

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΣΤΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ»



ΛΑΔΑΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ
ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ
ΓΛΑΒΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΣΤΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

ΚΕΦ.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

1.1 Εισαγωγή

1.2 Γενικά χαρακτηριστικά Σύνθετων Υλικών

1.3 Τύποι Σύνθετων Υλικών

1.3.1 Ινώδη Σύνθετα Υλικά

1.3.2 Σύνθετα Υλικά Σωματιδίων

1.3.3 Πολύστρωτα Σύνθετα Υλικά

ΚΕΦ.2 ΤΥΠΟΙ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

2.1 Μήτρες

2.1.1 Σύνθετα πολυμερικής μήτρας

2.1.2 Σύνθετα κεραμικής μήτρας

2.1.3 Σύνθετα μεταλλικής μήτρας

2.2 Μέσα ενίσχυσης

2.2.1 Ίνες γυαλιού

2.2.2 Ίνες άνθρακα

2.2.3 Αραμιδικές ίνες

2.3 Μέθοδοι παρασκευής Σ.Υ

2.3.1 Τρόποι παρασκευής πολυμερών Σ.Υ

2.3.2 Τρόποι παρασκευής κεραμικών Σ.Υ

2.3.3 Παραγωγή ινών γυαλιού

2.3.4 Παραγωγή ινών άνθρακα

2.3.5 Παραγωγή αραμιδικών ινών

ΚΕΦ.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

3.1 Γενικά χαρακτηριστικά ινών και μήτρων

3.2 Πλεονεκτήματα σύνθετων υλικών

3.2.1 Θερμοκρασιακές επιδράσεις

3.2.2 Υγρασία

3.2.3 Υπεριώδης ακτινοβολία

3.2.4 Αλκαλικό και όξινο περιβάλλον

3.2.5 Γαλβανική διάβρωση

3.2.6 Ερπυσμός

3.2.7 Κόπωση

3.2.8 Κρούση

3.3 Μηχανικές ιδιότητες ενισχυμένων σύνθετων υλικών

3.3.1 Μελέτη ενισχυμένων ινωδών σύνθετων υλικών

3.3.2 Κατανομή των εντατικών και παραμορφωσιακών πεδίων στα άκρα των ινών

3.3.3 Ελαστικές ιδιότητες κοντόινων ινωδών σύνθετων υλικών

3.4 Ανακύκλωση σύνθετων υλικών

3.4.1 Ανακύκλωση των θερμοσκληρυνόμενων και θερμοπλαστικών συνθέτων

3.4.2 Επιλογές για την ανακύκλωση των θερμοσκληρυνόμενων συνθέτων

3.4.2.1 Επαναθρυμματισμός των σύνθετων υλικών

3.4.2.2 Πίεση εν θερμώ

3.4.2.3 Πυρόλυση

3.4.2.4 Καύση

3.4.3 Επιλογή μεθόδου ανακύκλωσης

ΚΕΦ.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

4.1 Γενικά

4.2 Εφαρμογές των GRP

4.2.1 Ειδικότεροι τομείς που κυριαρχούν τα GRP σύνθετα

4.3 Σύνθετα υλικά υψηλών επιδόσεων

4.4 Διάφορες εφαρμογές σύνθετων υλικών

4.5 Χαρακτηριστικά παραδείγματα κατασκευών από σύνθετα υλικά

4.5.1 Χαρακτηριστικά γέφυρας από σύνθετα υλικά

4.6 Κατασκευαστικά στοιχεία τύπου «Σάντουιτς»

4.7 Επιστρώματα

ΚΕΦ.5 ΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑΣ ΑΓΟΡΑΣ

5.1 Γενικά

5.2 Συνολικά στοιχεία οδικών γεφυρών από σύνθετα υλικά σε όλο τον κόσμο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΑ

Τα σύνθετα υλικά είναι τόσο παλιά όσο και η φύση .Υπάρχουν πολλά παραδείγματα χρήσης των σύνθετων υλικών στην ανατομία των ανθρώπων και των ζώων , στα φυτά και στις γεωλογικές μορφές .Τα πρώτα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν από τον άνθρωπο ήταν τα φυσικά σύνθετα όπως το ξύλο , αλλά γρήγορα ανακαλύφθηκαν τα πλεονεκτήματα από την τεχνητή μίξη υλικών .Οι αρχαίοι πολιτισμοί χρησιμοποιούσαν επεκταμένα άχυρο και πυλό για την κατασκευή τούβλων . Εκμεταλλεύονταν με αυτό το συνδυασμό τη θλιπτική αντοχή του πυλού με το συνδετικό ρόλο και την εφελκυστική αντοχή του άχυρου , επιτυγχάνοντας για την εποχή τους ένα εξαιρετικό δομικό υλικό . Η απόδοση του συνδυασμού των δυο αρκετά διαφορετικών υλικών είναι πολύ ανώτερη από την απόδοση του κάθε υλικού ξεχωριστά .

Σήμερα ,τα σύνθετα υλικά έχουν ένα αρκετά ευρύ πεδίο εφαρμογών και εξαιτίας της αλματώδους ανάπτυξης τους , μπορούν να χαρακτηριστούν ως τα υλικά του μέλλοντος .Στον παρακάτω πίνακα καταγράφεται μια ιστορική εξέλιξη των σύνθετων υλικών.

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΥΛΙΚΟ
5000 Π.Χ.	Πάπυρο /πίσσα (βάρκες)
1500 Π.Χ.	Ξύλινη σανίδα
1909	Σύνθετα με φαινολικές ρητίνες
1928	Σύνθετα με ουρία-φορμαλδεΐδη
1938	Σύνθετα υλικά μελαμίνης
1942	Πολυεστέρας με ίνες γυαλιού
1946	Σύνθετα με εποξειδικές ρητίνες
1951	Πολυστυρένιο με ίνες γυαλιού
1956	Πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα
1964	Πολυμερή ενισχυμένα με ίνες βορίου
1969	Υβριδικά υλικά άνθρακα /γυαλιού
1972	Πολυμερή ενισχυμένα με αραμιδικές ίνες
1975	Υβριδικά υλικά άνθρακα /αραμιδικών ινών
1980	Σύνθετα κεραμικά
2000	Νανοςύνθετα

Πίνακας 1.1 Ιστορική εξέλιξη των σύνθετων υλικών.

1.2. ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Το υψηλό επίπεδο της τεχνολογίας έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή βελτίωση των υλικών .Οι σύγχρονοι ρυθμοί ανάπτυξης απαιτούν υλικά τα οποία μπορούν να χαρακτηριστούν από ποικίλα κριτήρια όπως υψηλή αντοχή , χαμηλό κόστος παραγωγής και μικρό βάρος .Τα σύνθετα υλικά προσεγγίζουν με πολύ ικανοποιητικά όρια τα παραπάνω κριτήρια και γι' αυτό το λόγο παρατηρούνται τα τελευταία χρόνια εντατικές έρευνες για την περαιτέρω ανάπτυξη τους .

Τα σύνθετα υλικά (composite materials) μπορούν να θεωρηθούν ως ένας επιλεγμένος συνδυασμός από δύο ή περισσότερα ,διαφορετικά μεταξύ τους, υλικά (φάσεις) με συγκεκριμένη εσωτερική κατασκευή και εξωτερικό σχήμα και μορφή . Αυτές οι φάσεις είναι διαχωρισμένες από μια επιφάνεια , η οποία ονομάζεται διεπιφάνεια (interference). Ο συνδυασμός αυτός των υλικών αν και εμπεριέχει κάποια μορφή χημικής ένωσης , στα όρια της διεπιφάνειας , δεν έχει ως αποτέλεσμα ένα ομοιογενές υλικό . Αυτό συμβαίνει γιατί η ένωση των συνιστώντων υλικών γίνεται σε μακροσκοπική κλίμακα και πολύ εύκολα μπορούν να διακριθούν στο τελικό προϊόν , τόσο τα ίδια τα υλικά όσο και οι μεταξύ τους διαχωριστικές επιφάνειες .

Η επιλογή των υλικών είναι τέτοια ώστε να επιτυγχάνονται υψηλές αντοχές και να προσφέρονται ανώτερες μηχανικές ιδιότητες από τα συμβατικά υλικά .Συχνά τα σύνθετα υλικά διαθέτουν κάποιες ιδιότητες που κανένα από τα συστατικά τους δεν διαθέτει . Μερικές από τις ιδιότητες που μπορούν να βελτιωθούν με τη χρήση των σύνθετων υλικών είναι :

- αντοχή σε φορτία
- χαμηλό βάρος
- ακαμψία
- εμφάνιση / χρωματισμός
- αντοχή σε διάβρωση
- αντοχή σε κόπωση
- θερμική και ακουστική μόνωση
- θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα

Η συνεχής φάση ενός σύνθετου υλικού ονομάζεται μήτρα (matrix). Η πιο σημαντική λειτουργία της μήτρας είναι η προσφορά ακαμψίας στο σύστημα της ενίσχυσης και επίσης η διατήρηση της διεύθυνσης και του σχήματος της ενίσχυσης. Το δεύτερο συστατικό των σύνθετων υλικών αναφέρεται ως μέσο ενίσχυσης (reinforcement), αφού ενισχύει ή βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες της μήτρας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα σύνθετου υλικού είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα. Τα δύο συνιστώμενα υλικά είναι το μπετό (μήτρα) και ο οπλισμός από σίδηρα (μέσο ενίσχυσης).

Όπως αναφέραμε, οι τουλάχιστον δύο διαφορετικές φάσεις που έχουν τα σύνθετα υλικά είναι διαχωρισμένες από μια διεπιφάνεια. Είναι εξαιρετικά σημαντικό, για τη σωστή λειτουργία του σύνθετου υλικού, η διεπιφάνεια να μπορεί να καθορίζει πλήρως τις φάσεις αυτές αφού αυτή η περιοχή επηρεάζει τη μεταφορά τάσεων από τη μήτρα στο μέσο ενίσχυσης. Η καλή "συνεργασία" των δύο φάσεων είναι απαραίτητη και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η περιοχή της επαφής τους, οι ιδιότητες τριβής τους αλλά και από την αντοχή και το είδος του δεσμού που αναπτύσσεται. Στη περιοχή της διεπιφάνειας

πραγματοποιείται συγκέντρωση τάσεων εξαιτίας της διαφοράς των ιδιοτήτων μεταξύ του ενισχυτικού μέσου και της μήτρας. Γενικά θεωρείται ότι σε αυτή την περιοχή δεν υπάρχει μια συνέχεια και οι ιδιότητες από την κυρίως μάζα της μήτρας έως την κυρίως μάζα του ενισχυτικού υλικού υφίστανται κάποια διαβάθμιση. Εξαιτίας της σημαντικότητας της, πραγματοποιούνται συνεχής και επεκταμένες έρευνες για να καθορισθούν πλήρως οι συνθήκες που επικρατούν στη διεπιφάνεια. Είναι γεγονός ότι στην επιστημονική κοινότητα επικρατεί, μέχρι σήμερα, μια αβεβαιότητα για το τι ακριβώς συμβαίνει στη περιοχή της διεπιφάνειας. Υπάρχουν στη βιβλιογραφία διαφορετικές προσεγγίσεις για αυτή την περιοχή, ωστόσο όλες συμφωνούν ότι για να παραχθεί ένα σύνθετο υλικό με ικανοποιητικές ιδιότητες πρέπει η συνεργασία των δύο φάσεων στη περιοχή της διεπιφάνειας να είναι πλήρης και αρμονική με όσο το δυνατόν λιγότερα κενά, ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή μεταφορά φορτίων από τη μια φάση στην άλλη.

Τα σύνθετα υλικά έχουν χαρακτηριστικά που τα ξεχωρίζουν από τα περισσότερα συμβατικά υλικά. Το κατασκευαστικό ενδιαφέρον για τα σύνθετα υλικά εστιάζεται κυρίως στο συνδυασμό της χαμηλής τους πυκνότητας με τις καλές μηχανικές τους ιδιότητες. Σε αντίθεση με τα κοινά υλικά τα σύνθετα υλικά είναι ανομοιογενή και ανισότροπα. Οι ιδιότητες τους εξαρτώνται άμεσα από τη θέση στη μάζα του υλικού και τον προσανατολισμό, καθώς αυτά διαφέρουν ανάλογα με τον άξονα αναφοράς. Λόγω της ετερογένειας των σύνθετων υλικών εξετάζονται συνήθως με δύο τρόπους:

α)Μικρομηχανικά: η μικρομηχανική εξέταση αφορά την αλληλεπίδραση των συστατικών υλικών σε μικροσκοπική κλίμακα και

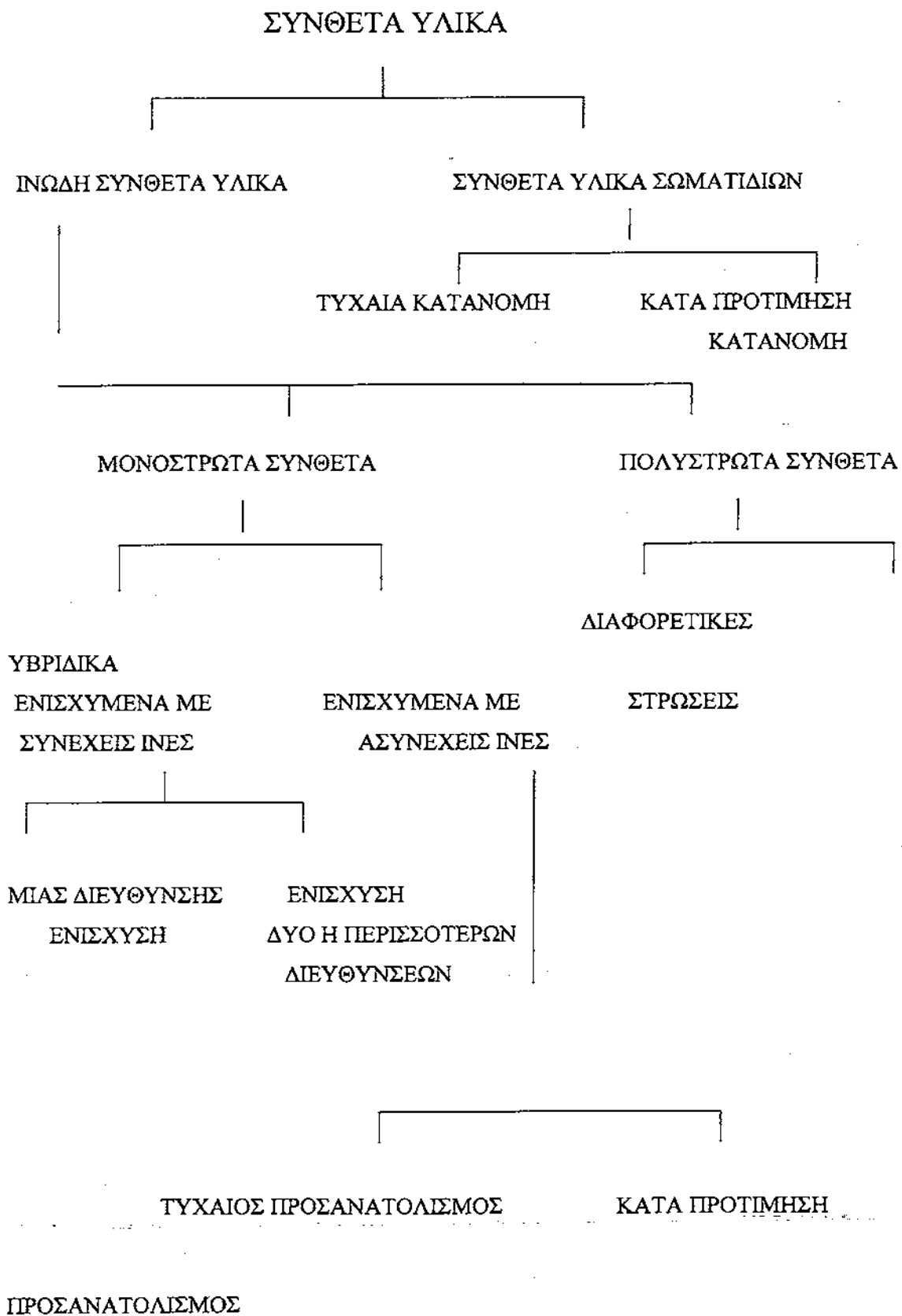
β)Μακρομηχανικά: η μακρομηχανική εξέταση είναι η εξέταση του υλικού θεωρώντας το ομοιογενές και η επίδραση των συστατικών υλικών αναφέρονται μόνο σαν μέσες φαινομενικές ιδιότητες.

1.3. ΤΥΠΟΙ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα σύνθετα υλικά μπορούν να ταξινομηθούν είτε βάσει του υλικού της μήτρας (ρητίνη) είτε βάσει του υλικού του μέσου ενίσχυσης . Έχει επικρατήσει η ταξινόμηση των σύνθετων υλικών να γίνεται με βάση το υλικό του ενισχυτικού μέσου . Επομένως οι τύποι των σύνθετων υλικών είναι οι εξής:

- A. Ινώδη σύνθετα υλικά
- B. Σύνθετα υλικά σωματιδίων
- Γ. Πολύστρωτα σύνθετα υλικά

Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει μια κοινή εφαρμοζόμενη κατηγοριοποίηση των σύνθετων υλικών βάσει του μέσου ενίσχυσης .



Σχήμα 1.1. Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών βάσει του μέσου ενίσχυσης
 [ΠΑΝΤΕΛΗΣ Δ., 1996]

1.3.1. ΙΝΩΔΗ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ (FIBROUS COMPOSITES)

Ο τύπος αυτός των σύνθετων υλικών αποτελείται από τη μήτρα, μέσα στην οποία βρίσκονται ίνες ενός άλλου υλικού. Οι ίνες μπορεί να έχουν συγκεκριμένο ή τυχαίο προσανατολισμό και να είναι συνεχείς ή ασυνεχείς (μακριές ή κοντές). Όσο μεγαλύτερη είναι η κατ' όγκο αναλογία των ινών σε ένα σύνθετο υλικό τόσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή και η ακαμψία του σύνθετου υλικού. Βέβαια σε ένα ποσοστό μεγαλύτερο του 60 -70% της κατ' όγκο αναλογίας των ινών στο σύνθετο υλικό παρόλο που το μέτρο ελαστικότητας μπορεί να συνεχίσει να αυξάνει η αντοχή θα αρχίσει να μειώνεται εξαιτίας της έλλειψης επαρκούς ποσότητας ρητίνης.

Από τη φύση τους οι ίνες έχουν μεγαλύτερη αντοχή και δυσκαμψία από το ίδιο το υλικό τους. Αυτό οφείλεται στην ευθυγράμμιση της κρυσταλλικής δομής τους με τον άξονα τους κατά το στάδιο της παραγωγής τους. Η γεωμετρία της ενίσχυσης είναι από τις πιο σπουδαίες παραμέτρους για να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα της. Μια ενίσχυση με ίνες χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι το μήκος των ινών είναι πολύ μεγαλύτερο από την εγκάρσια διάσταση τους. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι μεγάλο μήκος ινών εξασφαλίζει μεγαλύτερη αντοχή στο σύνθετο υλικό. Γενικά οι μηχανικές ιδιότητες ενός σύνθετου υλικού είναι συνάρτηση της γεωμετρίας της ενισχυτικής φάσης. Επίσης άλλη μια σημαντική παράμετρος στις μηχανικές ιδιότητες ενός ινώδους σύνθετου υλικού είναι η καλή διασπορά των ινών μέσα στη μήτρα. Καλή διασπορά των ινών προκαλεί βελτίωση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας του σύνθετου υλικού ενώ σε διαφορετική περίπτωση προκαλούνται

"ασυνέχειες" στη μάζα του σύνθετου υλικού με αποτέλεσμα οι περισσότερες τάσεις να μεταφέρονται μέσα στη μήτρα.

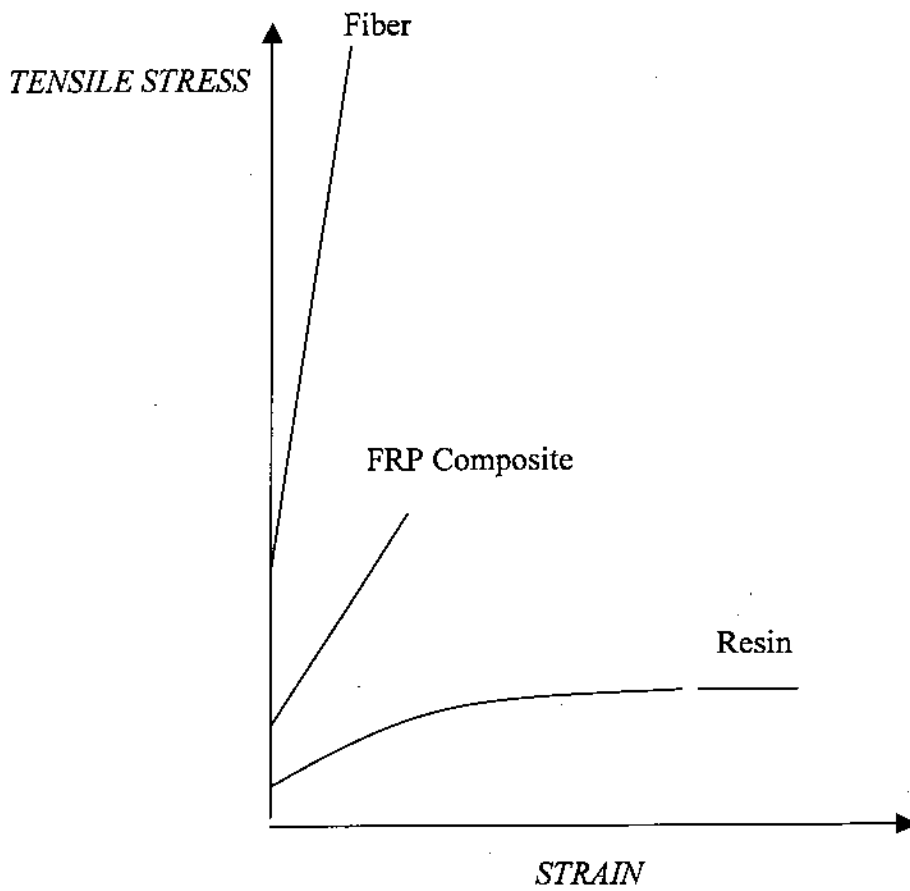
Οι ιδιότητες του ινώδους σύνθετου υλικού καθορίζονται από τους εξής παράγοντες:

1. Την κατ' όγκο αναλογία των ινών
2. Τον προσανατολισμό των ινών
3. Τις ιδιότητες των ινών και της ρητίνης
4. Τη συνάφεια ινών - μήτρας
5. Τη διαπότιση των ινών από τη μήτρα

(Behr, Rosentritt ,Lang - 2000)

Οι ίνες δε θα μπορούσαν, εάν δεν υπήρχε η μήτρα, να πάρουν τη φόρμα ενός κατασκευαστικού στοιχείου, ώστε να μπορούν να δεχθούν φορτίο. Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζεται σε ένα σχεδιάγραμμα ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα σύγκρισης της μεταβολής της εφελκυστικής τάσης συναρτήσει της παραμόρφωσης για ίνες, ρητίνη και το παραγόμενο σύνθετο υλικό.

Συνήθως οι ίνες έχουν μεγαλύτερο ειδικό βάρος, αντοχή και ακαμψία από ότι η μήτρα. Όμως ο συνδυασμός μήτρας και ινών έχει πολύ μεγαλύτερη αντοχή, ακαμψία και χαμηλότερη πυκνότητα, από ότι το καθένα ξεχωριστά.



