοποιήθηκαν στην πρέσα

Σχήμα 2.4: Παράδειγμα προϊόντος από σύνθετο υλικό που παράγεται με συμπίεση σε

29

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για να γίνει η συνένωση πρέπει να είναι κατάλληλες, ώστε να μην προκληθεί καταστροφή της μήτρας και των ινών, ενώ συγχρόνως να επιτυγχάνεται αντοχή στις εξωτερικές φορτίσεις. Για το λόγο αυτό οι τεχνικές συνένωσης είναι εξίσου σημαντικές με τις τεχνικές παραγωγής και μορφοποίησης. Οι σημαντικότερες συμβατικές μέθοδοι συνένωσης κατασκευαστικών στοιχείων από θερμοπλαστικά σύνθετα υλικά περιγράφονται παρακάτω [1].

- Συγκόλληση με επαγωγή (Induction Welding) Για τη συγκόλληση γίνεται χρήση μιας σκόνης που έχει τη δυνατότητα να μαγνητίζεται και είναι συνήθως από το ίδιο θερμοπλαστικό υλικό με αυτό που πρόκειται να συγκολληθεί. Η σκόνη τοποθετείται μεταξύ των επιφανειών των στοιχείων που θα συγκολληθούν και στη συνέχεια εφαρμόζεται ένα υψηλής συχνότητας μαγνητικό πεδίο το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την θέρμανση των κόκκων της σκόνης. Καθώς οι κόκκοι φτάνουν σε θερμοκρασία τήξης τους επιτυγχάνεται η συγκόλληση των στοιχείων.
- Συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση (Resistance Welding) Κατά την συγκόλληση, τα δύο στοιχεία που πρόκειται να συγκολληθούν τοποθετούνται μεταξύ δύο ρολών που χρησιμοποιούνται για την εξάσκηση της απαραίτητης πίεσης καθώς και για την προώθηση των στοιχείων. Έτσι τα στοιχεία περνούν ανάμεσα από δύο αντιστάσεις από τις οποίες διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα, που προκαλεί την θέρμανση του υλικού. Καθώς αυτό φτάνει στη θερμοκρασία τήξης του επιτυγχάνεται η συγκόλληση των στοιχείων
- Συγκόλληση με ακτίνα λέιζες (Laser Welding) Για την συγκόλληση/συνένωση των θερμοπλαστικών υλικών με λέιζες χρησιμοποιείται η τεχνική διαπεραστικής εκπομπής της ακτίνας (through-transmission). Η διεργασία αυτή βασίζεται στην ένωση δύο πολυμερών με την προσθήκη θερμότητας μέσω ακτίνας λέιζες. Η ακτίνα λέιζες διεισδύει στο διαφανές άνω κομμάτι και προσπίπτει στο απορροφητικό κομμάτι που βρίσκεται στο κάτω μέρος. Στη συνέχεια, εφαρμόζοντας πίεση, τα δύο κομμάτια συγκρατούνται μέχρι να ενωθούν πλήρως.

Κεφάλαιο 3

Μηχανικές ιδιότητες

3.1 Μέτοο ελαστικότητας

Ο στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι να υπολογίσουμε τις μηχανικές ιδιότητες των συνθέτων υλικών βασισμένοι στις ιδιότητες των συστατικών τους [2].

Οι συνήθεις παραδοχές της θεωρίας ελαστικότητας των συνθέτων υλικών είναι οι ακόλουθες [9]:

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



Θεωρήστε ένα μονοαξονικό ινοπλισμένο σύνθετο όπως στο σχήμα. Οι τάσεις στην ίνα και στη μήτρα είναι:

$$\sigma_f = E_f \epsilon_f \qquad \quad \sigma_m = E_m \epsilon_m$$

Εάν το μέτρο ελαστικότητας της ίνας είναι πολύ μεγαλύτερο από το μέτρο της μήτρας, τότε η τάση στην ίνα θα είναι πολύ μεγαλύτερη από την τάση στη μήτρα¹

3.1.1 Αξονική τάση

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

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

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

 $\epsilon_f = \epsilon_m = \epsilon_1$

Εισάγοντας τα μέτρα ελαστικότητας της ίνας και της μήτρας:

$$\sigma_1 = E_1 \epsilon_1 \qquad \sigma_f = E_f \epsilon_1 \qquad \sigma_m = E_m \epsilon_1$$

Αντικαθιστώντας στις παραπάνω έχουμε:

$$P = P_m + P_f \Rightarrow E_1 \epsilon_1 A = E_m \epsilon_m A_m + E_f \epsilon_f A_f$$
$$\Rightarrow \qquad E_1 = E_f \frac{A_f}{A} + E_m \frac{A_m}{A} = E_1 = E_m (1 - \phi) + \phi E_f, \qquad (3.1)$$

όπου φ είναι το κλάσμα όγκου των ινών)



¹Οι δείκτες που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τις χωρικές κατευθύνσεις είναι: 1 = Aξονική κατεύθυνση · 2 = Eγκάρσια κατεύθυνση στο επίπεδο του φύλλου · 3 = η τρίτη κατεύθυνση, συνήθως κάθετα στο επίπεδο του φύλλου. Οι άλλοι δείκτες στις εξισώσεις αυτές είναι: m η μήτρα · και f η ίνα.

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

$$\frac{P_f}{P} = \frac{\frac{E_f}{E_m}}{\frac{E_f}{E_m} - \frac{1-\phi}{\phi}} \qquad \dot{\eta} \qquad \frac{P_f}{P} = \left(1 + \frac{1-\phi}{\alpha\phi}\right)^{-1}$$
$$= \frac{E_f}{E_m}$$

3.1.2 Εγκάρσιες τάσεις

με α



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

$$\sigma_f = \sigma_m = \sigma_2$$
 αλλά $\epsilon_f \neq \epsilon_m \neq \epsilon_1$
 $\epsilon_f = \frac{\sigma_2}{E_f}$ $\epsilon_m = \frac{\sigma_2}{E_m}$

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

$$\epsilon_2 = (1 - \phi)\epsilon_m + \phi\epsilon_f$$

με άλλα λόγια:

$$\epsilon_{2} = \frac{\sigma_{2}}{E_{2}} = \frac{\sigma_{2}\phi}{E_{f}} + \frac{\sigma_{2}(1-\phi)}{E_{m}} \quad \Rightarrow \quad E_{2} = \left[\frac{\phi}{E_{f}} + \frac{1-\phi}{E_{m}}\right]^{-1} \quad (3.2)$$



Σχήμα 3.1: Οι διαφορετικές συνιστώσες του μέτρου διάτμησης στα ινοπλισμένα σύνθετα υλικά

3.1.3 Μέτρο διάτμησης

Όλες οι συνιστώσες του μέτρου διάτμησης στα ινοπλισμένα σύνθετα υλικά με ομοαζονικά προσανατολισμένες συνεχείς ίνες έχουν μόνο δύο διαφορετικές τιμές: $G_{12} = G_{21} = G_{13} = G_{31}$ και $G_{23} = G_{32}$. Για τα: $G_{12} = G_{21} = G_{13} = G_{31}$ Θεωρώντας τις ίσες δυνάμεις στο σύνθετο έχουμε:

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

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

$$\Rightarrow \quad G_{12} = \left[\frac{\phi}{G_f} + \frac{1-\phi}{G_m}\right]^{-1} \tag{3.3}$$

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

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

Αθροίζουμε τις τάσεις και:

$$G_{23} = \phi G_f + (1 - \phi) G_m \tag{3.4}$$

Το μοντέλο σειράς συνήθως υποεκτιμά τις ιδιότητες. Άλλα μοντέλα που μερικές φορές δίνουν καλύτερα αποτελέσματα είναι τα μοντέλα του Takayanagi που παρουσιάζονται στο Σχ. 3.2.

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

Σχήμα 3.2: Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου του Takayanagi

$$V_f = \frac{\pi d^2}{4a^2} \qquad V_{fs} = \frac{\pi d}{4a}$$
 (3.6)

$$V_{mp} = \frac{(a-d)d}{ad} = 1 - \frac{d}{a} \qquad a \ge d \qquad (3.7)$$

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

 $V_f = \frac{\pi d^2}{2\sqrt{3}h^2}$ $V_{fs} = \frac{\pi d}{4h}$ (3.8)

Εξαγωνική διάταξη

V_s

Τετραγωνική διάταξη

$$V_{mp} = 1 - \frac{2d}{\sqrt{3}h} \qquad h \ge \frac{2}{\sqrt{3}h}$$

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

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

$$E = \frac{E_m E_f (1 - V_{mp}) - V_{mp} V_f) + V_{mp} V_f E_m^2}{E_f (1 - V_{mp}) - V_f (E_f - E_m)}$$
(3.10)

$$\Rightarrow \quad E_2 = E_m \frac{1 + \xi \eta \phi}{1 - \eta \phi} \tag{3.11}$$

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

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

(3.9)

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

$$G_{12} = G_m \frac{1 + \xi \eta \phi}{1 - \eta \phi} \tag{3.12}$$

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

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

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

Ιδιότητα	ξ	\rightarrow μοντέλο
E_1	∞	παράλληλο
E_2	2	
G_{12}	1	—
	0	σειράς

3.1.4 Λόγος του Poisson

Ο λόγος του Poisson οφίζεται ως: $\nu_{ij} = -\frac{\epsilon_j}{\epsilon_i}$. Για τα ινοπλισμένα σύνθετα υλικά υπάρχουν 3 ανεξάρτητα στοιχεία του ν_{ij} , και ισχύει



Για ισότροπα συστατικά μπορούμε να υπολογίσουμε τις τιμές των στοιχείων του λόγου του Poisson. Θεωρώντας το παράλληλο μοντέλο (ίσες παραμορφώσεις) έχουμε $\epsilon_{1f} = \epsilon_{1m} = \epsilon_1$. Τότε:

$$\epsilon_{2f} = \nu_f \epsilon_{1f} = -\nu_f \frac{\sigma_{1f}}{E_f} \quad \text{iai} \quad \epsilon_{2m} = \nu_m \epsilon_{1m} = -\nu_m \frac{\sigma_{1m}}{E_m}$$

36

$$\Rightarrow \epsilon_2 = -\left[\frac{\phi\nu_f\sigma_{1f}}{E_f} + \frac{(1-\phi)\nu_m\sigma_{1m}}{E_m}\right] = -\phi\nu_f\epsilon_1 - (1-\phi)\nu_m\epsilon_1$$
$$\Rightarrow \nu_{12} = -\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} = \phi\nu_f + (1-\phi)\nu_m \tag{3.14}$$

иаг
$$\nu_{21} = [\phi \nu_f + (1 - \phi) \nu_m] \frac{E_2}{E_1}$$
 µихео́теео ало́ то nu_{12} ! (3.15)

Για το ν_{23} εξετάζουμε τη μεταβολή του όγκου: $\Delta V/V_0 = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = \sigma_H/K$. Υπό υδροστατική τάση (πίεση) έχουμε: $\sigma_H = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{\sigma_2}{3}$ και $\Rightarrow \epsilon_3 = \frac{\sigma_3}{3K} - \epsilon_1 - \epsilon_2$

$$\Rightarrow \nu_{23} = -\frac{\epsilon_3}{\epsilon_2} = -\frac{\sigma_2}{3K\epsilon_2} + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} + 1 = 1 - \nu_{21} - \frac{E_2}{3K}$$
(3.16)

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

$$K = \frac{\sigma_H}{\Delta V/V_0} = \left[\frac{\phi}{K_f} + \frac{1-\phi}{K_m}\right]^{-1}$$
(3.17)

Για ισότροπο υλικό:

 $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$

3.1.5 Ιδιότητες σε ενδιάμεσες γωνίες μεταξύ 0^0 και 90^0

Μποφούμε να «διοφθώσουμε» τις προηγούμενες εξισώσεις που δίδουν το μέτρο ελαστικότητας κατά μήκος και εγκάφσια στις ίνες για να υπολογίσουμε τις ιδιότητες σε μια τυχαία γωνία ως προς την κατεύθυνση των ινών. Επειδή $E_1 >> E_2$, εισάγουμε, λοιπόν, ένα δείκτη αποτελεσματικότητας προσανατολισμού (orientation efficiency factor), η_0 , στη συνεισφορά της ίνας:

$$E_1 = \eta_0 E_f \phi + E_m (1 - \phi) \tag{3.18}$$

Το η_0 είναι μία συνά
ρτηση της γωνίας (ως προς την ίνα) που δρα το φορτίο: $\eta_0 = 1$ για
 καλά προσανατολισμένες ίνες. Γενικά:

$$\eta_0 = \sum_{i=1}^{i=n} a_i \cos^4 \theta_i$$
 (3.19)

όπου a_i είναι το ποσοστό ινών προσανατολισμένων σε μία γωνία θ_i ως προς το φορτίο. Η σχέση αυτή ισχύει για μικρές σχετικά γωνίες θ .

Μια ειδική περίπτωση είναι για 2D τυχαίο προσανατολισμό, π.χ. ανάκατες τεμαχισμένες, αλλά μακριές ίνες (Σχ. 3.3). Θεωρήστε, τότε ένα σημείο μέσα από το οποίο



Σχήμα 3.3: Ίνες προσανατολισμένες σε μια γωνία θ ως προς το φορτίο, ή προσανατολισμένες τυχαία σε 2D ή 3D στο σύνθετο υλικό

περνούν ίνες προσανατολισμένες με τυχαία κατανομή (συνάρτηση κατανομής $\Psi(\theta) = 1$ ή $\alpha_i = 1/n$) σε δύο διαστάσεις. Το κλάσμα των ινών με γωνία προσανατολισμού μεταξύ θ και $\theta + d\theta$ είναι $d\theta/\pi$. Ο δείκτης αποτελεσματικότητας, η_0 , δίδεται από:

$$\eta_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^4 \theta \, d\theta = \frac{3}{8} \tag{3.20}$$

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

$$A_{sphere} = 4\pi r^2 \qquad A_{strip} = 2\pi r \sin \theta \ r d\theta$$
$$\alpha_{\theta} = \frac{A_{strip}}{A_{sphere}} = \frac{\sin \theta}{2} d\theta \quad \Rightarrow \quad \eta_0 = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{\sin \theta}{2} \cos^4 \theta \ d\theta = \frac{1}{5}$$
(3.21)

3.2 Θοαύση και αντοχές

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

3.2.1 Αστοχία σε αξονική φόρτιση

Εδώ διαχρίνουμε δύο περιπτώσεις:

- (α) Όταν η μήτρα έχει χαμηλότερη ολκιμότητα (Σχ. 3.5).
- (β) Όταν η ίνα έχει χαμηλότερη ολκιμότητα (Σχ. 3.6).



Σχήμα 3.4: Αστοχία ενός ινοπλισμένου συνθέτου υλικού

$$\sigma_{1}^{*} = \phi \sigma_{f}^{*} \quad \dot{\eta}$$
 (3.22)
 $\sigma_{1}^{*} = \phi \sigma_{fm}^{*} + (1 - \phi) \sigma_{m}^{*}$ (3.23)

Η κρίσιμη τιμή του κλάσματος όγκου είναι:

$$\phi' = \frac{\sigma_m^*}{\sigma_f^* - \sigma_{fm}^* + \sigma_m^*}$$
(3.24)



Σχήμα 3.5: Η αντοχή του συνθέτου όταν η μήτρα έχει χαμηλότε
ρη ολκιμότητα από την ίνα



Σχήμα 3.6: Η αντοχή του συνθέτου όταν η μήτρα έχει υψηλότερη ολκιμότητα από την ίνα



Σχήμα 3.7: Η εξάρτηση της αντοχής από το κλάσμα όγκου των ινών όταν η μήτρα έχει χαμηλότερη ολκιμότητα από την ίνα (α) ή υψηλότερη (β).

Η εξάρτηση των αντοχών από το κλάσμα όγκου των ινών φαίνεται στο σχήμα 3.7 για τις δύο περιπτώσεις. Στην παρούσα εργασία ευρισκόμαστε στην περίπτωση (β). Δηλαδή, για πολύ χαμηλές τιμές του κλάσματος όγκου ινών, είναι δυνατόν η αντοχή του συνθέτου να είναι χαμηλότερη από αυτή του LDPE της μήτρας!

Μετά τη θραύση μπορεί να υπάρξει συνέχεια της φόρτισης της ίνας μέσω διάτμησης στην διεπιφάνεια μήτρας - ίνας. Τότε γίνεται αλλαγή στην κλίση της καμπύλης από την οριζόντια. Επίσης μπορούμε να εισάγουμε τη στατιστική της αντοχής των ινών κατά Weibull:

$$P_s = \exp\left[-\frac{L}{L_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right]$$

Η αστοχία συμβαίνει πρώτα σε ένα ασθενές σημείο της ίνας.

