

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ - ΜΕΛΕΤΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: ΜΟΥΡΟΥΤΣΟΣ Ε. ΗΛΙΑΣ


ΑΡ. ΜΗΤΡΩΟΥ: 08103627

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΑΙΜ. ΣΙΔΕΡΙΔΗΣ Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

E. Sideridis

Αιμίλιος Σιδερίδης
Έπικ. Καθ. ΕΜΠ

B. Kytopoulos
Κώστας Βίεωφ
Έπικ. Καθ. ΕΜΠ


Nikolaos Teodoridis
Αναγλ. Καθ. ΕΜΠ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη των ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών, με εφαρμογή στη ναυπηγική. Αφού πρωτίστως οριστούν οι έννοιες του συνθέτου υλικού, στη συνέχεια παρατίθενται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, που σχετίζονται με τη μηχανική συμπεριφορά των υλικών αυτών. Ακολούθως, επιχειρείται η ταξινόμηση των σύνθετων υλικών, ενώ γίνεται αναφορά και σε υλικά τύπου Sandwich.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας, περιγράφονται οι κυριότερες μέθοδοι μορφοποίησης σύνθετων υλικών, όπου γίνεται αναφορά τόσο σε απλοποιημένες αλλά και σε πλέον σύγχρονες αυτοματοποιημένες μεθόδους.

Στο τμήμα που ακολουθεί παρατίθεται ο γενικευμένος Νόμος του Hooke, η κλασική θεωρία των πολύστρωτων πλακών όπως και τα κριτήρια αστοχίας Tsai Hill και Tsai Wu, τα οποία αποτελούν εργαλεία για την μελέτη της συμπεριφοράς των υλικών αυτών.

Το τέταρτο κεφάλαιο αποτελεί το υπολογιστικό τμήμα της εργασίας, όπου εξετάζονται οι μηχανικές ιδιότητες σύνθετου υλικού αποτελούμενου από οκτώ στρώσεις, ενισχυμένου με ίνες γυαλιού, μέσω θεωρητικών και ημιεμπειρικών μεθόδων.

Ακολουθεί στο πέμπτο κεφάλαιο η παρουσίαση της πειραματικής διαδικασίας στην οποία υποβλήθησαν δοκίμια του υλικού, προκειμένου να ληφθούν οι πειραματικές μετρήσεις των ιδιοτήτων, ώστε να συγκριθούν με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη χρήση θεωρητικών μεθόδων και ημιεμπειρικών τύπων. Στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας εκτελέστηκε δοκιμή εφελκυσμού, καθώς και κάμψης τριών σημείων.

Η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με την καταγραφή συμπερασμάτων και παρατηρήσεων.

ABSTRACT

The continuous development of the technology and the needs which are determined from the section of constructions for the optimization of their efficiency as to the natural, mechanical properties of the materials as well as the need of fulfillment of pure economic criteria, such as the reduced construction cost, the reduced service costs, low weight have led to a revolution concerning the used materials.

These demands appear with an intense manner in the field of constructions, part of which constitutes the section of shipbuilding industry, a field which depends on various demands, that are partly in an interconflict. The particularity nature of the problem of the ship on the sea surface, essentially at the interface of the fluids water and air, forms a special challenge for the researchers, as they are called to face complex phenomena that are related with hydrodynamics and the dynamic strength of the constructions. The particularities of the problem are reinforced, if special conditions, such as the intensive corrosive environment in which the ship has to function as a construction, are taken under consideration.

In order to confront these difficulties there is a demand for collective effort of researchers of various fields which are related with the shipbuilding industry. An essential part of the effort for the optimization of the constructions are also called to play the materials that are used in them. The historical tracing back reveals that for the shipbuilding the material which are used were under continuous improvement as to the strength, the weight saving, the amelioration of the strength of the construction. The last decades it is observed that there is a tendency of the constructions for more "exotic" materials, initially in applications of the aeronautical nature, in specialized applications at the defense technology and elsewhere.

Κεφάλαιο 1

1.1 Εισαγωγή

Η διαρκής ανάπτυξη της τεχνολογίας και οι ανάγκες που υπαγορεύονται από τον τομέα των κατασκευών για βελτιστοποίηση της απόδοσης τους, όσον αφορά τις φυσικές, μηχανικές ιδιότητες των υλικών, καθώς και η ανάγκη εκπλήρωσης καθαρά οικονομοτεχνικών κριτηρίων, όπως το μειωμένο κόστος κατασκευής, τα μειωμένα κόστη συντήρησης, χαμηλό βάρος, έχουν οδηγήσει σε μια επανάσταση όσον αφορά στα χρησιμοποιούμενα υλικά.

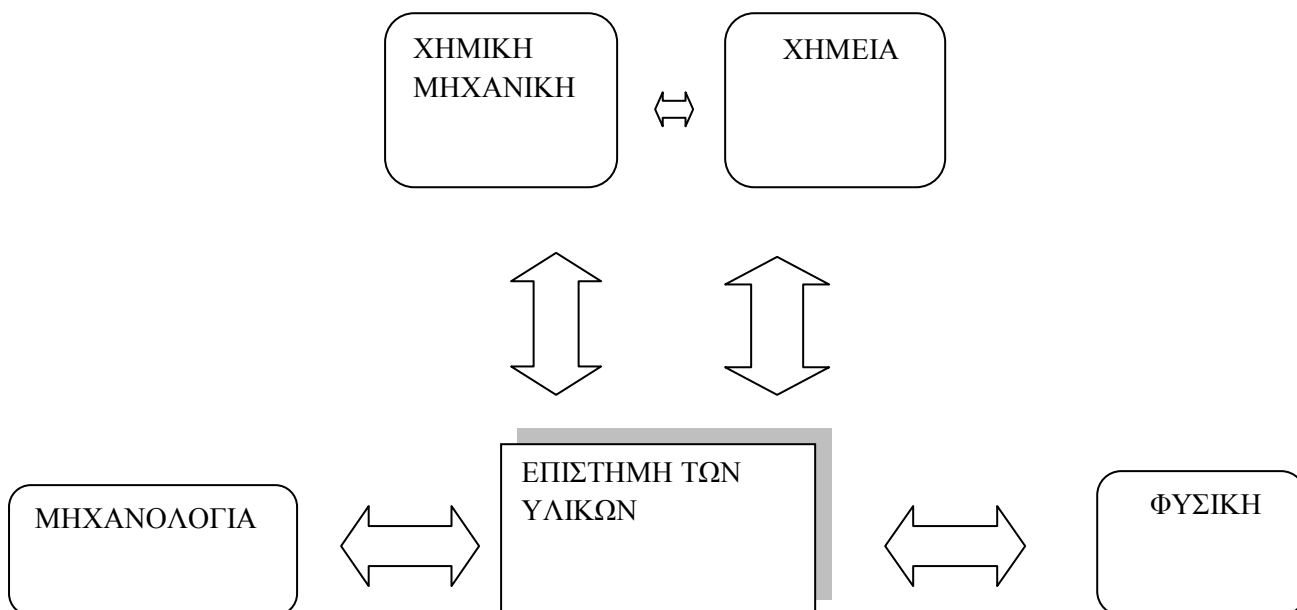
Οι απαιτήσεις αυτές εμφανίζονται με ιδιαίτερα έντονο τρόπο στον κλάδο των κατασκευών, μέρος του οποίου αποτελεί και ο τομέας της ναυπηγικής βιομηχανίας, ένας κλάδος ο οποίος διέπεται από πληθώρα απαιτήσεων, οι οποίες κατά μέρος αλληλοσυγκρούονται.

Η ιδιαιτερότητα της φύσης του προβλήματος της πλεύσης του πλοίου στην επιφάνεια της θάλασσας –ουσιαστικά στην διεπιφάνεια δύο ρευστών νερού και αέρα, αποτελεί για τους μελετητές ιδιαίτερη πρόκληση, καθώς καλούνται να αντιμετωπίσουν πολύπλοκα φαινόμενα που σχετίζονται με την υδροδυναμική και την δυναμική αντοχή των κατασκευών. Οι ιδιαιτερότητες του προβλήματος ενισχύονται, αν ληφθούν υπόψη και οι ιδιαίτερες συνθήκες όπως το έντονα διαβρωτικό περιβάλλον, στο οποίο καλείται να λειτουργήσει το πλοίο ως κατασκευή.

Προς την αντιμετώπιση των δυσκολιών αυτών απαιτείται συλλογική προσπάθεια πολλών μελετητών, διαφόρων κλάδων που σχετίζονται με την ναυπηγική βιομηχανία. Ουσιαστικό μέρος της προσπάθειας βελτιστοποίησης των κατασκευών, καλούνται να παίξουν και τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτές. Σχεδιαγραμματικά τα παραπάνω θα μπορούσαν να απεικονιστούν στο παρακάτω γράφημα.

Η ιστορική αναδρομή αποκαλύπτει πως διαρκώς για τη ναυπήγηση του πλοίου, το υλικό που χρησιμοποιείται, βελτιωνόταν από πλευράς αντοχής, εξοικονόμησης βάρους, βελτίωσης της αντοχής της κατασκευής κλπ. Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται στροφή των κατασκευών σε πιο "εξωτικά" υλικά, αρχικά σε εφαρμογές αεροναυπηγικής φύσεως, εξειδικευμένων εφαρμογών στην πολεμική τεχνολογία και αλλού.

Σχήμα 1.1 Σχηματική απεικόνιση διαφόρων κλάδων που σχετίζονται με την ναυπηγική βιομηχανία.



1.2 Σύνθετα υλικά

Η ανάγκη κάλυψης των ολοένα και αυξανόμενων απαιτήσεων επέφερε την ανάπτυξη και εφαρμογή των σύνθετων υλικών. Η ιδέα χρήσης «βελτιωμένων» υλικών δεν είναι σημερινή, αλλά ανάγεται από την εποχή της αρχαιότητας. Παράγοντες που επέτρεψαν την εδραίωση τους είναι η χρήση νέων α' υλών, η ανάπτυξη καινοτόμων τεχνικών, καθώς και η εκτεταμένη έρευνα που συντελείται στην επιστήμη των υλικών, όπως και σε αυτούς της μηχανολογίας και των κατασκευών.

Με τον όρο σύνθετα υλικά, εννοούνται υλικά τα οποία προκύπτουν από τον συνδυασμό δύο ή περισσότερων συνιστώντων υλικών, τα οποία εμφανίζουν διαφορετικές ιδιότητες ως προς τα συστατικά τους μέρη που συγκροτούν το σύνθετο υλικό. Οι συνιστώσες φάσεις είναι χημικά ανόμοιες και διαχωρίζονται με διακριτή επιφάνεια.

Λαμβάνοντας αυτές τις παραμέτρους δεν συμπεριλαμβάνονται στα σύνθετα υλικά, κράματα μετάλλων και κεραμικά υλικά των οποίων οι πολλαπλές φάσεις, σχηματίζονται ως αποτέλεσμα φυσικών φαινομένων. Ο στόχος για την ανάπτυξη ενός σύνθετου υλικού είναι η δημιουργία ενός νέου υλικού, το οποίο θα συνδυάζει τις βέλτιστες ιδιότητες των συστατικών μερών από τα οποία προέρχεται, καθώς και η ανάπτυξη νέων ιδιοτήτων οι οποίες δεν απαντώνται σε κάποιο εκ των συστατικών του.

Οι ιδιότητες ενός υλικού διακρίνονται στις μηχανικές και στις μη μηχανικές. Στην πρώτη κατηγορία συγκαταλέγονται ιδιότητες όπως:

- η ακαμψία,
- η ολκιμότητα,
- η αντοχή,
- η συμπεριφορά του υλικού σε κόπωση,
- η σκληρότητα,
- η συμπεριφορά του υλικού σε ερπυσμό, καθώς και άλλες.

Στις μη μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού συγκαταλέγονται ιδιότητες όπως:

- η πυκνότητα,
- η θερμική αγωγιμότητα,
- η συμπεριφορά του υλικού απέναντι στη διάβρωση,
- το κόστος επεξεργασίας και κατασκευής του υλικού όπως και πληθώρα άλλων.

Γίνεται αντιληπτό πως είναι πρακτικά αδύνατο ένα και μόνο σύνθετο υλικό να συνδυάζει το σύνολο των ιδιοτήτων που περιγράφηκαν προτύτερα. Αυτός είναι και ο λόγος όπου κάθε σύνθετο υλικό κατασκευάζεται έτσι, ώστε να έχει τις ιδιότητες εκείνες ανάλογα και με την χρήση στην οποία πρόκειται να βρει εφαρμογή.

1.3 Μηχανική συμπεριφορά στα σύνθετα υλικά

Ισοτροπικότητα Ανισοτροπικότητα στα σύνθετα υλικά.

Κύριο χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών είναι πως μπορούν να κατασκευαστούν ώστε να εμφανίζονται είτε ως ισότροπα υλικά είτε ως ανισότροπα. Η ιδιότητα αυτή συμβάλει στο να εμφανίζουν τα σύνθετα υλικά, διαφορετικά χαρακτηριστικά από τα υλικά που χρησιμοποιούνται κυρίως στις κατασκευές. Στο σημείο αυτό παρατίθενται ορισμένοι όροι σχετικοί με τις ιδιότητες που εμφανίζουν τα υλικά.

- **Ομοιογενές**, χαρακτηρίζεται ένα υλικό το οποίο παρουσιάζει τις ίδιες ιδιότητες σε όλη του την έκταση.

- **Ισότροπο**, είναι το υλικό του οποίου οι ιδιότητες είναι οι ίδιες σε κάθε διεύθυνση στο υπό εξέταση σημείο.

- **Ετερογενές**, είναι το υλικό του οποίου οι ιδιότητες διαφοροποιούνται συναρτήσει της θέσης η οποία εξετάζεται, οπότε και δεν εμφανίζει ομοιόμορφες ιδιότητες.

- **Ορθότροπο**, χαρακτηρίζεται ένα υλικό του οποίου οι ιδιότητες μεταβάλλονται συναρτήσει του προσανατολισμού στο εξεταζόμενο σημείο. Τα υλικά αυτά εμφανίζουν διαφορετικές ιδιότητες στις τρεις κάθετες μεταξύ τους κύριες διευθύνσεις.

- **Ανισότροπο**, είναι το υλικό του οποίου οι ιδιότητες διαφοροποιούνται συναρτήσει του προσανατολισμού. Οι ιδιότητες είναι διαφορετικές σε όλες τις διευθύνσεις στο υπό εξέταση σημείο, μη εμφανίζοντας επίπεδα συμμετρίας όπως στα ορθότροπα υλικά.

Η συμπεριφορά των υλικών ανάλογα με το αν αυτά είναι ισότροπα, ορθότροπα ή ανισότροπα υπό την επίδραση εφελκυστικών και διατμητικών τάσεων διαφοροποιείται, και οι επιδράσεις των επιβαλλόμενων τάσεων περιγράφονται στη συνέχεια καθώς και στο σχήμα που ακολουθεί.

Στα ισότροπα υλικά η επιβολή εφελκυστικού φορτίου προκαλεί επιμήκυνση κατά τη διεύθυνση που εφαρμόζεται και συστολή στην κάθετη προς αυτή διεύθυνση. Οι διατμητικές τάσεις έχουν ως αποτέλεσμα την προξένηση διατμητικής παραμόρφωσης μόνο.

Στα ορθότροπα υλικά οι τρεις κύριες διευθύνσεις ορίζονται ως οι τομές των τριών κάθετων μεταξύ τους επιπέδων συμμετρίας. Η εφαρμογή εφελκυστικής τάσης κατά τη μια κύρια διεύθυνση σε ένα ορθότροπο υλικό επιφέρει επιμήκυνση κατά τη διεύθυνση αυτή και συστολή στην κάθετη διεύθυνση ως προς αυτή. Λόγω όμως της ύπαρξης διαφορετικών ιδιοτήτων στις διευθύνσεις αυτές, η εμφανιζόμενη συστολή μπορεί να είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από αυτή που θα εμφανιζόταν σε ένα όμοια φορτισμένο ισότροπο υλικό με το ίδιο μέτρο ελαστικότητας κατά τη διεύθυνση της φόρτισης. Η εφαρμογή διατμητικών τάσεων προκαλεί διατμητική παραμόρφωση το μέγεθος της οποίας είναι ανεξάρτητο των διαφόρων μέτρων ελαστικότητας και λόγων του Poisson. Το μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση G , ενός ορθότροπου υλικού ανεξάρτητο των άλλων ιδιοτήτων του υλικού.

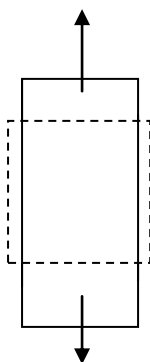
Στα ανισότροπα υλικά η εφαρμογή εφελκυστικού φορτίου έχει σαν αποτέλεσμα εκτός της επιμήκυνσης κατά τη διεύθυνση εφαρμογής και τη συστολή στην κάθετη προς αυτή διεύθυνση, την εμφάνιση διατμητικής παραμόρφωσης. Αντίστοιχα η εφαρμογή διατμητικών τάσεων σε ανισότροπα υλικά επιφέρει εκτός της διατμητικής παραμόρφωσης, επιμήκυνση και συστολή.

Η σχέση μεταξύ των δύο καταστάσεων φόρτισης και των δύο καταστάσεων παραμόρφωσης εμφανίζεται και στα ορθότροπα υλικά τα οποία υπόκεινται σε φόρτιση μη παράλληλη με τις τρεις κύριες διευθύνσεις.

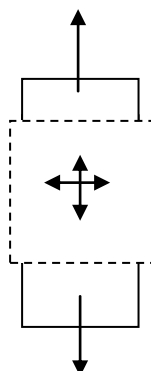
Σχήμα 1.2 Παραμόρφωση ενός ισότροπου, ενός ορθότροπου και ενός ανισότροπου υλικού που υπόκεινται σε μονοαξονικό εφελκυσμό και απλή διάτμηση.

Σε μονοαξονικό εφελκυσμό:

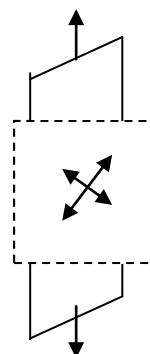
Ισότροπο υλικό



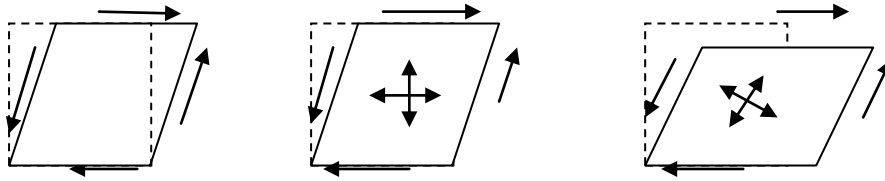
Ορθότροπο υλικό



Ανισότροπο υλικό



Σε διάτμηση:

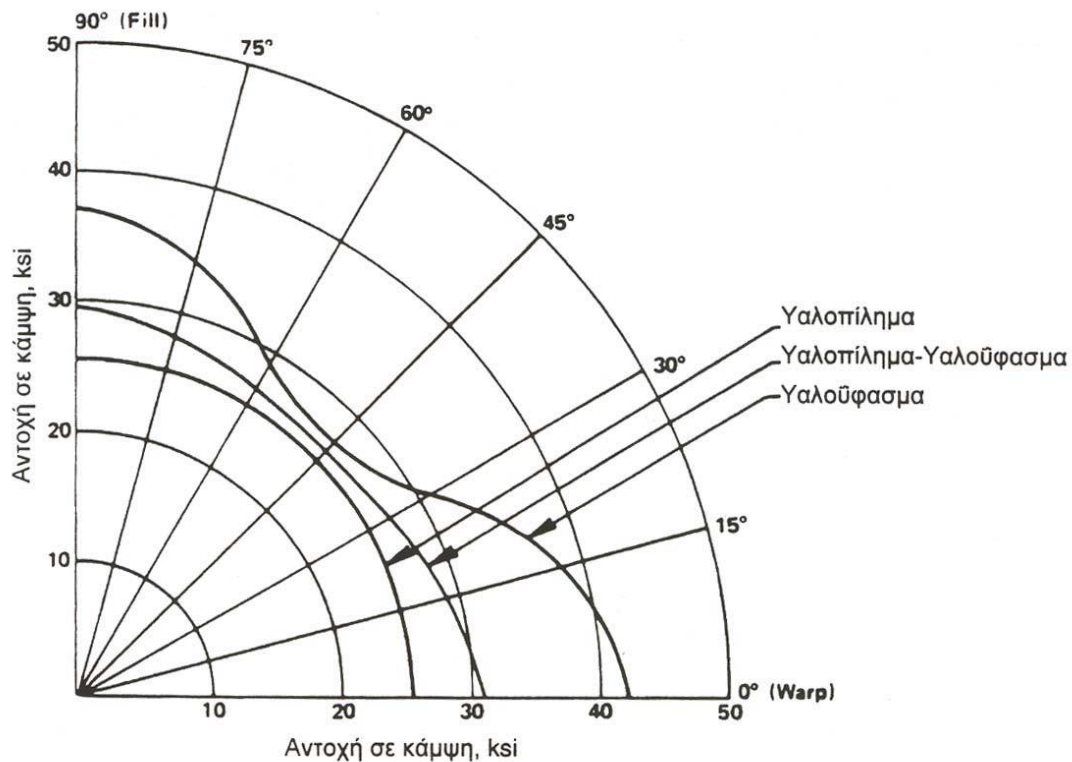


Τα πολύστρωτα τα οποία έχουν κατασκευαστεί εξ ολοκλήρου από υαλοπίλημα (C.S.M.) χαρακτηρίζονται ως ισότροπα υλικά, λόγω της άτακτης τοποθέτησης των μεμονωμένων ινών με τρόπο που χαρακτηρίζεται τυχαίως εντός της μήτρας που τις συγκρατεί.

Το υαλούφασμα (W.R.) όπως και το U.R. θεωρούνται ορθότροπα υλικά, γεγονός που οφείλεται στο διαφορετικό αριθμό και στη διαφορετική μορφή των ενισχυτικών ινών κατά τις δύο κύριες διευθύνσεις Warp και Fill.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται το πώς μεταβάλλεται συναρτήσει της γωνίας κατά τις δύο κύριες διευθύνσεις η αντοχή σε κάμψη για υαλοπίλημα (C.S.M.), για συνδυασμό υαλοπίλημα – υαλούφασμα, καθώς και για υαλούφασμα (W.R.).

Σχήμα 1.3 Μεταβολή της αντοχής ως συνάρτηση της γωνίας προσανατολισμού



Πηγή: Ναυπηγική τεχνολογία Β.Ι.Παπάζογλου

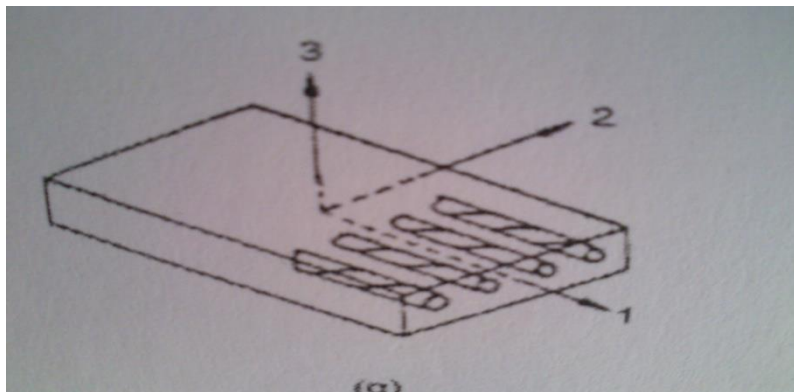
Στην περίπτωση των ενισχύσεων από υαλοπίλημα (C.S.M.), οι μηχανικές ιδιότητες παραμένουν αναλλοίωτες σε σχέση με τη γωνία ως προς τους κύριους άξονες οι οποίοι μπορούν να έχουν οποιαδήποτε διεύθυνση, μιας και το υλικό εμφανίζει ιδιότητες πρακτικά ιστροπικές.

Στην περίπτωση της ενίσχυσης υαλουφάσματος (WR), διαπιστώνει κανείς πως οι μηχανικές ιδιότητες είναι ελαφρώς αυξημένες παράλληλα με τον άξονα 1 (Warp), σε σχέση με την κάθετη σε αυτόν διεύθυνση 2 (Fill).

Σε ισοσταθμισμένα υαλουφάσματα η μείωση των ιδιοτήτων κατά τη διεύθυνση Fill ανέρχεται στο 20%, ενώ η αντοχή σε γωνία 45° από τις κύριες διευθύνσεις είναι κατά πολύ μικρότερη, γεγονός που αποδίδεται στην ορθοτροπικότητα που εμφανίζει το υλικό.

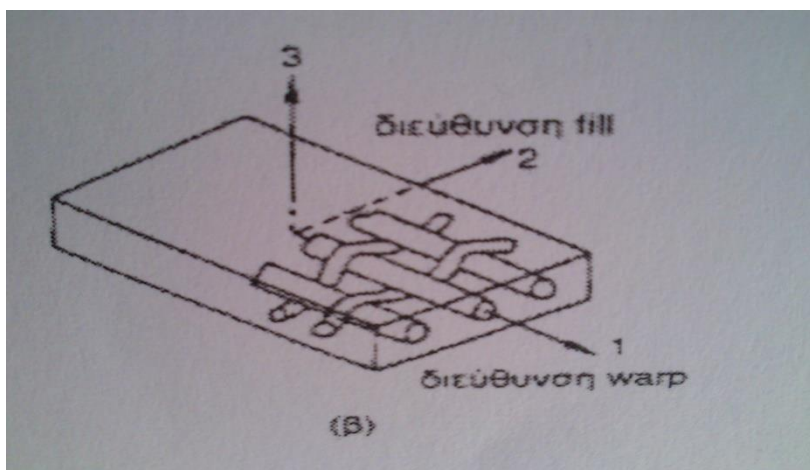
Η στρώση αποτελεί το βασικότερο στοιχείο όταν αναφερόμαστε σε σύνθετα υλικά. Η στρώση αποτελεί μια επίπεδη – αν και ορισμένες φορές ενδέχεται να είναι και καμπύλη – διαμόρφωση ενισχυτικών ινών σε μια μήτρα. Η κάθε στρώση χαρακτηρίζεται από τρεις κύριους άξονες, τους 1, 2, 3, οι οποίοι είναι κάθετοι μεταξύ τους.

Σχήμα 1.4.α Κύριοι άξονες σε στρώσεις με UD ενίσχυση



Πηγή: Ναυπηγική τεχνολογία Β.Ι.Παπάζογλου

Σχήμα 1.4.β Κύριοι άξονες σε στρώσεις με W.R. ενίσχυση

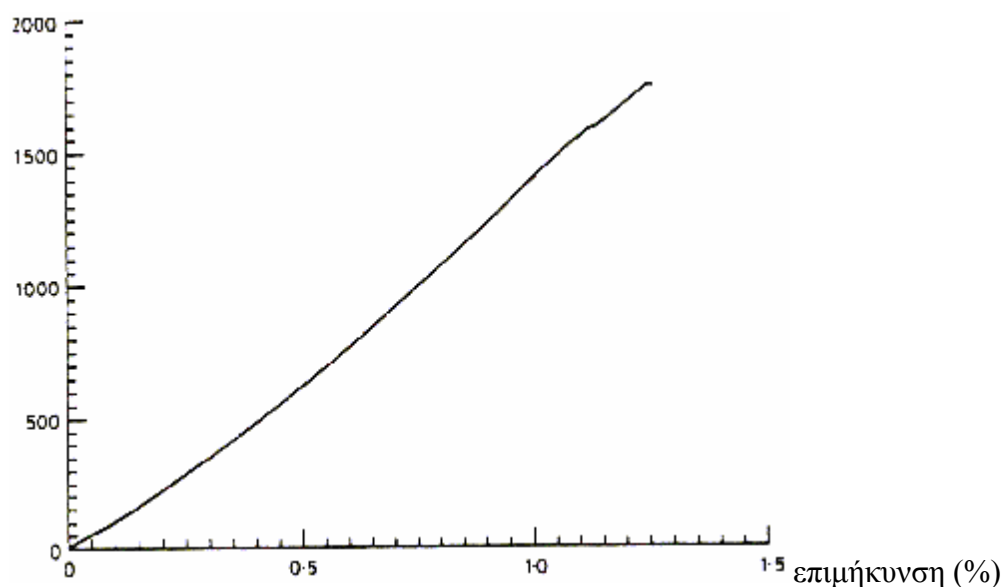


Πηγή: Ναυπηγική τεχνολογία Β.Ι.Παπάζογλου

Γενικά η μηχανική συμπεριφορά των σύνθετων υλικών διαφέρει από την αντίστοιχη συμβατικών ισοτροπικών υλικών, όπως π.χ. ο χάλυβας. Ο τρόπος αστοχίας τους είναι διαφορετικός. Όπου για παράδειγμα σε ένα πολύστρωτο υλικό, παρατηρείται αστοχία κάθε φορά και σε μία στρώση, προκαλώντας στα ενδιάμεσα στάδια αλλαγές στην αντοχή και στη δυσκαμψία, οδηγώντας τελικά σε καταστροφική αστοχία. Η συμπεριφορά γενικά θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ελαστική μέχρι τη θραύση, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα (σχ.5) όπου η καμπύλη τάσεων επιμηκύνσεων (σ - ϵ) μπορεί να θεωρηθεί γραμμική χωρίς σημαντικό σφάλμα.

Σχήμα 1.5 Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων μονοαξονικού σύνθετου υλικού.

Τάση (MPa)



Πηγή: Eckold 1994

1.3.1 Μήτρα σύνθετων υλικών

Αναφέρθηκε πρωτίτερα πως ο στόχος για την ανάπτυξη ενός σύνθετου υλικού είναι η δημιουργία ενός νέου υλικού, το οποίο θα συνδυάζει τις βέλτιστες ιδιότητες των συστατικών μερών από τα οποία προέρχεται, καθώς και η ανάπτυξη νέων ιδιοτήτων, οι οποίες δεν απαντώνται σε κάποιο εκ των συστατικών του. Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από την μήτρα και τις ενισχύσεις.

Ο ρόλος της μήτρας είναι πολλαπλός:

- Έχει συνδετικό ρόλο, ως συγκολλητική ουσία,
- Προστατεύει το έγκλεισμα από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες,
- Συνεισφέρει στις τελικές ιδιότητες του συνθέτου,
- Μεταφέρει το φορτίο μέσω της διεπιφάνειας στο έγκλεισμα,
- Ο τύπος της μήτρας καθορίζει και το βιομηχανικό εξοπλισμό που απαιτείται για την κατασκευή του σύνθετου υλικού.

1α. Ρητίνες

Οι ρητίνες διακρίνονται α) στις θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες και β) στις θερμοπλαστικές.

Το ρόλο της μήτρας στις ναυπηγικές κατασκευές καλούνται να παίξουν κυρίως οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες (thermosetting resins) που σκληραίνουν μόνιμα κατά τη διάρκεια του πολυμερισμού και σκλήρυνσής τους (curing). Τέτοιες είναι:

- οι φαινολικές (phenolic), οι οποίες επιδुकνεύουν υψηλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, όντας ιδανικές για πυρίμαχες εφαρμογές.
- οι εποξικές (epoxy), οι οποίες εμφανίζουν αυξημένες μηχανικές ιδιότητες, έχοντας όμως υψηλό κόστος.
- οι βινυλεστερικές (vinylester), καθώς και
- οι πολυεστερικές (polyester) ρητίνες, οι οποίες αποτελούν και τις πλέον χρησιμοποιούμενες στη ναυπηγική, λόγω της καλής συμπεριφοράς που επιδुकνύουν στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Επίσης, χρησιμοποιούνται και οι θερμοπλαστικές ρητίνες (thermoplastic resins), αλλά για εξειδικευμένα τμήματα των σκαφών, όπου δεν παρατηρούνται υψηλές θερμοκρασίες, στις οποίες έχουν την τάση να μαλακώνουν και να μορφοποιούνται.

Οι πολυεστερικές ρητίνες που είναι και οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες ρητίνες στη ναυπηγική, λόγω της ευκολίας χρήσης τους, του λογικού τους κόστους και της καλής τους συμπεριφοράς στο θαλάσσιο περιβάλλον, διατίθενται σε δύο τύπους:

- τους ορθοφθαλικούς πολυεστέρες που είναι πιο φθηνοί και χρησιμοποιούνται για μικρές κατασκευές κυρίως (βάρκες, μικρά ταχύπλοα), και

- τους ισοφθαλικούς πολυεστέρες που είναι πιο ακριβοί και έχουν καλύτερες ιδιότητες και αντοχή στο υδάτινο περιβάλλον.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται μερικές από τις ιδιότητες τις οποίες παρουσιάζουν οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες. (Smith-1990).

Πίνακας 1.3: Ιδιότητες θερμοσκληρυνόμενων ρητινών.

Ρητίνη	Πυκνότητα (g/cm ³)	E (GPa)	ν	σ _{ut} (MPa)	ε _t (%)	σ _{uc} (MPa)
Πολυεστερική (ορθοφθαλική)	1.23	3.2	0.36	65	2.0	130
Πολυεστερική (Ισοφθαλική)	1.21	3.6	0.36	60	2.5	130
Βινυλεστερική	1.12	3.4	---	83	5.0	120
Εποξική	1.20	3.0	0.37	85	5.0	130
Φαινολική	1.15	3.0	---	50	2.0	---

1.3.2 Ενισχύσεις

Ο ρόλος του εγκλείσματος είναι τελείως διαφορετικός. Κατ' αρχάς όταν το έγκλεισμα ενισχύει τις μακροσκοπικές ιδιότητες του συνθέτου τότε καλείται «ενισχυτικό» (reinforcement). Για παράδειγμα ίνες και κόκκοι με υψηλό μέτρο δυσκαμψίας όταν αναμιχθούν σε μία εποξική ρητίνη θα λειτουργήσουν ως ενισχυτικά μέσα, καθώς οι τελικές ιδιότητες του συνθέτου, όπως η δυσκαμψία και η αντοχή σε εφελκυσμό, θα αυξηθούν σημαντικά. Αυτό συμβαίνει γιατί το ενισχυτικό μέσο παραλαμβάνει δια μέσου της μήτρας το φορτίο. Η γεωμετρία του ενισχυτικού παίζει εξίσου καθοριστικό ρόλο.

Χαρακτηριστικά αναφέρονται οι ίνες, οι οποίες είναι εγκαρσώς ισότροπες, εμφανίζουν, δηλαδή, ανισοτροπία τόσο στις μηχανικές όσο και στις θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες. Αυτό σημαίνει ότι έχουν διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας, συντελεστή θερμικής διαστολής και διαφορετική αγωγιμότητα στη διαμήκη διεύθυνση της ίνας και στην εγκάρσια. Σε κάθε περίπτωση τα εγκλείσματα είναι αυτά που ουσιαστικά συμβάλουν στις τελικές ιδιότητες του συνθέτου, τις μηχανικές, ηλεκτρικές, μαγνητικές, θερμικές, οπτικές και άλλες ενώ παράλληλα καθορίζουν τη θραυστομηχανική συμπεριφορά του συνθέτου.

Οι ενισχυτικές ίνες συνεισφέρουν το μεγαλύτερο μέρος:

- της εφελκυστικής,
- της θλιπτικής,
- της καμπτικής και
- της διατμητικής δυσκαμψίας και αντοχής,

ενός ινώδους πολύστρωτου, από σύνθετα υλικά, αν και είναι ικανές να φέρουν μόνο εφελκυστικό φορτίο υπό μορφή νήματος μη εμποτισμένου σε ρητίνη. Επίσης, είναι υπεύθυνες για τη μετατροπή μιας ψαθυρής ρητίνης σε ανθεκτικό υλικό.

Υπάρχουν πολλών ειδών ίνες, κυριότερες από τις οποίες είναι οι ίνες άνθρακα και γραφίτη, οι ίνες aramid οι οποίες ανήκουν στις πολυμερείς ίνες και περιλαμβάνουν τον τύπο ινών Kevlar® 49 και Kevlar® 29 και τέλος οι ίνες γυαλιού τύπου S και E. Όλες οι προαναφερθείσες ίνες μπορούν να διατεθούν σε ποικίλες μορφές, όπως για παράδειγμα σε μεμονωμένα νήματα ή σε μορφή υφάσματος χωρίς πλέξη ή με διάφορες πλέξεις. Επίσης, τα υφάσματα διατίθενται και σε διάφορες τιμές επιφανειακού βάρους (gr/cm^2).

Επιπρόσθετα για την κάλυψη των διαφόρων αναγκών της κατασκευαστικής βιομηχανίας, παράγοντες όπως:

- ο αριθμός των ενισχυτικών ινών,
- το μήκος τους,
- η διάμετρος τους,

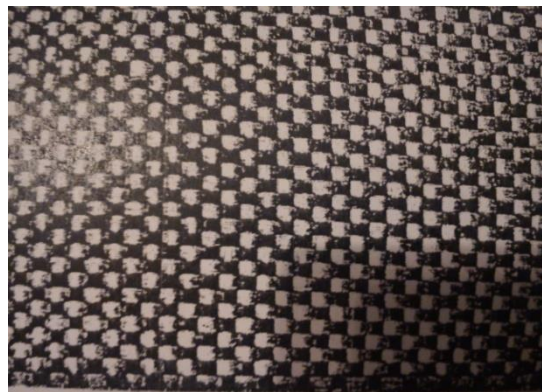
διαφοροποιούνται ώστε να είναι δυνατή η διάθεση υλικών με διαφορετικές ιδιότητες.

Ίνες γυαλιού

Πλήθος από διαφορετικές συνθέσεις γυαλιού χρησιμοποιούνται για συγκεκριμένες εφαρμογές. Ο **τύπος E** είναι ο πιο συνήθης τύπος γυαλιού που χρησιμοποιείται, έχει μεγάλη αντοχή, εμφανίζει καλές ηλεκτρικές ιδιότητες και δεν επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες. Οι **ίνες γυαλιού τύπου E** αποτελούν το είδος των ενισχύσεων που προτιμάται περισσότερο στην κατασκευή σκαφών. Αυτές διατίθενται σε διάφορες μορφές, με πιο συχνά χρησιμοποιούμενες:

- τη μορφή *υαλοπιλήματος* (Chopped Strand Mat, **CSM**) όπου οι ίνες είναι από νημάτια γυαλιού κομμένα σε μήκος 6 έως 50 mm τα οποία συνδέονται με τη βοήθεια ειδικού συνδετικού (binder) σχηματίζοντας ένα “χαλαρό ύφασμα” με τυχαίο προσανατολισμό ινών,
- τη μορφή *υαλοϋφάσματος* (Woven Roving, **WR**) κατασκευασμένο από μη στριμμένα νήματα πλεγμένα κάθετα μεταξύ τους δημιουργώντας ένα “τραχύ και χοντροκομμένο ύφασμα”, όπου τα νήματα εξαπλώνονται σε δύο κάθετες διευθύνσεις και η πλέξη τους χαρακτηρίζεται ως αραιή,
- και τέλος τη μορφή των *μονοαξονικών υφασμάτων* (Unidirectional Roving or Clothes, **UD**) κατασκευασμένα από παράλληλες ίνες που ράβονται ή συγκρατούνται παράλληλα μεταξύ τους με συνδετικό υλικό, προσανατολισμένες προς μία διεύθυνση.

Σχήμα 1.6 Υαλοϋφασμα WR (Woven Roving)



Ο **τύπος C** είναι ανθεκτικότερος στη χημική διάβρωση σε σύγκριση με τις ίνες γυαλιού τύπου E, αλλά εμφανίζει μικρότερη αντοχή, ενώ παρουσιάζει και αυξημένο κόστος.

Ο **τύπος S**, ο οποίος είναι ακριβότερος από τον τύπο E, αλλά εμφανίζει και υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας, ενώ παρουσιάζει και μεγάλη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες.

Η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας του γυαλιού καθορίζεται από την τρισδιάστατη δομή των οξειδίων από τα οποία αποτελείται, ενώ σημαντικό ρόλο παίζουν οι συνθήκες παραγωγής τους καθώς και οι βλάβες που υφίστανται οι ίνες κατά την παρασκευή τους. Για παράδειγμα, τα συνηθισμένα φύλλα υάλου θραύονται σε τάσεις μόνο μερικών δεκάδων MN/m^3 , ενώ ίνες υάλου δύνανται να έχουν αντοχή η οποία ανέρχεται από 2.76 GN/m^2 έως 4.83 GN/m^2 όταν αυτές διατίθενται στο εμπόριο, με όριο και μέχρι 6.89 GN/m^2 όταν αυτές έχουν παρασκευαστεί στο

εργαστήριο. Αυτό προφανώς δείχνει ότι η γεωμετρία μιας ίνας είναι αποφασιστικής σημασίας για τον υπολογισμό της αντοχής της ίνας και θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη στις σχετικές εφαρμογές.