Σχήμα 1.2. Μεταβολή εφελκυστικής τάσης συναρτήσει της παραμόρφωσης [FUDUKA M. , 1990]

1.3.2. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ (PARTICULATE COMPOSITES)

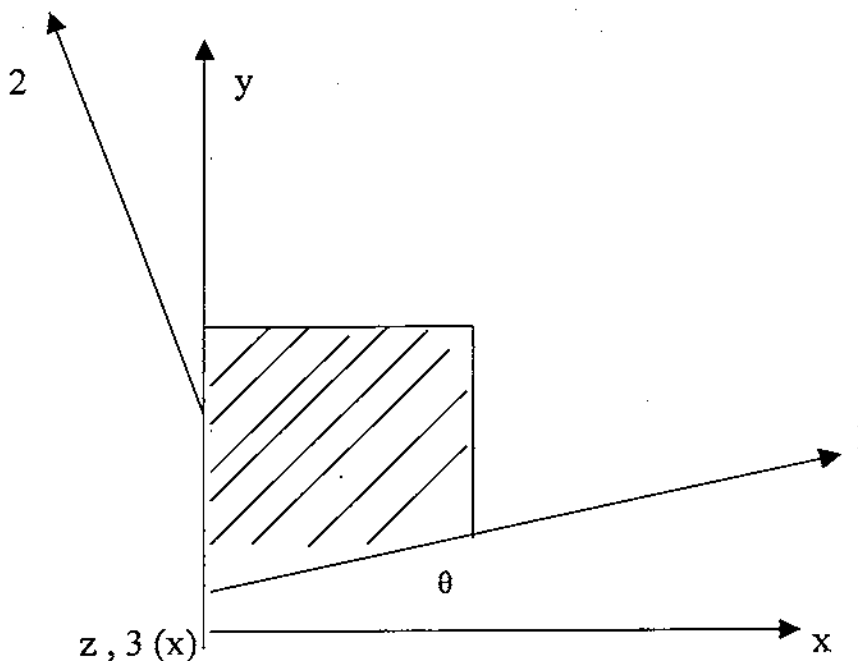
Τα σύνθετα υλικά σωματιδίων αποτελούνται από σωματίδια ενός ή περισσοτέρων υλικών, τοποθετημένα σε μήτρα ενός τρίτου υλικού. Τα σωματίδια μπορεί να είναι μεταλλικά ή μη μεταλλικά και έχουν διαστάσεις οι οποίες είναι προσεγγιστικά ίσες σε όλες τους τις διευθύνσεις. Το σχήμα των ενισχυτικών σωματιδίων μπορεί να είναι σφαιρικό, κυβικό, καμπυλωτό, δισκοειδή ή να έχει οποιαδήποτε άλλη γεωμετρική μορφή. Η μορφή της ενίσχυσης με σωματίδια, μπορεί να έχει τυχαίο ή καθορισμένο προσανατολισμό. Το μέγεθος, το σχήμα και η κατανομή των σωματιδίων σε συνάρτηση με την ποσότητα τους και το μέτρο ελαστικότητας τους επηρεάζουν τις ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Γι' αυτό το λόγο προτιμούνται σωματίδια με σχετικά μικρά μεγέθη και στρογγυλεμένα, γιατί παρουσιάζουν μεγαλύτερη ομοιομορφία. Στη πλειοψηφία των σύνθετων υλικών, που είναι ενισχυμένα με σωματίδια, ο προσανατολισμός των σωματιδίων είναι τυχαίος. Οι ιδιότητες που μπορούν να βελτιωθούν σε ένα σύνθετο υλικό σωματιδίων είναι η θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα και επίσης παράγονται σχετικά χαμηλού κόστους σύνθετα υλικά.

1.3.3. ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ (PARTICULATE COMPOSITES)

Τα πολύστρωτα σύνθετα υλικά έχουν ως μέσο ενίσχυσης κυρίως ίνες και αποτελούνται από διαδοχικές στρώσεις υλικού. Αυτές οι στρώσεις μπορεί να είναι ίδιου ή διαφορετικού υλικού. Ως στρώση

ορίζουμε μια επίπεδη ή και με καμπυλότητα διάταξη των ενισχυτικών ινών, διαποτισμένη με το υλικό της μήτρας.

Ένα τυπικό πολύστρωτο σύνθετο υλικό μπορεί να περιλαμβάνει από τέσσερα μέχρι σαράντα φύλλα υλικού και ο προσανατολισμός των ινών μπορεί να μεταβάλλεται από στρώση σε στρώση διαμέσου του πάχους του πολύστρωτου υλικού. Το σύστημα αξόνων 1,2,3 μιας στρώσης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.3 τοποθετείται έτσι ώστε ο άξονας 1 να είναι παράλληλος στη διεύθυνση των ινών. Ο άξονας 2 έχει διεύθυνση κάθετη στη διεύθυνση της ενίσχυσης. Ο άξονας 3 είναι κάθετος στο επίπεδο της στρώσης. Στο πολύστρωτο χρησιμοποιούμε το γεωμετρικό σύστημα x,y,z .



Σχήμα 1.3 Γεωμετρικό (x,y,z) και κύριο σύστημα υλικού $(1,2,3)$

[ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ, 1998]

Ο κύριος άξονας 1 κάθε στρώσης σχηματίζει γωνία θ με τον γεωμετρικό άξονα x του πολύστρωτου ενώ ο άξονας 3 συμπίπτει με τον άξονα z . Επομένως, σε ένα πολύστρωτο σύνθετο υλικό υπάρχει η δυνατότητα να τοποθετηθούν οι στρώσεις, κατά το στάδιο της παραγωγής, έτσι ώστε οι

κύριες διευθύνσεις κάθε μιας στρώσης να προσανατολιστούν ανάλογα με τις απαιτήσεις που χρειάζονται και επίσης να ρυθμιστούν οι αντοχές και η δυσκαμψία στις διάφορες διευθύνσεις, ώστε να συμπέσουν με αυτές των φορτίων της κατασκευής.

Στη περίπτωση που οι στρώσεις είναι διαφορετικού υλικού το πολύστρωτο σύνθετο υλικό ονομάζεται υβριδικό. Γενικά τα υβριδικά σύνθετα αποτελούνται από διαφορετικούς τύπους και γεωμετρίες ινών. Οι ίνες μπορούν να αναμιχθούν σε μια ή περισσότερες στρώσεις και αυτά τα σύνθετα σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε το τελικό προϊόν να εξαρτάται από τις ιδιότητες και τις κατευθύνσεις των χρησιμοποιούμενων ινών. Για παράδειγμα ένα σύνθετο υλικό αποτελούμενο από καρβιδικές ίνες και ίνες γυαλιού, τοποθετούμενες σε μια πολυμερική μήτρα, προσφέρει ένα σχετικά φθηνό σύνθετο υλικό, λόγω του χαμηλού κόστους των ινών γυαλιού, αλλά με μηχανικές ιδιότητες αυξημένες από την εξαιρετικά μεγάλη αντοχή των καρβιδικών ινών. Μερικά υβριδικά συστήματα αποτελούνται και από μίγμα ινών και κόκκων.

Γενικά κάθε πολύστρωτο σύνθετο υλικό χαρακτηρίζεται από μια ονομασία που αποτελείται από δύο όρους. Ο πρώτος όρος δηλώνει τη συμμετρία του πολύστρωτου και ο δεύτερος όρος τον προσανατολισμό των ινών των στρώσεων του. Επομένως υπάρχουν οι εξής τύποι πολύστρωτων σύνθετων υλικών. Τα συμμετρικά με διασταυρούμενες ή διαγώνιες στρώσεις και τα μη συμμετρικά με διασταυρούμενες ή διαγώνιες στρώσεις.

Συμμετρικό είναι το πολύστρωτο που για κάθε μια στρώση υπάρχει μια άλλη στρώση συμμετρική, ως προς το μέσο επίπεδο του πολύστρωτου,

που αποτελείται από το ίδιο υλικό και οι ίνες έχουν τον ίδιο προσανατολισμό.

Πολύστρωτο με διασταυρούμενες στρώσεις είναι το πολύστρωτο που όλες οι στρώσεις του έχουν τις ίνες τους ευθυγραμμισμένες με τα γεωμετρικά του άκρα ενώ όταν τουλάχιστον μια στρώση δεν ικανοποιεί την παραπάνω συνθήκη αναφερόμαστε σε πολύστρωτο με διαγώνιες στρώσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 ΜΗΤΡΕΣ

Η συνεχής φάση ενός σύνθετου υλικού ονομάζεται μήτρα. Σκοπός της μήτρας είναι η διατήρηση της συνοχής του σύνθετου υλικού, η προστασία του μέσου ενίσχυσης και η ομοιόμορφη κατανομή και μεταφορά στο ενισχυτικό μέσο των εξωτερικά επιβαλλόμενων φορτίων.

Για να ικανοποιεί η μήτρα το ρόλο που είναι επιφορτισμένη χρειάζεται να παρουσιάζει πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες όπως πολύ υψηλή αντοχή, υψηλή ακαμψία, ολκιμότητα και επίσης χρειάζεται να εξασφαλίζει καλή πρόσφυση στις ίνες. Η ολκιμότητα αποτελεί ένα μέτρο ικανότητας του υλικού για να ανακόπτει τη διάδοση ρωγμών. Όσο πιο όλκιμο είναι το μητρικό υλικό τόσο ανθεκτικότερο θα είναι το σύνθετο στη διάδοση των ρωγμών. Επίσης η καλή πρόσφυση ινών - μήτρας είναι απαραίτητη προκειμένου να μεταφέρονται αποτελεσματικά οι τάσεις προς τις ίνες και να αποφεύγεται το φαινόμενο της εκρίζωσης των ινών. Μπορεί να γίνει ταξινόμηση των σύνθετων υλικών και βάσει του υλικού της μήτρας. Αυτή έχει ως εξής:

1. Σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας (Ceramic Matrix Composites).
2. Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας (Metal Matrix Composites).
3. Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας (Polymer Matrix Composites).

2.1.1. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ

Ως σύνθετα πολυμερικά υλικά ή ενισχυμένο πολυμερές χαρακτηρίζεται το σύστημα ενός ή περισσοτέρων μέσων ενίσχυσης και μιας μήτρας που αποτελείται από ένα ή περισσότερα πολυμερή.

[Πολυμερές χαρακτηρίζεται κάθε υλικό που προκύπτει από τον πολυμερισμό βασικών μορίων του που επαναλαμβάνονται.

Πολυμερισμός: όταν το αρχικό υλικό είναι ένα πλήθος ίδιων μονομερών που ενεργοποιούνται και ακολουθεί μια γρήγορη "αντίδραση αλυσίδας", δηλαδή προκύπτει ένα πολυμερές που έχει τη μορφή μιας αλυσίδας όπου κάθε κρίκος της είναι ένα τέτοιο πολυμερές].

Τα πολυμερή που συνιστούν τη μήτρα μπορεί να είναι θερμοπλαστικά ή θερμοσκληρυνόμενα.

Α) Θερμοσκληρυνόμενα : είναι ρητίνες που σκληραίνουν μόνιμα κατά τη διάρκεια του πολυμερισμού τους. Προέρχονται συνήθως από υγρά χαμηλής ρευστότητας. Τα θερμοσκληρυνόμενα υλικά είναι άμορφα και ακολουθούν μια μη αντιστρεπτή διαδικασία διαμόρφωσης. Από τη στιγμή δηλαδή που διαμορφωθούν, δεν πρόκειται να λιώσουν ή να ρευστοποιηθούν ξανά με επάνοδο της θερμοκρασίας. Αυτό οφείλεται στους ισχυρούς δεσμούς του τρισδιάστατου πλέγματος του.

Οι πρώτες θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες που χρησιμοποιήθηκαν ως μήτρες σε σύνθετα υλικά ήταν οι φαινολικές ρητίνες το 1870. Ακολούθησαν οι εποξικές ή εποξειδικές ρητίνες (epoxy), οι βινυλεστερικές (vinylester), οι πολυεστέρες (polyester), οι σιλικόνες ενώ σήμερα έχουν παραχθεί κι άλλες ομάδες πλαστικών.

Οι πολυεστερικές ρητίνες αποτελούν αξιόπιστη και δοκιμασμένη επιλογή για σύνθετα υλικά με ενίσχυση υφάσματος που δεν υποβάλλονται σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι εποξικές και οι φαινολικές ρητίνες αποτελούν λύση, με υψηλή αντοχή, για τη δημιουργία σύνθετων υλικών με απαίτηση λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες.

Στον παρακάτω πίνακα παραθέτονται συγκριτικά στοιχεία για χαρακτηριστικούς τύπους θερμοσκληρυνόμενων ρητινών.

ΡΗΤΙΝΕΣ	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Πολυεστερικές	Ευκολία στη χρήση Χαμηλό κόστος (\$1-2/kg)	Μέτριες μηχανικές ιδιότητες Μεγάλη συρρίκνωση κατά την σκλήρυνση
Βινυλεστερικές	Υψηλή αντοχή στη διάβρωση Υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες από τις πολυεστερικές	Υψηλότερο κόστος από τις πολυεστερικές (\$2-4/kg) Μεγάλη συρρίκνωση κατά τη σκλήρυνση
Εποξικές	Πολύ υψηλές μηχανικές και θερμικές ιδιότητες Μικρή συρρίκνωση κατά τη σκλήρυνση	Υψηλότερο κόστος από τις βινυλιστερικές (3-15/kg)

Πίνακας 2.1 Σύγκριση χαρακτηριστικών τύπων θερμοσκληρυνόμενων ρητινών

[ΠΑΝΤΕΛΗΣ Δ., 1996]

Β) Θερμοπλαστικά: είναι πολυμερή τα οποία σε υψηλές θερμοκρασίες (150°C - 200°C) μαλακώνουν και μπορούν εύκολα να μορφοποιηθούν. Τα πιο απλά θερμοπλαστικά προκύπτουν συνήθως από τον πολυμερισμό απλών μορίων τα οποία συντάσσονται σε πολυμερείς αλυσίδες μεγάλου

μήκους και μικρού πλάτους (μακρομόρια). Στην κατηγορία των θερμοπλαστικών περιλαμβάνονται τα ακρυλικά (acrylic), το πολυπροπυλένιο (polypropylene) και το πολυαιθυλένιο (polyethylene). Επίσης, άλλα συστήματα μήτρας είναι τα νέα θερμοπλαστικά ΡΕΕΚ (polyetheroketone). Τα ΡΕΕΚ είναι ημικρυσταλικά πολυμερή, παρουσιάζουν μεγάλη ανάπτυξη και αποτελούν πολύ υποσχόμενες λύσεις πολυμερικού μητρικού υλικού για εφαρμογές σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες.

Για την παραγωγή πολυμερικών μήτρων τα θερμοσκληρυνόμενα υλικά είναι περισσότερο διαδεδομένα από ότι τα θερμοπλαστικά. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα είναι ότι από τη δεκαετία του 1990 το 85% των σύνθετων πολυμερών που παράχθηκαν ήταν με θερμοσκληρυνόμενα υλικά, ενώ το 15% με θερμοπλαστικά [ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ 1998]. Μέχρι και το τέλος της προηγούμενης δεκαετίας η πιο διαδεδομένη εφαρμογή των θερμοπλαστικών ήταν η τοποθέτηση κοντών ινών μέσα σε θερμοπλαστική ρητίνη. Με αυτό τον τρόπο προέκυπτε ένα σύνθετο υλικό με μέτριες μηχανικές ιδιότητες. Μόνο τα τελευταία δέκα χρόνια αναπτύχθηκαν μέθοδοι για τη χρήση συνεχόμενων ενισχυτικών ινών με μήτρες θερμοπλαστικών υλικών.

Υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των πολυμερικών υλικών. Γενικά τα θερμοσκληρυνόμενα υλικά είναι κατά βάση εύθραυστα υλικά, ενώ τα θερμοπλαστικά μπορούν να υποστούν σημαντική πλαστική παραμόρφωση. Στον παρακάτω πίνακα γίνεται μια σύγκριση μεταξύ χαρακτηριστικών θερμοπλαστικών και θερμοσκληρυνόμενων υλικών.

Property	Thermosets resins		Thermoplastics resins		
	Epoxy	Polyester	Nylon 6.6	Polypropylene	PEEK
Melting temperature °C	-	-	265	164	334
Distorsion temperature °C	50-200	50-110	120-150	80-120	150-200
Shrinkage on curing (%)	1-2	4-8	-	-	-
Water absorption(%)	0.1-0.4	0.1-0.3	1.3	0.03	0.1
Chemical resistance	Good, attacked by strong acids	Attacked by strong acids and alkalis	Good, attacked by strong acids	Excellent	Excellent

Πίνακας 2.2 Comparison between thermosets and thermoplastics of properties relating to dimensional and environmental stability.

[ΝΕΟΦΩΤΙΣΤΟΣ Δ. , 2003]

Τέλος τα σύνθετα υλικά θερμοπλαστικής βάσης παρουσιάζουν ορισμένα πλεονεκτήματα, συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα θερμοσκληρυνόμενης. Μερικά από αυτά τα πλεονεκτήματα είναι:

* Ο χρόνος κατασκευής είναι μικρότερος αφού η σκλήρυνση των θερμοσκληρυνόμενων υλικών είναι περισσότερο χρονοβόρα.

* Έχουν χαμηλότερο κόστος αποθήκευσης πρώτων υλών αφού τα θερμοπλαστικά είναι στερεά και συνήθως σε μορφή pellets ή κόκκων ενώ τα θερμοσκληρυνόμενα είναι σε υγρή μορφή.

* Έχουν ευκολότερη μορφοποίηση και επεξεργασία.

* Η ανακύκλωση τους είναι πιο εύκολη.

2.1.2. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΕΡΑΜΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ

Μπορούμε να διακρίνουμε τα κεραμικά υλικά σε δύο κατηγορίες, τα συμβατικά κεραμικά και τα προηγμένα ή κεραμικά υψηλών επιδόσεων. Στα συμβατικά ανήκουν τα τούβλα, η πορσελάνη και τα υλικά αγγειοπλαστικής, ενώ τα προηγμένα αντιπροσωπεύουν μια βελτιωμένη κατηγορία κεραμικών που τα χαρακτηριστικά τους εξαρτώνται από την ποιότητα και την καθαρότητα των πρωτογενών υλικών. Συνήθως είναι κρυσταλλικής μορφής και δημιουργούνται από την ένωση μεταλλικών και μη μεταλλικών στοιχείων. Τέτοια υλικά είναι το πυρίτιο, το αλουμίνιο και το τιτάνιο.

Σε σχέση με τις πολυμερικές και μεταλλικές μήτρες οι κεραμικές διακρίνονται για τις πολύ καλές ιδιότητες τους όπως το πολύ υψηλό σημείο τήξης, χαμηλή πυκνότητα, χαμηλό ειδικό βάρος, υψηλή αντοχή σκληρότητα και δυσκαμψία. Παρόλο όμως τις εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες τους παρουσιάζουν δυο πολύ σημαντικά μειονεκτήματα, πολύ δαπανηρή παρασκευή και ελάχιστη ανεκτικότητα σε ατέλειες (ψαθυρότητα) όπως ρωγμές ή οπές, που μπορούν να εμφανιστούν κατά το στάδιο της κατασκευής τους.

2.1.3. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ

Η εξέλιξη των υλικών για μεταλλικές μήτρες είναι βασισμένη κυρίως σε τρία μέταλλα το αλουμίνιο, το μαγνήσιο και το τιτάνιο. Τα μέταλλα γίνονται συνήθως κράματα με άλλα υλικά για να βελτιώσουν τις φυσικές και τις μηχανικές τους ιδιότητες. Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία

από κράματα τα οποία χρησιμοποιούνται για τη παραγωγή σύνθετων υλικών.

Τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται για τα σύνθετα υλικά είναι όλκιμα και προσφέρουν στα μεταλλικά σύνθετα υλικά αντοχή στη φθορά, αντοχή στη παραμόρφωση και καλή θερμική μόνωση.

Συνήθως στα σύνθετα υλικά με μεταλλική μήτρα αναπτύσσονται χημικές αντιδράσεις στο σημείο επαφής μεταξύ μήτρας και ενίσχυσης (διεπιφάνεια). Το συγκεκριμένο γεγονός οφείλεται στην αντίδραση του οξυγόνου με τα μέταλλα. Αυτό είναι ένα σημαντικό μειονέκτημα στη παραγωγή μεταλλικών μήτρων.

2.2. ΜΕΣΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

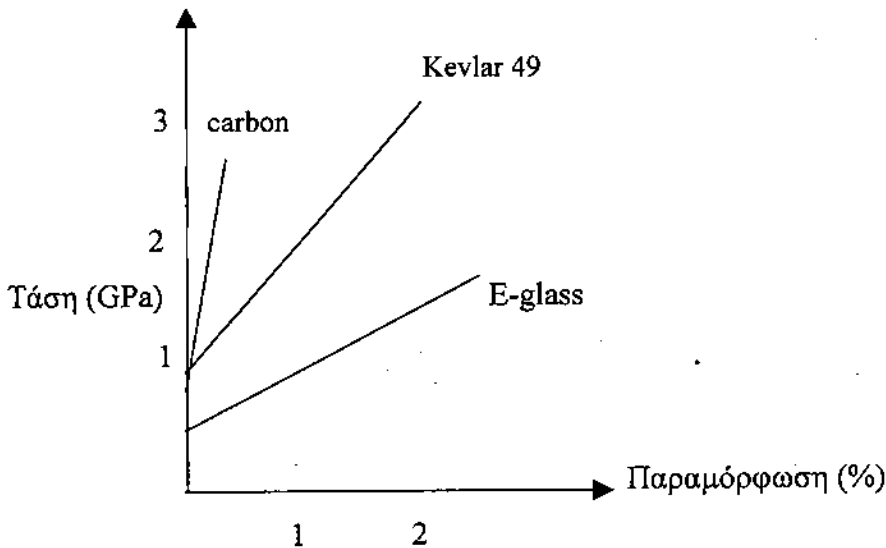
Τα μέσα ενίσχυσης είναι στερεά υλικά, σε διάφορες μορφές, που ενσωματώνονται στις μήτρες με αποτέλεσμα να αυξηθούν οι μηχανικές της ιδιότητες. Υπάρχουν ανόργανα και οργανικά μέσα ενίσχυσης και πολλές μορφές όπως ινώδη, σωματιδίων και πολύστρωτα. Ο ρόλος των ενισχύσεων διαφέρει ανάλογα με το είδος του υλικού στο ρόλο της μήτρας.

Στην περίπτωση που το ενισχυτικό υλικό είναι μέταλλο, βελτιώνονται οι ιδιότητες του υλικού στον ερπυσμό σε υψηλές θερμοκρασίες και η σκληρότητα του. Όταν το υλικό της ενίσχυσης είναι κεραμικό βελτιώνεται η σκληρότητα του και η αντοχή του σε πολύ μεγάλες θερμοκρασίες ενώ όταν είναι πολυμερές βελτιώνεται η ακαμψία, η αντοχή και περιστασιακά η σκληρότητα του.

Το περισσότερο διαδεδομένο μέσο ενίσχυσης είναι οι ίνες. Οι μηχανικές ιδιότητες των ινών είναι ανώτερες σε σχέση με τους

υπόλοιπους τύπους ενίσχυσης και η ανάπτυξη τους είναι τέτοια που η συντριπτική πλειοψηφία των σύνθετων υλικών είναι με ιώδη ενίσχυση. Η παραγωγή τους μπορεί να γίνει με τη μορφή συνεχών ινών, τεμαχισμένων ινών, υφασμάτων ή μη υφασμένων στρωμάτων ινών.

Τα σύνθετα υλικά, για να είναι ικανά να αποδώσουν σε εφαρμογές με υψηλές καταπονήσεις χρειάζεται να κατασκευάζονται από ίνες ή ομάδες ινών υψηλής αντοχής. Οι ίνες υψηλής αντοχής παρουσιάζουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες και προσδίδουν στα σύνθετα υλικά υψηλή στιβαρότητα, υψηλή τάση θραύσης, υψηλό μέτρο ελαστικότητας και παράλληλα μικρή πυκνότητα. Από τις πιο σημαντικές και πιο συνηθισμένες ίνες που χρησιμοποιούνται ως μέσα ενίσχυσης είναι οι ίνες γυαλιού, οι ίνες άνθρακα και οι αραμιδικές ίνες. Χαρακτηριστικές τους καμπύλες τάσεις παραμόρφωσης παρουσιάζονται στο σχήμα 2.1 .



Σχήμα 2.1. Καμπύλες τάσεις - παραμόρφωσης διάφορων ινών.

[ΝΕΟΦΩΤΙΣΤΟΣ Δ. ,2003]

Η υψηλή τάση αντοχής, η πολύ μικρή παραμόρφωση θραύσης και το υψηλό μέτρο ελαστικότητας αποτελούν τα κοινά χαρακτηριστικά αυτών

των ινών. Το κοινό μειονεκτήματα των ευρέως διαδεδομένων ινών είναι η δυσκολία επεξεργασίας τους.

2.2.1. ΊΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ

Με τον όρο γυαλί καλύπτεται ένα ευρύ φάσμα υλικών που συνήθως περιέχουν πάνω από 50% SiO_2 . Το συνηθισμένο γυαλί που χρησιμοποιείται για τζάμια περιέχει 14% Na_2O , 10% CaO , 2.5% MgO , 0.6% Al_2O_3 και 0.7% SO_3 ενώ το υπόλοιπο είναι SiO_2 . Ίνες που κατασκευάζονται από το γυαλί αυτό δεν έχουν πολύ καλές αντοχές, δεν είναι ανθεκτικές και σχετικά εύκολα επηρεάζονται από την υγρασία. Επίσης το γυαλί Pyrex περιέχει μεγάλη αναλογία B_2O_3 (περίπου 12.9%) και είναι πολύ ανθεκτικότερο αλλά είναι αρκετά δύσκολο να μετατραπεί σε ίνες.