3.2.2 Αστοχία σε εγκάρσια εφελκυστική παραμόρφωση

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

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

3.2.3 Αστοχία σε γωνία, ϕ , ως προς την κατεύθυνση των ινών

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

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

Τότε για μονοαξονική φόρτιση σ_x η αστοχία θα επέλθει όταν:

$$\sigma_x^* = \frac{\sigma_1^*}{\cos^2 \phi} \qquad \dot{\eta} \qquad \sigma_x^* = \frac{\sigma_2^*}{\sin^2 \phi} \quad \dot{\eta} \qquad \sigma_{x^*} = \frac{\tau_{12}^*}{\cos \phi \sin \phi}$$

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

$$(\sigma_p - \sigma_q)^2 + (\sigma_q - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_p)^2 = 2\sigma_Y^2$$
(3.28)

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

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_1^*}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_2^*}\right)^2 - \frac{\sigma_1\sigma_2}{\sigma_1^{*2}} + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12}^*}\right)^2 = 1$$
(3.29)

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

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

3.3 Ανθεκτικότητα

3.3.1 Γενική θεωρία

Ο Inglish (1913) και ο Griffith (1920) έβαλαν τις βάσεις για την θεωρία της διάδοσης ρωγμής και τελικής θραύσης των υλικών. Η τάση στο άκρο μιας ρωγμής είναι $\sigma = \sigma_{\infty} \left(1 + 2\sqrt{\frac{c}{r}}\right)$. Η ρωγμή διαδίδεται μόνο αν η ενέργεια του συστήματος μειώ-

νεται. Δηλαδή, το άθροισμα της συσσωρευμένης ελαστικής ενέργειας, $\frac{\sigma_{\infty}^2 \pi c^2}{E}$, συν την ενέργεια λόγω αύξησης της επιφάνειας $4c\gamma$, συν την αλλαγή της εσωτερικής ενέργειας των κρυστάλλων, συν την αλλαγή της ενέργειας λόγω της κίνησης των γραμμοαταξιών, συν το εξωτερικό έργο, πρέπει να είναι αρνητικό.

$$\Delta U = -\Delta \frac{\sigma_{\infty}^2 \pi c^2}{E} + 4c\gamma + \dots < 0, \qquad (3.30)$$

όπου γ: επιφανειακή ενέργεια, c: μήκος, r: ακτίνα της ρωγμής

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

$$G = \frac{\sigma^2 \pi c}{E}$$

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

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

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



Σχήμα 3.8: Τρόποι διάδοσης της ρωγμής

3.3.2 Διεπιφανειακή θραύση και διάδοση ρωγμών στα σύνθετα υλικά

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

- Με εφελκυσμό
- Με διάτμηση (απορροφά περισσότερη ενέργεια!)

• Μικτός:
$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{K'_{shear}}{K'_{tensile}} \right)$$

Η κατεύθυνση διάδοσης της φωγμής αλλάζει όταν η φωγμή συναντάει διεπιφάνειες. Για μία φωγμή που διαδίδεται και προσκρούει εγκάρσια σε μία ίνα η ύπαρξη της τάσης σ₂ την κάνει να αλλάζει κατεύθυνση. σ₂ είναι περίπου 20% της σ₁ και η ίνα αποκολλάται όταν η αντοχή του δεσμού της με τη μήτρα είναι λιγότερο από το 1/5 της αντοχής της μήτρας! Αυτό καταναλώνει ενέργεια. Όσο πιο πολλές διεπιφάνειες τόσο πιο πολλή ενέργεια απορροφάται

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

$$\frac{G_{ic}}{G_{fc}} \le \left(\frac{h_m E_m + h_f E_f}{h_f E_f}\right) \left[\frac{1}{4\pi(1-\nu^2)}\right],\tag{3.31}$$

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

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

3.3.3 Ερπυσμός

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

Κατά τον εφπυσμό ενός συνθέτου υλικού που υφίσταται αξονική φόφτιση η αφχική (ελαστική) παφαμόφφωση αμέσως μετά από την εφαφμογή της τάσης είναι:

$$\epsilon_0 = \frac{\sigma}{\phi E_f + (1 - \phi)E_m}$$

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

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

3.3.4 Κόπωση

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

 $\stackrel{min}{\mathrm{H}}$ αντίσταση του υλικού σε κόπωση δίνεται από τον ταχύτητα επέκτασης της ϱ ωγμής ανά κύκλο φόρτισης: $\frac{dc}{dN}$. Σε μέσες τιμές του ΔK η ταχύτητα επέκτασης της ϱ ωγμής

ανά κύκλο φόρτισης είναι $\frac{dc}{dN} = \beta (\Delta K)^n$. Το *n* δίνει τη (λογαριθμική) κλίση στο διάγραμμα (αυξάνει με τις ίνες). Για μικρές τιμές του ΔK οι ρωγμές δεν αναπτύσσονται. Οι ίνες αυξάνουν την ελάχιστη τιμή του ΔK για κόπωση γιατί προκαλούν ανάκλαση των ρωγμών και εμποδίζουν τις μπάντες ολίσθησης.

Σε ένα υλικό που υφίσταται κόπωση η αστοχία επέρχεται με τη δημιουργία και επέκταση μεμονωμένων ρωγμών. Η κατάσταση της επιφάνειας του υλικού είναι πολύ σημαντική για την αρχική δημιουργία των ρωγμών. Τα σύνθετα υλικά είναι πιο ανθεκτικά σε κόπωση από τα μέταλλα, τουλάχιστον σε εφελκυστική καταπόνηση. Εδώ οι ρωγμές που οδηγούν σε κόπωση δημιουργούνται μέσα στη μήτρα. Αστοχία επέρχεται όταν υπάρξει θραύση ινών. Καθώς το LDPE, το υλικό που χρησιμοποιούμε ως μήτρα στην παρούσα εργασία, είναι γενικά μη ψαθυρό υλικό, η κόπωση δεν αναμένεται να είναι πρόβλημα για τα δοκίμιά μας. Με την πάροδο του χρόνου όμως, με την φυσική γήρανση του πολυμερούς, αλλά, κυρίως με την προσβολή του από την υπεριώδη ακτινοβολία του ήλιου, το πολυμερές καθίσταται πιο ψαθυρό και μπορεί μακροχρόνια να υπάρξει πρόβλημα κόπωσης.

Κεφάλαιο 4

Πειραματική διαδικασία

Η παρασκευή των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο της εταιρίας Πλαστικά Κρήτης, στο Ηράκλειο. Οι μετρήσεις εφελκυσμού έγιναν στο εργαστήριο Μηχανικής των Υλικών στο Γενικό Τμήμα του Πολυτεχνείου Κρήτης.

4.1 Περιγραφή δοκιμίων

4.1.1 Υλικό μήτρας

Ως υλικό μήτρας χρησιμοποιήθηκε πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LDPE), σε μορφή φύλλου που παρασκευάζει η εταιρία Πλαστικά Κρήτης για την κάλυψη θερμοκηπίων. Το πάχος του φύλλου ήταν 200 η 90 μm. Επίσης χρησιμοποιήθηκε πεπαλαιωμένο φύλλο πολυαιθυλενίου που είχε χρησιμοποιηθεί για 3-4 χρόνια σε θερμοκήπια στην Κρήτη, μεταφερθεί από τον τόπο συλλογής στο τμήμα ανακύκλωσης της εταιρίας και καθαρισθεί με νερό. Το πάχος αυτού του φύλλου ήταν 180 μm.

4.1.2 Ενισχυτικό μέσο

Ως ενισχυτικό μέσο χρησιμοποιήθηκαν υαλοϋφάσματα από E-glass, που μας προσέφερε η εταιρία Fibermax (Βόλος). Το είδος των υφασμάτων και το πάχος των ινών είναι στον Πίνακα 4.1. Οι μηχανικές ιδιότητες και η πυκνότητα του LDPE και του υλικού των ινών δίνονται στον Πίνακα 4.2.

4.1.3 Διαδικασία παρασκευής δειγμάτων

Για τη παρασκευή των δειγμάτων φύλλα LDPE και φύλλα από τους διάφορους τύπους υαλοϋφάσματος τοποθετήθηκαν εναλλάξ διατηρώντας πάντα τα φύλλα LDPE στις εξωτερικές επιφάνειες. Σε αυτό το στάδιο της εναλλάξ τοποθέτησης των φύλλων προσέχαμε τα φύλλα υαλοϋφάσματος να τοποθετούνται ενδιάμεσα στα φύλλα LDPE με τον ίδιο πάντα

κωδικός	πάχος	warp/weft ¹	ends ²	weave
	(µm)	(%)/%)	νήματα/cm	
G200P	9	61:39	16.8:10.8	plain
G025P	5	50:50	22:22	plain
G320U	9	88:12		uniaxial

Πίνακας 4.1: Οι ιδιότητες των υαλοϋφασμάτων (FiberMax®)

¹Λόγος των ποσοστών ινών στο στημόνι και στο υφάδι.
²Νήματα ανά cm στο στημόνι και στο υφάδι.

TT! 4.0	TO 1		,
1100000000000000000000000000000000000	LOIOTNTEC	$\tau \omega v$	συστατικών
110000000 1.000	10:00:01000		00000000000

Συστατικό	πυκνότητα	μ. ελαστ.	αντοχή
	g/cm^3	MPa	MPa
LDPE	0.92	133	11
LDPE (ανακ)	0.92	59	9
Γυαλί ινών	2.58	33000	1152

προσανατολισμό των ινών (warp) ώστε ο ίδιος άξονας της τελικής πλάκας να περιέχει πάντα το μέγιστο ποσοστό συνεισφοράς των ινών. Επίσης για να ελαχιστοποιήσουμε φαινόμενα ύπαρξης ανομοιογενούς κλάσματος ινών εκτός πλάκας μετά από το στάδιο της πρέσας, τα φύλλα LDPE είχαν μεγαλύτερες διαστάσεις από αυτά των κομματιών του υαλοϋφάσματος.

Μετά το στοίβαγμα, το «σάντουιτς» φύλλων LDPE και υαλοϋφάσματος τοποθετήθηκε ανάμεσα σε δύο φύλλα πολυϊμιδίου για να μη κολλήσει στις θερμές πλάκες της πρέσας και τοποθετήθηκε στη πρέσα για το λιώσιμο του LDPE, τη μορφοποίηση και τη δημιουργία της τελικής πλάκας - δείγματος του σύνθετου υλικού.

Η θερμοκρασία της άνω και της κάτω πλάκας της πρέσας είναι 160° C και τα στάδια συμπίεσης και ψύξης ήταν :

- 1. 2 min σε φορτίο 2 τόνων
- 2. 2 min σε φορτίο 6 τόνων
- 3. 2 min σε φορτίο 16 τόνων
- 4. Ψύξη υπό φορτίο 16 τόνων



Σχήμα 4.1: Το σχήμα των δειγμάτων για τις μετρήσεις εφελκυσμού με τις διαστάσεις τους. Το πάχος κάθε δείγματος δίδεται στον Πίνακα 4.3.

Με τη μέθοδο αυτή μοφφοποιήθηκαν τα δείγματα (πλάκες) που περιέχονται στον Πίνακα 4.3. Μετά την αφαίρεσή της από την πρέσα, κόπηκαν μέρη περιμετρικά της πλάκας όπου είτε υπήρχε προφανής κακή διαβροχή ινών από το πολυμερές, ή το πολυμερές λιώνοντας είχε απλωθεί εκτός των ινών γυαλιού. Έτσι δημιουργήθηκαν πλάκες τετράγωνες ή παραλληλόγραμμες. Οι διαστάσεις αυτών των πλακών μετρήθηκαν: μήκος, πλάτος, πάχος, αλλά και το βάρος. Οι μετρήσεις του πάχους έδειξαν κάποια διασπορά και χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος για κάθε δείγμα.

Το επόμενο στάδιο είναι να πάφουμε από κάθε πλάκα όσα δοκίμια μποφούσαμε. Τα δοκίμια είχαν το καθιεφωμένο (ISO standard) σχήμα για μετφήσεις εφελκυσμού (dogbone, Σχ. 4.1). Η κοπή έγινε με τη χφήση ειδικού μηχανήματος (stencil) στο εφγαστήφιο των Πλαστικών Κφήτης. Τα δοκίμια είχε μήκος λαιμού 38,5 mm και πλάτος λαιμού 6 mm. Οι μετφήσεις του πάχους του λαιμού έγιναν για κάθε δείγμα ξεχωφιστά.

4.1.4 Χαρακτηρισμός των δοκιμίων

Το κλάσμα όγκου των ινών στο σύνθετο, ϕ υπολογίσθηκε σε κάθε δείγμα από την πυκνότητά του. Η πυκνότητα, ρ υπολογίζεται από την μάζα, m του δείγματος και τον όγκο, V: $\rho = m/V$. Καθώς τα δείγματα είχαν μορφή πλακών με διαστάσεις $L \times W \times D$, ο όγκος τους είναι V = LDW και η πυκνότητα του δείγματος δίδεται από: $\rho = m/(LDW)$.

Αν δεν υπάρχει αλλαγή όγκου, η πυκνότητα ενός μίγματος μπορεί να υπολογισθεί από τις πυκνότητες των συστατικών του:

$$\rho = \rho_f \phi + \rho_m (1 - \phi) , \qquad (4.1)$$

όπου ρ_f η πυκνότητα του γυαλιού, ϕ το κλάσμα όγκου των ινών στο σύνθετο, και ρ_m η πυκνότητα του πολυμερούς. Αν όλες οι πυκνότητες είναι γνωστές, τότε το κλάσμα όγκου μπορεί να υπολογισθεί:

$$\phi = \frac{m/LDW - \rho_m}{\rho_f - \rho_m} \,. \tag{4.2}$$

Στο Πίνακα 4.3 καταγράφονται οι τιμές του κλάσματος όγκου των ινών για κάθε πλάκα σύνθετου που παρασκευάστηκε. Τα δείγματα που παρασκευάσθηκαν από το υαλόνημα με κωδικό G320U (μονοαξονικό) παρουσίασαν έντονη ανομοιομορφία στην χωρική σύσταση και προσανατολισμό των ινών και δεν μπορέσαμε να τα χρησιμοποιήσουμε για μετρήσεις εφελκυσμού με επαρκή ακρίβεια. Η ανομοιομορφία πιθανώς να οφείλεται στην απουσία ενός καλουπιού στην πρέσα, το οποίο να μπορεί να περιορίζει τη μακροσκοπική ροή του τήγματος της μήτρας η οποία παρασύρει τις ίνες σε κατευθύνσεις κάθετα από τον άξονα τους.

4.1.5 Δοκιμές εφελκυσμού

Για την μέτρηση του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής σε εφελκυσμό των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε μια μηχανή εφελκυσμού INSTRON που υπάρχει στο εργαστήριο Μηχανικής των Υλικών στο Γενικό Τμήμα του Πολυτεχνείου Κρήτης. Για τις μετρήσεις μας χρησιμοποιήθηκαν 2 κεφαλές μέτρησης, μέγιστου φορτίο 1 και 5 kN αντίστοιχα. Η συσκευή συνδέεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή για την καταγραφή του φορτίου και της μετατόπισης και τον υπολογισμό της τάσης και της παραμόρφωσης του δοκιμίου. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν ανάμεσα στις (μηχανικές) δαγκάνες της συσκευής, οι οποίες τα παραμόρφωναν εφελκυστικά με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης, 48 μm/s.

Η ενίσχυση που χρησιμοποιήθηκε αποτελείτο από υφασμένα υαλονήματα απλής ύφανσης. Οι δοκιμές εφελκυσμού των ινών στα υφάσματα έγιναν σε μεμονωμένα νήματα, τα οποία αφαιρέθηκαν από το ύφασμα, μετρήθηκε το μήκος τους και το βάρος τους, και τοποθετήθηκαν σε ειδικές δαγκάνες σχεδιασμένες στο εργαστήριο για μέτρηση εφελκυσμού ινών, έτσι ώστε να αποφευχθεί η συντριβή τους από τις κανονικές δαγκάνες του οργάνου. Από τη μάζα, m, και το μήκος, L, του νήματος, και τη γνωστή ακτίνα των ινών, r, υπολογίσθηκε ο αριθμός των ινών, n, στο νήμα και η διατομή του δείγματος, A, για τον υπολογισμό της τάσης:

$$m = \rho n \pi r^2 L \quad \Rightarrow \quad A = n \pi r^2 = \frac{m}{\rho L} ,$$
 (4.3)

όπου $ho=2.58~{
m g/cm^3},$ η πυκνότητα του γυαλιού-Ε που χρησιμοποιήθηκε για τις ίνες.

Η συνολική καμπύλη τάσης παραμόρφωσης καταγράφηκε για κάθε δοκίμιο. Από αυτήν υπολογίσθηκε η εφαπτομένη σε μηδενική (η αρκούντως χαμηλή) παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο μέτρο ελαστικότητας, E) · η μέγιστη τάση (μέγιστο της καμπύλης) που αντιστοιχεί στην αντοχή · η μέγιστη παραμόρφωση πριν από τη θραύση του δοκιμίου, που αντιστοιχεί στην ολκιμότητα · και το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη, από μηδέν παραμόρφωση μέχρι το σημείο θραύσης, που αντιστοιχεί στη δυσθραυστότητα ή ανθεκτικότητα του συνθέτου.

Τύπος ίνας	Πάχος ³	Είδος4	Αναλογία ⁵	Κωδικός	κλάσμα	πάχος
	(μm)	(<i>μ</i> / <i>π</i>)	ίνα/πλασ.	δείγματος	όγκου	δοκ.(mm)
G025P	90	и	3:4	25_90_3_4_1	0.12	0.42
				25_90_3_4_2	0.07	0.40
				25_90_3_4_3	0.13	0.40
				25_90_3_4_4	0.122	0.40
G200P	200	и	1:2	200_1_2_1	0.25	0.45
				200_1_2_2	0.17	0.45
				200_1_2_3	0.21	0.47
G200P	200	х	2:3	200_2_3_1	0.26	0.66
				200_2_3_2	0.255	0.62
				200_2_3_3	0.254	0.69
G200P	200	х	3:4	200_3_4_1	0.3	0.74
				200_3_4_2	0.327	0.74
				200_3_4_3	0.296	0.72
				200_3_4_4	0.319	0.75
G200P	90	х	2:3	200_90_2_3_1	0.36	0.45
				200_90_2_3_2	0.36	0.45
				200_90_2_3_3	0.30	0.46
G200P	180	π	2:3	an200_180_2_3_1	0.25	0.67
				an200_180_2_3_1	0.27	0.70
				an200_180_2_3_1	0.28	0.70
G320U	200	х	1:2	320_200_1_2_1	0.176	
				320_200_1_2_2	0.198	
				320_200_1_2_3	0.25	
				320_200_1_2_4	0.22	
				320_200_1_2_5	0.28	
G320U	200	х	2:3	320_200_2_3_1	0.365	
				320_200_2_3_2	0.31	
				320_200_2_3_3	0.27	
				320_200_2_3_4	0.27	

Πίνακας 4.3: Δείγματα συνθέτου υλικού · είδος ίνας, αναλογία φύλων/υφασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν και κ.ο. σύσταση

 3Π άχος φύλλου LDPE.

