

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΑΝ.ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΚΕΛΥΦΩΝ ΛΕΠΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ
ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ ΜΕ ΑΦΡΟ**

ΕΡΩΤΟΚΡΙΤΟΣ Ν. ΓΚΑΓΚΑΔΕΛΗΣ

ΑΘΗΝΑ, 2008

Περιεχόμενα

1	Πρόλογος	5
2	Εισαγωγή στα Σύνθετα Υλικά	7
2.1	ΕΙΔΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	7
2.2	ΪΝΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ	8
2.3	ΥΛΙΚΑ ΜΗΤΡΑΣ	8
2.4	ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	9
2.4.1	<i>Επίστρωση, στρωματοποίηση και εμποτισμός με το χέρι</i>	9
2.4.2	<i>Vacuum Bagging</i>	10
2.4.3	<i>Vacuum Assisted Resin Infusion</i>	11
2.5	ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΥΦΑΣΜΑΤΑ ΓΥΑΛΙΟΥ	12
2.6	Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΙΝΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ	12
2.7	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΙΝΩΝ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	14
2.8	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΛΕΞΗΣ ΤΩΝ ΙΝΩΝ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	14
2.9	ΔΙΑΘΕΣΙΜΕΣ ΠΛΕΞΕΙΣ ΙΝΩΝ	16
2.9.1	<i>Plain</i>	16
2.9.2	<i>Satin</i>	17
2.9.3	<i>Basket</i>	17
2.9.4	<i>Leno</i>	18
2.9.5	<i>Mock Leno</i>	18
2.10	Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΜΗΤΡΑΣ ΤΟΥ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	19
2.11	Η ΕΠΟΞΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ	20
2.11.1	<i>Χημική σύσταση</i>	20
2.11.2	<i>Ιδιότητες</i>	21
2.11.3	<i>Μηχανικές ιδιότητες</i>	22
2.11.4	<i>Εφαρμογές</i>	23

3	Αφρώδη υλικά.....	25
3.1	Ορισμοί κυψελοειδών στερεών αφρών.....	25
3.2	Μέθοδοι παρασκευής κυψελοειδών στερεών.....	28
3.3	Ιδιότητες και εφαρμογές των κυψελοειδών στερεών.....	29
3.4	Μηχανική συμπεριφορά των αφρών.....	31
4	Αξονική καταπόνηση κελυφών.....	36
4.1	Αξιολόγηση συμπεριφοράς συστημάτων ενέργειας.....	36
4.2	Πειραματικό μέρος.....	36
4.2.1	Χαρακτηρισμός υλικού	36
4.2.2	Κατασκευή δοκιμίων	38
4.2.3	Πρέσα INSTRON 4482	38
4.2.4	Πειραματικές παρατηρήσεις.....	40
4.2.5	Συμπίεση κελυφών	40
5	Συμπεράσματα.....	53
6	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	54
7	Βιβλιογραφία	55
8	Παράρτημα – DOW Epoxy resin (D.E.R. 321)	57

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον Αν. Καθηγητή κ.Δ.Ε.Μανωλάκο τόσο για την εμπιστοσύνη και εκτίμηση την οποία επέδειξε προς το πρόσωπό μου αναθέτοντας μου την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής, όσο και γιατί υπήρξε πολύτιμος συνεργάτης και αρωγός σε οποιοδήποτε πρόβλημα ανέκυψε κατά το χρονικό διάστημα της σπουδής μου στο παρόν αντικείμενο.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζονται επίσης προς τον καθηγητή και διευθυντή του τομέα Δρ. Α. Μάμαλη, για τη διάθεση του εξοπλισμού του εργαστηρίου με σκοπό την εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας, καθώς και προς τον υποψήφιο διδάκτορα και μέλος Ε.Ε.ΔΙ.Π. του εργαστηρίου κ.Π.Κωστάζο ο οποίος επέδειξε καθ' όλο το παραπάνω χρονικό διάστημα την αμέριστη συμπαράσταση, ανοχή και βοήθεια, ιδιαίτερα κατά την εκτέλεση των πειραμάτων.

Περίληψη

1 Πρόλογος

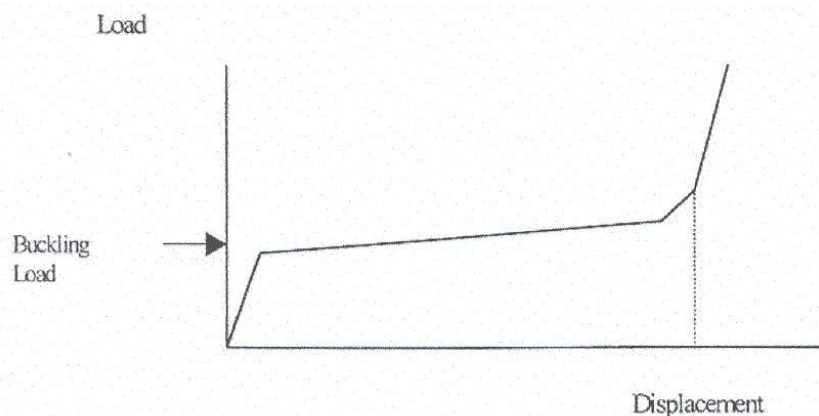
Τα σύνθετα υλικά αποτελούν έναν από τους τομείς υψηλής τεχνολογίας με εφαρμογές σε ολοένα αυξανόμενο αριθμό εφαρμογών. Χρησιμοποιούνται τόσο στην αεροναυπηγική όσο και στην ναυτική βιομηχανία σε κατασκευές όπου ζητούμενο είναι η ελαχιστοποίηση του βάρους με την καλύτερη δυνατή αντοχή και στιβαρότητα. Σήμερα κατασκευάζονται σύνθετα υλικά για εφαρμογές όπως είναι τα καλύμματα αυτοκινήτων έως και κουζινέτα μηχανών.

Ο νέος ρόλος που καλούνται να παίξουν τα υλικά αυτά φανερώνει τους νέους ορίζοντες που ανοίγουν μαζί τους στον τομέα της αντοχής.

Τα υλικά αυτά παραδοσιακά κατασκευάζονταν σε καλούπια. Η τεχνολογία αυτή τους έδινε ένα σχεδόν τέλειο σχήμα, με μικρές αλλαγές να απομένουν. Πρόσφατα άρχισαν να κόβονται από μπλοκ προσχηματισμένων υλικών.

Κύριο χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών είναι η υψηλή αντοχή τους και η πολύ καλή δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας σε σχέση με το βάρος τους. Ειδικά στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας, η σημασία της μεγιστοποίησης απορρόφησης ενέργειας είναι τεράστια και η χρήση σύνθετων υλικών αυξάνεται ραγδαία.

Το επόμενο γράφημα Φορτίου – Μετατόπισης είναι χαρακτηριστικό και δείχνει τον τρόπο που αυξάνει το φορτίο συναρτήσει της συμπίεσης ενός υλικού :



Η επιφάνεια κάτω από την καμπύλη αναπαριστά την ενέργεια που μπορεί να απορροφηθεί από το υλικό. Αυτή εξαρτάται από τη μέγιστη παραμόρφωση και το φορτίο λυγισμού. Εφόσον υπάρχει ένα μέγιστο όριο στην παραμόρφωση ενός δοκιμίου, για να αυξήσουμε το ποσό της ενέργειας που απορροφάται, μπορούμε να αυξήσουμε το φορτίο λυγισμού κάνοντας τη δομή στιβαρότερη, ενισχύοντας τα υλικά αυτά και με άλλα μέσα (πχ γέμισμα με αφρο). Αυτός είναι και ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Να μελετήσουμε τον τρόπο αύξησης της ποσότητας απορροφούμενης ενέργειας σε δομικά στοιχεία, που αποτελούνται από σύνθετα υλικά.

2 Εισαγωγή στα Σύνθετα Υλικά

Τα υλικά συνήθως κατατάσσονται σε μεταλλικά, κεραμικά και οργανικά. Η διάκριση ανάμεσά τους γίνεται με βάση τη χημική σύσταση, τη δομή και τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητές τους. Υπάρχουν υλικά που αποτελούν συνδυασμούς των τριών αυτών κατηγοριών και έχουν ιδιότητες που δεν μπορούν να τα κατατάξουν σαφώς σε καμία.

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

Τα σύνθετα υλικά από τον καιρό που πρωτοεμφανίστηκαν, έχουν εξελιχθεί από υλικά για δευτερεύοντα εξαρτήματα, όπως είναι τα συμπαγή καλύμματα, σε υλικά υψηλών επιδόσεων που αποτελούν κύριες εφαρμογές όπως είναι οι γάστρες αγωνιστικών σκαφών και τμήματα αεροσκαφών.

2.1 Είδη σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά συνήθως αποτελούνται από δυο διαφορετικά συστατικά που διακρίνονται μακροσκοπικά: το συστατικό ενίσχυσης και τη μήτρα.

Με βάση τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης τα σύνθετα υλικά μπορούν να καταταγούν σε τρεις κατηγορίες:

1. Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών (fiber reinforced composites).
2. Σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων (particulate composites).
3. Στρωματικά σύνθετα υλικά (laminar composites) με πυρήνα από Polystyrene, PVC, Balsa, Paper ή Aluminum Honeycomb.

2.2 Ίνες ενίσχυσης

Στις εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων πρωτεύοντα ρόλο παίζουν τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών. Επειδή οι ίνες φέρουν πάντοτε τα μεγαλύτερα μηχανικά φορτία στο υλικό, οι μηχανικές ιδιότητες και η συμπεριφορά τους κατά τη φόρτιση έχει άμεσες επιπτώσεις στη συμπεριφορά του σύνθετου υλικού. Μέσα στις προδιαγραφές βρίσκεται πάντα η ελαχιστοποίηση του βάρους μαζί με την μεγιστοποίηση της στιβαρότητας της κατασκευής.

Οι πιο συνηθισμένες ίνες που χρησιμοποιούνται σε σύνθετα υλικά είναι:

1. Ίνες γυαλιού (glass fibers)
2. Ίνες αραμιδίου (aramid fibers ή Kevlar)
3. Ίνες άνθρακα (carbon fibers)

Υπάρχουν πολλά ακόμα είδη ινών που χρησιμοποιούνται για σύνθετα υλικά, όμως οι παραπάνω ίνες διακρίνονται για τις ιδιαίτερα καλές φυσικές και μηχανικές ιδιότητές τους σε σχέση με το βάρος τους. Έτσι τείνουν να χρησιμοποιούνται σχεδόν κατα αποκλειστικότητα στα σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών σε όλες τις προηγμένες εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας.

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με τις ίνες γυαλιού.

2.3 Υλικά μήτρας

Τα υλικά μήτρας μπορεί να είναι οργανικά, μεταλλικά ή κεραμικά. Ευρύτερη χρήση και εφαρμογές έχουν τα οργανικά υλικά λόγω των πολύ καλών μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων, της ευκολίας κατασκευής και το χαμηλό κόστος τους.

Οι οργανικές μήτρες διαχωρίζονται στις **θερμοπλαστικές** και τις **θερμοσκληρυνόμενες**. Οι θερμοπλαστικές μήτρες δημιουργούνται από πολυμερή όπως το πολυεθυλένιο (PE) και το πολυστυρένιο (PS) με γραμμικές αλυσίδες. Λόγω του πολύ χαμηλού κόστους τους χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ευρείας κατανάλωσης με ενισχυτικά υλικά χαμηλού κόστους έτσι ώστε το τελικό προϊόν να είναι χαμηλής τιμής.

Οι θερμοσκληρυνόμενες μήτρες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων, όπου χρειάζονται καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και θερμοκρασιακή σταθερότητα. Μήτρες με τη μεγαλύτερη χρήση είναι:

1. Πολυεστερικές ρητίνες (γνωστό στην αγορά ως πολυεστέρας)
2. Εποξικές ρητίνες

Συνήθως η ενίσχυση γίνεται με γυαλί, στον πολυεστέρα αποκλειστικά ενώ με την εποξική ρητίνη χρησιμοποιούνται και ίνες αραμιδίου (Kevlar) ή άνθρακα (carbon).

Οι πολυεστερικές ρητίνες είναι περίπου τέσσερις φορές χαμηλότερες σε τιμή και μηχανικές ιδιότητες από τις εποξικές, γεγονός που τις καθιστά ιδιαίτερα δημοφιλείς σε εφαρμογές μεγάλης παραγωγής κατασκευών με μέτριες μηχανικές ιδιότητες.

Στις κατασκευές όπου απαιτούνται οι βέλτιστες ιδιότητες του σύνθετου υλικού χρησιμοποιούνται κατα αποκλειστικότητα εποξικές ρητίνες.

2.4 Μέθοδοι κατασκευής των σύνθετων υλικών

Οι ενισχύσεις που γίνονται με ίνες γυαλιού στα σύνθετα έχουν τη μορφή υφάσματος (υαλοϋφάσματος). Πολλά στρώματα υφάσματος εμποτίζονται με ρητίνες και όταν αυτές πολυμεριστούν παίρνουμε το τελικό δοκίμιο. Ανάλογα με τις επιδιωκόμενες ιδιότητες της κατασκευής μας, τη μέθοδο παραγωγής που διαθέτουμε και το τελικό κόστος επιλέγουμε τη ρητίνη που θα χρησιμοποιηθεί (πολυεστερική ή εποξική) και την ύφανση των ινών γυαλιού.