Για σκοπούς ενίσχυσης ένας από τους πιο διαδεδομένους τύπους γυαλιού είναι το E-glass, το οποίο αποτελεί πάνω απ' το 90% της παραγωγής. Το E-glass διακρίνεται για τις πολύ καλές μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες του. Πέρα από αυτόν τον τύπο υπάρχει και το S-glass που διαθέτει υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες και προτιμάται σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες. Ο τύπος αυτός όμως έχει πολύ υψηλό κόστος παραγωγής και χρησιμοποιείται επεκταμένα στην αεροναυπηγική. Ακόμα υπάρχει και το R-glass που έχει υψηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο και αντοχή στη χημική διάβρωση και αντέχει επίσης σε υψηλές θερμοκρασίες. Στον πίνακα 2.3 φαίνεται η σύσταση και ορισμένες χαρακτηριστικές ιδιότητες των τριών προαναφερθέντων τύπων γυαλιών.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΥΠΟΙ ΓΥΑΛΙΟΥ		
	E	R	S
Χημική σύσταση			
SiO ₂	54	60	65
Al ₂ O ₃	16	25	25
B ₂ O ₃	8	-	-
CaO	17	9	-
MgO	5	6	10
Na ₂ O	0.3	8.5	0.3
K ₂ O	0.2	-	-
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	75	80	84
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2100-3400	2500-4400	2800-4800
Πυκνότητα (g/cm ³)	2.54	2.50	2.48
Θερμοκρασία τήξης (°C)	900-1200	1400-1600	1400-1600
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	550	650	650

Πίνακας 2.3 Σύσταση χαρακτηριστικών τύπων γυαλιών.

Η ομοιόμορφη δομή του τρισδιάστατου πλέγματος του γυαλιού και η ισχύς του κάθε δεσμού είναι σημαντική, γιατί με την προσθήκη άλλων μεταλλικών οξειδίων είναι δυνατόν να παραχθεί γυαλί με διαφορετικές ιδιότητες.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των ινών γυαλιού είναι η υψηλή αντοχή τους, η σχετική χαμηλή δυσκαμψία τους και το χαμηλό κόστος παραγωγής. Οι ίνες γυαλιού είναι ευαίσθητες σε επιφανειακές καταπονήσεις. Ακόμα και με την επαφή μιας ίνας με μια άλλη είναι πιθανό να προκληθεί επιφανειακή κάκωση ή ρωγμή που μπορεί να μειώσει το όριο θραύσης έως και κάτω του μισού του κανονικού ορίου. Για το λόγο αυτό είναι επιτακτική η ανάγκη να επικαλύπτονται οι ίνες με ένα λεπτό προστατευτικό στρώμα (sizing).

Το sizing γίνεται συνήθως με ψεκασμό των ινών με ένα πολυμερικό γαλάκτωμα. Η επίστρωση των ινών γυαλιού με το γαλάκτωμα γίνεται επίσης και για τους εξής λόγους:

(α) για να δεθούν οι ίνες μεταξύ τους, σε μικρές ομάδες ώστε να είναι ευκολότερη η επεξεργασία τους.

β) για τη λίπανση της επιφάνειάς τους.

γ) για να αποκτήσουν αντιστατικές ιδιότητες.

δ) για τη δημιουργία χημικού δεσμού και γενικότερα για να δημιουργηθεί καλύτερη αλληλεπίδραση μεταξύ των ινών του γυαλιού και της μήτρας στη διεπιφάνεια.

Οι ίνες γυαλιού διατίθενται στο εμπόριο σε διάφορες μορφές, όπου η κάθε μια είναι κατάλληλη για διαφορετικές εφαρμογές. Οι βασικές μορφές των ινών γυαλιού είναι οι εξής:

1.Υαλοπίλημα (Chopped Strand Mat, CSM):Το υαλοπίλημα κατασκευάζεται από νήματα γυαλιού που κόβονται σε μικρό μήκος και τα οποία συνδέονται με τη βοήθεια ενός ειδικού συνδετικού (binder) και δημιουργούν ένα ύφασμα με τυχαίο προσανατολισμό ινών.[σχ. Νεωφότιστος 2003]. Οι ενισχύσεις από υαλοπίλημα προτιμούνται συνήθως για επιστρώσεις με το χέρι. Έχουν χαμηλό κόστος.

2.Πλεξίδες νημάτων και υαλοϋφασμα (Woven Roving, WR): Οι πλεξίδες νημάτων (rovings) είναι ευθεία νήματα γυαλιού, που μπλέκονται κάθετα μεταξύ τους. Τα υαλοϋφάσματα έχουν επίπεδη ύφανση και μπορούν να έχουν ισοσταθμισμένη ή μη ισοσταθμισμένη διαμόρφωση. (Ισοσταθμισμένη διαμόρφωση σημαίνει ότι έχουν τον ίδιο αριθμό ινών στις δυο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις). Οι ενισχύσεις από υαλοϋφασμα έχουν ακριβό κόστος και παρουσιάζουν την υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό.

3.Υφάσματα πυκνής πλέξης (Wooven Fabrics): Κατασκευάζονται από νήματα που έχουν υποστεί περιστροφή (yarns) και τα οποία μπλέκονται μεταξύ τους και δημιουργούνται υφάσματα με πυκνή πλέξη .

4. Μονοαξονικά υφάσματά (Unidirectional Rovings UD): Μονοαξονικά υφάσματα δημιουργούνται όταν οι παράλληλες ίνες ράβονται ή συγκρατούνται μεταξύ τους, προσανατολισμένες όμως σε μια διεύθυνση .

2.2.2. ΊΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

Οι ίνες άνθρακα έχουν διάμετρο περίπου 7 με 8 μm .Υπάρχουν δύο κυρίως τύποι ινών άνθρακα. Οι ίνες υψηλής αντοχής (High Strength HS) και οι ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας (High Modulus HM) . Οι ίνες υψηλής αντοχής είναι περισσότερο διαδεδομένες στις εφαρμογές .

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να γίνει μια αναφορά στις ίνες γραφίτη, οι οποίες έχουν και αυτές ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών . Ο γραφίτης είναι μια αλλοτροπική μορφή του άνθρακα .Έχει εξαγωνική δομή και τα άτομα στο επίπεδο πλέγμα συγκρατούνται μεταξύ τους εξαιτίας ισχυρών ομοιοπολικών δεσμών, ενώ μεταξύ των επιπέδων του δημιουργούνται ασθενείς δεσμοί . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη ανισοτροπία κατά τις δύο διευθύνσεις του , που επιβεβαιώνεται από το διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας το οποίο κατά την διεύθυνση των επιπέδων είναι 910 GNm^2 και κάθετα προς τα επίπεδα είναι μόνο 30 GNm^2 .

Για να επιτευχθούν ίνες με υψηλό μέτρο ελαστικότητας χρειάζεται τα επίπεδα του άνθρακα να βρίσκονται ευθυγραμμισμένα παράλληλα προς τον άξονα της ίνας. Πρακτικά αυτό έχει μια δυσκολία, γιατί οι κρυσταλλικές μονάδες είναι υπερβολικά μικρές και ο ακριβής παραλληλισμός τους είναι σχεδόν αδύνατος, με αποτέλεσμα να υπάρχουν αταξίες στη δομή και πολλές κρυσταλλικές ατέλειες. Αυτές οι ατέλειες προκαλούν υποβάθμιση των ιδιοτήτων των συγκεκριμένων ινών, αφού εξαιτίας τους αυξάνονται οι μηχανικές τάσεις και λειτουργούν ως σημεία αδυναμίας για τη συνοχή του σύνθετου υλικού.

Οι ίνες άνθρακα παράγονται σε διάφορες μορφές, όπως συνεχείς ή ασυνεχείς, ως ύφασμα πυκνής πλέξης και ως λωρίδες (tapes). Οι λωρίδες αποτελούνται από συνεχείς ίνες άνθρακα κολλημένες ή ελαφρά συρραμμένες μεταξύ τους. Τα σύνθετα υλικά που είναι ενισχυμένα με ίνες άνθρακα εκτός από πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες και ιδιαίτερα έχουν καλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα.

2.2.3. ΑΡΑΜΙΔΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

Οι ίνες αραμιδίου ανήκουν στη κατηγορία των πολυμερών ινών και περιγράφονται από τους κατασκευαστές τους ως αρωματικά πολυαμίδια. Κατασκευάστηκαν για πρώτη φορά το 1971. Η τεχνολογία για τη παραγωγή αραμιδικών ινών αναπτύχθηκε από δύο εταιρίες, την Dyront και την Akzo που τυποποίησαν το υλικό ως Kevlar και Twaron αντίστοιχα.

Στην αγορά κυκλοφορούν τριών ειδών αραμιδικών ινών :

- α) ίνες υψηλής αντοχής και ενδιάμεσου μέτρου ελαστικότητας
- β) ίνες υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας

γ) ίνες υπερύψηλου μέτρου ελαστικότητας

Οι ίνες υψηλού και υπερύψηλου μέτρου ελαστικότητας είναι κατάλληλες για την παραγωγή ενισχυμένων άκαμπτων υλικών όπου απαιτείται μικρό βάρος , υψηλή αντοχή , υψηλή ακαμψία , μειωμένη ταλάντωση και αντοχή σε φθορά και κόπωση . Τα σύνθετα με αραμιδικές ίνες έχουν μέχρι και 40% μειωμένο βάρος σε σχέση με άλλα σύνθετα αντίστοιχης ακαμψίας .

Για πολλά χρόνια , το γυαλί ήταν το μόνο χρησιμοποιούμενο υλικό για μια ευρεία γκάμα προϊόντων σύνθετων υλικών . Αργότερα άρχισαν να χρησιμοποιούνται ίνες από γραφίτη και ίνες kevlar . Στις αεροπορικές κατασκευές , όπου ο λόγος δυσκαμψίας ανά μονάδα βάρους είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας επιλογής για ένα υλικό , οι ίνες άνθρακα είναι το κυρίαρχο υλικό. Αν ο κρίσιμος παράγοντας είναι η μέγιστη τάση ανά βάρος , τότε οι ίνες kevlar είναι αυτές που κυριαρχούν ως κατασκευαστικές λύσεις. Σε συμβατικές κατασκευές , όπου το κόστος είναι ο βασικός παράγοντας επιλογής ενός υλικού , το γυαλί παραμένει πρώτη επιλογή , αφού ο λόγος της αντοχής του ανά κόστος ανά βάρος αποτελεί την καλύτερη λύση .

2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Σχεδιάζοντας ένα σύνθετο υλικό , η επιλογή των υλικών πρέπει να γίνει με γνώμονα τις απαιτήσεις σε φέρουσα ικανότητα , την ευκολία παραγωγής και τις οικονομικές ανάγκες . Οι κατασκευαστικές μέθοδοι ποικίλουν και μπορεί να είναι αργές και ακριβές (hand lay-up , τμηματική

παραγωγή) έως πολύ γρήγορες , με οικονομικές και αυτόματες διεργασίες (pultrusion) .

Τα σύνθετα υλικά μπορούν να παραχθούν είτε σε καλούπια είτε με εξωτερικές διεργασίες . Κανένα σύνθετο υλικό δεν μπορεί να παραχθεί και να χαρακτηριστεί ιδανική λύση αν δεν ληφθούν υπόψη οι εξής σημαντικοί παράγοντες:

- το κόστος
- η αντοχή
- η διατήρηση των ιδιοτήτων στο χρόνο
- η διαθεσιμότητα
- η ευκολία παρασκευής
- η επεξεργασιμότητα
- η συντήρηση

Με βάσει αυτούς τους παράγοντες και τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις αγοράς πρέπει να κατασκευάζονται τα κατάλληλα σύνθετα υλικά .

Παρακάτω θα αναπτυχθούν οι τρόποι παραγωγής των πολυμερικών και κεραμικών μήτρων και των ινών γυαλιού , των ινών άνθρακα και των αραμιδικών ινών, που αποτελούν τους περισσότερο διαδεδομένους τύπους μήτρων και ινών.

2.3.1. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΜΗΤΡΩΝ

Για την ορθή κατασκευή ενός σύνθετου με "συνέχεια " , πρέπει η μήτρα να είναι ικανή να διαπεράσει όλα τα σημεία της κατασκευής της

ενίσχυσης και να διαποτίσει όλες τις επιφάνειες των ομάδων της ενίσχυσης. Με άλλα λόγια μια σημαντική παράμετρος για την παρασκευή του σύνθετου είναι το ιξώδες της ρητίνης που επηρεάζει τον τρόπο που εξαπλώνεται / διαχέεται στην προμορφή . Επίσης οι ίνες πρέπει να είναι συμβατές όσον αφορά την επιφανειακή κατεργασία με το υλικό έκχυσης (χημικά ή με ειδική κατεργασία).

Οι μέθοδοι παρασκευής των πολυμερών σύνθετων υλικών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τεχνικές ανοιχτής και κλειστής μήτρας.

A) Τεχνικές ανοιχτής μήτρας

Οι τεχνικές ανοιχτής μήτρας πραγματοποιούνται με τους παρακάτω τρόπους:

- **Επίστρωση με το χέρι (hand lay-up):** Είναι η παλιότερη , η πιο απλή μέθοδος και η περισσότερο χρονοβόρα μέθοδος .Αρχικά προετοιμάζονται οι στρώσεις των ενισχύσεων , οι οποίες είναι συνήθως από γυαλί και μπορεί να έχουν τη μορφή υφάσματος , πλήθους ινών ή και συνδυασμό τους .Κάθε στρώση τοποθετείται σ' ένα καλούπι και ταυτόχρονα προστίθεται η κατάλληλη ποσότητα υγρής θερμοσκληρυνόμενης ρητίνης .Στη συνέχεια πραγματοποιείται σκλήρυνση με ή χωρίς θερμότητα και ατμοσφαιρική πίεση . Ασυνεχής ίνες και άλλα υφάσματα ινών τοποθετούνται στο καλούπι της μήτρας και διαποτίζονται με ρητίνη .
- **Μέθοδος επίστρωσης με ψεκασμό (spray-up):** Ασυνεχείς ίνες ψεκάζονται ταυτόχρονα με ποσότητες ρητίνης, με ένα πιστόλι ψεκασμού, πάνω στην επιφάνεια ενός καλουπιού. Επίσης πραγματοποιείται σκλήρυνση με ατμοσφαιρική πίεση .

Στις παραπάνω δύο περιπτώσεις αποτελεί μειονέκτημα το γεγονός ότι η σκλήρυνση γίνεται σε ατμοσφαιρική πίεση και αυτό γιατί στο τελικό προϊόν μπορεί οι ίνες να μην τοποθετηθούν σωστά και να υπάρξει άνιση κατανομή της ρητίνης, προκύπτοντας με αυτό τον τρόπο εστίες υψηλής και χαμηλής συγκέντρωσης. Τέτοια προβλήματα ξεπερνιούνται με τη παρουσία συνθηκών πίεσης ανώτερων της ατμοσφαιρικής. Οι παρακάτω μέθοδοι έχουν αυτό το χαρακτηριστικό:

- Μέθοδος μορφοποίησης με σάκο κενού (vacuum bag method):
Σε αυτή τη μέθοδο ασκείται πίεση μέσω της χρήσης της τεχνικής του σάκου κενού. Η υγροποιημένη ρητίνη και η μήτρα περικλείονται από μια ελαστική μεμβράνη (σάκος). Με κατάλληλο μηχανισμό δημιουργείται κενό στο εσωτερικό της μεμβράνης και η ατμοσφαιρική πίεση, που ασκείται στην επιφάνεια του σάκου, τον πιέζει ομοιόμορφα συμπιέζοντας το υγρό σύνθετο υλικό. Η πίεση κυμαίνεται από 70 μέχρι και 380 kPa.
- Μέθοδος μορφοποίησης με σάκο πίεσης (vacuum pressure bag method):
Αυτή η μέθοδος βρίσκει εφαρμογή στις περιπτώσεις που απαιτούνται ακόμα μεγαλύτερες τιμές πίεσης. Για να πραγματοποιηθεί αυτό τοποθετείται ένα περιτύλιγμα γύρω από όλη την μηχανική διάταξη, η οποία είναι η παρόμοια με της προηγούμενης και διοχετεύεται πίεση αέρα στο χώρο που βρίσκεται ανάμεσα στην εξωτερική επιφάνεια του σάκου και στην εσωτερική επιφάνεια του περιτυλίγματος.
- Μέθοδος μορφοποίησης σε θερμαινόμενο θάλαμο πίεσης (autoclave molding):
Στη μέθοδο αυτή με τη τοποθέτηση της διάταξης κενού μέσα σε ένα θερμαινόμενο θάλαμο (αυτόκλειστο) αναπτύσσονται πιέσεις

από αέρα ή ατμό που κυμαίνονται από 600 έως 1380 kPa. Ο σάκος πρέπει να είναι σφραγισμένος για να μην υπάρχει εισροή υψηλής πίεσης αέρα, νερού ή ατμού μέσα στο μορφοποιούμενο προϊόν.

B) Τεχνικές κλειστής μήτρας

Η παραγωγής σύνθετων με την τεχνική της κλειστής μήτρας γίνεται με τις εξής μεθόδους:

- Μορφοποίηση με μεταφοράς ρητίνης (resin-transfer molding method):

Είναι μια χαμηλής πίεσης διαδικασία κλειστής μήτρας όπου μια στεγνή μορφή του συστήματος της ενίσχυσης τοποθετείται μάζα στη μήτρα . Στη συνέχεια κλείνει η μήτρα . Η υγρή ρητίνη μεταφέρεται μέσω ενός κατάλληλου μηχανισμού και διαμέσου μιας οπής , που έχει η μήτρα στο κέντρο της , εισέρχεται η ρητίνη στο εσωτερικό της. Η ρητίνη εκτοπίζει τον αέρα στο εσωτερικό της μήτρας, ο οποίος αποβάλλεται από υπάρχουσες οπές. Όταν όλη η ποσότητα της ρητίνης εισέλθει στο εσωτερικό της μήτρας οι τρύπες εισόδου της ρητίνης και εξόδου του αέρα κλείνουν. Η ρητίνη σκληραίνει με πίεση και το τελικό προϊόν απομακρύνεται από το καλούπι.

- Ενισχυμένη μορφοποίηση με έγχυση υπό αντίδραση: Κατά τη μέθοδο αυτή τοποθετείται μια μορφή ενισχυτικού μέσου μέσα σε ένα κλειστό καλούπι . Στη συνέχεια αναμιγνύεται , με καθορισμένη αναλογία , ρητίνη σε υψηλή πίεση . Κατόπιν η ρητίνη ρέει με μικρή πίεση μέσω ενός δικτύου που την οδηγεί στο εσωτερικό του καλουπιού, όπου και εμπλουτίζει το σύστημα της ενίσχυσης . Όταν γεμίσει ο χώρος του καλουπιού από την ρητίνη , πιέζεται και σκληραίνει .

- Μέθοδος μορφοποίησης με έλξη (Pultrusion method): Με αυτή τη μέθοδο οι ίνες (συνήθως με προκαθορισμένους προσανατολισμούς) διαποτίζονται με ρητίνη και περνούν διαμέσου ενός θερμαινόμενου καλουπιού για να αποκτήσουν την τελική τους μορφή (π.χ. σωλήνες, ελάσματα, μορφοδοκοί διατομής I ή L). Μερική ή ολική σκλήρυνση πραγματοποιείται κατά το πέρασμα από τη μήτρα.
- Ψυχρή μόρφωση: Είναι μια διεργασία χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας, όπου οι ίνες διαποτίζονται με ρητίνη και μετά πιέζονται σε μήτρα. Η θέρμανση παράγεται κατά τη φάση της σκλήρυνσης.
- Χύτευση ρητίνης: Υφάσματα ινών τοποθετούνται στη μήτρα. Η μήτρα στη συνέχεια κλείνει και η ρητίνη χυτεύεται σε χαμηλή πίεση ρέοντας μέσα από τις ίνες για να καλύψει όλο το χώρο της μήτρας.

2.3.2. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ

Διάφοροι μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παραχθεί ένα σύνθετο κεραμικό υλικό. Όμως η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου γίνεται με γνώμονα το υλικό της μήτρας. Η παρασκευή σύνθετων κεραμικών βασίζεται κυρίως στον αέριο ή υγρό εμποτισμό μιας μορφοποιημένης διάταξης ινών, η οποία καλείται προμορφή. Το σύνθετο παραλαμβάνεται μετά από αποσύνθεση ή πυρόλυση του

εμπλουτισμένου αερίου ή υγρού υλικού της μήτρας . Επίσης ένα σύνθετο κεραμικό μπορεί να παραχθεί και με εν θερμό συμπίεση.

Ο αέριος χημικός εμποτισμός επιτρέπει την παραγωγή οποιουδήποτε επιθυμητού σχήματος σύνθετου. Επίσης υπάρχει μεγάλη δυνατότητα ελέγχου της διεπιφάνειας μήτρας-ίνας. Αρχικά η προμορφή εισάγεται σε έναν ειδικό φούρνο σε χαμηλές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας και εντός του φούρνου πραγματοποιείται η αποσύνθεση της αέριας φάσης . Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα αλλά παράγονται σύνθετα πολύ υψηλής ποιότητας.

Στον υγρό εμποτισμό, το υλικό της μήτρας βρίσκεται αρχικά υπό μορφής γέλης (gel) και είναι ή πολυμερές ή κολλοειδές διάλυμα. Η προμορφή βυθίζεται μέσα στο διάλυμα και στη συνέχεια το σύνθετο υλικό παραλαμβάνεται μέσω πυρόλυσης , αν χρησιμοποιηθεί πολυμερές διάλυμα ή μέσω πυροσυσσωμάτωσης αν χρησιμοποιηθεί κολλοειδές διάλυμα .

Με τη μέθοδο του χημικού εμποτισμού αερίων παρασκευάζονται περισσότερο σύνθετα με μήτρες άνθρακα ενώ με τη μέθοδο του υγρού εμποτισμού παρασκευάζονται σύνθετα με μήτρες οξειδίων , κεραμικών γυαλιών , καρβιδίου του πυριτίου και νιτριδίου του πυριτίου .

2.3.3. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΝΩΝ ΓΥΑΛΙΟΥ

Συνεχείς ίνες παρασκευάζονται με την τήξη και ανάμιξη των συστατικών του γυαλιού σε μια δεξαμενή . Η δεξαμενή αυτή τροφοδοτεί το τήγμα σε μια ακολουθία από θερμαινόμενες πλατινένιες πλάκες οι οποίες έχουν εκατοντάδες οπές στη βάση τους . Το γυαλί σπρώχνεται με

μεγάλη ταχύτητα διαμέσου των οπών για να προκύψουν ίνες με διάμετρο περίπου 10 μ m . Στη συνέχεια οδηγούνται σε ένα περιστρεφόμενο τύμπανο , έπειτα επικαλύπτονται με ψεκασμό , με το στρώμα binder [προστατεύει τις ίνες από ενδεχόμενες φθορές , διατηρεί στην επιφάνεια τους μια λιπαρότητα και προσδίδει εκείνες τις ιδιότητες της επικόλλησης και τη χημική συμβατότητα που απαιτείται για να επικολληθεί σωστά η ρητίνη επάνω της] και τέλος μορφοποιούνται . Η διάμετρος των ινών ελέγχεται ρυθμίζοντας την πυκνότητα του γυαλιού (εξαρτάται απ' τη θερμοκρασία) και τη διάμετρο των οπών .

2.3.4. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ

Οι ίνες άνθρακα προέρχονται από οργανικά ινώδη προπαρασκευάσματα . Για τη παραγωγή ινών άνθρακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρώτη ύλη το πολυκρυλονιτρίνιο (PAN) ή υγρή πίσσα . Οι τεχνικές παραγωγής είναι δύο:

A) Προσανατολισμός του αρχικού πολυμερούς με εφαρμογή εφελκυστικών τάσεων: Σαν πρώτη ύλη χρησιμοποιείται το πολυκρυλονιτρίλιο (PAN). Στην πρώτη φάση η μάζα του PAN μετατρέπεται σε ίνες και στη συνέχεια γίνεται ευθυγράμμιση των μοριακών αλυσίδων παράλληλα με τον άξονα των ινών . Όσο οι ίνες βρίσκονται σε εφελκυσμό θερμαίνονται σε οξειδωτικό περιβάλλον και οι ενεργές ομάδες νιτριλίου αλληλεπιδρούν παράγοντας πολυμερές με αλυσωτούς εξαγωνικούς δακτυλίους . Προκαλείται με αυτό τον τρόπο η δημιουργία διασταυρώσεων μεταξύ των νέων μορίων . Το οξειδωμένο PAN ανάγεται στη συνέχεια απουσία οξυγόνου και σε αδρανή ατμόσφαιρα , αποκτώντας τη δομή του εξαγωνικού δακτυλίου του

άνθρακα και κατόπιν μετατρέπεται στην αλλοτροπική μορφή των κρυσταλλιτών γραφίτη με θέρμανση σε υψηλότερες θερμοκρασίες .