⁴Παλαιωμένο (π) ή καινούργιο (κ) LDPE.

⁵Λόγος αριθμών στρώσεων: υαλοϋφάσματα/φύλλα LDPE.



Σχήμα 4.2: Καμπύλες βαθμονόμησης του συστήματος καταγραφής δεδομένων. (α) Μετατόπιση (mm) = $98.5 \times volt + 0.22$. (β) δύναμη (N) = $99.5 \times volt + 0.14$ για την κεφαλή 1000 N.

Βαθμονόμηση του οργάνου

Η συσκευή εφελκυσμού βαθμονομήθηκε ως προς τις ενδείξεις της σε δύναμη, και ως προς τη μετατόπιση των δαγκανών. Οι μετρητές της δύναμης (κεφαλές) βαθμονομήθηκαν με τη χρήση γνωστών βαρών. Η βαθμονόμηση της μετατόπισης και της ταχύτητάς της έγιναν με χρονόμετρο και χάρακα. Οι καμπύλη βαθμονόμησης για το φορτίο (κεφαλή 1000 N) και τη μετατόπιση παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.2.

Κεφάλαιο 5

Ανάλυση αποτελεσμάτων

5.1 Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης

Το βασικό διάγραμμα που προκύπτει από τις μετρήσεις εφελκυσμού είναι το διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης. Από την κλίση της καμπύλης σε μηδενική παραμόρφωση εξάγουμε το μέτρο ελαστικότητας, *E*, συνήθως σε MPa. Από τη μέγιστη τιμή της τάσης (μέγιστο στην καμπύλη) έχουμε την αντοχή (σε MPa). Από το εμβαδόν της περιοχής κάτω από την καμπύλη μέχρι τη θραύση του δοκιμίου έχουμε τη δυσθραυστότητα (σε MJ/m³). Η παραμόρφωση στο σημείο της θραύσης δίνει την ολκιμότητα.

Μετρήθηκαν τα φύλλα πολυαιθυλενίου που χρησιμοποιήθηκαν ως μήτρα, οι ίνες γυαλιού και τα δείγματα του συνθέτου υλικού που παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3. Τα σχήματα 5.1 και 5.2 δίνουν τις καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για το LDPE και τις ίνες γυαλιού, αντίστοιχα. Τα Σχήματα 5.3 έως 5.7 παρουσιάζουν τις καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για μερικά από τα δείγματα του συνθέτου υλικού.

5.2 Μέτρο ελαστικότητας

Καθώς δεν χρησιμοποιήθηκε τενσιόμετρο και η παραμόρφωση υπολογίσθηκε από την μετατόπιση των δαγκανών, η εξαγωγή του μέτρου ελαστικότητας από το διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης δεν ήταν πάντα απλός. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3 η ανάπτυξη της καμπύλης παρουσιάζει αρχικά μια υστέρηση, και το μέγιστο στην κλίση δεν παρουσιάζεται στο μηδέν, αλλά μετά από κάποια παραμόρφωση. Αυτό μπορεί να οφείλεται στη αρχική διευθέτηση του δείγματος ανάμεσα στις δαγκάνες, που προηγείται της πραγματικής εφελκυστικής παραμόρφωσης. Ως μέτρο ελαστικότητας, *E*, ορίσθηκε σε αυτές τις περιπτώσεις η μέγιστη τιμή της κλίσης της καμπύλης.

Οι τιμές του μέτ
ρου ελαστικότητας, E_{exp} (MPa) παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.1
 - 5.3. Από τους πίνακες αυτούς μπορούμε να δούμε ότι το μέτρο ελαστικότητας των



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης για τα φύλλα LDPE (παρθένο και ανακυκλωμένο) που χρησιμοποιήθηκαν ως μήτρα.



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης για τις ίνες γυαλιού (9 mm).



Σχήμα 5.3: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης για δείγμα με 12% ίνες 5 μm διαμέτρου



Σχήμα 5.4: Διάγ
ραμμα τάσης – παραμόρφωσης για δείγμα με 7% ίνες 5 μ
m διαμέτρου



Σχήμα 5.5: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης για δείγμα με 26% ίνες 9 μm διαμέτρου



Σχήμα 5.6: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης για δείγμα με 21% ίνες 9 μ
m διαμέτρου



Σχήμα 5.7: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης για δείγμα με 30% ίνες 9 μm διαμέτρου.

ινών του γυαλιού που μετρήσαμε έχει περίπου το 1/2 της τιμής που περιμέναμε από τους διαθέσιμους πίνακες των τιμών των ιδιοτήτων των υλικών (π.χ. Callister [4]). Αυτό ίσως οφείλεται στο sizing με το οποίο είναι καλυμμένες οι ίνες, το πάχος του οποίου δεν είναι γνωστό. Το στρώμα αυτό δεν συνεισφέρει αρκετά στην ακαμψία της ίνας αλλά συνεισφέρει στην εκτίμηση της πραγματικής διατομής του δείγματος. Άλλη πιθανή πηγή σφάλματος είναι η ολίσθηση, ή το μη σωστό κράτημα του δείγματος της ίνας από τις ειδικές δαγκάνες της συσκευής εφελκυσμού.

Οι τιμή του *E* που μετρήσαμε για το παρθένο LDPE (133 MPa) είναι μέσα στα αναμενόμενα όρια. Το ανακυκλωμένο LDPE έχει χαμηλότερη τιμή του μέτρου ελαστικότητας. Δεν είναι γνωστό αν αυτό οφείλεται σε χαμηλότερη κρυσταλλικότητα του δείγματος αυτού ή στην πλαστικοποιητική δράση παραγόντων του περιβάλλοντος (π.χ. υγρασία, ή μερική αποσύνθεση λόγω UV).

5.2.1 Εξάρτηση του μέτρου ελαστικότητας από το κλάσμα όγκου των ινών

Η σχέση του μέτρου ελαστικότητας με το συνολικό κλάσμα όγκου των ινών φαίνεται στο Σχήμα 5.8. Στο Σχ. 5.8 παρατηρείται αύξηση του μέτρου ελαστικότητας με την αύξηση του κλάσματος όγκου των ινών γυαλιού. Το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται έντονα από το κλάσμα όγκου των ινών γυαλιού, οι οποίες εμποδίζουν την ικανότητα παραμόρφωσης της πολυμερικής μήτρας στην ελαστική περιοχή φέροντας οι ίδιες το μεγαλύτερο μέρος των τάσεων, όπως εξηγήθηκε στο κεφ. 3.1. Έτσι η αύξηση του κλάσματος όγκου των ινών γυαλιού οδηγεί σε υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας. Η δυσκαμψία του συνθέτου αυξάνει σχεδόν γραμμικά με το κλάσμα όγκου των ινών. Τα υλικά με πεπαλαιωμένο φύλλο

Κωδικός	ϕ	d_1	E_1	E_2	E	E_{exp}
δειγμ.			MPa	MPa	MPa	MPa
LDPE	0	1				133
γυαλί	1	1				33000
200_1_2_2_1	0.17	0.61	5720	160	3997	1188
200_1_2_2_2	0.17	0.61	5720	160	3997	1196
200_1_2_2_3	0.17	0.61	5720	160	3997	1293
200_1_2_2_4	0.17	0.61	5720	160	3997	1224
200_1_2_3_1	0.21	0.61	7035	168	4906	1301
200_1_2_3_3	0.21	0.61	7035	168	4906	1284
200 2 3 2 1	0 256	0.61	8547	179	5953	1482

Πίνακας 5.1: Θεωρητικές τιμές των μέτρων εφελκυσμού στις κύριες κατευθύνσεις του συνθέτου υλικού φτιαγμένο με το υαλόνημα G200P, E_1 και E_2 , καθώς και η τιμή του Eστην

δειγμ.			MPa	MPa	MPa	MPa
LDPE	0	1				133
γυαλί	1	1				33000
200_1_2_2_1	0.17	0.61	5720	160	3997	1188
200_1_2_2_2	0.17	0.61	5720	160	3997	1196
200_1_2_2_3	0.17	0.61	5720	160	3997	1293
200_1_2_2_4	0.17	0.61	5720	160	3997	1224
200_1_2_3_1	0.21	0.61	7035	168	4906	1301
200_1_2_3_3	0.21	0.61	7035	168	4906	1284
200_2_3_2_1	0.256	0.61	8547	179	5953	1482
200_2_3_2_2	0.256	0.61	8547	179	5953	1476
200_2_3_2_3	0.256	0.61	8547	179	5953	1291
200_1_2_1_2	0.246	0.61	8218	176	5725	1461
200_1_2_1_4	0.246	0.61	8218	176	5725	1328
200_2_3_3_1	0.254	0.61	8481	178	5907	1276
200_2_3_3_2	0.254	0.61	8481	178	5907	1350
200_2_3_3_4	0.254	0.61	8481	178	5907	1405
200_2_3_1_1	0.26	0.61	8678	179	6044	1238
200_2_3_1_2	0.26	0.61	8678	179	6044	1119
200_2_3_1_3	0.26	0.61	8678	179	6044	1191
200_3_4_3_1	0.296	0.61	9862	189	6863	2081
200_3_4_3_2	0.296	0.61	9862	189	6863	2344
200_3_4_1_1	0.298	0.61	9927	189	6909	1949
200_3_4_1_2	0.298	0.61	9927	189	6909	2029
200_3_4_1_3	0.298	0.61	9927	189	6909	1930
200_90_2_3_3_1	0.3	0.61	9993	190	6954	2045
200_90_2_3_3_2	0.3	0.61	9993	190	6954	2204
200_90_2_3_3_3	0.3	0.61	9993	190	6954	2079
200_3_4_4_1	0.319	0.61	10618	195	7387	1970
200_3_4_2_1	0.327	0.61	10881	197	7569	2337
200_3_4_2_2	0.327	0.61	10881	197	7569	2451
200_90_2_3_1_1	0.362	0.61	12031	208	8366	2029
200_90_2_3_1_3	0.362	0.61	12031	208	8366	2059
200_90_2_3_2_1	0.364	0.61	12097	209	8411	2196
200_90_2_3_2_2	0.364	0.61	12097	209	8411	2340
200_90_2_3_2_3	0.364	0.61	12097	209	8411	2098

Κωδικός	ϕ	d_1	E_1	E_2	E	E_{exp}
δειγμ.			MPa	MPa	MPa	MPa
25_90_3_4_2_1	0.07	0.5	2434	143	1288	1102
25_90_3_4_2_2	0.07	0.5	2434	143	1288	1112
25_90_3_4_2_3	0.07	0.5	2434	143	1288	1087
25_90_3_4_2_4	0.07	0.5	2434	143	1288	1105
25_90_3_4_3_1	0.128	0.5	4340	152	2246	569
25_90_3_4_3_2	0.128	0.5	4340	152	2246	774
25_90_3_4_1_2	0.12	0.5	4077	151	2114	1124
25_90_3_4_1_3	0.12	0.5	4077	151	2114	1124
25_90_3_4_4_1	0.122	0.5	4143	151	2147	915
25_90_3_4_4_2	0.122	0.5	4143	151	2147	910
25_90_3_4_4_3	0.122	0.5	4143	151	2147	828
25_90_3_4_4_4	0.122	0.5	4143	151	2147	1089

Πίνακας 5.2: Συνέχεια πίνακα 5.1 για το υαλόνημα G025P.

Πίνακας 5.3: Συνέχεια πίνακα 5.1 για τα δείγματα με ανακυκλωμένο LPDE ως μήτρα

Κωδιπός	ϕ	d_1	E_1	E_2	E	E_{exp}
δειγμ.			MPa	MPa	MPa	MPa
LDPE ανακ.	0	1				59
an200_180_2_3_1_1	0.254	0.61	8426	79	5838	1742
an200_180_2_3_1_2	0.254	0.61	8426	79	5838	1723
an200_180_2_3_1_3	0.254	0.61	8426	79	5838	1938
an200_180_2_3_2_2	0.265	0.61	8788	80	6089	1751
an200_180_2_3_2_3	0.265	0.61	8788	80	6089	1812
an200_180_2_3_3_1	0.276	0.61	9151	81	6339	1772
an200_180_2_3_3_2	0.276	0.61	9151	81	6339	1773
an200_180_2_3_3_3	0.276	0.61	9151	81	6339	1911



Σχήμα 5.8: Το μέτρο ελαστικότητας των συνθέτων ως συνάρτηση του κλάσματος όγκου των ινών (όλα τα δείγματα)

ως μήτρα έχουν λίγο υψηλότερες τιμές του *E* από ότι τα υλικά με παρθένο LDPE ως μήτρα. Η μικρή αυτή διαφορά δεν μπορεί να οφείλεται στην μειωμένη τιμή της ακαμψίας του παλαιωμένου φύλλου, αλλά έχει σχέση με στο μικρότερο πάχος αυτού του φύλλου (180μm) σε σχέση με το καινούργιο φύλλο (200μm) και με το ιξώδες του τήγματος του υλικού και την αλληλεπίδραση της μήτρας με την ίνα, όπως θα δούμε παρακάτω.

Όπως αναμένεται, η δυσκαμψία του συνθέτου αυξάνει με το κλάσμα όγκου των ινών. Η αύξηση είναι σχεδόν γραμμική. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών, όμως δεν μπορεί να γίνει με έναν απλό κανόνα ανάμιξης. Για την θεωρητική μελέτη, λοιπόν, του μηχανισμού ενίσχυσης των ινών του υαλοϋφάσματος θεωρούμε ότι το σύνθετο υλικό αποτελείται από δύο στρώματα στοιβαγμένα το ένα πάνω στο άλλο. Στο πρώτο στρώμα όλες οι συνεχείς ίνες είναι προσανατολισμένες στην κατεύθυνση του φορτίου και στο δεύτερο όλες οι ίνες είναι προσανατολισμένες κάθετα σε αυτήν την κατεύθυνση. Το κλάσμα όγκου των ινών σε κάθε στρώμα είναι το ίδιο με το κλάσμα όγκου σε ολόκληρο το δείγμα, όπως δίνεται στην προτελευταία στήλη στον πίνακα 4.3. Το σχετικό πάχος των στρωμάτων αντιστοιχεί στον λόγο των ποσοστών των ινών που είναι στο στημόνι και στο υφάδι: $d_1: d_2 = 0.50: 0.50$ για τα υαλοϋφάσματα G025P και 0.61: 0.39 για το G200P.

Το μέτρο ελαστικότητας (εφελκυσμού) του συνθέτου κατά την κατεύθυνση του φορτίου (η κατεύθυνση που μετράμε) θα είναι ο μέσος όρος των E_1 και E_2 ζυγισμένα με τα πάχη των παραπάνω στρωμάτων. Τα μέτρα ελαστικότητας E_1 και E_2 των στρωμάτων είναι:

$$E_1 = E_f \phi + E_m (1 - \phi)$$

5.2. ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

$$E_2 = \left(\frac{\phi}{E_f} + \frac{1-\phi}{E_m}\right)^{-1}$$

Το μέτρο ελαστικότητας του συνθέτου γίνεται:

$$E = E_1 * d_1 + E_2 * d_2 = d_1 \left(E_f \phi + E_m (1 - \phi) \right) + d_2 \left(\frac{\phi}{E_f} + \frac{1 - \phi}{E_m} \right)^{-1}$$
(5.1)

Οι θεωρητικές τιμές των E_1 και E_2 για τα διάφορα δείγματα φαίνονται στους Πίνακες 5.1 - 5.3 (υπενθύμιση: $d_2 = 1 - d_1$). Προφανώς οι πειραματικές μετρήσεις δεν συμφωνούν με τις θεωρητικές. Η μεγάλη απόκλιση μπορεί να έχει τρεις αιτίες:

- Αέρας εγκλωβισμένος στο σύνθετο και/ή μη πλήρης διαβροχή των ινών από το πολυμερές
- Ο προσανατολισμός των ινών στο στημόνι του υφάσματος στο σύνθετο δεν είναι πλήρης, καθώς οι ίνες αυτές περνάνε εναλλάξ πάνω και κάτω από τα διαδοχικά νήματα του υφαδιού που συναντούν (Σχ. 1.4).
- 3. Η παραμόρφωση των ινών στο υαλόνημα δεν ακολουθούν το μηχανισμό που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των θεωρητικών μοντέλων του κεφαλαίου 3.1. Δηλαδή, το υαλοΰφασμα (υφασμένες ίνες) είναι πολύ πιο εύκαμπτο σε εφελκυσμό από ότι οι τεντωμένες ίνες γυαλιού, οι οποίες έχουν μέτρο ελαστικότητας $E_g=33$ GPa.

Διαβροχή των ινών από το LDPE

Μετά την παρασκευή των δειγμάτων, το υλικό μακροσκοπικά φαίνεται «ομοιογενές» χωρίς περιοχές με διαφορετικό χρώμα, που θα έδειχναν παρουσία μακροσκοπικών κενών ή διαφορές στη σύσταση. Μπορούσαμε, όμως, να ξεχωρίσουμε τα φύλλα του πολυμερούς και τα υαλοϋφάσματα, από τα οποία αποτελούνται οι πλάκες των δειγμάτων με σχετική ευκολία για ορισμένους συνδυασμούς στοίβαξης. Αυτό δείχνει ότι το πολυμερές ίσως να μην είχε εισχωρήσει πλήρως ανάμεσα στις (διαμέτρου μερικών μm) ίνες του υφάσματος. Η μη πλήρης διαβροχή έχει τις ακόλουθες συνέπειες στις μετρήσεις του μέτρου ελαστικότητας.

 Το πάχος και ο όγκος του δείγματος, που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του κλάσματος όγκου και τη μετατροπή της δύναμης στη συσκευή εφελκυσμού σε τάση δεν είναι σωστά, καθώς, ίσως, περιλαμβάνουν και κενά ή αέρα, που δεν συνεισφέρουν θετικά στην πυκνότητα ή στην ακαμψία του υλικού. Τα κενά αυτά, όμως, εκτιμάται ότι είναι μικρά και δεν είναι καθοριστικά για την εξήγηση των διαφορών στον Πίνακα 5.1.