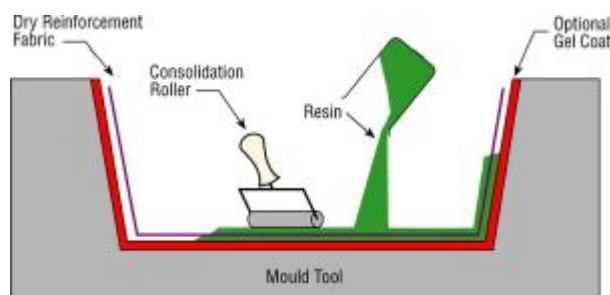
Στη βιομηχανία εφαρμόζονται πολλοί τρόποι εμποτισμού των ινών από ρητίνη. Οι κυριότεροι που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για κατασκευή μπλοκ υλικού ή τεμάχια on-off είναι οι παρακάτω:

2.4.1 Επίστρωση,στρωματοποίηση και εμποτισμός με το χέρι (Hand Layup)

Ο εμποτισμός και η στρωματοποίηση με το χέρι είναι η απλούστερη μέθοδος κατασκευής σύνθετων υλικών. Είναι η διαδικασία που έχει τις μικρότερες απαιτήσεις από πλευράς εγκαταστάσεων και μηχανημάτων, για αυτό και χρησιμοποιήθηκε για να κατασκευαστούν τα πειραματικά δοκίμια της εργασίας.

Οι ίνες τοποθετούνται διαδοχικά, στρώμα προς στρώμα μέσα ή πάνω σε ένα καλούπι, το οποίο προηγουμένως έχει περαστεί με κερί και ενδεχομένως από ένα προστατευτικό στρώμα ρητίνης (Gel Coat). Αφού τοποθετηθεί το στρώμα ινών στο καλούπι, ο τεχνίτης το εμποτίζει με πινέλο, ρολό ή άλλο αντίστοιχο εργαλείο με ρητίνη. Στη συνέχεια, αφού βεβαιωθεί ότι το στρώμα έχει καλυφθεί με ρητίνη και δεν υπάρχουν ξηρές περιοχές, τοποθετεί το επόμενο και επαναλαμβάνει τη διαδικασία μέχρι να φτάσει το επιδιωκόμενο πάχος ή αριθμό στρωμάτων.

Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει μεγάλη ευελιξία λόγω των ελάχιστων απαιτήσεων της από πλευράς μηχανημάτων και εφαρμόζεται ευρέως σε ναυπηγεία και βιοτεχνίες κατασκευής σκαφών αναψυχής.



Σχήμα 1 - Διαδικασία στρωματοποίησης με το χέρι (hand layup)

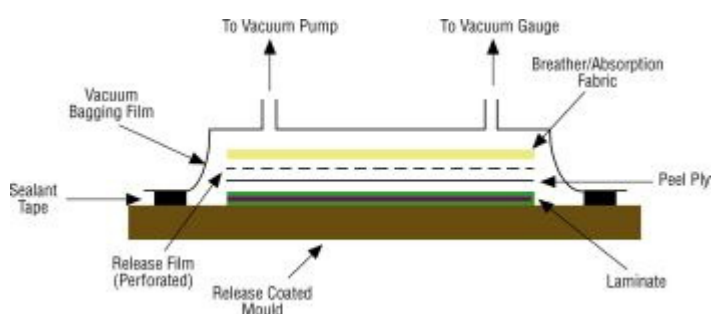
2.4.2 Vacuum Bagging

Χρησιμοποιώντας την προηγούμενη μέθοδο είναι εύκολο να κατασκευαστούν τεμάχια σχετικά απλής γεωμετρίας, χωρίς οξείες γωνίες και απότομες αλλαγές καμπυλότητας. Για αυτές τις περιπτώσεις που δεν μπορούν να καλυφθούν από το Hand Layup εφαρμόζεται η μέθοδος Vacuum Bagging.

Με τη μέθοδο Vacuum Bagging εξασφαλίζουμε ότι αφού οι ίνες εμποτιστούν σε ρητίνη, μπορούν να αποκτήσουν σχήματα περίπλοκης γεωμετρίας.

Στη μέθοδο αυτή οι ίνες τοποθετούνται μέσα ή πάνω στο καλούπι, εμποτίζονται και στρωματοποιούνται κατά τα γνωστά. Στη συνέχεια μπαίνει επάνω τους ένα ειδικό ύφασμα που δε κολλάει στη ρητίνη (peel ply), ένα ύφασμα απορρόφησης της ρητίνης που περισσεύει (breather) και μια ειδική σακούλα νάιλον που κλείνει με ειδική μαστίχα επάνω στο καλούπι.

Στη σακούλα αυτή προσαρμόζεται ένας σωλήνας που συνδέει το σύστημα με αντλία κενού. Όταν η αντλία κενού ξεκινήσει τη λειτουργία της, ο αέρας που υπάρχει μέσα στη σακούλα, τις στρώσεις ρητίνης και υφάσματος οδηγείται έξω από το σύστημα. Η σακούλα πιέζει τις στρώσεις υαλουφάσματος με αποτέλεσμα το τελικό προϊόν συνήθως να έχει καλύτερο ποσοστό περιεκτικότητας κατα βάρος σε γυαλί και λιγότερες ατέλειες (φουσαλίδες) από ότι με απλό Hand Layup.



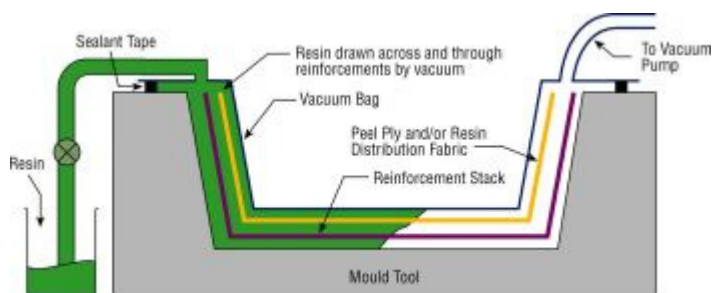
Σχήμα 2 - Τεχνική Vacuum Bagging

2.4.3 Vacuum Assisted Resin Infusion

Η μέθοδος V.A.R.I. (Vacuum Assisted Resin Infusion) αποτελεί μια εξέλιξη της τεχνικής του Vacuum Bagging ώστε να επιταχυνθεί η κατασκευή δοκιμίων, παρακάμπτοντας τη διαδικασία της επίστρωσης και του εμποτισμού με το χέρι.

Στη μέθοδο αυτή τα στρώματα υαλουφάσματος τοποθετούνται μέσα στο καλούπι χωρίς να γίνεται εμποτισμός σε ρητίνη. Στη συνέχεια τοποθετείται η ειδική σακούλα του Vacuum Bagging όπως και τα υπόλοιπα ειδικά υφάσματα και επάνω στη σακούλα προσαρμόζονται δυο σωλήνες. Ο ένας πηγαίνει στην αντλία κενού και ο δεύτερος έρχεται από δοχείο ρητίνης.

Με την εκκίνηση της αντλίας κενού η ρητίνη αρχίζει να κυκλοφορεί μέσα στις στρώσεις γυαλιού και τις εμποτίζει μέχρι να φτάσει στο σωλήνα της αντλίας κενού, οπότε και ολοκληρώνεται η διαδικασία. Έτσι αποφεύγουμε τη χρονοβόρα διαδικασία του Hand Layup. Το πρόβλημα της μεθόδου είναι ότι για να εφαρμοστεί απαιτούνται ρητίνες ειδικού ιξώδους ώστε να μπορεί να γίνει σωστή κυκλοφορία υγρού μέσα από τις ίνες.



Σχήμα 3 - Vacuum Assisted Resin Infusion

2.5 Διαθέσιμα Υφάσματα γυαλιού

Τα υαλοφάσματα διατίθενται στην αγορά σε διαφορετικές πλέξεις και διαφορετικά βάρη, μετρώμενα σε γραμμάρια ανά τετραγωνικό μέτρο. Συνήθως στις πολυεστερικές κατασκευές χρησιμοποιούνται βαριά υαλοφάσματα, με ή χωρίς πλέξη.

Όταν τα υφάσματα είναι χωρίς πλέξη οι ίνες συγκρατώνται μεταξύ τους με ειδικές κόλλες που διαλύονται από τη ρητίνη. Εμποτίζονται με πολυεστερική ρητίνη και μας δίνουν ένα φθινό προϊόν με μέτριες μηχανικές ιδιότητες.

2.6 Ο ρόλος των ινών ενίσχυσης

Στις εποξικές κατασκευές, με τις οποίες θα ασχοληθούμε, επιδιώκουμε να έχουμε την μεγαλύτερη δυνατή περιεκτικότητα σε γυαλί, χωρίς το προϊόν να παρουσιάζει την ψαθυρή συμπεριφορά του γυαλιού. Εκτός όμως από ενίσχυση με ίνες γυαλιού μπορεί να χρησιμοποιηθούν και άλλα υλικά με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες:

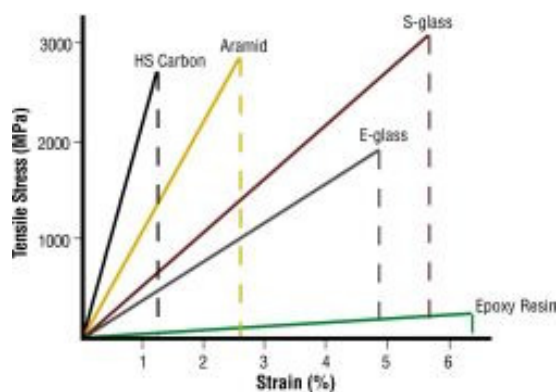
1. Ίνες άνθρακα (Carbon fibers)
2. Ίνες αραμιδίου (γνωστές ως Kevlar)
3. Ίνες γυαλιού με βελτιωμένα χαρακτηριστικά (S-glass)
4. Ίνες βορίου-βολφραμίου, σε σπάνιες περιπτώσεις

Οι μηχανικές ιδιότητες των ινών που χρησιμοποιούνται φαίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.

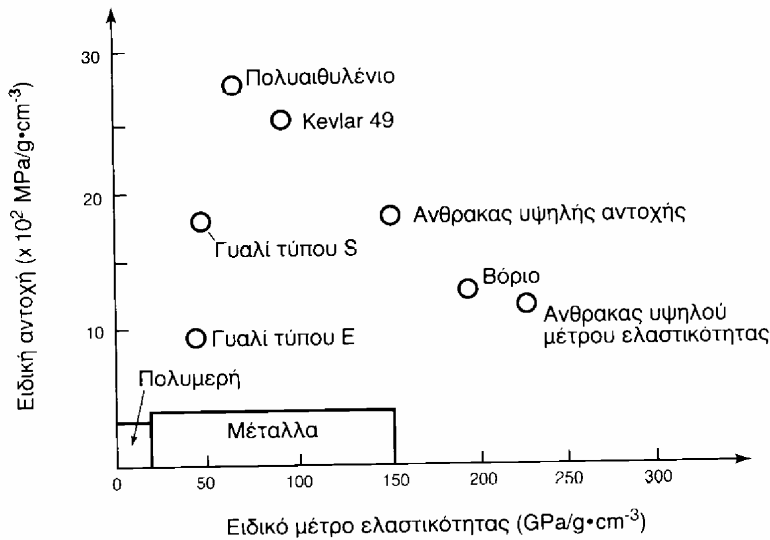
Υλικό		<i>E glass</i>	<i>R, S and T glass</i>	<i>Aramid</i>	<i>Boron/tungsten</i>
Τυπικό παράδειγμα		Araverre (Chomarat), Fibreglas (Owens Corning)	R Glass (Vetrotex)	Kevlar (Du Pont)	Textron (Textron Speciality Mtlis)
Πυκνότητα	g/cm ³	2.54	2.50	1.44	2.6
Αντοχή σε εφελκυσμό	MPa	2.5–3.5	4.4–4.7	2.8–3.6	2.8–3.5
E	GPa	72	87	60–120	400
Επιμήκυνση	%	4.8	5.4	2–4.5	0.9
Ειδική αντοχή	MPa	1.0–1.4	1.75–1.90	1.9–2.5	1.1–1.5
Ειδικό μέτρο ελαστικότητας	GPa	28	35	86	153
Διάμετρος ίνας	μm	5–14	9	12	10
Θερμική αγωγιμότητα	W/m per K	1.0	1.0	0.05	
Θερμική διαστολή (αξονική)	10 ⁻⁶ K ⁻¹	5.0	2.2–4	-2.0 to -3.5	2.0

Πίνακας 1 - Ιδιότητες ινών (η εταιρεία παραγωγής αναφέρεται σε παρένθεση)

Στο διάγραμμα εφελκυσμού / παραμόρφωσης είναι εμφανής η μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό που έχουν οι ίνες σε σχέση με την εποξική ρητίνη.



Σχήμα 4 - Σύγκριση ινών ενίσχυσης, διάγραμμα εφελκυσμού/παραμόρφωσης



Σχήμα 5 - Σύγκριση ειδικού μέτρου ελαστικότητας/ειδικής αντοχής ινών

2.7 Επίδραση του μεγέθους ινών στις μηχανικές ιδιότητες

Το μέγεθος που έχουν οι ίνες είναι καθοριστικό για τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Γενικά οι μικρότερες ίνες έχουν καλύτερη μηχανική αντοχή. Επομένως όσο λεπτότερο είναι το υαλούφασμα τόσο πιο ανθεκτική γίνεται η κατασκευή.