B) Προσανατολισμός με περιδίνηση (spinning): Ως πρώτη ύλη χρησιμοποιείται πετρελαϊκή ή ορυκτή πίσσα η οποία αφού επεξεργάζεται θερμικά σε θερμοκρασία άνω των 350°C, μετατρέπεται σε ' μεσοφασική ' πίσσα και στη συνέχεια γίνεται τήξη και συγκόλληση όλων των ινών . Ο θύσανος που προκύπτει απανθρακώνεται σε θερμοκρασία περίπου 2000°C. Σ' αυτό το βήμα εξαλείφονται οι ακαθαρσίες και ξεκινά η κρυσταλλοποίηση του υλικού . Το τελικό μέγεθος των κρυσταλλιτών σε αυτές τις ίνες είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των ινών που παράγονται από PAN.

2.3.5. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΡΑΜΙΔΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

Σε εμπορική κλίμακα για την παραγωγή αραμιδικών ινών χρησιμοποιείται η μέθοδος της πολυσυμπύκνωσης διαλύματος σε χαμηλή θερμοκρασία . Η μέθοδος παραγωγής περιλαμβάνει την εξαέρωση των αντιδρώντων , τη διάλυση τους σε αδρανές αέριο και την τροφοδοσία ενός αντιδραστήρα με το έτοιμο μίγμα σε θερμοκρασία που κυμαίνεται από 150°C μέχρι 500°C για μικρό χρονικό διάστημα (από 0,05 sec έως 5 sec το μέγιστο) . Η πιο διαδεδομένη μέθοδος παραγωγής είναι ένας συνδυασμός εκβολής και περιδίνησης , όπου το διάλυμα σε κατάλληλο διαλύτη διατηρείται σε θερμοκρασία από -80°C μέχρι -50°C. Κατόπιν γίνεται εκβολή του σε κύλινδρο θερμαινόμενων τοιχωμάτων, όπου και εξατμίζονται οι διαλύτες. Τέλος οι ίνες δέχονται μια κατεργασία προσανατολισμού υπό τάση και αυξάνεται η αντοχή και η ακαμψία τους. Για τη μείωση του κόστους παραγωγής, η πολυσυμπύκνωση μπορεί να

γίνει σε αέρια φάση οπότε αποφεύγεται η χρήση διαλυτών. Τυχών μεταβολές στη διεργασία παραγωγής επηρεάζουν τους διάφορους δομικούς παράγοντες. Επίσης αν ενσωματωθούν στις ίνες ακαθαρσίες κατά την παραγωγή επηρεάζονται σημαντικά οι μηχανικές τους ιδιότητες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ❖ Παντελής Δ. (1996) << Μη μεταλλικά σύνθετα υλικά .Δομή -ιδιότητες -Τεχνολογία- Εφαρμογές .>>, Παπασωτηρίου & ΣΙΑ Ο.Ε. , Αθήνα .
- ❖ Τσουβάλης Νικόλαος .. "ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΚΑΦΩΝ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ " ,Ε.Μ.Π. ,ΑΘΗΝΑ 1998 .
- ❖ Νεοφώτιστος Δ.(2003) << Ανάπτυξη και αξιολόγηση αναλυτικών εξισώσεων υπολογισμού μηχανικών ιδιοτήτων Σύνθετων Υλικών σε εφελκυσμό . >> Διδακτωρική διατριβή διατμηματικού προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών .
- ❖ Fuduka M ."A New Bending Test Method of Advanced Composites " ,In Bethias C, Uemura M, editor. Advanced Composite Materials. PARIS .. SIRPE Publishers ,1990
- ❖ Behr M, Rosentritt M, Lang R, Handel G , "Flexural properties of fiber reinforced composite using a vacuum/pressure or a manual adaptation manufacturing process " , Journal of Dentistry 2000
- ❖ Jones , R.M.(1975) ," Mechanics of Composite Materials" , Hemisphere Publishing Co. , Washington.
- ❖ John L. Clarke , (1996) ," Structural Design of Polymer Composites" , EYROCOMP Design Code and Handbook ,London .
- ❖ Whitney J.M. ,Daniel ,I .M. and Pipes , R.B., "Experimental Mechanics of Fiber Reinforced Composite Materials " , Revised Edition , Society for Experimental Mechanics ,1984 .
- ❖ Mayer, Rayner, M .. "Design with reinforced plastics" , First Edition , The Disegn Council , 1993, London .
- ❖ M.W.Hyer.. Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials , WCB/Mc Graw-Hill ,International Edition,1998

- ❖ D.Hull and T. W Clyne .. "An Introduction to Composite Materials" ,
Second Edition ,Cambridge Solid State Science Series .
- ❖ Proceedings of The Tenth International Conference on Composite
Materials Volume VI.. Microstructure ,Degradation and Design .
- ❖ Halim Hamid S., Amin B. M. , Maadhah A. G. .. Handbook of
Polymer Degradation , Markel Dekker Inc ,1992.
- ❖ Robert M. Jones .. "Mechanics of Composite Materials" , 2000
- ❖ George S. Springer .. "Environmental effects on composite materials "
,1981

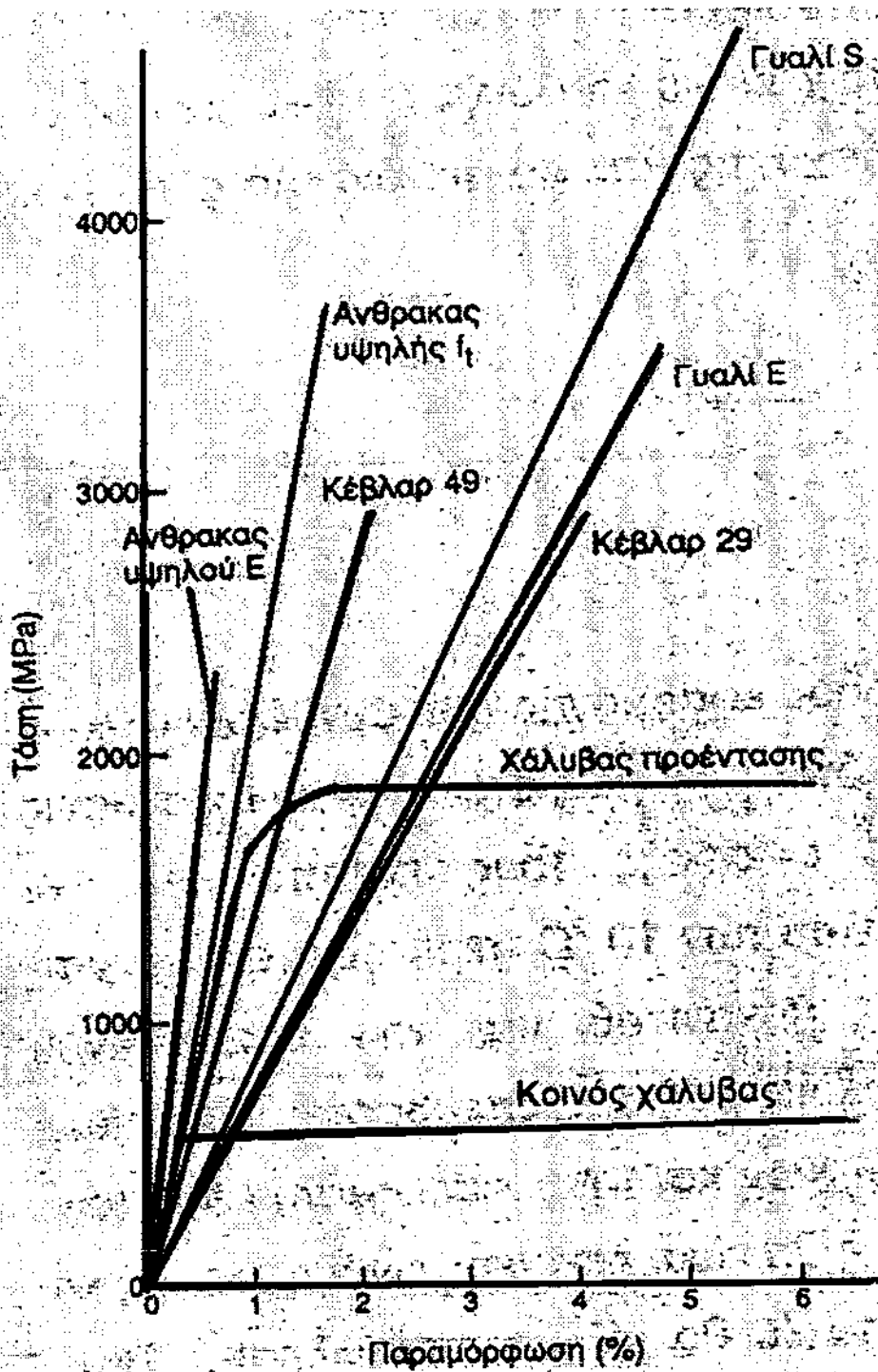
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΙΝΩΝ ΚΑΙ ΜΗΤΡΩΝ

Τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών αποτελούν στις μέρες μας την πιο διαδεδομένη κατηγορία σύνθετων υλικών λόγω των καλύτερων μηχανικών ιδιοτήτων των ινών σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους ενίσχυσης. Ιδιαίτερα οι κεραμικές ίνες (π.χ. γυαλιού, άνθρακα, καρβιδίου του πυριτίου, οξειδίου του αλουμινίου) διακρίνονται για τις πολύ ανώτερες επιδόσεις τους σε σχέση με τις μεταλλικές και πολυμερικές ίνες σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και είναι εκείνες που έχουν καθιερωθεί σήμερα ως ο κυρίαρχος τύπος ενίσχυσης.

Οι ίνες στα σύνθετα υλικά αποτελούν το φορέα ανάληψης δυνάμεων (κατά κανόνα εφελκυστικών), παράλληλα στη διεύθυνσή τους. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή και η γραμμικά ελαστική συμπεριφορά μέχρι τη θραύση τους. (Σχ. 3.1). Οι κυριότεροι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται στο πεδίο των ενισχύσεων είναι οι ίνες άνθρακα (ανθρακονήματα), οι ίνες γυαλιού (υαλονήματα) και οι ίνες αραμιδίου, με βασικές ιδιότητες που δίνονται στους Πίνακες 3.1(α) (Feldman 1989, Kim 1995) και 3.1(β) (Hannant 1978, JSCE 1993). Οι ιδιότητες αυτές αναφέρονται στις ίνες υπό μονοτονική φόρτιση, χωρίς να έχει ληφθεί υπόψη η επίδραση μακροχρόνιας φόρτισης και τυχόν δυσμενών περιβαλλοντικών παραγόντων.



Σχ.3.1 Τυπικές καμπύλες εφελκυστικής τάσης – παραμόρφωσης για διάφορους τύπους ινών και σύγκριση με απλοποιημένες καμπύλες για χάλυβα.

Υλικό	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Εφελκυστική Αντοχή (MPa)	Οριακή Παραμόρφωση Εφελκυστικής Αστοχίας (%)
<i>Ανθρακας</i>			
Υψηλής αντοχής	215-235	3500-4800	1.4-2.0
Υπερ-υψηλής αντοχής	215-235	3500-6000	1.5-2.3
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας	350-500	2500-3100	0.5-0.9
Υπερ-υψηλού μέτρου ελαστικότητας	500-700	2100-2400	0.2-0.4
<i>Γυαλί</i>			
E	70-75	1900-3000	3.0-4.5
Z	70-75	1900-3000	3.0-4.5
S	85-90	3500-4800	4.5-5.5
<i>Αραμίδιο</i>			
Χαμηλού μέτρου ελαστικότητας	70-80	3500-4100	4.3-5.0
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας	115-130	3500-4000	2.5-3.5

Πίνακας 3.1(α) Ενδεικτικές ιδιότητες ινών (Feldman 1989, Kim 1995).

Ίνες	Διάμετρος (μm)	Μήκος (mm)	Πυκνότητα (kg/m ³ x 10 ³)	Μέτρο ελαστ. (GPa)	Λόγος Poisson	Εφελκ. αντοχή (MPa)	Παραμ. Θραύσης (%)	Τυπική αναλογία (%κ.ο.)
Χάλυβας	100-600	10-60	7.86	200	0.28	700-2000	3.5	0.5-2
Ανοξ. χάλυβας	10-330	10-60	7.86	160	0.28	2100	3	0.5-2
Πολυπροπυλένιο	500-4000	15-75	0.90	3-8	0.30-0.45	400-700	8-25	0.2-1.2
Γυαλί E	8-12	10-50	2.54	72-75	0.25	3500	4.8	2-8
Γυαλί AR	8-12	10-50	2.27	70-76	0.25	2000-3500	3-4.6	2-8
Κέβλαρ 29	12	5-65	1.44	70	0.32	2900	4	0.5-2
Κέβλαρ 49	10	5-65	1.45	135	0.32	2900	2.1	0.5-2
Ανθρακας υψηλού E	8	10-50	1.90	380	0.35	1800	0.5	2-12
Ανθρακας υψηλής f_t	9	10-50	1.90	230	0.35	2600	1.2	2-12

Πίνακας 3.1(β) Τυπικές ιδιότητες ινών(Hannant 1978, JSCE 1993).

Η μήτρα στα σύνθετα υλικά αποτελεί το συνεχές μέσο το οποίο συγκρατεί τις ίνες. Συνήθως είναι κεραμικές, μεταλλικές ή πολυμερής. Η μήτρα συνδέει τις ίνες μεταξύ τους, τις προστατεύει, εξασφαλίζει την μεταφορά δυνάμεων σε αυτές, αλλά καθορίζει και αρκετές μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών, όπως είναι η αντοχή κάθετα στη διεύθυνση των ινών, η διατμητική και η θλιπτική αντοχή. Ο πλέον

συνηθισμένος και ακριβότερος τύπος μήτρας είναι οι εποξειδικές ρητίνες. Σπανιότερα χρησιμοποιείται πολυεστέρας ή βινυλεστέρας. Οι εποξειδικές ρητίνες έχουν εξαιρετικά μηχανικά χαρακτηριστικά και μεγάλη ανθεκτικότητα σε δυσμενείς περιβαλλοντικές επιδράσεις. Στον πίνακα 3.2(α) δίνονται ορισμένες ενδεικτικές ιδιότητες εποξειδικών ρητινών σε σύγκριση με σκυρόδεμα και χάλυβα ενώ ο πίνακας 3.2(β) παρουσιάζει τις ιδιότητες μερικών από τα σημαντικότερα προηγμένα κεραμικά υλικά.

Ιδιότητα (σε 20°C)	Εποξειδική ρητίνη	Σκυρόδεμα	Χάλυβας
Πυκνότητα (kg/m ³)	1100-1700	2350	7800
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	0.5-20	20-50	205
Μέτρο διάτμησης (GPa)	0.2-8	8-21	80
Λόγος Poisson	0.3-0.4	0.2	0.3
Εφελκυστική αντοχή (MPa)	9-30	1-4	200-600
Διατμητική αντοχή (MPa)	10-30	2-5	150-400
Θλιπτική αντοχή (MPa)	55-110	25-150	200-600
Οριακή παραμόρφωση σε εφελκυσμό (%)	0.5-5	0.015	20-25
Ενέργεια θραύσης (Jm ⁻²) κατά προσέγγιση	200-1000	100	10 ⁵ -10 ⁶
Συντελεστής θερμικής διαστολής (10 ⁻⁶ /°C)	25-100	11-13	10-15
Υδαταπορροφητικότητα: 7ημ-25°C (%κ.β.)	0.1-3	5	0
Θερμοκρασία ναλώδους μετάπτωσης (°C)	50-80	---	---

Πίνακας 3.2(α) Ενδεικτικές ιδιότητες εποξειδικών ρητινών και σύγκριση με σκυρόδεμα και χάλυβα(fib 2001).

Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας E (GPa)	Λόγος Poisson N	Συντελεστής θερμικής διαστολής α (10^{-6} K^{-1})
SiC	480	0.3	4
Al ₂ O ₃	380	0.25	8
3Al ₂ O ₃ .2SiO ₂	215	0.25	5

Πίνακας 3.2 (β) Ιδιότητες επιλεγμένων προηγμένων κεραμικών υλικών.

3.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η ανθεκτικότητα που παρουσιάζουν τα σύνθετα υλικά υπό την επίδραση μίας σειράς παραγόντων όπως υψηλές θερμοκρασίες, υγρασία, υπεριώδης ακτινοβολία, αλκαλικό και όξινο περιβάλλον, γαλβανική διάβρωση, ερπυσμός (θραύση υπό τάση, διάβρωση υπό τάση), κόπωση, κρούση είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρων και σημαντική. Γενικά παρατηρείται υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα των σύνθετων υλικών σε σκληρές κλιματολογικές συνθήκες.

Τα πλεονεκτήματα που εμφανίζουν σε σχέση με τα συμβατικά υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα στις κατασκευές είναι:

- Το μικρό τους βάρος το οποίο ισούται με το ¼ του βάρους του χάλυβα.
- Η μεγάλη εφελκυστική αντοχή.
- Η χαρακτηριστική ευκαμψία τους και η γραμμικά ελαστική συμπεριφορά τους μέχρι την αστοχία (καταστροφή) του υλικού.
- Η απουσία ηλεκτροχημικής διάβρωσης και οξείδωσης των σύνθετων υλικών σε σχέση με τα μέταλλα.

- Η μεγάλη ευκολία και ταχύτητα εφαρμογής, με την οποία επιτυγχάνεται η τεχνική της ενίσχυσης.
- Ο εμπλουτισμός της μήτρας του σύνθετου υλικού με ειδικά επιβραδυντικά προσθετικά, αποτρέπει κάθε κίνδυνο από πυρκαγιά, θέτοντας τα σύνθετα υλικά στο ίδιο επίπεδο αντοχής με τα μέταλλα.
- Η άριστη ηλεκτρική μόνωση που προσφέρουν τα σύνθετα υλικά τα καθιστά ιδανικά για εφαρμογές, όπως πυλώνες υψηλής τάσεως, μειώνοντας τα προβλήματα από σπινθήρες (το οποίο αποτελεί συχνό φαινόμενο σε πυλώνες από μέταλλο) και επίσης τους σοβαρούς κινδύνους ηλεκτροπληξίας για τεχνικούς και πολίτες.
- Η ευελιξία στο σχεδιασμό τους. Ανάλογα με την εφαρμογή που προορίζεται η κατασκευή είναι δυνατό να προσδοθούν στα υλικά οι επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες (εφελκυστικές, καμπτικές, κρουστικές, θλιπτικές), μέσω ελέγχου της φάσης ενίσχυσης. Αντίθετα στα παραδοσιακά υλικά (μέταλλα-σκυρόδεμα) οι ιδιότητες είναι προκαθορισμένες και παρουσιάζουν μικρή προσαρμοστικότητα στις απαιτήσεις διαφορετικών κατασκευών.
- Η αρκετά καλή ανθεκτικότητα σε δυσμενείς χημικές επιδράσεις, καθώς επίσης δεν επηρεάζονται από την υγρασία, τα διαλυτικά υγρά και τις βάσεις.
- Τέλος, τα υλικά αυτά κατά τη χρήση τους σε άλλες εφαρμογές όπως σε κεραίες μετάδοσης σήματος (τηλεοπτικές, κινητής τηλεφωνίας) αφήνουν το σήμα ανεπηρέαστο, σε αντίθεση με τις μεταλλικές κεραίες όπου αυξάνουν τον ηλεκτρικό θόρυβο.

3.2.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ

Οι σχετικά υψηλές θερμοκρασίες, της τάξης των 500-800 °C μειώνουν σημαντικά την ικανότητα ανάληψης δυνάμεων στις ρητίνες (μήτρα σύνθετων υλικών). Ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες, όπως αυτές κατά την διάρκεια πυρκαγιάς, προκαλούν πλήρη αποσύνθεση των ρητινών. Η πλειοψηφία των ινών έχουν πολύ καλύτερες ιδιότητες στις υψηλές θερμοκρασίες. Οι ίνες άνθρακα μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά μέχρι τους 500 °C (όπου αρχίζει η οξείδωσή τους) και με ειδικές προστατευτικές επιστρώσεις μέχρι και τους 2000 °C. Οι ίνες πυριτίου, καρβιδίου και νιτριδίου του πυριτίου περιορίζουν την λειτουργία τους σε θερμοκρασίες μικρότερες των 1400 °C. Οι ίνες οξειδίου του αλουμινίου λειτουργούν μέχρι τους 1200 °C, του γυαλιού αντέχουν στους 1000 °C και του αραμιδίου στους 200 °C.

Τα σύνθετα υλικά εμφανίζουν χαμηλή απορροφητικότητα σε νερό, με αποτέλεσμα να αντέχουν σε θερμοκρασίες υπό το μηδέν, το οποίο αποτελεί σημαντικό πρόβλημα των κατασκευών από μπετόν διότι η συστολή του εγκλωβισμένου νερού δημιουργεί ρωγμές. Επίσης ο υψηλός λόγος αντοχής προς βάρος, προσδίδει στα σύνθετα υλικά αυξημένη αντίσταση σε διάδοση ρωγμών.

3.2.2 ΥΓΡΑΣΙΑ

Γενικά τα σύνθετα υλικά έχουν καλύτερη συμπεριφορά σε συνθήκες υγρασίας ως προς τα συμβατικά υλικά. Σε ορισμένες

περιπτώσεις και μετά από μακροχρόνια δράση του νερού (ή ρευστών, γενικότερα) κάποιοι συνδυασμοί ινών-ρητίνης ενδέχεται να παρουσιάσουν προβλήματα. Από τα ινώδη υλικά, παρουσία υγρασίας, το γυαλί υφίσταται μικρή μείωση αντοχής (λόγω απομάκρυνσης ιόντων από την επιφάνεια των ινών) το αραμίδιο το οποίο μπορεί να απορροφήσει υγρασία μέχρι και 13% κ.β., αρκετά μεγαλύτερη, ενώ οι ίνες άνθρακα είναι πρακτικά απρόσβλητες. Οι μεταλλικές κατασκευές, καθώς και αυτές από σκυρόδεμα, οξειδώνονται (σκουριάζουν) ή διαβρώνονται σε υγρά περιβάλλοντα όπως παράκτιες περιοχές (υψηλά επίπεδα υγρασίας και αλάτων αντίστοιχα). Σε αυτές τις κλιματολογικές συνθήκες τα σύνθετα υλικά δεν παρουσιάζουν καμία ευαισθησία με αποτέλεσμα να είναι αυτά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχεδόν κατ' αποκλειστικότητα.(Σχ. 3.2.1) Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι παρά τις καταπονήσεις που υφίσταται μια κατασκευή από σύνθετα υλικά εξαιτίας των κλιματολογικών συνθηκών δεν εμφανίζονται αλλαγές ούτε στην εσωτερική δομή, ούτε και στην εξωτερική εμφάνισή της.



Σχήμα 3.2.1 Γέφυρα/αποβάθρα από σύνθετα υλικά για ναυτιλιακή χρήση στην Ολλανδία.

3.2.3 ΥΠΕΡΙΩΔΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Η υπεριώδης ακτινοβολία του ηλίου (UV) επιφέρει αλλοίωση της ισχύος των δεσμών και γενικά μείωση της αντοχής στα πολυμερή (μήτρα σύνθετων υλικών) που εκτίθενται σε αυτή. Φαινομενικά, το αποτέλεσμα της επίδρασης της υπεριώδους ακτινοβολίας είναι η χρωματική αλλοίωση και μικρορηγμάτωση των εκτιθέμενων επιφανειών. Για την περίπτωση των σύνθετων υλικών η υπεριώδης ακτινοβολία επηρεάζει την επιφανειακή στρώση ρητίνης, επιφέροντας χρωματική αλλοίωση και ενδεχομένως μικρή μείωση της αντοχής της, όχι όμως και τις ίνες.

3.2.4 ΑΛΚΑΛΙΚΟ ΚΑΙ ΟΞΙΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Γενικά, τόσο το αλκαλικό περιβάλλον όσο και το όξινο δεν έχουν δυσμενείς επιδράσεις σε σύνθετα υλικά, ιδιαίτερα σε αυτά με ίνες άνθρακα. Οι ίνες γυαλιού είναι αρκετά ευπαθείς (υφίστανται μείωση αντοχής), ενώ οι ίνες αραμιδίου έχουν ενδιάμεση συμπεριφορά. Παρέχεται όμως προστασία σε ευπαθείς ίνες από την μήτρα, υπό την προϋπόθεση ότι αυτή τις απομονώνει από το αλκαλικό ή το όξινο περιβάλλον.

3.2.5 ΓΑΛΒΑΝΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Η επαφή των ινών άνθρακα με χάλυβα θα πρέπει να αποφεύγεται, διότι ο τελευταίος θα υποστεί γαλβανική διάβρωση. Τέτοιο πρόβλημα δεν υφίσταται όταν χρησιμοποιούνται άλλων ειδών ίνες.