- Η μεταφορά τάσης από τη μήτρα στις ίνες δεν είναι πλήρης, με αποτέλεσμα μεγαλύτερο ποσοστό των τάσεων να φέρεται από τη μήτρα.
- 3. Οι ίνες γυαλιού είναι υφασμένες και όχι πλήρως ίσιες. Ο εφελκυσμός τους, λοιπόν, μπορεί να περιέχει ένα στοιχείο κάμψης τους. Την κάμψη των ινών του στημονιού αντιμάχονται οι ίνες του υφαδιού. Αν δεν υπάρχει πλήρης διαβροχή ινών από τη μήτρα, η αντιστάθμιση αυτή δεν μπορεί να είναι ικανοποιητική. Στην περίπτωση αυτή το μέτρο ελαστικότητας που μετριέται αντιστοιχεί περισσότερο στο «τέν-τωμα» των ινών από το κυματιστό τους σχήμα προς το ευθύ, που δεν εμποδίζεται επαρχώς από τις εγκάρσιες ίνες.

Οι κάπως υψηλότερες τιμές του μέτρου ελαστικότητας των συνθέτων υλικών με ανακυκλωμένο (παλιό) πολυμερές ως μήτρα δείχνει ότι το πρόβλημα της διαβροχής είναι λιγότερο έντονο για αυτό το υλικό. Πρώτον, το πάχος του ανακυκλωμένου φύλλου είναι λίγο μικρότερο από το παρθένο (180 μm vs. 200 μm). Δεύτερον, φαίνεται ότι η μερική αποσύνθεση του εν λόγω υλικού από την UV ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα, μειώνει το μέσο μοριακό βάρος, άρα και το ιξώδες, η του τήγματος, καθώς $\eta \propto M_w^{3.4}$, με M_w το μέσο κατά βάρος μοριακό βάρος του πολυμερούς. Έτσι επέρχεται καλύτερη ροή και διείσδυση του τήγματος της μήτρας ανάμεσα και γύρω από τις ίνες.

Προσανατολισμός των ινών στο σύνθετο

Καθώς οι ίνες στο σύνθετο παραμένουν υφασμένες, δεν έχουν απολύτως ευθεία μορφή. Η κυματοειδής τους μορφή στην απλή ύφανση μπορεί να προσεγγισθεί ως μια πεπλατυμένη ημιτονοειδή καμπύλη (σχ. 1.4 και 5.9), όπου μια ίνα από το στημόνι σκαρφαλώνει πάνω από ένα αριθμό ινών (νήμα) του υφαδιού και στη συνέχεια κάτω από το επόμενο νήμα κ.ο.κ. Αντίστοιχα για τις ίνες του υφαδιού. Οι ίνες, με άλλα λόγια, δεν είναι πλήρως προσανατολισμένες στην κατεύθυνση του φορτίου, ή κάθετα σε αυτό. Η γωνία προσανατολισμού τους στο (1,3) επίπεδο μπορεί να υπολογισθεί παίρνοντας το μέσο όρο, ολοκληρώνοντας, δηλαδή την εφαπτομένη αυτής της γραμμής από 0 – π.

Από τα δεδομένα του Πίνακα 4.1 (ends/cm στις δύο διαστάσεις του υφάσματος), η εξίσωση που περιγράφει την καμπύλη που διαγράφει μια ίνα του στημονιού γύρω από τις ίνες του υφαδιού είναι:

$$z(x) = a_1 \cos \frac{2\pi x}{w_1} \Rightarrow \varkappa \log \eta = \frac{dz}{dx} = -\frac{2a_1\pi}{w_1} \sin \frac{2\pi x}{w_1}$$
(5.2)

όπου w_1 είναι η απόσταση ανάμεσα στους άξονες δύο γειτονικών νημάτων (το αντίστροφο του αριθμού νημάτων (ends) ανά cm του υφαδιού στον Πίνακα 1.3, $w_1 = L/2$ στο Σχ. 5.9) και, για τα υφάσματά μας, $a_1 \approx 0.2w_1$ ($a_1 = h$ στο Σχ. 5.9) ή $a_1 = H/2$, με H το πάχος του υαλοϋφάσματος. Η γωνία της ίνας κατά μήκος του στημονιού είναι:

$$\theta = \arctan\left\{-\frac{2a_1\pi}{w_1}\sin\left(\frac{2\pi x}{w_1}\right)\right\}$$
(5.3)


Σχήμα 5.9: Σχηματική παράσταση των υφασμένων ινών στα υαλοϋφάσματα. Τα γραμμοσκιασμένα σχήματα στο (β) αντιστοιχούν στις διατομές των νημάτων του υφαδιού (από Xiong et al. [17]).

Με γνωστή την κατανομή των γωνιών προσανατολισμού μπορεί τώρα να χρησιμοποιηθεί η εξ. 3.19 για τον συντελεστή διόρθωσης, η_0 , του μέτρου ελαστικότητας E_1 της εξ. 3.18:

$$\eta_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos^4 \theta \ d\theta = \frac{1}{w_1} \int_0^w \cos^4 \theta(x) \ dx \tag{5.4}$$

Апо та парапа́чы ипоλογίζεται μια μέση γωνία $\langle |\theta| \rangle \approx 8^{o}$ για το ύφασμα G025P και $\langle |\theta| \rangle \approx 11^{o}$ για το G200P. Οι συντελεστές διόρθωσης υπολογίζονται σε $\eta_{0} \approx 0.96$ και 0.92, αντίστοιχα. Προφανώς οι μικρές αυτές διακυμάνσεις στη γωνία προσανατολισμού των ινών δεν είναι ικανές να δικαιολογήσουν τις μεγάλες διαφορές ανάμεσα στις μετρήσεις και στις θεωρητικές προβλέψεις του μέτρου ελαστικότητας του συνθέτου.

Παρόμοια προσέγγιση ακολούθησαν οι Naik and Ganesh [18] για να υπολογίσουν τις ελαστικές ιδιότητες του συνθέτου υλικού με ενίσχυση υφάσματος. Και σε αυτή τη μελέτη χωρίστηκαν το στημόνι από το υφάδι σε στρώματα και χρησιμοποιήθηκε η εξάρτηση της γωνίας προσανατολισμού από το x (για το στημόνι) και y για το υφάδι σε κάθε στρώμα αντίστοιχα. Έτσι υπολογίστηκαν όλοι οι όροι του τανυστή ακαμψίας για το στρώμα που αντιστοιχεί στο στημόνι και το στρώμα που αντιστοιχεί στο υφάδι και χρησιμοποιήθηκε η κλασσική θεωρία των συστρωματώσεων για να υπολογισθεί το μέτρο ελαστικότητας του συνθέτου [18].

Μια πιο λεπτομερής προσέγγιση με τη θεώρηση των δυνάμεων και των ροπών που δημιουργούνται λόγω αλληλεπιδράσεων των νημάτων του στημονιού και υφαδιού παρου-

σιάσθηκε από τους Xiong et al. [17] και συνοψίζεται στο Παράρτημα.

Επίδραση της ύφανσης

Στο υαλούφασμα οι ίνες δεν είναι πλήρως εκτεταμένες. Κατά τον εφελκυσμό, οι ίνες του στημονιού μπορούν να μειώσουν την κάμψη τους («ανακάμψουν» ή ισιώσουν) από το κυματοειδές τους σχήμα. Σε αυτό τους εμποδίζουν η μήτρα και οι ίνες στο υφάδι. Όταν το μέτρο ελαστικότητας της μήτρας είναι χαμηλό, όμως, είναι δυνατόν αυτή η «ανάκαμψη» να μην εμποδίζεται αρκετά, ούτε από τη μήτρα, ούτε από το υφάδι, οι ίνες του οποίου είναι ακόμα λιγότερο περιορισμένες για την κάμψη τους. Έτσι, κατά τη μέτρηση του μέτρου ελαστικότητας του συνθέτου, είναι πιθανόν να μετράμε κυρίως την αντίσταση των ινών του στημονιού να ισιώσουν στο περιβάλλον του σύνθετου και όχι την αντίσταση τους σε μονοαξονικό εφελκυσμό.

5.2.2 Εξάρτηση του E από το πάχος των ινών

Η σχέση του μέτρου ελαστικότητας με το κλάσμα όγκου των ινών για τα υαλοϋφάσματα με πάχος ίνας 5 μm και μήτρα από παρθένο LDPE φαίνεται στο Σχήμα 5.8 (κύκλοι). Τα αντίστοιχα σημεία στο διάγραμμα για ίνες 9 μm παρουσιάζονται με τετραγωνάκια και τριγωνάκια. Αν και η διασπορά των αποτελεσμάτων είναι αρκετά μεγάλη, ιδιαίτερα για τα μικρά κλάσματα όγκου, φαίνεται ότι δεν υπάρχει σημαντική επίδραση του πάχους της ίνας στο μέτρο ελαστικότητας του συνθέτου υλικού.

5.3 Ολκιμότητα, αντοχή και δυσθραυστότητα

Ως ολκιμότητα εδώ ορίζεται η μέγιστη παραμόρφωση στην οποία επέρχεται η θραύση (αστοχία) του δοκιμίου. Η αντοχή των συνθέτων υλικών ευρίσκεται από το μέγιστο στη καμπύλη τάσης παραμόρφωσης. Η ανθεκτικότητα υπολογίζεται από το εμβαδόν κάτω από τη καμπύλη τάσης παραμόρφωσης. Οι τιμές της ολκιμότητας, ε^{*}, της αντοχής, σ^{*}, και της ανθεκτικότητας, E_A, των δειγμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.

5.3.1 Ολκιμότητα

Η ολκιμότητα του πολυαιθυλενίου είναι πολύ μεγάλη (Σχ. 5.1). Τα δείγματα από καθαρό πολυμερές παραμορφώνονται αρχικά ελαστικά, μέχρι 2%, και κατόπιν πλαστικά, σχηματίζοντας λαιμό, μέχρι πάνω από 200%. Οι ίνες γυαλιού έχουν πολύ μικρή ολκιμότητα. Βασικά παραμορφώνονται ελαστικά μέχρι 3 - 5%, όπου και σπάνε (Σχ. 5.2).

Η ολκιμότητα των συνθέτων υλικών φαίνεται να μειώνεται ελαφρά με το κλάσμα όγκου του γυαλιού (Σχ. 5.10), τουλάχιστον μέσα στα όρια που μετρήσαμε. Εξαρτάται, όμως πιο έντονα από το πάχος της ίνας. Τα περισσότερα δείγματα με υαλοΰφασμα G200P (διά-

64

κωδικός	ϕ	ε^*	σ_1^*	σ_2^*	σ^*	σ^*_{exp}	E_A
			MPa	MPa	MPa	MPa	MJ/m ³
LDPE	0	>2				9	
glass fibres	1	0.05				1152	
200_1_2_2_1	0.17	0.14	121.7	2.09	123.8	155.1	11.9
200_1_2_2_2	0.17	0.17	121.7	2.09	123.8	156.2	10.8
200_1_2_3	0.17	0.13	121.7	2.09	123.8	141	9.8
200_1_2_2_4	0.17	0.14	121.7	2.09	123.8	146	9.7
200_1_2_3_1	0.21	0.13	149.7	1.88	151.6	157	10.2
200_1_2_3_3	0.21	0.14	149.7	1.88	151.6	164.7	10.3
200_2_3_2_1	0.256	0.12	181.9	1.67	183.6	185	10.8
200_2_3_2_2	0.256	0.13	181.9	1.67	183.6	166.5	10
200_2_3_2_3	0.256	0.13	181.9	1.67	183.6	145	8.7
200_1_2_1_2	0.246	0.11	174.9	1.72	176.7	160	8.4
200_1_2_1_4	0.246	0.13	174.9	1.72	176.7	165	8.6
200_2_3_3_1	0.254	0.13	180.5	1.68	182.2	175.6	11
200_2_3_3_2	0.254	0.12	180.5	1.68	182.2	176	10
200_2_3_3_4	0.254	0.13	180.5	1.68	182.2	168.3	10.3
200_2_3_1_1	0.26	0.11	184.7	1.66	186.4	123.4	7
200_2_3_1_2	0.26	0.11	184.7	1.66	186.4	113	6.5
200_2_3_1_3	0.26	0.13	184.7	1.66	186.4	140	10.5
200_3_4_3_1	0.296	0.11	209.9	1.51	211.4	227.3	12.4
200_3_4_3_2	0.296	0.10	209.9	1.51	211.4	221	9.8
200_3_4_1_1	0.298	0.11	211.3	1.50	212.8	188.5	10
200_3_4_1_2	0.298	0.10	211.3	1.50	212.8	178	8.35
200_3_4_1_3	0.298	0.10	211.3	1.50	212.8	182.4	8.75
200_90_2_3_3_1	0.3	0.13	212.7	1.49	214.2	254.5	15.4
200_90_2_3_3_2	0.3	0.12	212.7	1.49	214.2	255	14.8
200_90_2_3_3_3	0.3	0.13	212.7	1.49	214.2	273	16
200_3_4_4_1	0.319	0.11	226.0	1.41	227.5	181	10.7
200_3_4_2_1	0.327	0.11	231.6	1.38	233.0	159.2	12
200_3_4_2_2	0.327	0.11	231.6	1.38	233.0	178.7	9.3
200_90_2_3_1_1	0.362	0.13	256.1	1.25	257.4	248	14.9
200_90_2_3_1_3	0.362	0.13	256.1	1.25	257.4	252	15
200_90_2_3_2_1	0.364	0.14	257.5	1.24	258.8	253	18
200_90_2_3_2_2	0.364	0.13	257.5	1.24	258.8	256	15.6
200_90_2_3_2_3	0.364	0.13	257.5	1.24	258.8	250.5	15.8

Πίνακας 5.4: Ολκιμότητα, Αντοχή και Ενέργεια θραύσης των συνθέτων υλικών, (α) με ίνες πάχους 9 μm.

κωδικό ς	ϕ	ε^*	σ_1^*	σ_2^*	σ^*	σ^*_{exp}	E_A
			MPa	MPa	MPa	MPa	MJ/m^3
25_90_3_4_2_1	0.07	0.07	42.4	3.51	45.9	48.5	1.9
25_90_3_4_2_2	0.07	0.05	42.4	3.51	45.9	51	1.3
25_90_3_4_2_3	0.07	0.05	42.4	3.51	45.9	56.3	1.37
25_90_3_4_2_4	0.07	0.05	42.4	3.51	45.9	55.4	1.57
25_90_3_4_3_1	0.128	0.06	75.7	2.98	78.7	33	1.2
25_90_3_4_3_2	0.128	0.06	75.7	2.98	78.7	42	1.3
25_90_3_4_1_2	0.12	0.05	71.1	3.05	74.1	46.4	1.06
25_90_3_4_1_3	0.12	0.05	71.1	3.05	74.1	48.6	1.17
25_90_3_4_4_1	0.122	0.06	72.2	3.03	75.3	42.6	1.46
25_90_3_4_4_2	0.122	0.05	72.2	3.03	75.3	49.7	1.47
25_90_3_4_4_3	0.122	0.06	72.2	3.03	75.3	38.2	1.28
25_90_3_4_4_4	0.122	0.07	72.2	3.03	75.3	43.6	1.6

Πίνακας 5.5: Συνέχεια πίνακα 5.4 (β) για το υαλόνημα G025P (πάχος ινών 5 μm).

Πίνακας 5.6: Συνέχεια πίνακα 5.4 (γ) για τα σύνθετα με ανακυκλωμένο LDPE

κωδικό ς	ϕ	ε^*	σ_1^*	σ_2^*	σ^*	σ^*_{exp}	E_A
			MPa	MPa	MPa	MPa	MJ/m^3
LDPE (ανακ.)	0	>2				9	
an200_180_2_3_1_1	0.254	0.07	179.6	1.51	181.1	134.58	4.62
an200_180_2_3_1_2	0.254	0.08	179.6	1.51	181.1	147.48	5.82
an200_180_2_3_1_3	0.254	0.08	179.6	1.51	181.1	150.6	6.1
an200_180_2_3_2_2	0.265	0.08	187.3	1.47	188.8	131.8	4.9
an200_180_2_3_2_3	0.265	0.07	187.3	1.47	188.8	103.8	3.7
an200_180_2_3_3_1	0.276	0.06	195.1	1.43	196.5	120.1	3.9
an200_180_2_3_3_2	0.276	0.06	195.1	1.43	196.5	112.3	3.6
an200_180_2_3_3_3	0.276	0.08	195.1	1.43	196.5	140.9	5.17



Σχήμα 5.10: Η ολκιμότητα των συνθέτων ως συνάρτηση του κλάσματος όγκου των ινών (όλα τα δείγματα). Οι γραμμές είναι γραμμικές παρεμβολές για κάθε ομάδα δειγμάτων.

μετρο ίνας 9 μm) αστόχησαν σε παραμόρφωση 10 - 14 %. Τα σύνθετα με τις λεπτότερες ίνες αστόχησαν σε παραμόρφωση 5 - 7 %.

Όταν χρησιμοποιήθηκε παλαιωμένο πολυμερές ως μήτρα, η ολκιμότητα του συνθέτου υλικού με ίνες διαμέτρου 9 μm έπεσε στο 6 - 8 %. Αυτό πρέπει να οφείλεται στην μειωμένη ολκιμότητα του γηρασμένου λόγω UV χρησιμοποιημένου πολυαιθυλενίου.

5.3.2 Αντοχή

Η αντοχή των δειγμάτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.11. Στο διάγραμμα αυτό παρατηρείται αύξηση της αντοχής με την αύξηση του κλάσματος όγκου των ινών γυαλιού για τα δείγματα με καινούριο φύλλο LDPE. Τα σύνθετα με λεπτές ίνες (υαλοΰφασμα G025P) δίνουν γενικά μικρότερη αντοχή από ότι τα αντίστοιχα με το υαλοΰφασμα G200P. Για τα δείγματα με παλαιωμένο φύλλο παρατηρούμε ότι αν και έχουν μεγαλύτερο κλάσμα όγκου ινών από άλλα δείγματα δεν παρουσιάζουν αντίστοιχη αύξηση στην αντοχή.