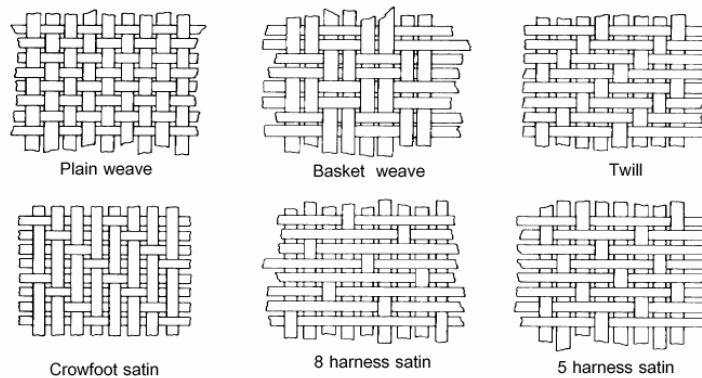
Από την άλλη πλευρά όσο μεγαλώνει το μέγεθος των ινών τόσο αυξάνει το μέτρο ελαστικότητάς τους, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη δυσκαμψία του τελικού σύνθετου υλικού.

2.8 Επίδραση της πλέξης των ινών στις μηχανικές ιδιότητες

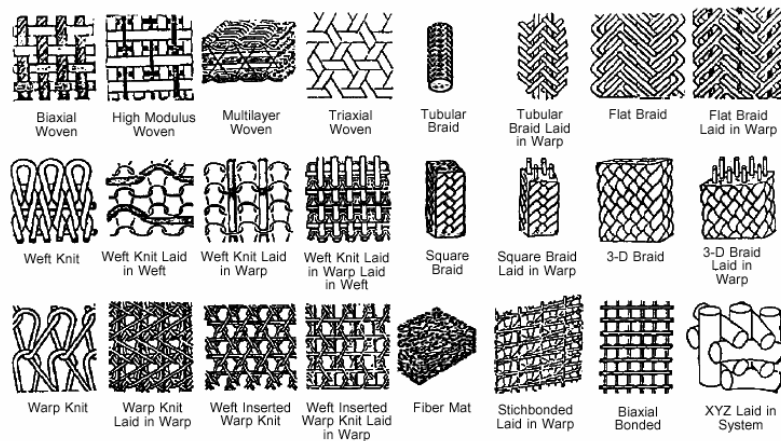
Στις εφαρμογές όπου τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται λόγω των μηχανικών ιδιοτήτων τους οι ίνες στα υαλοφάσματα είναι πάντοτε πλεγμένες (woven roving). Με το πλέξιμο οι ίνες του πλέγματος συγκρατώνται μεταξύ τους με τρόπο μηχανικό και αυτό συνεχίζει να συμβαίνει μετά τον πολυμερισμό, μέσα στην πολυμερική μήτρα. Οι τάσεις μεταφέρονται κυρίως μέσω των ινών και έτσι η αντοχή είναι μεγάλη.

Αντίθετα, όταν τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές χωρίς απαιτήσεις για μηχανική αντοχή τότε συνήθως όχι χημικό όπως συμβαίνει στα υφάσματα MAT που χρησιμοποιούνται με Πολυεστέρα.

Γενικά διαφορετικές πλέξεις δίνουν ελαφρώς διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Παρακάτω φαίνονται οι διαθέσιμες διαφορετικές πλέξεις που υπάρχουν στο εμπόριο καθώς και οι διαφορετικές αρχιτεκτονικές ινών στο χώρο.



Σχήμα 6 - Πλέξεις ενισχύσεων σύμφωνα με το ASM Engineered Materials Handbook

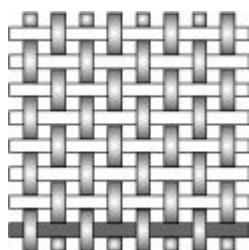


Σχήμα 7 - Διαφορετικές μορφές αρχιτεκτονικών ενίσχυσης

2.9 Διαθέσιμες πλέξεις ινών

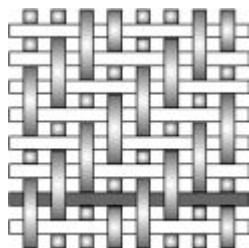
Στα υφάσματα που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στη βιομηχανία, υπάρχουν ίνες πλεγμένες μεταξύ τους. Οι ίνες αυτές είναι συνήθως σε γωνία 0 και 90 μοιρών. Ο τρόπος με τον οποίο είναι πλεγμένες επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα στο σύνθετο υλικό καθώς αλλάζει το μηχανισμό διάδοσης τάσεων μέσα σε αυτό. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται ακριβώς τα είδη πλέξης. Για τα πειραματικά δοκίμια της εργασίας χρησιμοποιήθηκε υαλούφασμα Woven Roving 500 gr/m² και 800 gr/m² με πλέξη Plain.

2.9.1 Plain



Κάθε οριζόντια ίνα περνά εναλλάξ πάνω και κάτω από κάθε κατακόρυφη. Το ύφασμα είναι συμμετρικό, με καλή σταθερότητα και αρκετά καλό πορώδες. Ωστόσο, είναι το πιο δύσκολο να σκεπαστεί από άλλο ύφασμα και η κυματοειδής μορφή που παίρνουν οι ίνες έχει ως αποτέλεσμα τις σχετικά χαμηλές μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με άλλα είδη πλέξης.

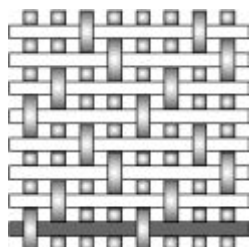
Twill



Μια ή περισσότερες οριζόντιες ίνες περνούν εναλλάξ πάνω και κάτω από δυο ή περισσότερες κατακόρυφες ίνες με επαναληπτικό τρόπο. Αυτό παράγει την οπτική αίσθηση μια ευθείας ή διαγώνιας σπαστής ράβδωσης. Καλύτερη δυνατότητα εμποτισμού και μικρότερος κυματισμός είναι τα χαρακτηριστικά της

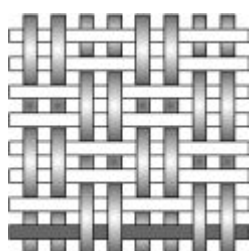
πλέξης σε σχέση με την plain. Λόγω της λιγότερο κυματοειδούς μορφής της δίνει ομαλότερη επιφάνεια και ελαφρώς καλύτερες μηχανικές ιδιότητες.

2.9.2 Satin



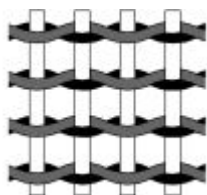
Οι πλέξεις Satin είναι στη πραγματικότητα πλέξεις Twill, τροποποιημένες ώστε να δημιουργούν λιγότερες διασταυρώσεις των οριζόντιων και κατακόρυφων ινών. Τα υφάσματα αυτών των πλέξεων είναι πολύ επίπεδα, εμποτίζονται εύκολα και λόγω της πολύ λιγότερο κυματοειδούς μορφής των ινών έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Ωστόσο, η χαμηλή σταθερότητα και ασυμμετρία κάνουν τη μια κατεύθυνση του υφάσματος να έχει κυρίως κατακόρυφες ή οριζόντιες ίνες, ενώ η άλλη τις υπόλοιπες. Κατά τη χρήση αυτών των πλέξεων χρειάζεται προσοχή ώστε να μην δημιουργηθούν τάσεις εξαιτίας αυτής της ασυμμετρίας στη μορφή.

2.9.3 Basket



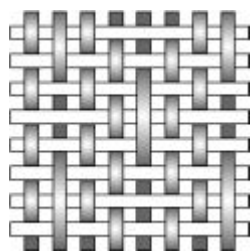
Η πλέξη αυτή είναι αντίστοιχη με την plain, μόνο που δυο ή περισσότερες οριζόντιες ίνες περνούν εναλλάξ πάνω και κάτω από δυο ή περισσότερες κατακόρυφες. Όταν έχουμε δυο και δυο τότε η ύφανση παίρνει το χαρακτηρισμό “basket 2x2”, χωρίς αυτό να την περιορίζει σε συμμετρικούς συνδυασμούς. Υπάρχουν υφάνσεις 8x4, 5x2 κλπ. Σαν ύφανση είναι πιο επίπεδη και πιο δυνατή από την plain, αλλά λιγότερο σταθερή.

2.9.4 Leno



Η ύφανση αυτή βελτιώνει τη σταθερότητα των «ανοικτών» υφασμάτων με χαμηλό αριθμό ινών. Είναι μια μορφή plain ύφανσης στην οποία οι διπλανές οριζόντιες ίνες πλέκονται γύρω από διαδοχικές κατακόρυφες ώστε να δημιουργήσουν ένα σπειροειδές ζεύγος, «κλειδώνοντας» με αυτό τον τρόπο κάθε κατακόρυφη ίνα στο ίδιο μέρος. Τα υφάσματα με αυτή την πλέξη χρησιμοποιούνται πάντοτε με διαφορετικών πλέξεων γιατί λόγω της μορφής τους δεν μπορούν να δημιουργήσουν ένα αποτελεσματικό σύνθετο προϊόν.

2.9.5 Mock Leno



Είναι μια έκδοση της ύφανσης plain, στην οποία σποραδικές οριζόντιες ίνες, σε ίσα διαστήματα αλλά συνήθως αρκετές ίνες μακριά, αποκλίνουν από το συνηθισμένο πάνω-κάτω κάθε μια ίνα και το κάνουν κάθε δυο ή περισσότερες. Το ίδιο συμβαίνει με παρόμοια συχνότητα και στην κατακόρυφη διεύθυνση και το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα ύφασμα με αυξημένο πάχος, αγριότερη επιφάνεια και πρόσθετο πορώδες.

Ιδιότητα	Plain	Twill	Satin	Basket	Leno	Mock leno
Καλή σταθερότητα	****	***	**	**	*****	***
Χαμηλό πορώδες	***	****	*****	**	*	***
Ομαλότητα	**	***	*****	**	*	**
Ισοροπία	****	****	**	****	**	****
Συμμετρία	*****	***	*	***	*	****
Χαμηλός κυματισμός	**	***	*****	**	**/*****	**

***** = άριστο , **** = καλό, ***= αποδεκτό, ** =κακό, * = πολύ κακό

Πίνακας 2- Σύγκριση ιδιοτήτων διαθέσιμων πλέξεων

Στην εργασία χρησιμοποιήθηκαν υφάσματα πλέξης plain. Παρόλο που η πλέξη αποτελεί έναν από τους πιθανούς παράγοντες που μπορεί να επηρεάζουν την κατεργασιμότητα των σύνθετων υλικών, ο μεγάλος αριθμός διαθέσιμων πλέξεων καθιστά απαγορευτικό τον αριθμό πειραμάτων που απαιτούνται για να διαπιστωθούν οι διαφορές. Επίσης, πολλές από τις πλέξεις χρησιμοποιούνται σε υφάσματα διαφορετικών βαρών και έτσι δεν υπάρχει πάντα η δυνατότητα σύγκρισης διαφορετικών πλέξεων με το ίδιο μέγεθος ίνας.

2.10 Ο ρόλος του υλικού μήτρας του σύνθετου υλικού

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για μήτρα στα σύνθετα υλικά με εφαρμογές στη ναυτιλία και την αεροπορική βιομηχανία είναι κυρίως (κατά σειρά μηχανικής αντοχής από το καλύτερο προς το χειρότερο) η Εποξική ρητίνη και η Πολυεστερική ρητίνη.

Από πλευράς κόστους η εποξική ρητίνη είναι τέσσερις με πέντε φορές ακριβότερη από την πολυεστερική και σχεδόν πέντε φορές ανθεκτικότερη. Αποτελεί την επιλογή σε εφαρμογές που απαιτούν πολύ υψηλή μηχανική αντοχή και ελαχιστοποίηση του βάρους. Η πολυεστερική ρητίνη, ή αλλιώς «Πολυεστέρας», χρησιμοποιείται κατά κόρον στην ναυτική βιομηχανία για τη κατασκευή σκαφών αναψυχής αλλά και καλυμμάτων, προφυλακτών και άλλων πλαστικών μερών

για το αυτοκίνητο. Η χρήση του υπαγορεύεται από το κόστος σε αυτές τις εφαρμογές.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία στα πειραματικά δοκίμια χρησιμοποιείται εποξική ρητίνη, καθώς το πεδίο εφαρμογής τους (πτερύγια ιστιοσανίδων) απαιτεί μέγιστη μηχανική αντοχή με ελάχιστο βάρος.

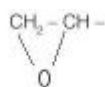
2.11 Η εποξική ρητίνη

Η μεγάλη οικογένεια των εποξικών ρητινών αντιπροσωπεύει τις ρητίνες με τις καλύτερες επιδόσεις από όλες τις διαθέσιμες. Οι εποξικές γενικά ξεπερνούν όλα τα άλλα συστήματα ρητινών από πλευράς μηχανικών ιδιοτήτων και αντίστασης στο περιβάλλον, κάτι που οδηγεί στην σχεδόν αποκλειστική τους χρήση σε εφαρμογές πολύ υψηλής τεχνολογίας.

Ως ρητίνη στρωματοποίησης, οι εξαιρετικές συγκολλητικές ιδιότητές της και η πολύ καλή αντίσταση στο νερό την κάνουν ιδανική για χρήσεις όπως η κατασκευή σκαφών υψηλών επιδόσεων.