3.2.6 ΕΡΠΥΣΜΟΣ (Θραύση υπό τάση, διάβρωση υπό τάση)

Οι ερπυστικές παραμορφώσεις (αυτές δηλαδή που αναπτύσσονται με το χρόνο υπό σταθερή τάση), σύνθετων υλικών τα οποία φορτίζονται παράλληλα στις ίνες είναι μικρές. Για υλικά με ίνες άνθρακα είναι πρακτικά μηδενικές, ενώ για γυαλιού και αραμιδίου είναι αμελητέες. Δεδομένου όμως ότι σε περιπτώσεις ενισχύσεων συνήθως τα σύνθετα υλικά βρίσκονται υπό τάση μόνο για τα πρόσθετα φορτία (του ίδιου βάρους), ο ερπυσμός σπανίως αποτελεί φαινόμενο προς εξέταση. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η συμπεριφορά των σύνθετων υλικών με ίνες γυαλιού υπό τάση είναι εξαιρετικά πτωχή. Οι τελευταίες μπορεί να αστοχήσουν όταν βρίσκονται υπό μόνιμη τάση, ακόμη και αν αυτή είναι εξαιρετικά χαμηλή (π.χ. 20% της εφελκυστικής αντοχής). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται θραύση υπό τάση. Το φαινόμενο της διάβρωσης υπό τάση αφορά στην μείωση της αντοχής των σύνθετων υλικών λόγω της συνδυασμένης δράσης εφελκυστικών τάσεων και διαβρωτικού (π.χ. όξινου ή αλκαλικού) περιβάλλοντος (το οποίο όμως, απουσία τάσεων, δεν θα είχε ως αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής). Γενικά τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα δεν έχουν πρόβλημα διάβρωσης υπό τάση ακόμα και αν η τάση φτάνει στο 80% της εφελκυστικής αντοχής. Οι ίνες γυαλιού είναι αρκετά ευπαθείς ενώ οι ίνες αραμιδίου δείχνουν ενδιάμεση συμπεριφορά.

Συμπερασματικά η βέλτιστη επιλογή ινών σε σύνθετα υλικά που φέρουν μόνιμα φορτία είναι ο άνθρακας.

3.2.7 ΚΟΠΩΣΗ

Η συμπεριφορά των σύνθετων υλικών σε κόπωση (δράση μεγάλου αριθμού κύκλων επαναλαμβανόμενης φόρτισης) είναι πολύ καλή. Ειδικά για τα υλικά με ίνες άνθρακα η αντοχή σε κόπωση είναι μεγαλύτερη από αυτή του χάλυβα οπλισμού. Σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση έχει παρατηρηθεί πρώτα αστοχία, λόγω κόπωσης, στον εφελκυσμένο χάλυβα και σε καμία περίπτωση στα υλικά με ενίσχυση ινών άνθρακα.

3.2.8 ΚΡΟΥΣΗ

Σε ότι αφορά στην επίδραση της κρούσης (π.χ. λόγω πρόσκρουσης οχήματος σε υποστύλωμα γέφυρας ενισχυμένο με σύνθετο υλικό) στην εναπομένουσα αντοχή των σύνθετων υλικών, καλύτερη συμπεριφορά δίνουν τα υλικά με ίνες αραμιδίου (δεν είναι τυχαίο άλλωστε ότι αυτές χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αλεξίσφαιρων γιλέκων) και ακολουθούν αυτά με ίνες γυαλιού και άνθρακα.

3.3 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

3.3.1 ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΙΝΩΔΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Στην μελέτη των ινωδών σύνθετων υλικών η μεταφορά τάσης στην διεπιφάνεια ρητίνης-ίνας από την ρητίνη στην ίνα είναι πολύ σημαντική. Χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες της διεπιφάνειας είναι δυνατόν να υπολογίσουμε την κατανομή των τάσεων και παραμορφώσεων σε σύνθετα υλικά βάσει της γεωμετρίας, την κατανομή και το ποσοστό κατ' όγκο των ινών και τις ελαστικές ιδιότητες των ινών και της ρητίνης. Από την κατανομή των τάσεων και παραμορφώσεων μπορούμε να υπολογίσουμε τις ελαστικές ιδιότητες του σύνθετου.

Εάν η σύνδεση μεταξύ ίνας και ρητίνης είναι τέλεια τότε όταν μια εφελκυστική ή θλιπτική παραμόρφωση εφαρμόζεται παράλληλα προς τις ίνες σε ένα μονοαξονικό πολύστρωτο υλικό η παραμόρφωση στην ρητίνη, ε_r , θα ισούται με εκείνη στην ίνα. Εάν αμφότερα τα υλικά, ρητίνη και ίνα, συμπεριφέρονται ελαστικά τότε οι αντίστοιχες τάσεις δίνονται από τη σχέση¹ :

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f$$

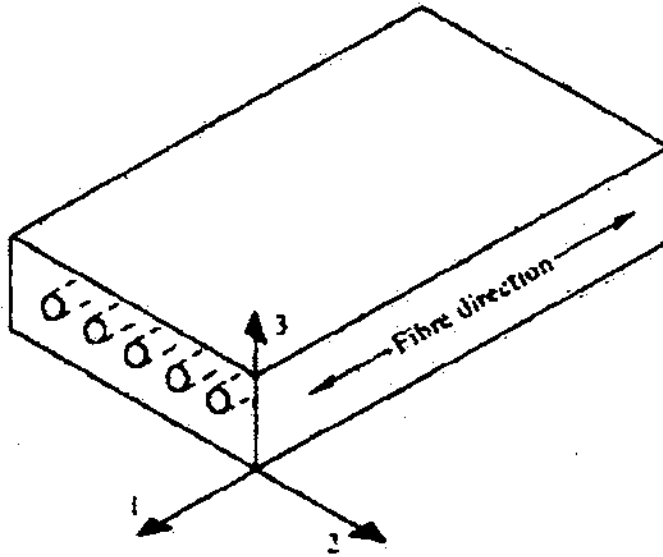
$$\sigma_m = E_m \varepsilon_m \quad (3.3.1)$$

Είναι φανερό ότι εάν $E_f > E_m$ τότε η τάση στις ίνες είναι μεγαλύτερη από εκείνη στην ρητίνη. Αυτό αποτελεί την βάση για τα ενισχυμένα υλικά

¹ D. Hull, An Introduction to Composite Materials, Cambridge University Press (1981).

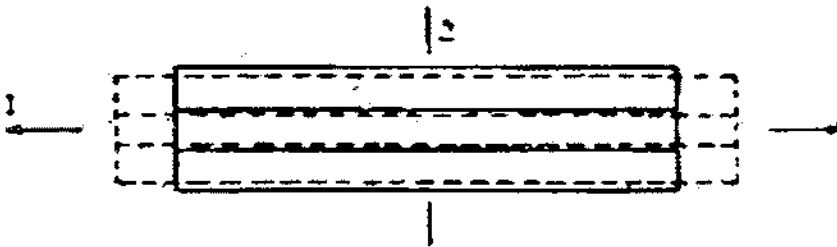
καθ' όσον οι ίνες παίρνουν το κύριο μέρος του εφαρμοζόμενου φορτίου P
(Σχ. 3.3.1 α,β)

(α)



Σχ. 3.3.1 α Προσδιορισμός των κύριων διευθύνσεων σε ένα πολύστρωτο υλικό μιας κατεύθυνσης.

(β)



Σχ. 3.3.1 β Η παραμόρφωση σε ένα πολύστρωτο μιας διεύθυνσης υπό την επίδραση ενός εφελκυστικού φορτίου στην 1 - διεύθυνση.

Για ένα σύνθετο υλικό συνολικής επιφάνειας A, η μέση τάση είναι :

$$P = \sigma_1 A = P_f + P_m = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (3.3.2)$$

όπου A_f και A_m είναι οι διατομές της ίνας και ρητίνης αντίστοιχα, P_f και P_m είναι τα αντίστοιχα φορτία. Εφ' όσον $\sigma_c = E_c \varepsilon_c$, από την ανώτερη σχέση προκύπτει ότι το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου ισούται με:

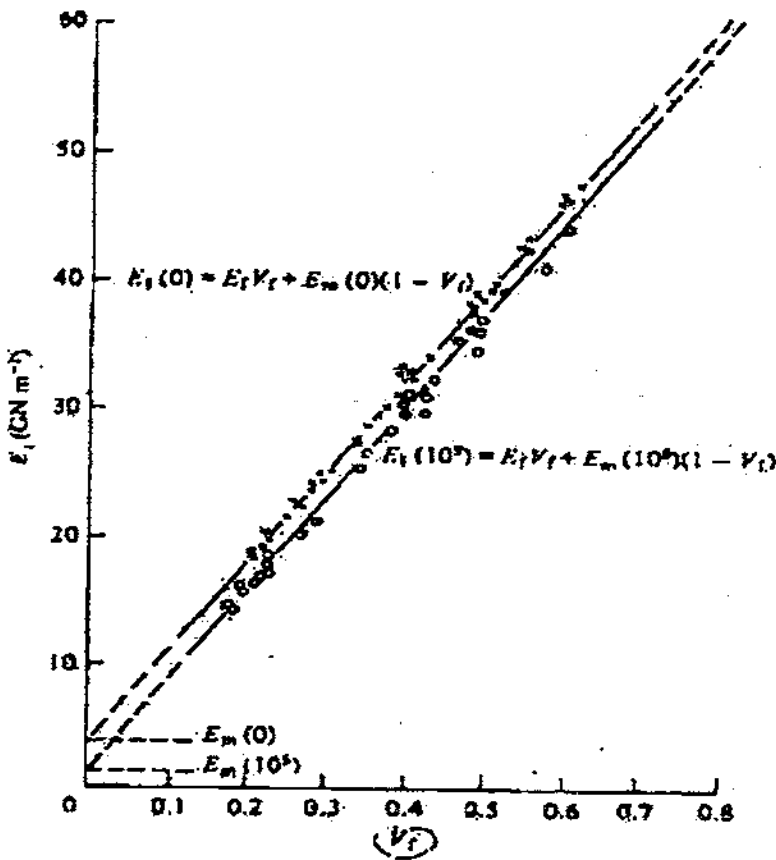
$$E_c = E_f \frac{A_f}{A} + E_m \frac{A_m}{A} \quad (3.3.3)$$

Επειδή οι κατ' όγκο περιεκτικότητες των ινών στη ρητίνη ισούται με

$$V_f = \frac{A_f}{A}, V_m = \frac{A_m}{A} \quad \text{το μέτρο ελαστικότητας του συνθέτου ισούται με}$$

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m = E_f V_f + E_m (1 - V_f). \quad (3.3.4)$$

Η ανωτέρω σχέση συνήθως καλείται ο νόμος των μειγμάτων. Η ανάλυση βασίζεται στην υπόθεση ότι ισχύει η εξίσωση (3.3.1). Αυτό όμως δεν ισχύει απολύτως διότι ο λόγος Poisson της ρητίνης και της ίνας είναι διαφορετικός και δίνει στο σύνθετο επιπρόσθετες τάσεις. Το σφάλμα στον υπολογισμό του αξονικού μέτρου ελαστικότητας είναι μικρότερο από 1-2% περίπου και η πειραματική επαλήθευση της εξίσωσης (3.3.4) έχει γίνει για πολλά συστήματα ρητίνης-ίνας. Ένα παράδειγμα δίνεται στο σχήμα 3.3.2.



Σχ. 3.3.2 Μέτρο ελαστικότητας συναρτήσει της κατ' όγκο περιεκτικότητας σε ίνες.

Τα περισσότερα πειραματικά δεδομένα κυμαίνονται για περιεκτικότητες επί τοις εκατό σε ίνες V_f 2%-6%, αλλά σύμφωνα με την εξ.(3.3.4) τα δεδομένα μπορεί να επεκταθούν στο E_m για $V_f = 0$ και στο E_f για $V_f = 1$.

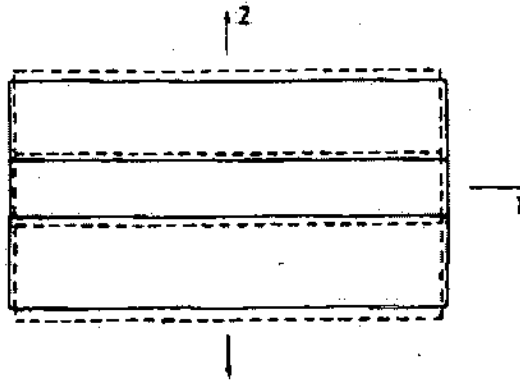
Το απλούστερο μοντέλο ενός σύνθετου παρουσιάζεται στο σχήμα (3.3.3) όπου μια τομή κόβεται παράλληλα στη διεύθυνση των ινών. Το εφαρμοζόμενο φορτίο εγκάρσια των ινών ενεργεί εξ' ίσου στην ίνα και

στην ρητίνη και ισχύει η υπόθεση ότι $\sigma_f = \sigma_m$. Οι αντίστοιχες παραμορφώσεις είναι:

$$\varepsilon_f = \sigma_2 / E_f, \varepsilon_m = \sigma_2 / E_m \quad (3.3.5)$$

Ωστε η παραμόρφωση ε_2 δίνεται από τον τύπο:

$$\varepsilon_2 = V_f \varepsilon_f + V_m \varepsilon_m \quad (3.3.6)$$



Σχ. 3.3.3 Η παραμόρφωση σ' ένα πολύστρωτο μιας διεύθυνσης υπό την επίδραση ενός εφελκυστικού φορτίου στην 2-διεύθυνση.

Η αντικατάσταση της (3.3.5) στην (3.3.6) δίνει:

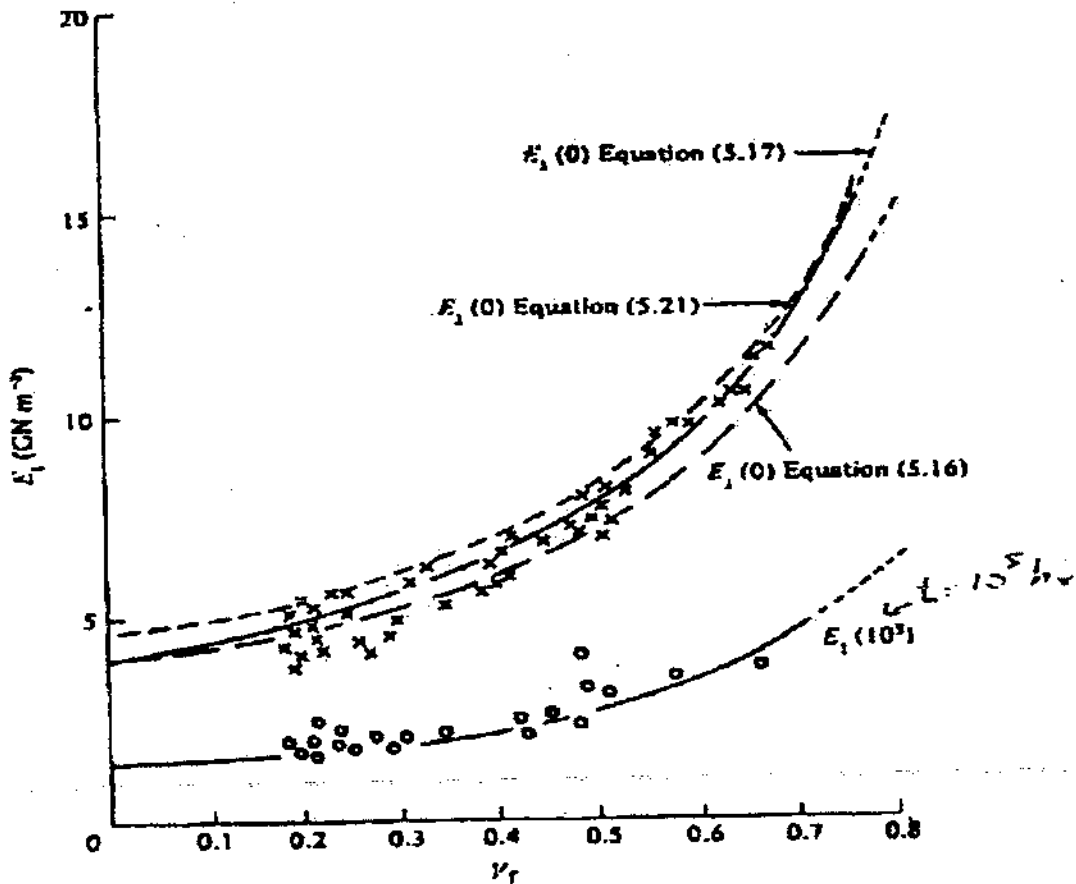
$$E_2 = \frac{E_f E_m}{E_f (1 - V_f) + E_m V_f} \quad (3.3.7)$$

Η γενική μορφή αυτής της εξίσωσης είναι σε συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα του Σχ.3.3.4 για την μεταβολή της E συναρτήσει του V_f για το σύνθετο με ίνες υαλοβάμβακα (Eglass) και ρητίνη

πολυεστέρα (Polyester). Μια ακριβέστερη έκφραση υπολογισμού του E δίνεται από τον τύπο:

$$E = \frac{E_f E_m^*}{E_f(1-V_f) + E_m^* V_f} \quad (3.5.8)$$

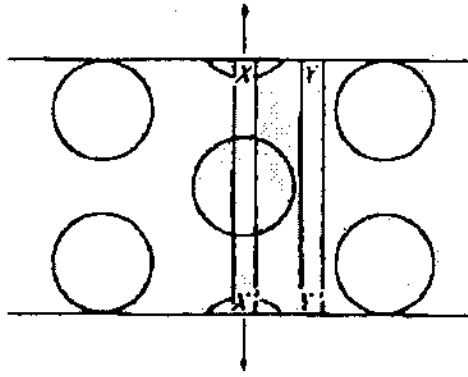
όπου $E_m^* = \frac{E_m}{1-V_m^2}$



Σχ. 3.3.4 Μέτρο ελαστικότητας στην εγκάρσια διεύθυνση συναρτήσει του V_f

Η ανωτέρω εξίσωση δίνει καλύτερα αποτελέσματα για τον υπολογισμό του E όπως φαίνεται στο Σχ. 3.3.4 . Τα αποτελέσματα του Σχ. 3.3.4 φανερώνουν τη κύρια επίδραση των ιδιοτήτων της ρητίνης στον υπολογισμό του εγκάρσιου μέτρου ελαστικότητας του σύνθετου.

Οι εξισώσεις (3.3.7) και (3.3.8) είναι βασικές για τον σχεδιασμό των πολύστρωτων κατασκευών αλλά δεν παρέχουν πολλές πληροφορίες σχετικά με την φυσική ερμηνεία της τάσης και παραμόρφωσης γύρω από τις ίνες οι οποίες απαιτούνται για την επεξήγηση της εγκάρσιας αστοχίας του υλικού. Η υπόθεση, ότι $\sigma_f = \sigma_m$ και επί πλέον ότι σε κάθε φάση η παραμόρφωση είναι ομοιόμορφη, είναι μη-ρεαλιστική διότι οι ίνες δεν μπορεί να αντιπροσωπεύσουν φύλλα. Αυτό γίνεται φανερό στο Σχ. 3.3.5 το οποίο δείχνει μια ιδανική εξαγωνική διεύθυνση των ινών σε ένα σύνθετο το οποίο υφίσταται μια ομοιόμορφη εφαρμοζόμενη εξωτερικά παραμόρφωση. Το κύριο ποσοστό της παραμόρφωσης στη τομή XX' η οποία αντιστοιχεί στο φύλλο του Σχ. 3.3.5 λαμβάνεται από την ρητίνη εφ' όσον $E_f \gg E_m$. Οι παραμορφώσεις στην τομή YY' η οποία βρίσκεται ολοκληρωτικά μέσα στη ρητίνη θα είναι καθ' ολοκληρία ομοιόμορφες και η μέση παραμόρφωση θα είναι πολύ μικρότερη απ' ότι στη ρητίνη στην τομή XX' . Με άλλα λόγια θα υπάρχει μια μεγέθυνση στην παραμόρφωση στην ρητίνη μεταξύ των ινών. Οι διαφορετικές παραμορφώσεις σε διαφορετικά τμήματα της ρητίνης οδηγεί σε επιπρόσθετες και ακολούθως σε μία ανομοιόμορφη κατανομή τάσεων.



Σχ. 3.3.5 Σχηματική αναπαράσταση της τάσης σ' ένα πολύστρωτο μιας διεύθυνσης σε διατμητικό φορτίο.

Η θεωρία ελαστικότητας και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχουν χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη του E και άλλων μέτρων ελαστικότητας χρησιμοποιώντας περισσότερο ρεαλιστικές υποθέσεις. Μια απλοποίηση των εξισώσεων υπολογισμού της E έχουν προταθεί από τους Halpin & Tsai² όπου αυτές οι εξισώσεις είναι χρήσιμες για την πρόβλεψη των ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών. Η εξίσωση των Halpin & Tsai χρησιμοποιείται περισσότερο απ' ό,τι η (3.3.8) και έχει την μορφή:

$$E_{||} = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (3.3.9)$$

$$V_{||} = V_f V_f + V_m (1 - V_f)$$

και

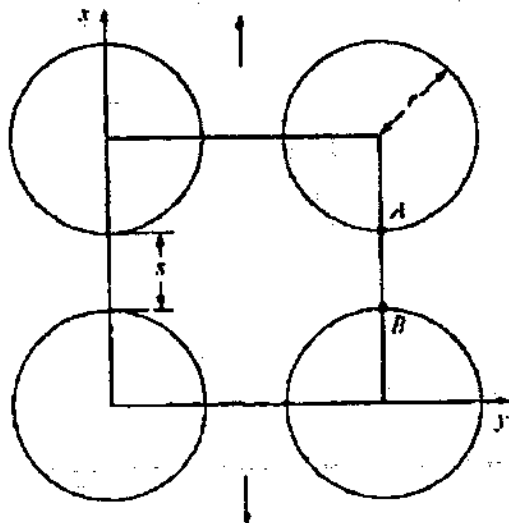
² Halpin J.C. and Tsai S.W. Environmental factors in Composite Materials Design, in Force Materials Labs Technical Report AFML-TR-67-423 (1967)

$$M/M_m = (1 + \xi \eta V_f) / (1 - \eta V_f)$$

$$\eta = \left(\frac{M_f}{M_m} - 1 \right) / \left(\frac{M_f}{M_m} + \xi \right) \quad (3.3.10)$$

όπου M παριστάνει το εγκάρσιο μέτρο ελαστικότητας E ή το διατμητικό μέτρο ελαστικότητας G . Οι ποσότητες $M_f, M_m, V_f, G_f, G_m, V_m$ παριστάνουν τις ιδιότητες της ίνας και της ρητίνης. Η παράμετρος ξ εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των δύο φάσεων π.χ το σχήμα και το λόγο L/d (L =μήκος, d =διάμετρος) των ινών και από τις συνθήκες φόρτισης του υλικού. Το ξ προσδιορίζεται εμπειρικά με προσομοίωση των πειραματικών δεδομένων. Για παράδειγμα τα αποτελέσματα του Σχ. 3.3.4 εάν προσομοιωθούν με την (3.3.9) δίνουν $\xi=0.2$.

Μια από τις αρχικές ποσοτικές μελέτες για τον προσδιορισμό της ανομοιομορφής κατανομής των παραμορφώσεων στην ρητίνη μεταξύ των ινών προτάθηκε από τον Kies³ ο οποίος χρησιμοποίησε ένα απλό μοντέλο τετραγωνικής διεύθεσης των ινών όπως δείχνει το Σχ. 3.3.6.



Σχ. 3.3.6 Απλό μοντέλο τετραγωνικής διεύθεσης των ινών.