Η κάπως μειωμένη αυτή αντοχή οφείλεται στην παλαιότητα και γήρανση του πολυμερικού φύλλου. Προέρχεται από την κακή μεταφορά τάσεων από τη μήτρα στις ίνες και στην κακή πρόσφυση μήτρας–πολυμερούς λόγω και των ακαθαρσιών που ενδέχεται να έχουν μείνει στη μήτρα λόγω παλαιότητας. Οφείλεται επίσης στη φυσική και χημική (UV) γήρανση του υλικού της μήτρας. Η υπεριώδης ακτινοβολία δημιουργεί ελεύθερες ρίζες στο υλικό, οι οποίες αντιδρούν και σπάζουν τις αλυσίδες του πολυμερούς, με αποτέλεσμα να μειώνεται το μέσο μοριακό βάρος του. Η αντοχή του πολυμερούς αυξάνει



Σχήμα 5.11: Η αντοχή των συνθέτων ως συνάρτηση του κλάσματος όγκου των ινών (όλα τα δείγματα). Η γραμμή δείχνει την trendline των συνθέτων με ίνες διαμέτρου 9 μm.

με το μέσο μοριακό βάρος κατ' αριθμό, \bar{M}_n [4]:

$$\sigma_p^* = \sigma_\infty^* - \frac{A'}{\bar{M}_n}$$

Η αντοχή ενός lamina υπολογίζεται από το κριτήριο Tsai-Hill (σελ. 41). Για την περίπτωση των υφασμένων ινών της παρούσας εργασίας, αρκεί να υπολογισθεί η αντοχή κατά μήκος των ινών του στημονιού, σ_1^* , η εγκάρσια αντοχή (κατά μήκος των ινών του υφαδιού), σ_2^* , και ο μέσος όρος τους, ζυγισμένος με τα ποσοστά ινών στο στημόνι και στο υφάδι, και να συγκριθεί με τις πειραματικές μετρήσεις.

$$\sigma_1^* = \left[\phi \sigma_f^* + (1 - \phi) \sigma_{mf}^*\right]$$
$$\sigma_2^* = \sigma_m^* \left[1 - 2\sqrt{\frac{\phi}{\pi}}\right]$$
$$\sigma^* = d_1 \sigma_1^* + d_2 \sigma_2^*$$
(5.5)

 σ^*_{mf} είναι η τιμή της τάσης στη μήτ
ρα για παραμόρφωση ίση με την ολκιμότητα των ινών: $\sigma^*_{mf}=E_m\varepsilon^*_f.$

Οι τιμές των σ_1^* και σ_2^* για τα δείγματα φαίνονται στον Πίνακα 5.4. Η συμφωνία με τη θεωρία είναι ικανοποιητική για τις ίνες πάχους 9 μm και παρθένο πολυμερές ως μήτρα. Οι λεπτές ίνες και το παλαιωμένο LDPE δίνουν σύνθετα με αντοχή κάτω από τη θεωρητική (Σχ. 5.12).



Σχήμα 5.12: Σύγκριση της αντοχής των συνθέτων υλικών (σημεία) με τις θεωρητικές προβλέψεις (γραμμές, εξ. 5.5).

Το πάχος της ίνας στο σύνθετο φαίνεται να επηρεάζει την αντοχή. Τα σημεία που αντιστοιχούν στις λεπτές ίνες στο Σχ. 5.11 πέφτουν κάτω από την προέκταση της γραμμής που δίνει την τάση των δεδομένων (trendline). Μια μικρή μείωση πρέπει να περιμένουμε γιατί στην περίπτωση του υφάσματος G025P το στημόνι, το οποίο συνεισφέρει περισσότερο στην αντοχή σε εφελκυσμό, έχει αναλογικά λιγότερες ίνες από ότι το G200P. Φαίνεται, όμως, ότι οι λεπτότερες ίνες δίνουν χαμηλότερη αντοχή στο σύνθετο. Προφανώς αυτό έχει να κάνει με τα μικρότερα διάκενα ανάμεσα στις ίνες σε αυτή την περίπτωση, μέσα στα οποία πρέπει να διεισδύσει το τήγμα του πολυμερούς κατά την παρασκευή του συνθέτου, κάτι που μειώνει την πιθανότητα καλής διαβροχής.

5.3.3 Ανθεκτικότητα

Η ενέργεια που χρειάζεται για να σπάσουν τα δείγματα παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.13. Το διάγραμμα αυτό παρουσιάζει την ανθεκτικότητας του σύνθετου υλικού ως συνάρτηση του κλάσματος όγκου των ινών του.

Η ανθεκτικότητα ενός υλικού είναι αντίσταση στη θραύση όταν σε αυτό εφαρμόζεται μια τάση. Ορίζεται ως η συνολική ενέργεια ανά όγκο (J/m³) που μπορεί να απορροφήσει ένα υλικό μέχρι να αστοχήσει. Η ανθεκτικότητα δηλαδή, εξαρτάται από τα επίπεδα τάσεων που μπορεί να φέρει το υλικό και από την ολκιμότητα του.

Στο διάγραμμα 5.13 παρατηρείται αύξηση της ανθεκτικότητας με την αύξηση του κλάσματος όγκου των ινών στα δείγματα με καινούργιο φύλλο. Όπως παρατηρήσαμε και



Σχήμα 5.13: Η ενέργεια προς θραύση των συνθέτων ως συνάρτηση του κλάσματος όγκου των ινών (όλα τα δείγματα). Η γραμμή δείχνει την trendline των συνθέτων με ίνες διαμέτρου 9 μm.

για την αντοχή, η ανθεκτικότητα που μετρήθηκε στα δείγματα εξαρτάται από το πάχος των ινών και από το υλικό της μήτρας.

Τα σημεία που αντιστοιχούν στα σύνθετα με τις λεπτές ίνες στο Σχ. 5.13 πέφτουν και εδώ κάτω από την trendline των δεδομένων των συνθέτων με τις ίνες διαμέτρου 9 μm. Καθώς η ανθεκτικότητα στα σύνθετα υλικά εξαρτάται πολύ από τις αλληλεπιδράσεις μήτρας – ίνας, η μειωμένη ενέργεια θραύσης σε αυτή την περίπτωση αντικατοπτρίζει τη δυσκολία διείσδυσης της μήτρας ανάμεσα στις λεπτές ίνες και την χαμηλότερη ολκιμότητα. Η μείωση της ανθεκτικότητας στα σύνθετα με παλαιωμένο πολυμερές ως μήτρα φαίνεται ότι οφείλεται στην ψαθυρότητα της μήτρας που έχει υποστεί χημική γήρανση στην ατμόσφαιρα των θερμοκηπίων.

5.4 Γενική συζήτηση

5.4.1 Υαλοϋφάσματα ως ενίσχυση συνθέτων

Όπως αναμενόταν, η αύξηση του κλάσματος όγκου των ινών επιφέρει γρήγορη αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, της αντοχής και της ανθεκτικότητας του συνθέτου υλικού. Τουλάχιστον, όμως για το μέτρο ελαστικότητας, η αύξηση αυτή δεν είναι τόσο γρήγορη όσο προβλέπει η θεωρία των συνθέτων υλικών. Αυτό οφείλεται στο ότι οι ίνες που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή του συνθέτου ήταν υφασμένες. Στο ύφασμα οι ίνες δεν είναι πλήρως εκτεταμένες, αλλά έχουν ένα κυματοειδές σχήμα. Φαίνεται, λοιπόν, ότι όταν το υαλοΰφασμα υφίσταται εφελκυστικό φορτίο, οι ίνες του στημονιού ανταποκρίνονται αρχικά κυρίως με μείωση της κάμψης τους από το κυματοειδές τους σχήμα και δευτερευόντως με έκταση. Το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας της μήτρας και το γεγονός ότι οι ίνες στο υφάδι είναι λιγότερο περιορισμένες στις κινήσεις τους και στην περαιτέρω καμπτική παραμόρφωσή τους, έχει ως αποτέλεσμα να μην εμποδίζεται σημαντικά αυτή η «ανάκαμψη» των ινών του στημονιού. Το μέτρο ελαστικότητας, λοιπόν, που μετράμε με τον κλασσικό τρόπο δεν μπορεί να υπολογισθεί από τον συγκερασμό των μέτρων ελαστικότητας των δύο υλικών συστατικών του συνθέτου (γυαλί και LDPE), αλλά από τη δυνατότητα των ινών του στημονιού να «ισιώσουν» από την κυματοειδή μορφή που έχουν στο υαλοΰφασμα δεδομένων των περιορισμών που τους βάζουν οι ίνες του υφαδιού και η πολυμερική μήτρα.

Σε αυτή τη λογική οι ιδιότητες της μήτρας είναι πολύ πιο σημαντικές από ότι δέχεται η κλασσική θεωρία. Αυτό εξηγεί τις μεγάλες διαφορές των τιμών του μέτρου ελαστικότητας στον Πίνακα 5.1. Αν οι ίνες του στημονιού μπορέσουν να ισιώσουν πλήρως, τότε οι πειραματικές μετρήσεις θα έρθουν σε συμφωνία με την απλή θεωρία των ιδιοτήτων των μιγμάτων που παρουσιάστηκε. Η μέτρηση του μέτρου ελαστικότητας σε αυτήν την περίπτωση, πρέπει να γίνεται σε «μεγάλες» παραμορφώσεις για να επέλθει συμφωνία με τις θεωρητικές.

Για την πλήρη περιγραφή των αποτελεσμάτων στα σχήματα 5.1 - 5.8, χρειάζεται, λοιπόν, να εφαρμοσθεί μια άλλη θεωρία που να μπορεί να υπολογίζει και τη συμπεριφορά των υφασμάτων. Η βιβλιογραφία μας δίνει μερικές απόπειρες που έχουν γίνει προς αυτόν το σκοπό (π.χ. [17]. Ο υπολογισμός της παραμόρφωσης γίνεται για το σύστημα των κυματοειδών ινών του στημονιού και του υφαδιού λαμβάνοντας υπ' όψιν την καμπυλότητα των ινών και τις πιθανές κάμψεις τους στην απλή ύφανση. Η επίλυση γίνεται με αριθμητικό τρόπο. Καθώς όμως η παρούσα εργασία έγινε κυρίως για να συγκρίνει τις ιδιότητες του θερμοπλαστικού συνθέτου υλικού με παρθένο και ανακυκλωμένο πολυμερές ως μήτρα, η παραπάνω λεπτομερής ανάλυση ξεπερνάει τον σκοπό μας και μπορεί να γίνει θέμα για περαιτέρω μελέτη.

Από την άλλη, οι πειραματικές τιμές για τις τελικές ιδιότητες (utlimate properties) των συνθέτων υλικών ταιριάζουν αρκετά καλά με τις προβλέψεις των περιορισμένων υπαρχουσών θεωριών. Εδώ φαίνεται ότι οι σημαντικές παράμετροι για την αστοχία εξαρτώνται κυρίως από τη διεπιφάνεια ίνας/μήτρας και τις ιδιότητες της μήτρας. Η κυματοειδής μορφή των ινών φαίνεται να μην επηρεάζει σημαντικά την αντοχή και την ανθεκτικότητα του συνθέτου υλικού, παρά μόνο την ολκιμότητά του και φυσικά το μέτρο ελαστικότητας.

5.4.2 Σύνθετα υλικά με θερμοπλαστική μήτρα

Αν αποδεχθούμε τα παραπάνω, τότε μπορούμε να πούμε ότι η παρασκευή συνθέτων υλικών με θερμοπλαστική μήτρα με τη μέθοδο που χρησιμοποιήσαμε ήταν επιτυχής. Οι

είδος δείγματος	σ^{*} (MPa)	$E_A (\mathrm{MJ/m^3})$	E (MPa)	ε %	ϕ
25_90_3_4	46.3	4.72	1040	5	0.1
200_1_2	155.6	9.9	1276	13.6	0.2
200_2_3	155	9.4	1314	12.3	0.25
an200_180_2_3	130.2	4.72	1603	7	0.265
200_3_4	189.5	10.2	2136	10.6	0.31
200_90_2_3	255	15.7	2131	13	0.34

Πίνακας 5.7: Μέσοι όροι μηχανικών ιδιοτήτων για τους διαφορετικούς συνδυασμούς φύλλων πολυμερούς / υαλοϋφάσματος που χρησιμοποιήσαμε

μηχανικές ιδιότητες των συνθέτων υλικών που παρασκευάσαμε είναι αντίστοιχες με αυτές των παραδοσιακών συνθέτων υλικών με θερμοσκληρυνόμενη μήτρα και υαλοΰφασμα. Η αντοχή και η δυσθραυστότητα είναι ικανοποιητικές, ενώ το μέτρο ελαστικότητας είναι σχετικά χαμηλό. Για υψηλότερες τιμές ακαμψίας στα σύνθετα υλικά με ενίσχυση υαλοϋφάσματος και θερμοπλαστική μήτρα πρέπει στην πρέσα να χρησιμοποιούνται μονοαξονικά προσανατολισμένες ίνες (rovings) και κατάλληλο καλούπι ή κάποιο σύστημα που να περιορίζει την κίνηση των ινών και τη ροή του τήγματος του υλικού της μήτρας προς τα έξω.

Οι τιμές (μέσοι όροι) των μηχανικών ιδιοτήτων κάθε υλικού που παρασκευάσαμε παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.7. Οι ιδιότητες παρουσιάζονται για τους συνδυασμούς φύλλων πολυμερούς και υαλοϋφάσματος που στοιβάξαμε για να παρασκευάσουμε τα δείγματα. Η σύγκριση των τιμών στον Πίνακα 5.7 γίνεται για να βρούμε την επίδραση του συνδυασμού των φύλλων και της στοίβαξης τους στην ποιότητα του παρασκευαζομένου συνθέτου υλικού και στις ιδιότητές του.

Στο πίνακα 5.7 παρατηρούμε ότι τα δείγματα που παρουσίασαν τον καλύτερο συνδυασμό υψηλών τιμών μηχανικών ιδιοτήτων είναι αυτά στα οποία είχαμε τύπο υαλοϋφάσματος G200P (με πάχος ίνας 9 μm) και (καινούργιο) φύλλο πολυμερούς πάχους 90 μm, σε αναλογία 2:3 υαλοϋφασμα : φύλλο πολυμερούς (δείγμα 200_90_2_3). Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι χρησιμοποιώντας φύλλο πολυμερούς μικρότερου πάχους μειώνεται η απόσταση που θα πρέπει να διανύσει το πολυμερές ώστε να διαβρέξει τις ίνες. Αυτό είναι πολύ σημαντικό διότι, όπως αναφέραμε στο θεωρητικό μέρος, το σημαντικότερο πρόβλημα στη δημιουργία σύνθετων υλικών από θερμοπλαστικές μήτρες είναι το υψηλό ιξώδες τους. Μειώνοντας, λοιπόν, το πάχος του πολυμερούς για να διαβρέξει πλήρως τις ίνες. Επίσης το συγκεκριμένο σύνθετο υλικό μας δίνει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες γιατί έχει αυξημένο κλάσμα όγκου ινών γυαλιού.

5.4.3 Παλαιωμένο και καινούργιο πολυμερές στη μήτρα

Οι μηχανικές ιδιότητες των πλαστικών φύλλων που χρησιμοποιούνται στα θερμοκήπια μεταβάλλονται πολύ γρήγορα με τη πάροδο του χρόνου, κυρίως λόγω της έκθεσής των φύλλων στην υπεριώδη ακτινοβολία (UV), στις υψηλές θερμοκρασίες, στις αυξομειώσεις της θερμοκρασίας και της υγρασίας, στις δονήσεις που προκαλεί ο άνεμος και στην επαφή με χημικές ουσίες όπως χλώριο ή θείο από τα φυτοφάρμακα. Το σημαντικότερο αποτέλεσμα της έκθεσης αυτής είναι το σπάσιμο των αλυσίδων και η μείωση του μοριακού βάρους. Αυτό έχει επίδραση κυρίως στην αντοχή του υλικού ($\sigma^* = \sigma_{\infty}^* - A/M_n$) και στο ιξώδες του τήγματος ($\eta \propto M_w^{3.4}$). Με τη μείωση του μοριακού βάρους η μείωση της φοριακού βάρους του φύλλου προκαλεί μείωση της ολκιμότητας του υλικού και αύξηση της ψαθυρότητας.

Στο Σχήμα 5.8 παφατηφούμε ότι τα σημεία που αντιστοιχούν στο μέτφο ελαστικότητας των δειγμάτων με πεπαλαιωμένο φύλλο βρίσκονται πάνω από τη γραμμή που δίνει τον μέσο όφο του E για τα δείγματα με παρθένα μήτφα. Δηλαδή, το E είναι λίγο υψηλότεφο για δείγματα με πεπαλαιωμένο φύλλο, συγκρινόμενο με δείγματα καινούργιου φύλλου και ίδιου κλάσματος όγκου γυαλιού. Η αλλαγή στο μέτφο ελαστικότητας της μήτρας με τη γήρανση δεν μπορεί να δικαιολογήσει αυτή την αύξηση του E. Άλλωστε το μέτφο ελαστικότητας του ανακυκλωμένου υλικού μετρήθηκε να είναι χαμηλότεφο από αυτό του παρθένου. Το υψηλότεφο, λοιπόν, μέτφο ελαστικότητας των συνθέτων με ανακυκλωμένο πολυμεφές ως μήτφα πρέπει να οφείλεται στις άλλες ιδιότητες του υλικού της μήτφας, και συγκεκριμένα στο ιξώδες του τήγματος του. Το χαμηλότεφο ιξώδες κάνει τη διείσδυση της μήτρας στα κενά ανάμεσα στις ίνες ευκολότεφη.