2.11.1 Χημική σύσταση

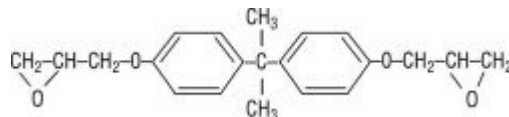
Ο όρος «έποξυ» αναφέρεται στη χημική ομάδα που αποτελείται από ένα άτομο οξυγόνου ενωμένο με δυο άτομα άνθρακα που έχουν κάποιο δεσμό μεταξύ τους. Η απλούστερη «έποξυ» είναι ένας δακτύλιος τριών ατόμων γνωστός και ως «άλφα-έποξυ» και η χημική δομή του φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 8 - Άλφα-έποξυ

Ο σχηματισμός της χημικής αυτής ένωσης γίνεται από μια μοριακή δομή μακριάς αλυσίδας, όμοια με αυτή του βινυλεστέρα με αντιδρώντα τμήματα στις δυο άκρες. Στην έποξυ όμως, αυτά τα τμήματα ατόμων αποτελούνται από εποξικές ομάδες αντί για εστερικές ομάδες. Η απουσία εστερικών ομάδων σημαίνει ότι η εποξική ρητίνη έχει καλή αντίσταση στο νερό. Το μόριο της εποξικής περιέχει

ακόμη δυο βενζολικές ομάδες στο κέντρο του που του επιτρέπουν να απορροφά καλύτερα τόσο τις μηχανικές όσο και τις θερμικές τάσεις από τις ευθύγραμμες ομάδες και επομένως δίνει στην εποξική πολύ καλή αντοχή, σκληρότητα και ιδιότητες μονωτή θερμότητας.

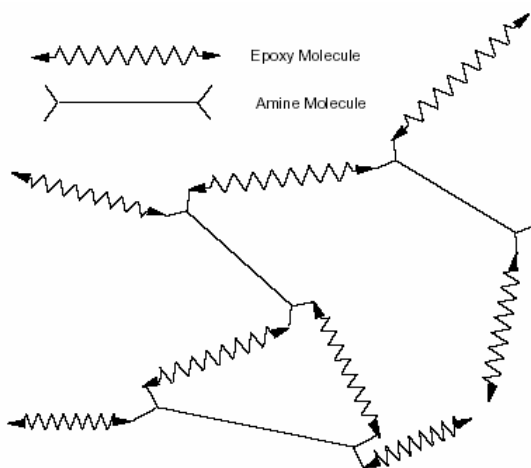


Σχήμα 9 - Τμήμα εποξικής αλυσίδας

2.11.2 Ιδιότητες

Οι εποξικές ρητίνες έχουν πλήθος χρήσιμων ιδιοτήτων:

- Τόσο η ρητίνη όσο και οι σκληρυντές της έχουν χαμηλό ιξώδες.
- Παρουσιάζουν πολύ μικρή συστολή κατά τον πολυμερισμό τους. Έτσι αποφεύγονται πρόσθετες τάσεις μέσα στο υλικό.
- Μεγάλη αντοχή συγκολλήσεων.
- Μεγάλη μηχανική αντοχή.
- Κακή ηλεκτρική αγωγιμότητα (καλοί μονωτές).
- Καλή χημική αντίσταση.



Σχήμα 10 - Αναπαράσταση τρισδιάστατης μορφής πολυμερισμένης εποξικής ρητίνης

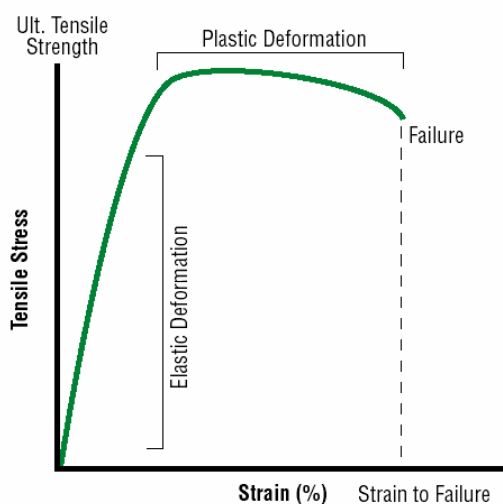
Η εποξική ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία ήταν η D.E.R. 321 της DOW Chemical. Οι ιδιότητες της ρητίνης, σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρεία είναι:

Epoxyde Equivalent Weight, (g/eq)	180 - 188
Percentage Epoxyde, (%)	22.9 - 23.9
Epoxyde Group Content, (mmol/kg)	5320 - 5560
Viscosity @ 25°C (77°F), (mPa.s)	500 - 700
Color, Gardner	3 Max.
Density @ 25°C (77°F), (g/ml)	1.14
Flash Point, (°C)	121
Shelf Life, (Months)	24

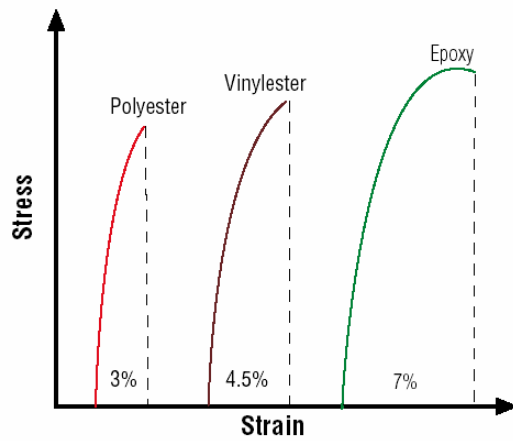
Πίνακας 3 - Τυπικές ιδιότητες της ρητίνης D.E.R. 321

2.11.3 Μηχανικές ιδιότητες

Το τυπικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης της εποξικής ρητίνης φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Η ρητίνη συμπεριφέρεται σαν πολυμερές και έχει χαρακτηριστική πλαστική περιοχή πριν τη θραύση.



Σχήμα 11 - Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης εποξικής ρητίνης



Σχήμα 12 - Τυπικό διάγραμμα κόπωσης-τάσης για Πολυεστερική, Βινυλεστερική και Εποξική ρητίνη

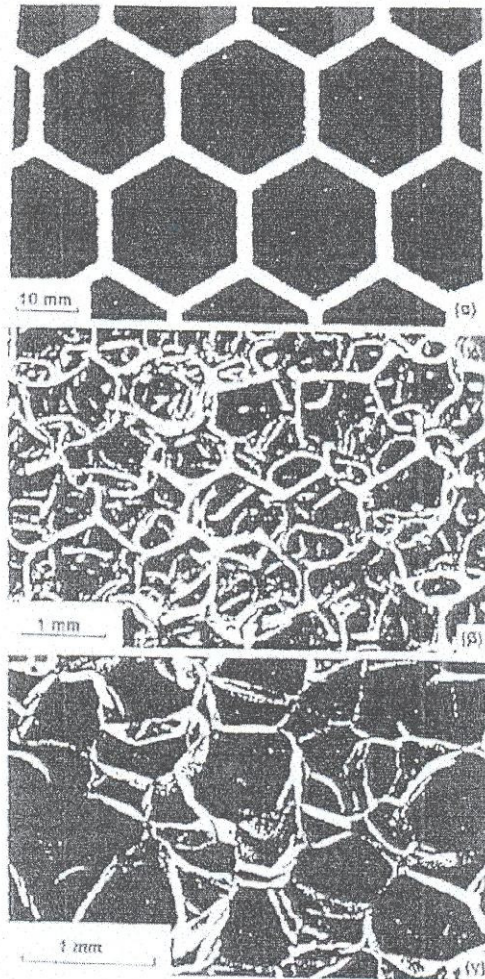
2.11.4 Εφαρμογές

Λόγω των παραπάνω ιδιοτήτων τους, οι εποξικές ρητίνες χρησιμοποιούνται ως κόλλες, μονωτικά, βερνίκια, μπογιές καθώς και ρητίνες στρωματοποίησης σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές.

3 Αφρώδη υλικά

3.1 Ορισμοί κυψελοειδών στερεών – αφρών

Με τον όρο κυψελοειδές στερεό, εννοούμε το στερεό εκείνο, το οποίο συνίσταται από ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο από στερεές ράβδους ή πλάκες οι οποίες και μορφοποιούν τόσο τις άκρες όσο και τις επιφάνειες των κυψελών. Τρεις τυπικές δομές εμφανίζονται στις ακόλουθες εικόνες :

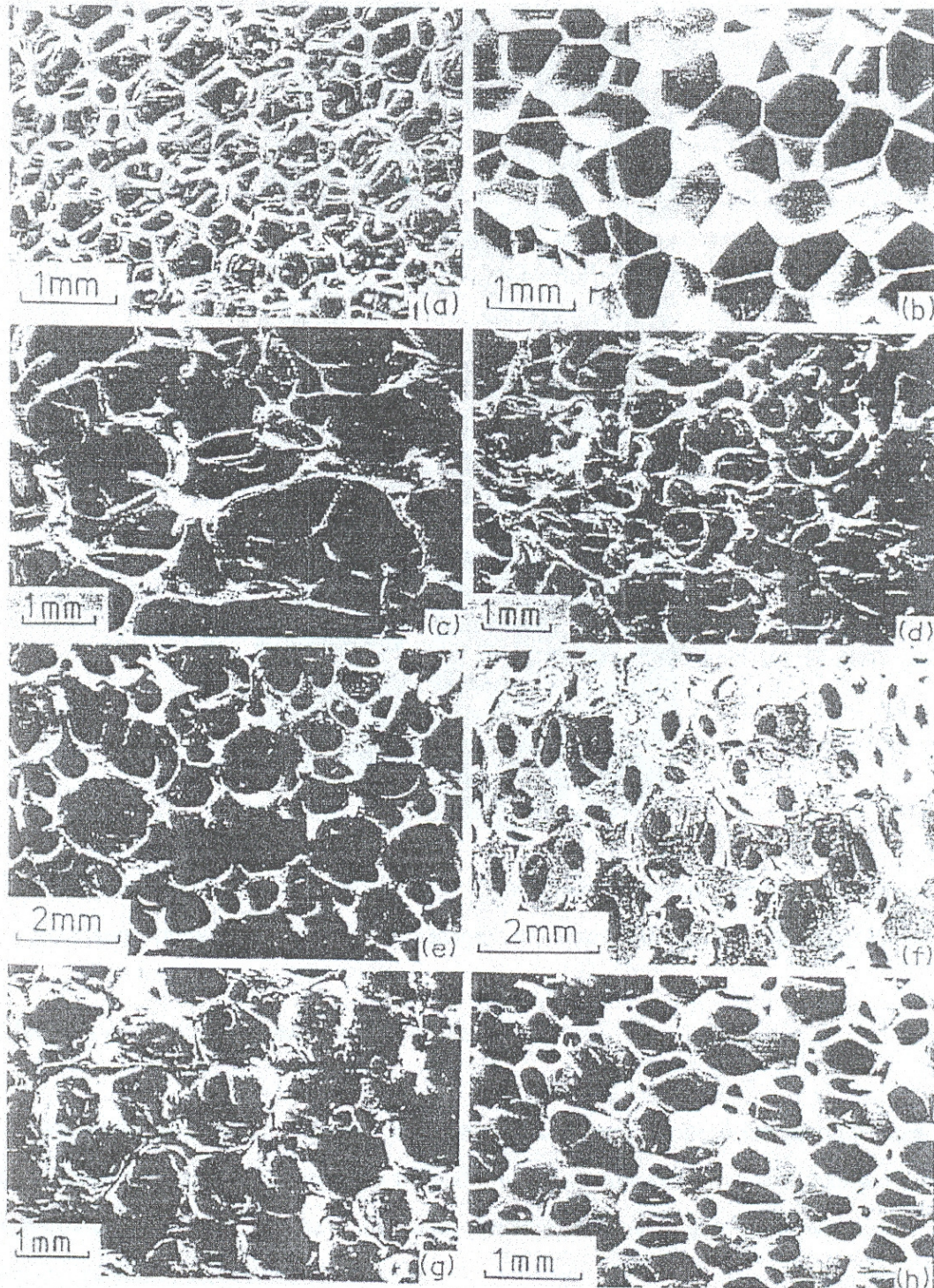


Σχήμα 3.1. Παραδείγματα κυψελοειδών υλικών. (α) Κηρύθρα δύο διαστάσεων, (β) αφρός ανοιχτών κυψελών τριών διαστάσεων και (γ) αφρός κλειστών κυψελών τριών διαστάσεων.

Η απλούστερη είναι μια διδιάστατη διάταξη από πολύγωνα, τα οποία είναι τοποθετημένα έτσι, ώστε να καλύπτουν μια επίπεδη επιφάνεια μορφής παρόμοιας με τις εξαγωνικές κυψέλες των μελισσών. Γι αυτό το λόγο τέτοια υλικά αποκαλούνται ως «κηρήθρες». Πιο απλά, οι κυψέλες είναι πολύεδρα τα οποία συγκροτούνται στο χώρο των τριών διαστάσεων μορφοποιώντας στερεά. Τέτοιου είδους κυψελοειδή υλικά των οποίων η δομή είναι τρισδιάστατη αποκαλούνται αφροί (foams). Εάν το στερεό από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο αφρός περιέχεται μόνο στις άκρες των κυψελών τότε ο αφρός λέμε ότι είναι ανοικτών κυψελών (open celled). Αν και οι όψεις των κυψελών είναι επίσης στερεές έτσι ώστε κάθε κυψέλη να είναι αποκλεισμένη δίχως συνδέσεις με τις διπλανές τις, λέμε ότι ο αφρός είναι κλειστών κυψελών (closed celled). Υπάρχουν και κάποιοι αφροί οι οποίοι είναι εν μέρει ανοιχτοί και εν μέρει κλειστοί.