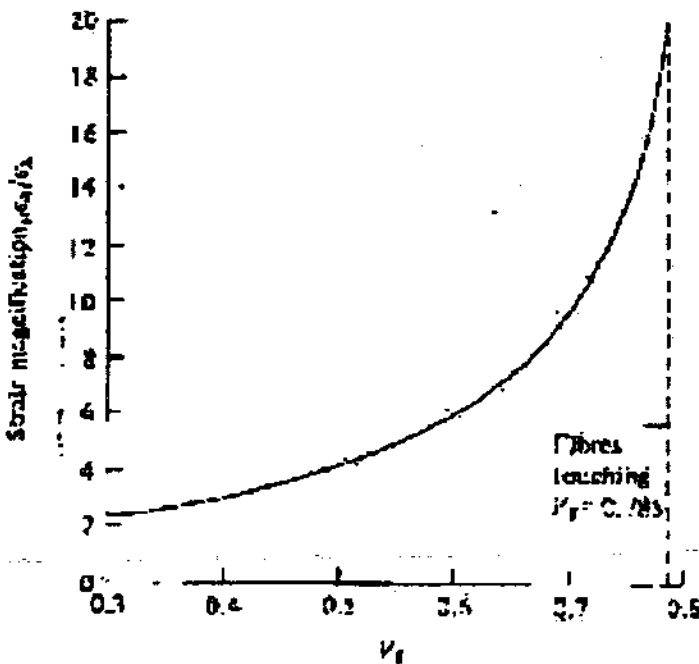
³ Kies J.A. Maximum strain in the resin of fiber glass composites, US Naval Research Lab Report NRL 5752 (1962)

Όταν η τετραγωνική διάταξη υφίσταται την επίδραση μιας απλής παραμόρφωσης $\bar{\epsilon}_x$ τότε η παραμορφωσιακή μεγέθυνση στην ρητίνη κατά μήκος της γραμμής AB ισούται με:

$$\epsilon_x / \bar{\epsilon}_x = (2 + \frac{s}{r}) / [\frac{s}{r} + 2(\frac{E_m}{E_f})] \quad (3.3.11)$$

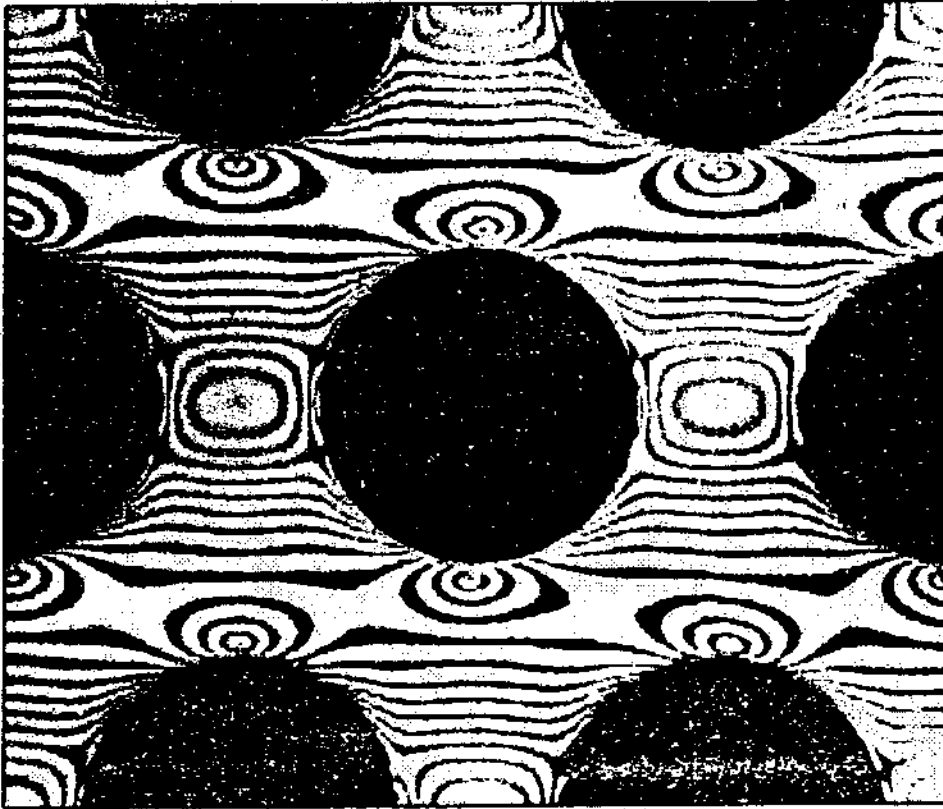
όπου s και r ορίζονται στο Σχ. 3.3.6.

Οι ανωτέρω εξισώσεις μπορούν να συνδυαστούν για να υπολογίσουν την μεταβολή της παραμορφωσιακής μεγέθυνσης συναρτήσει του V_f . Μια τυπική καμπύλη του λόγου $\epsilon_x / \bar{\epsilon}_x$ φαίνεται στο Σχ. 3.3.7 το οποίο αντιστοιχεί στο σύστημα ίνες γυαλιού εμβαπτισμένες σε πολυεστερική ρητίνη ($E_f / E_m = 20$).



Σχ. 3.3.7 Διάγραμμα τάσεων συναρτήσει του V_f σύμφωνα με την εξίσωση (3.3.11) για σύστημα ύαλου(ίνα)-πολυεστέρα(ρητίνη).

Μια εναλλακτική μέθοδος για να καταλάβουμε την ανομοιόμορφη κατανομή των τάσεων και παραμορφώσεων σε πολύστρωτα υλικά τα οποία υπόκεινται σε εγκάρσια φορτία, είναι η εφαρμογή της φωτοελαστικότητας. Το Σχ. 3.3.8 παρουσιάζει τις ισοχρωματικές καμπύλες που δημιουργούνται σ' ένα σύνθετο στο οποίο οι κύκλοι δεικνύουν τις ίνες εμβαπτιζόμενες στην ρητίνη. Οι ισοχρωματικές καμπύλες φαίνονται όταν το σύνθετο υφίσταται εγκάρσια τάση στην εγκάρσια διεύθυνση και προκύπτει έπ' αυτού πολωμένο φως. Κάθε καμπύλη είναι η θέση στην ρητίνη η οποία έχει την ίδια διαφορά κύριων τάσεων. Είναι δυνατόν να υπολογισθεί η τάση και παραμόρφωση από το πρότυπο της θέσης και την τάξη των κροσσών. Είναι ικανό να γνωρίζουμε ότι το πρότυπο είναι σύνθετο και δεικνύει ότι το μέγεθος και η διεύθυνση της τάσης μεταβάλλεται μέσα στη ρητίνη. Εξαρτάται, για μια δεδομένη κατ' όγκο περιεκτικότητα σε ίνες, από την διευθέτηση των ινών και από τον βαθμό συμμετρίας. Μέσα στη ρητίνη δημιουργούνται διαξονικά και τριαξονικά εντατικά πεδία και το μέγεθός τους εξαρτάται από το λόγο των μέτρων ελαστικότητας της ίνας και ρητίνης.



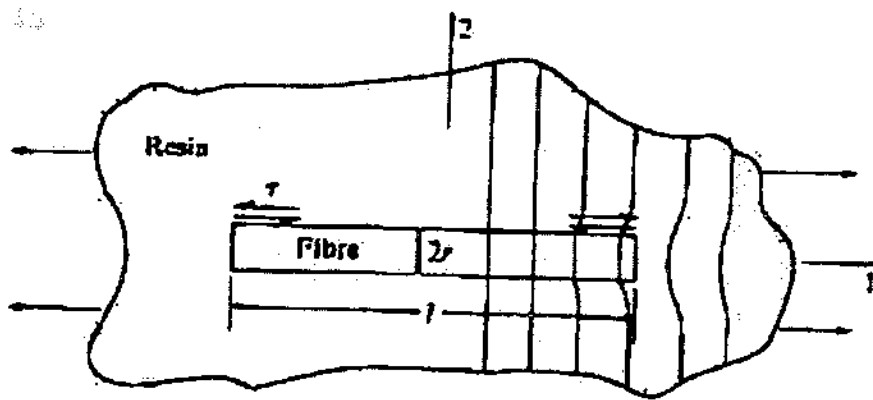
Σχ. 3.3.8 Κροσσοί φωτοελαστικότητας από ίνες εμβαπτισμένες σε ρητίνη.

3.3.2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΕΝΤΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΑΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ ΣΤΑ ΑΚΡΑ ΤΩΝ ΙΝΩΝ

Για την ερμηνεία των ελαστικών ιδιοτήτων των υλικών, βασικός παράγοντας προς μελέτη είναι ο λόγος του μήκους (L) προς τη διάμετρο ($2r$) στην παραμορφωσιακή ικανότητα των ινών στο σύνθετο. Καθώς ο λόγος $L/2r$ των ινών ελαττώνεται οι επιδράσεις των άκρων γίνονται σημαντικές καθώς η ασυνέχεια στα άκρα επηρεάζει τα εντατικά και παραμορφωσιακά πεδία μέσα στη ρητίνη. Η δυνατότητα των ινών στην ενίσχυση της μήτρας εξασθενεί καθώς ελαττώνεται το μήκος των ινών. Τα άκρα των ινών παίζουν σημαντικό ρόλο στην αστοχία κοντόινων

σύνθετων και σε συνεχή ινώδη σύνθετα καθ' όσον οι μακριές ίνες μπορούν να τεμαχιστούν σε μικρά τμήματα.

Ας θεωρήσουμε μια ίνα, μήκους L η οποία εμβαπτίζεται σε ρητίνη μικρότερου μέτρου ελαστικότητας (Σχ. 3.3.9 α). εάν η ίνα έχει καλή πρόσφυση με την ρητίνη τότε η εφαρμοζόμενη τάση στη ρητίνη θα μεταφερθεί εγκάρσια στην ίνα κατά μήκος της διεπιφάνειας. Στην περιοχή των άκρων της ίνας η παραμόρφωση στην ίνα θα είναι μικρότερη απ' ότι στη ρητίνη. Το πεδίο των μετατοπίσεων στη ρητίνη φαίνεται στο Σχ. 3.3.9 α.



Σχ. 3.3.9 α Ίνα εμβαπτισμένη σε ρητίνη.

Αυτό το πρόβλημα έχει λυθεί αναλυτικά από τον Cox ο οποίος χρησιμοποίησε την ανάλυση 'διατμητικής καθυστέρησης'.

Η ανάλυση του Cox υποθέτει ότι αμφότερα τα υλικά ίνα και ρητίνη παραμένουν ελαστικά. Σε ένα άρθρο του, το οποίο δημοσιεύθηκε το

1952⁴, έδειξε ότι για μια εφαρμοζόμενη τάση στη ρητίνη παράλληλα με την διεύθυνση των ινών η εφελκυστική τάση μέσα στην ίνα δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_m \left\{ 1 - \frac{\cosh[\beta(L/2 - x)]}{\cosh[\beta(L/2)]} \right\} \quad (3.3.12)$$

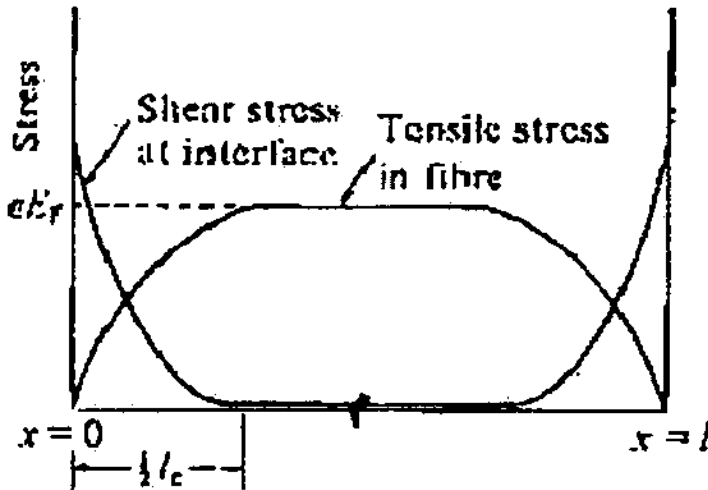
όπου ο συντελεστής β ισούται με $\beta = \sqrt{\frac{2G_m}{E_f r^2 \ln(R/r)}}$ (G διατμητικό μέτρο ελαστικότητας, r ακτίνα της ίνας, R αντιπροσωπεύει την απόσταση μεταξύ των ινών).

Η εφελκυστική τάση στην ίνα μηδενίζεται στα άκρα της ίνας και παίρνει μέγιστη τιμή στο κέντρο της, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.3.9 β. Η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια δίνεται από τον τύπο:

$$\tau(x) = E_f \varepsilon_m \gamma \frac{\sinh \beta(L/2 - x)}{\cosh \beta(L/2)} \quad (3.3.13)$$

όπου $\gamma = \beta r / 2$. Η σχηματική παράσταση της (3.3.13) δίνετε στο Σχ. 3.3.9 β.

⁴ Cox H.L The elasticity and strength of paper and other fibrous materials, Br J.Appl. Phys.3, 72-79 (1952)



Σχ. 3.3.9β Κατανομή των τάσεων στη διεπιφάνεια ρητίνης-ίνας.

Η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια παίρνει μέγιστη τιμή στα άκρα των ινών και σχεδόν μηδενίζεται στο κέντρο. Αυτά τα αποτελέσματα φανερώνουν ότι υπάρχουν περιοχές στα άκρα των ινών τα οποία δεν μεταφέρουν το συνολικό φορτίο, έτσι ώστε η μέση τιμή της τάσης στις ίνες μήκους L είναι μικρότερη από ότι σε μία συνεχή ίνα η οποία υφίσταται τις ίδιες εξωτερικές συνθήκες φόρτισης.

Η απόδοση της ενίσχυσης ελαττώνεται καθώς το μέσο μήκος της ίνας ελαττώνεται διότι ένα μεγαλύτερο μέρος του συνολικού μήκους της ίνας δεν φορτίζεται πλήρως. Η μεγαλύτερη πιθανή τιμή της παραμόρφωσης στην ίνα είναι η παραμόρφωση ϵ η οποία εφαρμόζεται στο σύνθετο έτσι ώστε η μέγιστη τάση στην ίνα είναι ϵE_f . Για να επιτευχθεί η μέγιστη τάση το μήκος της ίνας πρέπει να είναι μεγαλύτερο από την κρίσιμη τιμή L_c . Το Σχ. 3.3.9β δείχνει ότι για ίνες μεγαλύτερου μήκους απ' ότι το L_c οι περιοχές στα άκρα των ινών οι οποίες δεν είναι πλήρως φορτισμένες έχουν μήκος $L_c/2$.

Θα γίνει προφανές ότι η απόδοση της ενίσχυσης εξαρτάται από της αντοχής της διεπιφάνειας εφ' όσον η μεταφορά φορτίου απαιτεί έναν

ισχυρό διεπιφανειακό δεσμό. Η μεγάλη τιμή της διατμητικής τάσης στα άκρα των ινών συνεπάγεται:

1. διατμητική αποκόλληση στη διεπιφάνεια
2. αστοχία της ρητίνης
3. αστοχία της ίνας
4. διατμητική υποχώρηση της ρητίνης, η οποία εξαρτάται από τη σχετική αντοχή η οποία συνδέεται με αυτές τις διαδικασίες.

Ένας άλλος παράγοντας που περιορίζει την απόδοση της ενίσχυσης είναι η αντοχή της ίνας.

Ο λόγος της μέγιστης διεπιφανειακής διατμητικής τάσης στα άκρα της ίνας προς την μέγιστη τάση στο κέντρο της ίνας μπορεί να υπολογιστεί από τις εξισώσεις (3.3.12) και (3.3.13), δηλαδή

$$\frac{\tau_{\max}}{\sigma_{f,\max}} = \sqrt{\frac{G_m}{2E_f \ln(R/r)}} \cosh(\beta L/4) \quad (3.3.14)$$

Ο λόγος αυτός για μακρόνια σύνθετα υλικά δίνει

$$\frac{\tau_{\max}}{\sigma_{f,\max}} = \sqrt{\frac{G_m}{2E_f \ln(R/r)}} \quad (3.3.15)$$

Ο λόγος $\tau_{\max}/\sigma_{f,\max}$ για τέσσερα σύνθετα υλικά δίνεται στον πίνακα 3.3.1.

Υλικά	G_m/E_f	V_f	$\tau_{\max}/\sigma_{f,\max}$
Glass-Polyester	0.017	0.3	0.13
Carbon-Epoxy	0.005	0.3	0.07
Glass-Nylon	0.010	0.3	0.10
Kevlar 49-Epoxy	0.014	0.3	0.12

Πίνακας 3.3.1 Τιμές του λόγου $\tau_{\max}/\sigma_{f,\max}$ για κάποια τυπικά σύνθετα υλικά.

3.3.3 ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΟΝΤΟΙΝΩΝ ΙΝΩΔΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Εφ' όσον η απόδοση ενίσχυσης των κοντόινων σύνθετων υλικών είναι μικρότερη απ' αυτή των μακρόινων, συνεπάγεται ότι το ενεργό μέτρο ελαστικότητας των κοντόινων υλικών θα είναι επίσης μικρότερο. Σ' αυτή την περίπτωση ένα υλικό έχει τρισδιάστατη κατανομή προσανατολισμού ινών και κατανομή μηκών των ινών. Δεν υπάρχει μια ικανοποιητική περιγραφή των ελαστικών ιδιοτήτων σαν συνάρτηση αυτών των παραμέτρων. Για ένα σύνθετο στο οποίο οι ίνες μήκους L κατευθύνονται σε μια διεύθυνση ο κανόνας των μιγμάτων μπορεί να τροποποιηθεί από την εισαγωγή του παράγοντα μήκους η έτσι ώστε:

$$E_{||} = \eta E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (3.3.16)$$

Σύμφωνα με την θεωρία Cox ο συντελεστής η δίνεται από τη σχέση

$$\eta = 1 - \frac{\tanh(\beta L / 2)}{\beta L / 2} \quad (3.3.17)$$

όπου η παράμετρος β έχει οριστεί προηγούμενα. Ο συνδυασμός των σχέσεων (3.3.4), (3.3.16) και (3.3.17) δείχνει ότι εάν $E_f \gg E_m$ το *ανηγμένο μέτρο ελαστικότητας* για κοντόινα υλικά συγκρινόμενο με εκείνο των συνεχών ινωδών υλικών είναι:

$$E(\text{κοντόινα})/E(\text{συνεχές}) = \eta \quad (3.3.18)$$

Μερικές τιμές του η για τρεις διαφορετικές τιμές του μήκους των ινών 0.1, 1.0 και 10 mm για δύο σύνθετα δίνονται στον Πίνακα 3.3.2.

Υλικά	L(mm)	G_m/E_f	R(μ m)	V_f	H
Carbon-Epoxy	0.1	0.005	8	0.3	0.20
	1.0	0.005	8	0.3	0.89
	10	0.005	8	0.3	0.99
Glass-nylon	0.1	0.010	11	0.3	0.21
	1.0	0.010	11	0.3	0.89
	10	0.010	11	0.3	0.99

Πίνακας 3.3.2 Τιμές του διορθωτικού συντελεστή μήκους η για δύο διαφορετικά σύνθετα.

Μια εναλλακτική έκφραση της (3.3.16) η οποία προτάθηκε από τους Halpin & Tsai⁵ και φέρει το όνομά τους, εκφράζεται από τον τύπο:

$$E = E_m \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \quad (3.3.19)$$

όπου $\xi = L/r$.

Η ανωτέρω εξίσωση υπολογίζει το αξονικό μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου. Όταν υπάρχει μια κατανομή στον προσανατολισμό των ινών η απόδοση της ενίσχυσης των ινών ελαττώνεται περαιτέρω. Ο Cox έβαλε έναν ακόμη όρο στην εξίσωση (3.3.16) για να λάβει υπόψη την επίδραση του προσανατολισμού των ινών, δηλαδή

$$E = \eta_o \eta E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (3.3.20)$$

όπου η_o είναι ο συντελεστής ικανότητας προσανατολισμού.

Οι τιμές του η_o έχουν υπολογισθεί για διαφορετικές κατανομές προσανατολισμού των ινών, υποθέτοντας ότι η ρητίνη και οι ίνες παραμορφώνονται ελαστικά και ότι οι παραμορφώσεις είναι ίδιες σε αμφότερες τις φάσεις. Μια ομάδα παραλλήλων ινών με συνολική

⁵ Halpin J.C. Stiffness and Expansion Estimates for Oriented Short Fiber Composites, J. Composite Materials, 3 pp. 732-734 (1969).

διατομή $\Delta\alpha_f$, οι οποίες είναι προσανατολισμένες κατά γωνία θ σχετικά με το εφαρμοζόμενο φορτίο είναι ισοδύναμες με μια δέσμη ινών διατομής $\Delta\alpha^*_f$, οι οποίες είναι προσανατολισμένες στη διεύθυνση του φορτίου, όπου $\Delta\alpha^*_f = \Delta\alpha_f \cos^4(\theta)$ (3.3.21)

Για δέσμη διαφορετικών προσανατολισμένων ινών η ισοδύναμη επιφάνεια του συνολικού ενισχυμένου υλικού είναι

$$\alpha^*_f = \sum \Delta\alpha_f \cos^4(\theta) \quad (3.3.22)$$

Ο παράγοντας ικανότητας προσανατολισμού η_o ορίζεται από τη σχέση $\eta_o = \alpha^*_f / \alpha_f$. Για πολύστρωτα υλικά φορτιζόμενα σε μία διεύθυνση, όταν το φορτίο είναι παράλληλο με τις ίνες ισχύει $\eta_o = 1$, και όταν το φορτίο είναι κάθετο ως προς τον προσανατολισμό των ινών ισχύει $\eta_o = 0$.

3.4 ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η ολοένα αυξανόμενη περιβαλλοντική ευαισθησία σε συνδυασμό, πολλές φορές, με οικονομικές παραμέτρους, έχουν οδηγήσει στο ενδιαφέρον για ανακύκλωση των υλικών και ιδιαίτερα των πλαστικών. Η επιθυμία για ελάττωση της κατανάλωσης των πηγών ενέργειας και των διαθέσιμων πόρων γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική, και το πρόβλημα της απόθεσης των πλαστικών απορριμμάτων που εν γένει μολύνουν το περιβάλλον γίνεται όσο περνάει ο καιρός οξύτερο.

Το ποσοστό των πλαστικών στο σύνολο των απορριμμάτων είναι της τάξης του 5-8% κατά βάρος αλλά φτάνει σε κατ' όγκο αναλογία και το 30% δεδομένης της χαμηλής πυκνότητας και του γεγονότος ότι συνήθως

συναντώνται υπό τη μορφή κοίλων αντικειμένων. Τα παραπάνω ποσοστά αυξάνονται βαθμιαία λόγω της ραγδαίας αύξησης της χρησιμοποίησης των πλαστικών σε διάφορα πεδία εφαρμογών και λόγω του γεγονότος ότι τα πολυμερή στη μεγαλύτερη πλειοψηφία τους δεν είναι βιοαποικοδομήσιμα.

Οι προσπάθειες που γίνονται για την αντιμετώπιση της παραπάνω κατάστασης, καλούνται να αναπτύξουν:

1. μεθόδους συλλογής και διαχωρισμού απορριμμάτων
2. αγορές ικανές να απορροφήσουν τα ανακυκλωμένα προϊόντα
3. πρότυπα για τον έλεγχο της ποιότητας των ανακυκλωμένων υλικών
4. μεθόδους ανακύκλωσης οικονομικά συμφέρουσες.

Σχετικά με τον τρόπο και την πορεία της ανακύκλωσης των πλαστικών απορριμμάτων, έχουν κατηγοριοποιηθεί οι μέθοδοι ανακύκλωσης σε πρωτογενής, δευτερογενής, τριτογενής και τεταρτογενής.

3.4.1 ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΣΚΛΗΡΥΝΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ

Το πρόβλημα σχετικά με την ανακύκλωση των σύνθετων υλικών, επαφίεται βασικά, σε τεχνολογικό επίπεδο αφενός, και τεχνοοικονομικό επίπεδο αφετέρου. Τα τεχνοοικονομικά προβλήματα αφορούν την συγκέντρωση των ανακυκλώσιμων υλικών με αποτελεσματικό και οικονομικά ανεκτό τρόπο. Αυτά τα προβλήματα είναι κοινά για διάφορους τύπους υλικών και εξαρτώνται κυρίως από τη φύση του scrap παρά από το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένο. Τα τεχνολογικά προβλήματα, εξ' άλλου, σχετίζονται με την ανάκτηση της αξίας των

συνθέτων που στην περίπτωση των θερμοσκληρυνόμενων υλικών είναι ιδιαίτερης φύσης.

Το πιο θεμελιώδες πρόβλημα απορρέει από το γεγονός ότι τα θερμοσκληρυνόμενα είναι πολυμερή των οποίων οι αλυσίδες είναι διασταυρωμένες (cross-linked) και ως εκ τούτου δεν είναι δυνατή η επανάτηξή τους. Έτσι δεν μπορεί να ακολουθηθεί η συμβατική πορεία ανακύκλωσης που χρησιμοποιείται στην περίπτωση των θερμοπλαστικών, κατά την οποία η θερμοπλαστική μήτρα επανατήκεται και μπορεί να μορφοποιηθεί ακολούθως.

Εξ' άλλου, τα σύνθετα δεν αποτελούνται από ένα και μόνο υλικό αλλά είναι ένα «μίγμα» υλικών με τελείως διαφορετικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες. Ίνες γυαλιού, άνθρακα, αραμιδίου κ.α. χρησιμοποιούνται ως μέσα ενίσχυσης σε θερμοσκληρυνόμενα σύνθετα καθώς επίσης και διάφορα πρόσθετα (συνήθως fillers) και προσδίδουν όγκο, ακαμψία ή ανάλογα διάφορες ιδιότητες όπως μείωση της αναφλεξιμότητας. Σε πολλές περιπτώσεις το πολυμερές αποτελεί μόνο ένα μικρό ποσοστό στο συνολικό βάρος του συνθέτου (μικρότερο και από 30%). Οι μέθοδοι για την επεξεργασία του scrap που προέρχονται από σύνθετα πρέπει να είναι ικανοί ώστε να μπορούν να μεταχειριστούν ένα τέτοιο «μίγμα» και επιπλέον να μπορούν να αποδώσουν σε περίπτωση ενδεχόμενης μόλυνσης του ανακυκλώσιμου υλικού.