Ούτε η καλύτερη διαβροχή των ινών από μόνη της μπορεί να εξηγήσει το υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας ενός συνθέτου υλικού οπλισμένου με συνεχείς ίνες. Αλλά στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν υφάσματα, τα οποία, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, έχουν ένα διαφορετικό μηχανισμό παραμόρφωσης από ότι οι μεμονωμένες ίνες. Η πληρέστερη διαβροχή των ινών, λοιπόν, μπορεί να προκαλέσει περισσότερο φρακάρισμα στις ίνες του στημονιού και καλύτερη αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης.

Τα δείγματα που παρασκευάσθηκαν από παλαιωμένο φύλλο πολυαιθυλενίου είναι συστηματικά πιο ψαθυρά από ότι αυτά που παρασκευάσθηκαν από παρθένο φύλλο. Αυτό οφείλεται στην γήρανση του πολυμερούς, η οποία οδηγεί σε μείωση της ικανότητας απορρόφησης τάσεων από τη πολυμερική μήτρα, μείωση της ολκιμότητάς της και αλλαγές στην αλληλεπίδραση του πολυμερούς με τις ίνες (διεπιφάνεια). Για τον ίδιο λόγο η αντοχή και η ανθεκτικότητα είναι σχετικά μειωμένες σε αυτά τα δείγματα συγκρινόμενες με τα αντίστοιχα δείγματα με καινούργιο πολυμερές ως μήτρα.

5.5 Πλεονεκτήματα και εφαρμογές του υλικού

5.5.1 Πλεονεκτήματα

Το υλικό που κατασκευάσαμε έχει μερικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με αντίστοιχα κλασσικά σύνθετα υλικά με θερμοσκληρυνόμενη μήτρα:

- Το υλικό είναι ανακυκλώσιμο λόγω θερμοπλαστικής μήτρας.
- Υπάρχει δυνατότητα εύκολης συγκόλλησης λόγω της θερμοπλαστικής μήτρας.
- Είναι αρχετά εύκαμπτο: αλλάζοντας τον αριθμό φύλλων μπορούμε να μεταβάλουμε την ελαστικότητα του.
- Ανάλογα το συνδυασμό φύλλων/υαλοϋφασμάτων μπορεί να γίνει ημιδιαφανές ή αδιαφανές.
- Το κόστος παρασκευής και πρώτων υλών είναι χαμηλό.
- Η παρασκευή του τελικού προϊόντος είναι γρήγορη, καθώς χρησιμοποιείται προκατασκευασμένο φύλλο πολυμερούς.
- Παρουσιάζει σχετικά καλές μηχανικές ιδιότητες και χαμηλή πυκνότητα.
- Είναι «ευέλικτο»: υπάρχει δυνατότητα συνδυασμών διαφόρων φύλλων και τύπων γυαλιού, δημιουργώντας έτσι το κατάλληλο υλικό για διαφορετικές εφαρμογές.
- Το παλαιωμένο φύλλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας μετά τον καθαρισμό του, παρακάμπτοντας έτσι το στάδιο της δευτερογενούς ανακύκλωσης. Η χρήση αποκλειστικά φύλλων θερμοκηπίων παρακάμπτει επίσης το (ακριβό) στάδιο του διαχωρισμού του υλικού της μήτρας από τα υπόλοιπα πολυμερή.
- Υπάρχει δυνατότητα αυτοματοποίησης της παραγωγής του υλικού.

5.5.2 Προτεινόμενες εφαρμογές

Οι πιθανές εφαρμογές για το καινούργιο υλικό με πολυαιθυλένιο ως μήτρα μπορούν να εκμεταλλευτούν το σχήμα του παραγόμενου υλικού (φύλλο), την ημιδιαφάνεια του, τις μηχανικές του ιδιότητες και την ικανότητά του να συγκολληθεί και να ανακυκλωθεί. Σε όλες αυτές τις εφαρμογές η ανακυκλωμένη μήτρα μπορεί να αντικαταστήσει την παρθένα με σημαντικό οικονομικό όφελος.

Μερικές προτεινόμενες εφαρμογές είναι οι ακόλουθες:

5.6. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

- Το σύνθετο υλικό που παρασκευάσαμε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό επικάλυψης θερμοκηπίων σε περιοχές έντονης χαλαζόπτωσης και δυνατών ανέμων καθώς είναι πιο ανθεκτικό σε σχέση με το μη ενισχυμένο φύλλο LDPE και με κατάλληλο συνδυασμό φύλλων μπορεί να είναι και ημιδιαφανές.
- Επίσης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σαν αδιαφανή ή ημιδιαφανή στέγαστρα,
 π.χ., σε στάσεις λεωφορείων αλλά και σε σπίτια αντικαθιστώντας το φύλλα αμιαντοτσιμέντου ή τσίγκου.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συστατικό σε κατασκευές (σύνθετα) τύπου σάντουιτς για να προσδώσει ακαμψία και αντοχή στο σύνολο
- Μια άλλη εφαρμογή του θα μπορούσε να είναι η χρήση του ως διακοσμητικά πάνελ σε τοίχους ή ταβάνια σπιτιών ή ως επένδυση σε διάφορα προϊόντα. Με τη μέθοδο της συμπίεσης με πρέσα και χρήση χρωματισμένου προκατασκευασμένου φύλλου LDPE, το σύνθετο υλικό μπορεί να πάρει διάφορα σχήματα και χρώματα που θα το καθιστούν κατάλληλο αφ' ενός ως υλικό διακόσμησης, αλλά και θα του προσδίδουν καλές δομικές (μηχανικές) ιδιότητες. Τα πάνελ αυτά μπορούν να συγκολληθούν με απλή θέρμανση.
- Το σχήμα που προκύπτει από την παρασκευή του σε πρέσα το κάνει κατάλληλο για κατασκευή ενισχυμένων αντιολισθητικών δαπέδων, πλαστικών τμημάτων και πάνελ αυτοκινήτων.
- Με το υλικό αυτό, χρησιμοποιώντας βέβαια τις κατάλληλες μεθόδους παρασκευής, θα μπορούσαν επίσης να κατασκευασθούν ενισχυμένοι σωλήνες άρδευσης, δοχεία, δεξαμενές κ.α. Και εδώ η ικανότητα συγκόλλησης των θερμοπλαστικών μερών καθιστούν τη διεργασίας παρασκευής και συναρμολόγησης αυτών των προϊόντων ευκολότερη.

5.6 Προτάσεις για βελτίωση του υλικού

Με τη μέθοδο μορφοποίησης με πρέσα που χρησιμοποιήσαμε δεν είχαμε ειδικό καλούπι για να χρησιμοποιήσουμε μονοαξονικές ίνες έτσι κάναμε χρήση υφασμάτων ινών για να μην έχουμε μετακίνηση των ινών στο σύνθετο κατά τη διάρκεια θέρμανσης και πίεσης στη πρέσα. Τα υφάσματα οδήγησαν σε καλύτερη ποιότητα συνθέτου υλικού με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Η μέθοδος αυτή, όμως, καταλήγει σε μειωμένη ακαμψία (μέτρο ελαστικότητας) σε σχέση με τη θεωρητική, καθώς οι ίνες του υφαδιού παρεμβάλλονται ανάμεσα στις ίνες του στημονιού όταν αυτές παραμορφώνονται κατά τον εφελκυσμό του δείγματος. Για την βελτίωση της ακαμψίας μπορούν μα μελετηθούν και άλλου είδους υφάνσεις (π.χ. satin ή twill) στις οποίες οι ίνες αναμένεται να παρουσιάζουν λιγότερο κυματοειδή μορφή (Σχ. 5.14).



Σχήμα 5.14: Τρεις τύποι ύφανσης με διαφορετικό κυματισμό των νημάτων του στημονιού.

Για σύνθετα ενισχυμένα με υφάσματα με απλή (plain) ύφανση θα πρέπει να γίνει χρήση νέας θεωρίας για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας. Για μεγαλύτερη δυσκαμψία πρέπει να χρησιμοποιηθούν μονοαξονικά προσανατολισμένες ίνες και ειδικό καλούπι για να τις κρατάει. Μία άλλη πρόταση για δημιουργία σύνθετων με θερμοπλαστική μήτρα και μονοαξονικές ίνες γυαλιού είναι η μορφοποίηση με την μέθοδο pultrusion την οποία αναφέραμε στο θεωρητικό κομμάτι της παρούσης εργασίας.

Για να βελτιωθούν οι ιδιότητες του συνθέτου υλικού με παλαιωμένο πολυμερές ως μήτρα πρέπει να αναπληρωθούν τα βελτιωτικά πρόσθετα στο πολυμερές, αντιοξειδωτικά και προστατευτικά από την υπεριώδη ακτινοβολία. Με αυτόν τον τρόπο θα μειωθεί η πιθανότητα αλλοίωσης του υλικού κατά τη θέρμανση στο στάδιο της παρασκευής του και κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου της ζωής του.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας διερεύνησης προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Τα θερμοπλαστικά πολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μήτρα για σύνθετα υλικά με συνεχείς ίνες. Χρειάζονται όμως ειδικές τεχνικές για την παρασκευή του υλικού.
- 2. Η τεχνική του στοιβάγματος πολλαπλών υαλοϋφασμάτων ανάμεσα σε φύλλα πολυμερούς και η θέρμανση των στοιβών υπό πίεση σε πρέσα προκαλεί ικανοποιητική τήξη του πολυμερούς της μήτρας και διαβροχή των ινών όταν τα υφάσματα έχουν κανονική (plain) ύφανση και το πλήθος των ινών στο στημόνι και στο υφάδι είναι παραπλήσιο. Όσο πιο λεπτά είναι τα φύλλα του πολυμερούς που χρησιμοποιούνται, τόσο μεγαλύτερες οι μηχανικές ιδιότητες του προϊόντος. Τα δείγματα που παρασκευάζονται με αυτήν την τεχνική έχουν την μορφή πλάκας και αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες.
- 3. Ομοιογενή σύνθετα υλικά με μονοαξονικές μη υφασμένες ίνες δεν μπορούν να παρασκευαστούν με απλό στοίβαγμα και συμπίεση. Στην περίπτωση αυτή η μακροσκοπική ροή του τήγματος της μήτρας μπορεί να παρασύρει τις ίνες σε κατευθύνσεις κάθετα στον άξονά τους και να οδηγήσει σε ανομοιογένειες στη χωρική σύσταση και τον προσανατολισμό των ινών του συνθέτου υλικού. Για την περίπτωση αυτή, λοιπόν, προτείνεται να χρησιμοποιηθεί κατάλληλο καλούπι που θα συγκρατεί τις ίνες και θα περιορίζει τη μακροσκοπική αυτή ροή του τήγματος της μήτρας.
- 4. Το μέτρο ελαστικότητας του συνθέτου υλικού αυξάνεται με την αύξηση του κλάσματος όγκου των ινών. Οι ίνες εμποδίζουν την παραμόρφωση της πολυμερικής μήτρας στην ελαστική περιοχή, φέροντας οι ίδιες το μεγαλύτερο μέρος των τάσεων, αυξάνοντας έτσι το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού. Το πάχος των ινών

φαίνεται να μην επηξεάζει σημαντικά το μέτρο ελαστικότητας, παξά μόνο όπου μποξεί να επηξεάσει την ευκολία διείσδυσης του τήγματος του πολυμεξούς της μήτξας κατά την παξασκευή του συνθέτου.

- 5. Η ολκιμότητα μειώνεται ελαφρά όταν αυξάνεται το κλάσμα όγκου των ινών. Η διάμετρος των ινών επηρεάζει σημαντικά την ολκιμότητα του σύνθετου: λεπτότερες ίνες δημιουργούν σύνθετα με χαμηλότερη ολκιμότητα από ότι ίνες μεγαλύτερης διαμέτρου.
- Η αντοχή του υλικού αυξάνεται με την αύξηση του κλάσματος όγκου των ινών. Τα δείγματα με λεπτές ίνες δίνουν συγκριτικά μικρότερη αντοχή
- 7. Η ανθεκτικότητα αυξάνεται με την αύξηση του κλάσματος όγκου των ινών, ενώ εξαρτάται από το πάχος των ινών και το υλικό της μήτρας. Η μείωση της ανθεκτικότητας σε δείγματα με ίνες διαμέτρου 5 μm αντικατοπτρίζει τη δυσκολία πλήρους διαβροχής των λεπτών ινών από τη μήτρα και τη χαμηλότερη ολκιμότητά τους. Η μείωση στα δείγματα παλαιωμένου φύλλου οφείλεται κυρίως στην ψαθυρότητα της μήτρας λόγω χημικής γήρανσης.
- 8. Η παραμόρφωση των ινών ως μέρος των υαλοϋφασμάτων στο σύνθετο ακολουθούν διαφορετικό μηχανισμό από τον αναμενόμενο για μεμονωμένες ίνες. Η θεωρία μπορεί να περιγράψει αρκετά καλά την αντοχή των συνθέτων υλικών που παρασκευάσθηκαν εδώ, αλλά υπερεκτιμά τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας.
- 9. Η θεωρία για τον υπολογισμό των ελαστικών ιδιοτήτων του συνθέτου χρειάζεται διόρθωση όσον αφορά την απόκλιση του προσανατολισμού των ινών από την κατεύθυνση του εφελκυσμού, λόγω της κυματοειδούς μορφής που έχουν οι ίνες του στημονιού καθώς είναι υφασμένες γύρω από τα νήματα του υφαδιού στο υαλοΰφασμα. Ο κλασσικός συντελεστής διόρθωσης για την εν λόγω απόκλιση του προσανατολισμού είχε τιμές γύρω στο 0.9, που δεν συμβαδίζει με τις αποκλίσεις των μετρήσεων από τις θεωρητικές τιμές. Χρειάζεται, λοιπόν, μια πιο λεπτομερής περιγραφή της παραμόρφωσης των υφασμένων ινών που θα παίρνει υπ' όψιν και τις καμπτικές παραμορφώσεις της κυματοειδούς τους μορφής. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν τέτοιες προσεγγίσεις με αρκετά υψηλή αποτελεσματικότητα.
- 10. Οι ιδιότητες του συνθέτου υλικού με παλαιωμένη μήτρα (χρησιμοποιημένο φύλλο LDPE) δεν είναι πολύ διαφορετικές από αυτές του συνθέτου υλικού με καινούργιο πολυμερές ως μήτρα. Εξαίρεση αποτελεί η ολκιμότητα και η ψαθυρότητα, οι οποίες είναι χειρότερες στα σύνθετα με παλαιωμένη μήτρα και ισοδύναμο κλάσμα όγκου γυαλιού. Αυτό οφείλεται στην αυξημένη ψαθυρότητα του πολυαιθυλενίου λόγω της επίδρασης πάνω του της υπεριώδους ακτινοβολίας (UV) κατά τη διάρκεια της χρήσης του ως κάλυμμα θερμοκηπίων.

- 11. Συγκρίνοντας δείγματα καινούργιου και πεπαλαιωμένου φύλλου ίδιου κλάσματος όγκου ινών παρατηρούμε ελαφρά μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας σε αυτά με παλαιωμένο φύλλο. Αυτό οφείλεται στο μικρότερο πάχος φύλλου (180 μm) σε σχέση με το καινούργιο φύλλο (200 μm) και στην μερική αποσύνθεση του χρησιμοποιημένου φύλλου από την υπεριώδη ακτινοβολία (UV), η οποία μειώνει το μέσο μοριακό βάρος άρα και το ιξώδες με αποτέλεσμα την καλύτερη ροή και διείσδυση της μήτρας στις ίνες κατά την παρασκευή του υλικού.
- 12. Τα δείγματα με παλαιά φύλλα, αν και έχουν μεγαλύτερο κλάσμα όγκου ινών από άλλα, δεν παρουσιάζουν αντίστοιχη αύξηση στην αντοχή. Αυτό οφείλεται στη γήρανση του πολυμερικού φύλλου, καθώς η υπεριώδης ακτινοβολία (UV) δημιουργεί ελεύθερες ρίζες στο υλικό οι οποίες αντιδρούν και σπάνε τις αλυσίδες του πολυμερούς μειώνοντας έτσι το μέσο μοριακό του βάρος, άρα και την αντοχή του υλικού της μήτρας. Δυσμενή επίδραση στην αντοχή έχει και η αλλαγή των επιφανειακών ιδιοτήτων του υλικού της μήτρας κατά τη χημική γήρανσή του.
- 13. Η αναπλήρωση των βελτιωτικών προσθέτων (π.χ. αντιοξειδωτικά και προστατευτικά από UV) στο παλαιωμένο πολυμερές που χρησιμοποιείται ως μήτρα αναμένεται να οδηγήσει στη βελτίωση των ιδιοτήτων του συνθέτου υλικού.

Βιβλιογραφία

- Χρήστος Β. Κατσιρόπουλος. Βελτιστοποίηση Διεργασιών Μορφοποίησης Θερμοπλαστικών Σύνθετων Υλικών. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2008.
- [2] Α.Δ. Γκότσης. Σημειώσεις επιστήμης και τεχνολογίας σύνθετων υλικών. Εκδ. Πολυτεχνείου Κρήτης, 2007.
- [3] Κ. Μπέλτσιος. Επιστήμη και τεχνολογία σύνθετων υλικών. Εκδ. Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, 2003.
- [4] W.D. Callister. Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών. Εκδ. Τζιόλα, 2004.
- [5] C.D. Papaspyrides, J.G. Poulakis, and C.D. Arvanitopoulos. Recycling of glass fiber reinforced thermo-plastic composites. I. ionomer and low density polyethylene based composites. *Resources, Conservation and Recycling*, 14:91–101, 1995.
- [6] Κ. Παναγιώτου. Επιστήμη και Τεχνολογία Πολυμερών. Πήγασος 2000, 2000.
- [7] Α.Δ. Γκότσης. Σημειώσεις ανακύκλωσης πολυμερών. Εκδ. Πολυτεχνείου Κρήτης, 2006.
- [8] Κ. Μπουντίνας και Μ. Λεζκίδου. Ανακύκλωση πλαστικών. Τζιόλας, 2001.
- [9] D. Hull and T.W. Clyne. An Introduction to Composite Materials. Cambridge University Press, 2003.
- [10] Παπαδόπουλος Α. Χρήστος. Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2009.
- [11] FiberMax, 2010. URL www.fibermax.composites.com.
- [12] Brian N. Cox and Gerry Flanagan. Handbook of analytical methods for textile composites. NASA Contractor Report 4750, 1997. URL http:// www.tpub.com/content/nasa1997/NASA-97-cr4750/.