Σημαντικό χαρακτηριστικό σε ένα κυψελοειδές υλικό είναι η σχετική του πυκνότητα ρ/ρ_s , δηλαδή το πηλίκο της πυκνότητας του κυψελοειδούς υλικού ρ , προς την πυκνότητα ρ_s του υλικού από το οποίο είναι φτιαγμένα τα τοιχώματα των κυψελών. Καθώς η σχετική πυκνότητα αυξάνεται, τα τοιχώματα των κυψελών διογκώνονται ενώ οι πόροι συστέλλονται – πέρα περίπου από την τιμή 0.30 υφίσταται μετάβαση από την αμιγώς κυψελοειδή δομή σε μια άλλη δομή η οποία μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί στερεό το οποίο περιέχει απομονωμένους μεταξύ τους πόρους.

Στις εικόνες που ακολουθούν διακρίνονται διάφορα παραδείγματα κυψελοειδών υλικών :



Σχήμα 3.2. Παραδείγματα κυψελοειδών υλικών. (α) πολυουρεθάνη, (β) πολυαιθυλένιο, (γ) νικέλιο, (δ) χαλκός, (ε) ζirkονία, (φ) μουλίτης, (ζ) γυαλί, (η) πολυεστέρας.

3.2 Μέθοδοι παρασκευής κυψελοειδών στερεών

Τα πιο κοινά υλικά που μπορούν να αποκτήσουν δομή αφρού είναι τα πολυμερή. Πάντως και τα μέταλλα, τα κεραμικά, τα υαλώδη, αλλά ακόμα και τα σύνθετα υλικά μπορούν να παραχθούν ως αφροί σε σύνθετη δομή. Οι κυριότεροι τρόποι παρασκευής κυψελοειδών στερεών είναι οι εξής :

α) Κηρήθρες :

Ένας προφανής τρόπος κατασκευής υλικού είναι να συμπιεστεί ένα λεπτό φύλλο υλικού και να δώσει ένα ημιεξαγωνικό προφίλ. Στη συνέχεια πρέπει να κολληθούν τα ημιεξαγωνικά προφίλ, ώστε να δώσουν εξάγωνα.

Επίσης, κηρήθρες μπορούν να χυτευτούν σε καλούπια.

Τέλος, κηρήθρες μπορούν να παραχθούν και με διέλαση. Οι κεραμικές κηρήθρες που χρησιμοποιούνται στους καταλύτες των αυτοκινήτων κατασκευάζονται με τον τρόπο αυτό.

β) Αφροί :

Για την μορφοποίηση σε αφρούς διαφόρων ειδών στερεών χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές. Τα πολυμερή μορφοποιούνται σε αφρούς με την εισαγωγή φυσαλίδων αερίου στο υγρό μονομερές ή στο θερμό πολυμερές, επιτρέποντας στις φυσαλίδες να διογκωθούν και να στερεοποιηθούν, και στη συνέχεια να στερεοποιηθούν με ψύξη. Το αέριο εισάγεται με τη βοήθεια μηχανικού αναδευτήρα, είτε αναμειγνύοντας κάποιο μέσο που διογκώνεται μέσα στο πολυμερές βοηθώντας έτσι στο να λάβει το αέριο μέρος του όγκου του. Φυσικά διογκωτικά μέσα είναι τα αδρανή αέρια, όπως το διοξείδιο του άνθρακα ή το άζωτο. Αυτά διαλύονται στο θερμό πολυμερές σε υψηλή πίεση και διαστέλλονται καθώς η πίεση ελατώνεται. Εναλλακτικά, υγρά χαμηλού σημείου τήξης, όπως οι χλωροφθοράνθρακες, αναμειγνύονται με το πολυμερές και εξατμίζονται κατόπιν θέρμανσης προς σχηματισμό ατμωδών φυσαλίδων. Τα χημικά διογκωτικά μέσα είναι πρόσθετα, τα οποία είτε αποσυντίθενται κατά την θέρμανση, είτε

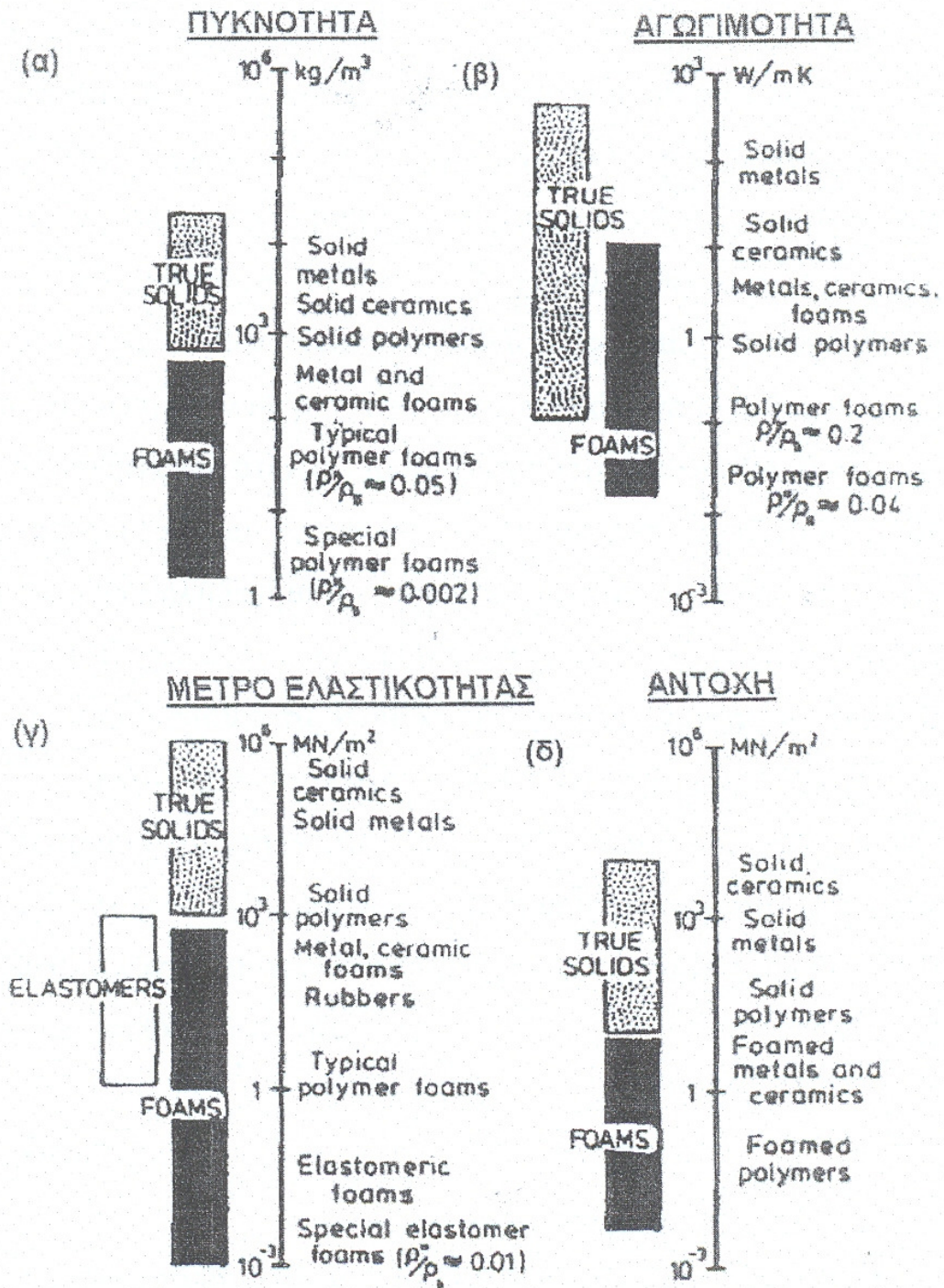
ελευθερώνουν αέρια. Οποιαδήποτε από τις παραπάνω διεργασίες οδηγεί στη δημιουργία αφρών ανοικτών ή κλειστών κυψελών.

Αφροί μετάλλων παράγονται αναμειγνύοντας οργανικές αλυσίδες (πχ άνθρακα) μέσα στο τήγμα του μετάλλου σε αδρανή ατμόσφαιρα. Όταν το μέταλλο ψυχθεί και στερεοποιηθεί, ο άνθρακας αφήνει στη θέση του μια μήτρα κυψελοειδούς μορφής. Εξάλλου, τα μέταλλα μπορούν να διηθηθούν μέσα σε χαμηλής πυκνότητας επίστρωμα άνθρακα ή κεραμικού, το οποίο ακολούθων απομακρύνεται, αφήνοντας το σκελετό του μετάλλου το οποίο είχε διαπεράσει τους πόρους. Κονιοποιητικές μέθοδοι μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν. Σκόνη μετάλλου αναμειγνυόμενη με αδρανές υλικό (άνθρακα) δημιουργεί συμπαγές συσσωμάτωμα. Μετά τη συσσωμάτωση, το πρόσθετο του άνθρακα απομακρύνεται. Αφροί μετάλλων, τέλος, μπορούν να παραχθούν με απευθείας διαμόρφωση: δημιουργώντας εγκλείσματα πάνω στα φύλλα των μετάλλων και εν συνεχεία ενώνοντας τα φύλλα μεταξύ τους.

Αφροί μετάλλων παράγονται με παρόμοιες μεθόδους με αυτές που χρησιμοποιούνται για τα πολυμερή κυρίως με χρήση διογκωτικών μέσων. Αφροί κεραμικών παράγονται διηθώντας έναν αφρό πολυμερούς σε μίγμα του κεραμικού σε νερό ή σε κάποιο άλλο υγρό.

3.3 Ιδιότητες και εφαρμογές των κυψελοειδών στερεών

Τα κυψελοειδή υλικά διαθέτουν ορισμένες χαρακτηριστικές ιδιότητες. Αυτές οι ιδιότητες, μηχανικές και θερμικές, μετρώνται με τις ίδιες μεθόδους που χρησιμοποιούνται και στα εντελώς συμπαγή στερεά. Στο ακόλουθο σχήμα εμφανίζεται το εύρος των τεσσάρων ιδιοτήτων : της πυκνότητας, της ελστικότητας, της θερμικής αγωγιμότητας και της αντοχής σε θλίψη.



Σχήμα 3.3. Οι ιδιότητες των αφρών. (α) πυκνότητα, (β) θερμική αγωγιμότητα, (γ) μέτρο ελαστικότητας και (δ) αντοχή σε θλίψη.

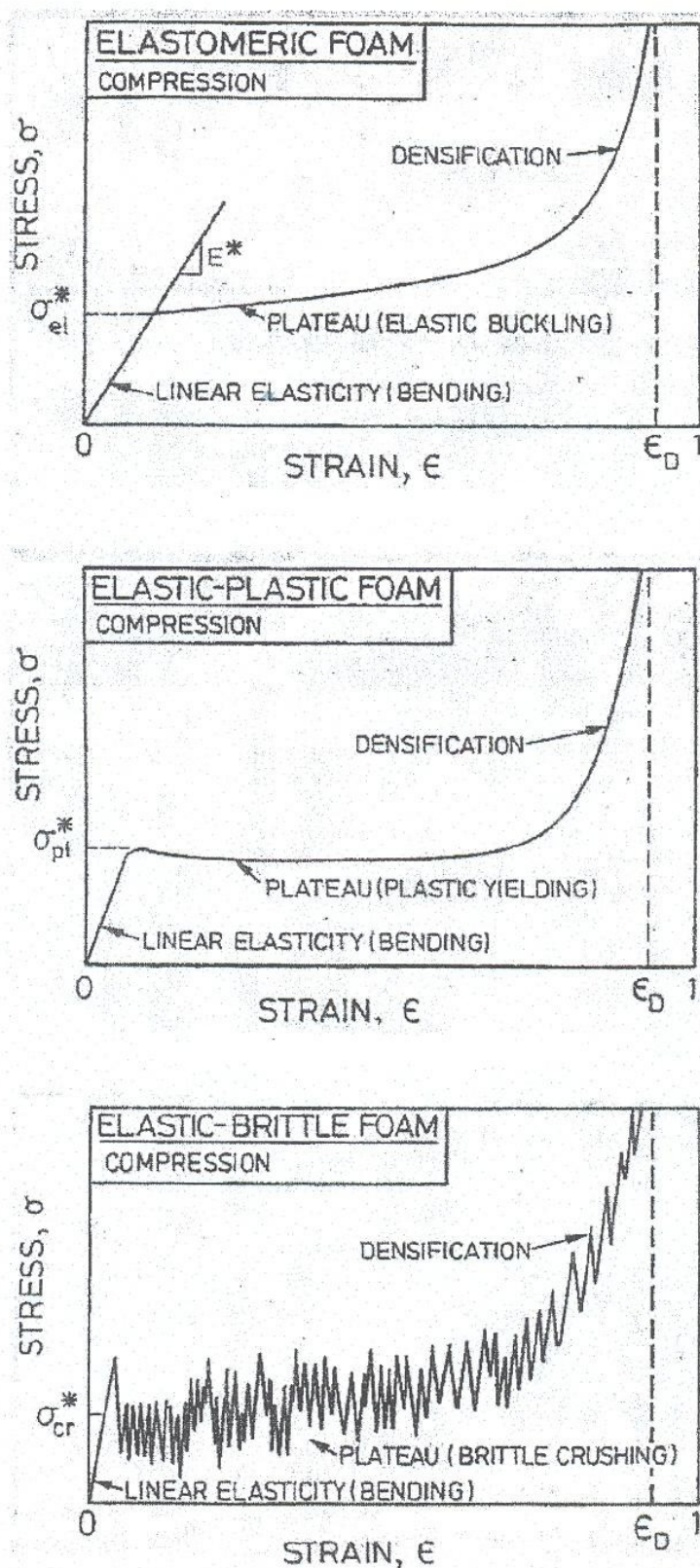
- Η χαμηλή πυκνότητα επιτρέπει το σχεδιασμό άκαμπτων ελαφριών εξαρτημάτων.
- Η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα επιτρέπει την κατασκευή φθηνών και αξιόπιστων θερμομονώσεων.
- Η χαμηλή ακαμψία και η δυνατότητα για παραλαβή μεγάλων θλιπτικών παραμορφώσεων κάνει τους αφρούς ιδανικούς για εφαρμογές απορρόφησης ενέργειας.