Στον Πίνακα 1.4 που παρατίθεται, παρουσιάζονται μερικές τυπικές ιδιότητες για ορισμένους τύπους ενισχυτικών ιών. (Smith-1990).

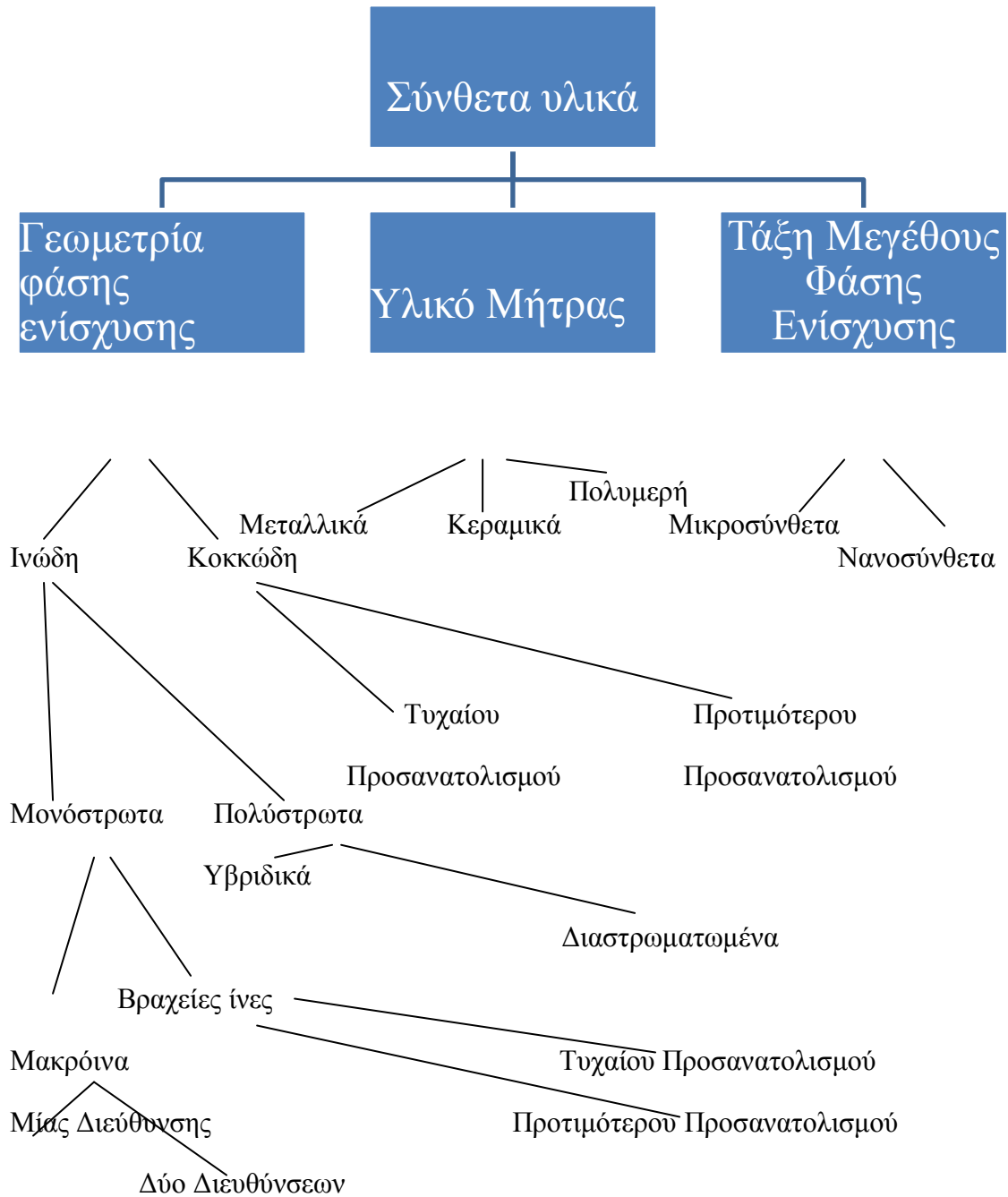
Πίνακας 1.4

Είδος ίνας	Πυκνότητ α (g/cm ³)	E (GPa)	. ν	σ_{ut} (MPa)	ϵ_t (%)
Γυαλί –E	2.55	72	0.2	2400	3.0
Γυαλί- S2, -R	2.50	88	0.2	3400	3.5
Άνθρακας υψηλής αντοχής (Thornell T-40)	1.74	297	---	4100	1.4
Άνθρακας υψηλής αντοχής (Thornell T-700)	1.81	248	---	4500	1.8
Άνθρακας υψηλής αντοχής (Fortafil F-5)	1.80	345	---	3100	0.9
Άνθρακας υψηλού Μέτρου Ελαστικότητας (P-75S)	2.00	520	---	2100	0.4
Άνθρακας υψηλού Μέτρου Ελαστικότητας (P-120)	2.18	826	---	2200	0.3
Aramid (Kevlar 49)	1.45	124	---	2800	2.5

1.4 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από την μήτρα και το έγκλεισμα (τις ενισχύσεις). Γενικά, η ταξινόμηση των σύνθετων υλικών γίνεται λαμβάνοντας υπόψιν τις ιδιότητες που παρουσιάζουν τόσο η μήτρα όσο και το έγκλεισμα.

Σχήμα 1.6 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών



Οι τρόποι ταξινόμησης των σύνθετων υλικών ποικίλουν ανάλογα με το κριτήριο που χρησιμοποιείται.

Στο προηγούμενο διάγραμμα η παρουσίαση της ταξινόμησης των σύνθετων υλικών, παρουσιάστηκε με βάση:

- το υλικό της μήτρας,
- τη γεωμετρία της φάσης ενίσχυσης,
- την τάξη μεγέθους της φάσης ενίσχυσης

1.4.1 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών ως προς τη μήτρα

Έτσι ως προς την μήτρα, τα σύνθετα υλικά είδαμε πως διακρίνονται σε:

- α) Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας (Polymer Matrix Composites, PMC's),
- β) Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας (Metal Matrix Composites, MMC's),
- γ) Σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας (Ceramic Matrix Composites, CMC's).

α) Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας (Polymer Matrix Composites, PMC's)

Η συγκεκριμένη κατηγορία υλικών είναι ίσως η δημοφιλέστερη στον τομέα συνθέτων υλικών, με πάρα πολλές εφαρμογές αλλά και πολλά υποσχόμενη για το μέλλον. Αυτό οφείλεται στον τύπο της μήτρας, η οποία είναι ένα πολυμερές. Τα πολυμερή αποτελούν μια πολύ ξεχωριστή κατηγορία υλικών και παρά το γεγονός ότι χρησιμοποιούνται ευρέως από τα μέσα του 20ου αιώνα για προϊόντα καθημερινής χρήσης, η επιστημονική μελέτη και έρευνα πάνω σε αυτά τα υλικά παρουσιάζει ανοδική πορεία καθώς προορίζονται για τεχνολογικά ανώτερες εφαρμογές.

Οι αναρίθμητοι τύποι συνθέτων υλικών πολυμερικής μήτρας είναι αποτέλεσμα της ποικιλίας των πολυμερών που ήδη υπάρχει σε συνδυασμό με τους διαφορετικούς τύπους ενίσχυσης.

β) Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας (Metal Matrix Composites, MMC's)

Τα υλικά αυτά αποτελούν μια σημαντική κατηγορία στον τομέα των συνθέτων υλικών. Κλασικά μέταλλα όπως το αλουμίνιο, το νικέλιο και το τιτάνιο χρησιμοποιούνται ως μήτρα προς ενίσχυση. Οι τύποι ενίσχυσης για μεταλλικές μήτρες περιορίζονται κυρίως σε κεραμικά υλικά μορφής κόκκων ή ινών.

Το βασικό πλεονέκτημα μιας μεταλλικής μήτρας έναντι μιας πολυμερικής είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε υψηλές θερμοκρασίες και συγκεκριμένα μεγαλύτερες από 300 °C, θερμοκρασία

στην οποία οι οργανικές μήτρες οξειδώνονται. Τα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας χρησιμοποιούνται, επίσης, για:

- τις πολύ καλές μηχανικές,
- θερμικές και
- ηλεκτρικές τους ιδιότητες.

Παράλληλα, μπορούν να υποστούν κατεργασίες με τις κλασικές μεθόδους και επιπρόσθετα να αποτελέσουν τμήμα μιας κατασκευής το οποίο θα ενωθεί με μια απλή συγκόλληση ή κόλληση.

Ωστόσο τα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας εμφανίζουν δύο βασικά μειονεκτήματα:

- την υψηλή πυκνότητα με αποτέλεσμα οι κατασκευές που προέρχονται από την χρήση σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας να εμφανίζουν αυξημένο βάρος,
- και η δυσκολία κατασκευής τους, που οδηγεί σε κατασκευές υψηλού κόστους.

Τέλος, στα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας μπορεί να προσαρτηθεί ένα μέρος των κραμάτων μετάλλων. Κράματα αλουμινίου (Al) και τιτανίου (Ti) με ευρύτατες εφαρμογές αποτελούν αντικείμενο εκτενούς έρευνας.

Στην πλειοψηφία τους, όμως, τα κράματα δεν ανήκουν στα σύνθετα υλικά, καθώς, σύμφωνα με τον ορισμό των συνθέτων υλικών η διεπιφάνεια εγκλείσματος – μήτρας πρέπει να εμφανίζει χημική σταθερότητα συναρτήσεως του χρόνου, κάτι που είναι δύσκολο να συμβεί στα κράματα μετάλλων. Ο λόγος είναι ότι στα κράματα τα εγκλείσματα ενώνονται κατά βάση χημικά με το μητρικό υλικό. Επιπρόσθετα, τα μέταλλα είναι πολύ ευαίσθητα στην οξείδωση κάτι που συμβάλλει στην χημική τροποποίηση της διεπιφάνειας.

Ένα παράδειγμα συνθέτου υλικού μεταλλικής μήτρας, που δεν αντιμετωπίζει το παραπάνω πρόβλημα, είναι το κράμα που θα προκύψει στην περίπτωση παρεμβολής μικτών μεταλλικών κρυστάλλων στο διάκενο του κρυσταλλικού πλέγματος του μετάλλου, που παίζει το ρόλο του μητρικού υλικού, χωρίς τη δημιουργία χημικών δεσμών στις διεπιφάνειες των κρυστάλλων. Φυσικά ο ορισμός του τι είναι σύνθετο υλικό δεν εξαιρεί τα κράματα από μία ξεχωριστή κατηγορία υλικών με εξαιρετικές ιδιότητες που βρίσκουν ολοένα και περισσότερες εφαρμογές.

γ) Σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας (Ceramic Matrix Composites, CMC's).

Ως κεραμικά ορίζονται όλα τα ανόργανα μη μεταλλικά υλικά τα οποία έχουν υποστεί θερμική κατεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες άνω των 1000 °C.

Γνωρίσματα των σύνθετων υλικών κεραμικής μήτρας είναι:

- πως πρόκειται για υλικά που παρουσιάζουν εξαιρετική δυσκαμψία,
- εμφανίζουν αυξημένη σκληρότητα,
- παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή σε θλίψη,
- εμφανίζουν πολύ μικρή αντοχή σε εφελκυσμό,
- έχουν χαμηλή πυκνότητα,
- παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά τόσο ως προς τις πυρίμαχες ιδιότητες τους, όσο και ως προς την αντιδιαβρωτική και αντιτριβική συμπεριφορά.

Το κύριο μειονέκτημα τους είναι ότι η μικροδομή τους επηρεάζει σημαντικά τη μακρομηχανική συμπεριφορά τους. Αποτέλεσμα αυτού είναι πως διαμέσου των ατελειών που μπορεί να υπάρχουν ή να δημιουργηθούν στο υλικό, όπως κενά ή μικρορωγμές, θα οδηγήσουν σε ταχεία διάδοση των ρωγμών όταν το υλικό θα υποστεί κάποια φόρτιση. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ως ενισχυτικά ίνες ή κόκκοι.

Το πλέον διαδεδομένο σύνθετο υλικό κεραμικής μήτρας είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα. Το σκυρόδεμα είναι από μόνο του ένα σύνθετο υλικό το οποίο περιέχει ανόργανα υλικά και συγκεκριμένα άμμο, χαλίκι, γαρμπίλι και σκύρα και προκύπτει όταν συνδυαστούν με τσιμεντοκονία και νερό. Το σκυρόδεμα χρησιμοποιείται κύρια σε κατασκευές, όχι ως αυτοτελές υλικό, αλλά ενισχυμένο με χαλύβδινες ράβδους. Έτσι προκύπτει το οπλισμένο σκυρόδεμα, το οποίο συνδυάζει την πολύ καλή αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος και την πολύ καλή αντοχή σε εφελκυσμό του χάλυβα.

Παραδοσιακά κεραμικά υλικά είναι ο πυλός, το τσιμέντο, η άργιλος και το γυαλί, υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως με πληθώρα εφαρμογών από την αρχαιότητα. Στις μέρες μας, υπάρχουν κεραμικά υλικά τα οποία χαρακτηρίζονται ως προηγμένα, λόγω του ότι παρουσιάζουν αξιοσημείωτες ηλεκτρικές, ηλεκτρονικές, οπτικές ή μαγνητικές ιδιότητες και προορίζονται για συγκεκριμένες εφαρμογές.

Ενδεικτικά αναφέρονται παρακάτω μερικά από τα προηγμένα κεραμικά υλικά:

- Οξειδία (Al_2O_3 , ZrO_2 , UO_2 , πυριτικά γυαλιά)
- Καρβίδια (B_4C , SiC , TiC , WC)
- Νιτρίδια (Si_3N_4 , TiN , AlN , BN)
- Βορίδια (ZrB_2 , TiB_2)
- Πυριτίδια ($MoSi_2$, $TiSi_2$)
- Φθορίδια (CaF_2 , LiF)

1.4.2 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών ως προς το έγκλεισμα

Υπάρχουν διάφοροι τύποι εγκλεισμάτων οι οποίοι διαφέρουν ως προς το σχήμα, το μέγεθος, καθώς επίσης και ως προς τον προσανατολισμό και τη φύση του χρησιμοποιούμενου εγκλείσματος στο σύνθετο υλικό. Αυτές οι διαφοροποιήσεις είναι που διαμορφώνουν και τις ιδιαιτερότητες των συνθέτων υλικών, όπως επίσης και η περιεκτικότητα των εγκλεισμάτων που απαντάται σε αυτά.

Ο απλούστερος τρόπος με τον οποίο μπορούν να ταξινομηθούν τα σύνθετα υλικά, στηρίζεται στο σχήμα των ενισχύσεων τους. Με βάση αυτό τον διαχωρισμό διακρίνονται σε:

- σύνθετα υλικά σωματιδίων (Particulate Composites),
- σε ινώδη σύνθετα υλικά (Fibrous Composites),
- σε πολύστρωτα σύνθετα υλικά (Laminated Composites).

Η κατηγοριοποίηση των σύνθετων υλικών ως προς το έγκλεισμα, αναλύεται στις παρακάτω παραγράφους:

A. Κοκκώδη σύνθετα υλικά

Τα κοκκώδη σύνθετα υλικά ή αλλιώς Σύνθετα υλικά σωματιδίων, με έγκλεισμα υπό μορφή κόκκων. Τα σύνθετα υλικά σωματιδίων αποτελούνται από σωματίδια ενός ή περισσοτέρων υλικών τοποθετημένα ατάκτως εντός της μήτρας. Σωματίδια θεωρούνται οι ενισχύσεις όπου όλες οι διαστάσεις τους είναι περίπου ίδιες.

Στα υλικά αυτά οι κόκκοι μπορεί να είναι μεταλλικοί ή μη όπως επίσης και η μήτρα μπορεί να εμφανίζει οποιασδήποτε από τις παρακάτω κατηγορίες. Το σχήμα, το

μέγεθος και το υλικό του κόκκου ποικίλουν με αποτέλεσμα να αποτελούν μια μεγάλη κατηγορία στον τομέα των συνθέτων υλικών.

Οι συνδυασμοί που προκύπτουν είναι οι ακόλουθοι:

- Υλικά μη μεταλλικού εγκλείσματος σε μη μεταλλική μήτρα.
- Υλικά μεταλλικού εγκλείσματος σε μη μεταλλική μήτρα.
- Υλικά μεταλλικού εγκλείσματος σε μεταλλική μήτρα.
- Υλικά μη μεταλλικού εγκλείσματος σε μεταλλική μήτρα.

i. Υλικά μη μεταλλικού εγκλείσματος σε μη μεταλλική μήτρα.

Παράδειγμα τέτοιου υλικού αποτελεί το σκυρόδεμα, του οποίου κόκκοι άμμου και πέτρας αποτελούν το μη μεταλλικό εγκλείσμα, ενώ η μήτρα του εν λόγω σύνθετου είναι τσιμέντο με νερό.

ii. Υλικά μεταλλικού εγκλείσματος σε μη μεταλλική μήτρα.

Σύνθετα υλικά αυτού του είδους χρησιμοποιούνται λόγω της αυξημένης θερμικής αγωγιμότητας που παρουσιάζουν καθώς και της αύξησης του συντελεστή θερμικής διαστολής. Τα υλικά αυτά άγουν την θερμότητα ενώ παράλληλα αποτελούν και καλούς αγωγούς του ηλεκτρισμού. Παράδειγμα τέτοιου υλικού αποτελεί σκόνη χαλκού σε εποξειδική ρητίνη.

iii. Υλικά μεταλλικού εγκλείσματος σε μεταλλική μήτρα.

Το μεταλλικό εγκλείσμα υπό μορφή κόκκων βρίσκεται εντός μεταλλικής μήτρας, όχι όμως διαλυμένο εντός αυτής, ώστε να μπορεί να χαρακτηριστεί ως κράμα.

Μέταλλα τα οποία εμφανίζουν χρήσιμες ιδιότητες, αλλά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος χαρακτηρίζονται από την εύθραυστη συμπεριφορά την οποία επιδυνκνείουν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως το κοκκώδες εγκλείσμα σε μήτρα άλλων μετάλλων που παρουσιάζουν όλκιμη συμπεριφορά σε αντίστοιχες θερμοκρασίες. Το αποτέλεσμα είναι με τον τρόπο αυτό να παραχθεί ένα σύνθετο υλικό όλκιμο, το οποίο θα διατηρεί και τις ιδιότητες του εγκλείσματος.

iv. Υλικά μη μεταλλικού εγκλείσματος σε μεταλλική μήτρα.

Τα σύνθετα υλικά που προκύπτουν με τον τρόπο αυτό ονομάζονται κεραμομέταλλα και διακρίνονται σε δύο είδη ανάλογα με το εγκλείσμα.

- αν το κοκκώδες εγκλείσμα προέρχεται από οξειδία ενός μετάλλου,
- αν το κοκκώδες εγκλείσμα είναι από καρβίδια ενός μετάλλου.

Τα σύνθετα κεραμομέταλλα της πρώτης υποκατηγορίας χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου παρατηρούνται υψηλές θερμοκρασίες, όπου η αντίσταση στη διάβρωση αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην επιλογή ενός υλικού. Το δεύτερο είδος των κεραμομετάλλων λόγω της αυξημένης σκληρότητας που εμφανίζει και της αντοχής σε οξείδωση (π.χ. καρβίδιο του χρωμίου σε μήτρα κοβαλτίου), βρίσκει εφαρμογή σε μηχανολογικές εγκαταστάσεις όπως βαλβίδες, μέρη στροβιλομηχανών.

B. Πολύστρωτα σύνθετα υλικά.

Στα σύνθετα αυτά υλικά το έγκλεισμα αλλά και η μήτρα είναι υπό μορφή φύλλων. Τα πολύστρωτα σύνθετα υλικά, όπως αυτά ονομάζονται, αποτελούνται από στρώσεις δύο τουλάχιστον διαφορετικών υλικών (ή και ενός, αλλά με διαφορετικούς προσανατολισμούς), οι οποίες συνδέονται (κολλιούνται μεταξύ τους). Οι στρώσεις από τις οποίες αποτελείται το πολύστρωτο είναι μία επίπεδη ή με καμπυλότητα διάταξη ενισχυτικών ινών, διαποτισμένη με το υλικό της μήτρας, τη ρητίνη. Η διεύθυνση που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αντοχή λόγω των περισσοτέρων ενισχυτικών ινών ονομάζεται στημόνι (Warp) και η κάθετη σε αυτή γέμιση (Fill).

Τα πολύστρωτα σύνθετα υλικά, ιδίως αυτά που αποτελούνται από επάλληλες στρώσεις ινωδών σύνθετων υλικών, είναι αυτά που χρησιμοποιούνται ευρέως στη ναυπηγική βιομηχανία. Τα κυριότερα είδη αυτής της κατηγορίας παρουσιάζονται ακολούθως:

- i. Διμέταλλα
- ii. Επιμεταλλωμένα μέταλλα
- iii. Ύαλος ασφαλείας
- iv. Υλικά με επίστρωση πλαστικού

Διμέταλλα

Τα διμέταλλα αποτελούνται από φύλλα δύο μετάλλων συνδεδεμένα, τα οποία παρουσιάζουν σημαντική διαφορά ως προς τους συντελεστές θερμικής διαστολής τους. Η ιδιότητα αυτή, τα καθιστά ικανά να κάμπτονται κατά ένα καθορισμένο τρόπο σε αλλαγή θερμοκρασίας, ενώ σε αυτή βασίζονται και οι εφαρμογές τους ως θερμοστάτες, διακόπτες.

Επιμεταλλωμένα μέταλλα

Με την επιμετάλλωση ενός μετάλλου επιτυγχάνεται η δημιουργία ενός σύνθετου υλικού το οποίο συνδυάζει τις καλύτερες ιδιότητες και από τα δύο υλικά.

Ύαλος ασφαλείας

Η ύαλος ασφαλείας αποτελείται από διαδοχικές στρώσεις ενός υλικού που ονομάζεται polyvinyl butrual ανάμεσα σε στρώσεις συνήθους υάλου. Ο λόγος δημιουργίας της οφείλεται στο ότι το πολυβινύλιο είναι εξαιρετικά εύκαμπτο, μειώνοντας την ψαθυρότητα της συνήθους υάλου η οποία είναι αρκετά ανθεκτική αλλά εύθραυστη. Το αποτέλεσμα είναι η βελτίωση της ανθεκτικότητας της όλης κατασκευής.

Υλικά με επίστρωση πλαστικού

Αρκετά είναι τα υλικά εκείνα που αφού διαβραχούν με διάφορα πλαστικά αποκτούν ιδιότητες που τα καθιστούν αναγκαία σε ειδικούς σκοπούς. Παραδείγματα τέτοιων υλικών αποτελεί γυαλί που αν διαβραχεί με ρητίνες προκύπτουν ανθεκτικά υλικά σε κρούση με υψηλή σκληρότητα και χαμηλό βάρος.

Γ. Ινώδη σύνθετα υλικά

Τα σύνθετα υλικά με έγκλεισμα υπό μορφή ινών, αλλιώς ονομάζονται ινώδη σύνθετα υλικά, αποτελούνται έγκλεισμα υπό μορφή ινών μέσα σε ένα υλικό, τη μήτρα (matrix). Εντός της μήτρας στην οποία βρίσκονται οι ίνες ενός άλλου υλικού, οι οποίες μπορεί να είναι κατανεμημένες είτε:

- i). ατάκτως,
- ii). με ορισμένο προσανατολισμό.

Οι ίνες δεν έχουν καμία χρησιμότητα αν δεν έχουν ενσωματωθεί κατάλληλα εντός της μήτρας του σύνθετου υλικού. Στην περίπτωση αυτή ο ρόλος της μήτρας είναι να σταθεροποιεί, να υποστηρίζει και να προστατεύει από το περιβάλλον τις ίνες, καθώς επίσης να μεταφέρει τις τάσεις μεταξύ των ινών και να τις διασκορπίζει σε μεγαλύτερη περιοχή. Τα χρησιμοποιούμενα υλικά ως μήτρες παρουσιάζουν συνήθως μικρότερες τιμές όσον αφορά στην πυκνότητα, στην αντοχή και την ακαμψία σε σχέση με τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τις ενισχυτικές ίνες.

Όπως και στα κοκκώδη σύνθετα υλικά, η μήτρα ενός ινώδους συνθέτου υλικού μπορεί να είναι πολυμερική, μεταλλική είτε κεραμική. Η πλέον συνηθισμένη εμπορική μορφή ενός ινώδους υλικού είναι το πολύστρωτο σύνθετο, στο οποίο η στρωμάτωση μπορεί να έχει επίπεδη ή καμπύλη μορφή.

Ίνες διαφόρων υλικών έχουν βρεθεί να είναι πλέον άκαμπτες και ανθεκτικές από τα αντίστοιχα υλικά στη συνήθη μορφή τους. Το παράδοξο αυτό μιας ίνας, η οποία έχει διαφορετικές ιδιότητες από αυτές τις οποίες έχει το υλικό όταν δεν είναι διαμορφωμένο σε μορφή ίνας οφείλεται στην πλέον τέλεια δομή της ίνας. Έτσι, εντός της ίνας οι κρύσταλλοι του υλικού είναι ευθυγραμμισμένοι κατά τον διαμήκη άξονα της ίνας, επιπλέον υπάρχουν λιγότερες εσωτερικές ατέλειες στην ίνα εν σχέσει με αυτές οι οποίες υπάρχουν στο ίδιο υλικό το οποίο έχει άλλη τυχαία διαμόρφωση.

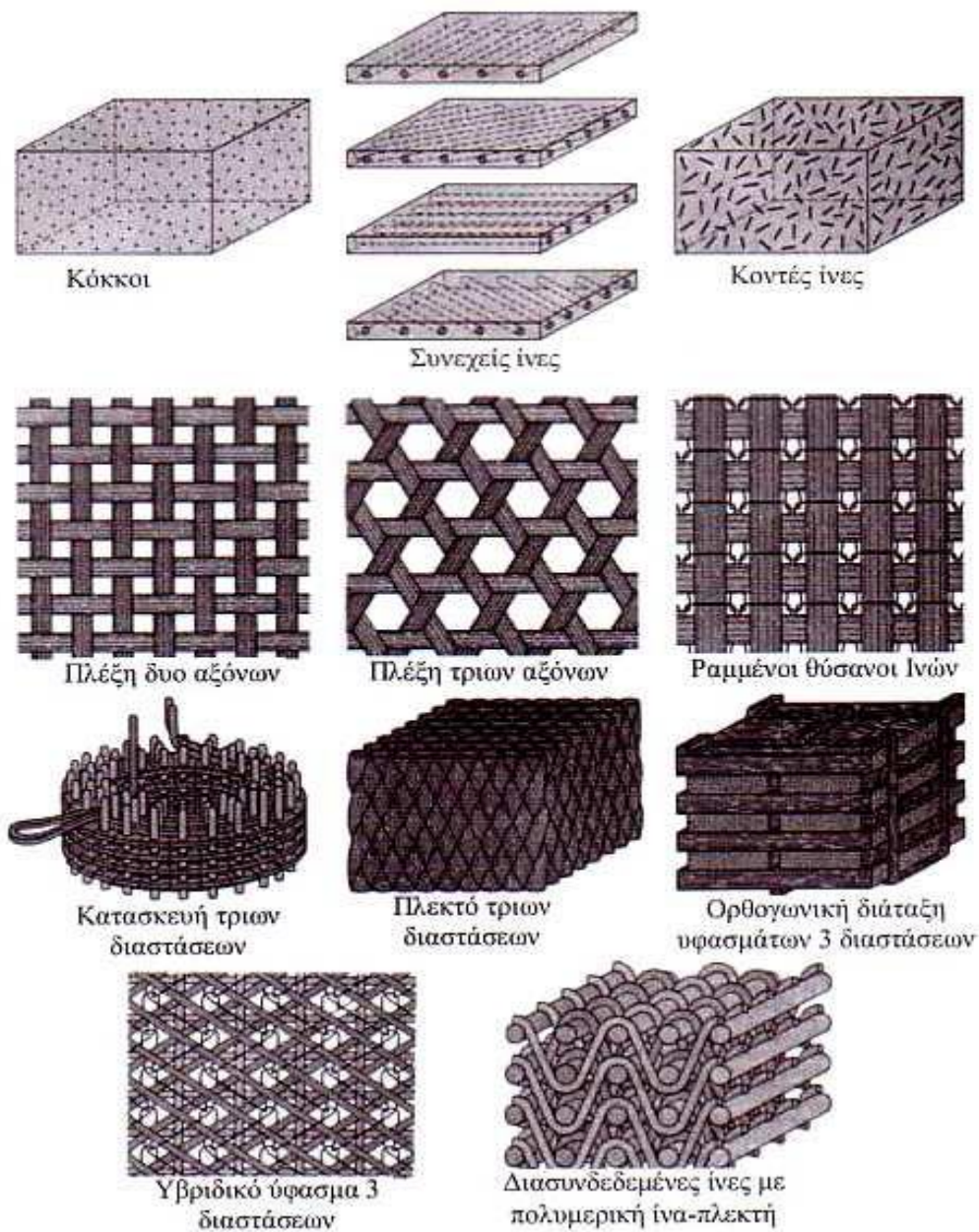
Η διακριτοποίηση των ινώδων σύνθετων υλικών όσον αφορά τις ίνες έχει ως εξής: Οι ίνες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τον λόγο του μήκους ως προς τη διάμετρο τους (l/d).

α). στις βραχείες ή ασυνεχείς, για λόγο μήκους ως προς τη διάμετρο μικρότερο του 100 ($l/d \leq 100$),

β). και μακριές ή συνεχείς, όταν ο λόγος μήκους ως προς τη διάμετρο υπερβαίνει το 100 ($l/d \geq 100$).

Πέρα από το λόγο του μήκους ως προς τη διάμετρο της ίνας, ο προσανατολισμός και η διάταξη των ινών παίζει καθοριστικό ρόλο στις ιδιότητες των συνθέτων και βάσει αυτών διακριτοποιούνται σε μονοδιευθυντικά και πολυδιευθυντικά. Τα πολυδιευθυντικά μπορεί να είναι σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης και με ίνες σε πλέξη ύφανσης δύο ή τριών διαστάσεων. Στην εικόνα 1.1 παρατίθενται διάφοροι τύποι ινώδων ενισχύσεων που παρατηρούνται στα σύνθετα υλικά.

Εικόνα 1.7 Διάφοροι τύποι ινωδών ενισχύσεων συνθέτων υλικών



Πηγή: Ναυπηγική Τεχνολογία, Β.Ι.Παπάζογλου

Στο εμπόριο υπάρχει μια σειρά από ίνες, μερικές εκ των οποίων παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1.1**. Οι πλέον διαδεδομένες είναι οι ίνες άνθρακα, γυαλιού και Kevlar, καθότι βρίσκουν πολύ μεγάλη εφαρμογή στις κατασκευές. Ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζονται υπάρχουν, όπως φαίνεται και στον πίνακα, ίνες του ίδιου υλικού αλλά διαφορετικού τύπου, με διαφορετικές ιδιότητες.

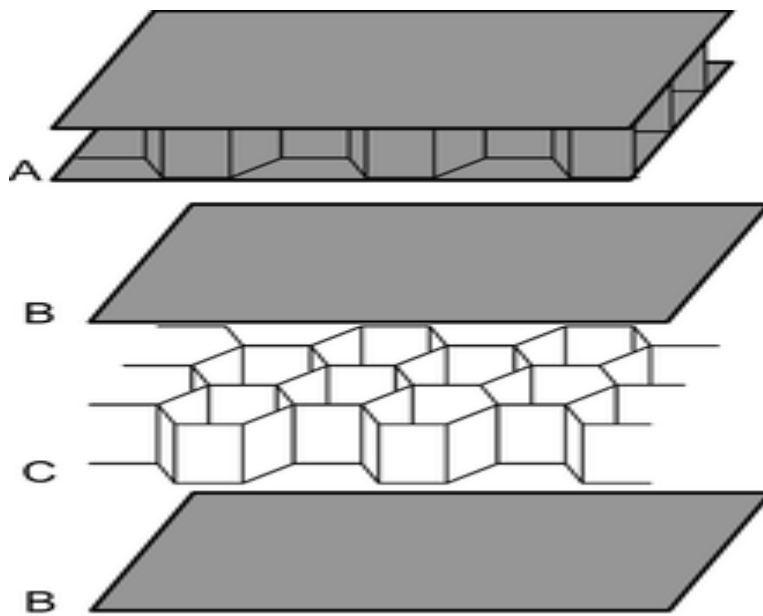
Πίνακας 1.1 Μηχανικές και Φυσικές Ιδιότητες Ινών

	Μέτρο Ελαστικό τητας (GPa)	Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	Πυκνότητα (g/cm ³)	Θερμοκρασία τήξης (°C)	Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)
Ανόργανα					
Γυαλί					
E glass	75	2100-3400	2.54	900-1200	550
C glass	80	2500-4400	2.50	1400-1600	650
S-glass	84	2800-4800	2.48	1400-1600	650
SiO ₂ (χαλαζιάς)	72	3500-4500	2.20	1720	1100
Αμιάντος	200	2400	2.50	---	---
Άνθρακας					
High Modulus	350-420	1900-2300	1.90	---	2500
High Strength	180-230	2500-3400	1.80	---	200
Graphite	250	1700	1.38	---	---
Κεραμικά					
SiC	480	2300	3.20	---	900
Al ₂ O ₃ (Αλουμίνα)	500	2000	4.00	---	800
Μέταλλα					
Χάλυβας	210	3100	7.80		
Τιτάνιο	115	1900	4.61		
Αργίλιο	73	620	2.63		
Βηρύλλιο	300	1700	1.82		
Βόριο (αμέταλλο)	400	3400	2.52		
Οργανικά					
Πολυμερή					
Kevlar-29	60	2700	1.45	---	200
Kevlar-49	130	3600	1.45	---	200
Kevlar-149	180	3400	1.45	---	
PE	119-270	2600-3200			

1.5 Κατασκευές τύπου Sandwich

Οι κατασκευές τύπου sandwich ονομάζονται έτσι λόγω του σχήματος τους. Δύο λεπτά, άκαμπτα και δυνατά περιβλήματα αποτελούν τις εξωτερικές επιφάνειες του υλικού που διαχωρίζονται από πυρήνα ο οποίος είναι κατασκευασμένος από ελαφρύ υλικό, το οποίο διαθέτει μεγάλο πάχος σε σύγκριση με τα εξωτερικά φύλλα. Τα περιβλήματα είναι συνδεδεμένα με τον πυρήνα, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η μεταφορά του φορτίου μεταξύ των συστατικών μερών. Το υλικό στο εσωτερικό του πυρήνα δεν παρουσιάζει καλές μηχανικές ιδιότητες ούτε ιδιαίτερη αντοχή στο σύνολο των φορτίσεων παρά μόνο στις θλιπτικές.

Σχήμα 1.8 (Α) Υλικό τύπου sandwich, (Β) Συστατικά του φύλλα, (C) Κυψελοειδής πυρήνας



Ο σκοπός για τον οποίο κατασκευάζονται τα υλικά τύπου sandwich είναι πως προσδίδουν αυξημένη ακαμψία λόγω του αυξημένου πάχους τους ενώ ταυτόχρονα το βάρος της όλης κατασκευής αυξάνει σε μικρό βαθμό. Τα υλικά τύπου Sandwich λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο όπως και οι μορφοδοκοί I, επιτυγχάνοντας καλύτερη συμπεριφορά έναντι των εξωτερικών φορτίων, τοποθετώντας το υλικό μακριά από τον ουδέτερο άξονα. Η δομή των κατασκευών τύπου sandwich είναι τέτοια που επιτρέπει στα περιβλήματα του υλικού να παραλαμβάνουν τα καμπτικά φορτία ενώ ο πυρήνας να παραλαμβάνει τα θλιπτικά και τα διατμητικά και να τα μεταφέρει στις στηρίξεις.

Η διαφορά με τους μορφοδοκούς I έγκειται στο γεγονός ότι ο πυρήνας των κατασκευών τύπου Sandwich είναι από διαφορετικό υλικό από ότι τα περιβλήματα και απλώνεται σε όλο το μήκος λαμβάνοντας το ρόλο της στήριξης των περιβλημάτων, αντί να συγκεντρώνεται σε ένα στενό κορμό. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην ομοιόμορφη κατανομή των διατμητικών τάσεων κατά το πάχος του υλικού του πυρήνα.

Κάτω από την εφαρμογή καμπτικής φόρτισης οι πλάκες τύπου sandwich αναπτύσσουν μεγάλες διατμητικές δυνάμεις ολίσθησης στην περιοχή του δεσμού μεταξύ των περιβλημάτων και του πυρήνα. Είναι αναγκαίο ο δεσμός αυτός να είναι αρκετά δυνατός, ώστε να αντέχει αυτές τις δυνάμεις απόσχισης που εμφανίζονται, διότι τυχών θραύση του δεσμού, οδηγεί τα υλικά να συμπεριφέρονται ως ανεξάρτητα μεταξύ τους, μειώνοντας την αντοχή και την ακαμψία της κατασκευής, έχοντας ως συνέπεια την κακή λειτουργία της όλης κατασκευής.

Για την αποφυγή τέτοιων αστοχιών πολλές φορές χρησιμοποιούνται ενθέματα υψηλής ακαμψίας (inserts) στον πυρήνα. Ως ενθέματα μπορεί να χρησιμοποιηθούν υλικά όπως το ξύλο κοντραπλακέ (Plywood), το αλουμίνιο (Aluminium), χάλυβας (Steel) ή άλλο μέταλλο ή έστω και αφρός μεγαλύτερης πυκνότητας από αυτόν του κανονικού πυρήνα. Ο σημαντικότερος λόγος εισαγωγής ενός ενθέματος στον πυρήνα είναι η διευκόλυνση της μεταφοράς των ορθών και διατμητικών τάσεων κατά τη διεύθυνση του πάχους, χωρίς την κατάρρευση της κατασκευής τύπου sandwich.

Η ύπαρξη του δεσμού ανάμεσα στα υλικά του πυρήνα και των περιβλημάτων, καθώς και τα πρόσθετα μέτρα που πρέπει να ληφθούν ώστε να επιτευχθεί καλή σύνδεση, μέσω των κατάλληλων κολλητικών ουσιών (adhesives), καθιστούν την κατασκευή από πλάκες τύπου sandwich πιο δύσκολη από μία αντίστοιχη με ενισχυμένα πολύστρωτα.

Παρόλα αυτά όμως μια κατασκευή με πλάκες τύπου sandwich έχει μικρότερο βάρος και θα καταλαμβάνει μικρότερο όγκο από μία αντίστοιχη με πολύστρωτα υλικά λόγω της αναγκαίας ύπαρξης, στη δεύτερη περίπτωση, των ενισχυτικών νομέων. Για αυτό το λόγο οι κατασκευές τύπου sandwich βρίσκουν εφαρμογή σε κατασκευές όπου απαιτούνται υψηλοί λόγοι αντοχής ως προς το βάρος, όσο και της ακαμψίας ως προς το βάρος όπως σε κατασκευή καταστρωμάτων φρακτών, διαχωριστικών στους χώρους ενδιαιτήσης κλπ.

1.5.1 Υλικά κατασκευών τύπου Sandwich

Η σχεδίαση κατασκευών τύπου Sandwich αποτελεί πρόβλημα επιλογής κατάλληλων υλικών, όσο και πρόβλημα διαστασιολόγησης της κατασκευής. Ο μεγάλος αριθμός επιλογής από υλικά που υπάρχουν διαθέσιμα για τον πυρήνα, όσο και για τα εξωτερικά περιβλήματα καθώς και για τις κολλητικές ουσίες που χρησιμοποιούνται για τον δεσμό των παραπάνω, αποτελεί το κυριότερο πλεονέκτημα των κατασκευών αυτού του τύπου. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές τύπου Sandwich δεν επιλέγονται με βάση μόνο τις μηχανικές τους ιδιότητες αλλά συνυπολογίζονται και παράγοντες που σχετίζονται με:

- τις συνθήκες που καλείται να εργαστεί η συγκεκριμένη κατασκευή,
- το ζητούμενο τελικό φινίρισμα,
- τη κατασκευαστική διαδικασία που θα ακολουθηθεί.