Παρά τις ανωτέρω δυσκολίες, διάφορες τεχνολογίες αναπτύσσονται με σκοπό την ανακύκλωση τέτοιων υλικών και την μερική ανάκτηση της αξίας τους δίνοντας έτσι και άλλες επιλογές από την ολική απόρριψή τους στο περιβάλλον με όλα τα δυσμενή επακόλουθα.

3.4.2. ΕΠΙΛΟΓΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΣΚΛΗΡΥΝΟΜΕΝΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ

Το πρόβλημα της ανακύκλωσης των θερμοσκληρυνόμενων συνθέτων προσεγγίζεται από διάφορες πλευρές, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- Ανακύκλωση υλικών, κατά την οποία η μέθοδος αποσκοπεί στην παραγωγή νέου συνθέτου.
- Χημική ανακύκλωση (με πυρόλυση), κατά την οποία ανακτώνται οργανικές ενώσεις όπως μονομερή καύσιμα ή χημικά.
- Επανάκτηση ενέργειας, κατά την οποία το ενεργειακό περιεχόμενο του πολυμερούς ανακτάται με καύση.

Υπάρχει μια γενική φιλοσοφία στην ανακύκλωση, που δέχεται ότι η σειρά που εγράφησαν οι ανωτέρω μέθοδοι συμβαδίζει με την αξία τους (π.χ. η ενεργειακή ανακύκλωση έχει μικρότερη αξία από την υλική ανακύκλωση). Για τα περισσότερα υλικά η παραπάνω πεποίθηση είναι ορθή, στην περίπτωση των συνθέτων όμως, με τις δυσκολίες και τους περιορισμούς που επικρατούν, η παραπάνω ιεραρχία δύναται να μην οδηγεί στην πιο ενδεδειγμένη τεχνική ανακύκλωσης. Για καλύτερη κατανόηση και αξιολόγηση, παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικά κάποιες μέθοδοι που λαμβάνουν χώρα στον τομέα της ανακύκλωσης των συνθέτων.

3.4.2.1. ΕΠΑΝΑΘΡΥΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Μολονότι η απευθείας επανάτηξη των θερμοσκληρυνόμενων υλικών δεν είναι δυνατή, εν' τούτοις είναι εφικτή η θραύση τους που οδηγεί σε θρυμματισμό (grinding) και εν συνεχεία η χρησιμοποίησή τους για την παραγωγή ενός νέου συνθέτου. Αυτή η μέθοδος αναπτύσσεται στη Γερμανία από μια σχετικά νέα εταιρία (ERCOM GmbH) που ιδρύθηκε από μια ομάδα εταιριών με ενδιαφέρον στο ερευνητικό αυτό πεδίο. Ο στόχος είναι η ανακύκλωση των θερμοσκληρυνόμενων συνθέτων κυρίως των λεγόμενων *suit mould compounds* (SMC) και *Bulk mould compounds* (BMC) με διαδικασία θρυμματισμού και η περαιτέρω αναγέννησή τους σε καινούρια SMC και BMC. Μετά τη θραύση το υλικό διαχωρίζεται σε διάφορα κλάσματα. Το κλάσμα της ρητίνης που αποτελεί σκόνη κοκκομετρίας μέχρι 3mm μπορεί να ανακυκλωθεί ως πληρωτικό υλικό. Εξ' άλλου, από την θραύση προκύπτει και ένα ινώδες κλάσμα με ίνες που στην περίπτωση του γυαλιού το μέγεθός τους κυμαίνεται από 0.5 μέχρι 7 χιλιοστά και μπορεί να αποτελέσει ενεργό filler και να αντικαταστήσει μέρος από το μέσο ενίσχυσης για την παραγωγή καινούριων SMC. Έτσι με αυτό τον τρόπο κάποια από την αξία του μέσου ενίσχυσης ανακτάται. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι το scrap, ανακυκλώνεται προς άλλο σύνθετο υλικό μολονότι ότι η μορφή και η λειτουργία του στο νέο σύνθετο διαφέρει. Το πολυμερές δεν χρησιμοποιείται πλέον ως μήτρα αλλά ως πληρωτικό μέσο και οι ίνες ανακτούν μερική από την αξία τους ως μέσο ενίσχυσης.

Η παραπάνω τεχνική θεωρείται κατάλληλη όταν το scrap είναι σχετικά απαλλαγμένο από μόλυνση και οι ποσότητές του είναι περιορισμένες. Δεδομένου ότι μόνο το 25% από το ανακυκλωμένο

σύνθετο χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενός νέου SMC ή BMC είναι αναγκαίο να παρασκευάζεται περισσότερο παρθένο υλικό από αυτό που ανακυκλώνεται. Επιπλέον, το νέο σύνθετο που περιέχει το ανακυκλωμένο υλικό παρουσιάζει ελάχιστη μείωση στις μηχανικές ιδιότητες ενώ παράλληλα παρατηρείται μείωση στην πυκνότητα το οποίο όμως μπορεί να θεωρηθεί σαν κάτι θετικό.

Παρόμοιες διεργασίες επαναθρυμμάτισης, έχουν αναπτυχθεί και από άλλους οργανισμούς, και περιλαμβάνουν διαδικασίες κατά τις οποίες το θρυμματισμένο σύνθετο ανακυκλώνεται σε θερμοπλαστικές μήτρες ως πληρωτικό υλικό και ως μέσο ενίσχυσης.

3.4.2.2. ΠΙΕΣΗ ΕΝ ΘΕΡΜΩ

Οι πολυουρεθάνες και οι εποξειδικές ρητίνες είναι υλικά τα οποία δύναται να επαναμορφοποιηθούν με πίεση εν θερμώ και σε μορφή θραυσμάτων σε συνθήκες 50 έως 100 bar και γύρω στους 200 °C. Το ανακυκλωμένο υλικό εμφανίζει αρκετά υποβαθμισμένες ιδιότητες και για το λόγο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε εφαρμογές που δεν απαιτούν φορτίσεις. Καλύτερες ιδιότητες μπορούν να επιτευχθούν με την προσθήκη θερμοπλαστικών που λειτουργούν ως σύνδεσμος. Σημαντικά μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου, αποτελεί το γεγονός ότι η τεχνολογία αυτή δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα θερμοσκληρυνόμενα υλικά και επιπλέον απαιτεί την δημιουργία αγοράς προκειμένου να απορροφηθεί το σύνολο των υποβαθμισμένων υλικών που παράγονται.

3.4.2.3. ΠΥΡΟΛΥΣΗ

Η διαδικασία της πυρόλυσης έχει ως αποτέλεσμα το «σπάσιμο» των οργανικών υλικών με την θέρμανσή τους απουσία αέρα. Έτσι αποτελεί μέσο ανάκτησης της αξίας ενός πολυμερούς απορρίμματος σπάζοντάς το σε μικρότερης αλυσίδας υδρογονάνθρακες οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν στη χημική βιομηχανία ως πρώτες ύλες. Υπάρχει ένας αριθμός από διάφορες θερμικές διεργασίες αυτού του τύπου για την επεξεργασία των πλαστικών.

Γενικά, όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία της διαδικασίας της πυρόλυσης τόσο μεγαλύτερο μοριακό βάρος θα έχουν τα προϊόντα που παράγονται και ως εκ τούτου και η αξία τους θα είναι μεγαλύτερη. Η μεγάλη περιεκτικότητα ανόργανων υλικών, ως μέσα ενίσχυσης, πληρωτικά υλικά ή διαφόρων ειδών πρόσθετα, στα περισσότερα σύνθετα σημαίνει ότι μια μεγάλη ποσότητα στερεών αποβλήτων θα σχηματίζεται. Επιπλέον, από την πυρόλυση του πολυμερούς σχηματίζονται απανθρακωμένα υλικά (char) και αυτό αναμιγνύεται με τα διάφορα ορυκτά fillers και τα μέσα ενίσχυσης στο στερεό απόβλητο.

Στις ΗΠΑ κάποιες από τις κατασκευάστριες εταιρίες SMC έχουν σχηματίσει την SMC automotive alliance η οποία ερευνά τα προβλήματα κατά την πυρόλυση SMC αποβλήτων. Έχουν αναφέρει ότι τα SMC μπορούν να πυρολυθούν. Εν τούτοις, τα υγρά και αέρια προϊόντα δεν είναι ιδιαίτερης αξίας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σαν καύσιμο. Τα στερεά προϊόντα δύναται να χρησιμοποιηθούν σαν πληρωτικά υλικά σε νέα SMC και επίσης σαν πρόσθετα σε τσιμέντο.

Η πυρόλυση μπορεί να γίνει παρουσία ουσιών που βοηθούν οδηγώντας στην παραγωγή συγκεκριμένων προϊόντων. Υλικά που βασίζονται στην πολυουρεθάνη μπορούν να σπάσουν στα αντίστοιχα μονομερή, αντιδρώντας με αλκοόλες (αλκοόληση). Η αλκοόληση αποτελεί μια ελκυστική μέθοδο για την ανακύκλωση των θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών αφού είναι αποτελεσματική στο σπάσιμο των cross-linked δεσμών και οδηγεί σε υψηλής αξίας μονομερή. Εν' τούτοις, η τεχνική δεν μπορεί να εφαρμοστεί στα περισσότερα θερμοσκληρυνόμενα υλικά (πολυεστέρες και εποξειδικές ρητίνες) και μέχρι τώρα δεν έχει επεκταθεί σε ενισχυμένα υλικά.

3.4.2.4. ΚΑΥΣΗ

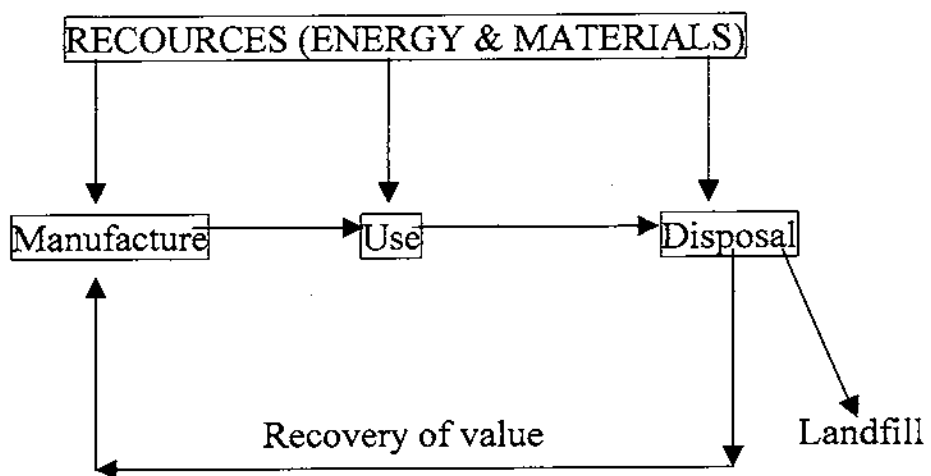
Με την εξαίρεση της αλκοόλυσης της πολυουρεθάνης, οι τεχνικές που περιγράφηκαν ως τώρα ανακτούν το πολυμερές σαν filler ή σαν καύσιμο, από το οποίο το ενεργειακό περιεχόμενό του μπορεί ακόμα να ανακτηθεί. Η καύση είναι μια άλλη τεχνική που αποσκοπεί στην ανάκτηση του ενεργειακού περιεχομένου του πολυμερούς με απλούστερη τεχνολογία. Έρευνες της καύσης των θερμοσκληρυνόμενων συνθέτων έχουν πραγματοποιηθεί μεταξύ άλλων στο Nottingham University ως μέρος ενός προγράμματος που αφορούσε την έρευνα για ανακύκλωση θερμοσκληρυνόμενων προερχόμενων από εφαρμογές της αυτοκινητοβιομηχανίας.

3.4.3. ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ

Κάθε μία από τις μεθόδους ανακύκλωσης που αναφέρθηκαν έχει τα ιδιαίτερα πλεονεκτήματά της που την κάνουν κατάλληλη για

συγκεκριμένες περιπτώσεις. Η μέθοδος θρυμματισμού είναι κατάλληλη όταν το απόρριμμα είναι σε σχετικά αμόλυνη κατάσταση. Εν τούτοις το πολυμερές ανακυκλώνεται σαν filler και αυτό ενδέχεται να μην αποτελεί την πιο αποτελεσματική χρήση ενός υλικού με μεγάλη αξία. Η τεχνική της πυρόλυσης μπορεί να θεωρηθεί κατάλληλη εφ' όσον μπορούν να ανακτηθούν υλικά υψηλής αξίας, όπως στην αλκοόλυση της πολυουρεθάνης. Σε περίπτωση που με αυτή την τεχνική μπορούν να ανακτηθούν μόνο καύσιμα, ίσως η τεχνική της καύσης να είναι πιο αποτελεσματική όσο αφορά το ενεργειακό περιεχόμενο.

Εξάλλου, δεδομένου ότι κατά το μεγαλύτερο βαθμό, ο σκοπός της ανακύκλωσης αφορά την προστασία του περιβάλλοντος, ο καλύτερος τρόπος αξιολόγησης της μεθόδου ανακύκλωσης είναι η πραγματοποίηση της περιβαλλοντικής ανάλυσης της κυκλικής ζωής του υλικού. Η ανάλυση του κύκλου ζωής αξιολογεί τις πηγές που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή, την χρήση και την διάθεση του εκάστοτε υλικού. Έτσι μπορεί να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες και συγκρίσεις μεταξύ των πηγών που αναλώνονται όταν κατασκευάζονται στοιχεία από διαφορετικά υλικά, και μπορεί να εντοπίσει την περισσότερο αποδεκτή μέθοδο ανακύκλωσης ή διάθεσης των υλικών στο τέλος της ζωής τους.



Σχ. 3.4.3 Ανάλυση κύκλου ζωής ενός στοιχείου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 3

- ❖ Cox H.L. *The elasticity and strenght of paper and other fibrous materials*, Br. J. Appl. Phys. 3, 72-79 (1952).
- ❖ D. Hull, *An Introduction to Composite Materials*, Cambrige University Press (1981).
- ❖ Feldman, D. (1989), *Polymeric Building Materials*, Elsevier Science Publishers Ltd., UK.
- ❖ Federation International du Beton – fib (2001), *Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures*, Bulletin 14, Lausanne.
- ❖ Halpin J.C. and Tsai S.W. *Enviromental Factors in Composite Materials Design*, Air Force Materials Labs Technical Report AFML-TR-67-423 (1967).
- ❖ Halpin J.C. *Stiffness and Expansion Estimatesfor Oriented Short Fiber Composites*, J. Composite Materials, 3 pp. 732-734 (1969).
- ❖ Hannant, D.J. (1978). *Fibre Cements and Fibre Concretes*, John Wiley & Sons, New York.
- ❖ JSCE (1993). *State of the Art Report on Continuous Fiber Reinforcing Materials*, Published by the Japan Society of Civil Engineers, Tokyo.

- ❖ Kies J.A. *Maximun Strain in the Resin of Fiber Glass Composites*, US Naval Research Lab Report NRL 5752 (1962).

- ❖ Kim, D.-H. (1995), *Composite Structures for Civil and Architectural Engineering*, E&FN Spon, London.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Σήμερα, τα σύνθετα υλικά επηρεάζουν την καθημερινή ζωή σχεδόν όλων μας. Μεγάλο τμήμα των μεταφορών μας, αλλά και κυρίως της ασφάλειας μας εξαρτάται από ένα ελαστικό αυτοκίνητο που δεν είναι τίποτα άλλο από ενισχυμένο με ίνες πολυεστέρα, πολυαραμίδιο και χάλυβα, συνθετικό καουτσούκ. Πολλά τμήματα αεροσκαφών, πολεμικών αλλά και επιβατικών οχημάτων κατασκευάζονται πια μόνο από σύνθετα υλικά, ενώ καθημερινά η παρουσία των υλικών αυτών γίνεται παραπάνω από εμφανής στα αθλητικά είδη, στα είδη αναψυχής, όπως ακόμη στα οικιακά σκεύη και στα είδη επιπλώσεων. Σύνθετα υλικά βρίσκουμε σε μεγάλα σκάφη αναψυχής μέχρι ρακέτες τένις και από δεξαμενές καυσίμων και ανεμοπλάνα μέχρι μπαστούνια του γκολφ. Διάφορα παραδείγματα δίνονται στον πίνακα 4.1 .

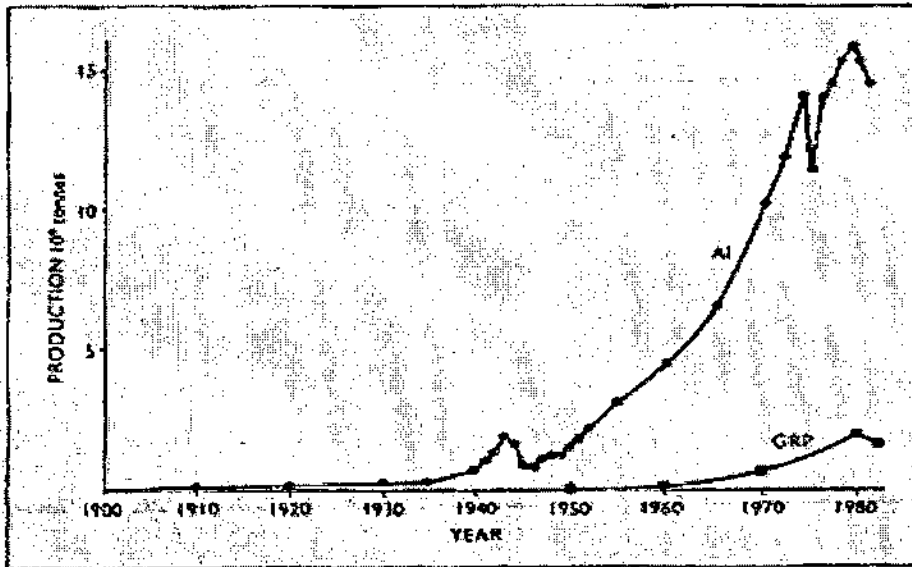
Βιομηχανία	Παραδείγματα
Αεροπορική	Φτερά, Άτρακτος, Πτερύγια ελικοπτέρου
Αυτοκινήτων	Μάσκες, Άξονες κίνησης, Προφυλακτήρες, Φτερά, Καθίσματα, Σαλόνια
Σκαφών	Καταστρώματα, Ιστία
Επίπλων	Καρέκλες, Τραπέζια, Σκάλες
Ηλεκτρικών ειδών	Πλαίσια, Μονωτές, Διακόπτες
Αθλητικών ειδών	Καλάμια ψαρέματος, Μπαστούνια γκόλφ, Κανό, Εξαρτήματα σκι
Χημική	Σωλήνες, Δοχεία πίεσης, Δεξαμενές

Πίνακας 4.1 Χρήσεις Συνθέτων Υλικών

Ο όρος βέβαια «σύνθετο υλικό» μπορεί να αποδοθεί με δεκάδες τρόπους, όπως έχουμε τονίσει και παραπάνω. Θα επικεντρώσουμε την προσοχή μας σε πολυμερή ενισχυμένα με ίνες διαμέτρων της τάξης των 10mm, ενώ θα γίνει και μικρή αναφορά σε περιπτώσεις όπου η μήτρα αποτελείται από μέταλλο ή κεραμικό. Με κάποια άλλη, πιο ευρεία θεώρηση, θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε και το ενισχυμένο με χάλυβα σκυρόδεμα, όπου εδώ, η ποσότητα σε τόνους θα ξεπερνούσε κατά πολύ, κάθε άλλη σκέψη. Ακόμα όμως και αν αφαιρέσουμε αυτές τις προφανείς χρήσεις και περιορίσουμε στον παραπάνω ορισμό, οι εφαρμογές των σύνθετων υλικών σήμερα είναι τόσες πολλές, που είναι αρκετά δύσκολο να κάνει έστω και μια σύντομη αναφορά κανείς.

^ε Πριν αναφερθούμε στις κυρίως εφαρμογές θα ήταν σκόπιμο να δούμε την κλίμακα που χρησιμοποιούνται τα σύνθετα υλικά σε σχέση με τα παραδοσιακά. Ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών είναι αναμφισβήτητα η χαμηλή τους πυκνότητα. Στο σχήμα 4.1 έχουμε τη σύγκριση της παγκόσμιας κατανάλωσης GRP με την αντίστοιχη του χαμηλής πυκνότητας αλουμινίου. Τα στοιχεία για το αλουμίνιο καλύπτουν την περίοδο 1890-1985, ενώ αντίθετα η πρώτη εμφάνιση των GRP έγινε στα μέσα της δεκαετίας του 1940. Αν και όπως φαίνεται η κατανάλωση GRP είναι μικρή σε σχέση πάντα με αυτή του αλουμινίου, είναι προφανές ότι ο ρυθμός αύξησης του συνθέτου τα πρώτα 30 χρόνια της εμφάνισης του (15% ετησίως περίπου), είναι πολύ υψηλότερος από τον αντίστοιχο του αλουμινίου, των 30 πρώτων χρόνων ζωής του.

Από την άλλη πλευρά, η κατανάλωση των λεγόμενων «σύνθετων υψηλών προδιαγραφών» που βασίζονται κυρίως στον άνθρακα και το αραμίδιο, αποτελεί μόνο ένα μικρό κλάσμα της αντίστοιχης των GRP. Φυσικά σε επίπεδο κόστους αλλά και σπουδαιότητας κατασκευών, τα πράγματα αντιστρέφονται. Η παγκόσμια παραγωγή ινών άνθρακα κυμαίνεται γύρω στους 4000 τόνους ετησίως, με την παραγωγή ινών αραμιδίου να κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα. Βέβαια, ιδιαίτερα για αυτά τα σύνθετα υπολογίζεται μια ετήσια αύξηση πάνω από 20% μέχρι το τέλος του αιώνα, βασισμένη κυρίως στην ολοένα αυξανόμενη υιοθέτηση τέτοιων υλικών από την αεροπορική βιομηχανία και την αεροδιαστημική, γενικότερα.



Σχήμα 4.1 Απεικόνιση της κατανάλωσης GRP και αλουμινίου διεθνώς.

4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ GRP

Στον πίνακα (4.2), έχουμε την εικόνα που παρουσιάζεται στην αγορά της Μεγάλης Βρετανίας, ως προς την κατανάλωση GRP. Οι αριθμοί είναι πολύ ενθαρρυντικοί, αν αναλογιστούμε και τα ασύγκριτα περισσότερα έτη ύπαρξης των παραδοσιακών υλικών, αλλά και των μεγάλων απαιτήσεων που απαιτούνται τις περισσότερες φορές για την μετατροπή της παραγωγικής διαδικασίας.

Τομέας	Ποσοστό της συνολικής αγοράς στη Μ. Βρετανία
Ηλεκτρισμός	21.2
Μεταφορές	17.8
Βιομηχανία	17.0
Ναυπηγική	17.0
Σπορ	9.6
Οικοδομική	5.5
Δεξαμενές/σολήνες	4.6
Καταναμητές	3.6
Καλλιέργειες	2.1
Χημική Βιομηχανία	1.0
Επιπλοποιία	0.6

Πίνακας 4.2 Τομείς εφαρμογών των GRP στη Μεγάλη Βρετανία (1986)

4.2.1 ΕΙΔΙΚΟΤΕΡΟΙ ΤΟΜΕΙΣ ΠΟΥ ΚΥΡΙΑΡΧΟΥΝ ΤΑ GRP ΣΥΝΘΕΤΑ

α. Ναυπηγική

Ο τομέας αυτός αποτελεί ένα καλό παράδειγμα για το πόσο εύκολα τα GRP έχουν εκτοπίσει σειρά παραδοσιακών υλικών και κυρίως του ξύλου. Έχοντας χαμηλή πυκνότητα, πολύ καλή αντίσταση στη διάβρωση και προσφέροντας πολύ εύκολη παραγωγική διαδικασία, αποτελούν σήμερα μοναδική λύση μικρών και μέσων σκαφών αναψυχής. Το γεγονός ότι δίνεται η δυνατότητα παραγωγής ολόκληρου του σκαριού ή του καταστρώματος από ένα μοναδικό καλούπι, με ελάχιστες πάγιες εγκαταστάσεις, έδωσε στις μικρές ιδίως μονάδες παραγωγής σκαφών αναψυχής αλματώδη ανάπτυξη. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως πολυεστερική μήτρα και ενίσχυση υαλόπανου με τυχαία προσανατολισμένες ίνες γυαλιού το γνωστό "chopped strand mat". Μια άλλη ιδιότητα που έχει σημασία για τα ναρκαλιευτικά είναι το γεγονός

του μη μαγνητικού χαρακτήρα των GRP. Στην Μεγάλη Βρετανία, έχει ήδη ναυπηγηθεί από το 1972 ένα ναρκαλιευτικό το HMS Wilton, ενώ άλλο ένα το HMS Brecon, μήκους 60m και συνολικού εκτοπίσματος 625 τόνων, ναυπηγήθηκε πρόσφατα.