3.4 Μηχανική συμπεριφορά των αφρών

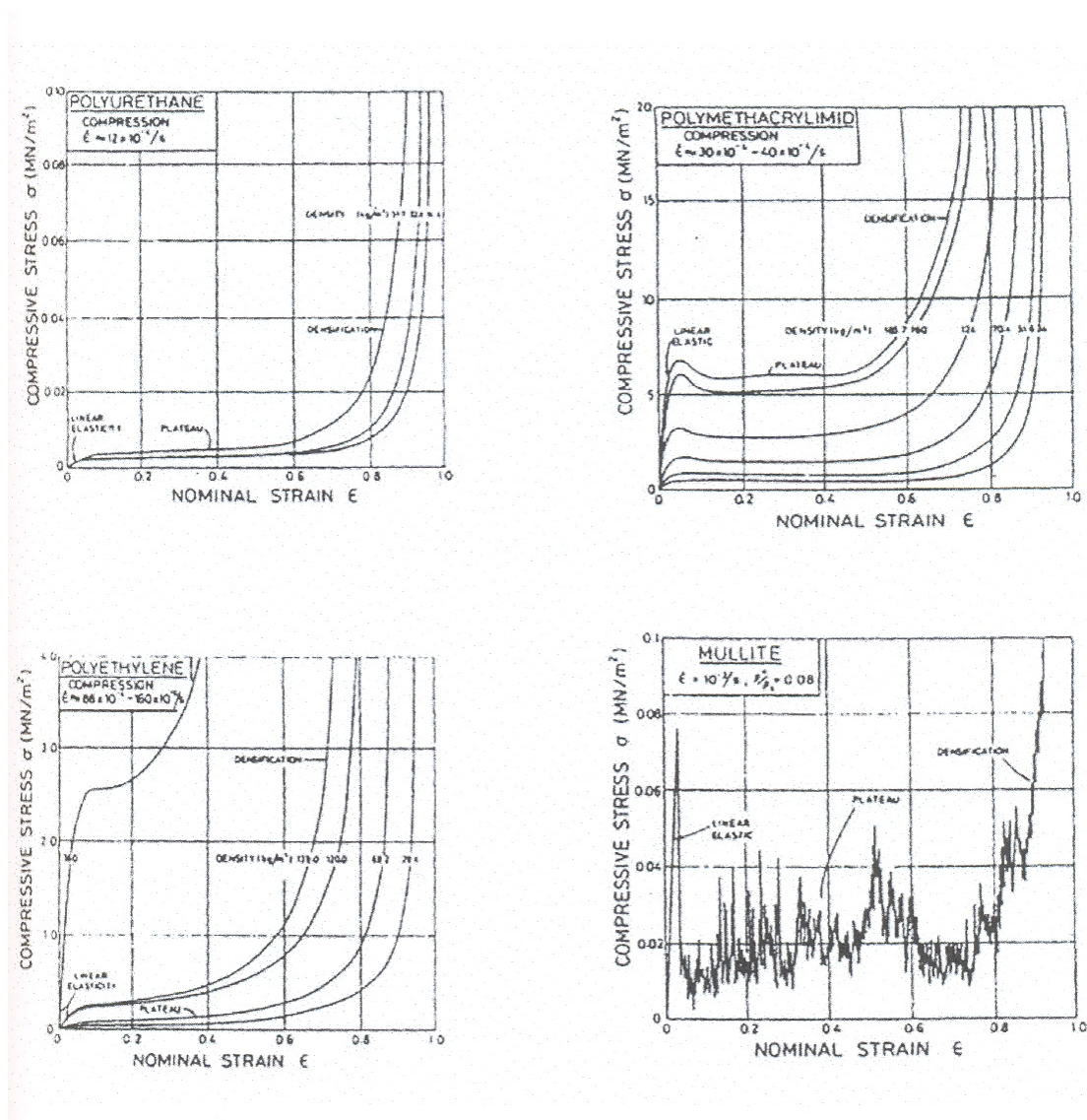
Οι μηχανικές ιδιότητες ενός αφρού σχετίζονται με τη δομή του και με το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένα τα τοιχώματα των κυψελών του. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της δομής ενός αφρού είναι η σχετική του πυκνότητα ρ/ρ_s , ο βαθμός στον οποίο οι κυψέλες είναι ανοικτές ή κλειστές και οι λόγοι ανισοτροπίας του R_{12} και R_{13} . Οι κρίσιμες ιδιότητες των τοιχωμάτων των κυψελών είναι η πυκνότητα του στερεού από το οποίο αποτελούνται ρ_s , το μέτρο ελαστικότητας E_s , το όριο διαρροής σ_v , το όριο θραύσης σ_f , και οι παράμετροι ερπυσμού η_s , ϵ_{os} και σ_{os} .

Οι ιδιότητες ενός αφρού αναλύονται με βάση αυτές τις παραμέτρους και κατόπιν συγκρίνονται και συσχετίζονται με τα πειραματικά δεδομένα προκειμένου να δώσουν τις κατάλληλες εξισώσεις. Παράγοντες όπως ο ρυθμός παραμόρφωσης, η θερμοκρασία, η ανισοτροπία και η πολυαξονική φόρτιση επηρεάζουν σημαντικά τις ιδιότητες αυτές. Γενικά, η έρευνα της πλήρους μηχανικής ανάλυσης είναι αρκετά δύσκολη, λόγω της γεωμετρικής πολυπλοκότητας.

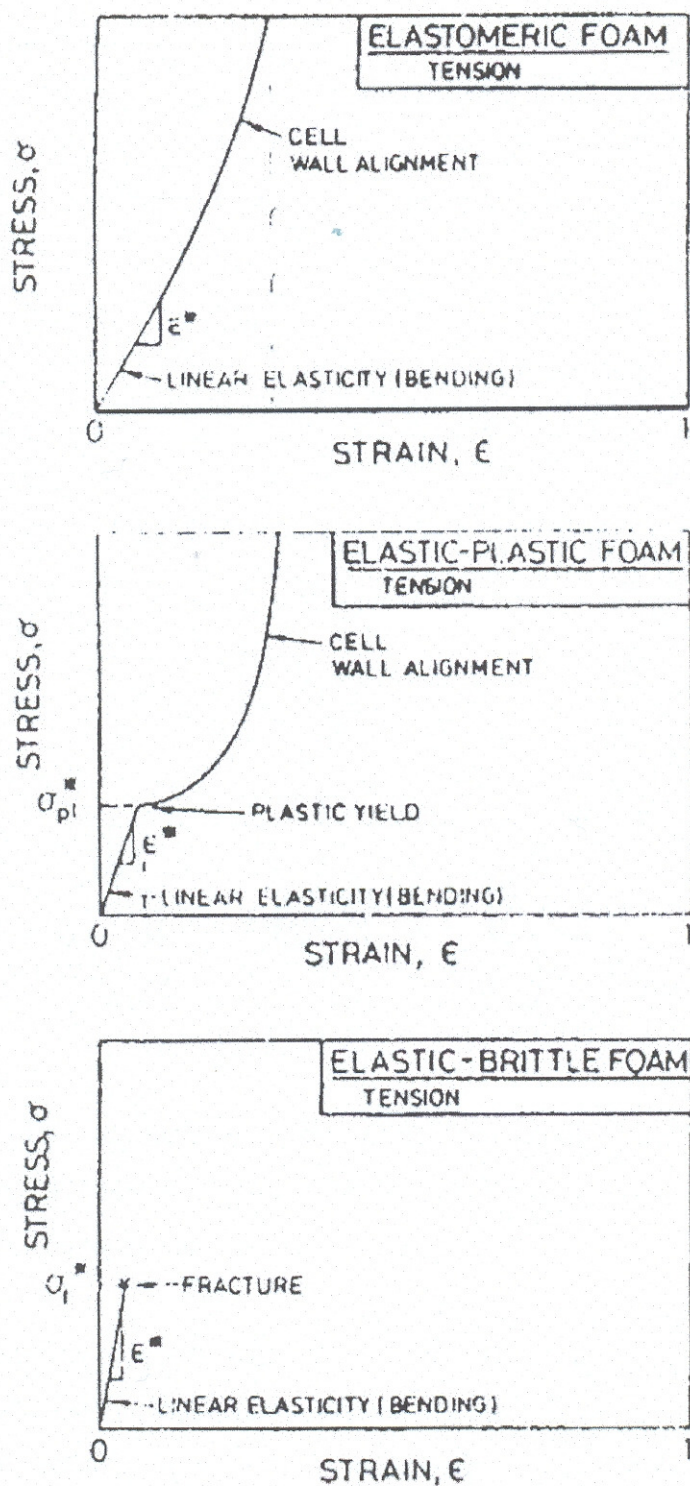
Στα παρακάτω σχήματα παρατίθενται οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης και οι μικρογραφίες για εφελκισμό ή θλίψη για έναν ελαστομερή, έναν ελαστικο-πλαστικό και έναν ψαθυρό αφρό :



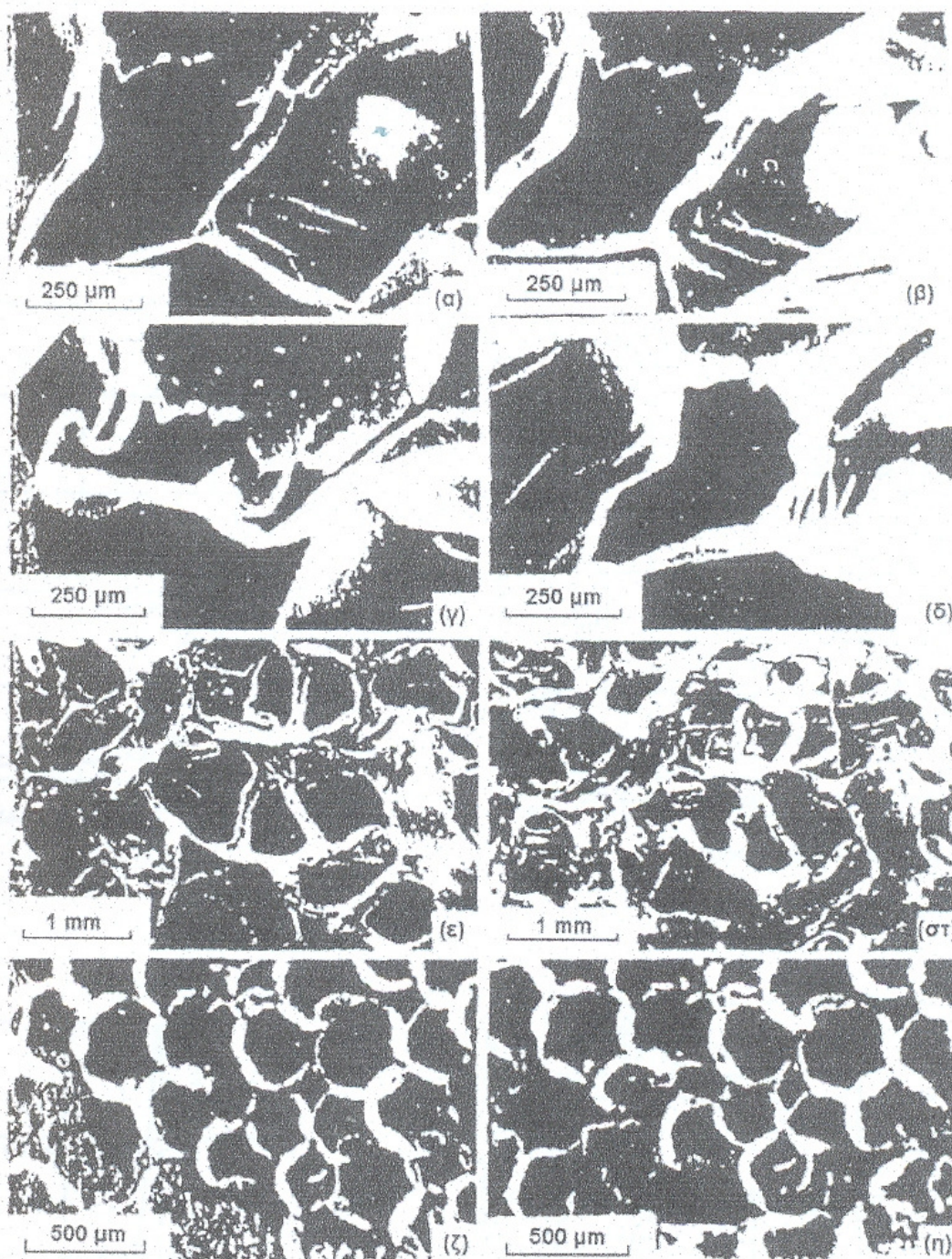
Σχήμα 3.4. Καμπύλες τάσης παραμόρφωσης θλιπτικής καταπόνησης για (α) ελαστομερή αφρό, (β) ελαστικό-πλαστικό αφρό και (γ) ψαθυρό ελαστικό αφρό.