1.5.2 Υλικά Περιβλήματος

Τα χρησιμοποιούμενα υλικά για το περίβλημα μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- στα μεταλλικά υλικά, όπως ο χάλυβας, ο ανοξείδωτος χάλυβας και κράματα αλουμινίου.
- στα μη-μεταλλικά υλικά, όπως το κόντρα πλακέ, τσιμέντο, ενισχυμένα πλαστικά, ινώδη σύνθετα υλικά.

Η πιο σημαντική από τις κατηγορίες υλικών είναι τα ινώδη σύνθετα υλικά, τα οποία βοήθησαν στην επέκταση της χρήσης των κατασκευών τύπου Sandwich. Αυτό συνέβη διότι πολλά σύνθετα υλικά παρουσιάζουν αντοχές παρόμοιες ή και μεγαλύτερες αυτών των μεταλλικών υλικών, αλλά με δυσκαμψία σημαντικά μικρότερη. Επιπλέον η διαμόρφωση των σύνθετων υλικών για το περίβλημα είναι πιο εύκολη από ότι στα μεταλλικά υλικά. Βασικότερο χαρακτηριστικό τους όμως είναι η ανισοτροπικότητα, με αποτέλεσμα να έχουν διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες σε διαφορετικές μεταξύ τους διευθύνσεις, γεγονός το οποίο προσφέρει το πλεονέκτημα της τοποθέτησης της διεύθυνσης με τις υψηλές ιδιότητες, στη διεύθυνση ανάπτυξης των μεγαλύτερων τάσεων.

1.5.3 Υλικά Πυρήνα

Οι πυρήνες που χρησιμοποιούνται μπορούν να χωριστούν σε τρεις κυρίως ομάδες:

- σε κυψελοειδείς,
- ξύλο Balsa, και
- στους αφρώδεις πυρήνες.

Το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί ως πυρήνας της κατασκευής Sandwich πρέπει να έχει χαμηλή πυκνότητα έτσι ώστε να συνεισφέρει στο ελάχιστο στο βάρος της συνολικής κατασκευής.

Επιπλέον, το μέτρο ελαστικότητας σε διεύθυνση κάθετη προς τα περιβλήματα πρέπει να είναι υψηλό, έτσι ώστε να αποφεύγεται μείωση του πάχους του πυρήνα και κατά συνέπεια μείωση της θλιπτικής ακαμψίας. Ο πυρήνας συνήθως υπόκειται σε διάτμηση, με συνέπεια οι διατμητικές παραμορφώσεις του να επιδρούν στη συνολική παραμόρφωση και να του προκαλούν διατμητικές τάσεις. Η απαίτηση λοιπόν από το υλικό του πυρήνα είναι να μην καταρρέει υπό την επίδραση κάθετου φορτίου και επίσης το μέτρο διάτμησής του να είναι αρκετά υψηλό για να παρέχει την απαραίτητη διατμητική ακαμψία.

1.5.3.α Κυψελοειδείς πυρήνες

Οι κυψελοειδείς πυρήνες μπορούν να παραχθούν σε μεγάλη ποικιλία, όσον αφορά στο μέγεθος της κυψέλης, με τους εξαγωνικής μορφής να είναι οι πιο συνηθισμένοι. Κυψελοειδείς πυρήνες από κράματα αλουμινίου έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε αεροδιαστημικές εφαρμογές, με πιο διαδεδομένα κράματα είναι τα 5052, 5056 και 2024. Οι κυψελοειδείς πυρήνες από χαρτί εμποτίζονται σε ρητίνη για να αποκτήσουν αντιδιαβροχικές ιδιότητες. Έτσι προκύπτει μία φτηνή κατασκευή αλλά με αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες. Μερικοί κατασκευαστές συμπληρώνουν το κενό ανάμεσα στις κυψέλες με έναν αφρό χαμηλού βάρους για αναπτυγμένη θερμική μόνωση.

Οι μη-μεταλλικοί κυψελοειδείς πυρήνες, όπως τα ενισχυμένα με ίνες πλαστικά, κατασκευάζονται με τη χρήση υφάσματος προκατασκευασμένης κυψελοειδούς μορφής το οποίο εμποτίζεται σε ρητίνη. Η ρητίνη στην οποία εμποτίζεται το ύφασμα είναι συνήθως φαινολική ή πολυεστερική. Οι φαινολικές προσφέρουν υψηλή αντοχή μέχρι τη θερμοκρασία των 180⁰C, ενώ οι πολυεστερικές αντέχουν μόνο μέχρι τους 80⁰C.

Πολύ γνωστός τύπος εμποτισμένου υφάσματος κυψελοειδούς πυρήνα είναι το Nomex®, το οποίο αποτελείται από ύφασμα αραμιδικό το οποίο εμποτίζεται σε ρητίνη. Είναι ευρέως διαδεδομένο λόγω της υψηλής σκληρότητάς του και της αντοχής του σε βλάβη, όπως επίσης για τις παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες με τους κυψελοειδείς πυρήνες από κράματα αλουμινίου. Το Nomex® σε θερμοκρασία 180⁰C διατηρεί το 75% των μηχανικών ιδιοτήτων που έχει σε θερμοκρασία δωματίου. Οι μηχανικές τους ιδιότητες είναι εξαιρετικές, παρέχουν πολύ μεγάλη δυσκαμψία σε διεύθυνση κάθετη προς τα περιβλήματα και επίσης το μεγαλύτερο λόγο διατμητικής δυσκαμψίας προς αντοχή από όλα τα άλλα διαθέσιμα υλικά πυρήνα. Το κύριο μειονέκτημά τους είναι το υψηλό τους κόστος.

1.5.3.β Ξύλο Balsa

Το ξύλο balsa ήταν το πρώτο υλικό που χρησιμοποιήθηκε σαν πυρήνας σε κατασκευές Sandwich. Η μικροσκοπική του δομή φανερώνει έναν υψηλό λόγο πλευρών σε διάταξη κλειστών κυψελών. Οι ιδιότητες του ξύλου balsa είναι ιδιαίτερες υψηλές στη διεύθυνση που είναι προσανατολισμένα τα «νερά» του, αλλά πολύ χαμηλότερες στις άλλες διευθύνσεις. Η διαθεσιμότητα του ξύλου balsa εκτείνεται σε εύρος πυκνοτήτων από 100 μέχρι 300 kg/m³. Βασικό μειονέκτημα είναι ότι επηρεάζεται σημαντικά από την υγρασία με αποτέλεσμα να μειώνονται οι μηχανικές του ιδιότητες εάν απορροφήσει νερό. Διακρίνεται στις ακόλουθες κατηγορίες:

A-Grain Balsa, το οποίο έχει μακριές ίνες και είναι πολύ εύκαμπτο κατά μήκος,

B-Grain Balsa, το οποίο έχει μερικά από τα χαρακτηριστικά και των δύο τύπων A και C.

C-Grain Balsa, έχει μια όμορφη εμφάνιση και είναι πολύ σκληρό κατά μήκος του φύλλου.

1.5.3.γ Αφρώδεις πυρήνες

Οι αφρώδεις πυρήνες μπορούν να θεωρηθούν μακροσκοπικά ως ένα στερεό υλικό, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα κατασκευής στοιχείων Sandwich εύκολα. Επίσης η επιφάνεια επαφής του αφρού με το υλικό του δεσμού είναι πιο εύκολο να διαμορφωθεί κατάλληλα ώστε ο δεσμός να είναι καλύτερος. Επιπλέον προσφέρουν θερμικής και ακουστικής μόνωση όπως επίσης η κλειστή κυψελοειδής τους μορφή προσφέρει εξαιρετική αντίσταση στη διείσδυση του νερού. Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τύπων που διατίθενται παρατίθενται στη συνέχεια.

i. Αφρός PUR (Polyurethane)

Οι αφροί πολουρεθάνης παράγονται σε μεγάλη ποικιλία, ξεκινώντας από τους μαλακούς αφρούς, με περισσότερο ή λιγότερο ανοικτά κελιά, έως στερεού τύπου κλειστά κελιά και σε μεγάλο εύρος πυκνοτήτων. Η προσθήκη φωσφόρου δίνει ικανοποιητική αντοχή απέναντι στην πυρκαγιά. Αυτό συμβαίνει λόγω του υψηλού μοριακού βάρους των στοιχείων του αφρού, με συνέπεια τη χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Οι μηχανικές τους ιδιότητες είναι χαμηλότερες από τα περισσότερα άλλα υλικά πυρήνα, αλλά έχουν το μικρότερο κόστος.

Ο αφρός πολυστερενίου έχει δομή κλειστών κελιών και παράγεται σε εύρος πυκνοτήτων από 15 έως 300 kg/m³. Παρέχει αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες και θερμική μόνωση. Η πρωταρχική του χρήση ήταν ως μονωτής, αλλά τελευταίως έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται σε κατασκευές που μεταφέρουν φορτία υπό ψύξη, όπως τα ψυχόμενα εμπορευματοκιβώτια.

ii. Αφρός PVC (Polyvinyl chloride)

Οι δύο μορφές που διατίθεται αυτός ο αφρός είναι το γραμμικό PVC (linear PVC), και το PVC με διασταυρούμενους δεσμούς (cross-linked PVC). Το γραμμικό PVC προσφέρει εξαιρετική ακαμψία, αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες, αλλά λόγω του ότι είναι θερμοπλαστικό υλικό δεν ενδείκνυται για χρήση σε υψηλές θερμοκρασίες. Ο τύπος PVC με διασταυρούμενες στρώσεις είναι πιο άκαμπος, έχει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, είναι λιγότερο ευαίσθητος στην επίδραση της θερμοκρασίας αλλά πιο εύθραυστος. Διατίθεται σε εύρος πυκνοτήτων από 30 μέχρι 400 kg/m³. Οι μηχανικές του ιδιότητες είναι καλύτερες από αυτές των PUR και PS αλλά είναι και πιο ακριβός. Πρόσθετο πλεονέκτημα είναι η δομή κλειστών κελιών που παρουσιάζει μικροσκοπικά, το οποίο εκτιμάται θετικά σε εφαρμογές όπου η απορρόφηση του νερού είναι απαγορευτική. Η χρήση του έχει επεκταθεί σε όλους τους τύπους των κατασκευών, με αποτέλεσμα να είναι οι πιο διαδεδομένοι αφροί.

iii. Αφρός PMI (Poly-methacryl-imide)

Οι μηχανικές ιδιότητες αυτών των αφρών είναι καλές, ίσως οι καλύτερες από όλους τους αφρούς που βρίσκονται στο εμπόριο, όμως η τιμή τους είναι η υψηλότερη. Ο αφρός PMI είναι σχετικά εύθραυστος, με τη μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση σε εφελκυσμό να φτάνει στο 5%.

1.6 Ειδική ιδιότητα υλικού.

Πέρα από τις απόλυτες τιμές των ιδιοτήτων, οι οποίες παρουσιάζονται στον προηγούμενο πίνακα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι ειδικές ιδιότητες των υλικών.

Ως ειδική ιδιότητα ορίζεται το πηλίκο της ιδιότητας, διαιρεμένο ως προς την πυκνότητα του υλικού. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της ειδικής ιδιότητας ενός υλικού, τόσο υψηλότερη είναι η σχέση ιδιότητας / βάρους, οπότε τόσο ελαφρύτερο είναι το υλικό, ενώ παράλληλα διαθέτει υψηλότερη τιμή της συγκεκριμένης ιδιότητας. Επομένως, η γνώση των ειδικών ιδιοτήτων αποδύκνείται βαρύνουσας σημασίας για το σχεδιασμό μίας κατασκευής με σύνθετα υλικά.

Ενδεικτικά αναφέρεται, σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα 1.1, πως το ειδικό μέτρο ελαστικότητας E/ρ των ινών άνθρακα υψηλού μέτρου είναι περίπου $220 \times 10^6 \text{ Pa}/(\text{kg}/\text{m}^3)$ ενώ των ινών χάλυβα είναι $27 \times 10^6 \text{ Pa}/(\text{kg}/\text{m}^3)$, δηλαδή οχτώ φορές μεγαλύτερο. Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται οι τιμές ιδιοτήτων βραχείων ινών, όπως επίσης ειδικές ιδιότητες τους, όπως είναι το ειδικό μέτρο ελαστικότητας.

Πίνακας 1.2 Ιδιότητες βραχείων ινών.

Υλικό ίνας	Πυκνότητα ρ (KN/m^3)	Θεωρητική αντοχή (GPa)	Πειραματική αντοχή (GPa)	Μέτρο ελαστικότητας E (GPa)	Ειδικό μέτρο ελαστικότητας E/ρ (Mm)
Χαλκός	87.4	12	3.0	124	1.40
Νικέλιο	87.9	21	3.9	215	2.40
Χάλυβας	76.8	20	13.0	200	2.60
B_4C	24.7	45	6.7	450	18.0
SiC	31.2	83	11.0	840	27.0
Al_2O_3	38.8	41	19.0	410	11.0
C	16.3	98	21.0	980	60.0

1.7.1 Πλεονεκτήματα των συνθέτων υλικών

Από τα κυριότερα πλεονεκτήματα που εμφανίζουν τα σύνθετα υλικά συγκρινόμενα με τα μεταλλικά, είναι οι σημαντικές μειώσεις του βάρους των κατασκευών στις οποίες χρησιμοποιούνται. Το πλεονέκτημα αυτό βασίζεται στη δυνατότητα τοποθέτησης των ενισχυτικών ινών εκεί όπου ακριβώς απαιτούνται, (στις διευθύνσεις των επιβαλλόμενων φορτίων), χρησιμοποιώντας λιγότερο απαιτούμενο υλικό με αποτέλεσμα τη μείωση του βάρους της κατασκευής. Το ποσοστό της μείωσης του βάρους που επιτυγχάνεται, κυμαίνεται ανάλογα με το ποσοστό εφαρμογής του σύνθετου υλικού στη συγκεκριμένη κατασκευή και σε καμία περίπτωση δεν θεωρείται ευκαταφρόνητο.

Η αξιοποίηση του πλεονεκτήματος αυτού, χαρακτηρίζεται ως ιδιαίτερα επίπονη διαδικασία, ιδιαίτερα στα αρχικά στάδια μιας νέας κατασκευής για την οποία δεν υπάρχουν στοιχεία από όμοιες κατασκευές. Καθίσταται σαφές πως η σχεδίαση με σύνθετα υλικά απαιτεί περισσότερα δεδομένα για τις ιδιότητες των υλικών και χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη πολυπλοκότητα σε σχέση με την σχεδίαση και εφαρμογή πιο παραδοσιακών υλικών.

Επιπρόσθετα, λόγω της αυξημένης τιμής των ειδικών ιδιοτήτων των συνθέτων υλικών, μπορούν να αντικαταστήσουν στοιχεία που μέχρι πρότινος κατασκευάζονταν από αλουμίνιο με αποτέλεσμα περαιτέρω μείωση του βάρους της κατασκευής, αλλά και οφέλη ως προς την ευκολία διαχείρισης του υλικού σε σχέση με την δυσκολία που παρουσιάζει η συγκόλληση του αλουμινίου.

Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν υψηλές μηχανικές ιδιότητες οι οποίες αποδίδονται στην αντοχή και στην αυξημένη δυσκαμψία που παρουσιάζουν αρκετοι τύποι ινών, όπως για παράδειγμα οι ίνες βορίου.

Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα των συνθέτων υλικών είναι πως ύστερα από κάποια πιθανή αστοχία (θραύση των ινών), διατηρούν την ιδιότητα να παραλαμβάνουν αυξημένα φορτία, γεγονός που οφείλεται στο ότι η τάση μεταβιβάζεται εντός της μήτρας του υλικού σε πολλαπλές κατευθύνσεις.

Επιπρόσθετα τα ινώδη σύνθετα υλικά εμφανίζουν μικρή ευαισθησία στην ύπαρξη εγχοπών, ιδιότητα η οποία καθυστερεί την διάδοση ρωγμών, βελτιώνοντας την συμπεριφορά των υλικών αυτών σε κόπωση. Η σύγκριση της ανά μονάδα βάρους διάρκειας ζωής σε κόπωση των ινώδων σύνθετων υλικών με άνθρακα σε σχέση με την αντίστοιχη των υλικών που χρησιμοποιούνται παραδοσιακά, καταδουκνύει πως τα ινώδη σύνθετα υλικά, παρουσιάζουν αυξημένες τιμές σε σύγκριση με το τιτάνιο (Ti) το οποίο είναι το ανθεκτικότερο εκ των μετάλλων σε κόπωση.

Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν πολύ υψηλή αντοχή σε φαινόμενα ηλεκτροχημικής διάβρωσης, χαρακτηριστικό το οποίο δεν συναντάται στις μεταλλικές κατασκευές. Τα ινώδη σύνθετα υλικά δε διαβρώνονται με την έννοια μείωσης του πάχους τους όπως οι κατασκευές από μέταλλα, ύστερα από έκθεσή τους για μεγάλο χρονικό διάστημα στο θαλασσινό νερό ή αέρα, γεγονός που τα καθιστά ως ενδιαφέρουσα λύση σε ναυπηγικές εφαρμογές. Ωστόσο λόγω προσκόλλησης οστράκων και άλλων θαλασίων μικροοργανισμών στα ύφαλα των ναυπηγικών κατασκευών, όπως συμβαίνει και στις μεταλλικές κατασκευές, απαιτείται η επικάλυψή τους με προστατευτικά υφαλοχρώματα.

Επιπλέον, εξαιρετική συμπεριφορά επιδεικνύουν τα σύνθετα υλικά και έναντι χημικών ενώσεων όπως οξέα, αλκάλια, ενυδατωμένα άλατα, οξειδωτικά μέσα και οργανικές ενώσεις.

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών είναι η ευελιξία που προσφέρουν ως προς τις μεθόδους κατασκευής τους. Κατά τη διάρκεια κατασκευής τους δεν απαντώνται οι περιορισμοί που διέπουν τις διαδικασίες διαμόρφωσης και μηχανικής επεξεργασίας για τα μέταλλα, ελαχιστοποιώντας το αντίστοιχο κόστος, δίνοντας την δυνατότητα για κατασκευή πολύπλοκων τμημάτων ταχύτερα, δίχως την ύπαρξη ενώσεων και συνδέσμων.

Σημαντικό πλεονέκτημα ορισμένων σύνθετων υλικών είναι ο ιδιαίτερα χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής που παρουσιάζουν, όπως επίσης και η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα καθιστώντας τα ιδανικά σε εφαρμογές ως θερμομονωτικά στοιχεία.

Τα σύνθετα υλικά τύπου sandwich εμφανίζουν ιδιαίτερα καλά χαρακτηριστικά απόσβεσης των μηχανικών ταλαντώσεων, παρουσιάζοντας ιδιότητες υψηλής απορρόφησης ενέργειας, περιορίζοντας τη μετάδοση ανεπιθύμητων θορύβων και κραδασμών από τις μηχανές το αξονικό σύστημα και την έλικα του σκάφους.

Σύνθετα υλικά όπως το FRP αποτελούν κακό αγωγό του ηλεκτρισμού, βρίσκοντας εφαρμογές, ως μονωτές του ηλεκτρισμού.

Όσον αφορά τη συντήρηση και την επισκευασιμότητα κατασκευών που είναι κατασκευασμένες από σύνθετα υλικά, οι εργασίες που απαιτούνται κρίνονται ευκολότερες σε σχέση με κατασκευές από μεταλλικά υλικά.

1.7.2 Μειονεκτήματα των συνθέτων υλικών

Οι ιδιότητες ενός συνθέτου μπορούν να υποβαθμιστούν από την έκθεση σε ηλιακή ακτινοβολία, η οποία μπορεί να αντιμετωπιστεί με κατάλληλη προστασία του υλικού.

Η συμπεριφορά του υλικού που υπόκειται σε ερπυσμό επηρεάζεται αρνητικά τις ιδιότητες του κάτω από υψηλή και συνεχή φόρτιση.

Η συμπεριφορά υλικών κατασκευασμένων με ρητίνες γενικού τύπου εμφανίζουν ευπάθεια σε φωτιά, ενώ συντηρούν την κάυση χάνοντας τις ιδιότητές τους.

Τα σύνθετα υλικά εμφανίζουν μικρό μέτρο ελαστικότητας συγκρινόμενο με το αντίστοιχο του χάλυβα. (για παράδειγμα το μέτρο ελαστικότητας των laminates από G.R.P. ανέρχεται σε 28 GPa, ενώ η αντίστοιχη τιμή του μέτρου ελαστικότητας του χάλυβα είναι 207 GPa). Λαμβάνοντας την ιδιότητα αυτή των σύνθετων υλικών προκύπτει πως για ισοδύναμο πάχος υλικού το βέλος κάμψης μιας γάστρας κατασκευασμένης από G.R.P. θα είναι πολλαπλάσιο κατά 10 με 12 φορές του αντίστοιχου μιας γάστρας κατασκευασμένης από χάλυβα. Αξίζει επομένως ιδιαίτερης προσοχής η επιλογή των περιοχών της γάστρας που θα χρησιμοποιηθεί το υλικό, καθώς επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψιν και η επίδραση των αυξημένων παραμορφώσεων σε άλλα στοιχεία του σκάφους.

Η εγκατάσταση μεταλλικών στοιχείων σε σκάφη κατασκευασμένα από πλαστικό χαρακτηρίζεται ως δυσκολότερη εργασία σε σχέση με τα μεταλλικά σκάφη. Η ιδιαίτερη μελέτη που απαιτείται και ο λεπτομερής σχεδιασμός είναι παράγοντες που συντελούν στην αύξηση του κόστους. Επιπρόσθετα, η πολυπλοκότητα των διαδικασιών που απαιτούνται για την κατασκευή σκαφών υψηλών απαιτήσεων από F.R.P., οδηγούν σε υψηλά κόστη.

Το κόστος του ίδιου του υλικού πέρα από το κόστος αγοράς, καθώς θα πρέπει να συνυπολογίζεται τόσο το κόστος κατασκευής όσο και το κόστος συντήρησης ποικίλει ανάλογα με το είδος των ενισχύσεων και της μήτρας που χρησιμοποιείται και συχνά κρίνεται ως αρκετά υψηλό περιορίζοντας την εφαρμογή σε πιο εξεζητημένες κατασκευές αυξημένων απαιτήσεων.

Κεφάλαιο 2

Μέθοδοι μορφοποίησης Συνθέτων Υλικών

Στην ενότητα αυτή επιχειρείται η παρουσίαση των κυριότερων μεθόδων για την κατασκευή των σύνθετων υλικών, όπου παρουσιάζονται οι σημαντικότερες παράμετροι της κάθε μεθόδου, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους. Η παρουσίαση ξεκινά από τις πλέον απλοποιημένες μεθόδους χαμηλού κόστους διεργασίες για την ενίσχυση ινών, έως τις πλέον αυτοματοποιημένες και υψηλότερου κόστους που εφαρμόζονται σε εξειδικευμένες κατασκευές.

2.1 Μέθοδοι επίστρωσης

Ανάλογα με τις τελικές επιθυμητές ιδιότητες, οι οποίες απορρέουν από την εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθεί το εκάστοτε υλικό, επιλέγεται και η μέθοδος κατασκευής. Οι επιστρώσεις είναι πολυεστερικές επικαλύψεις, οι οποίες καλύπτουν την επιφάνεια του καλουπιού και δημιουργούν το φινίρισμα μετά την μορφοποίηση.

Οι κυριότερες μέθοδοι επίστρωσης είναι:

- η επίστρωση με το χέρι,
- η επίστρωση με ψεκασμό.

2.1.1 Η επίστρωση με το χέρι

Η επίστρωση με το χέρι απαιτεί την αρχική προετοιμασία του καλουπιού στο οποίο θα γίνει η μορφοποίηση, ώστε να μην κολλήσει το προς κατασκευή εξάρτημα εντός του καλουπιού κατά το στάδιο της μορφοποίησης. Για τον σκοπό αυτό το καλούπι καλύπτεται από ειδικό αντικολλητικό υλικό το οποίο μπορεί να είναι:

- Κερί,
- Φθοράνθρακες, σιλικόνες,
- Αντικολλητικά φιλμ, χαρτιά,
- PVA,
- Εσωτερικής χρήσης αντικολλητικές ουσίες.

Η επιλογή του κατάλληλου υλικού διαμορφώνεται ανάλογα με την επιθυμητή ποιότητα της εξωτερικής επιφάνειας. Για τα περισσότερα αντικολλητικά υλικά απαιτείται η επικάλυψη του καλουπιού να επαναλαμβάνεται μετά από μία έως πέντε χρήσεις.

Πίνακας 2.1 Αντικολλητικές επιστρώσεις

Είδος αντικολλητικού υλικού	Μορφή	Χαρακτηριστικά
Κερί	Ρευστή ή ιμήρευση	Πολύ καλό γυάλισμα Καλή μεταφορά λεπτομερειών Πολλαπλές χρήσεις
Φθοράνθρακες, Σιλικόνες	Υγρό ή σπρέυ	Σχετικά υψηλό κόστος, Μέτριο γυάλισμα επιφάνειας
Αντικολλητικά φιλμ	Επικαλυμμένο χαρτί, σελοφάν, PVA	Μίας χρήσης, απλά σχετικά καλούπια
Εσωτερικής χρήσης	Υγρό	Άριστο γυάλισμα,

αντικολλητικές ουσίες		καλή μεταφορά λεπτομέρειας, δυνατότητα βαψίματος επιφάνειας
PVA	Υγρό	Υδατοδιαλυτό, μιας χρήσης, δυνατότητα βαψίματος επιφάνειας, Άριστη αντικολλητικότητα

Πηγή: Σύνθετα υλικά, Γ. Παπανικολάου, Δ.Μουζάκης

Το επόμενο βήμα της διαδικασίας είναι η επικάλυψη του καλουπιού με ένα φύλλο πολυμερούς μη ενισχυμένο το οποίο θα αποτελεί την εξωτερική επιφάνεια του κομματιού ύστερα από την ολοκλήρωση της διαδικασίας μορφοποίησης. Το φύλλο αυτό του πολυμερούς μπορεί να είναι σε στερεή μορφή φιλμ, να ψεκαστεί πάνω στο καλούπι, ή να αποχυθεί με ή χωρίς πίεση πάνω σε αυτό.

Ύστερα από τον έλεγχο της ποιότητας της επίστρωσης, ακολουθεί η προετοιμασία της ενίσχυσης του σύνθετου υλικού. Η ενίσχυση είναι σε μορφή υφάσματος πλεγμένων ινών (woven roving), ή βραχείων ινών τυχαίας διεύθυνσης (strand mat). Το ύφασμα κόβεται σε κομμάτια ανάλογων διαστάσεων με το μέγεθος του καλουπιού και επιστρώνεται σε αυτό. Ακολουθεί η ανάμιξη της ρητίνης με τον καταλύτη και στρώνεται με ρολά για να ομογενοποιηθεί η κατασκευή, ώστε να διαπεράσει το μίγμα την ενίσχυση και επιπλέον να διαφύγει ο παγιδευμένος αέρας, ο οποίος παραμένει τόσο ανάμεσα στο πανί των ινών και το gel coating, όσο και στο ίδιο το πανί.

Σχήμα 2.1 Η διαδικασία επίστρωσης με τοχέρι (Hand Lay up).



Πηγή: Polyester Resin Operations, Barry Young - Matthew Powers

Όπου:

- resin: η ρητίνη,
- dry reinforcement: η ξηρή στρώση επίστρωσης,
- gel coat: το εξωτερικό στρώμα εποξειδικής ρητίνης

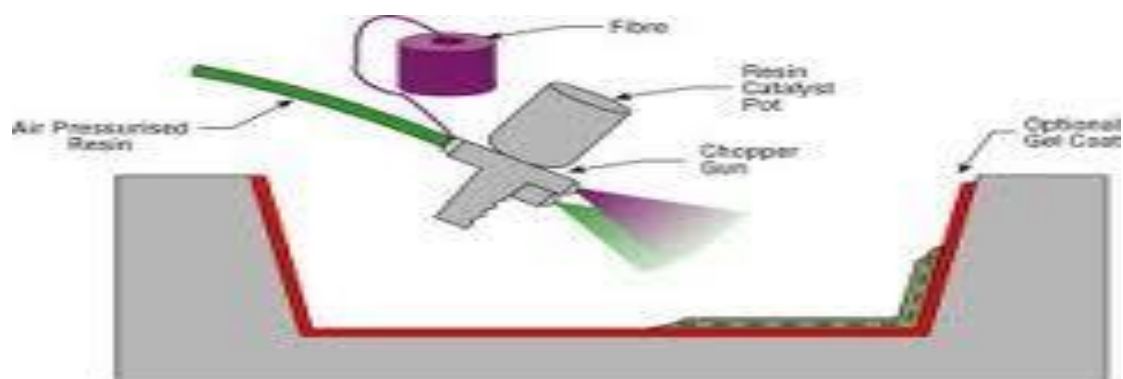
Αν είναι για το προς κατασκευή στοιχείο είναι επιθυμητή η αντοχή σε διάβρωση, χαρακτηριστικό απαραίτητο για την κατασκευή μικρών σκαφών, απαιτείται το πρώτο επιφανειακό φύλλο να είναι πλούσιο σε ρητίνη.

2.1.2 Επίστρωση με ψεκασμό των ινών

Η τεχνική του ψεκασμού των ινών αποτελεί μια διαδικασία επίστρωσης του συνθέτου στο καλούπι με τη χρήση κατάλληλου ψεκαστήρα και όχι πιστολιού όπως στην προηγούμενη μέθοδο. Οι ίνες στη μέθοδο αυτή κόβονται σε μικρά μεγέθη και δεν είναι σε μορφή πανιού.

Η αρχική προετοιμασία του καλουπιού γίνεται με την επίστρωση του κατάλληλου αντικολλητικού και του αρχικού φύλλου του του πολυμερούς. Η διαδικασία προετοιμασίας είναι όμοια όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη μέθοδο επίστρωσης με το χέρι.

Σχήμα 2.2 Επίστρωση με ψεκασμό των ινών (Spray up Technique).



Πηγή: composites.ugent.be

Η πρώτη ύλη η οποία αποτελείται από την ρητίνη του πολυμερούς και τις ίνες που είναι τυλιγμένες σε νήμα. Οι ίνες κόβονται με τη βοήθεια μηχανικού κόπτη και ψεκάζονται ταυτόχρονα μαζί με την ρητίνη εντός του καλουπιού. Ο ψεκασμός μπορεί να γίνεται με δύο τρόπους:

- δύο ακροφύσια εκ των οποίων το πρώτο ψεκάζει ρητίνη αναμειγμένη με καταλύτη και το δεύτερο ρητίνη με προωθητικό,
- ένα ακροφύσιο ψεκάζει ρητίνη με καταλύτη τα οποία έχουν αναμειχθεί σε θάλαμο προανάμειξης.

Για τον ψεκασμό τα ψεκαστικά πιστόλια διακρίνονται σε τρεις βασικούς τύπους ανάλογα με το εάν γίνεται χρήση αέρα για την εξώθηση του καταλύτη ή όχι και το τύπο της μίξης ρητίνη καταλύτη.

- ψεκαστικό σύστημα εξωτερικής μίξης,
- σύστημα με εσωτερική μίξη και χρήση αέρα,
- σύστημα με εσωτερική μίξη χωρίς αέρα.

Η διαδικασία της μορφοποίησης ολοκληρώνεται με τη συμπίεση με ρολούς για την ομογενοποίηση και την απομάκρυνση του αέρα.

2.1.3 Γενικά χαρακτηριστικά των μεθόδων επίστρωσης

Οι μέθοδοι μορφοποίησης με επίστρωση του καλουπιού που περιγράφησαν προωτύτερα, παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν για την τελική επιλογή της κατάλληλης μεθόδου.

Τα πλεονεκτήματα είναι:

- η παρεχόμενη ευελιξία στον σχεδιασμό εξαρτημάτων,
- η δυνατότητα παραγωγής μεγάλων και πολύπλοκων κομματιών, αρκεί το καλούπι να μην παρουσιάζει απότομες αλλαγές καμπυλότητας και γωνίες, σημεία στα οποία συγκεντρώνεται οαέρας,
- το μειωμένο εξοπλιστικό κόστος, μιάς και δεν απαιτούνται ιδιαίτερα ακριβά μηχανήματα και αυξημένοι χρόνοι για την έναρξη της παραγωγικής διαδικασίας,
- η ελευθερία στην επιλογή του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί για το καλούπι,
- η ευκολία που παρουσιάζουν στις όποιες σχεδιαστικές αλλαγές,
- η εκπαίδευση του εργατικού προσωπικού είναι σχετικά απλή.

Τα μειονεκτήματα σχετίζονται με:

- το αυξημένο εργασιακό κόστος,
- το τελικό προϊόν εμφανίζει καλή μορφή μόνο στην εξωτερική του επιφάνεια,
- η ποιότητα κατασκευής σχετίζεται άμεσα με την ικανότητα του προσωπικού,
- οι μέθοδοι χαρακτηρίζονται από την μικρή παραγωγικότητα,
- δεν υπάρχει ομοιομορφία στην ποιότητα του τελικού προϊόντος,
- το ποσοστό απωλειών σε πρώτες ύλες και σε ατελή προϊόντα είναι υψηλότερο συγκριτικά με άλλες μεθόδους,
- οι μέθοδοι κρίνονται ως χρονοβόρες λόγω των μεγάλων χρόνων που απαιτούνται για τον πολυμερισμό καθώς το καλούπι βρίσκεται σε θερμοκρασία δωματίου.

Για την βελτίωση των χαμηλών ρυθμών παραγωγής και την εξάλειψη του φαινομένου της μη ομοιομορφίας ως προς τα τελικά προϊόντα που είδαμε στις προγενέστερες μεθόδους, προκρίθηκε η λύση της μερικής ή ολοκληρωτικής αυτοματοποίησης της διαδικασίας της μορφοποίησης.

2.2 Τεχνικές μορφοποίησης με καλούπια

Το κυρίαρχο χαρακτηριστικό των μεθόδων μορφοποίησης με τη χρήση καλουπιού είναι ότι το φύλλο ή τα φύλλα του σύνθετου υλικού εξαναγκάζονται να εισέλθουν εντός του καλουπιού για να αποκτήσει την επιθυμητή μορφή. Η διαδικασία αυτή μπορεί να περιλαμβάνει την εφαρμογή πίεσης, κενού ή κανενός από τα δύο. Επιπρόσθετα είναι δυνατόν κατά τη διαδικασία της μορφοποίησης να γίνεται εν θερμώ είτε όχι, ανάλογα με την φύση του υλικού της μήτρας.

Όταν το σύνθετο υλικό έχει θερμοπλαστική μήτρα, τότε απαιτείται η ψύξη του σε θερμοκρασία μικρότερη της θερμοκρασίας τήξης T_m ή την θερμοκρασία μετάβασης υαλώδους κατάστασης T_g ώστε να είναι δυνατή η αφαίρεση του από το καλούπι,

χωρίς να μεταβληθεί το διαμορφωμένο σχήμα. Η διαδικασία μορφοποίησης περιλαμβάνει:

- θέρμανση,
- διαμόρφωση υπό πίεση,
- ψύξη υπό πίεση.

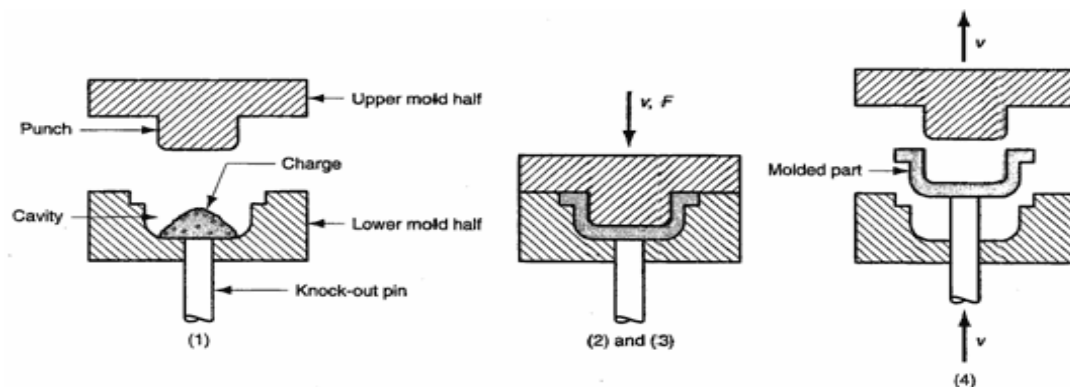
Αν το σύνθετο υλικό έχει μήτρα η οποία περιλαμβάνει θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη, πρέπει η θερμοκρασία να διατηρηθεί για κάποιο χρονικό διάστημα, ώστε το υλικό να αποκτήσει μια σταθερή δομή, διαδικασία που ονομάζεται curing. Στην περίπτωση των σύνθετων με θερμοσκληρυνόμενη μήτρα η διαδικασία της μορφοποίησης περιλαμβάνει τα στάδια:

- θέρμανσης,
- διαμόρφωσης υπό πίεση,
- curing υπό πίεση.

Για την άσκηση της πίεσης κατά την μορφοποίηση του σύνθετου υλικού έχουν αναπτυχθεί οι ακόλουθες μέθοδοι:

- Το σύνθετο υλικό μπορεί να συμπιέζεται με άμεση επαφή του με το άνω μέρος του καλουπιού το οποίο κλείνει οπότε επιτυγχάνεται η διαμόρφωση με συμπίεση (Compression molding).

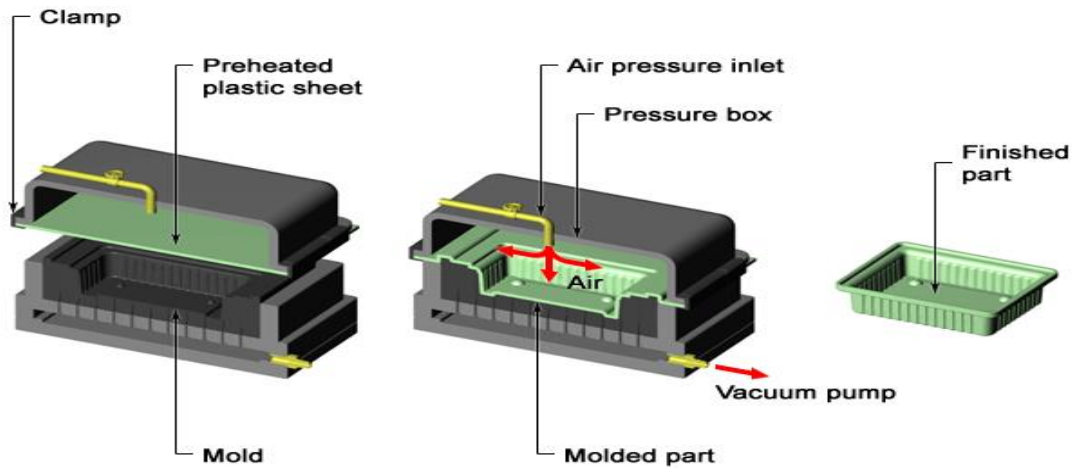
Σχήμα 2.3 Διαμόρφωση με συμπίεση (Compression molding).



Πηγή: Sinotech.com

- Η απαραίτητη συμπίεση να επιτυγχάνεται μέσω κάποιου αδρανούς αερίου ή ακόμα και αέρα, οπότε η διαδικασία είναι τύπου μορφοποίησης με πίεση (Pressure forming).

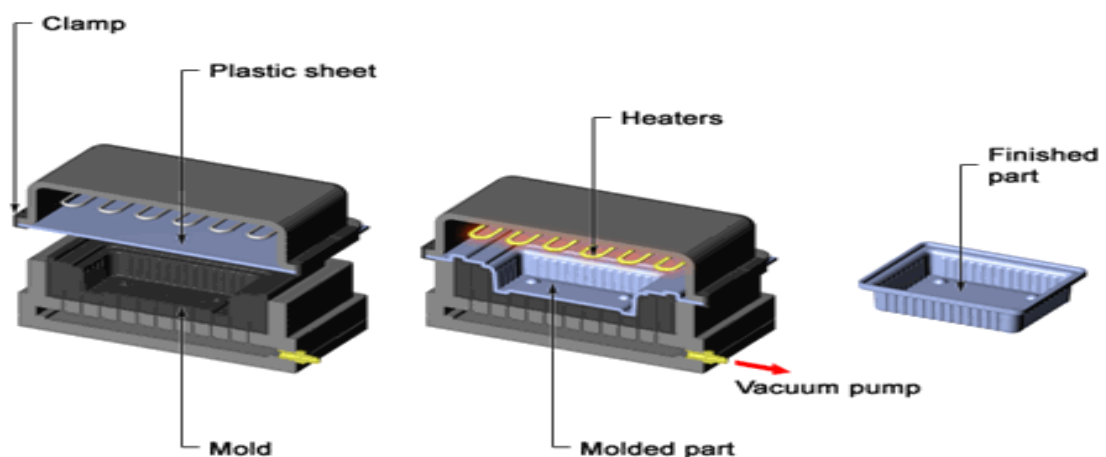
Σχήμα 2.4 Μορφοποίηση με πίεση (Pressure forming).