- [13] ΕΜΠ Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών. Σημειώσεις για το μάθημα: Εφαρμογές προηγμένων υλικών. 2004. URL http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/ mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf.
- [14] Κ. Παπανικολάου. Επιστήμη και τεχνολογία σύνθετων υλικών. εκδ. Κλειδάριθμος, 2008.
- [15] Ιορδανίδου Ευλαλία. Βελτιστοποίηση ενισχυμένων δομικών στοιχείων από σύνθετα υλικά. Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Μηχανικών Σχεδίασης Προϊόντων και Συστημάτων, 2010.
- [16] G.F Nino, H.E.N. Bersee, and Beukers. Design and production of composite structures. In 49th ALAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, page 2250, Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, 2008.
- [17] J.J. Xiong, R.A. Shenoi, and X. Cheng. A modified micromechanical curved beam analytical model to predict the tension modulus of 2D plain weave fabric composites. *Composites B*, 40:776–783, 2009.
- [18] N. K. Naik and V. K. Ganesh. An analytical method for plain weave fabric composites. *Composites*, 26:281–289, 1995.

Παφάφτημα Α

Υπολογισμός των συντελεστών ελαστικότητας του συνθέτου υλικού ενισχυμένου με υαλοΰφασμα

Θεωρούμε ένα μονό υαλοΰφασμα διαβρεγμένο από τη πολυμερική μήτρα σε μαχροσκοπική μορφή επίπεδου φύλλου (lamina). Ακολουθούμε την προσέγγιση στο άρθρο [17]. Το σύστημα συντεταγμένων είναι έτσι ώστε το επίπεδο του φύλλου είναι το (x, y) και η κυματοειδής απόκλιση των ινών από το επίπεδο γίνεται στην κατεύθυνση z. Σε σχέση με το Σχ. 5.9 είδαμε ότι η κυματοειδής μορφή της ίνας του στημονίου περιγράφεται από την εξίσωση 5.2:

$$z_1 = a_1 \cos \frac{2x\pi}{w_1} \Rightarrow \varkappa \log \eta = \frac{dz}{dx} = -\frac{a_1 2\pi}{w_1} \sin \frac{x 2\pi}{w_1}$$
(A.1)

Αντίστοιχα για το υφάδι έχουμε:

$$z_2 = a_2 \cos \frac{2y\pi}{w_2} \Rightarrow \text{klog} = \frac{dz}{dy} = -\frac{a_2 2\pi}{w_1} \sin \frac{y 2\pi}{w_2} \tag{A.2}$$

Οι εκτός επιπέδου γωνίες προσανατολισμού της κάθε ίνας του στημονιού, θ , και του υφαδιού, λ , λοιπόν, είναι συναρτήσεις του x και y αντίστοιχα:

$$\theta = \arctan\left[-\frac{a_1 2\pi}{w_1} \cos\frac{x 2\pi}{w_1}\right] \qquad \text{ind} \quad \lambda = \arctan\left[-\frac{a_2 2\pi}{w_2} \cos\frac{y 2\pi}{w_2}\right] \quad (A.3)$$

Κατά τη δοχιμή εφελχυσμού τα νήματα του στημονιού, μαζί με το υλικό της μήτρας που περιχλείουν, ισιώνουν ενώ τα νήματα του υφαδιού κάμπτονται περισσότερο. Για μονοαξονικό φορτίο N_1 κατά μήκος του στημονιού, έστω N_2 η δύναμη αλληλεπίδρασης των νημάτων στημονιού και υφαδιού και M_1 και M_2 οι ροπές στα νήματα στο στημόνι και στο υφάδι, αντίστοιχα όπως στο παρακάτω σχήμα:



Δυνάμεις και ροπές στα νήματα στο υαλοΰφασμα. (a) Στημόνι, (b) υφάδι.

Οι Xiong et al. [17] έδειξαν ότι οι ροπές κατά μήκος των νημάτων είναι:

$$M_{1}(x) = \begin{cases} M_{1} + N_{1}a_{1} \begin{bmatrix} 1 - \cos\frac{2\pi x}{w_{1}} \\ M_{1} + N_{1}a_{1} \end{bmatrix} - 0.5N_{2}x & x \le 0.5w_{1} \\ 1 - \cos\frac{2\pi x}{w_{1}} \end{bmatrix} - 0.5N_{2}(w_{1} - x) & 0.5w_{1} < x \le w_{1} \end{cases}$$

$$M_{2}(x) = \begin{cases} N_{2}y + M_{2} & y \le 0.5w_{2} \\ N_{2}(x) = 0.5w_{2} & y \le 0.5w_{2} \end{cases}$$
(A.5)

$$M_2(x) = \begin{cases} N_2 y + M_2 & y \le 0.5 w_2 \\ N_2 y (w_2 - y) + M_2 & 0.5 w_2 < x \le w_2 \end{cases}$$
(A.5)

Η δύναμη κατά μήκος των νημάτων του στημονιού είναι:

$$N(x) = \frac{N_1}{\sqrt{1 + \frac{4\pi^2 a_1^2}{w_1^2} \sin^2 \frac{2\pi x}{w_1}}}$$
(A.6)

Με αυτές τις ροπές και δυνάμεις, η ελαστική ενέργεια του συνθέτου γίνεται:

$$\Pi = \frac{1}{E_1} \left(M_1^2 J_1 + N_1^2 J_2 + N_1^2 J_3 + M_1 N_1 J_4 - M_1 N_2 J_5 - N_1 N_2 J_6 + M_2^2 J_7 + M_2 N_2 J_8 \right), \quad (A.7)$$

με $E_1 = E_f \phi + E_m (1 - \phi)$, жан:

$$J_{1} = \frac{1}{I_{1}} \int_{0}^{w_{1}/2} dx \sqrt{1 + \frac{4\pi^{2}a_{1}^{2}}{w_{1}^{2}} \sin^{2}\frac{2\pi x}{w_{1}}}$$
(A.8)
$$J_{1} = \frac{a_{1}^{2}}{1} \int_{0}^{w_{1}/2} dx \sqrt{1 + \frac{4\pi^{2}a_{1}^{2}}{w_{1}^{2}}} \left[1 - \frac{2\pi x}{w_{1}} \right]^{2} \sqrt{1 + \frac{4\pi^{2}a_{1}^{2}}{1 + \frac{4\pi^{2}a_{1}^{2}}{w_{1}^{2}}} \right]^{2} \sqrt{1 + \frac{4\pi^{2}a_{1}^{2}}{w_{1}^{2}}}$$

$$J_{2} = \frac{u_{1}}{4I_{1}} \int_{0}^{w_{1}/2} dx \left[1 - \cos \frac{u_{1}}{w_{1}} \right] \sqrt{1 + \frac{u_{1}}{w_{1}^{2}}} \sin^{2} \frac{u_{1}}{w_{1}} + \frac{1}{A_{1}} \int_{0}^{w_{1}/2} dx \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4\pi^{2}a_{1}^{2}}{w_{1}^{2}}} \sin^{2} \frac{2\pi x}{w_{1}}}$$
(A.9)

$$J_{3} = \frac{1}{4I_{1}} \int_{0}^{w_{1}/2} dx \, x^{2} \sqrt{1 + \frac{4\pi^{2}a_{1}^{2}}{w_{1}^{2}} \sin^{2}\frac{2\pi x}{w_{1}}} \\ + \frac{1}{I_{2}} \int_{0}^{w_{2}/2} dx \, y^{2} \sqrt{1 + \frac{4\pi^{2}a_{2}^{2}}{w_{2}^{2}} \sin^{2}\frac{2\pi y}{w_{2}}}$$
(A.10)

$$J_4 = \frac{2a_1}{I_1} \int_0^{w_1/2} dx \left[1 - \cos \frac{2\pi x}{w_1} \right] \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 a_1^2}{w_1^2} \sin^2 \frac{2\pi x}{w_1}}$$
(A.11)

$$J_5 = \frac{1}{I_1} \int_0^{w_1/2} dx \, x \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 a_1^2}{w_1^2} \sin^2 \frac{2\pi x}{w_1}}$$
(A.12)

$$J_6 = \frac{2a_1}{I_1} \int_0^{w_1/2} dx \, x \left[1 - \cos \frac{2\pi x}{w_1} \right] \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 a_1^2}{w_1^2} \sin^2 \frac{2\pi x}{w_1}} \quad (A.13)$$

$$J_7 = \frac{1}{I_2} \int_0^{w_2/2} dy \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 a_2^2}{w_2^2} \sin^2 \frac{2\pi y}{w_2}}$$
(A.14)

$$J_8 = \frac{1}{I_2} \int_0^{w_2/2} dy \, y \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 a_2^2}{w_2^2} \sin^2 \frac{2\pi y}{w_2}}, \tag{A.15}$$

όπου I_i και A_i είναι οι
 ροπές αδρανείας και οι διατομές των νημάτων (Σχ. 5.9).

Για να βρούμε τη σχέση ανάμεσα στις ροπές και στο εξωτερικό φορτίο, ελαχιστοποιούμε την ενέργεια ως προς τα $M_1,\,M_2,$ και $N_2:$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial M_1} = \frac{\partial \Pi}{\partial M_2} = \frac{\partial \Pi}{\partial N_2} = 0,$$

και βρίσκουμε:

$$N_2 = \frac{2J_1J_6 - J_4J_5}{4J_2J_1 - J_5^2 - 2J_1J_8^2/J_7}N_1$$
(A.16)

$$M_1 = \left(-\frac{J_4}{2J_1} + \frac{J_5J_6 - J_4J_5^2/2J_1}{4J_1J_3 - J_5^2 - J_1J_8^2/J_7} \right) N_1$$
(A.17)

$$M_2 = -\frac{J_8}{2J_7}N_2 \tag{A.18}$$

Η μετατόπιση, Δl του στημονιού λόγω της εξωτε
ρικής δύναμης N_1 , της αλληλεπίδρασης N_2 και της ροπή
ς M_1 βρίσκεται ως εξής:

$$\Delta l = \int_0^{w_1} \frac{M_1(x)}{E_1 I_1} \frac{\partial M_1(x)}{\partial N_1} dl + \int_0^{w_1} \frac{N(x)}{E_1 A_1} \frac{\partial N(x)}{\partial N_1} dl = \frac{J}{E_1} N_1, \quad (A.19)$$

όπου
$$J = 2J_2 - \frac{J_4}{2J_1} + \frac{2J_4J_5J_6 - 2J_1J_6^2 - J_4J_5/2J_1}{4J_1J_3 - J_5^2 - J_1J_8^2/J_7}$$
. Το μέτρο ελαστικότητας του συνθέτου τελικά είναι:

$$E = \frac{N_1/A_1}{\Delta l/w_1} = E_1 \frac{w_1}{A_1 J}$$
(A.20)

86

Παφάφτημα Β

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ τον καθηγητή μου Αλέξανδρο Γκότση για τις γνώσεις που μου μετέφερε κατά τη διάρκεια του μεταπτυχιακού και την πολύτιμη βοήθεια και υποστήριξη που μου παρείχε για την εκτέλεση και συγγραφή της διπλωματικής εργασίας. Ευχαριστώ και τους άλλους δύο καθηγητές της επιτροπής μου Κωνσταντίνο Προβιδάκη και Γιάννη Τσομπανάκη.

Επίσης ευχαριστώ την εταιρία Fibermax (διεύθυνση: Κ.Γαρέφη 5, 37300 Αγριά Βόλου, ιστοσελίδα: www.fibermaxcomposites.com) που μας δώρισε τα υαλοϋφάσματα που χρησιμοποιήσαμε στη εργασία, καθώς και τον κ. Βερτουδάκη και τα Πλαστικά Κρήτης (BI.ΠΕ. Ηρακλείου, ιστοσελίδα: www.plastikakritis.com) για τα καινούργια και τα παλαιά φύλλα πολυαιθυλενίου που μας παρείχαν, τη χρήση της εργαστηριακής τους πρέσας και την υποστήριξη τους κατά τη διάρκεια του πειραματικού μέρους αυτής της εργασίας στο Ηράκλειο.

Α Βιογραφικό

Γεννήθηκα στην Θεσσαλονίκη στις 18/07/1983.

Μεγάλωσα στα Χανιά όπου και τελείωσα την πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια εκπαίδευση το 2001. Την ίδια χρονιά πέρασα στη σχολή Τεχνολογίας και Επιστήμης των Υλικών του Πανεπιστημίου Κρήτης. Οι σπουδές μου διήρκεσαν μέχρι το 2006 όπου και πήρα το πτυχίο μου. Κατά τη διάρκεια των σπουδών μου δούλεψα (2004-2006) σε εταιρία κατασκευής και ενοικίασης συνεδριακού εξοπλισμού (Cretapanel E.Π.Ε.), έκανα πρακτική στο εργοστάσιο της ΔΕΗ στη Ξυλοκαμάρα Χανίων (καλοκαίρι 2007) και συμμετείχα στην θεατρική ομάδα του Τ.Ε.Ι Ηρακλείου(2003-2007) ανεβάζοντας το θεατρικό «Οι Φυσικοί».

Το 2007 ξεκίνησα το μεταπτυχιακό πρόγραμμα στο Γενικό Τμήμα του Πολυτεχνείου Κρήτης στον Τομέα Μηχανικής (Γεχνολογία Υλικών και Κατασκευών). Κατά τη διάφκεια του πρώτου έτους του μεταπτυχιακού παρακολούθησα τα προσφερόμενα μαθήματα Προχωρημένη Μηχανική των Υλικών, Σύνθετα Υλικά, Ειδικά Θέματα Υλικών, Υπολογιστική Μηχανική, Θέματα Τεχνολογίας και Ελέγχου Υλικών και Κατασκευών και Μηχανική των Υλικών. Στο δεύτερο έτος του προγράμματος ξεκίνησα την παρούσα διπλωματική εργασία.

Παφάφτημα Γ

English Abstract

The possibility of using a thermoplastic polymer as matrix for continuous fibre composites was examined in this work. LDPE was chosen for this themoplastic matrix and glass woven mat was used for the reinforcement. The LDPE initially had the form of film. Pieces of the film were stacked between pieces of the woven glass mat, heated under pressure in a flat press to prepare composite samples in the form of plaques. We used new ("virgin") LDPE film, as well as film that had been used for up to four years as covering on green-houses in Crete to examine if these composites could be made from recycled polymer.

The method produced composites in the form of thin plaques and of reasonable material quality, at least when the volume fraction of the glass is not very low (above 10%). The absence of a retaining mould in the press, however, while it does not affect the preparation of samples with woven glass mat, does not permit the preparation of good samples with uniaxial glass rovings. In the latter case the fibres cannot retain their orientation well and the sample becomes non-homogeneous with respect to spatial density and fibre orientation.

Increasing the volume fraction of glass fibres causes a rapid increase in the modulus of elasticity, the strength and the toughness. The modulus increase is not as fast as the theory of simple composite materials would predict. This is because the fibres used to manufacture the composite material are woven into clothes. The fibres in the cloth are not fully extended but have a wavy shape. It seems, therefore, that when the glass is under tensile load, the fibres of the warp respond initially mainly by reducing the bending of their corrugated shape and then by stretching. The low modulus of the matrix and the fact that the fibres in the weft are less restricted in their movements and their further deflection, result in that the warp fibres are not significantly impeded at this "recovery". The modulus thus measured by the traditional methods can be calculated by combining the modulus of the component materials of the composite (glass and LDPE), and by adding the possibility that the warp glass fibres will "flatten" from the wavy line form, subjected to the constraints put by the weft fibres and the polymer matrix.

In this sense the properties of the matrix is more important than what the classical theory accepts, and this explains the large differences in the values of Young's modulus in Table 5.1. If the warp fibres can be fully straightened, then the experimental results will come to an agreement with the simple theory of the properties of mixtures presented. Measurement of the modulus in this case must be made in rather large deformations. For a full description of the results in Figures 5.1 - 5.3 another theory is needed, which can calculate and behaviour of fabrics. The literature gives us several attempts that have been made for this purpose (e.g., [17] or [18]). In these reports the calculation of the deformation is based on the system of corrugated fibre warp and weft, and takes into account the curvature of the fibres and possible bending of the plain weaving. The solution is conducted numerically. However, the present study was primarily to compare the properties of the thermoplastic composite material with used (aged) and new polymer sheets as matrix. A more detailed analysis falls, therefore, outside our purpose and may be the subject for a further study.

Even though the modulus is relatively low, the strength and fracture toughness are quite good. To get even higher values of stiffness in these composite materials made by reinforcing fibreglass and thermoplastic matrix one should use unaxially oriented fibres and a suitable mould in the thermoforming press, or a system that restricts the movement of the fibres and the flow of the molten matrix in the compression moulds

The comparison between the virgin and the recycled LDPE in the matrix indicated that composites made using the latter seem to have lower toughness than composites made with virgin polymer and equivalent fibre content.

The average values of the mechanical properties of each material are shown in Table 5.7. These properties are presented for the stacking combinations of polymer and glass fibre sheets that we used to prepare our samples. The comparison in Table 5.7 was done in order to find the effect of the combination of layers and stacking in the prepared material quality and properties.