Σχήμα 3.5. Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης θλίψης για αφρούς (α) εύκαμπτης πολυουρεθάνης, (β) πολυαιθυλενίου, (γ) πολυμεθυλακρυλαμιδίου και (δ) μουλλίτη για διάφορες τιμές πικνότητας.



Σχήμα 3.6. Καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων δοκιμής εφελκυσμού για (α) ελαστομερή αφρό, (β) ελαστοπλαστικό αφρό και (γ) ελαστικό ψαθυρό αφρό.



Σχήμα

3.7. Μικρογραφίες στις οποίες βλέπουμε τους τρόπους της παραμόρφωσης που ανταποκρίνονται σε κάθε περιοχή συμπεριφοράς στη θλίψη του ελαστομερούς πολυαιθυλενίου: (α) αφόρτιστο, (β) φόρτιση στην περιοχή γραμμικής ελαστικότητας, (γ) φόρτιση στην περιοχή της μη γραμμικής ελαστικότητας, (δ) αποκατάσταση ελαστικής παραμόρφωσης στη αποφόρτιση.

4 Αξονική καταπόνηση κελυφών

4.1 Αξιολόγηση συμπεριφοράς συστημάτων ενέργειας

Η αξιολόγηση της συμπεριφοράς των συστημάτων απορρόφησης ενέργειας έχει πρωτεύουσα σημασία. Ο πρωταρχικός μηχανισμός απορρόφησης ενέργειας είναι η εφαρμογή ενός φορτίου για μια δεδομένη μετατόπιση. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η μετατόπιση για δεδομένη απορροφούμενη ενέργεια τόσο μικρότερο είναι το μέσο φορτίο. Ο σχεδιαστικός στόχος είναι η μέγιστη δυνατή διάχυση ενέργειας κατά τρόπο μη αντιστρεπτό. Με αυτό το σκεπτικό, η βέλτιστη συμπεριφορά που αναμένεται από κάποιο υλικό είναι αυτή του απόλυτα πλαστικού υλικού, όπου το διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης προσδιορίζεται από μια τετραγωνική επιφάνεια.

4.2 Πειραματικό μέρος

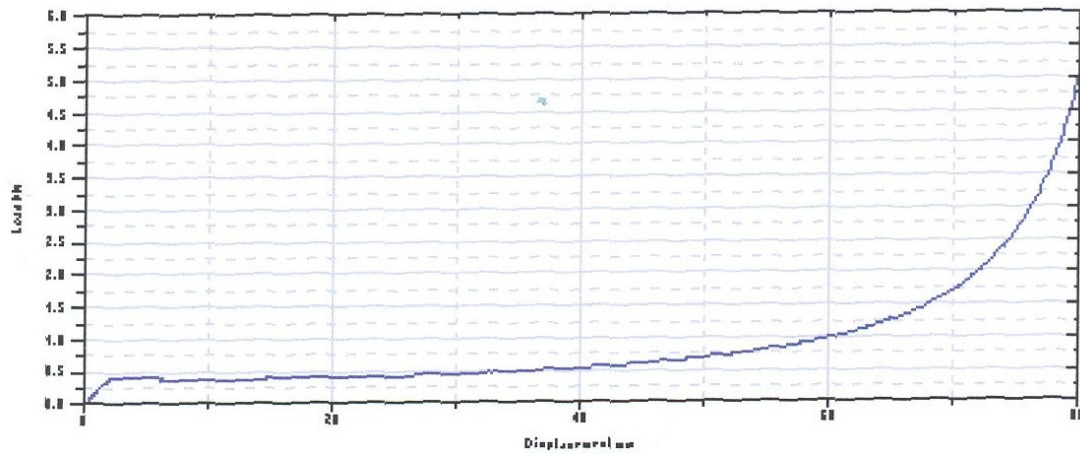
4.2.1 Χαρακτηρισμός υλικού

Για τις δοκιμές χρησιμοποιήσαμε τέσσερα κελύφη.

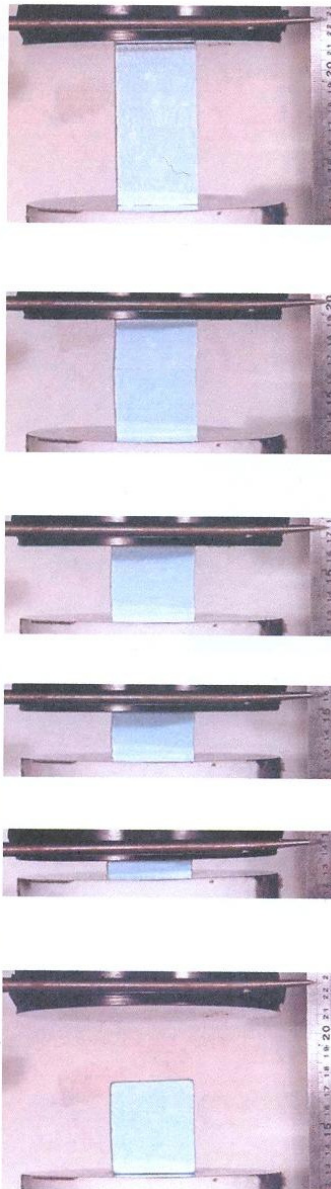
Τα κελύφη ήταν κυκλικής διατομής και αποτελούσαν από σύνθετο υλικό ως μήτρα. Πιο συγκεκριμένα, η μήτρα αποτελούσαν από υαλοϋφασμα με ινες τυχαίας διεύθυνσεως (chopped strand glass mat) εμποτισμένο με πολυεστερική ρητίνη.

Για την ενίσχυση των κελυφών χρησιμοποιήθηκε αφρός, ο οποίος ήταν από πλάκα εξηλασμένης πολυστερίνης με την εμπορική ονομασία STYROFOAM της εταιρίας DOW. Η πυκνότητα του ήταν 35 kg/m³.

Παρακάτω παρουσιάζονται το γράφημα Φορτίου-Μετατόπισης και διαδοχικές εικόνες από τη δοκιμή θλίψης για τον αφρό τύπου DOW, με διαστάσεις διατομής 51.2mm x 46.2mm και ύψος 90mm.



Σχήμα 4.1 Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων για αφρό τύπου DOW



Σχήμα 4.2. Εικόνες από την συμπίεση του αφρού DOW.

4.2.2 Κατασκευή δοκιμίων

Τα κελύφη κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ κατά τη διάρκεια της εκπόνησης του διδακτορικού του Μηχ.μηχ. Γεωργίου Δημοσθένους και έγινε με τη βοήθεια μητρών - καλουπιών τα οποία κατασκευάστηκαν από μπλόκ ξύλου που κατεργάστηκε σε εργαλειομηχανές.

Για την απόλυτη εξακρίβωση της επίδρασης του αφρού στην αντοχή των κελυφών , τα κελύφη επεξεργάστηκαν έτσι ώστε να δημιουργηθούν τέσσερα αντίγραφα πανομοιότυπα με αυτά που είχαν καταπονηθεί στο παρελθόν και δεν περιείχαν αφρό.

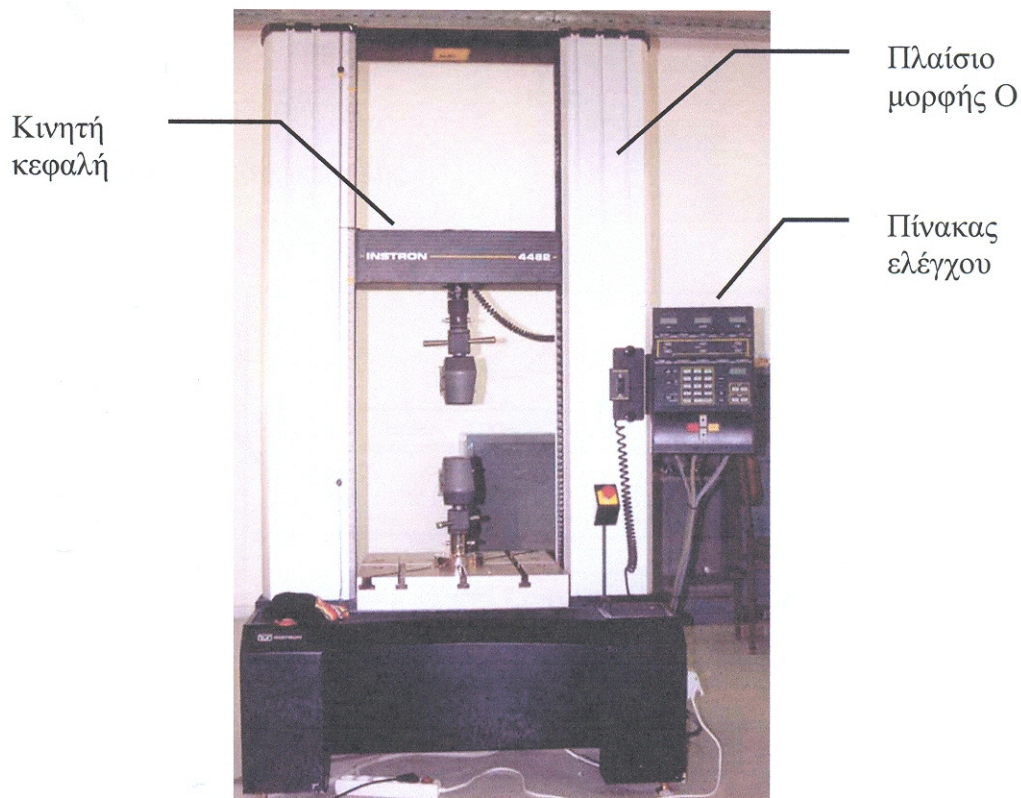
Έτσι τα δοκίμια κόπηκαν στα κατάλληλα ύψη και με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η παραλληλότητα της πάνω και της κάτω επιφάνειας. Στη συνέχεια, πληρώθηκαν με αφρό τύπου DOW

4.2.3 Πρέσα INSTRON 4482

Για την αξονική στατική καταπόνηση χρησιμοποιήθηκε η πρέσα δοκιμών Instron 4482 του εργαστηρίου. Πρόκειται για μηχανική πρέσα (μηχανισμού κοχλία – περικοχλίου) ονομαστικού φορτίου 10KNt.

Τα βασικά μέρη της πρέσας είναι:

- Το πλαίσιο, μορφής Ο, που περιλαμβάνει το τραπέζι στερέωσης του δοκιμίου και το μηχανισμό κίνησης του εργαλείου διαμόρφωσης
- Ο μηχανισμός της κινητής κεφαλής
- Ο πίνακας ελέγχου, ο οποίος διαθέτει θύρα επικοινωνίας συμβατή με το πρωτόκολλο IEEE , συνδεδεμένη μέσω παράλληλης θύρας με Η/Υ



Σχήμα 4.3. Η πρέσα INSTRON 4482.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της πρέσας είναι :

- Ονομαστική δύναμη : 10KNt
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής : 500mm/min
- Ταχύτητα επιστροφής της κεφαλής : 600mm/min
- Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο στη μέγιστη ταχύτητα : 7,5KNt
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής σε μέγιστο φορτίο : 250mm/min

Ο πίνακας ελέγχου έχει ενσωματωμένο που αναλαμβάνει τη ρύθμιση όλων των παραμέτρων κατεργασίας και την επεξεργασία των απαραίτητων υπολογισμών.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η σωστή τοποθέτηση του δοκιμίου στην κάτω πλάκα της πρέσας, ώστε να αποφευχθεί τυχόν μετακίνηση του, και οι δύο πλάκες να μείνουν παράλληλες μεταξύ τους, κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Με τον τρόπο αυτόν αποφεύγεται η επιβολή μεγάλων φορτίων και εφαρμογή στρεπτικής δύναμης στην πλάκα βάσης.

Τέλος, με το κατάλληλο λογισμικό – στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το Instron Series IX Automated Material Tester – μας δίνεται η δυνατότητα να επεξεργαστούμε τα λαμβανόμενα αρχεία και να δημιουργήσουμε τα απαραίτητα γραφήματα και τους υπολογισμούς.