Copyright © 2008 CustomPartNet

- Η πίεση για την μορφοποίηση του σύνθετου υλικού επιτυγχάνεται με την δημιουργία αρνητικής πίεσης, μέσω δημιουργίας κενού εντός του καλουπιού ώστε να εξαναγκάζεται το σύνθετο να λάβει την τελική του μορφή. Η μορφοποίηση τότε ονομάζεται μορφοποίηση εν κενώ (Vacuum forming).

Σχήμα 2.5 Μορφοποίηση εν κενώ (Vacuum forming).



Copyright © 2008 CustomPartNet

Αξίζει να αναφερθεί πως εντός των καλουπιών κατά τη διαδικασία της μορφοποίησης των συνθέτων υλικών, λαμβάνουν χώρα πολύπλοκα φαινόμενα μετάδοσης της θερμότητας καθώς και φαινόμενα ροών μεγάλου ιξώδους και μικρών

ταχυτήτων, τα οποία και καθορίζουν τις τελικές ιδιότητες του διαμορφωμένου σύνθετου υλικού.

2.2.1 Τεχνικές διαμόρφωσης με πρέσσα

Γενικά

Η τεχνική μορφοποίησης με πρέσσα συνίσταται στη χρήση καλουπιού θερμαινόμενου ή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, οπότε η τεχνική ονομάζεται «εν θερμώ» ή «εν ψυχρώ» αντίστοιχα. Εντός του καλουπιού τοποθετείται το σύνθετο υλικό στο οποίο εφαρμόζεται εξωτερική πίεση για την μορφοποίηση του.

Η μήτρα του σύνθετου υλικού μπορεί να είναι θερμοπλαστική ή θερμοσκληρυνόμενη, ενώ οι ενισχυτικές ίνες μπορούν να είναι στις ακόλουθες μορφές:

- σε μορφή υφάσματος μακρών ινών (roving),
- σε μορφή βραχείων ινών (strand),
- σε συνεχή μορφή.

Κύριο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής διαμόρφωσης αποτελεί το χαρακτηριστικό ότι μπορούν να κατασκευαστούν σχετικά πολύπλοκα κομμάτια σε σύντομο χρονικό διάστημα, απλοποιώντας με αυτό τον τρόπο δευτερογενείς κατασκευαστικές διαδικασίες, όπου αυτές απαιτούνται όπως είναι τρυπήματα, συνενώσεις. Επιπρόσθετα μέσω της τεχνικής αυτής είναι δυνατή η αυτοματοποίηση της διαδικασίας μειώνοντας τους χρόνους παραγωγής, συμβάλλοντας στην αύξηση της παραγωγικότητας. Η ακρίβεια της μορφοποίησης με πρέσσα κρίνεται ικανοποιητική ενώ το κύριο μειονέκτημα της συνίσταται στη μη εξασφάλιση ικανοποιητικών ανοχών.

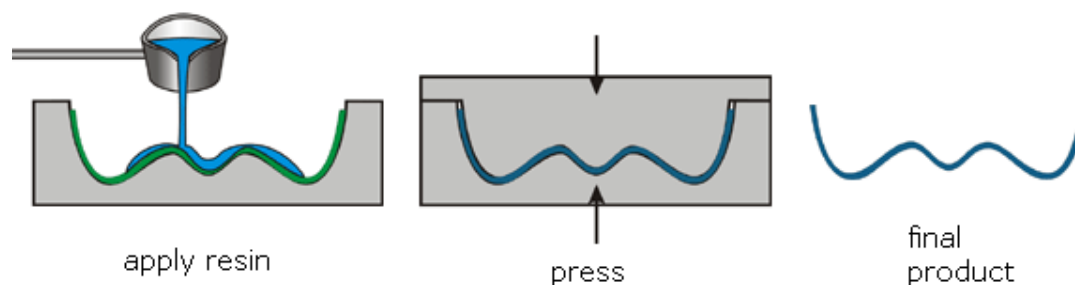
Στη συνέχεια παρουσιάζονται η μορφοποίηση με πρέσσα εν ψυχρώ καθώς και οι τεχνικές μορφοποίησης εν θερμώ.

2.2.1.a Μορφοποίηση με πρέσσα εν ψυχρώ

Η μέθοδος αυτή μορφοποίησης παρουσιάζει ομοιότητες με την τεχνική επίστρωσης του καλουπιού με την διαφορά ότι οι χρόνοι μορφοποίησης είναι κατά πολύ μικρότεροι και ότι το χρησιμοποιούμενο καλούπι είναι μικτό (αρσενικό + θηλυκό τμήμα καλουπιού). Αρχικά το κοίλο μέρος του καλουπιού καλύπτεται με ένα φύλλο μη ενισχυμένου πλαστικού (gel coat), για να εξασφαλιστεί η καλή ποιότητα στην εξωτερική επιφάνεια του προς κατασκευή τμήματος, ενώ στη συνέχεια επιστρώνεται το ύφασμα των ινών πάνω από το gel coat και ακολουθεί η επίστρωση της ρητίνης πάνω στο ύφασμα. Στο καλούπι που κλείνει ασκείται χαμηλή πίεση, ώστε να εμποτιστεί ομοιόμορφα το ύφασμα των ινών από την ρητίνη. Η πίεση που ασκείται δεν είναι υψηλή μιας και δεν είναι απαραίτητη για να πάρει το σύνθετο το σχήμα του

καλουπιού, αλλά για να διασκορπιστεί η ρητίνη στις ίνες. Ο χρόνος μορφοποίησης περιορίζεται σε 10 με 15 λεπτά. Στη συνέχεια παρουσιάζεται σχηματικά η μέθοδος μορφοποίησης με πρέσσα εν ψυχρώ.

Σχήμα 2.6 Μορφοποίηση με πρέσσα εν ψυχρώ



Πηγή: Nat Perssen.nl

2.2.1.β Μορφοποίηση με πρέσσα εν θερμώ

Οι τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί είναι οι ακόλουθες δύο:

- i) Η μορφοποίηση προδιαμορφωμένων εξαρτημάτων,
- ii) Η μορφοποίηση με συμπίεση.

i) Η μορφοποίηση προδιαμορφωμένων εξαρτημάτων

Η διαδικασία μορφοποίησης πραγματοποιείται σε δύο στάδια, στο στάδιο της προδιαμόρφωσης και στο στάδιο της τελικής μορφοποίησης. Στο πρώτο στάδιο ψεκάζονται οι ίνες σε διάτρητο μεταλλικό εκμαγείο, το οποίο έχει το τελικό σχήμα του εξαρτήματος προς παραγωγή. Ακολουθεί η αναρρόφηση αέρα ώστε να παραμείνουν οι ίνες στη θέση τους, ενώ ψεκάζεται μικρή ποσότητα ρητίνης. Στη συνέχεια το προδιαμορφωμένο εξάρτημα απομακρύνεται από το εκμαγείο και τοποθετείται σε φούρνο, όπου και παραμένει για μικρό χρονικό διάστημα, ώστε να γίνει η αρχική του στερεοποίηση.

Ακολουθεί το δεύτερο στάδιο όπου το προκατασκευασμένο εξάρτημα μεταφέρεται σε θερμαινόμενο μικτό καλούπι. Οι επιφάνειες του καλουπιού είναι επικαλυμμένες με κατάλληλη αντικολλητική ουσία ώστε να είναι εύκολη η απομάκρυνση του εξαρτήματος. Επάνω στο προκατασκευασμένο κομμάτι τοποθετείται η ρητίνη, η οποία συμπιεζόμενη με το κλείσιμο του καλουπιού επικαλύπτει όλη την επιφάνεια του. Ο χρόνος μορφοποίησης είναι συνάρτηση του δεύτερου σταδίου και διαμορφώνεται από την θερμοκρασία που επικρατεί κατά την άσκηση της πίεσης.

Η μέθοδος χαρακτηρίζεται από το υψηλό κόστος και ενδείκνυται σε περιπτώσεις που υπάρχει ανάγκη μαζικής παραγωγής εξαρτημάτων, ώστε να γίνεται απόσβεση του κατασκευαστικού κόστους.

ii) Η μορφοποίηση με συμπίεση.

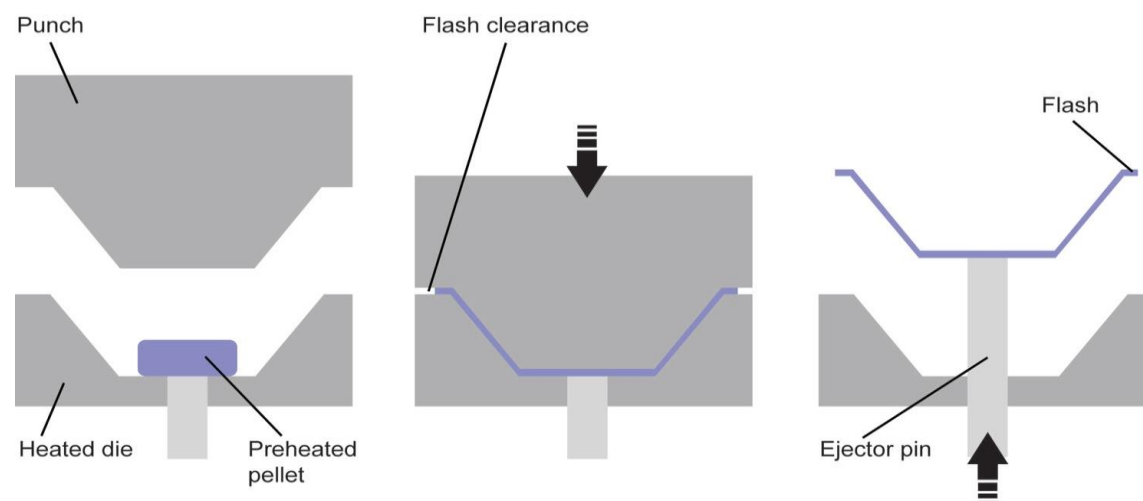
Στη διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται θερμαινόμενο μικτό καλούπι. Η μορφοποίηση γίνεται με την ταυτόχρονη θέρμανση και λιώσιμο του πολυμερούς και την ροή του στα τοιχώματα του καλουπιού.

Αρχικά το καλούπι θερμαίνεται στην απαραίτητη για τη μορφοποίηση θερμοκρασία. Στη συνέχεια τοποθετείται η κατάλληλη ποσότητα φύλλων σύνθετου υλικού ώστε να καλύπτεται η επιφάνεια της κοιλότητας του καλουπιού κατά ποσοστό 60-70%. Κλείνοντας το καλούπι εφαρμόζεται εξωτερική πίεση που αυξάνεται με σταθερό ρυθμό έως την προκαθορισμένη τιμή, η οποία είναι συνάρτηση:

- της περιεκτικότητας και της μορφής των ινών,
- της φύσης και της δυσρευστότητας της ρητίνης στην θερμοκρασία μορφοποίησης,
- καθώς και της μορφής και του μεγέθους της επιφάνειας του καλουπιού.

Το καλούπι παραμένει κλειστό για όσο χρονικό διάστημα απαιτείται, ώστε να ολοκληρωθεί ο πολυμερισμός του μητρικού υλικού και στη συνέχεια το καλούπι ανοίγει και το τελικό εξάρτημα εξέρχεται με την βοήθεια εμβόλων που ανέρχονται από τον πυθμένα του καλουπιού. Στη συνέχεια παρατίθεται σχήμα που απεικονίζει την προηγούμενη διεργασία.

Σχήμα 2.7 Μορφοποίηση με συμπίεση (Compression moulding)



Πηγή: higherproductdesign.blogspot.com

2.2.2 Παράμετροι που επηρεάζουν τη μορφοποίηση

Αναφέρθηκε πρωτίτερα πως κατά τη διαδικασία της μορφοποίησης των συνθέτων υλικών, λαμβάνουν χώρα πολύπλοκα φαινόμενα μετάδοσης της θερμότητας καθώς και φαινόμενα ροών μεγάλου ιξώδους και μικρών ταχυτήτων, τα οποία και καθορίζουν τις τελικές ιδιότητες του διαμορφωμένου σύνθετου υλικού. Οι σημαντικότερες παράμετροι που θα πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψιν κατά τη μορφοποίηση είναι η θερμοκρασία, η πίεση και η ταχύτητα κλεισίματος του καλουπιού.

Κατά τη μορφοποίηση, παρατηρείται θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στα επιφανειακά στρώματα και στα μεσαία στρώματα του σύνθετου υλικού. Η διαφορά αυτή οφείλεται στη μικρή θερμική αγωγιμότητα που εμφανίζουν τα σύνθετα υλικά. Αποτέλεσμα είναι τα επιφανειακά στρώματα να αποκτούν γρηγορότερα την θερμοκρασία του καλουπιού, φτάνοντας πρώτα στο σημείο πήξης και στην συνέχεια τη μεταδίδουν με βραδύτητα στα εσωτερικά στρώματα.

Κατά την έναρξη του πολυμερισμού η θερμοκρασία των μεσαίων φύλλων αυξάνει καθώς η θερμότητα απάγεται με χαμηλότερους ρυθμούς σε σχέση με τα επιφανειακά στρώματα που εφάπτονται του καλουπιού, εμφανίζοντας ένα μέγιστο. Όταν η διαδικασία του πολυμερισμού τείνει προς ολοκλήρωση η θερμοκρασία στα μεσαία στρώματα φθίνει.

Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή όταν η διαδικασία του πολυμερισμού λαμβάνει χώρα σε υψηλές θερμοκρασίες, προκειμένου να επιταχυνθεί, να μην προκληθεί κάψιμο του υλικού, λόγω του μεγίστου που παρουσιάζεται στα μεσαία στρώματα. Για την αποφυγή του φαινομένου αυτού προστίθενται προσμίξεις στο υλικό, μειώνοντας το ποσοστό της ρητίνης, οπότε επιτυγχάνεται μείωση του συνολικού ποσοστού θερμότητας που εκλύεται κατά τον πολυμερισμό.

Επιπρόσθετα για την εξάλειψη τυχών παραμενουσών τάσεων λόγω μορφοποίησης το εξάρτημα θερμαίνεται ομοιόμορφα σε φούρνο ή σε λάμπες υπέρυθρης μορφοποίησης.

Η ταχύτητα με την οποία κλείνει το καλούπι επηρεάζει την ροή της ρητίνης, όταν το υλικό δεν έχει ιδιαίτερα μικρό πάχος. Στα σύνθετα υλικά με σχετικά μεγάλα πάχη, προκειμένου να επιτευχθεί ομοιόμορφη ροή ρητίνης, το καλούπι πρέπει να κλείνει γρήγορα. Αυτό συμβαίνει γιατί τα εξωτερικά φύλλα του υλικού θερμαίνονται γρηγορότερα από τα τοιχώματα του καλουπιού και ρέουν, ενώ τα μεσαία παραμένουν ανεπηρέαστα, οπότε για να μην ολισθήσουν επάνω στα εσωτερικά στρώματα προκαλώντας ανομοιογένεια στο σύνθετο υλικό, το καλούπι πρέπει να κλείνει γρήγορα.

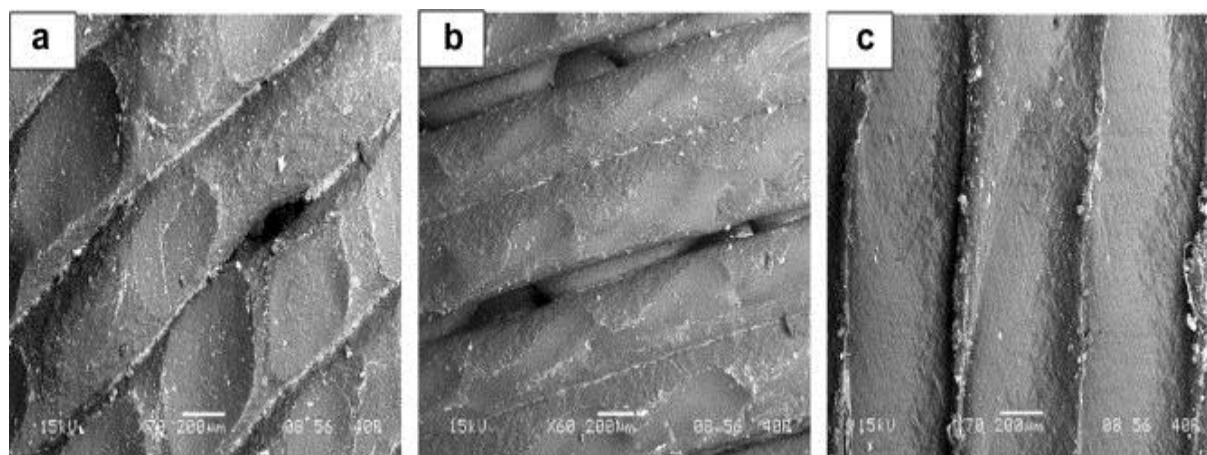
2.2.3 Ατέλειες κατά τη μορφοποίηση με συμπίεση

Κατά τη μορφοποίηση με συμπίεση είναι δυνατή η εμφάνιση ατελειών οι οποίες μπορεί να είναι επιφανειακές επηρεάζοντας μόνο την εμφάνιση του υλικού, είτε δομικές οπότε υποβαθμίζουν τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Οι ατέλειες αυτές μπορεί να έχουν τη μορφή:

- κενών (voids), η ατέλεια που έχει ως αποτέλεσμα η εξωτερική επιφάνεια να εμφανίζει μια πορώδη μορφή, είναι ενδεικτική της ύπαρξης κενών στην εσωτερική δομή του συνθέτου. Η πορώδης αυτή δομή οφείλεται στην ύπαρξη παγιδευμένου αέρα που υπήρχε κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της μορφοποίησης εντός του καλουπιού, ο οποίος παγιδεύτηκε ανάμεσα στα φύλλα του συνθέτου, μεταξύ των ινών και της μήτρας ή μεταξύ του καλουπιού και του συνθέτου και δεν απομακρύνθηκε είτε λόγω του υψηλού ιξώδους του υλικού είτε ανεπαρκούς εξαερισμού του καλουπιού κατά τη ροή της ρητίνης.

Σχήμα 2.8 α). Ρωγμή μεταξύ δύο στρώσεων β). Κενό αέρα

(SEM εικόνα με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) JEOL JSM-6480LV στη λειτουργία LV).



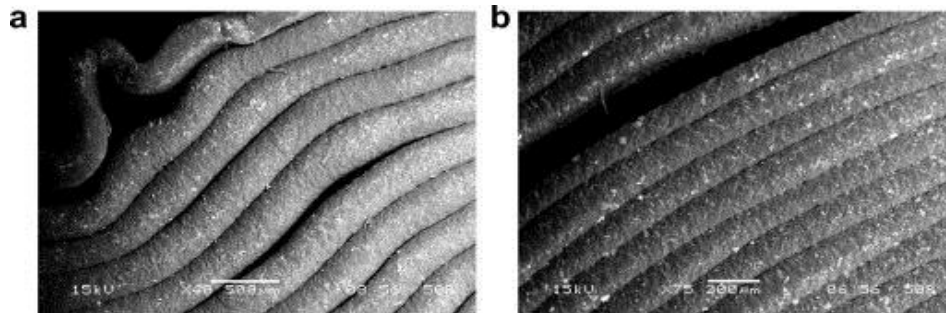
. Πηγή: sciencedirect.com

- διαστρωματικών ρωγμών ή φυσαλίδων (blisters), η ύπαρξη διαστρωματικών ρωγμών ή φυσαλίδων στο σύνθετο υλικό, δημιουργούνται μετά το τέλος της διαδικασίας μορφοποίησης κατά το άνοιγμα του καλουπιού. Η αιτία της ύπαρξης των φυσαλίδων αυτών αποδίδεται στην ύπαρξη θυλάκων αέρα ή αερίων που βρίσκονται στη μάζα του συνθέτου. Τα εγλωβισμένα αέρια είναι συνήθως μονομερή χαμηλού μοριακού βάρους τα οποία απελευθερώνονται κατά τον πολυμερισμό. Το φαινόμενο μπορεί να περιορισθεί με ελάττωση της θερμοκρασίας διεργασίας ή με αύξηση της διαστρωματικής αντοχής με χρήση coatings των ινών ή άλλου τύπου μήτρας.

- λυγισμού των ινών, στην περίπτωση των μακριών συνεχών ινών οι οποίες εμφανίζουν την τάση να λυγίζουν προς τα άκρα του καλουπιού υπό τη επίδραση της

συνιστώσας ροής που είναι κάθετη σε αυτές. Ως αποτέλεσμα εμφανίζεται η μείωση της αντοχής στη διεύθυνση των ινών.

Σχήμα 2.9 Λυγισμός των ινών (fibre buckling)



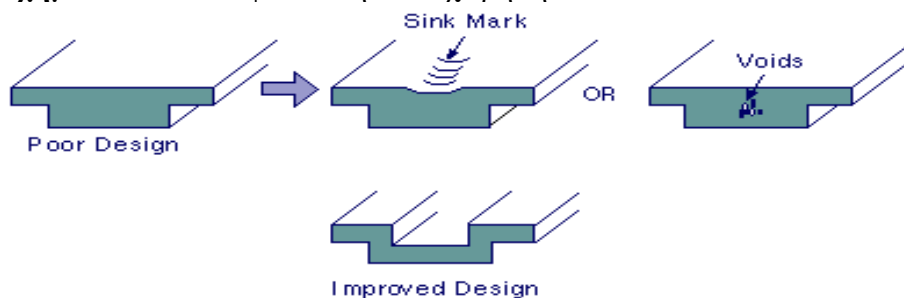
Πηγή: [sciencedirect.com](https://www.sciencedirect.com) Anoop K. Sood , Raj K. Ohdar , Siba Σ. Mahapatra

- προσανατολισμού των ινών παράλληλα ως προς τη ροή της ρητίνης, όπου οι βραχείς ίνες εμφανίζουν την τάση να προσανατολίζονται με τη ροή της ρητίνης, γεγονός που αναιρεί την ισοτροπία του σύνθετου υλικού τοπικά. Αποτέλεσμα είναι στις περιοχές στα τοιχώματα του καλουπιού οι ίνες διατάσσονται παράλληλα σε αυτά.

- σημείων επιφανειακής υποχώρησης του συνθέτου σε σημεία που αλλάζει απότομα η γεωμετρία. Η ροή της ρητίνης στη βάση των περιοχών αλλαγής γεωμετρίας δημιουργεί περιοχές πλούσιες σε ίνες τοπικά και αντίστοιχα περιοχές φτωχές σε ίνες απέναντι από τις προηγούμενες. Οι περιοχές αυτές μεταξύ τους εμφανίζουν διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής με αποτέλεσμα κατά την ψύξη του υλικού η περιοχή που είναι φτωχή σε ίνες να συρρικνώνεται σε μεγαλύτερο ποσοστό από την άλλη, οπότε δημιουργούνται υποχωρήσεις.

Για την αποφυγή εμφάνισης του φαινομένου συνίσταται η αλλαγή γεωμετρίας του εξαρτήματος εάν είναι αυτό εφικτό, η μείωση του πάχους του σύνθετου υλικού στα σημεία που διασταυρώνεται με την κύρια επιφάνεια (σχ.2.10).

Σχήμα 2.10 Επιφανειακή υποχώρηση του συνθέτου υλικού (sink marks)



Πηγή: dc.engr.scu.edu

2.3 Μορφοποιήσεις με περιστροφή

Στις τεχνικές κατασκευής των συνθέτων υλικών που περιγράφησαν προτούτερα, κοινό τους χαρακτηριστικό είναι πως το καλούπι παραμένει ακίνητο κατά τη διάρκεια που συντελείται η διαδικασία επίστρωσης και μορφοποίησης του υλικού. Πέρα όμως από τις μεθόδους αυτές έχει αναπτυχθεί και μια σειρά κατασκευαστικών μεθόδων για εξειδικευμένες εφαρμογές, όπου το καλούπι δεν παραμένει ακίνητο αλλά περιστρέφεται ή περιστρέφονται τα εξαρτήματα της συσκευής μορφοποίησης γύρω από αυτό. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι μέθοδοι:

- της φυγοκεντρικής μορφοποίησης,
- της μορφοποίησης με περιστροφή,
- της μορφοποίησης με περιέλιξη των ινών.

2.3.1 Η φυγοκεντρική μορφοποίηση (Centrifugal forming)

Αποτελεί την απλούστερη από τις μεθόδους μορφοποίησης με περιστροφή. Αρχικά απαιτείται προετοιμασία του καλουπιού στο οποίο επιστρώνεται κατάλληλη αντικολλητική ουσία. Αφού τοποθετηθεί η στρώση του εξωτερικού φύλλου του συνθέτου, τυλίγεται το ύφασμα των ινών στις διαστάσεις της διαμέτρου του καλουπιού, φροντίζοντας ώστε να είναι καλυμμένη όλη του η επιφάνεια. Στη συνέχεια ακολουθεί η έγχυση της ρητίνης επάνω στο στρώμα των ινών, εντός του καλουπιού το οποίο περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα. Με την ολοκλήρωση της έγχυσης το περιστρεφόμενο καλούπι παράλληλα θερμαίνεται για να επιτευχθεί ο πολυμερισμός. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας σταματά η περιστροφή του καλουπιού.

Σημαντικοί παράμετροι στη μέθοδο αυτή παίζουν η ταχύτητα της περιστροφής του καλουπιού, καθώς και η θερμοκρασία όπως και ο χρόνος που διαρκεί η περιστροφή. Η μέθοδος βασίζεται στην φυγόκεντρο δύναμη που αναπτύσσεται κατά την περιστροφή του καλουπιού, η οποία εξαναγκάζει τη ρητίνη να εμποτίσει ομοιόμορφα το στρώμα των ινών, ισοκατανέμει το πάχος του υλικού, ενώ λόγω αυτής συγκρατείται το ύφασμα των ινών στην θέση του.

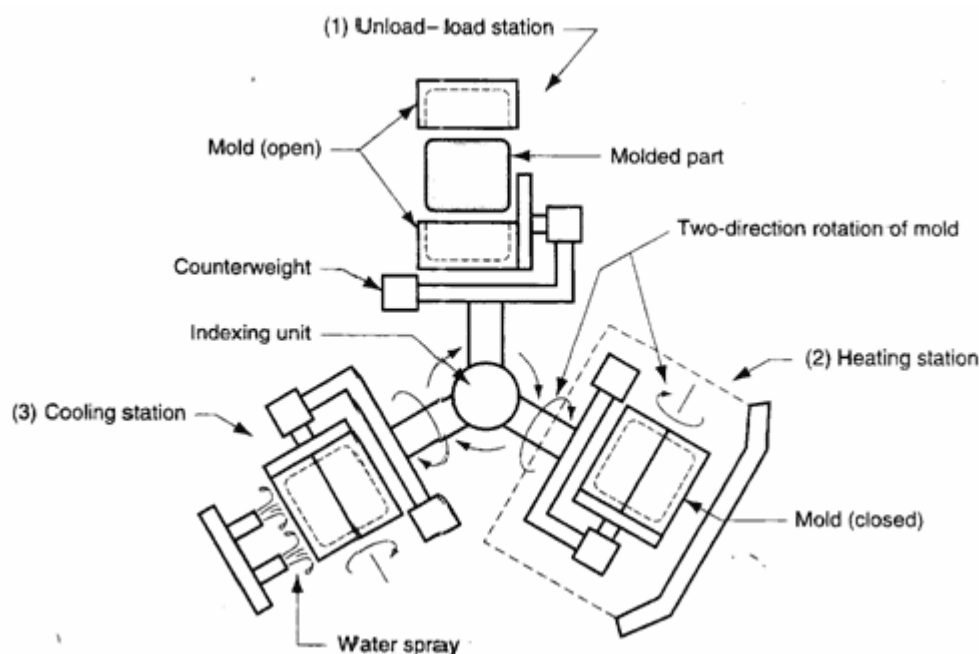
Η μέθοδος μορφοποίησης μέσω της φυγοκέντρωσης χαρακτηρίζεται ως χαμηλού κόστους, μπορεί εύκολα να αυτοματοποιηθεί, ενώ οι ίνες μπορεί να έχουν οποιαδήποτε μορφή και η χρησιμοποιούμενη ρητίνη μπορεί να είναι είτε θερμοπλαστική είτε θερμοσκληρυνόμενη. Επιπρόσθετα χαρακτηρίζεται ως υψηλής ακρίβειας ενώ μπορούν να κατασκευαστούν με αυτή κλειστά αξονοσυμμετρικά σχήματα όπως κώνοι σωλήνες κυλινδρικά δοχεία. Απαιτείται προσεκτικό τύλιγμα του υφάσματος των ινών, προκειμένου να αποφευχθούν ανομοιομορφίες στην κατανομή των ινών στο σύνθετο υλικό.

2.3.2 Η μορφοποίηση με περιστροφή (Rotational Moulding)

Η μέθοδος μορφοποίησης με περιστροφή χαρακτηρίζεται ως πολυπλοκότερη σε σχέση με την προηγούμενη λόγω ψύξης του καλουπιού, αν και στηρίζεται στην ίδια αρχή της εκμετάλλευσης της φυγόκεντρου δύναμης. Το κύριο μειονέκτημά της είναι οι μεγάλοι χρόνοι μορφοποίησης, οπότε οδηγεί σε χαμηλούς ρυθμούς παραγωγής.

Το καλούπι το οποίο είναι προσαρμοσμένο σε έναν βραχίονα πληρώνεται κατά ένα ποσοστό με προζυγισμένη ποσότητα πολυμερούς σε μορφή κόκκων ή σκόνης, αφού έχει προηγηθεί η τοποθέτηση της ενίσχυσης εντός το καλουπιού (1). Στη συνέχεια θερμαίνεται εντός φούρνου και αρχίζει να περιστρέφεται. Κατά το στάδιο αυτό το λειωμένο θερμοπλαστικό κινείται σε όλη την επιφάνεια του καλουπιού εμποτίζοντας την ενίσχυση, λόγω της φυγόκεντρου δυνάμεως που αναπτύσσεται από την περιστροφή του καλουπιού (2). Έπειτα το καλούπι οδηγείται σε ψυκτικό θάλαμο ή ψεκάζεται με νερό για την ψύξη και στερεοποίηση του εξαρτήματος (3). Η όλη διαδικασία παρουσιάζεται στο σχήμα που παρατίθεται.

Σχήμα 2.11 Η διαδικασία της μορφοποίησης με περιστροφή (Rotational Moulding)



Πηγή: sinotech.com

Η συσκευή που χρησιμοποιείται στη μέθοδο μορφοποίησης με περιστροφή αποτελείται από διπλά ανοιγόμενο μεταλλικό καλούπι το οποίο περιστρέφεται ταυτόχρονα γύρω από δύο άξονες οι οποίοι είναι κάθετοι μεταξύ τους. Η ταχύτητα περιστροφής ως προς τους δύο αυτούς άξονες δεν είναι η ίδια. Η όλη διάταξη συμπληρώνεται από ένα βραχίονα πακτωμένο στο καλούπι και ένα σύστημα περιστροφής του σε τρεις άξονες.

Καθοριστικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη μέθοδο αυτή είναι:

- η ταχύτητα περιστροφής του καλουπιού, η οποία καθορίζει την κατανομή της ρητίνης στο εξάρτημα και είναι συνήθως μικρότερη των 20 περιστροφών ανά λεπτό, με λόγο ταχυτήτων κύριου προς βοηθητικό άξονα 4 προς 1.
- ο τρόπος με τον οποίο περιστρέφεται το καλούπι, όπου για να αποφευχθούν μεγάλες αποκλίσεις στην κατανομή του πάχους του εξαρτήματος, η διάταξη θα πρέπει να σχεδιάζεται ώστε το σημείο τομής των αξόνων περιστροφής να μην συμπίπτει με τον κύριο άξονα του καλουπιού.
- η θέρμανση του καλουπιού, όπου μπορεί να επιτυγχάνεται μέσω υπέρυθρης ακτινοβολίας, καύσης αερίου, διοχέτευση θερμού αέρα ή θερμού λαδιού. Στα θερμοπλαστικά η θερμοκρασία θέρμανσης του καλουπιού κυμαίνεται από 250 °C έως 400 °C. Απαιτείται προσοχή ώστε να μην υπερθερμανθεί το καλούπι και καταστραφεί το πολυμερές αλλά και να μην θερμανθεί σε μικρότερη θερμοκρασία οπότε καθυστερεί η διαδικασία μορφοποίησης.
- ο ρυθμός απόψυξης του καλουπιού, ο οποίος παίζει καθοριστικό ρόλο στη δομή του εξαρτήματος μιας και αν γίνει απότομα δημιουργούνται παραμένουσες θερμικές τάσεις και επιφανειακές ανωμαλίες στην επιφάνεια του σύνθετου.

2.3.3 Η μέθοδος περιέλιξης των ινών

Η διαφορά της μεθόδου αυτής σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους μορφοποίησης με περιστροφή, έγκειται στο γεγονός πως σε αυτή γίνεται περιστροφή τόσο του καλουπιού όσο και της συσκευής μορφοποίησης γύρω από αυτό. Ίνα ή δέσμη ινών περιελίσσονται γύρω από ένα τύμπανο το οποίο αποτελεί και το καλούπι της μορφοποίησης. Κάθε τύπος ινών μπορεί να χρησιμοποιηθεί αρκεί να είναι σε συνεχή μορφή. Στην πράξη οι τύποι των ινών που χρησιμοποιούνται κυρίως είναι ίνες γυαλιού κυρίως E-glass και S-glass. Οι δύο αυτοί τύποι ινών γυαλιού προτιμώνται λόγω της αυξημένης αντοχής σε εφελκυσμό που παρουσιάζουν σε σχέση με άλλους τύπους. Σε περιπτώσεις που το προς κατασκευή εξάρτημα θα υπόκειται σε λυγισμό ή σε αυξημένα θλιπτικά φορτία, θα πρέπει να αυξάνεται το πάχος της κατασκευής ή να χρησιμοποιούνται τοπικές ενισχύσεις.

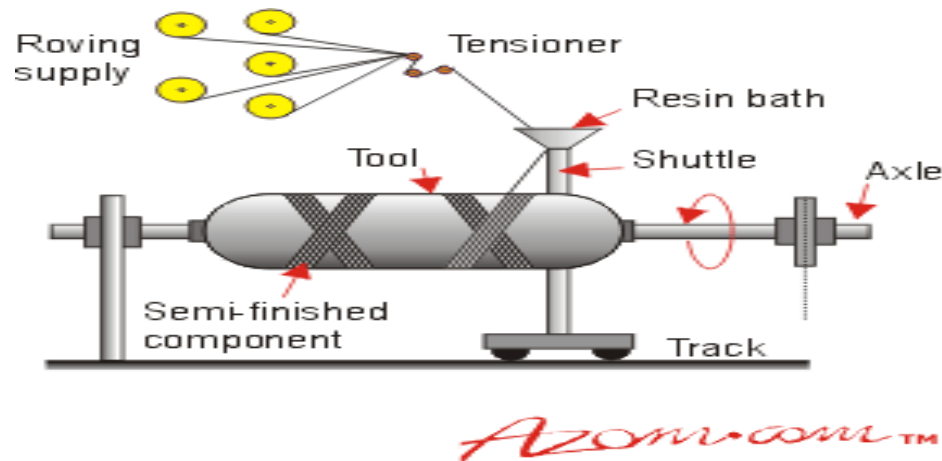
Η μέθοδος της περιέλιξης των ινών δεν μπορεί να εφαρμοστεί για όλα τα είδη αξονοσυμμετρικών διατομών. Σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν πολλές κοιλότητες στο εξωτερικό της διατομής η μέθοδος δεν ενδύκνεται.

Ως προς τη διαδικασία περιέλιξης των ινών διακρίνονται δύο κατηγορίες ανάλογα με το αν οι ίνες προεμποτίζονται πριν την περιέλιξη στο τύμπανο, οπότε έχουμε την α). περιέλιξη ξηρού τύπου και β). την περιέλιξη υγρού τύπου αν οι ίνες διαβρέχονται από την ρητίνη αφού τυλιχτούν στο τύμπανο.

Στη συνέχεια παρατίθεται σε μορφή σχήματος η διάταξη της διαδικασίας περιέλιξης, όπου φαίνεται το στάδιο που ξετιλύγονται οι ίνες από το τύμπανο αποθήκευσης και διατάσσονται σε δέσμη. Ακολούθως περνούν από δοχείο εντός του οποίου υπάρχει η ρητίνη και ο καταλύτης και αφού διαβραχούν οι ίνες περνούν από

μια διάταξη κυλίνδρων που αφαιρεί την περισσευόμενη ρητίνη και ελέγχει το πάχος της δέσμης των ινών. Επίσης μέσω αυτής της διάταξης των κυλίνδρων (τεντοτήρων) ελέγχεται και η επιθυμητή προένταση στο νήμα των ινών. Ακολούθως οι ίνες διέρχονται από πλαίσιο στο οποίο ομαδοποιούνται σε νήμα και τυλίγονται στο τύμπανο.

Σχήμα 2.12 Η διαδικασία της περιέλιξης των ινών



Πηγή: azom.com

Η περιέλιξη των ινών διακρίνεται ανάλογα με το αν περιστρέφεται το τύμπανο ή όχι σε δύο τύπους:

- στην ελικοειδή περιέλιξη,
- την πολική περιέλιξη,
- Η ελικοειδής περιέλιξη, όπου το πλαίσιο κινείται κατά τον διαμήκη άξονα του τυμπάνου, το οποίο περιστρέφεται. Ως γωνία περιέλιξης των ινών ορίζεται η γωνία της δέσμης με τον διαμήκη άξονα του τυμπάνου. Η γωνία περιέλιξης των ινών στο τύμπανο εξαρτάται από την ταχύτητα κίνησης του πλαισίου και επηρεάζει άμεσα τις τελικές ιδιότητες του προς κατασκευή εξαρτήματος. Η γωνία περιέλιξης δίδεται από την σχέση:

$$\tan\theta = 2\pi Nr/V \text{ όπου,}$$

N: η γωνιακή ταχύτητα του τυμπάνου,

r: η διάμετρος του τυμπάνου,

V: η ταχύτητα του πλαισίου.

- Η πολική περιέλιξη, όπου το τύμπανο δεν περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του κατά την περιέλιξη, αλλά η περιέλιξη του νήματος των ινών πραγματοποιείται με την περιστροφή ενός βραχίονα περιτύλιξης ινών γύρω από τον διαμήκη άξονα του τυμπάνου. Η διάταξη αποτελείται από ένα τύμπανο το οποίο συνήθως είναι

τοποθετημένο σε κάθετη θέση για να είναι απλή η κατασκευή του βραχίονα τροφοδοσίας. Με τη μέθοδο αυτή γίνεται περιέλιξη ξηρού τύπου λόγω δυσκολίας προσαρμολογίας συστήματος εμποτισμού των ινών.

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας της περιέλιξης των ινών στο σύνθετο υλικό, με οποιαδήποτε από τις δύο μεθόδους, το τύμπανο οδηγείται σε κλίβανο, όπου η ρητίνη πολυμερίζεται και έτσι ολοκληρώνεται η διαδικασία της μορφοποίησης. Σημαντικό είναι κατά την κατασκευή του τυμπάνου να έχει ληφθεί υπόψη η δυνατότητα απομάκρυνσής του με το πέρας της διαδικασίας, γιατί το τύμπανο είναι καλυμένο από το τελικό εξάρτημα. Επιπλέον το τύμπανο θα πρέπει να είναι κατασκευασμένο ώστε να αντέχει τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά τον πολυμερισμό της ρητίνης καθώς και τις τάσεις που προκύπτουν κατά την περιέλιξη.

2.3.3.a Ατέλειες στην περιέλιξη των ινών

Στην εφαρμογή της μεθόδου της περιέλιξης των ινών έχουν παρατηρηθεί ατέλειες που σχετίζονται με την εμφάνιση:

- Κενών στη δομή του υλικού, που οφείλονται στην ύπαρξη φυσαλίδων αέρα στο δοχείο όπου εμβαπτίζονται οι ίνες σε ρητίνη όταν δεν γίνεται με επαρκή τρόπο ο εμποτισμός, είτε όταν η περιέλιξη γίνεται υπό αυξημένες τάσεις οπότε η ρητίνη εξαναγκάζεται να ρεύσει από τα εσωτερικά στρώματα του υλικού προς τα εξωτερικά.
- Διαστρωματικών αποκολλήσεων, που εμφανίζονται σε εξαρτήματα σχετικά μεγάλου πάχους που μεσολαβούν μεγάλα χρονικά διαστήματα περιέλιξης από στρώση σε στρώση, οπότε είναι δυνατόν να αποκολλούνται τα στρώματα. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού συνίσταται η μείωση του χρονικού διαστήματος από στρώση σε στρώση και ο ψεκασμός ρητίνης πριν την έναρξη της περιέλιξης για κάθε στρώση.
- Κυματώσεων των ινών, η οποίες εμφανίζεται όταν οι ίνες στα νήματα δεν έχουν ευθυγραμμιστεί καταλλήλως, είτε η προένταση κατά την μορφοποίηση είναι μικρή.