Table 5.7 shows that the samples with the best combination of mechanical properties are those with G200P cloth type, used as glass fibre reinforcement (fibre thickness 9 μ m), and new (unused) polymer sheet, 90 μ m thick, as matrix, at a ratio of 2:3 fibreglass : polymer sheet (sample with code 200_90_2_3). The probable reason for this is that using lower polymer sheet thickness decreases the distance to be traveled by the flowing polymer melt to wet the fibres. This is very important because the main problem in making composite materials with thermoplastic matrices is the high viscosity of the melt of the matrix material. Thus, reducing the thickness of the polymer sheet between each fibreglass cloth sheet shortens the distance the molten polymer must move to fully penetrate into the cloth and better wetting of the fibres is

achieved. Naturally, when this idea of combining many very thin sheets is stretched far, then the problem of heat transfer through the stack will become more important and the wetting of the fibres will start to worsen. The sample 200_90_2_3 seems, therefore, to offer the best compromise. Further, this composite gives better mechanical properties because this stacking combination and the use of thinner sheet polymer result to a higher volume fraction of glass fibres.

The mechanical properties of the plastic sheet used as cover in greenhouses are changing over time, mainly because of the exposure of the material to ultraviolet radiation, high temperatures, fluctuations in temperature and humidity, vibrations caused by wind and by contact with agricultural chemicals such as chlorine or sulphur from the pesticides. This chemical ageing results in breaking of polymer chains and reducing of the average molecular weight. This affects mainly the strength of the polymer and the viscosity of its melt. When the molecular weight decreases, then of the strength is linear, while the reduction of viscosity is much faster. This difference in the effect of the molecular weight on the properties can be utilised in making thermoplastic composites with aged polymer as matrix. However, the ageing of the polymer sheet causes a decrease in ductility of the material and an increase of its brittleness.

In Figure 5.8 we see that the points corresponding to the modulus of the samples with recycled polymer sheet lie above the trendline for the modulus of the samples with a new polymer sheet. That is, the modulus is higher for samples with recycled polymer sheet compared with new polymer sheet samples with the same volume fraction of glass fibres. This increase must be due to the lower viscosity of the melt of the aged polymer. The lower viscosity makes penetration of the matrix melt in the spaces between the fibres easier. On the other hand, the composites with the recycled polymer in the matrix show lower strength than the ones with equivalent fibre volume fraction but virgin matrix. This can be due to the lower strength of the aged matrix material, but also to the reduced interfacial interactions due to possible contamination or alteration of the surface properties of the polymer in the case of incomplete melting during preparation of the composite. Also samples with recycled polymer sheet are more brittle than those with new polymer sheet. This is due to the ageing of the polymer which leads to reduced energy dissipation capacity of the matrix and reduced ductility.

Κατάλογος πινάκων

1.1	Μερικές εφαρμογές σύνθετων υλικών [2]	2
1.2	Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού	19
1.3	Ιδιότητες υάλου-Ε και υάλου-S [4]	19
4.1	Οι ιδιότητες των υαλοϋφασμάτων (FiberMax®)	48
4.2	Ιδιότητες των συστατικών	48
4.3	Δείγματα συνθέτου υλικού · είδος ίνας, αναλογία φύλων/υφασμάτων που	
	χρησιμοποιήθηκαν και κ.ο. σύσταση	51
5.1	Θεωρητικές τιμές των μέτρων εφελκυσμού στις κύριες κατευθύνσεις του	
	συνθέτου υλικού φτιαγμένο με το υαλόνημα G200P, E_1 και E_2 , καθώς	
	και η τιμή του E στην κατεύθυνση του φορτίου. E_{exp} είναι οι πειραμα-	
	τικές μετθήσεις	58
5.2	Συνέχεια πίνακα 5.1 για το υαλόνημα G025P	59
5.3	Συνέχεια πίνακα 5.1 για τα δείγματα με ανακυκλωμένο LPDE ως μήτρα	59
5.4	Ολκιμότητα, Αντοχή και Ενέργεια θραύσης των συνθέτων υλικών, (α)	
	με ίνες πάχους 9 μm.	65
5.5	Συνέχεια πίνακα 5.4 (β) για το υαλόνημα G025P (πάχος ινών 5 μm).	66
5.6	Συνέχεια πίνακα 5.4 (γ) για τα σύνθετα με ανακυκλωμένο LDPE	66
5.7	Μέσοι όροι μηχανικών ιδιοτήτων για τους διαφορετικούς συνδυασμούς	
	φύλλων πολυμερούς / υαλοϋφάσματος που χρησιμοποιήσαμε	72

Κατάλογος σχημάτων

1.1	Ταξινόμηση των διαφόρων ειδών των σύνθετων υλικών, [4]	3
1.2	Η διεργασία της εκβολής φιλμ με εμφύσηση [6]	12
1.3	Τύποι συνθέτων υλικών με ινώδη μέσα ενίσχυσης [10]	15
1.4	Είδη υαλοϋφασμάτων	16
1.5	Δισδιάστατη απλή ύφανση (2D plain).	17
1.6	Η άμορφη δομή του κοινού γυαλιού	18
1.7	Διεργασίες παραγωγής υαλονημάτων [13]	20
2.1	Σχηματική αναπαφάσταση της τεχνικής μοφφοποίησης με συμπίεση (α) και της τεχνικής χύτευσης με μεταφοφά φητίνης (β)	27
2.2	Προετοιμασία του υλικού για την παραγωγή στοιχείων σε αυτόκλειστο φούρνο (α), αυτόκλειστος φούρνος (β) [1].	27
2.3	Σχηματική αναπαφάσταση της παφαγωγής με πφοώθηση (α), της μοφ- φοποίησης με πεφιστφεφόμενους κυλίνδφους (β) και της παφαγωγής με πεφιέλιξη ταινιών (γ) [1]	29
2.4	Παράδειγμα προϊόντος από σύνθετο υλικό που παράγεται με συμπίεση σε πρέσα [16]	29
3.1	Οι διαφορετικές συνιστώσες του μέτρου διάτμησης στα ινοπλισμένα σύν- θετα υλικά	34
3.2	Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου του Takayanagi	35
3.3	Ίνες προσανατολισμένες σε μια γωνία θ ως προς το φορτίο, ή προσανα- τολισμένες τυχαία σε 2D ή 3D στο σύνθετο υλικό	38
3.4	Αστοχία ενός ινοπλισμένου συνθέτου υλικού	39
3.5	Η αντοχή του συνθέτου όταν η μήτρα έχει χαμηλότερη ολκιμότητα από την ίνα	39
3.6	Η αντοχή του συνθέτου όταν η μήτρα έχει υψηλότερη ολκιμότητα από την ίνα	40

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

3.7	Η εξάρτηση της αντοχής από το κλάσμα όγκου των ινών όταν η μήτρα έγει γαμηλότερη ολκιμότητα από την ίνα (α) ή υψηλότερη (β).	40
3.8	Τρόποι διάδοσης της ρωγμής	43
4.1	Το σχήμα των δειγμάτων για τις μετρήσεις εφελκυσμού με τις διαστάσεις τους. Το πάχος κάθε δείγματος δίδεται στον Πίνακα 4.3	49
4.2	Καμπύλες βαθμονόμησης του συστήματος καταγραφής δεδομένων. (α) Μετατόπιση (mm) = $98.5 \times volt + 0.22$. (β) δύναμη (N) = $99.5 \times volt + 0.14$ για την κεφαλή 1000 N.	52
5.1	Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης για τα φύλλα LDPE (παρθένο και ανακυκλωμένο) που χρησιμοποιήθηκαν ως μήτρα.	54
5.2	Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης για τις ίνες γυαλιού (9 mm)	54
5.3	Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης για δείγμα με 12% ίνες 5 μm δια-	55
5.4	μετίου Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης για δείγμα με 7% ίνες 5 μm δια- μέτρου	55
5.5	Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης για δείγμα με 26% ίνες 9 μm δια-	56
5.6	Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης για δείγμα με 21% ίνες 9 μm δια-	56
5.7	Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης για δείγμα με 30% ίνες 9 μm δια- μέτρου	57
5.8	Το μέτρο ελαστικότητας των συνθέτων ως συνάρτηση του κλάσματος όνκου των ινών (όλα τα δείνματα)	60
5.9	Σχηματική παράσταση των υφασμένων ινών στα υαλοϋφάσματα. Τα γραμμοσκιασμένα σχήματα στο (β) αντιστοιχούν στις διατομές των νη- μάτων του υφαδιού (από Xiong et al. [17]).	63
5.10	Η ολκιμότητα των συνθέτων ως συνάρτηση του κλάσματος όγκου των ινών (όλα τα δείγματα). Οι γραμμές είναι γραμμικές παρεμβολές για κάθε ομάδα δειγμάτων.	67
5.11	Η αντοχή των συνθέτων ως συνάρτηση του κλάσματος όγκου των ινών (όλα τα δείγματα). Η γραμμή δείχνει την trendline των συνθέτων με ίνες διαμέτρου 9 μm.	68
5.12	Σύγκριση της αντοχής των συνθέτων υλικών (σημεία) με τις θεωρητικές προβλέψεις (γραμμές, εξ. 5.5).	69
5.13	Η ενέργεια προς θραύση των συνθέτων ως συνάρτηση του κλάσματος όγκου των ινών (όλα τα δείγματα). Η γραμμή δείχνει την trendline των συνθέτων με ίνες διαμέτρου 9 μm.	70

96

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

5.14	Τρεις τύποι ύφανσης με διαφορετικό κυματισμό των νημάτων του στη-	
	μονιού	76
Κατάλογος συμβόλων

- Α επιφάνεια διατομής
- Α' Σταθερά στην εξάρτηση της αντοχής πολυμερούς από το μοριακό του βάρος
- E1 μέτοο ελαστικότητας κατά μήκος του άξονα της ίνας
- E_2 μέτρο ελαστικότητας εγκάρσια του άξονα της ίνας
- *E_A* ενέργεια προς θραύση (ανθεκτικότητα)
- E_f μέτρο ελαστικότητας υλικού ίνας
- E_m μέτρο ελαστικότητας υλικού μήτρας
- *E*exp πειραματικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας
- G ουθμός απελευθέρωσης ενέργειας (κατά τη θραύση)
- G_c ενέργεια θραύσης
- G_f μέτρο διάτμησης ίνας
- *G*_m μέτρο διάτμησης μήτρας
- G_{ij} μέτρο διάτμησης
- *I*_i *Q*οπή αδρανείας
- K bulk modulus
- Κ' παράγοντας έντασης τάσης
- *K*_c δυσθραυστότητα
- M_i φoπή

100

 M_w

 N_i

P

 P_f

 P_m

 P_s

V

 V_f

 V_m

 ΔU

Π

 α

 ϵ

 ϵ_{f}

 ϵ_m

 η

 η

 η_0

 γ

 γ_{ij}

 $\lambda(y)$

 u_f

 $\Psi(\theta)$

- M_n μέση κατ' αριθμό μοριακή μάζα
 - μέση κατά βάρος μοριακή μάζα

αξονικό φορτίο (δύναμη)

φορτίο (δύναμη) στην ίνα

φορτίο (δύναμη) στη μήτρα

πιθανότητα αστοχίας της ίνας

κλάσμα όγκου ίνας (= ϕ)

κλάσμα όγκου μήτρας

μεταβολή της ενέργειας

συνά
ρτηση κατανομής πιθανότητας για τη γωνία θ

λόγος των μέτρων ελαστικότητας ινών/μήτρας

εφελκυστική παραμόρφωση στην ίνα

εφελκυστική παραμόρφωση στη μήτρα

παράμετρος του μοντέλου Halpin-Tsai

δείκτης αποτελεσματικότητας προσανατολισμού

ελαστική ενέργεια

παραμόρφωση

επιφανειακή ενέργεια

διατμητική παραμόρφωση

γωνία των ινών του υφαδιού

λόγος του Poisson της ίνας

ιξώδες

δύναμη (φορτίο)

όγκος

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

- λόγος του Poisson της μήτρας ν_m
- λόγος του Poisson u_{ij}
- κλάσμα όγκου ινών ϕ
- πυκνότητα ρ
- τάση σ
- σ^* αντοχή σε εφελκυσμό
- αντοχή του συνθέτου σε εφελκυσμό στην κατεύθυνση της ίνας σ_1^*
- σ_{f} εφελκυστική τάση στην ίνα
- σ_f^* αντοχή της ίνας
- εφελκυστική τάση στη μήτρα σ_m
- αντοχή της μήτρας σ_m^*
- σ_2^* αντοχή του συνθέτου εγκάρσια στις ίνες
- σ^*_{exp} πειραματικές τιμές της αντοχής
- σ_{fm}^* τάση στην ίνα στο σημείο αστοχίας της μήτρας
- au_{12}^* αντοχή σε διάτμηση
- διατμητική τάση στην ίνα au_{ijf}
- διατμητική τάση au_{ij}
- $\theta(x)$ γωνία των ινών (του στημονιού)
- ε^* ολκιμότητα

- ξ

μήκος وωγμής

κρίσιμο μήκος ρωγμής

πάχος στρώματος

- παράμετρος του μοντέλου Halpin-Tsai

μάζα m

c

 c_*

 d_i

- m παράμετρος κατανομής Weibull
- r μικρή ακτίνα ρωγμής
- ry ακτίνα της περιοχής πλαστικής παραμόρφωσης γύρω από το άκρο της ρωγμής

Ευρετήριο

autoclave, 26 bulk modulus, 37 C-glass, 18 chopped strand mat, 15, 16 compression moulding, 28 continuous fibers, 14, 15 discontinuous fibers, 14 E-glass, 18, 47 fill, 17 film blowing, 11 Halpin-Tsai, 35, 36 HDPE, 8 honeycomb panels, 3 hybrid, 15 knitted fabrics, 14 laminar fillers, 3 LDPE, 8, 9, 47 LLDPE, 9 MDPE, 8 non-woven, 14, 16 orientation efficiency factor, 37 PE, 8 pultrusion, 26

resin transfer moulding, 26 roll forming, 26 S-glass, 18 sizing, 20, 57 Takayanagi, 34, 35 tape winding, 28 toughness, 42 Tsai-Hill, 68 UV, 79 UV ακτινοβολία, 57, 62, 67, 73 warp, 17 weft, 17 whiskers, 14 woven mat, 14 ίνες, 2 κοντές, 14 μη προσανατολισμένες, 14 προσανατολισμένες, 14 συνεχείς, 14 ίνες γυαλιού, 17 ανακυκλωμένο, 73 ανακυκλωμένο πολυμερές, 62 ανακυκλωμένο φύλλο, 62 ανθεκτικότητα, 42, 50, 64, 69, 70, 78 ανθρακονήματα, 17 αντοχή, 38, 40, 41, 50, 53, 64-70, 73 αποσύνθεση, 57, 62 βαθμονόμηση, 52

γήρανση, 73, 79 γυαλί παραγωγή, 20 ίνες, 18 δομή, 18 ιδιότητες, 19 δείκτης αποτελεσματικότητας προσανατολισμού, 37, 63 διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης, 53-57 διαβροχή, 61, 73 διεπιφάνεια μήτρας - ενίσχυσης, 21 δεσμοί, 21 δοκιμές εφελκυσμού, 50 δομικό αφρό, 3 δυσθραυστότητα, 42, 50, 53, 64 ενέργεια θραύσης, 42, 44, 65, 66, 70 ερπυσμός, 44 εφαρμογές, 2, 74 ημιδιαφανές, 74 θερμοπλαστικά πολυμερή, 7, 77 θερμοπλαστικά σύνθετα υλικά παρασκευή, 25, 26, 28 θερμοπλαστικές μήτρες, 6 μειονεκτήματα, 7 πλεονεκτήματα, 7 θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή, 6 για μήτρες συνθέτων, 6 θερμοσκληρυνόμενες μήτρες, 5 ιδιότητες συστατικών, 48 ινοπλισμένο σύνθετο μονοαξονικό, 32 ινώδη μέσα ενίσχυσης, 14 ιξώδες, 62, 73 κάμψη ινών, 62 κλάσμα όγκου, 50, 51, 57, 64, 67–70, 78 κυψελλωτά στρώματα, 3 κόπωση, 44 λόγος Poisson, 36 μέσα ενίσχυσης, 13 μέτρο διάτμησης, 34

μέτρο ελαστικότητας, 32, 50, 53, 57-60, 70, 73, 77 μήτρα, 2, 4 αντοχή, 4 είδη, 5 θερμικές ιδιότητες, 4 κεραμική, 2 λειτουργίες, 4 μεταλλική, 2 πολυμερική, 2 μείγμα, 1 μετρήσεις εφελκυσμού, 53 μηχανικές ιδιότητες, 31 μονοαξονικές ίνες, 77 μοριακό βάρος, 73 μορφοποίηση με πρέσα, 28 μορφοποίηση με συμπίεση, 25, 28 νημάτια, 14 οικονομικό όφελος, 74 ολκιμότητα, 50, 64-67, 73, 78 πάγος ίνας, 64, 69 πάχος ινών, 77 παραμόρφωση, 78 πολυαιθυλένιο, 8 ανακύκλωση, 11-13 εφαρμογές, 9, 10 παραγωγή, 9 φιλμ, 11, 12 πολυαραμίδιο, 17 πολυμερικές μήτρες, 4 πολυστρώματα, 13 προσανατολισμός ινών, 15, 62, 78 τυχαίος 2D, 37 $\tau u \gamma \alpha i o \varsigma 3D, 38$ πυκνότητα, 49 στημόνι, 17, 48, 62, 64, 73 συγκόλληση, 8, 28, 30 συστατικά, 47 σύνθετα υλικά, 1

104

EYPETHPIO

είδη, 2, 3 εφαρμογές, 22, 23 ινοπλισμένα πολυμερή, 21 τεμαχίδια, 2, 13 τριχίτες, 14 υαλονήματα, 17 υαλοϋφάσματα, 14, 16, 48, 60, 61, 64, 70 υλικά ινών, 17 υπεριώδη ακτινοβολία, 73 υφάδι, 17, 48, 62, 64 φύλλα LDPE, 47, 48 φύλλα υαλοϋφάσματος, 47 χαρακτηρισμός δοκιμίων, 49 ψαθυρότητα, 78 ύφανση, 14, 64 plain, 17, 62, 64, 71, 76, 77 satin, 17 triaxiall, 17 uniweave, 17