4.2.4 Πειραματικές παρατηρήσεις

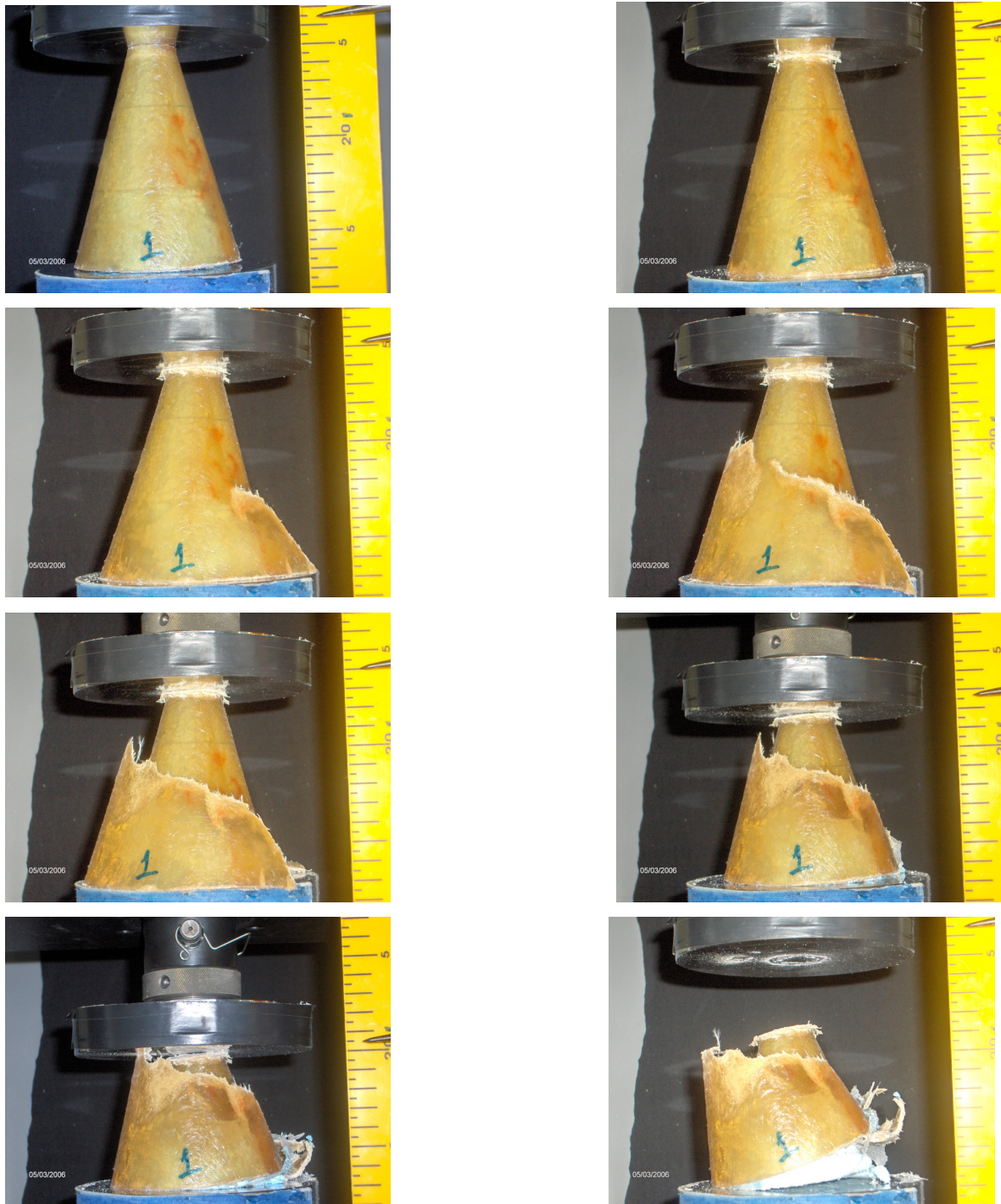
Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων ελήφθησαν φωτογραφίες των δοκιμίων σε διαδοχικές φάσεις συμπίεσης, οι οποίες παρουσιάζουν τον μηχανισμό παραμόρφωσης αυτών. Η φωτογραφική κάμερα που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου Canon EOS 5000.

4.2.5 Συμπύεση κελυφών

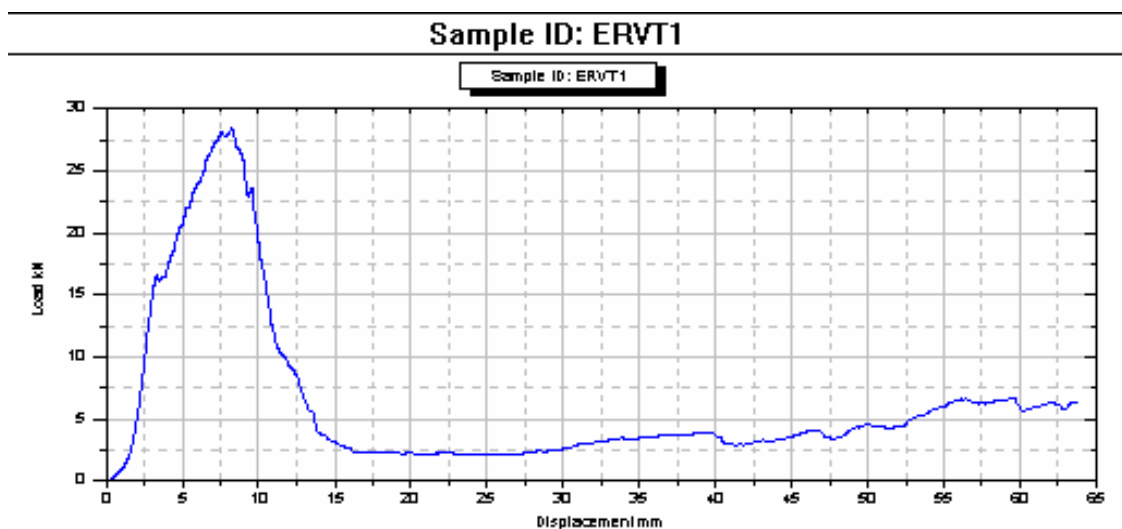
-1° Κέλυφος:

Το κέλυφος αυτό έχει 3 στρώσεις υαλονήματων, πάχος 2,7mm, ύψος 138mm, διάμετρο πάνω κύκλου 31.3mm και κάτω κύκλου 104.8mm με ημιγωνία κώνου 15°. Το κέλυφος ενισχύεται με αφρό τύπου DOW.

Παρακάτω εμφανίζονται οι διαδοχικές εικόνες και το γράφημα φορτίου – μετατόπισης για το δοκίμιο αυτό



Σχήμα 4.4. Εικόνες από την κατάρρευση του πρώτου δοκιμίου.



Crushing

load $P_{max} = 28.39 \text{ KNt}$
 Crush length $\Delta l = 63.5 \text{ mm}$
 Mean-post crushing load $P_a = 6.39 \text{ KNt}$
 Total energy absorbed $W = 405.8 \text{ J}$

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα του πρώτου δοκιμίου με τον αφρό, συγκρίτικα με τα αποτελέσματα της ίδιας δοκιμής σε πανομοιότυπο κέλυφος χωρίς αφρό:

ΤΥΠΟΣ ΑΦΡΟΥ	ΜΗΚΟΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ Δl (mm)	ΑΡΧΙΚΟ ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ P_{max} (KNt)	ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ P_a (KNt)	ΟΛΙΚΗ ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ W (J)
Χωρίς αφρό	63.5	18.73	3.19	202.6
DOW	63.5	28.39	6.39	405.8

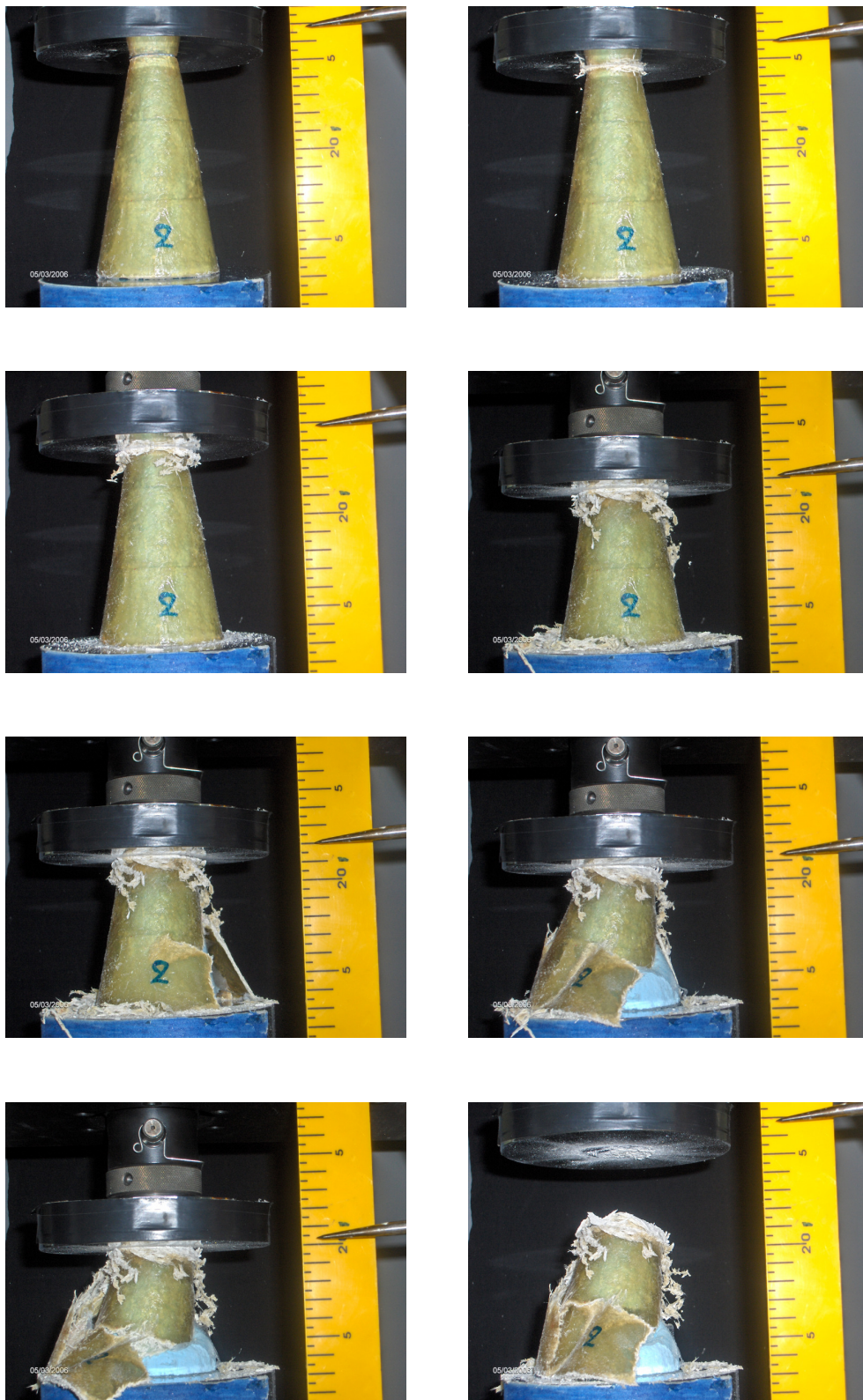
Ο τρόπος κατάρρευσης – ελικοειδής κατάρρευση - προδίδει πως δεν είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για συστήματα απορρόφησης ενέργειας. Ωστόσο ο αφρός DOW κατάφερε να βελτιώσει τη συμπεριφορά του ψαθυρού κελύφους και να διπλασιάσει

σχεδόν το μέσο φορτίο , ενώ, λόγω καλύτερης στήριξης του κελύφους, μπόρεσε να σηκώσει και αρκετά μεγαλύτερο μέγιστο φορτίο.

-2° Κέλυφος :

Το συγκεκριμένο κέλυφος έχει 2 στρώσεις υαλοϋφάσματος, έχει ύψος 141.6mm, πάνω διάμετρο 31.2mm και κάτω διάμετρο 80.5mm, πάχος υλικού 2,2mm. Η ημιγωνία του κώνου στην περίπτωση αυτή είναι 10°. Το κέλυφος περιέχει αφρό τύπου DOW.

Παρακάτω εμφανίζονται οι διαδοχικές εικόνες που προδίδουν τον τρόπο κατάρρευσης και το γράφημα φορτίου – μετατόπισης.



Σχήμα 4.5. Εικόνες από την κατάρρευση του δεύτερου δοκιμίου.

Sample ID: ERVT2



Crushing load	$P_{max} = 38.12 \text{KNt}$
Crush length	$\Delta l = 63.5 \text{mm}$
Mean post-crushing load	$P_a = 19.46 \text{KNt}$
Total energy absorbed	$W = 1235.7 \text{J}$

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα του δεύτερου δοκιμίου με τον αφρό, συγκριτικά με τα αποτελέσματα της ίδιας δοκιμής σε πανομοιότυπο δοκίμιο χωρίς αφρό.

ΤΥΠΟΣ ΑΦΡΟΥ	ΜΗΚΟΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ Δl (mm)	ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ P_{max} (KNt)	ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ P_a (KNt)	ΟΛΙΚΗ ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ W (J)
Χωρίς αφρό	63.5	23.67	11.48	728.9
DOW	63.5	38.12	19.46	1235.7

Στην περίπτωση αυτή ο τρόπος κατάρρευσης είναι σταθερός και σταδιακός και παρατηρούμε ότι έχουμε συνεχή θρυμματισμό του υλικού και δημιουργία «μανιταριού». Αυτό διαρκεί για αρκετό χρονικό διάστημα και η ενέργεια που απορροφάται είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με την περίπτωση του πρώτου δοκιμίου, παρόλο που το κέλυφος αυτό έχει δύο στρώσεις υαλοϋφασματος. Ο αφρός και στην περίπτωση αυτή είχε θετική επίδραση τόσο στην αύξηση του μέσου και μέγιστου φορτίου όσο και την συνολική απορροφούμενη ενέργεια.

-3° Κέλυφος :

Το συγκεκριμένο κέλυφος έχει 2 στρώσεις υαλοϋφάσματος. Το ύψος του είναι 151mm, η διάμετρος του πάνω κύκλου 29,8mm, η διάμετρος του κάτω κύκλου είναι 111,2mm και το πάχος του σύνθετου υλικού 2mm. Η ημιγωνία του κώνου είναι 15°. Το κέλυφος περιέχει αφρό τύπου DOW.

Παρακάτω εμφανίζονται οι διαδοχικές εικόνες που προδίδουν τον τρόπο κατάρρευσης και το γράφημα φορτίου – μετατόπισης :