2.4 Μορφοποιήσεις με διατάξεις συνεχούς παραγωγής

Γενικά

Στο τμήμα αυτό θα παρουσιαστούν μέθοδοι παραγωγής συνθέτων υλικών οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης. Η ανάπτυξη τέτοιων μεθόδων έχει επιτρέψει τα τελευταία χρόνια την παραγωγή εξαρτημάτων σε μεγάλους όγκους παραγωγής μειώνοντας στο ελάχιστο τους χρόνους μορφοποίησης. Οι τεχνικές συνεχούς παραγωγής δεν απαιτούν την επέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα παρά μόνο στα στάδια της τροφοδοσίας και του ποιοτικού ελέγχου.

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των διατάξεων αυτών είναι η μεγάλη ευελιξία που παρέχουν ως προς την ποικιλία των παραγόμενων σχημάτων, η οποία προέρχεται από την χρήση του καλουπιού ως βασικό εργαλείο της μορφοποίησης, το οποίο αλλάζει εύκολα προσαρμόζοντας στη θέση του άλλο διαφορετικού σχήματος. Το παραπάνω σε συνδυασμό με την υψηλή ταχύτητα και τον όγκο παραγωγής, δίνουν το πλεονέκτημα στις διατάξεις συνεχούς παραγωγής όταν το ζητούμενο είναι οι μεγάλοι όγκοι παραγωγής. Οι τεχνικές που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια είναι:

- η εξώθηση,
- η μορφοποίηση με έγχυση,
- η παραγωγή συνεχών ευθύγραμμων στοιχείων με διέλαση/εξέλαση.

2.4.1 Η εξώθηση

Η εξώθηση μπορεί να αποτελέσει τη βάση για πολλές τεχνικές διαμόρφωσης συνθέτων υλικών. Η πρώτη ύλη την οποία συνήθως αποτελούν κόκκοι πολυμερούς διοχετεύεται μέσω μιας χοάνης στο εσωτερικό της συσκευής εξώθησης. Μια τυπική συσκευή εξώθησης παρατίθεται στο ακόλουθο σχήμα.

Στο σημείο εκείνο ασκείται συμπίεση από ένα περιστρεφόμενο κοχλία και με τη βοήθεια της θερμότητας που παράγεται από θερμαντικά στοιχεία αλλά και λόγω της τυρβώδους ροής επιτυγχάνεται η ομογενοποίηση του υλικού. Στη συνέχεια το υλικό διέρχεται από μηχανικά φίλτρα για να κατακρατηθούν οι όποιες ξένες ουσίες υπάρχουν και ακολούθως διοχετεύεται σε καλούπι όπου θα αποκτήσει και την τελική μορφή του.

Σημαντικές παράμετροι που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν για τους εξωθητές είναι η διάμετρος του τυμπάνου του κοχλία D , και ο λόγος L/D του μήκους προς τη διάμετρο. Το επαρκές μήκος του τυμπάνου διασφαλίζει την πλήρη ομογενοποίηση του πολυμερούς.

Σχήμα 2.13 Τυπική συσκευή εξώθησης

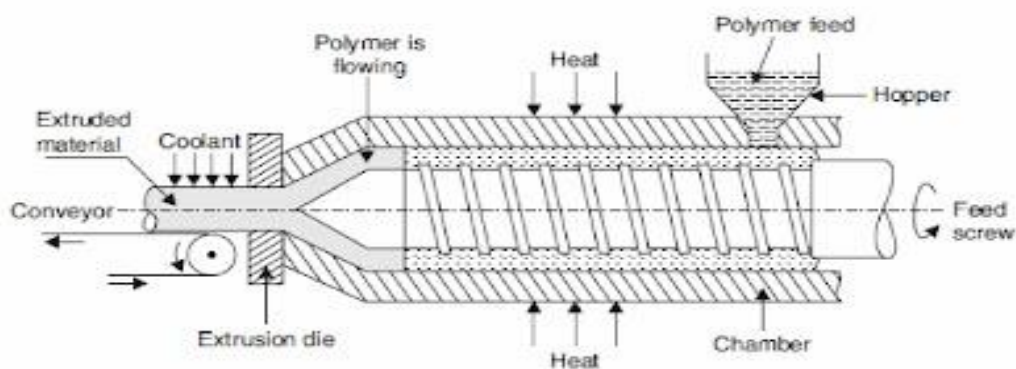


Fig. 4.2 Extrusion of plastics

Πηγή: production-process.blogspot.com

Σε ορισμένες εφαρμογές εντός του εξωθητή συναντάται σύστημα διπλού κοχλίου το οποίο αποτελείται από δύο παράλληλους κοχλίες αντί για έναν, το οποίο προσφέρει βελτιωμένη ομογενοποίηση του υλικού, καλύτερο έλεγχο της μηχανής και εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της χαμηλότερης θερμοκρασίας ομογενοποίησης. Στα μειονεκτήματα της διάταξης αυτής υπολογίζονται η πολυπλοκότητα και το υψηλό κόστος κατασκευής.

Με την μέθοδο της μορφοποίησης με εξώθηση επιτυγχάνεται η παραγωγή ενός ευρύ φάσματος από προϊόντα όπως:

- κόκκοι,
- παραγωγή προφίλ συνεχών κατασκευαστικών εξαρτημάτων,
- ταινίες και φύλλα με εμφύσηση,
- κοίλα εξαρτήματα η μορφοποίηση των οποίων γίνεται με εμφύσηση,
- σύνθετα υλικά τύπου bi-layer, όπου φύλλα πολυμερούς επικαλύπτονται από άλλο πολυμερές μέσω της διαδικασίας επικάλυψης με εξώθηση, για την κατασκευή του οποίου τα πολυμερή φύλλα παράγονται σε παράλληλους εξωθητές και στην συνέχεια το σύστημα των δύο φύλλων διέρχεται από περιστρεφόμενους κυλίνδρους ή ειδικό καλούπι προκειμένου να επιτευχθεί η πλήρης επαφή των δυο φύλλων.

2.4.2 Η μορφοποίηση με έγχυση

Η μέθοδος της μορφοποίησης με έγχυση αποτελεί μια απλή μέθοδο μορφοποίησης, η οποία έχει ως βασικό πλεονέκτημα τον αυξημένο ρυθμό παραγωγής, συνοδευόμενο από τον υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης που παρέχει. Μέσω της μεθόδου αυτής είναι δυνατή η παραγωγή προϊόντων με καλή ακρίβεια σε ποικιλία.

Η διαδικασία παραγωγής της ξεκινά με την πρώτη ύλη σε μορφή σκόνης ή κόκκων πολυμερούς προενισχυμένου με ίνες ή αναμεμιγμένη με άλλο πολυμερές που διοχετεύεται μέσω μιας χοάνης εντός της συσκευής όπου πραγματοποιείται η ομογενοποίηση και το λειώσιμο του πολυμερούς. Το υγρό διοχετεύεται ακολούθως μέσω στομίου σε ένα θερμαινόμενο/ψυχόμενο καλούπι όπου στερεοποιείται το τελικό εξάρτημα. Η όλη διαδικασία φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί, όπου παρατίθεται μια μηχανή έγχυσης τύπου εμβόλου-ατράκτου.

Σχήμα 2.14 Μορφοποίηση με έγχυση (Injection Moulding)

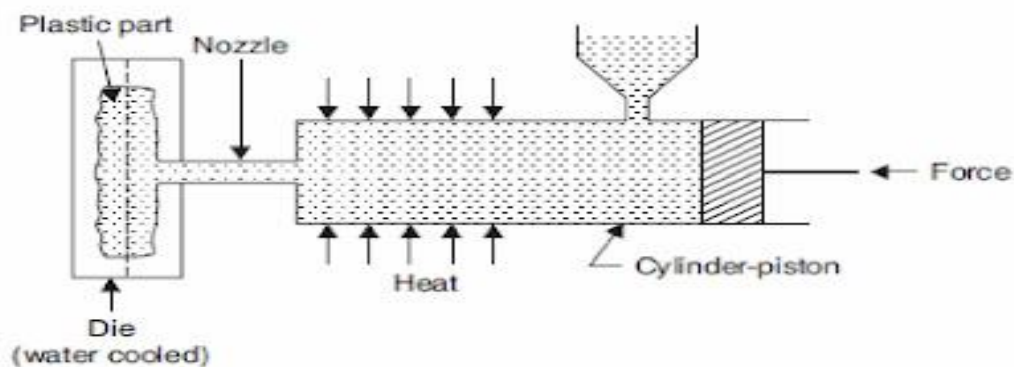


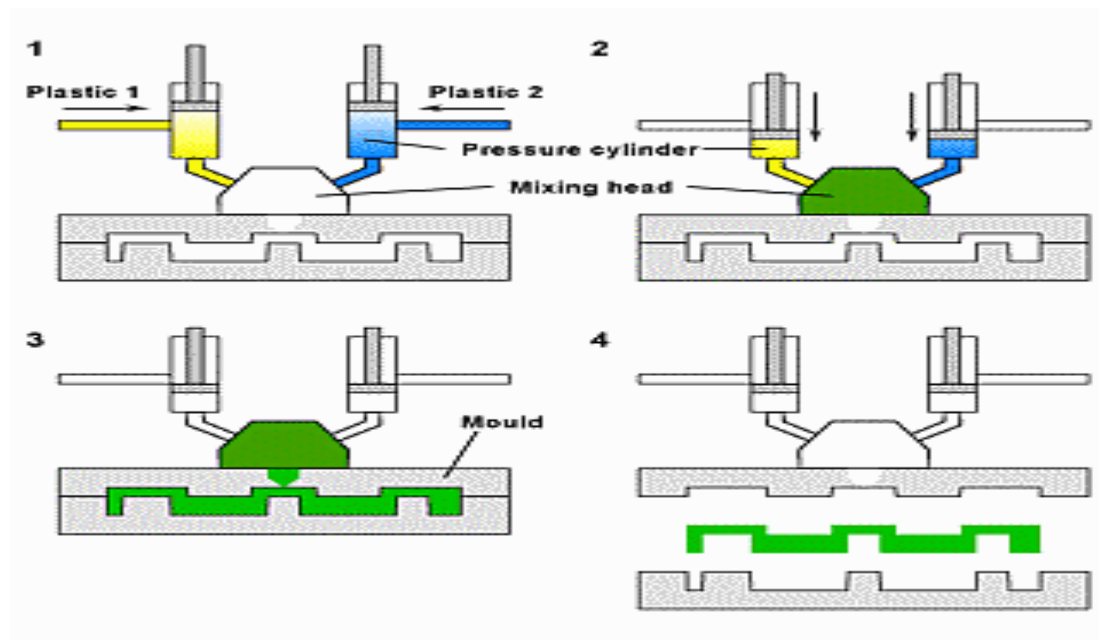
Fig. 4.1 Injection moulding of plastics

Πηγή: production-process.blogspot.com

Τέτοιου είδους μηχανές παρουσιάζουν μια σειρά προβλημάτων που σχετίζονται με την ανεπαρκή ανάμιξη και ομογενοποίηση του υλικού, το μη ακριβή έλεγχο της ποσότητας που εγχύεται στο υλικό λόγω της διαφοροποίησης της πυκνότητας εντός του υλικού, τις αλλαγές στην πίεση μορφοποίησης λόγω του εμβόλου. Προκειμένου να ξεπεραστούν τα προβλήματα αυτά έχει αναπτυχθεί ως συσκευή μορφοποίησης με έγχυση ένας τύπος μηχανής με κύριο εξάρτημα έναν παλινδρομικό κοχλία, ο οποίος ομογενοποιεί το υλικό καθώς περιστρέφεται, ενώ ωθεί το υλικό στο καλούπι όταν παλινδρομεί.

Μέσω της μεθόδου μορφοποίησης με έγχυση είναι δυνατή η κατασκευή υλικών με αφρώδη δομή η οποία οφείλεται στην απελευθέρωση κάποιου αδρανούς αερίου εντός του καλουπιού κατά τη μορφοποίηση. Η απελευθέρωση του αερίου αποδίδεται στην θέρμανση και διάσπαση κάποιας χημικής ουσίας που προαναμιγνύεται με την ρητίνη πριν αυτή εισαχθεί στον κοχλία. Η όλη διαδικασία ονομάζεται έγχυση αντίδρασης (reaction injection molding) και τα παραγόμενα υλικά παρουσιάζουν πλεονεκτήματα, όπως αυξημένη ακαμψία, συρρικνώνονται ομοιόμορφα κατά την ψύξη τους, ενώ είναι δυνατή η κατασκευή υλικών τύπου Sandwich με αφρώδη πυρήνα και λεπτή πολυμερική επιφάνεια.

Σχήμα 2.15 Διαδικασία έγχυσης αντίδρασης (reaction injection molding)



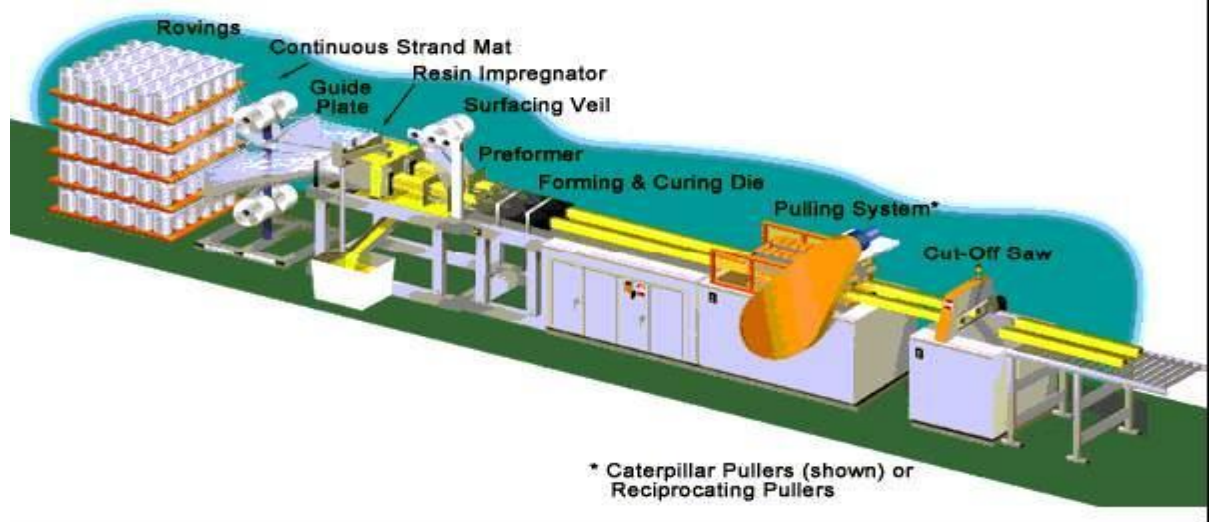
Πηγή: designinsite.dk

2.4.3 Η παραγωγή συνεχών ευθύγραμμων στοιχείων με διέλαση/εξέλαση

Τα σύνθετα υλικά που παρασκευάζονται με αυτή τη μέθοδο χαρακτηρίζονται από την πολύστρωτη δομή τους. Οι στρώσεις των ινών που χρησιμοποιούνται μπορεί να έχουν διαφορετική γεωμετρία στον πυρήνα του συνθέτου από αυτές στην εξωτερική του επιφάνεια. Ως μήτρες για το σύνθετο χρησιμοποιούνται θερμοσκληρυνόμενες, ενώ οι εποξειδικές δεν βρίσκουν ευρεία εφαρμογή λόγω του αυξημένου χρόνου πολυμερισμού που απαιτούν.

Η διαδικασία μορφοποίησης ξεκινά με το ξετύλιγμα των παράλληλων συνεχών ινών από τα τύμπανα αποθήκευσης. Ταυτόχρονα ξετυλίγονται και τα υφάσματα των ινών των εξωτερικών επιφανειών του συνθέτου. Στη συνέχεια περνούν μέσα από το σύστημα έγχυσης ρητίνης που διαθέτει η διάταξη και εμβαπτίζονται στο μίγμα ρητίνης. Ακολούθως οδηγείται εντός καλουπιού όπου γίνεται προδιαμόρφωση του υλικού για να απομακρυνθεί τυχόν περίσσεια ρητίνης και να ομογενοποιηθεί το εξάρτημα. Το προδιαμορφωμένο εξάρτημα οδηγείται σε μακρύ προθερμασμένο καλούπι όπου λαμβάνει την τελική του μορφή. Για την αποφυγή πρώιμου πολυμερισμού το αρχικό τμήμα του καλουπιού ψύχεται με κατάλληλη διάταξη νερού που κυκλοφορεί εντός των τοιχωμάτων του, ενώ το υπόλοιπο τμήμα του καλουπιού θερμαίνεται ομοιόμορφα στην θερμοκρασία πολυμερισμού. Η διαδικασία ολοκληρώνεται από προωθητικό σύστημα το οποίο τραβάει το υλικό και από το κοπτικό εργαλείο που κόβει σε κομμάτια επιθυμητού μήκους το υλικό. Η όλη διαδικασία απεικονίζεται στο σχήμα 2.16 που ακολουθεί.

Σχήμα 2.16 Η διάταξη παραγωγής συνεχών ευθύγραμμων στοιχείων με διέλαση/εξέλαση



Πηγή: megamould.com

Μέσω της συγκεκριμένης τεχνικής επιτυγχάνεται καλή πρόσφυση μεταξύ ίνας και μήτρας η οποία επηρεάζει σε καθοριστικό βαθμό τις μηχανικές ιδιότητες του συνθέτου υλικού. Η καλή πρόσφυση είναι συνάρτηση των ακολούθων:

- του χρόνου παραμονής των ινών στο δοχείο με τη ρητίνη προκειμένου να πραγματοποιηθεί επαρκής εμποτισμός τους,
- της θερμοκρασίας που επικρατεί στο δοχείο της ρητίνης. Αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μείωση της τιμής του ιξώδους της ρητίνης με αποτέλεσμα τον καλύτερο εμποτισμό των ινών. Προσοχή απαιτείται γιατί η πολύ χαμηλή τιμή του ιξώδους μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια ρητίνης κατά την έξοδο των ινών από το δοχείο εμποτισμού. Επιπρόσθετα μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας παρατηρείται μείωση των επιφανειακών ενεργειών ρητίνης και ινών και επιτυγχάνεται καλύτερη πρόσφυση.
- της υφής των ινών. Οι ίνες του Kevlar-49 συγκρατούν περισσότερη ρητίνη σε σχέση με τις ίνες του άνθρακα ή γυαλιού στις ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας και χρόνου εμποτισμού τους.

Κεφάλαιο 3

Γενικά

Η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των σύνθετων υλικών είναι αναγκαία προκειμένου να διασφαλιστεί ότι η κατασκευή στην οποία θα χρησιμοποιηθεί το εν λόγω σύνθετο υλικό δεν θα αντιμετωπίσει προβλήματα που θα οδηγήσουν στην κατάρρευση της. Απαιτείται η γνώση της κατάλληλης θεωρίας, η οποία θα λαμβάνει υπόψιν της την ανισότροπη φύση των υλικών αυτών, ώστε να προβλέπονται οι ελαστικές μηχανικές ιδιότητες τους.

3.1 Γενικευμένος νόμος του Hooke

Λόγω του ότι τα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται ως ανισότροπα είναι αναγκαία η γενίκευση του νόμου του Hooke, ώστε να καταλήξουμε στην μορφή της ανισοτροπίας που εξυπηρετεί για την μελέτη των σύνθετων υλικών.

Σε μια διάσταση ή στο επίπεδο η ορθή τάση συσχετίζεται με την ορθή παραμόρφωση μέσω της σχέσης:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

όπου,

σ : ορθή τάση,

E : μέτρο ελαστικότητας,

ε : παραμόρφωση,

αντίστοιχα η διατμητική τάση συσχετίζεται με τη διατμητική παραμόρφωση μέσω της σχέσης:

$$\tau = G \cdot \gamma$$

όπου,

τ : διατμητική τάση,

G : μέτρο διατμήσεως

γ : διατμητική παραμόρφωση

Στη γενική εντατική κατάσταση στο χώρο (τριαξονική εντατική κατάσταση) εμφανίζονται όλες οι τάσεις και οι παραμορφώσεις, όπου θεωρώντας ότι η κάθε τάση συνδέεται γραμμικά με κάθε παραμόρφωση μέσω μιας σειράς γραμμικά ανεξάρτητων σταθερών αλλά και αντίστροφα κάθε παραμόρφωση συνδέεται γραμμικά με κάθε τάση μέσω μιας σειράς σταθερών γραμμικά ανεξάρτητων μεταξύ τους, καταστρώνεται μια σειρά 6 εξισώσεων με 36 σταθερούς συντελεστές που ονομάζονται ελαστικές σταθερές ή σταθερές δυσκαμψίας.

$$\sigma_x = A_1 \varepsilon_x + B_1 \varepsilon_y + C_1 \varepsilon_z + D_1 \gamma_{xy} + E_1 \gamma_{xz} + F_1 \gamma_{yz}$$

$$\sigma_y = A_2 \varepsilon_x + B_2 \varepsilon_y + C_2 \varepsilon_z + D_2 \gamma_{xy} + E_2 \gamma_{xz} + F_2 \gamma_{yz}$$

$$\sigma_z = A_3 \varepsilon_x + B_3 \varepsilon_y + C_3 \varepsilon_z + D_3 \gamma_{xy} + E_3 \gamma_{xz} + F_3 \gamma_{yz}$$

$$\tau_{xy} = A_4 \varepsilon_x + B_4 \varepsilon_y + C_4 \varepsilon_z + D_4 \gamma_{xy} + E_4 \gamma_{xz} + F_4 \gamma_{yz}$$

$$\tau_{xz} = A_5 \varepsilon_x + B_5 \varepsilon_y + C_5 \varepsilon_z + D_5 \gamma_{xy} + E_5 \gamma_{xz} + F_5 \gamma_{yz}$$

$$\tau_{yz} = A_6 \varepsilon_x + B_6 \varepsilon_y + C_6 \varepsilon_z + D_6 \gamma_{xy} + E_6 \gamma_{xz} + F_6 \gamma_{yz}$$

Οι παραπάνω εξισώσεις σε τανυστική μορφή στο καρτεσιανό σύστημα μπορούν να γραφούν ως:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad \text{όπου } i,j,k,l = x,y,z$$

όπου c_{ijkl} ο τανυστής 4^{ης} τάξεως που ονομάζεται τανυστής δυσκαμψίας του υλικού.

Αντιστοίχως το σύστημα των 6 εξισώσεων για τις παραμορφώσεις σε τανυστική μορφή δίνεται ως:

$$\varepsilon_{ij} = s_{ijkl} \sigma_{kl}, \quad i,j,k,l = x,y,z$$

όπου s_{ijkl} ο τανυστής 4^{ης} τάξεως που ονομάζεται τανυστής ενδώσεως του υλικού.

Οι παραπάνω σχέσεις αποτελούν τη γενίκευση του νόμου του Hooke για στερεά στη γραμμική θεωρία ελαστικότητας. Τόσο ο τανυστής δυσκαμψίας του υλικού c_{ijkl} , όσο και ο τανυστής ενδώσεως του υλικού s_{ijkl} λόγω του ότι είναι συμμετρικοί το πλήθος των στοιχείων τους υποβιβάζεται από 3^4 στοιχεία σε 36 στοιχεία. Στην περίπτωση που το προς εξέταση υλικό εμφανίζει και τις 36 ελαστικές σταθερές ανεξάρτητες μεταξύ τους, τότε πρόκειται για τρικλινές μέσο το οποίο δεν παρουσιάζει συμμετρίες και χαρακτηρίζεται ως ανισότροπο.

Υιοθετώντας τη σύμβαση τόσο για τις ορθές τάσεις,

$$\sigma_{xx} = \sigma_{11} = \sigma_1$$

$$\sigma_{yy} = \sigma_{22} = \sigma_2$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_{33} = \sigma_3$$

όσο και για τις διατμητικές τάσεις, όπου

$$\sigma_{xy} = \sigma_{12} = \sigma_6$$

$$\sigma_{xz} = \sigma_{13} = \sigma_5$$

$$\sigma_{yz} = \sigma_{23} = \sigma_4$$

και ακολουθώντας όμοια σύμβαση και στο συμβολισμό της παραμόρφωσης, ο γενικευμένος νόμος του Hooke γράφεται ως εξής για τρικλινές μέσον:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix}$$

Για τις διατμητικές παραμορφώσεις ε_4 , ε_5 , ε_6 οφείλει να επισημανθεί ότι αναπαριστούν τεχνικές παραμορφώσεις, οι οποίες συνδέονται με τις πραγματικές παραμορφώσεις μέσω των σχέσεων:

$$\varepsilon_4 = 2\gamma_{23}, \quad \varepsilon_5 = 2\gamma_{13}, \quad \varepsilon_6 = 2\gamma_{12}$$

Στα σύνθετα υλικά λόγω των συμμετριών που παρουσιάζουν ως προς συγκεκριμένους άξονες ή ως προς επίπεδα, ο τανυστής δυσκαμψίας τους εμφανίζει μια απλούστερη μορφή σε σχέση με την προηγηθείσα.

Στην περίπτωση του μονοκλινούς μέσου, όπου έχει ένα επίπεδο συμμετρίας και κάθε διεύθυνση παρουσιάζει τις ίδιες ιδιότητες με τη συμμετρική της ως προς το επίπεδο αυτό, ο τανυστής δυσκαμψίας του μέσου έχει 13 ελαστικές σταθερές και η μορφή του είναι:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & 0 & 0 \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & 0 & 0 \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & 0 & 0 \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & c_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{65} & c_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix}$$

Στην περίπτωση που το υλικό εμφανίζει και δεύτερο επίπεδο συμμετρίας κάθετο ως προς το προηγούμενο τότε ονομάζεται ορθότροπο. Ο τανυστής δυσκαμψίας του μέσου έχει 9 ανεξάρτητες ελαστικές σταθερές και η μορφή του είναι:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix}$$

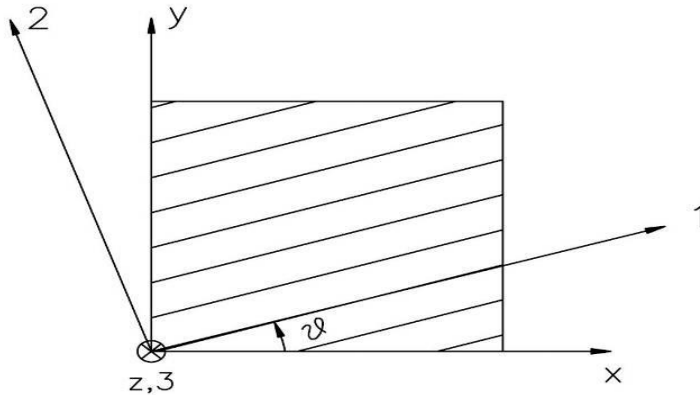
Μια άλλη περίπτωση ελαστικής συμμετρίας είναι όταν το υλικό παρουσιάζει έναν άξονα ως προς τον οποίο όλες οι κάθετες διευθύνσεις είναι συμμετρικές ως προς τις ελαστικές ιδιότητες. Το υλικό που εμφανίζει αυτού του είδους τη συμμετρία ονομάζεται εγκαρσίως ισότροπο. Τέτοια υλικά είναι οι ίνες του άνθρακα το Kevlar κ.α. Ο τανυστής δυσκαμψίας αυτού του μέσου έχει 6 ανεξάρτητες ελαστικές σταθερές και η μορφή του είναι:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{21} & c_{32} & c_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix}$$

3.2 Κλασσική θεωρία Πολύστρωτων Πλακών

Βάση για την Κλασσική θεωρία Πολύστρωτων Πλακών αποτελεί η μελέτη μιας μεμονωμένης στρώσης ορθοτροπικού υλικού, της οποίας το γεωμετρικό και κύριο σύστημα αξόνων του υλικού ορίζονται στο σχήμα που ακολουθεί:

Σχήμα 3.1 Γεωμετρικό σύστημα αξόνων (x,y,z) και κύριο (1,2,3) σύστημα αξόνων του υλικού ορθοτροπικής στρώσης.



Προκειμένου να καταστρωθούν οι καταστατικές εξισώσεις μηχανικής συμπεριφοράς της πολύστρωτης πλάκας, η κάθε στρώση (k) από την οποία αποτελείται το πολύστρωτο υλικό θεωρείται ως ομογενές υλικό για την οποία ισχύει ο νόμος του Hooke, όπου Q_{ij} ο επίπεδος τανυστής δυσκαμψίας και S_{ij} ο επίπεδος τανυστής ενδόσεως, στο κύριο σύστημα αξόνων του υλικού:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{6k} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_6 \end{Bmatrix}$$

όπου οι δυσκαμψίες Q_{ij} δίνονται συναρτήσει των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, ως προς το κύριο σύστημα αξόνων του υλικού, από τις σχέσεις:

$$Q_{11} = E_1 / (1 - \nu_{12} \nu_{21})$$

$$Q_{12} = \nu_{12} E_2 / (1 - \nu_{12} \nu_{21})$$

$$Q_{22} = E_2 / (1 - \nu_{12} \nu_{21})$$

$$Q_{66} = G_{12}$$

Όπου,

E_1 μέτρο ελαστικότητας ως προς διεύθυνση παράλληλη με τις ίνες του στρώματος,

E_2 μέτρο ελαστικότητας ως προς διεύθυνση κάθετη με τις ίνες του στρώματος,

ν_{12} ο μείζων λόγος Poisson,

ν_{21} ο ελάσσων λόγος Poisson,

G_{12} το μέτρο διάτμησης στο επίπεδο 12

και σε τυχαίο σύστημα αξόνων η σχέση τάσεων παραμορφώσεων λαμβάνει τη μορφή:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{s,k} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_s \kappa \end{Bmatrix}$$

όπου οι όροι Q_{ij} ονομάζονται ανηγμένες δυσκαμψίες. Το μητρώο των ανηγμένων δυσκαμψιών μιας ορθοτροπικής στρώσης, με το κύριο σύστημα αξόνων του υλικού προσανατολισμένο κατά γωνία θ ως προς το γεωμετρικό σύστημα αξόνων, ονομάζεται μητρώο ανηγμένης δυσκαμψίας και δίνεται από τη σχέση:

$$[\bar{Q}] = [T]^{-1} [Q][T]$$

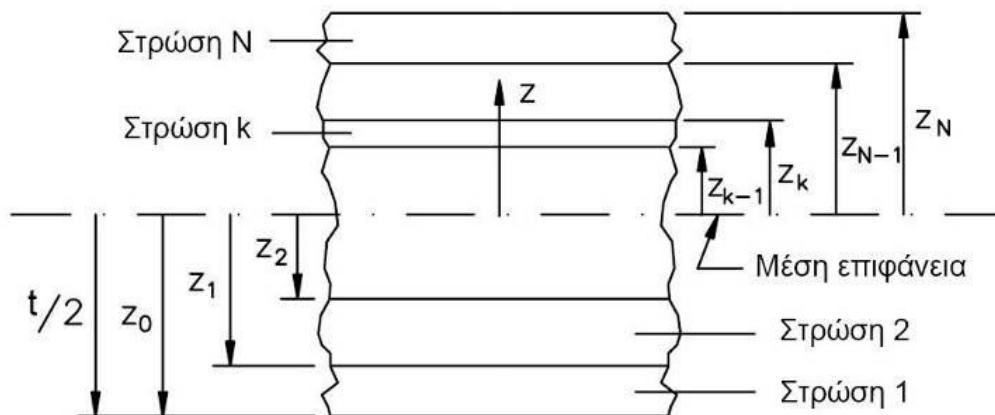
όπου τα μητρώα $[T]^{-1}$ και $[T]$ δίνονται:

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 2\cos\theta\sin\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -2\cos\theta\sin\theta \\ -\cos\theta\sin\theta & \cos\theta\sin\theta & (\cos^2\theta - \sin^2\theta) \end{bmatrix}$$

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & -2\cos\theta\sin\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & 2\cos\theta\sin\theta \\ \cos\theta\sin\theta & -\cos\theta\sin\theta & (\cos^2\theta - \sin^2\theta) \end{bmatrix}$$

Η αρίθμηση των στρώσεων που ακολουθείται κατά την ανάλυση ενός πολύστρωτου υλικού πάχους t , παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί, όπου με N συμβολίζεται ο συνολικός αριθμός των στρώσεων, ενώ με k συμβολίζεται μια τυχαία στρώση.

Σχήμα 3.2 Εγκάρσια τομή ενός πολύστρωτου που αποτελείται από N στρώσεις



Επιπρόσθετα, προκειμένου να εξαχθούν οι καταστατικές εξισώσεις λαμβάνονται υπόψιν μια σειρά θεωρήσεων οι οποίες περιγράφουν τη μηχανική συμπεριφορά της πολύστρωτης πλάκας, οι οποίες παρατίθενται:

- Οι επίπεδες διατομές διατηρούνται επίπεδες όταν υποβάλλονται σε κάμψη βάσει της πρότασης Bernoulli,
- Οι επίπεδες διαστάσεις τη πλάκας είναι πολύ μεγαλύτερες εν συγκρίσει με το πάχος της,
- οι μετατοπίσεις κατά μήκος των κύριων αξόνων της πλάκας είναι πολύ μικρές συγκρινόμενες με το πάχος της,
- οι παραμορφώσεις της πλάκας στο επίπεδο της είναι πολύ μικρότερες της μονάδας $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_s \ll 1$,
- οι εγκάρσιες διατμητικές παραμορφώσεις θεωρούνται αμελητέες (εκτός του επιπέδου xy),
- οι μετατοπίσεις στο επίπεδο xy είναι γραμμικές συναρτήσεις της z μεταβλητής,
- η παραμόρφωση στη διεύθυνση του πάχους είναι αμελητέα.

Για μικρές παραμορφώσεις και περιστροφές της τάξης των $10^\circ - 15^\circ$ οι σχέσεις παραμορφώσεων και μετατοπίσεων γίνονται:

$$\epsilon_{xx} = \Theta u / \Theta x + 1/2(\Theta w / \Theta x)^2$$

$$\epsilon_{xy} = 1/2 (\Theta u / \Theta y + \Theta v / \Theta x + \Theta w / \Theta x \Theta w / \Theta y)$$

$$\epsilon_{xz} = 1/2(\Theta u / \Theta z + \Theta w / \Theta x)$$

$$\epsilon_{yy} = \Theta v / \Theta y + 1/2(\Theta w / \Theta y)^2$$

$$\epsilon_{yz} = 1/2 (\Theta v / \Theta z + \Theta w / \Theta y)$$

$$\epsilon_{zz} = \Theta w / \Theta y$$

λαμβάνοντας την υπόθεση πως $\Theta w / \Theta z = 0$ τότε,

$$\epsilon_{xx} = \Theta u_o / \Theta x + 1/2(\Theta w_o / \Theta x)^2 - z \Theta^2 w_o / \Theta x^2$$

$$\epsilon_{xy} = 1/2 (\Theta u_o / \Theta y + \Theta v_o / \Theta x + \Theta w_o / \Theta x \Theta w_o / \Theta y) - z \Theta^2 w_o / \Theta x \Theta y$$

$$\epsilon_{xz} = 1/2(-\Theta u_o / \Theta z + \Theta w_o / \Theta x) = 0$$

$$\epsilon_{yy} = \Theta v_o / \Theta y + 1/2(\Theta w_o / \Theta y)^2 - z \Theta^2 w_o / \Theta y^2$$

$$\epsilon_{yz} = 1/2 (\Theta w_o / \Theta y + \Theta w / \Theta y) = 0$$

$$\epsilon_{zz} = 0$$

οπότε σε μητρωική μορφή η παραμόρφωση σε οποιαδήποτε επίπεδο κατά τον άξονα Z της πλάκας δίνεται:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_x^o \\ \epsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \end{bmatrix} + Z \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix}$$

Όπου k η καμπυλότητα της πλάκας σαν αποτέλεσμα της κάμψης

Οπότε για τις παραμορφώσεις της στρώσης k της πλάκας ισχύει:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_s \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{ss} \end{bmatrix}_k \left\{ \begin{matrix} \epsilon_x^o \\ \epsilon_y^o \\ \epsilon_s^o \end{matrix} \right\} + Z \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix}$$

3.3 Καταστατικές εξισώσεις στρωσιγενούς πλάκας

Οπότε οι καταστατικές εξισώσεις, οι οποίες συνδέουν τις συνιστώσες των δυνάμεων με τις αντίστοιχες των παραμορφώσεων γράφονται:

$$N_x = \int \sigma_x dA = \int \sigma_x b \cdot dz \text{ όπου,}$$

$$N_x/b = (\int \sigma_x dA)/b = (\int \sigma_x b \cdot dz)/b$$

και σε μητρική μορφή:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{Bmatrix} &= \sum_{k=1}^N \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} dz = \\ &= \sum_{k=1}^N \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{ss} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \epsilon_x^o + z k_x \\ \epsilon_y^o + z k_y \\ \epsilon_s^o + z k_{xy} \end{Bmatrix} dz = \\ \begin{Bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^o \\ \epsilon_y^o \\ \epsilon_s^o \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z k_x \\ z k_y \\ z k_s \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

Όπου:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N Q_{xx}^{(k)} (z_{k+1} - z_k) \quad \text{ή} \quad A_{ij} = \sum_{k=1}^N Q_{xx}^{(k)} t_k$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N Q_{xx}^{(k)} (z_{k+1}^2 - z_k^2) \quad \text{ή} \quad B_{ij} = \sum_{k=1}^N Q_{xx}^{(k)} t_k z_k$$

Όπου $i, j = 1$ έως 6

Ενώ αντίστοιχα οι εξισώσεις για τις καμπτικές ροπές, προκύπτουν
 $M = \int \sigma_x dA = \int \sigma_x b^* dz$, όπου

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{Bmatrix} &= \sum_{k=1}^N \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} z^* dz = \\ &= \sum_{k=1}^N \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{pmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{ss} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 + z k_x \\ \varepsilon_y^0 + z k_y \\ \varepsilon_s^0 + z k_{xy} \end{Bmatrix} z^* dz = \end{aligned}$$

$$\begin{Bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_s^0 \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} z k_x \\ z k_y \\ z k_s \end{Bmatrix}$$

Όπου:

$$D_{xx} = 1/3 \sum_{k=1}^N Q_{xx}^{(k)} (z_{k+1}^3 - z_k^3) \quad \eta$$

$$D_{xx} = \sum_{k=1}^N Q_{xx}^{(k)} (t_k^* z_k^2 + t_k^3/12)$$

3.4 Κριτήρια αστοχίας

Οι περισσότερες πειραματικές μετρούμενες τιμές της αντοχής ενός πολύστρωτου υλικού στηρίζονται σε καταστάσεις μονοδιάστατης φόρτισης, η οποία δεν συναντάται σε πραγματικές συνθήκες στις οποίες καλείται να λειτουργήσει το υλικό. Είναι αναγκαία η ανάπτυξη των κατάλληλων κριτηρίων, τα οποία βασιζόμενα στα πειραματικά αποτελέσματα που προκύπτουν ύστερα από κατάσταση μονοδιάστατης φόρτισης του υλικού, θα βοηθήσουν τον μελετητή να υπολογίσει το κατά πόσο είναι επαρκές από άποψη αντοχής ένα συγκεκριμένο υλικό για μια δεδομένη τασική κατάσταση.

Τα δύο σημαντικότερα κριτήρια αντοχής για πολύστρωτα υλικά σε επίπεδη εντατική κατάσταση είναι:

- το κριτήριο Tsai Hill,
- το κριτήριο Tsai Wu.

τα οποία περιγράφονται ακολούθως.

3.4.1 Κριτήριο Tsai Hill

Το κριτήριο Tsai Hill χαρακτηρίζεται από το ότι συμφωνεί σε ικανοποιητικό βαθμό με τα πειραματικά αποτελέσματα, ενώ ταυτοχρόνως διακρίνεται για το ότι είναι το πλέον απλοποιημένο.

Το κριτήριο αυτό εκφράζεται από τη σχέση:

$$(1) \quad \sigma_x^2/X^2 - \sigma_x\sigma_y/X^2 + \sigma_y^2/Y^2 - \tau_{xy}^2/S^2 < 1$$

όπου:

σ_x, σ_y : οι επιβαλλόμενες ορθές τάσεις στις διευθύνσεις κατά τον άξονα x και y αντιστοίχως,

τ_{xy} : η διατμητική τάση στο επίπεδο xy

X, Y : οι μέγιστες επιτρεπόμενες τάσεις σε εφελκυσμό ή θλίψη παράλληλα προς τις ίνες και κάθετα προς τις ίνες, αντιστοίχως

S : η μέγιστη επιτρεπόμενη διατμητική τάση.

3.4.2 Κριτήριο Tsai Wu

Το κριτήριο Tsai Wu χαρακτηρίζεται ως περισσότερο ακριβές από το αντίστοιχο κριτήριο Tsai Hill. Αυτό οφείλεται στο ότι περιλαμβάνει περισσότερα μεγέθη στην τελική του εξίσωση, η οποία δίδεται από τη σχέση:

$$(2) \quad F_1\sigma_x + F_2\sigma_y + F_6\tau_{xy} + F_{11}\sigma_x^2 + F_{22}\sigma_y^2 + F_{66}\tau_{xy}^2 + 2F_{12}\sigma_x\sigma_y < 1$$

σ_x, σ_y : οι επιβαλλόμενες ορθές τάσεις στις διευθύνσεις κατά τον άξονα x και y αντιστοίχως,

τ_{xy} : η διατμητική τάση στο επίπεδο xy

Όπου οι συντελεστές δίνονται από τις σχέσεις:

$$F_1 = 1/X_t + 1/X_c ,$$

$$F_2 = 1/Y_t + 1/Y_c ,$$

$$F_6 = 0 ,$$

$$F_{11} = - 1/X_t X_c ,$$

$$F_{22} = - 1/Y_t Y_c ,$$

$$F_{66} = 1/S^2 ,$$

$$F_{12} = 1/2\sigma^2 [1 - (1/X_t + 1/X_c + 1/Y_t + 1/Y_c)\sigma + (1/X_t X_c + 1/Y_t Y_c)\sigma^2]$$

Όπου

X_t η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση σε εφελκυσμό παράλληλα προς τις ίνες

X_c η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση σε θλίψη παράλληλα προς τις ίνες

Y_t η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση σε εφελκυσμό κάθετα προς τις ίνες

Y_c η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση σε θλίψη κάθετα προς τις ίνες

S η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση σε διάτμηση

σ η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση σε διαξονική φόρτιση

Κεφάλαιο 4

4.1 Υπολογισμός των μηχανικών ιδιοτήτων

Στο σημείο αυτό της διπλωματικής εργασίας ακολουθεί το πειραματικό μέρος, όπου εξετάζεται τμήμα γάστρας πολυεστερικού σκάφους ενισχυμένο με ίνες γυαλιού τύπου E.

Εικόνα 4.1



Εικόνα 4.2



Το προς μελέτη υλικό έχει την ακόλουθη σύνθεση:

Πίνακας 4.1

Στρώμα	Υλικό	Βάρος γυαλιού [kg/m²]	E Μέτρο Ελαστικότητας [GPa]	σ_{rup} [MPa]	ν_f	G Μέτρο διάτμησης [GPa]
1 ^ο	CSM	0.300	8.350	113	0.3	3.211
2 ^ο	CSM	0.450	11.130	151	0.3	4.280
3 ^ο	CSM	0.450	11.130	151	0.3	4.280
4 ^ο	CSM	0.450	11.130	151	0.3	4.280
5 ^ο	CSM	0.450	11.130	151	0.3	4.280
6 ^ο	Woven Roving	0.900	11.130	139	--	---
7 ^ο	CSM	0.450	11.130	151	0.3	4.280
8 ^ο	CSM	0.450	11.130	151	0.3	4.280

Για τον προσδιορισμό του μέτρου διάτμησης βάσει της σχέσης:

$$G = E/2(1+\nu)$$

Όπου η πυκνότητα για ίνες γυαλιού τύπου E είναι $\rho_f = 2600 \text{ kg/m}^3$

Το μέτρο ελαστικότητας κατά μήκος των ινών και κάθετα ως προς αυτές λαμβάνεται ίσο με $E_f = 74 \text{ GPa}$

Το μέτρο διάτμησης των ινών γυαλιού τύπου E λαμβάνεται $G_f = 30 \text{ GPa}$.

Οι αντίστοιχες τιμές για την πολυεστερική μήτρα λαμβάνονται:

$$E_m = 4.0 \text{ GPa}$$

$$G_m = 1.40 \text{ GPa}$$

4.2 Υπολογισμός του πάχους των στρωμάτων

Το πάχος των στρωμάτων θα υπολογισθεί με τους ακόλουθους τρόπους:

α). Με βάση τη σχέση αμερικανικής εταιρείας κατασκευής ενισχυμένων πλαστικών (Owners Corning Fiberglass Corp.),

όπου το πάχος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$t = W \cdot Z / 100$$

t το πάχος σε ίντσες,

W: το βάρος του υλικού σε oz/ft²

Z: συντελεστής περιεκτικότητας

Πίνακας 4.2

Στρώμα	Βάρος [oz/ft ²]	Z συντελεστής περιεκτικότητας	g _c % κατά βάρος περιεκτικότητα των ινών γυαλιού επί της %	Βάρος [kg/m ²]	t το πάχος [in]	t το πάχος [mm]
1 ^ο	0.983	3.174	28	0.300	0.031	0.793
2 ^ο	1.475	2.420	35	0.450	0.036	0.906
3 ^ο	1.475	2.420	35	0.450	0.036	0.906
4 ^ο	1.475	2.420	35	0.450	0.036	0.906
5 ^ο	1.475	2.420	35	0.450	0.036	0.906
6 ^ο	2.949	2.420	35	0.900	0.071	1.813
7 ^ο	1.475	2.420	35	0.450	0.036	0.906
8 ^ο	1.475	2.420	35	0.450	0.036	0.906

β). Με βάση τους κανονισμούς του Ιαπωνικού Νηογνώμονα (NIPPON),

όπου χρησιμοποιείται η σχέση: $t = W_G/1000 \cdot \gamma_R \cdot G + W_G/1000 \cdot \gamma_G + W_G/1000 \cdot \gamma_R$

όπου:

t: το πάχος σε mm,

W_G : το βάρος του υλικού σε kg/m^2 ,

G: επί της % περιεκτικότητα σε γυαλί κατά βάρος

γ_R : το ειδικό βάρος της στερεοποιημένης ρητίνης,

γ_G : το ειδικό βάρος των ενισχύσεων του υλικού.

Πίνακας 4.3

Στρώμα	W_G βάρος του υλικού [kg/m^2]	γ_R [gr/cm^3]	γ_G [gr/cm^3]	G	t [mm]
1°	0.300	1.2	2.6	0.27659574	0.769
2°	0.450	1.2	2.6	0.35135135	0.865
3°	0.450	1.2	2.6	0.35135135	0.865
4°	0.450	1.2	2.6	0.35135135	0.865
5°	0.450	1.2	2.6	0.35135135	0.865
6°	0.900	1.2	2.6	0.35135135	1.731
7°	0.450	1.2	2.6	0.35135135	0.865
8°	0.450	1.2	2.6	0.35135135	0.865

γ). Σύμφωνα με τους κανονισμούς του Αμερικανικού Νηογνώμονα (ABS),

Το πάχος μιας στρώσης που αποτελείται από στερεοποιημένη ρητίνη και ενισχύσεις τύπου C.S.M. έχει 0.25 mm ανά 0.10 kg/m^2 βάρους του υλικού.

Το πάχος μιας στρώσης που αποτελείται από στερεοποιημένη ρητίνη και ενισχύσεις τύπου Woven Roving ανέρχεται σε 0.16 mm ανά 0.10 kg/m^2 βάρους του υλικού.

Οι τιμές αυτές αποτελούν τις μέσες τιμές και ενδέχεται να υπάρχουν αποκλίσεις έως 15% σε σχέση με τις πραγματικές τιμές.

Πίνακας 4.4

Στρώμα	W_G βάρος του υλικού [kg/m²]	Συντελεστής	t [mm]
1^ο	0.300	0.25	0.750
2^ο	0.450	0.25	1.125
3^ο	0.450	0.25	1.125
4^ο	0.450	0.25	1.125
5^ο	0.450	0.25	1.125
6^ο	0.900	0.16	1.440
7^ο	0.450	0.25	1.125
8^ο	0.450	0.25	1.125

δ). Σύμφωνα με τους κανονισμούς του Βρετανικού Νηογνώμονα (L.R.of Shipping),

Όπου το πάχος προσδιορίζεται με βάση τη σχέση:

$$t = W/3072 * [(2.56/g_c) - 1]$$

όπου

t: το πάχος σε mm,

W_G: το βάρος του υλικού σε kg/m²,

g_c: η περιεκτικότητα σε γυαλί κατά βάρος

Πίνακας 4.5

Στρώμα	W _G βάρος του υλικού [kg/m ²]	g _c	t [mm]
1 ^ο	0.300	0.276595745	0.771
2 ^ο	0.450	0.351351351	0.868
3 ^ο	0.450	0.351351351	0.868
4 ^ο	0.450	0.351351351	0.868
5 ^ο	0.450	0.351351351	0.868
6 ^ο	0.900	0.351351351	1.736
7 ^ο	0.450	0.351351351	0.868
8 ^ο	0.450	0.351351351	0.868

ε). Βάση της σχέσης: $h = m_{of}/V_f \cdot \rho_f$

όπου:

h το πάχος σε mm,

m_{of} το βάρος του υλικού σε kg/m^2 ,

V_f η περιεκτικότητα σε γυαλί κατ'όγκο,

ρ_f το ειδικό βάρος του πολυεστέρα σε Kg/m^3

Πίνακας 4.6

Στρώμα	V_f	ρ_f [Kg/m^3]	m_{of} το βάρος του υλικού σε [kg/m^2]	h [mm]
1°	0.15	2600	0.300	0.769
2°	0.20	2600	0.450	0.865
3°	0.20	2600	0.450	0.865
4°	0.20	2600	0.450	0.865
5°	0.20	2600	0.450	0.865
6°	0.20	2600	0.900	1.731
7°	0.20	2600	0.450	0.865
8°	0.20	2600	0.450	0.865

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των μεθόδων για τον προσδιορισμό του πάχους των στρώματων.

Πίνακας 4.7

Στρώμα	1 ^η Μέθοδος t [mm]	2 ^η Μέθοδος t [mm]	3 ^η Μέθοδος t [mm]	4 ^η Μέθοδος t [mm]	5 ^η Μέθοδος t [mm]
1 ^ο	0.793	0.769	0.750	0.771	0.769
2 ^ο	0.906	0.865	1.125	0.868	0.865
3 ^ο	0.906	0.865	1.125	0.868	0.865
4 ^ο	0.906	0.865	1.125	0.868	0.865
5 ^ο	0.906	0.865	1.125	0.868	0.865
6 ^ο	1.813	1.731	1.440	1.736	1.731
7 ^ο	0.906	0.865	1.125	0.868	0.865
8 ^ο	0.906	0.865	1.125	0.868	0.865

Από τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα προκύπτει πως οι τιμές για τα πάχη των στρώσεων του υλικού που προέκυψαν εφαρμόζοντας διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού δεν εμφανίζουν μεγάλες αποκλίσεις, εκτός από τις τιμές που υπολογίστηκαν με βάση τη τρίτη μέθοδο (τους κανονισμούς του Αμερικανικού Νηογνώμονα). Στη συνέχεια των υπολογισμών θα βασιστούμε στα αποτελέσματα που προέκυψαν από την πέμπτη μέθοδο.

4.3 Υπολογισμός των E, G και του λόγου Poisson ν του 6^{ου} στρώματος

Το 6^ο στρώμα του υλικού αποτελείται από ορθότροπο υαλούφασμα WR. Για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του, το υαλούφασμα θεωρείται ισορροπημένο και ότι ισοδυναμεί με δύο στρώσεις Unidirectional Roving η κάθε μια στο μισό του συνολικού πάχους του στρώματος. Οι ίνες του σχηματίζουν γωνία 90°.

- Το μέτρο ελαστικότητας κατά τη διεύθυνση των ινών προσδιορίζεται:

$$E_l = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \Rightarrow E_l = 18 \text{ GPa}$$

όπου

$$E_f = 74 \text{ GPa}$$

$$E_m = 4 \text{ GPa}$$

$$V_f = 0.2$$

$$V_m = 0.8$$

- Το μέτρο ελαστικότητας κάθετα στη διεύθυνση των ινών προσδιορίζεται:

$$E_t = E_m [1/(V_m + V_f (E_m/E_{ft}))] \Rightarrow \mathbf{E_t = 4.933 \text{ GPa}}$$

όπου

$$E_{ft} = 74 \text{ GPa}$$

$$E_m = 4 \text{ GPa}$$

$$V_f = 0.2$$

$$V_m = 0.8$$

- Το μέτρο διάτμησης υπολογίζεται:

$$G_{lt} = G_m [1/(V_m + V_f (G_m/G_{flt}))] \Rightarrow \mathbf{G_{lt} = 1.730 \text{ GPa}}$$

Όπου:

$$G_{flt} = 30 \text{ GPa}$$

$$G_m = 1.40 \text{ GPa}$$

$$V_f = 0.2$$

$$V_m = 0.8$$

- Ο λόγος Poisson προσδιορίζεται:

$$\nu_{lt} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \Rightarrow \mathbf{\nu_{lt} = 0.37}$$

Όπου:

$$V_f = 0.2$$

$$V_m = 0.8$$

$$\nu_f = 0.25$$

$$\nu_m = 0.4$$

4.3.1. Πρώτος τρόπος υπολογισμού των μεγεθών του 6^{ου} στρώματος WR

Στη συνέχεια με βάση τα παραπάνω υπολογισθέντα μεγέθη θα προσδιοριστούν με τρεις διαφορετικούς τρόπους για το 6^ο στρώμα τα μεγέθη: E_1 , E_2 , G_{12} , ν_{12} .

Βάσει των σχέσεων ισχύει:

$$E_1 \approx k \cdot E_l + (1-k) \cdot E_t \Rightarrow E_1 \approx 11466.5 \text{ MPa}$$

$$E_2 \approx (1-k) \cdot E_l + k \cdot E_t \Rightarrow E_2 \approx 11466.5 \text{ MPa}$$

$$G_{12} \approx G_{lt} \Rightarrow G_{12} = 1730 \text{ MPa}$$

$$\nu_{12} = \nu_{lt} / [k + (1-k)E_l/E_t] \Rightarrow \nu_{12} = 0.159$$

$$k = n_1 / (n_1 + n_2) = 0.5$$

όπου

n_1 ο αριθμός των ινών στο στημόνι του νήματος ανά μέτρο (warp yarns)

n_2 ο αριθμός των ινών στο γέμισμα του νήματος ανά μέτρο (fill yarns)

4.3.2. Δεύτερος τρόπος υπολογισμού των μεγεθών του 6^{ου} στρώματος WR

Με βάση το Βρετανικό Νηογνώμονα το μέτρο ελαστικότητας προσδιορίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$E = (30G_c - 0.5) \cdot 10^{-3} = 10.040 \text{ GPa}$$

Όπου G_c η περιεκτικότητα σε γυαλί κατά βάρος του στρώματος, η οποία είναι:

$$G_c = 0.351351$$

4.3.3. Τρίτος τρόπος υπολογισμού των μεγεθών του 6^{ου} στρώματος WR

Αρχικά για να υπολογισθούν οι όροι:

$$(1/h)A_{ij} = Q_{ij}^0 \cdot p^0 + Q_{ij}^{90} \cdot p^{90}$$

Όπου:

p^0 : το ποσοστό των στρωμάτων στη διεύθυνση των 0° .

p^{90} : το ποσοστό των στρωμάτων στη διεύθυνση των 90° .

θα πρέπει να προσδιορισθούν τα Q_{ij}^θ σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$Q_{xx}^{\theta} = Q_{xx} * c^4 + 2 * (Q_{xy} + 2 * Q_{ss}) * s^2 * c^2 + Q_{yy} * s^4$$

$$Q_{xy}^{\theta} = (Q_{xx} + Q_{yy} - 4 * Q_{ss}) * s^2 * c^2 + Q_{xy} * (s^4 + c^4)$$

$$Q_{yy}^{\theta} = Q_{xx} * s^4 + 2 * (Q_{xy} + 2 * Q_{ss}) * s^2 * c^2 + Q_{yy} * c^4$$

$$Q_{xs}^{\theta} = (Q_{xx} - Q_{xy} - 2 * Q_{ss}) * s * c^3 + (Q_{xy} - Q_{yy} + 2 * Q_{ss}) * s^3 * c$$

$$Q_{ys}^{\theta} = (Q_{xx} - Q_{xy} - 2 * Q_{ss}) * s^3 * c + (Q_{xy} - Q_{yy} + 2 * Q_{ss}) * s * c^3$$

$$Q_{ss}^{\theta} = (Q_{xx} + Q_{yy} - 2 * Q_{xy} - 2 * Q_{ss}) * s^2 * c^2 + Q_{ss} * (s^4 + c^4)$$

Αντικαθιστώντας,

$$E_1 = 18 \text{ GPa}$$

$$E_t = 4.933 \text{ GPa}$$

$\nu_{lt} = 0.37$ προκύπτει από τη σχέση

$$\nu_{tl} = \nu_{lt} * E_t / E_1 \Rightarrow \nu_{tl} = 0.1014$$

οπότε υπολογίζονται τα Q_{xx} , Q_{xy} , Q_{yy} , Q_{ss} βάσει των σχέσεων:

$$Q_{xx} = E_1 / (1 - \nu_{lt} * \nu_{tl}) \Rightarrow Q_{xx} = 18701.7 \text{ MPa ή } 18.702 \text{ GPa}$$

$$Q_{xy} = \nu_{lt} * E_t / (1 - \nu_{lt} * \nu_{tl}) \Rightarrow Q_{xy} = 1896.4 \text{ MPa ή } 1.896 \text{ GPa}$$

$$Q_{yy} = E_t / (1 - \nu_{lt} * \nu_{tl}) \Rightarrow Q_{yy} = 5125.3 \text{ MPa ή } 5.125 \text{ GPa}$$

$$Q_{ss} = G_{lt} = 1730 \text{ MPa ή } 1.73 \text{ GPa}$$

- Για γωνία $\theta = 0^\circ$ προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

$$Q_{xx}^0 = 18.701 \text{ GPa}$$

$$Q_{xy}^0 = 1.896 \text{ GPa}$$

$$Q_{yy}^0 = 5.125 \text{ GPa}$$

$$Q_{xs}^0 = 0 \text{ GPa}$$

$$Q_{ys}^0 = 0 \text{ MPa}$$

$$Q_{ss}^0 = 1.730 \text{ GPa}$$

- Για γωνία $\theta = 90^\circ$ προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

$$Q_{xx}^{90} = 5125 \text{ MPa ή } 5.125 \text{ GPa}$$

$$Q_{xy}^{90} = 1896 \text{ MPa ή } 1.896 \text{ GPa}$$

$$Q_{yy}^{90} = 18701 \text{ MPa ή } 18.701 \text{ GPa}$$

$$Q_{xs}^{90} = 0 \text{ GPa}$$

$$Q_{ys}^{90} = 0 \text{ GPa}$$

$$Q_{ss}^{90} = 1730 \text{ MPa ή } 1.730 \text{ GPa}$$

Όπου αν θεωρήσω:

$p^0 = 0.5$ το ποσοστό των στρωμάτων στη διεύθυνση των 0° .

$p^{90} = 0.5$ το ποσοστό των στρωμάτων στη διεύθυνση των 90° .

τότε σύμφωνα με τη σχέση

$$(1/h)A_{ij} = Q_{ij}^0 * p^0 + Q_{ij}^{90} * p^{90}$$

Προκύπτουν οι όροι:

$$(1/h)A_{xx} = 11913.5 \text{ MPa ή } 11.913 \text{ GPa}$$

$$(1/h)A_{xy} = 1896.4 \text{ MPa ή } 1.896 \text{ GPa}$$

$$(1/h)A_{yy} = 11913.5 \text{ MPa ή } 11.913 \text{ GPa}$$

$$(1/h)A_{xs} = 0 \text{ GPa}$$

$$(1/h)A_{ys} = 0 \text{ GPa}$$

$$(1/h)A_{ss} = 1730 \text{ MPa ή } 1.730 \text{ GPa}$$

Οπότε σε μητρική μορφή:

$$1/h[A] = \begin{pmatrix} 11913 & 1896 & 0 \\ 1896 & 11913 & 0 \\ 0 & 0 & 1730 \end{pmatrix}$$

Αντιστρέφοντας προκύπτει το μητρώο:

$$h[A]^{-1} = \begin{pmatrix} 1/11628 & -0.163/11628 & 0 \\ -0.163/11628 & 1/11628 & 0 \\ 0 & 0 & 1/1730 \end{pmatrix}$$

Οπότε οι τιμές που λαμβάνονται παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 4.8

E₁	11.628 GPa
E₂	11.628 GPa
G₁₂	1.730 GPa
ν₁₂	0.163

Οι τιμές που προέκυψαν από τη μέθοδο αυτή, είναι αυτές που θα χρησιμοποιηθούν στους υπολογισμούς που θα ακολουθήσουν.

4.4 Υπολογισμός ιδιοτήτων της σύνθετης διατομής των 8 στρωμάτων

Για τον προσδιορισμό των μέτρων ελαστικότητας θα χρησιμοποιηθεί α). ο νόμος των μιγμάτων, β). η εξίσωση του Christensen, γ). ο υπολογισμός θεωρώντας κάθε μια στρώση του υλικού ως ομογενή και ισότροπη.

4.4.1. Ο νόμος των μιγμάτων

Το μέτρο ελαστικότητας ενός σύνθετου υλικού εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας των ινών και την τιμή του μέτρου ελαστικότητας της μήτρας, καθώς και από την περιεκτικότητα κατ' όγκο των ινών και της μήτρας στο σύνθετο υλικό. Η αριθμητική σχέση που εκφράζει τα παραπάνω είναι:

$$E = E_m \cdot V_m + n \cdot E_f \cdot V_f$$

Όπου:

$n = 0.375$ για ίνες τυχαίας διεύθυνσης

E_f το μέτρο ελαστικότητας των ινών 74 GPa

E_m το μέτρο ελαστικότητας του υλικού της μήτρας 4 GPa

V_f η κατ' όγκο περιεκτικότητα των ινών 0.196

V_m η κατ' όγκο περιεκτικότητα της μήτρας 0.804

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη στη παραπάνω σχέση προκύπτει ότι:

$$E = 8.655 \text{ GPa}$$

4.4.2. Η εξίσωση Christensen

Η θεωρία στην οποία στηρίζεται η εξίσωση αυτή αφορά ένα τετρα ισοτροπικό μοντέλο μαζί με μια μέση γεωμετρική τεχνική ώστε να προβλέπει μια ασυμπτωτική τιμή για το μέτρο ελαστικότητας των σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες. Στην περίπτωση των δύο διαστάσεων η εξίσωση αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$E = (1 - V_g) \cdot E_r / 3 + V_g \cdot E_g / 3 + (19/17) \cdot E_r \cdot \{ [E_g \cdot (1 + V_g) + E_r \cdot (1 - V_g)] / [E_g \cdot (1 - V_g) + E_r \cdot (1 + V_g)] \}$$

Όπου:

$E_g = 74$ GPa, το μέτρο ελαστικότητας των ινών

$E_r = 4$ GPa, το μέτρο ελαστικότητας της μήτρας

$V_g = 0.196$, η κατ' όγκο περιεκτικότητα των ινών

Οπότε αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση προκύπτει πως

$$E = 12.286 \text{ GPa}$$

4.4.3. Υπολογισμός ως ομογενούς και ισότροπου υλικού

Αν τα στρώματα της κατασκευής θεωρηθούν ως ομογενή και ισότροπα τότε ισχύει

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

οπότε το E_{ij} για κάθε στρώμα είναι ουσιαστικά ίσο με E οπότε τα μητρώα A , B , D , απλοποιούνται σε νούμερα. Τότε ισχύει:

$$A = \sum_{k=1}^N E_k \cdot t_k$$

$$B = \sum_{k=1}^N E_k \cdot t_k \cdot Z_k$$

$$D = \sum_{k=1}^N E_k \cdot t_k \cdot (Z_k^2 + t_k^2 / 12)$$

Ο προσδιορισμός των τιμών στις οποίες απλουστεύονται τα μητρώα γίνεται στον πίνακα 4.9.

Πίνακας 4.9

Στρώμα	E_k [GPa]	$v_{csm}-$ v_{wr}	t_k [m]	z_k [m]	$(z_k^2+t_k^2/12)$ [m ²]	Q_{11} [N/m ²]
1°	8.350	0.300	0.000769	-0.00356	1.27377E-05	9175824176
2°	11.130	0.300	0.000865	-0.00274	7.5962E-06	12230769231
3°	11.130	0.300	0.000865	-0.00188	3.59452E-06	12230769231
4°	11.130	0.300	0.000865	-0.00101	1.09061E-06	12230769231
5°	11.130	0.300	0.000865	-0.00015	8.44957E-08	12230769231
6°	11.628	0.163	0.001731	0.001149	1.57088E-06	11945376714
7°	11.130	0.300	0.000865	0.002448	6.05282E-06	12230769231
8°	11.130	0.300	0.000865	0.003313	1.10378E-05	12230769231

Στρώμα	$Q_{11}*t_k$ [N/m]	$Q_{11}*t_k*z_k$ [N]	$Q_{11}*t_k*(z_k^2+t_k^2/12)$ [Nm]
1°	7058326.289	-25142.34	89.9071365
2°	10584319.530	-29051.57	80.40057045
3°	10584319.530	-19892.07	38.04549691
4°	10584319.530	-10732.56	11.54341674
5°	10584319.530	-1573.05	0.894329947
6°	20674690.470	23764.65	32.47743949
7°	10584319.530	25905.47	64.06502981
8°	10584319.530	35064.98	116.8279165
Σύνολο	91238933.92	-1656.50	434.1613364

Οπότε:

A = 91238933.92 N/m

B = - 1656.50 N

D = 434.1613364 Nm

Για τον προσδιορισμό των στηλών που αναφέρονται στα t_k , z_k , απαιτείται ο προσδιορισμός του κέντρου βάρους της διατομής. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η ισοδύναμη διατομή με μέτρο ελαστικότητας 11130 MPa.

Πίνακας 4.10

Στρώμα	E_k [GPa]	t_k [mm]	Απόσταση από το $D_{reference}$ [mm]	$E_{reference}$ [GPa]	$E_k/E_{reference}$	$t_k * E_k / E_{reference}$ [mm]	$t_k * D_{reference} * E_k / E_{reference}$ [mm ²]
1°	8.350	0.769	7.308	11.130	0.7502	0.5771	4.2172
2°	11.130	0.865	6.490	11.130	1.0000	0.8654	5.6167
3°	11.130	0.865	5.625	11.130	1.0000	0.8654	4.8678
4°	11.130	0.865	4.760	11.130	1.0000	0.8654	4.1189
5°	11.130	0.865	3.894	11.130	1.0000	0.8654	3.3700
6°	11.628	1.731	2.596	11.130	1.0447	1.8082	4.6944
7°	11.130	0.865	1.298	11.130	1.0000	0.8654	1.1233
8°	11.130	0.865	0.433	11.130	1.0000	0.8654	0.3744

Οπότε από τις δύο τελευταίες στήλες αθροίζοντας προκύπτει:

$$\sum_{k=1}^N t_k * E_k / E_{reference} = 7.5776 \text{ mm}$$

$$\sum_{k=1}^N t_k * D_{reference} * E_k / E_{reference} = 28.3828 \text{ mm}^2$$

άρα

$$Z_{κ.β.} = \left(\sum_{k=1}^N t_k * D_{reference} * E_k / E_{reference} \right) / \left(\sum_{k=1}^N t_k * E_k / E_{reference} \right) =>$$

$$Z_{κ.β.} = 3.746 \text{ mm}$$

4.4.3.1 Καθαρός εφελκυσμός

Στην περίπτωση του καθαρού εφελκυσμού έχουμε $M = 0$, οπότε

$$0 = B \cdot \varepsilon^0 + D \cdot k \text{ οπότε } k = -(B \cdot \varepsilon^0)/D$$

Ακόμα ισχύει:

$$N = A \cdot \varepsilon^0 + B \cdot (-B/D) \cdot \varepsilon^0 \Rightarrow N = \{(A \cdot D - B^2)/D\} \cdot \varepsilon^0$$

Θεωρώντας τη διατομή ομογενή με υλικό ισοδύναμης αντοχής, μέτρου ελαστικότητας E_c και πάχους t τότε ο νόμος του Hooke γράφεται:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma = E_c \cdot \varepsilon \\ \text{και } N = \sigma \cdot t \end{array} \right\} \Rightarrow E_c = \sigma / \varepsilon$$
$$\left. \right\} \Rightarrow E_c = N / (t \cdot \varepsilon)$$

αντικαθιστώντας σύμφωνα με τα παραπάνω:

$$E_c = \{(A \cdot D - B^2)/D\} \cdot 1/t$$

Για τον προσδιορισμό του Μέτρου Ελαστικότητας σε εφελκυσμό

Αν αντικαταστήσουμε τα A , B , D , t που έχουν υπολογιστεί προηγουμένως

$$A = 912138933.92 \text{ N/m}$$

$$B = -1656.50 \text{ N}$$

$$D = 434.1613364 \text{ Nm}$$

$$t = 0.00769 \text{ m}$$

προκύπτει

$$E_c = 11.864 \text{ GPa}$$

4.4.3.2. Καθαρή κάμψη

Στην περίπτωση που έχουμε καθαρή κάμψη ισχύει $N = 0$, οπότε

$$N = A \cdot \varepsilon^0 + B \cdot k \Rightarrow 0 = A \cdot \varepsilon^0 + B \cdot k$$

και

$$M = B \cdot (-B/A) \cdot k + D \cdot k$$

Όπου για ομογενές υλικό με συμμετρική διατομή $B = 0$, οπότε και η παραμόρφωση στη μεσαία επιφάνεια θα είναι ίση με μηδέν, άρα $\varepsilon^0 = 0$.

$$M = B \cdot \varepsilon^0 + D \cdot k \Rightarrow D = M/k$$

$$\text{Άρα } D = E_c \cdot t^3/12 \Rightarrow E_c = D \cdot 12/t^3$$

οπότε αντικαθιστώντας

$$E_c = \{(A \cdot D - B^2) / A\} \cdot 12 / t^3$$

Αν αντικαταστήσουμε τα A, B, D, t που έχουν υπολογιστεί προηγουμένως

$$A = 912138933.92 \text{ N/m}$$

$$B = -1656.50 \text{ N}$$

$$D = 434.1613364 \text{ Nm}$$

$$t = 0.00769 \text{ m}$$

προκύπτει:

$$E_c = 11.456 \text{ GPa}$$

4.4.4. Υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας με βάση τους τύπους Lloyd's

- Στην περίπτωση του εφελκυσμού χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$E_T = (37 \cdot G_c - 4.75) \cdot 10^3$$

Όπου $G_c = 0.343874$ η περιεκτικότητα σε γυαλί κατά βάρος του πολυστρώματος

Λαμβάνουμε:

$$E_T = 7973 \text{ MPa ή } 7.973 \text{ GPa}$$

- Στην περίπτωση της κάμψης χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$E_F = (33.4 \cdot G_c^2 + 2.2) \cdot 10^3$$

Όπου $G_c = 0.343874$ η περιεκτικότητα σε γυαλί κατά βάρος του πολυστρώματος

Λαμβάνουμε: $E_F = 6150 \text{ MPa ή } 6.150 \text{ GPa}$

4.4.5 Υπολογισμός του μητρώου $\mathbf{h}^*[\mathbf{A}]^{-1}$

Οι όροι του μητρώου $1/\mathbf{h}^*[\mathbf{A}]$ δίνονται από τη σχέση:

$$1/\mathbf{h}^*A_{ij} = Q_{ij}^{\text{csm300}} \cdot p^{\text{csm300}} + Q_{ij}^{\text{csm450}} \cdot p^{\text{csm450}} + Q_{ij}^{\text{wr900}} \cdot p^{\text{wr900}}$$

Όπου:

$$p^{\text{csm300}} = 1 \cdot 0.769/7.69 = 0.1 \text{ (για στρώση c.s.m., πάχους 0.769 mm, 0.300 kg/m}^2\text{)}$$

$$p^{\text{csm450}} = 6 \cdot 0.865/7.69 = 0.6749 \text{ (6 στρώσεις c.s.m., πάχους 0.865 mm η κάθε μια, 0.450 kg/m}^2\text{)}$$

$$p^{\text{wr900}} = 1 \cdot 1.731/7.69 = 0.2251 \text{ (1 στρώση W.R. πάχους 1.731 mm, 0.900 kg/m}^2\text{)}$$

συνολικό πάχος υλικού 7.69 mm

- Για το στρώμα c.s.m., πάχους 0.769 mm, 0.300 kg/m²

$$Q_{11}^{\text{csm300}} = E_{\text{csm300}}/(1-v_{\text{csm300}}^2) = 8350\text{MPa}/(1-0.3^2) = 9175.8 \text{ MPa ή } 9.176 \text{ GPa}$$

$$Q_{22}^{\text{csm300}} = Q_{11}^{\text{csm300}} = 9175.8 \text{ MPa ή } 9.176 \text{ GPa}$$

$$Q_{12}^{\text{csm300}} = v_{\text{csm300}} \cdot E_{\text{csm300}}/(1-v_{\text{csm300}}^2) = 0.3 \cdot 8350\text{MPa}/(1-0.3^2) = 2752.8 \text{ MPa ή } 2.753 \text{ GPa}$$

$$Q_{16}^{\text{csm300}} = 0 \text{ GPa}$$

$$Q_{26}^{\text{csm300}} = 0 \text{ GPa}$$

$$Q_{66}^{\text{csm300}} = G^{\text{csm300}} = 3211.54 \text{ MPa ή } 3.212 \text{ GPa}$$

- Για το στρώμα c.s.m., πάχους 0.865 mm, 0.450 kg/m²

$$Q_{11}^{\text{csm450}} = E_{\text{csm450}}/(1-v_{\text{csm450}}^2) = 11130 \text{ MPa}/(1-0.3^2) = 12230.8 \text{ MPa ή } 12.231 \text{ GPa}$$

$$Q_{22}^{\text{csm450}} = Q_{11}^{\text{csm450}} = 12230.8 \text{ MPa ή } 12.231 \text{ GPa}$$

$$Q_{12}^{\text{csm450}} = v_{\text{csm450}} \cdot E_{\text{csm450}}/(1-v_{\text{csm450}}^2) = 0.3 \cdot 11130 \text{ MPa}/(1-0.3^2) = 3669.2 \text{ MPa ή } 3.669 \text{ GPa}$$

$$Q_{16}^{\text{csm450}} = 0 \text{ GPa}$$

$$Q_{26}^{\text{csm450}} = 0 \text{ GPa}$$

$$Q_{66}^{\text{csm450}} = G^{\text{csm450}} = 4280.77 \text{ MPa ή } 4.281 \text{ GPa}$$

- Για το στρώμα W.R. πάχους 1.731 mm, 0.900 kg/m²

$$Q_{11}^{\text{wr900}} = E_1/(1-v_{12}^2) = 11628 \text{ MPa}/(1-0.163^2) = 11945.4 \text{ MPa ή } 11.945 \text{ GPa}$$

$$Q_{22}^{\text{wr900}} = Q_{11}^{\text{wr900}} = 11945.4 \text{ MPa ή } 11.945 \text{ GPa}$$

$$Q_{12}^{wr900} = \nu_{12} * E_1 / (1 - \nu_{12}^2) = 0.163 * 11628 \text{ MPa} / (1 - 0.163^2) = 1947.1 \text{ MPa} \text{ ή } 1.947 \text{ GPa}$$

$$Q_{16}^{wr900} = 0 \text{ GPa}$$

$$Q_{26}^{wr900} = 0 \text{ GPa}$$

$$Q_{66}^{wr900} = G_{12} = 1730 \text{ MPa} \text{ ή } 1.730 \text{ GPa}$$

Οπότε οι όροι διαμορφώνονται ως εξής:

$$1/h * A_{11} = 11861.1 \text{ MPa}$$

$$1/h * A_{12} = 3189.9 \text{ MPa}$$

$$1/h * A_{22} = 11861.1 \text{ MPa}$$

$$1/h * A_{16} = 0 \text{ MPa}$$

$$1/h * A_{26} = 0 \text{ MPa}$$

$$1/h * A_{66} = 3599.7 \text{ MPa}$$

$$\text{Και σε μορφή μητρώου: } 1/h[A] = \begin{pmatrix} 11861.1 & 3189.9 & 0 \\ 3189.9 & 11861.1 & 0 \\ 0 & 0 & 3599.7 \end{pmatrix}$$

αντιστρέφοντας

$$h[A]^{-1} = \begin{pmatrix} 1/10989 & -0.264/10989 & 0 \\ -0.264/10989 & 1/10989 & 0 \\ 0 & 0 & 1/3597.1 \end{pmatrix}$$

$$E_1 = E_2 = 10989 \text{ MPa} \text{ ή } 10.989 \text{ GPa}$$

$$G_{12} = 3597 \text{ MPa} \text{ ή } 3.597 \text{ GPa}$$

$$\nu_{12} = 0.264$$

4.5 Συγκέντρωση αποτελεσμάτων Μέτρου Ελαστικότητας του στρωσιγενούς υλικού

Στη συνέχεια παρατίθενται συγκεντρωτικά σε πίνακα τα αποτελέσματα για το μέτρο ελαστικότητας του υλικού, όπως υπολογίστηκαν με τις προηγούμενες μεθόδους.

Πίνακας 4.11

Μέθοδος υπολογισμού	Μέτρο Ελαστικότητας E [GPa]
Νόμος μιγμάτων	8.655
Σχέση Christensen	12.286
Καθαρός εφελκυσμός	11.864
Καθαρή κάμψη	11.456
Με βάση τους τύπους Lloyd's σε εφελκυσμό	7.973
Με βάση τους τύπους Lloyd's σε κάμψη	6.150
Με βάση το μητρώο $1/h[A]$	10.989

Μελετώντας τα αποτελέσματα, παρατηρούμε πως το μέτρο ελαστικότητας που προέκυψε με βάση τους τύπους Lloyd's, υστερεί πολύ σε σχέση με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις άλλες μεθόδους. Οι υπολογισμοί με βάση τους τύπους του Νηογνώμονα κρίνονται ως συντηρητικοί για ασφαλέστερες κατασκευές. Επιπρόσθετα οι τιμές που προκύπτουν για το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη, είναι μικρότερες από αυτές όταν το υλικό καταπονείται σε εφελκυσμό. Ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας που στηρίζεται στο νόμο των μιγμάτων δίνει και αυτός συντηρητικά αποτελέσματα, ενώ οι υπόλοιπες μέθοδοι δίνουν αποτελέσματα σχετικά κοντά μεταξύ τους.

4.6 Μητρώο Ειδικώς Ορθότροπου μη συμμετρικού στρωσιγενούς

Για την εκτέλεση των προηγούμενων υπολογισμών, το υλικό θεωρήθηκε ως στρωσιγενές συμμετρικό, οπότε το μητρώο σύζευξης εφελκυσμού και κάμψης λήφθηκε ως μηδενικό ($B_{ij} = 0$).

$$\begin{Bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z k_x \\ z k_y \\ z k_s \end{Bmatrix}$$

Και

$$\begin{Bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z k_x \\ z k_y \\ z k_s \end{Bmatrix}$$

Στο σημείο αυτό, αφού έχουν προηγηθεί οι υπολογισμοί του κέντρου βάρους του στρωσιγενούς, παρατίθενται τα μητρώα που προσεγγίζουν περισσότερο τη συμπεριφορά του υλικού. Στους ακόλουθους πίνακες προσδιορίζονται τα μη μηδενικά στοιχεία των παραπάνω μητρώων:

Πίνακας 4.12 Μητρώο [A]

Στρώμα	$Q_{11} \cdot t_k$ [N/m]	$Q_{12} \cdot t_k$ [N/m]	$Q_{22} \cdot t_k$ [N/m]	$Q_{66} \cdot t_k$ [N/m]
1°	7058326.289	2117497.887	7058326.289	2470414.201
2°	10584319.53	3175295.858	10584319.53	3704511.834
3°	10584319.53	3175295.858	10584319.53	3704511.834
4°	10584319.53	3175295.858	10584319.53	3704511.834
5°	10584319.53	3175295.858	10584319.53	3704511.834
6°	20674690.47	3369974.546	20674690.47	2994230.769
7°	10584319.53	3175295.858	10584319.53	3704511.834
8°	10584319.53	3175295.858	10584319.53	3704511.834
$A_{ij} =$	91238933.92	24539247.58	91238933.92	27691715.98

Πίνακας 4.13 Μητρώο [B]

Στρώμα	$Q_{11} \cdot t_k \cdot z_k$ [N]	$Q_{12} \cdot t_k \cdot z_k$ [N]	$Q_{22} \cdot t_k \cdot z_k$ [N]	$Q_{66} \cdot t_k \cdot z_k$ [N]
1°	-25142.34076	-7542.702229	-25142.34076	-8799.819268
2°	-29051.57391	-8715.472173	-29051.57391	-10168.05087
3°	-19892.06663	-5967.619988	-19892.06663	-6962.223319
4°	-10732.55934	-3219.767803	-10732.55934	-3756.39577
5°	-1573.052061	-474.9156184	-1573.052061	-550.5682215
6°	23764.64559	3873.637232	23764.64559	3441.736318
7°	25905.46979	7771.640936	25905.46979	9066.914425
8°	35064.97707	10519.49312	35064.97707	12272.74197
B_{ij} =	-1656.500258	-3752.706523	-1656.500258	-5455.664729

Πίνακας 4.14 Μητρώο [D]

Στρώμα	$Q_{11} \cdot t_k \cdot (z_k^2 + t_k^2 / 12)$ [Nm]	$Q_{12} \cdot t_k \cdot (z_k^2 + t_k^2 / 12)$ [Nm]	$Q_{22} \cdot t_k \cdot (z_k^2 + t_k^2 / 12)$ [Nm]	$Q_{66} \cdot t_k \cdot (z_k^2 + t_k^2 / 12)$ [Nm]
1°	89.9071365	26.97214095	89.9071365	31.46749777
2°	80.40057045	24.12017113	80.40057045	28.14019966
3°	38.04549691	11.41364907	38.04549691	13.31592392
4°	11.54341674	3.463025022	11.54341674	4.040195859
5°	0.894329947	0.268298984	0.894329947	0.313015482
6°	32.47743949	5.293822637	32.47743949	4.703574585
7°	64.06502981	19.21950894	64.06502981	22.42276043
8°	116.8279165	35.04837495	116.8279165	40.88977078
D_{ij} =	434.1613364	125.7989917	434.1613364	145.2929385

4.7 Υπολογισμός ροπών αδρανείας και ροπών αντίστασης της διατομής

Τα αποτελέσματα για τις ροπές αδρανείας ως προς το κέντρο βάρους του κάθε στρώματος παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 4.15

Στρώμα	Πάχος στρώματος t_k [mm]	Ροπή Αδρανείας I [mm ⁴]
1 ^ο	0.769	0.759
2 ^ο	0.865	1.080
3 ^ο	0.865	1.080
4 ^ο	0.865	1.080
5 ^ο	0.865	1.080
6 ^ο	1.731	8.641
7 ^ο	0.865	1.080
8 ^ο	0.865	1.080

Λαμβάνοντας υπ' όψιν και την απόσταση του κέντρου βάρους του κάθε στρώματος από το κέντρο βάρους της διατομής, μέσω του θεωρήματος Steiner υπολογίζεται η ροπή αδράνειας της διατομής.

$$I_{\text{διατομής}} = I_C + M \cdot a^2$$

Θεώρημα Steiner: Η ροπή αδράνειας ενός σώματος ως προς τυχαίο άξονα Z ισούται με τη ροπή αδράνειας του σώματος ως προς άξονα Z_c παράλληλο στον Z που περνάει από το κέντρο μάζας του σώματος, συν το γινόμενο της μάζας του σώματος επί το τετράγωνο της απόστασης των δύο αξόνων.

Ο όρος b λαμβάνεται ίσος με 20 mm

Προκύπτει ότι η ροπή αδράνειας της διατομής ισούται με:

$$I_{\text{διατομής}} = 0.759 + 0.769 \cdot 20 \cdot 3.562^2 + 1.080 + 0.865 \cdot 20 \cdot 2.745^2 + 1.080 + 0.865 \cdot 20 \cdot 1.879^2 + 1.080 + 0.865 \cdot 20 \cdot 1.014^2 + 1.080 + 0.865 \cdot 20 \cdot 0.149^2 + 8.641 + 1.731 \cdot 20 \cdot 1.149^2 + 1.080 + 0.865 \cdot 20 \cdot 2.448^2 + 1.080 + 0.865 \cdot 20 \cdot 3.313^2 \Rightarrow$$

$$I_{\text{διατομής}} = 759.89 \text{ mm}^4$$

Ακολουθως, παρατίθενται οι ροπές αντίστασης του κάθε στρώματος της διατομής όπως προκύπτουν από τη σχέση:

$$W_i = (I_{\text{διατομής}}/z_i) * (E_{\text{ref}}/E_i)$$

όπου

z_i η απόσταση από τον κεντροβαρικό άξονα

Πίνακας 4.16

Αρ. Στρώσης	$I_{\text{ολικό}} [\text{mm}^4]$	$[z_i] [\text{mm}]$	$E_{\text{ref}} [\text{MPa}]$	$E_i [\text{MPa}]$	Ροπή αντίστασης $W_i [\text{mm}^3]$
1 άνω	759.89	3.945	11130	8350	256.751
1 κάτω	759.89	3.176	11130	8350	318.918
2 άνω	759.89	3.176	11130	11130	239.260
2 κάτω	759.89	2.311	11130	11130	328.814
3 άνω	759.89	2.311	11130	11130	328.814
3 κάτω	759.89	1.446	11130	11130	525.512
4 άνω	759.89	1.446	11130	11130	525.512
4 κάτω	759.89	0.579	11130	11130	1312.418
5 άνω	759.89	0.579	11130	11130	1312.418
5 κάτω	759.89	0.285	11130	11130	2666.281
6 άνω	759.89	0.285	11130	11628	2552.090
6 κάτω	759.89	2.016	11130	11628	360.787
7 άνω	759.89	2.016	11130	11130	376.930
7 κάτω	759.89	2.881	11130	11130	263.759
8 άνω	759.89	2.881	11130	11130	263.759
8 κάτω	759.89	3.746	11130	11130	202.854

Με τον όρο "άνω" εννοείται το σύνορο του στρώματος με τη μικρότερη τιμή της συντεταγμένης z ως προς το σύστημα συντεταγμένων που έχει οριστεί στη διατομή,

ενώ με τον όρο "κάτω" εννοείται το σύνορο του στρώματος με τη μεγαλύτερη τιμή της συντεταγμένης z ως προς το σύστημα συντεταγμένων.

4.8. Υπολογισμός φορτίου αστοχίας σε εφελκυσμό.

4.8.1. Υπολογισμός τάσεων αστοχίας με το κριτήριο Tsai Hill.

Στη συνέχεια θα υπολογισθεί για κάθε στρώμα του πολύστρωτου υλικού η τάση σ_{ox} η οποία θα οδηγήσει σε αστοχία με βάση το κριτήριο Tsai Hill. Το πολύστρωτο λαμβάνεται ως συμμετρικό. Οι παραμορφώσεις δίδονται από την ακόλουθη σχέση:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{ox} \\ \epsilon_{oy} \\ \gamma_{oxy} \end{Bmatrix} = h[A]^{-1} * \begin{Bmatrix} \sigma_{ox} \\ \sigma_{oy} \\ \tau_{oxy} \end{Bmatrix}$$

και στην περίπτωση του μονοαξονικού εφελκυσμού, η σχέση για τις παραμορφώσεις διαμορφώνεται ως εξής:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{ox} \\ \epsilon_{oy} \\ \gamma_{oxy} \end{Bmatrix} = h[A]^{-1} * \begin{Bmatrix} \sigma_{ox} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

όπου το μητρώο $h[A]^{-1}$ έχει προσδιορισθεί προηγουμένως, οπότε

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{ox} \\ \epsilon_{oy} \\ \gamma_{oxy} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 1/10989 & -0.264/10989 & 0 \\ -0.264/10989 & 1/10989 & 0 \\ 0 & 0 & 1/3597.1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{ox} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{ox} \\ \epsilon_{oy} \\ \gamma_{oxy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma_{ox}/10989 \\ -0.264*\sigma_{ox}/10989 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

- Υπολογισμός τάσεων του 1^{ου} στρώματος c.s.m., πάχους 0.769 mm, 0.300 kg/m²

Ισχύει:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = 1/h[A] * \begin{Bmatrix} \sigma_{ox}/10989 \\ -0.264*\sigma_{ox}/10989 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

όπου οι όροι του μητρώου $1/h[A]$ έχουν προσδιορισθεί προηγουμένως:

$$Q_{11}^{csm300} = E_{csm300}/(1-\nu_{csm300}^2) = 8350\text{MPa}/(1-0.3^2) = 9175.8 \text{ MPa ή } 9.176 \text{ GPa}$$

$$Q_{22}^{csm300} = Q_{11}^{csm300} = 9175.8 \text{ MPa ή } 9.176 \text{ GPa}$$

$$Q_{12}^{csm300} = \nu_{csm300} * E_{csm300}/(1-\nu_{csm300}^2) = 0.3 * 8350\text{MPa}/(1-0.3^2) = 2752.8 \text{ MPa ή } 2.753 \text{ GPa}$$

$$Q_{16}^{csm300} = 0 \text{ MPa}$$

$$Q_{26}^{csm300} = 0 \text{ MPa}$$

$$Q_{66}^{csm300} = G^{csm300} = 3211.54 \text{ MPa ή } 3.212 \text{ GPa}$$

Οπότε:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 9175.8 & 2752.8 & 0 \\ 2752.8 & 9175.8 & 0 \\ 0 & 0 & 3211.54 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{ox}/10989 \\ -0.264 * \sigma_{ox}/10989 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.768869 \sigma_{ox} \\ 0.030060 \sigma_{ox} \\ 0 \end{Bmatrix}$$

εφαρμόζοντας τις παραπάνω τιμές στο κριτήριο Tsai Hill

$$\sigma_x^2/X^2 - \sigma_x\sigma_y/X^2 + \sigma_y^2/Y^2 - \tau_{xy}^2/S^2 = 1$$

όπου

$$X = 113 \text{ MPa}$$

$$Y = 113 \text{ MPa}$$

Καταλήγουμε ότι το πρώτο στρώμα αστοχεί για τάση

$$\sigma_{ox} = 149.81 \text{ MPa}$$

- υπολογισμός τάσεων του 2^{ου}, 3^{ου}, 4^{ου}, 5^{ου}, 7^{ου}, 8^{ου} στρώματος c.s.m., πάχους 0.865 mm, 0.450 kg/m²

Ισχύει:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = 1/h[A]* \begin{Bmatrix} \sigma_{ox}/10989 \\ -0.264*\sigma_{ox}/10989 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

όπου οι όροι του μητρώου 1/h[A] έχουν προσδιορισθεί προηγουμένως:

$$Q_{11}^{csm450} = E_{csm450}/(1-\nu_{csm450}^2) = 11130 \text{ MPa}/(1-0.3^2) = 12230.8 \text{ MPa ή } 12.231 \text{ GPa}$$

$$Q_{22}^{csm450} = Q_{11}^{csm450} = 12230.8 \text{ MPa ή } 12.231 \text{ GPa}$$

$$Q_{12}^{csm450} = \nu_{csm450}*E_{csm450}/(1-\nu_{csm450}^2) = 0.3*11130 \text{ MPa}/(1-0.3^2) = 3669.2 \text{ MPa ή } 3.669 \text{ GPa}$$

$$Q_{16}^{csm450} = 0 \text{ MPa}$$

$$Q_{26}^{csm450} = 0 \text{ MPa}$$

$$Q_{66}^{csm450} = G^{csm450} = 4280.77 \text{ MPa ή } 4.181 \text{ GPa}$$

Οπότε:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 12230.8 & 3669.2 & 0 \\ 3669.2 & 12230.8 & 0 \\ 0 & 0 & 4280.77 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{ox}/10989 \\ -0.264*\sigma_{ox}/10989 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1.02485\sigma_{ox} \\ 0.040068\sigma_{ox} \\ 0 \end{Bmatrix}$$

εφαρμόζοντας τις παραπάνω τιμές στο κριτήριο Tsai Hill

$$\sigma_x^2/X^2 - \sigma_x\sigma_y/X^2 + \sigma_y^2/Y^2 - \tau_{xy}^2/S^2 = 1$$

όπου:

$$X = 151 \text{ MPa}$$

$$Y = 151 \text{ MPa}$$

Καταλήγουμε ότι τα στρώματα 2, 3, 4, 5, 7 και 8 αστοχούν για τάση

$$\sigma_{ox} = 150.19 \text{ MPa}$$

- υπολογισμός τάσεων για το 6^ο στρώμα W.R., πάχους 1.731 mm, 0.900 kg/m²

Ισχύει:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = 1/h[A]^* \begin{Bmatrix} \sigma_{ox}/10989 \\ -0.264*\sigma_{ox}/10989 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

όπου οι όροι του μητρώου 1/h[A] έχουν προσδιορισθεί προηγουμένως:

$$Q_{11}^{wr900} = E_1/(1-\nu_{12}^2) = 11628 \text{ MPa}/(1 - 0.163^2) = 11945.4 \text{ MPa ή } 11.945 \text{ GPa}$$

$$Q_{22}^{wr900} = Q_{11}^{wr900} = 11945.4 \text{ MPa ή } 11.945 \text{ GPa}$$

$$Q_{12}^{wr900} = \nu_{12}*E_1/(1-\nu_{12}^2) = 0.163*11628 \text{ MPa}/(1 - 0.163^2) = 1947.1 \text{ MPa ή } 1.947 \text{ GPa}$$

$$Q_{16}^{wr900} = 0 \text{ MPa}$$

$$Q_{26}^{wr900} = 0 \text{ MPa}$$

$$Q_{66}^{wr900} = G_{12} = 1730 \text{ MPa ή } 1.73 \text{ GPa}$$

Οπότε:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 11945.4 & 1947.1 & 0 \\ 1947.1 & 11945.4 & 0 \\ 0 & 0 & 1730 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{ox}/10989 \\ -0.264*\sigma_{ox}/10989 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1.02485\sigma_{ox} \\ 0.040068\sigma_{ox} \\ 0 \end{Bmatrix}$$

εφαρμόζοντας τις παραπάνω τιμές στο κριτήριο Tsai Hill

$$\sigma_x^2/X^2 - \sigma_x\sigma_y/X^2 + \sigma_y^2/Y^2 - \tau_{xy}^2/S^2 = 1$$

όπου:

$$X = 139 \text{ MPa}$$

$$Y = 139 \text{ MPa}$$

Καταλήγουμε ότι το 6^ο στρώμα του πολύστρωτου υλικού αστοχεί για τάση

$$\sigma_{ox} = 63.22 \text{ MPa}$$

Συγκεντρώνοντας τα αποτελέσματα των τάσεων αστοχίας που προέκυψαν με το κριτήριο Tsai Hill, στον πίνακα που ακολουθεί παρατηρούμε ότι το 6^ο στρώμα του πολύστρωτου υλικού, το οποίο είναι υαλούφασμα (W.R.) εμφανίζεται να αστοχεί για μικρότερη τάση συγκρινόμενο με τα άλλα στρώματα που αποτελούνται από c.s.m.

Πίνακας 4.17

Στρώμα	Τάση αστοχίας σ_{ox} [MPa]
1 ^ο	149.81
2 ^ο	150.19
3 ^ο	150.19
4 ^ο	150.19
5 ^ο	150.19
6 ^ο	63.22
7 ^ο	150.19
8 ^ο	150.19

4.8.2. Υπολογισμός φορτίου αστοχίας του πολύστρωτου.

Στο σημείο αυτό της εργασίας επιχειρείται ο προσδιορισμός του φορτίου στο οποίο αστοχεί το πολύστρωτο, στηριζόμενοι στους προηγούμενους υπολογισμούς. Για τον προσδιορισμό του φορτίου ακολουθούνται 4 μέθοδοι, οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια.

4.8.2.1. Μέθοδος α

Λαμβάνοντας υπόψιν την αστοχία του 6^{ου} στρώματος, η οποία συντελείται για τάση ίση με $\sigma_{ox} = 63.22 \text{ MPa}$, προσδιορίζεται το φορτίο που αντιστοιχεί στην τάση αυτή. Οπότε βάσει της σχέσης:

$$\sigma_{ox} = N_x / t_{ολικό} \Rightarrow N_x = \sigma_{ox} * t_{ολικό} \Rightarrow$$

$$N_x = 486.1618 \text{ N/mm} \text{ ή } N_x = 486162 \text{ N/m}$$

όπου:

$t_{\text{ολικό}} = 7.69 \text{ mm}$, ολικό πάχος της διατομής

$$\sigma_{\text{ox}} = 63.22 \text{ N/mm}^2$$

Λόγω όμως της αστοχίας που έχει επέλθει στο 6^ο στρώμα, το φορτίο αυτό θα κληθούν να παραλάβουν τα υπόλοιπα στρώματα του πολύστρωτου υλικού.

Οπότε το συνολικό ενεργό πάχος της διατομής είναι μικρότερο και προσδιορίζεται σε:

$$t_{\text{ενεργό}} = 5.959 \text{ mm ή } 5.959 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$N_x = 486162 \text{ N/m}$$

η τάση που καταπονεί τη διατομή είναι:

$$\sigma'_{\text{ox}} = N_x / t_{\text{ενεργό}} \Rightarrow \sigma_{\text{ox}} = 81.58 \text{ MPa}$$

η τάση αυτή είναι μικρότερη σε σχέση με την τάση για την οποία αστοχούν τα υπόλοιπα στρώματα του πολύστρωτου υλικού.

- Για τάση ίση με $\sigma_{\text{ox}} = 149.81 \text{ MPa}$, αστοχεί το πρώτο στρώμα του υλικού. το φορτίο που αντιστοιχεί στην τάση αυτή, προσδιορίζεται βάσει της σχέσης:

$$\sigma_{\text{ox}} = N_x / t_{\text{ολικό}} \Rightarrow N_x = \sigma_{\text{ox}} \cdot t_{\text{ολικό}} \Rightarrow$$

$$N_x = 892.718 \text{ N/mm ή } N_x = 892718 \text{ N/m}$$

όπου:

$t_{\text{ενεργό}} = 5.959 \text{ mm ή } 5.959 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, το νέο πάχος της διατομής λόγω της αστοχίας που έχει επέλθει στο 6^ο στρώμα.

$$\sigma_{\text{ox}} = 149.81 \text{ N/mm}^2, \text{ η τάση αστοχίας του 1}^{\text{ου}} \text{ στρώματος}$$

όμως λόγω της αστοχίας του 1^{ου} στρώματος, , το φορτίο αυτό θα κληθούν να παραλάβουν τα υπόλοιπα στρώματα του πολύστρωτου υλικού.

Οπότε το συνολικό ενεργό πάχος της διατομής είναι μικρότερο και προσδιορίζεται σε:

$$t_{\text{ενεργό}} = 5.190 \text{ mm ή } 5.190 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$N_x = 892718 \text{ N/m}$$

Οπότε η τάση που καταπονεί τη διατομή είναι:

$$\sigma'_{\text{ox}} = N_x / t_{\text{ενεργό}} \Rightarrow \sigma_{\text{ox}} = 172.01 \text{ MPa}$$

η τάση αυτή οδηγεί σε αστοχία όλα τα στρώματα του πολύστρωτου, καθώς είναι μεγαλύτερη από αυτή που προσδιορίστηκε για κάθε στρώμα.

Λαμβάνοντας υπόψη το πλάτος του δοκιμίου 25 mm, το φορτίο θραύσεως υπολογίζεται σε: $N = \sigma \cdot t_{\text{ολικό}} \cdot 25 \Rightarrow N = 22318 \text{ N}$.

4.8.2.2. Μέθοδος β

Βάσει του νόμου των μιγμάτων και λαμβάνοντας την κρίσιμη τάση για τις ίνες γυαλιού τα 2500 MPa και για την πολυεστερική μήτρα τα 80 MPa, έχουμε:

$$\sigma = n \cdot \sigma_{\text{frip}} \cdot U_f + \sigma_{\text{mrip}} \cdot U_m$$

$$\sigma = 248.07 \text{ MPa}$$

όπου:

$$n = 0.375$$

$$\sigma_{\text{frip}} = 2500 \text{ MPa}$$

$$U_f = 0.196$$

$$\sigma_{\text{mrip}} = 80 \text{ MPa}$$

$$U_m = 0.804$$

Λαμβάνοντας υπόψη το πλάτος του δοκιμίου 25 mm, το φορτίο θραύσεως υπολογίζεται σε:

$$N = \sigma \cdot t_{\text{ολικό}} \cdot 25 = 47691.5 \text{ N}$$

$$N \approx 47692 \text{ N}$$

4.8.2.3. Μέθοδος γ

Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι παραμορφώσεις σε όλα τα στρώματα σε μια συγκεκριμένη διατομή είναι ίσες, οπότε:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = \varepsilon_5 = \varepsilon_6 = \varepsilon_7 = \varepsilon_8$$

τότε ο Νόμος του Hooke γράφεται ως εξής:

$$\sigma_1/E_1 = \sigma_2/E_2 = \sigma_3/E_3 = \sigma_4/E_4 = \sigma_5/E_5 = \sigma_6/E_6 = \sigma_7/E_7 = \sigma_8/E_8$$

Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται οι τιμές για το μέτρο ελαστικότητας, το πάχος και η τάση αστοχίας για το κάθε στρώμα του πολύστρωτου υλικού.

Πίνακας 4.18

Στρώμα	E_k [GPa]	Πάχος στρώματος t_k [mm]	Μέγιστη επιτρεπόμενη Τάση σ_{ox} [MPa]
1°	8.350	0.769	113
2°	11.130	0.865	151
3°	11.130	0.865	151
4°	11.130	0.865	151
5°	11.130	0.865	151
6°	11.628	1.731	139
7°	11.130	0.865	151
8°	11.130	0.865	151

- Όταν η τάση είναι ίση με την τάση αστοχίας του πρώτου στρώματος, $\sigma = 113 \text{ MPa}$, τότε με βάση την σχέση:

$$\sigma_1/E_1 = \sigma_2/E_2 = \sigma_3/E_3 = \sigma_4/E_4 = \sigma_5/E_5 = \sigma_6/E_6 = \sigma_7/E_7 = \sigma_8/E_8 ,$$

προκύπτουν τα αποτελέσματα, που παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 4.19

Στρώμα	Τάση σ [MPa]
1 ^ο	113.0
2 ^ο	150.6
3 ^ο	150.6
4 ^ο	150.6
5 ^ο	150.6
6 ^ο	157.4
7 ^ο	150.6
8 ^ο	150.6

Όπου παρατηρούμε πως οι τάσεις που αναπτύσσονται στα στρώματα 2, 3, 4, 5, 7, 8 είναι οριακά μικρότερες των τάσεων αστοχίας που έχουν υπολογιστεί, ενώ στο 6^ο στρώμα η αναπτυσσόμενη τάση υπερβαίνει την τιμή της τάσεως αστοχίας.

Το συνολικό φορτίο που μπορεί να φέρει το πολύστρωτο υλικό υπολογίζεται σε:

$$N_{\text{ολικό}} = \sum \sigma_k \cdot t_k \cdot b_k \Rightarrow$$

$$N_{\text{ολικό}} = \sigma_1 \cdot t_1 \cdot b_1 + \sigma_2 \cdot t_2 \cdot b_2 + \sigma_3 \cdot t_3 \cdot b_3 + \sigma_4 \cdot t_4 \cdot b_4 + \sigma_5 \cdot t_5 \cdot b_5 + \sigma_7 \cdot t_7 \cdot b_7 + \sigma_8 \cdot t_8 \cdot b_8 \Rightarrow$$

$$N_{\text{ολικό}} = 21712.8 \text{ N}$$

Όπου:

$$b_k = 25 \text{ [mm]}$$

t_k = το πάχος του κάθε στρώματος [mm]

σ_k = η τάση κάθε στρώματος [MPa]

- Όταν η τάση είναι ίση με την τάση αστοχίας του 6^{ου} στρώματος, $\sigma = 139 \text{ MPa}$, τότε με βάση την σχέση:

$$\sigma_1/E_1 = \sigma_2/E_2 = \sigma_3/E_3 = \sigma_4/E_4 = \sigma_5/E_5 = \sigma_6/E_6 = \sigma_7/E_7 = \sigma_8/E_8 ,$$

προκύπτουν τα αποτελέσματα, που παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 4.20

Στρώμα	Τάση σ [MPa]
1 ^ο	99.8
2 ^ο	133.0
3 ^ο	133.0
4 ^ο	133.0
5 ^ο	133.0
6 ^ο	139.0
7 ^ο	133.0
8 ^ο	133.0

Όπου παρατηρούμε πως οι τάσεις που αναπτύσσονται σε όλα τα στρώματα είναι μικρότερες των τάσεων αστοχίας τους. Το συνολικό φορτίο που μπορεί να φέρει το πολύστρωτο υλικό υπολογίζεται σε:

$$N_{\text{ολικό}} = \sum \sigma_k \cdot t_k \cdot b_k =$$

$$N_{\text{ολικό}} = \sigma_1 \cdot t_1 \cdot b_1 + \sigma_2 \cdot t_2 \cdot b_2 + \sigma_3 \cdot t_3 \cdot b_3 + \sigma_4 \cdot t_4 \cdot b_4 + \sigma_5 \cdot t_5 \cdot b_5 + \sigma_6 \cdot t_6 \cdot b_6 + \sigma_7 \cdot t_7 \cdot b_7 + \sigma_8 \cdot t_8 \cdot b_8$$

$$\Rightarrow$$

$$N_{\text{ολικό}} = 25190.6 \text{ N}$$

Όπου:

$$b_k = 25 \text{ [mm]}$$

$$t_k = \text{το πάχος του κάθε στρώματος [mm]}$$

$$\sigma_k = \text{η τάση κάθε στρώματος [MPa]}$$

- Όταν η τάση είναι ίση με την τάση αστοχίας του 2^{ου}, 3^{ου}, 4^{ου}, 5^{ου}, 7^{ου}, 8^{ου} στρώματος, $\sigma = 151 \text{ MPa}$, τότε με βάση την σχέση:

$$\sigma_1/E_1 = \sigma_2/E_2 = \sigma_3/E_3 = \sigma_4/E_4 = \sigma_5/E_5 = \sigma_6/E_6 = \sigma_7/E_7 = \sigma_8/E_8 ,$$

προκύπτουν τα αποτελέσματα, που παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 4.21

Στρώμα	Τάση σ [MPa]
1 ^ο	113.3
2 ^ο	151.0
3 ^ο	151.0
4 ^ο	151.0
5 ^ο	151.0
6 ^ο	157.8
7 ^ο	151.0
8 ^ο	151.0

Όπου παρατηρούμε πως οι τάσεις που αναπτύσσονται σε όλα τα στρώματα είναι μεγαλύτερες των τάσεων αστοχίας τους. Το συνολικό φορτίο που μπορεί να φέρει το πολύστρωτο υλικό υπολογίζεται σε:

$$N_{\text{ολικό}} = \sum \sigma_k \cdot t_k \cdot b_k \Rightarrow$$

$$N_{\text{ολικό}} = \sigma_2 \cdot t_2 \cdot b_2 + \sigma_3 \cdot t_3 \cdot b_3 + \sigma_4 \cdot t_4 \cdot b_4 + \sigma_5 \cdot t_5 \cdot b_5 + \sigma_7 \cdot t_7 \cdot b_7 + \sigma_8 \cdot t_8 \cdot b_8 \Rightarrow$$

$$N_{\text{ολικό}} = 19592.3 \text{ N}$$

Όπου:

$$b_k = 25 \text{ [mm]}$$

$$t_k = \text{το πάχος του κάθε στρώματος [mm]}$$

$$\sigma_k = \text{η τάση κάθε στρώματος [MPa]}$$

4.8.2.4. Μέθοδος δ

Η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό δίνεται μέσω της ακόλουθης μαθηματικής σχέσης βάσει του Βρετανικού Νηογνώμονα:

$$\sigma_{\text{μέγιστο}} = 1278 \cdot G_c^2 - 510 \cdot G_c + 123 = 98.75 \text{ MPa}$$

όπου:

$G_c = 0.3439$ η εκατοστιαία περιεκτικότητα κατά βάρος του υλικού σε γυαλί

Το συνολικό φορτίο που μπορεί να φέρει το πολύστρωτο υλικό υπολογίζεται σε:

$$N_{\text{ολικό}} = \sigma_{\text{μέγιστο}} \cdot t_{\text{ολικό}} \cdot b_k \Rightarrow$$

$$N_{\text{ολικό}} = 18984.7 \text{ N}$$

$$N_{\text{ολικό}} \approx 18985 \text{ N}$$

Όπου:

$$b_k = 25 \text{ [mm]}$$

$t_{\text{ολικό}} = 7.69 \text{ [mm]}$ το συνολικό πάχος του πολύστρωτου

$\sigma_k = \eta$ τάση κάθε στρώματος [MPa]

4.9. Υπολογισμός των ορθών τάσεων και των παραμορφώσεων του στρωσιγενούς.

4.9.1. Εφελκυσμός

Λαμβάνοντας υπόψη τις προϋποθέσεις και βάσει των υπολογισμών που έχουν προηγηθεί, όταν το δοκίμιο υποβάλλεται σε μονοαξονικό εφελκυσμό σε τάση ίση με την τάση αστοχίας του 6^{ου} στρώματος, η οποία συντελείται για τάση ίση με $\sigma_{ox} = 63.22$ MPa, τότε στην περίπτωση αυτή έχουμε:

$$\varepsilon_{ox} = 63.22/10989 \text{ ή } \varepsilon_{ox} = 0.00595$$

$$\varepsilon_{oy} = -63.22*0.264/10989 \text{ ή } \varepsilon_{oy} = -0.00152$$

$$\gamma_{xy} = 0$$

οι τάσεις σε κάθε στρώμα του πολύστρωτου υλικού παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 4.22

Στρώμα	σ_{ox} [MPa]	σ_x [MPa]	σ_y [MPa]
1 ^ο	63.22	48.608	1.900
2 ^ο	63.22	64.791	2.533
3 ^ο	63.22	64.791	2.533
4 ^ο	63.22	64.791	2.533
5 ^ο	63.22	64.791	2.533
6 ^ο	63.22	131.530	-13.882
7 ^ο	63.22	64.791	2.533
8 ^ο	63.22	64.791	2.533

Ο υπολογισμός των τιμών των παραμορφώσεων μέσω του νόμου του Hooke για τα φορτία που εφαρμόστηκαν στο υλικό, θεωρώντας πως αυτό είναι ισότροπο, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων εφελκυσμού παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 4.23

Δύναμη [N]	Τάση [MPa]	E [GPa]	ν	ϵ_1	ϵ_2
0	0	10.989	0.264	0.000000	0.000000
1000	5.48	10.989	0.264	0.000499	-0.000132
2000	10.96	10.989	0.264	0.000997	-0.000263
3000	16.44	10.989	0.264	0.001496	-0.000395
4000	21.92	10.989	0.264	0.001995	-0.000527
5000	27.40	10.989	0.264	0.002493	-0.000658
6000	32.88	10.989	0.264	0.002992	-0.000790
7000	38.36	10.989	0.264	0.003490	-0.000921
8000	43.84	10.989	0.264	0.003989	-0.001053
9000	49.32	10.989	0.264	0.004488	-0.001185
10000	54.79	10.989	0.264	0.004986	-0.001316
11000	60.27	10.989	0.264	0.005485	-0.001448
12000	65.75	10.989	0.264	0.005984	-0.001580
13000	71.23	10.989	0.264	0.006482	-0.001711
14000	76.71	10.989	0.264	0.006981	-0.001843
15000	82.19	10.989	0.264	0.007479	-0.001975
16000	87.67	10.989	0.264	0.007978	-0.002106
17000	93.15	10.989	0.264	0.008477	-0.002238
18000	98.63	10.989	0.264	0.008975	-0.002369
19000	104.11	10.989	0.264	0.009474	-0.002501
20000	109.59	10.989	0.264	0.009973	-0.002633
21000	115.07	10.989	0.264	0.010471	-0.002764
22000	120.55	10.989	0.264	0.010970	-0.002896

23000	126.03	10.989	0.264	0.011469	-0.003028
24000	131.51	10.989	0.264	0.011967	-0.003159
25000	136.99	10.989	0.264	0.012466	-0.003291
26000	142.47	10.989	0.264	0.012964	-0.003423
27000	147.95	10.989	0.264	0.013463	-0.003554
28000	153.42	10.989	0.264	0.013962	-0.002686
29000	158.90	10.989	0.264	0.014460	-0.003818

4.9.2. Κάμψη

Σε προηγούμενη παράγραφο αναφέρθηκε πως για την καθαρή κάμψη ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$0 = A \cdot \varepsilon^0 + B \cdot k$$

$$M = B \cdot (-B/A) \cdot k + D \cdot k$$

Όπου αν επιλύσουμε τη δεύτερη σχέση ως προς k προκύπτει:

$$k = \{A/(A \cdot D - B^2)\} \cdot M$$

$$\text{και για την πρώτη προκύπτει } \varepsilon^0 = \{-B/(A \cdot D - B^2)\} \cdot M$$

Στον πίνακα που ακολουθεί, προσδιορίζεται η σχέση μεταξύ παραμορφώσεων και ροπής κάμψης για τη κάθε διεπιφάνεια του πολύστρωτου υλικού. Επιπρόσθετα παρουσιάζονται και οι ροπές αντίστασης της κάθε διεπιφάνειας.

Πίνακας 4.24

Αριθμός διεπιφάνειας	E_i [GPa]	z_i [mm]	Ροπή αντίστασης W_i [mm ³]	ε^0	$\varepsilon_i/M = (\varepsilon^0 + z_i \cdot k)/M$
1 άνω CSM	8.350	-3.945	256.751	0	-0.009085335
1 κάτω CSM	8.350	-3.176	318.918	0	-0.007314328
2 άνω CSM	11.130	-3.176	239.260	0	-0.007314328
2 κάτω CSM	11.130	-2.311	328.814	0	-0.005322233
3 άνω CSM	11.130	-2.311	328.814	0	-0.005322233
3 κάτω CSM	11.130	-1.446	525.512	0	-0.003330138
4 άνω CSM	11.130	-1.446	525.512	0	-0.003330138
4 κάτω CSM	11.130	-0.579	1312.418	0	-0.001333437
5 άνω CSM	11.130	-0.579	1312.418	0	-0.001333437
5 κάτω CSM	11.130	0.285	2666.281	0	0.000656355
6 άνω WR	11.628	0.285	2552.090	0	0.000656355

6 κάτωWR	11.628	2.016	360.787	0	0.004642848
7 άνω CSM	11.130	2.016	376.930	0	0.004642848
7 κάτωCSM	11.130	2.881	263.759	0	0.006634393
8 άνω CSM	11.130	2.881	263.759	0	0.006634393
8 κάτωCSM	11.130	3.746	202.854	0	0.008627038

Λαμβάνοντας τις τάσεις αστοχίας του κάθε στρώματος που έχουν υπολογιστεί πρωτύτερα, προσδιορίζονται οι ροπές για τις οποίες αστοχεί το κάθε στρώμα του υλικού σύμφωνα με τη σχέση:

$$M = \sigma \cdot W_i$$

Στη συνέχεια για κάθε ροπή αστοχίας υπολογίζονται οι παραμορφώσεις σύμφωνα με τη σχέση:

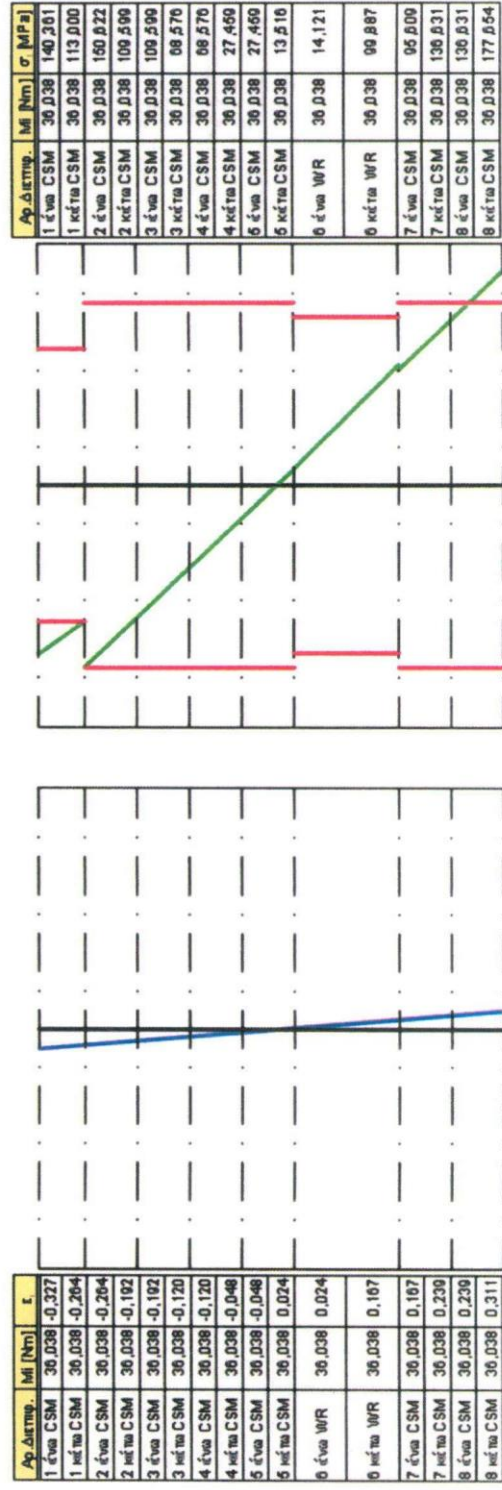
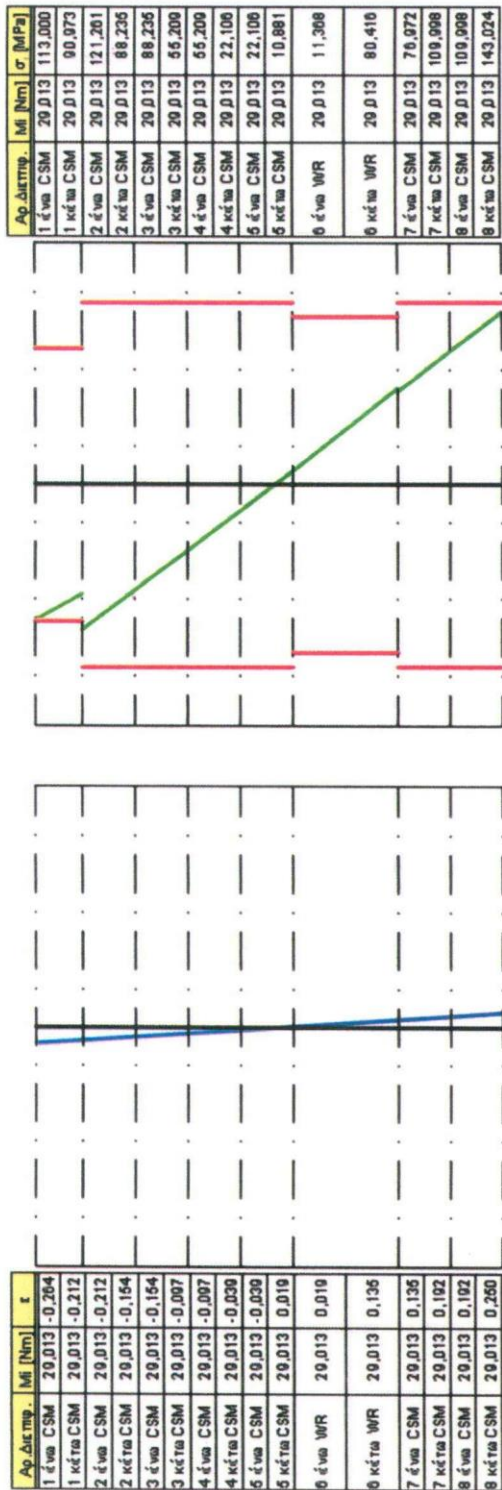
$$\varepsilon_i = \varepsilon^0 + z_i \cdot k$$

και οι τάσεις από τη σχέση:

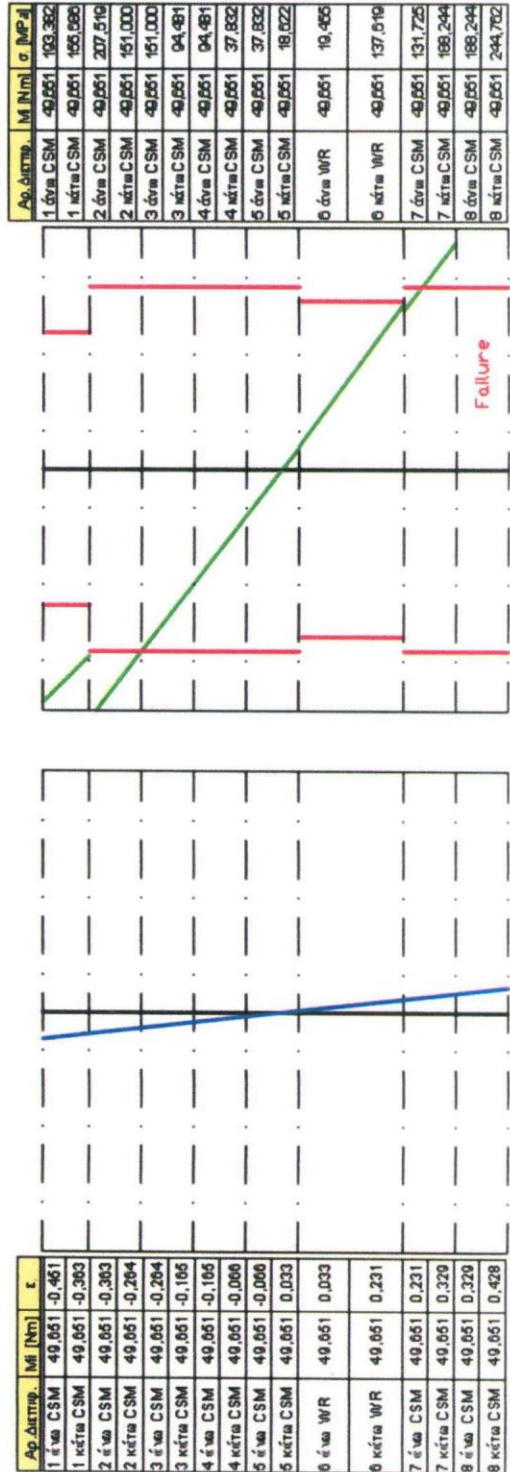
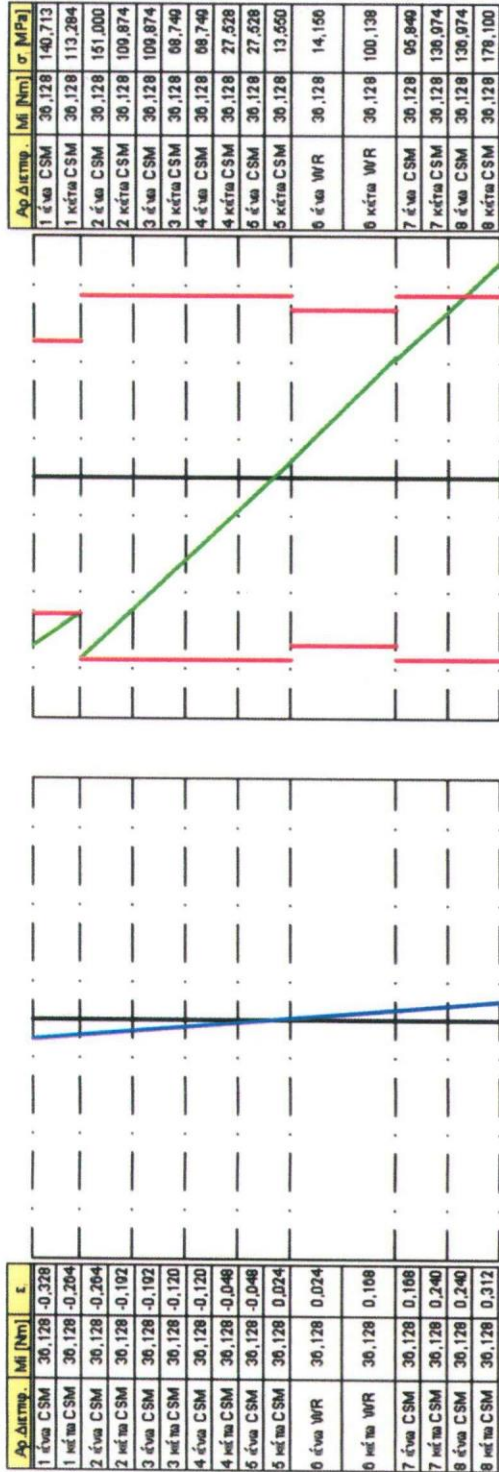
$$\sigma_i = M_i / W_i$$

Ακολουθώς παρουσιάζονται, σε μορφή διαγραμμάτων τα παραπάνω μεγέθη για διαφορες καταστάσεις φόρτισης. Όπου με μπλε αποικονίζονται οι παραμορφώσεις, με κόκκινο οι τάσεις και με πράσινο οι ροπές.

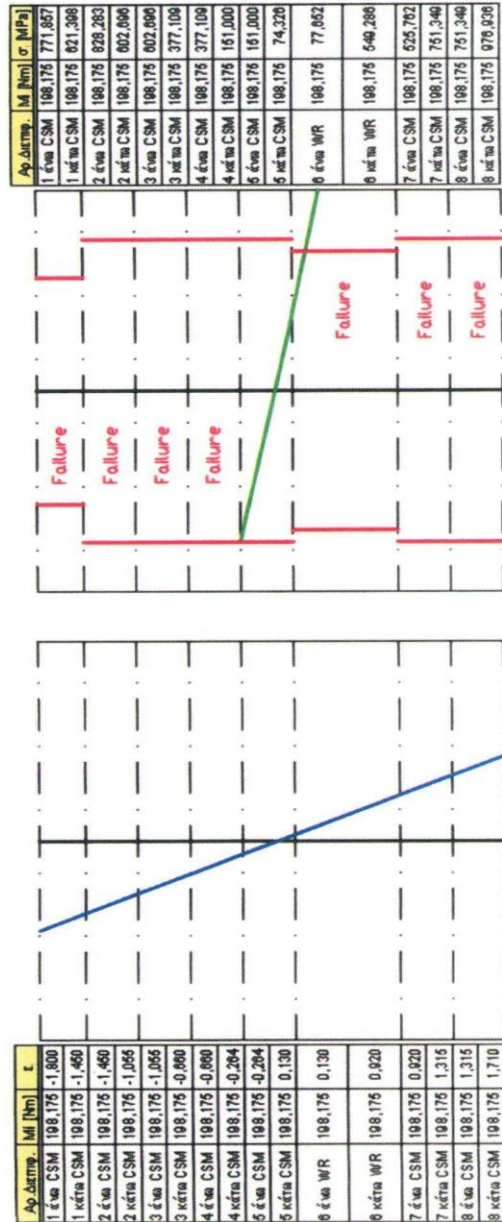
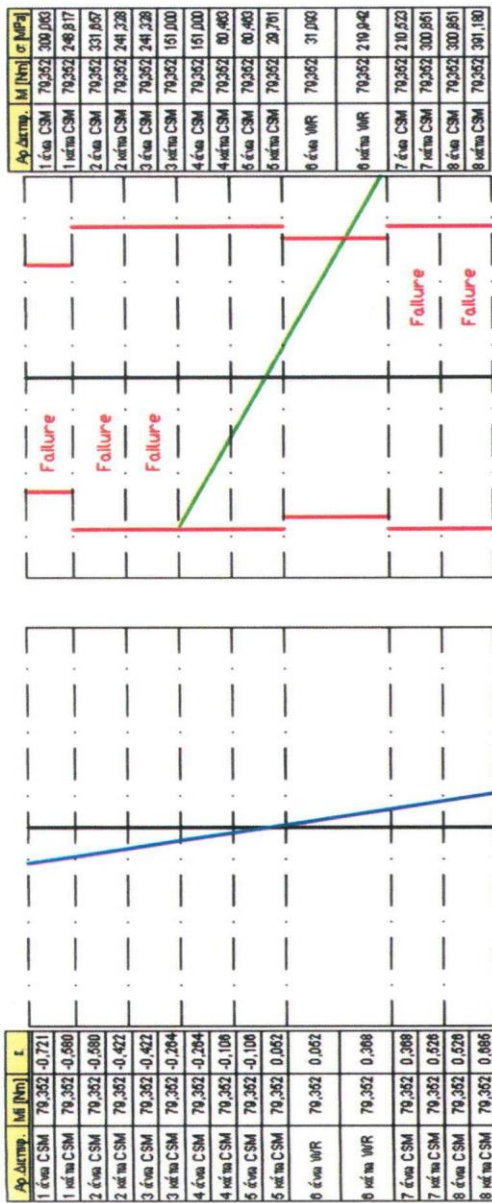
Διάγραμμα 4.1



Διάγραμμα 4.2



Διάγραμμα 4.3



Κεφάλαιο 5

5.1 Πειραματική διαδικασία

Για τον προσδιορισμό του φορτίου θραύσεως, χρησιμοποιήθηκαν τρία δοκίμια στον εφελκυσμό και ισάριθμος αριθμός δοκιμίων στην περίπτωση της κάμψης. Η τελική εκτιμώμενη τιμή προέκυψε, ως ο μέσος όρος των μετρήσεων που λήφθηκαν από την πειραματική διαδικασία. Κατά τη μέτρηση των παραμορφώσεων με χρήση μηκυνσιομέτρων χρησιμοποιήθηκε ένα δοκίμιο που υποβλήθηκε σε εφελκυσμό και ένα δοκίμιο σε κάμψη.

5.1.1 Πείραμα εφελκυσμού

Οι δοκιμές εκτελέστηκαν με τη βοήθεια του προτύπου BS 4994 σε συνθήκες περιβάλλοντος. Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων του εφελκυσμού χρησιμοποιήθηκε κατακόρυφη μηχανή εφελκυσμού AMSLER στην κλίμακα των 40 KN με ακρίβεια μετρήσεων τα 1000 N.

Η σταθερά των μηκυνσιομέτρων που χρησιμοποιήθηκαν είναι $K = 2.16$. Οι μετρήσεις που ελήφθησαν συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου καταγράφονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 5.1

Δύναμη [N]	μ_1	μ_2	μ_1	μ_2
0	0	0		
1000	419	-141		
2000	834	-285		
3000	1285	-445		
4000	1731	-604		
5000	2195	-772		
6000	2671	-947		
7000	3160	-1127		
8000	3648	-1311		
9000	4120	-1490		
10000	4637	-1687		
11000	5145	-1883		

12000	5669	-2085		
13000	6191	-2287		
14000	6745	-2503		
15000	7201	-2682	7230	-2739
16000	7889	-2947	7906	-2944
17000	8349	-3110	8315	-3116
18000	8870	-3306	8895	-3361
19000	9458	-3540	9376	-3569
20000	10052	-3776	9821	-3735
21000			10259	-3973
22000			10935	-4159
23000			11561	-4394
24000			11955	-4619
25000			12725	-4846
26000			13467	-5010
27000			13909	-5265
28000			14668	-5418
29000			15319	-5669

Στα 20000 N διενεργήθηκε επανάταξη της μηχανής για την επιβολή φορτίων έως τα 29000 N, όπου επήλθε και η θραύση του δοκιμίου. Οι τιμές που ελήφθησαν από τις επαναλαμβανόμενες μετρήσεις ήταν κοντά και στους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος αυτών για την εκτίμηση των παραμορφώσεων.

Βάσει των μετρήσεων του πίνακα 5.1 και σύμφωνα με τη σχέση: $\epsilon = 2\mu 10^{-6}/K$, προσδιορίστηκαν οι παραμορφώσεις που παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 5.2

Τάση [MPa]	ϵ_1	ϵ_2	$ \epsilon_2 $
0.00	0.000000	0.000000	0.000000
5.48	0.000388	-0.000131	0.000131
10.96	0.000772	-0.000264	0.000264
16.44	0.001190	-0.000412	0.000412
21.92	0.001603	-0.000559	0.000559
27.40	0.002032	-0.000715	0.000715
32.88	0.002473	-0.000877	0.000877
38.36	0.002926	-0.001044	0.001044
43.84	0.003378	-0.001214	0.001214
49.32	0.003815	-0.001380	0.001380
54.79	0.004294	-0.001562	0.001562
60.27	0.004764	-0.001744	0.001744
65.75	0.005249	-0.001931	0.001931
71.23	0.005732	-0.002118	0.002118
76.71	0.006245	-0.002318	0.002318
82.19	0.006681	-0.002510	0.002510
87.67	0.007313	-0.002727	0.002727
93.15	0.007715	-0.002882	0.002882
98.63	0.008225	-0.003087	0.003087
104.11	0.008719	-0.003291	0.003291
109.59	0.009200	-0.003477	0.003477
115.07	0.009499	-0.003679	0.003679
120.55	0.010125	-0.003851	0.003851
126.03	0.010705	-0.004069	0.004069

131.51	0.011069	-0.004277	0.004277
136.99	0.011782	-0.004487	0.004487
142.47	0.012469	-0.004639	0.004639
147.95	0.012879	-0.004875	0.004875
153.42	0.013581	-0.005017	0.005017
158.90	0.014184	-0.005249	0.005249

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις $\epsilon_1, |\epsilon_2|$, στον οριζόντιο άξονα, συναρτήσει τις επιβαλλόμενης τάσης που παρουσιάζεται στον κατακόρυφο άξονα.

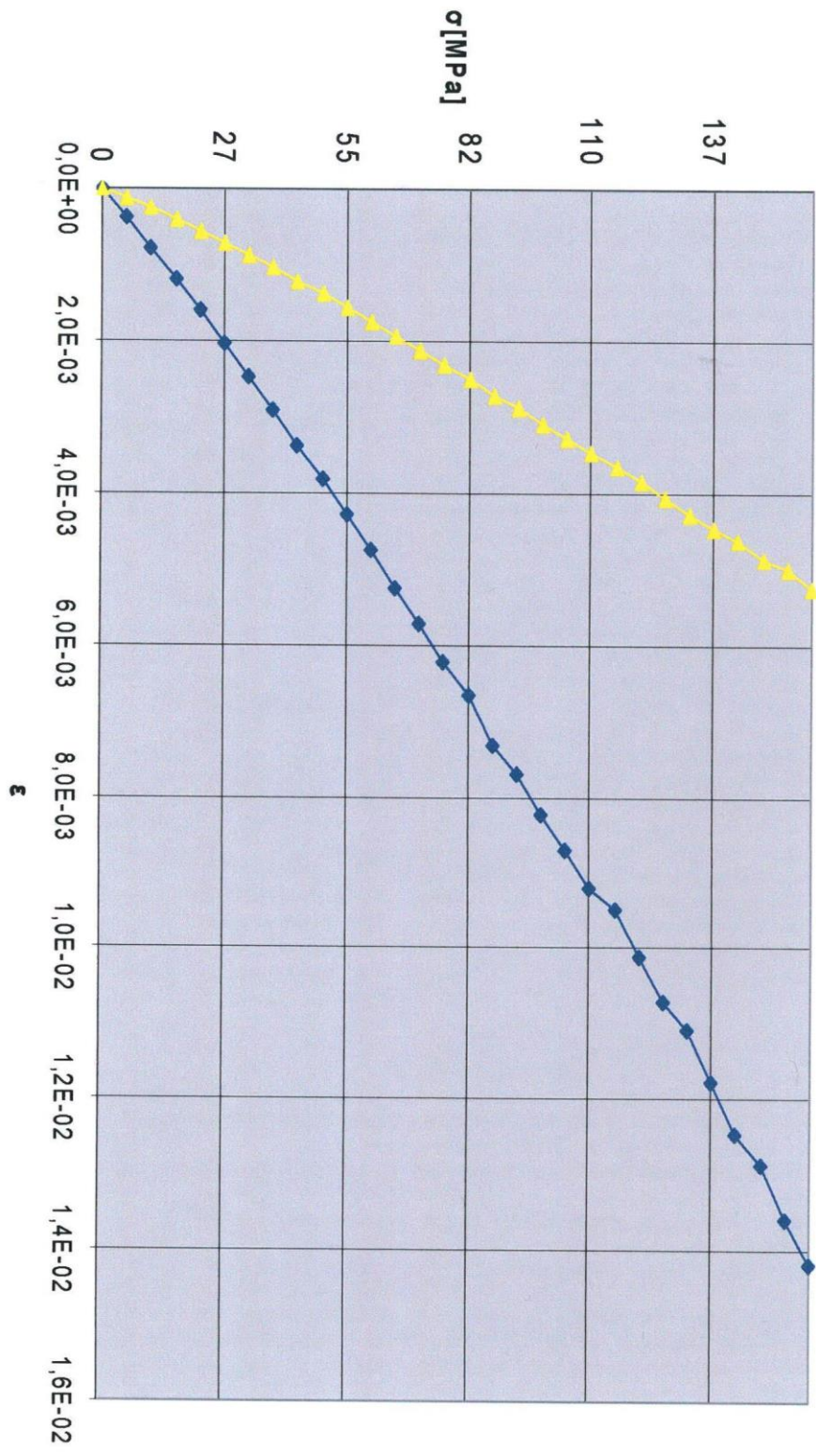
Όπου η ϵ_1 συμβολίζεται με μπλε χρώμα, και η $|\epsilon_2|$ με κίτρινο χρώμα.

Από την κλίση της καμπύλης της ϵ_1 προκύπτει ότι:

$$E \approx 13 \text{ GPa}$$

Η τιμή αυτή βρίσκεται στο εύρος της ελαστικής περιοχής, πριν αρχίσει η αποκόλληση ή σπάσιμο της ρητίνης. Η αντίστοιχη τάση είναι μικρότερη της τάσεως αστοχίας του 6^{ου} στρώματος του υλικού (W.R.), το οποίο είναι το πρώτο στρώμα του πολύστρωτου υλικού, το οποίο αστοχεί.

Διαγράμμα 5.1



5.1.2. Πείραμα κάμψης

Στο πείραμα της κάμψης εκτελέστηκε δοκιμή κάμψης τριών σημείων, κατά την οποία το δοκίμιο στηρίζεται σε δύο σημεία και φορτίζεται στο μέσον του. Ο λόγος του μήκους στήριξης ως προς το πάχος είναι 16. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν με τη βοήθεια του προτύπου ASTM D790 σε συνθήκες περιβάλλοντος και το πείραμα εκτελέστηκε στο μηχάνημα "OTTO WOLPERT WERKE" στην κλίμακα 4 KN με ακρίβεια μετρήσεων 10 N. Το δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Μήκος δοκιμίου: 280 mm,

Πλάτος δοκιμίου: 20.25 mm,

Πάχος δοκιμίου: 8.45 mm,

Μήκος στηρίξεως: 135 mm

Η σταθερά των μηκυνσιομέτρων είναι $K = 2.16$

Οι μετρήσεις σταματούν για επιβαλλόμενο φορτίο 1550 N, διότι σε αυτή τη τιμή επήλθε η θραύση του δοκιμίου. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου καταγράφονται στον πίνακα 5.3 που ακολουθεί.

Πίνακας 5.3

Επιβαλλόμενο φορτίο [N]	μ_1	μ_2
0	0	0
100	1626	-482
200	3250	-962
300	4600	-1444
400	6500	-2000
500	8000	-2406
600	10000	-2800
700	11376	-3368
800	13000	-3850
900	14750	-4142
1000	16300	-4720

1100	18250	-5300
1200	20000	-5820
1300	22486	-6298
1400	24772	-7120
1500	27058	-7852
1550	29200	-8400

Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων και με τις σχέσεις:

- $\varepsilon = 2 \cdot \mu \cdot 10^{-6} / K$,

όπου:

K = 2.16 η σταθερά των μηκυνσιομέτρων

- $\sigma = 3 \cdot P \cdot L / 2 \cdot b \cdot t^2$

όπου:

P το επιβαλλόμενο φορτίο [N],

L το μήκος στηρίζεως [mm],

b το πλάτος του δοκιμίου [mm],

t το πάχος του δοκιμίου [mm]

- $E = 6 \cdot M / \varepsilon \cdot b \cdot t^2$

Όπου:

M η μέγιστη ροπή στο μέσο του δοκιμίου [Nmm] υπολογίζεται από τη σχέση:

$$(M = P/2 \cdot L/2)$$

- $\nu = - \mu_1 / \mu_2$

υπολογίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 5.4

Επιβαλλόμενο φορτίο [N]	Τάση [MPa]	ϵ_1	$ \epsilon_2 $	E [GPa]	ν
0	0	0.0000000	0.0000000	---	---
100	14	0.001506	0.000446	9.302	0.296
200	28	0.003009	0.000891	9.308	0.296
300	42	0.004259	0.001337	9.864	0.314
400	56	0.006019	0.001852	9.308	0.308
500	70	0.007407	0.002228	9.453	0.301
600	84	0.009259	0.002593	9.075	0.280
700	98	0.010533	0.003119	9.307	0.296
800	112	0.012037	0.003565	9.308	0.296
900	126	0.013657	0.003835	9.229	0.281
1000	140	0.015093	0.004370	9.279	0.290
1100	154	0.016898	0.004907	9.117	0.290
1200	168	0.018519	0.005389	9.075	0.291
1300	182	0.020820	0.005831	8.745	0.280
1400	196	0.022937	0.006593	8.548	0.278
1500	210	0.025054	0.007270	8.385	0.290
1550	217	0.027037	0.007778	8.029	0.288

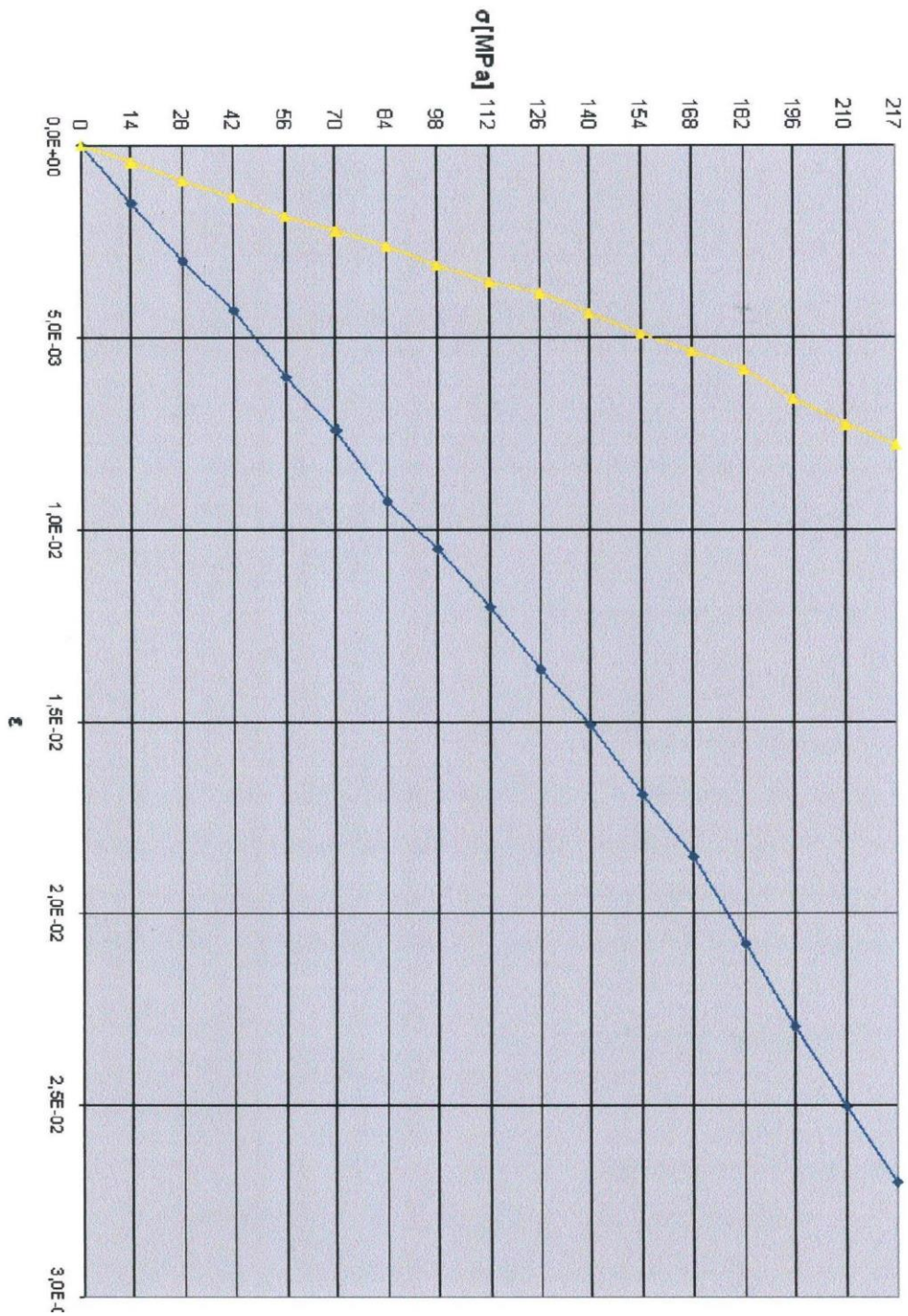
Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις $\epsilon_1, |\epsilon_2|$, στον οριζόντιο άξονα, συναρτήσει της επιβαλλόμενης τάσης που παρουσιάζεται στον κατακόρυφο άξονα. Από την κλίση της καμπύλης της ϵ_1 προκύπτει ότι:

$$E \approx 9.3 \text{ GPa}$$

Οπου λαμβάνεται για την περιοχή όπου το επιβαλλόμενο φορτίο είναι μικρό και ισχύει η γραμμική ελαστικότητα.

$$\nu \approx 0.296$$

Διαγράμμα 5.2



Με μπλε συμβολίζεται η ϵ_1 , ενώ με κίτρινο η $|\epsilon_2|$.

Κεφάλαιο 6

6.1. Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν για το στρωσιγενές υλικό, υπολογίσθηκαν τόσο με αναλυτικές μεθόδους, όσο και μέσω της πειραματικής διαδικασίας. Τα αποτελέσματα για το μέτρο ελαστικότητας του υλικού παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 6.1

Μέθοδος Προσδιορισμού	E [GPa]
Νόμος μιγμάτων	8.655
Σχέση Christensen	12.286
Καθαρός Εφελκυσμός	11.864
Καθαρή Κάμψη	11.456
Σχέση Lloyd's Εφελκυσμός	7.973
Σχέση Lloyd's Κάμψη	6.150
Μητρώο $1/h[A]$	10.989
Πείραμα Εφελκυσμού	13.000
Πείραμα Κάμψης	9.300

Μια γενική διαπίστωση στα παραπάνω αποτελέσματα αποτελεί το γεγονός πως οι τιμές για το μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό είναι κατά κανόνα μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες που προκύπτουν για την κάμψη. Αυτό εξηγείται διότι το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη τείνει να εξισωθεί με το μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό, όταν ο λόγος του μήκους στηρίξεως ως προς το πάχος είναι μεγάλος, για τιμές ($L/t > 40$).

Επιπρόσθετα στην περίπτωση του εφελκυσμού τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από αλγορίθμους είναι μικρότερα εκείνων του πειραματικού. Η λογική των συντηρητικών υπολογισμών – αποτελεσμάτων, δικαιολογείται από το ότι ο ερευνητής επιθυμεί να βρίσκεται στην ασφαλή πλευρά κατά το στάδιο του σχεδιασμού ναυπηγικών κατασκευών, οπότε και τα μεγέθη δεν έχουν διαμορφωθεί πλήρως.

Σχετικά με τον υπολογισμό του φορτίου αστοχίας σε εφελκυσμό προέκυψαν τα αποτελέσματα:

Πίνακας 6.2

Υπολογιστικές μέθοδοι	Φορτίο αστοχίας [N]
Μέθοδος α	22318
Μέθοδος β	47692
Μέθοδος γ	25191
Μέθοδος δ	18985
Πείραμα εφελκυσμού	29000

Όπου η μέθοδος δ, κατά την οποία η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό υπολογίζεται βάσει του Βρετανικού Νηογνώμονα, δίνει τα πιο συντηρητικά αποτελέσματα. Επιπρόσθετα παρατηρείται πως η μέθοδος β, η οποία στηρίζεται στο νόμο των μιγμάτων οδηγεί σε πολύ υψηλές τιμές για το φορτίο αστοχίας σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους.

Σχετικά με το λόγο του Poisson ν , προκύπτει πως ο προσδιορισμός του μέσω της πειραματικής διαδικασίας όπου υπολογίζεται σε:

$$\nu = - \mu_1 / \mu_2 ,$$

$$\nu \approx 0.35$$

διαφέρει σε σχέση με την τιμή που προκύπτει από θεωρητικούς υπολογισμούς, όπου:
 $\nu = 0.26$

λόγω του ότι οι εγκάρσιες παραμορφώσεις τις οποίες μετρούν τα μηκυνσιόμετρα, τα οποία είναι τοποθετημένα στην επιφάνεια του πολύστρωτου υλικού δεν λαμβάνουν τις μικρές τιμές του λόγου Poisson, του 6^{ου} στρώματος (στρώμα W.R.) του στρωσιγενούς υλικού.

Όσον αφορά στην περίπτωση του εφελκυσμού και τη σχέση των παραμορφώσεων με το επιβαλλόμενο εφελκυστικό φορτίο, φαίνεται πως τα πειραματικά αποτελέσματα των διαμήκων παραμορφώσεων (ϵ_1) είναι μικρότερα συγκρινόμενα με αυτά που προέκυψαν από τις υπολογιστικές μεθόδους. Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα των υπολογιστικών μεθόδων, καθώς και οι τιμές που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία.

Πίνακας 6.3

Φορτίο [N]	ϵ_1	ϵ_2	Πειραματικός προσδιορισμός ϵ_1	Πειραματικός προσδιορισμός ϵ_2
0	0	0	0	0
1000	4.9863E-04	-1.3164E-04	3.8796E-04	-1.3056E-04
2000	9.9726E-04	-2.6328E-04	7.7222E-04	-2.6389E-04
3000	1.4959E-03	-3.9492E-04	1.1898E-03	-4.1204E-04
4000	1.9945E-03	-5.2655E-04	1.6028E-03	-5.5926E-04
5000	2.4932E-03	-6.5819E-04	2.0324E-03	-7.1481E-04
6000	2.9918E-03	-7.8983E-04	2.4731E-03	-8.7685E-04
7000	3.4904E-03	-9.2147E-04	2.9259E-03	-1.0435E-03
8000	3.9890E-03	-1.0531E-03	3.3778E-03	-1.2139E-03
9000	4.4877E-03	-1.1847E-03	3.8148E-03	-1.3796E-03
10000	4.9863E-03	-1.3164E-03	4.2935E-03	-1.5620E-03
11000	5.4849E-03	-1.4480E-03	4.7639E-03	-1.7435E-03
12000	5.9836E-03	-1.5797E-03	5.2491E-03	-1.9306E-03
13000	6.4822E-03	-1.7113E-03	5.7324E-03	-2.1176E-03
14000	6.9808E-03	-1.8429E-03	6.2454E-03	-2.3176E-03
15000	7.4795E-03	-1.9746E-03	6.6810E-03	-2.5097E-03
16000	7.9781E-03	-2.1062E-03	7.3125E-03	-2.7273E-03
17000	8.4767E-03	-2.2379E-03	7.7148E-03	-2.8824E-03
18000	8.9754E-03	-2.3695E-03	8.2245E-03	-3.0866E-03
19000	9.4740E-03	-2.5011E-03	8.7194E-03	-3.2912E-03
20000	9.9726E-03	-2.6328E-03	9.2005E-03	-3.4773E-03
21000	1.0471E-02	-2.7644E-03	9.4991E-03	-3.6787E-03
22000	1.0970E-02	-2.8960E-03	1.0125E-02	-3.8509E-03

23000	1.1469E-02	-3.0277E-03	1.0705E-02	-4.0685E-03
24000	1.1967E-02	-3.1593E-03	1.1069E-02	-4.2769E-03
25000	1.2466E-02	-3.2910E-03	1.1782E-02	-4.4870E-03
26000	1.2964E-02	-3.4226E-03	1.2469E-02	-4.6389E-03
27000	1.3463E-02	-3.5542E-03	1.2879E-02	-4.8750E-03
28000	1.3962E-02	-3.6859E-03	1.3581E-02	-5.0167E-03
29000	1.4460E-02	-3.8175E-03	1.4184E-02	-5.2491E-03

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ
ABSTRACT**

Σελ.

Κεφάλαιο 1

1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Σύνθετα υλικά	2
1.3 Μηχανική συμπεριφορά στα σύνθετα υλικά Ισοτροπικότητα Ανισοτροπικότητα στα σύνθετα υλικά.	3
1.3.1 Μήτρα σύνθετων υλικών	7
1α. Ρητίνες	8
1.3.2 Ενισχύσεις	9
Ίνες γυαλιού	10
1.4 Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών	12
1.4.1 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών ως προς τη μήτρα	13
α) Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας (Polymer Matrix Composites, PMC's)	
β) Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας (Metal Matrix Composites, MMC's).	
γ) Σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας (Ceramic Matrix Composites, CMC's).	14
1.4.2 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών ως προς το έγκλεισμα	15
Α. Κοκκώδη σύνθετα υλικά	
i. Υλικά μη μεταλλικού εγκλείσματος σε μη μεταλλική μήτρα.	
ii. Υλικά μεταλλικού εγκλείσματος σε μη μεταλλική μήτρα.	
iii. Υλικά μεταλλικού εγκλείσματος σε μεταλλική μήτρα.	
iv. Υλικά μη μεταλλικού εγκλείσματος σε μεταλλική μήτρα.	
B. Πολύστρωτα σύνθετα υλικά.	17
Διμέταλλα	
Επιμεταλλωμένα μέταλλα	
Ύαλος ασφαλείας	
Υλικά με επίστρωση πλαστικού	
Γ. Ινώδη σύνθετα υλικά	18
1.5 Κατασκευές τύπου Sandwich	21
1.5.1 Υλικά κατασκευών τύπου Sandwich	22
1.5.2 Υλικά Περιβλήματος	23
1.5.3 Υλικά Πυρήνα	23
1.5.3.α Κυψελοειδείς πυρήνες	23
1.5.3.β Ξύλο Balsa	24
1.5.3.γ Αφρώδεις πυρήνες	24
i. Αφρός PUR (Polyurethane)	
ii. Αφρός PVC (Polyvinyl chloride)	
iii. Αφρός PMI (Poly-methacryl-imide)	
1.6 Ειδική ιδιότητα υλικού.	26
1.7.1 Πλεονεκτήματα των συνθέτων υλικών	27
1.7.2 Μειονεκτήματα των συνθέτων υλικών	28

Κεφάλαιο 2	
Μέθοδοι μορφοποίησης Συνθέτων Υλικών	30
2.1 Μέθοδοι επίστρωσης	30
2.1.1 Η επίστρωση με το χέρι	
2.1.2 Γενικά χαρακτηριστικά των μεθόδων επίστρωσης	32
2.2 Τεχνικές μορφοποίησης με καλούπια	33
2.2.1 Τεχνικές διαμόρφωσης με πρέσσα	36
2.2.1.α Μορφοποίηση με πρέσσα εν ψυχρώ	
2.2.1.β Μορφοποίηση με πρέσσα εν θερμώ	37
i) Η μορφοποίηση προδιαμορφωμένων εξαρτημάτων	
ii) Η μορφοποίηση με συμπίεση.	
2.2.2 Παράμετροι που επηρεάζουν τη μορφοποίηση	39
2.2.3 Ατέλειες κατά τη μορφοποίηση με συμπίεση	40
2.3 Μορφοποιήσεις με περιστροφή	42
2.3.1 Η φυγοκεντρική μορφοποίηση (Centrifugal forming)	42
2.3.2 Η μορφοποίηση με περιστροφή (Rotational Moulding)	43
2.3.3 Η μέθοδος περιέλιξης των ινών	44
2.3.3.α Ατέλειες στην περιέλιξη των ινών	46
2.4 Μορφοποιήσεις με διατάξεις συνεχούς παραγωγής	47
2.4.1 Η εξώθηση	
2.4.2 Η μορφοποίηση με έγχυση	48
2.4.3 Η παραγωγή συνεχών ευθύγραμμων στοιχείων με διέλαση/εξέλαση	50
Κεφάλαιο 3	
3.1 Γενικευμένος νόμος του Hooke	52
3.2 Κλασική θεωρία Πολύστρωτων Πλακών	55
3.3 Καταστατικές εξισώσεις στρωσιγενούς πλάκας	58
3.4 Κριτήρια αστοχίας	60
3.4.1 Κριτήριο Tsai Hill	
3.4.2 Κριτήριο Tsai Wu	61
Κεφάλαιο 4	
4.1 Υπολογισμός των μηχανικών ιδιοτήτων	62
4.2 Υπολογισμός του πάχους των στρωμάτων	64
4.3 Υπολογισμός των E, G και του λόγου Poisson ν του 6 ^{ου} στρώματος	69
4.3.1. Πρώτος τρόπος υπολογισμού των μεγεθών του 6 ^{ου} στρώματος WR	71
4.3.2. Δεύτερος τρόπος υπολογισμού των μεγεθών του 6 ^{ου} στρώματος WR	
4.3.3. Τρίτος τρόπος υπολογισμού των μεγεθών του 6 ^{ου} στρώματος WR	
4.4 Υπολογισμός ιδιοτήτων της σύνθετης διατομής των 8 στρωμάτων	74
4.4.1. Ο νόμος των μιγμάτων	
4.4.2. Η εξίσωση Christensen	75
4.4.3. Υπολογισμός ως ομογενούς και ισότροπου υλικού	
4.4.3.1 Καθαρός εφελκυσμός	79
4.4.3.2. Καθαρή κάμψη	
4.4.4. Υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας με βάση τους τύπους Lloyd's	80
4.4.5 Υπολογισμός του μητρώου $h_*[A]^{-1}$	81

4.5 Συγκέντρωση αποτελεσμάτων Μέτρου Ελαστικότητας του στρωσιγενούς υλικού	83
4.6 Μητρώο Ειδικός Ορθότροπου μη συμμετρικού στρωσιγενούς	84
4.7 Υπολογισμός ροπών αδρανείας και ροπών αντίστασης της διατομής	86
4.8. Υπολογισμός φορτίου αστοχίας σε εφελκυσμό.	88
4.8.1. Υπολογισμός τάσεων αστοχίας με το κριτήριο Tsai Hill.	
4.8.2. Υπολογισμός φορτίου αστοχίας του πολύστρωτου.	92
4.8.2.1. Μέθοδος α	92
4.8.2.2. Μέθοδος β	94
4.8.2.3. Μέθοδος γ	95
4.8.2.4. Μέθοδος δ	99
4.9. Υπολογισμός των ορθών τάσεων και των παραμορφώσεων του στρωσιγενούς.	100
4.9.1. Εφελκυσμός	
4.9.2. Κάμψη	103
Κεφάλαιο 5	
5.1 Πειραματική διαδικασία	108
5.1.1 Πείραμα εφελκυσμού	
5.1.2. Πείραμα κάμψης	113
Κεφάλαιο 6	
6.1. Συμπεράσματα	117
Βιβλιογραφία	

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ

1. Β. Ι. Παπάζογλου, «Ναυπηγική Τεχνολογία», Ε.Μ.Π. Αθήνα 1995.
2. Δ. Ι. Παντελής, «Μη Μεταλλικά Τεχνικά υλικά», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 1996.
3. Παπανικολάου Γ., Μουζάκης Δ., «Σύνθετα Υλικά», 1η Έκδοση, Κλειδάριθμος, Αθήνα (2007).
4. Ν. Ανδριανόπουλος, Ε. Κυριαζή, Κ. Λιακόπουλος, «Πειραματική Αντοχή των Υλικών», Αθήνα 1991.
5. sciencedirect.com , Anoop K. Sood , Raj K. Ohdar , Siba Σ. Mahapatra
6. Nat Perssen.nl
7. Lloyd's Register of Shipping, «Rules & Regulations for Special Service Craft».
8. Polyester Resin Operations, Barry Young - Matthew Powers
9. Robert P. Demchik, John F Mandell, Frederick J. McGarry «MARINE ENVIRONMENT EFFECTS ON FATIGUE CRACK PROPAGATION IN GRP LAMINATES FOR HULL CONSTRUCTION», (M.I.T 1973)
10. higherproductdesign.blogspot.com
11. composites.ugent.be
12. Sinotech.com
13. dc.engr.scu.edu
14. azom.com
15. production-process.blogspot.com
16. designinsite.dk
17. megamould.com