β. Ηλεκτρισμός

Ο πιο διαδεδομένος τύπος γυαλιού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή ινών, το E-glass, αρχικά επιλέχθηκε και για την άριστη ηλεκτρική μόνωση που προσφέρει. Έτσι, πολλά μονωτικά, διάφορα κουτιά πινάκων διανομής, στελέχη διακοπών, κελύφη κατανεμητών και πλήθος άλλων εξαρτημάτων όπου απαιτείται μόνωση, καλή αντοχή και περίπλοκο σχήμα, είναι κατασκευασμένα από ενισχυμένα πλαστικά.

γ. Εφαρμογές όπου απαιτείται αντοχή στη Διάβρωση

Εφαρμογές όπως δεξαμενές διαβρωτικών χημικών αλλά και τα αντίστοιχα δίκτυα σωληνώσεων τους βασίζονται αποκλειστικά στα ενισχυμένα πλαστικά. Τα δίκτυα GRP διαθέτουν καλή αντοχή σε διάβρωση, μικρό βάρος, αλλά και χαμηλό κόστος κατασκευής. Ένα τεράστιο σιλό μπορεί να κατασκευαστεί σε ένα μόνο κομμάτι, σε κάποιο καλούπι και η όλη επίστρωση των υλικών μπορεί να γίνει και με το χέρι.

Τα GRP είναι πολύ δημοφιλή και στις κατασκευές δικτύων σωληνώσεων νερού, αποχετεύσεων, ατμού ή διαφόρων χημικών ουσιών. Το χαμηλό τους βάρος προσφέρει δυο βασικά πλεονεκτήματα : μικρό κόστος μεταφοράς αλλά και ευκολία τοποθέτησης. Επίσης, η μεγάλη αντοχή τους μας επιτρέπει την κατασκευή μεγαλύτερων κομματιών, ώστε να απαιτούνται πολύ λιγότερες ενώσεις, οπότε να μειώνονται και οι πιθανότητες για τυχόν διαρροές.

4.3 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΥΨΗΛΩΝ ΑΠΟΔΟΣΕΩΝ

Ο όρος βέβαια δεν έχει πλήρως αποσαφηνιστεί. Περιγράφει κυρίως σύνθετα υλικά που βασίζονται στις ενισχύσεις άνθρακα (CRP) και αραμιδίου και αναφέρεται σε αντικείμενα υψηλών απαιτήσεων σε δύο βασικούς τομείς όπου το βασικό στοιχείο δεν είναι η τιμή αλλά η ποιότητα στους τομείς της αεροδιαστημικής και στα αθλητικά είδη.

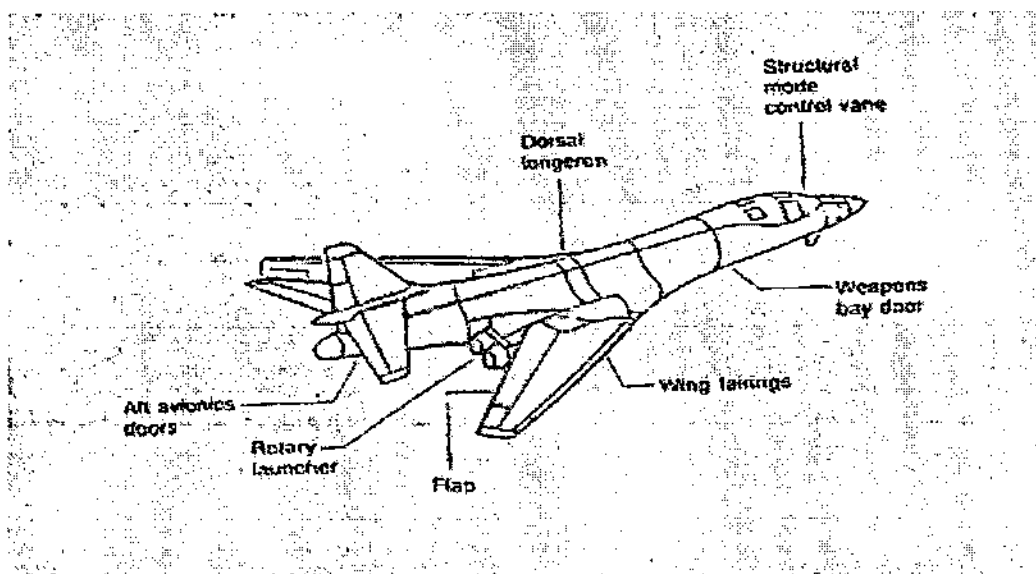
Η χρησιμοποίηση ελαφρύτερων υλικών στην αεροδιαστημική, σημαίνει είτε την μεγαλύτερη δυναμικότητα μεταφοράς φορτίου, είτε τη βασική μείωση του κόστους λειτουργίας για το ίδιο μεταφερόμενο φορτίο. Ένα καλό παράδειγμα του πόσο μπορούν να επηρεάσουν τα σύνθετα υλικά στην εξοικονόμηση βάρους οπότε και στο κόστος γενικότερα, είναι η περίπτωση κατασκευής δορυφόρων, όπου το κόστος της εκτόξευσης μπορεί να υπερβαίνει το κόστος του σχεδιασμού αλλά και όλης της κατασκευής του.

Έτσι λοιπόν τα ενισχυμένα με ίνες άνθρακα ή αραμιδίου πλαστικά, χρησιμοποιούνται για την κατασκευή διαστημοπλοίων και δορυφόρων, για την κατασκευή στηριγμάτων ηλιακών κυψελίδων, δεξαμενών αποθήκευσης προωθητικών αερίων, καθώς και για την κατασκευή κορμών μηχανής αλλά και κινούμενων τμημάτων μηχανής.

Εκτός από τη δραστική μείωση του βάρους στις κατασκευές, τα υλικά αυτά με τον πολύ μικρό συντελεστή θερμικής διαστολής προσφέρουν μεγάλη σταθερότητα διαστάσεων στις κατασκευές. Η κατάσταση κεραιών, καθώς και φίλτρων ή στηριγμάτων τηλεσκοπίων, στηρίζεται τώρα, αποκλειστικά στα υλικά αυτά. Τα εξαρτήματα αυτά όπως και αρκετά άλλα, αποτελούν τον απαραίτητο εξοπλισμό του

διαστημοπλοίου και εκτίθενται σε θερμοκρασίες που ποικίλουν από -100 έως +100 °C, ανάλογα με το αν το εξάρτημα αυτό εκτίθεται κατευθείαν στον ήλιο ή βρίσκεται κάτω από τη σκιά του διαστημοπλοίου.

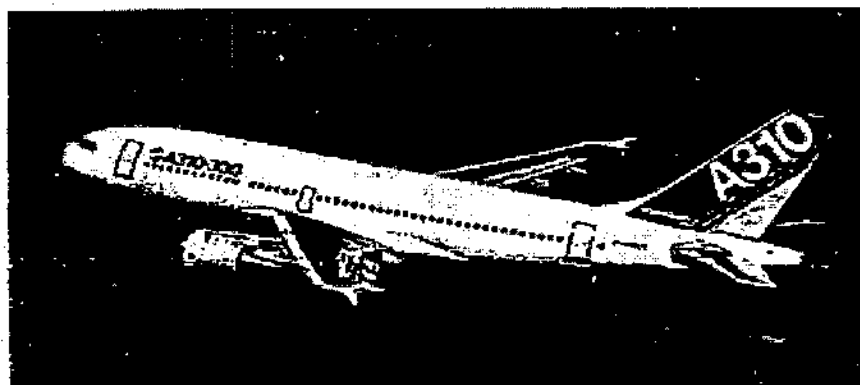
Στα μαχητικά αεροσκάφη, τα σύνθετα υλικά προσφέρουν μοναδικές ιδιότητες και επιτρέπουν τον ολοένα και πιο βελτιωμένο σχεδιασμό τους. Τα νέα προγράμματα παραγωγής αεροσκαφών δίνουν πρωταρχική έμφαση στη χρησιμοποίηση τέτοιων υλικών στα πιο ευπαθή, αρχικά τουλάχιστον σημεία, (Σχήμα 4.3α). Για παράδειγμα, περίπου το 35% του βάρους του «Ευρωπαϊκού Μαχητικού Αεροσκάφους» (EFA), έχει σχεδιαστεί να κατασκευαστεί εξαρχής από σύνθετα υλικά, συμπεριλαμβανομένων των κυρίως φτερών, του πηδαλίου, του ουραίου πτερυγίου, και του μπροστινού τμήματος της ατράκτου.



Σχήμα 4.3 α Εκτεταμένη χρήση των σύνθετων υλικών στο μαχητικό αεροσκάφος B-1B (Boeing)

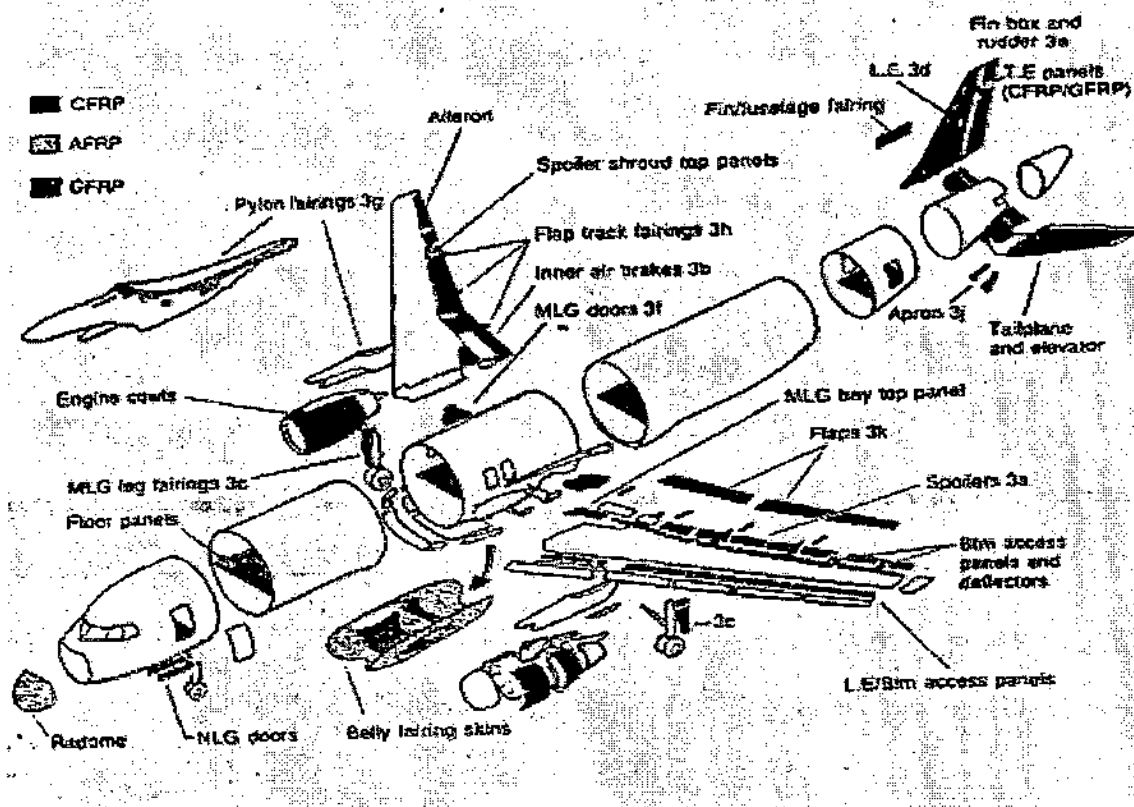
Σε αεροσκάφη της πολιτικής αεροπορίας, τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιήθηκαν αρχικά, με βασικό στόχο τη μείωση βάρους σε εσωτερικά τμήματα, όπως στο δάπεδο του αεροσκάφους, στις πόρτες, στις πόρτες αποσκευών και στην όλη εσωτερική επίπλωση. Τώρα έχουν αρχίσει να κατασκευάζουν και ολόκληρο το σκελετό του καθίσματος

επιβατών από ίνες άνθρακα και εποξική ρητίνη, προσφέροντας όχι μόνο μεγαλύτερη αντοχή, αλλά και κατά πολύ μειωμένες διαστάσεις, άρα εξοικονόμηση χώρου. Στο Airbus A310, (Σχήμα4.3β) ο οριζόντιος σταθεροποιητής κάνει ευρεία χρήση σύνθετων υλικών συνδυάζοντας ίνες γυαλιού, άνθρακα και Kevlar, σημειώνοντας μια συνολική εξοικονόμηση βάρους της τάξης των 400 κιλών.



Σχήμα 4.3 β Airbus A310

Στο Airbus A320 (Σχήμα4.3γ), χρησιμοποιούνται σύνθετα υλικά εποξικής ρητίνης/ινών άνθρακα τόσο στα πτερύγια όσο και στο ουραίο πτερύγιο, εξοικονομώντας συνολικά πάνω από 800 κιλά, σε σχέση πάντα με την παραδοσιακή κατασκευή, από ειδικά κράματα αλουμινίου, δηλαδή. Σαν μια ένδειξη του τι σημαίνει η εξοικονόμηση βάρους σε μια αεροπορική κατασκευή, αναφέρεται το γεγονός, ότι σε ένα DC-10. εξοικονομούνται ετησίως, περίπου, 2900 λίτρα καυσίμου!!



Σχήμα 4.3 γ Χρήση σύνθετων υλικών σε μεγάλη κλίμακα στο Airbus A320.

Σε μικρότερη κλίμακα, ένα πλήθος αεροπορικών κατασκευών, όπως ελαφρών αεροπλάνων και ανεμοπτέρων, κατασκευασμένων κυρίως από GRP, έχουν στο ενεργητικό τους μόνο επιτυχημένες πτήσεις. Αυτό που προσπαθείται τώρα είναι η μεταφορά αυτής της τεχνολογίας στην κατηγορία των ακριβών μαχητικών αεροσκαφών, ώστε να κατασκευάζονται εξολοκλήρου από σύνθετα υλικά. Στη κατηγορία αυτή, δυο πρωτότυπα του Lear Fan 2100, κατασκευασμένα με σύνθετα υλικά σε ποσοστό πάνω από 50% του συνολικού τους βάρους, πραγματοποίησαν χιλιάδες ώρες επιτυχών πτήσεων. Δυστυχώς το αεροσκάφος αυτό δε μπόρε ποτέ στην παραγωγή, για λόγους που δεν αφορούν τα σύνθετα υλικά αλλά γιατί η εταιρεία πτώχευσε.

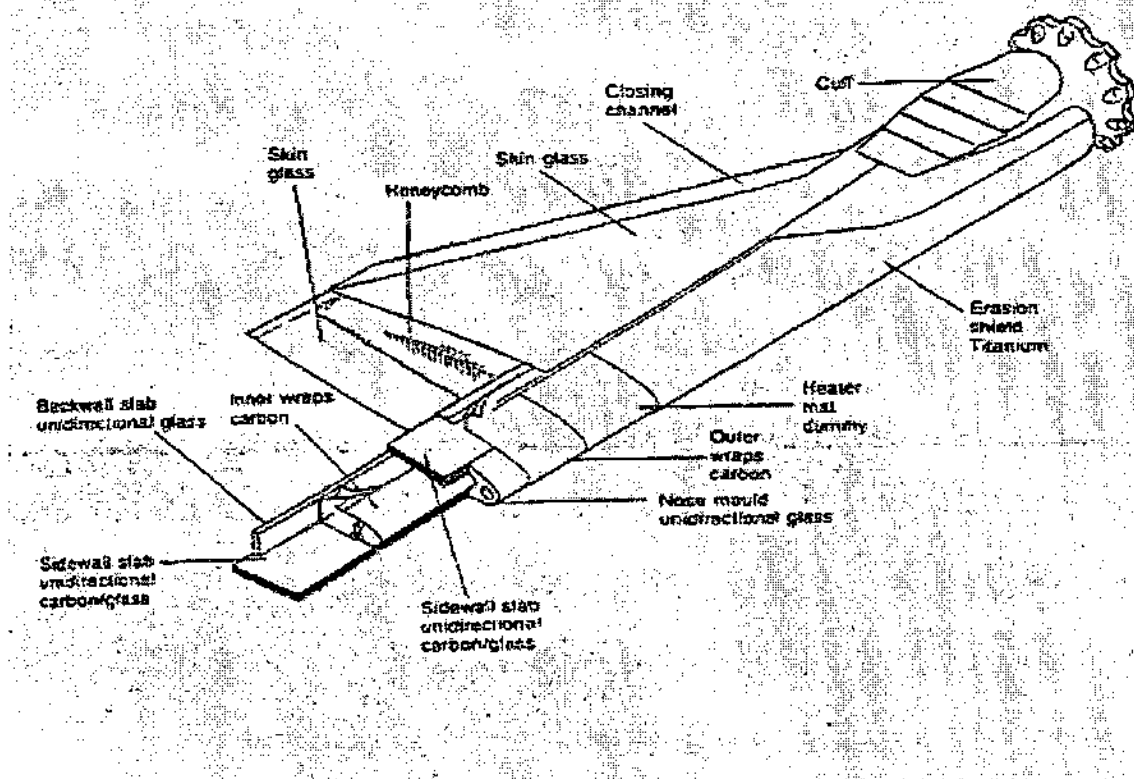
Στο “Beech Starship”, το οποίο είναι υπό κατασκευή, χρησιμοποιούνται σύνθετα υλικά σε πολύ μεγάλη κλίμακα, και μάλιστα γίνονται εκτεταμένες έρευνες για το ποια τεχνική τελικά είναι η πιο συμφέρουσα οικονομικά, προκειμένου να κατασκευαστεί όλη η άτρακτος από σύνθετα.

Όπως συνήθως συμβαίνει όταν μια υπάρχουσα παραδοσιακή τεχνολογία βάλλεται από μια σύγχρονη η βιομηχανία του αλουμινίου αντέδρασε με την εισαγωγή νέων κραμάτων στην αγορά. Τα νέα κράματα, όπως για παράδειγμα αυτών του AL-Li, συνδυάζουν πολύ υψηλότερη αντοχή αλλά και δυσκαμψία. Όσο βέβαια και να βελτίωσαν τις ονομαστικές τους ιδιότητες δεν έχουν καμία σχέση με τις αντίστοιχες των συνθέτων. Φυσικά ακόμα και κάτω από αυτές τις συνθήκες τα κράματα αλουμινίου εξακολουθούν να κυριαρχούν στη μεγάλη πλειοψηφία των κατασκευαστών. Η υιοθέτηση από μέρους των συνθέτων υλικών σημαίνει ριζική αλλαγή της γραμμής παραγωγής. Δηλαδή νέες επενδύσεις δισεκατομμυρίων, νέο εξειδικευμένο προσωπικό και ένα νέο σχεδιασμό με ανισότροπα υλικά που δεν είναι πάντα προσφιλής.

Όποιο βέβαια και να είναι το αποτέλεσμα της διαμάχης αυτής, το σίγουρα είναι ότι τα σύνθετα υλικά αποτελούν τη βέλτιστη λύση για κατασκευές υψηλής τεχνολογίας, προσφέροντας μια μοναδική, εξαιρετικής σημασίας για την παραγωγική διαδικασία δυνατότητα : αυτή της κατασκευής τεράστιων τμημάτων μιας κατασκευής σε ένα μοναδικό καλούπι. Η παραγωγή έτσι επιταχύνεται απεριόριστα, ενώ το τελικό προϊόν έχει τις ελάχιστες συνδέσεις και ασυνέχειες, δίνοντας την ευχέρεια στο σχεδιαστή να βελτιστοποιεί την κατασκευή του και να περιορίζει τα σημεία συνδέσεων που είναι και τα πιο επικίνδυνα για την πιθανή αστοχία μιας κατασκευής.

Μέχρι τώρα δεν έχει τονιστεί ιδιαίτερα ένα σημαντικό προσόν των συνθέτων υλικών : η εξαιρετική αντοχή τους σε κόπωση. Μια ιδιότητα,

που επιβάλλει τη χρησιμοποίησή τους σε πολλές κατασκευές παρέχοντας χαμηλό λειτουργικό κόστος αλλά κυρίως, ασφάλεια. Ένα απλό παράδειγμα εξαρτήματος του οποίου η βασική παράμετρος σχεδιασμού είναι η αντοχή του σε κόπωση είναι η έλικα του ελικοπτέρου (Σχήμα 4.3δ). Ένα εξάρτημα που δέχεται ποικίλες δυναμικές φορτίσεις όπως κάμψη και στρέψη σε δυο άξονες, το οποίο απαιτεί, όπως είναι προφανές, ιδιαίτερες τεχνικές ως προς το σχεδιασμό αλλά και την παραγωγή του. Οι έλικες κατασκευασμένες από σ. υ. αποτελούν μια κοινή λύση για όλους σχεδόν τους κατασκευαστές ελικοπτέρων αφού προσφέρουν σχεδόν απεριόριστη διάρκεια ζωής – σε σχέση πάντα με τη συνολική διάρκεια ζωής του αεροσκάφους – σε συνδυασμό με χαμηλό κόστος κατασκευής και με τη δυνατότητα παραγωγής μιας πιο αεροδυναμικής κατασκευής. Ένα πρόσφατο παράδειγμα των πλεονεκτημάτων προσφέρουν τα σύνθετα υλικά είναι η κατάρριψη του παγκοσμίου ρεκόρ ταχύτητας από ένα ελικόπτερο της Westland Lynx, εφοδιασμένο με μια νέα έλικα, κατασκευασμένη εξολοκλήρου από σύνθετο υλικό.



Σχήμα 4.3δ Έλικά ελικοπτέρου κατασκευασμένη από συνδυασμό σύνθετων υλικών.

4.4 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

α) Πυλώνες

Η πολύ καλή μονωτική συμπεριφορά των σύνθετων υλικών τα καθιστούν ιδανικά για την ανέγερση πυλώνων μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος, προστατεύοντάς τους από κεραυνούς. Επίσης η μη διαβρώσιμες επιφάνειές τους σε συνδυασμό με τις πολύ καλές μηχανικές τους ιδιότητες, προστατεύουν τους πυλώνες από ακραία καιρικά

φαινόμενα και μειώνουν το κόστος συντήρησης (δεν απαιτούνται επαλείψεις με αντιδιαβρωτικές ουσίες). Λόγω της καλής μονωτικής τους ιδιότητας τα σύνθετα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αστικές περιοχές για κατασκευές κοντά σε καλώδια της ΔΕΗ για αποφυγή κινδύνων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το τραγικό συμβάν τον Απρίλιο του 2004 στον Έβρο που στοίχισε τη ζωή σε πέντε στρατιώτες. Οι πέντε νεαροί σκοτώθηκαν από ηλεκτροπληξία όταν το μεταλλικό κοντάρι της σημαίας που κρατούσαν έπεσε πάνω στα κοντινά καλώδια της ΔΕΗ. Επειδή τα ρευματοφόρα καλώδια δεν μπορούν να βρίσκονται μακριά από κατοικημένες περιοχές, τέτοια περιστατικά θα μπορούσαν να έχουν αποφευχθεί αν αντικαθιστούσαμε τέτοιες μεταλλικές κατασκευές με άλλες από σύνθετα υλικά.



Σχήμα 4.4.1: Πυλώνας από σύνθετα υλικά.

β)Κεραίες μετάδοσης ηλεκτρομαγνητικών σημάτων

Κεραίες κινητής τηλεφωνίας, αναμεταδότες ραδιοηλεκτρονικού σήματος καθώς και άλλων ειδών κεραίες είναι προτιμότερο να κατασκευάζονται από σύνθετα υλικά για λόγους ασφαλείας. Επίσης τα σύνθετα υλικά, σε αντίθεση με τα ευρέως χρησιμοποιούμενα μεταλλικά μέρη, δεν επιδρούν στο ηλεκτρομαγνητικό σήμα προξενώντας ηλεκτρικό θόρυβο.



Σχήμα 4.4.2: Βάση κεραιών κινητής τηλεφωνίας από σύνθετα υλικά.

γ) Δοκάρια

Τα δοκάρια στηρίζουν μηχανικά κάθε έργο και του προσθέτουν αντοχή. Έτσι η αντοχή τους απαιτείται να είναι μέγιστη. Τα δοκάρια από σύνθετα υλικά παρουσιάζουν κυρίως το πλεονέκτημα της ευκολότερης μεταφοράς καθώς είναι πολύ ελαφρύτερα από τα αντίστοιχα μεταλλικά. Έτσι με το ίδιο κόστος μπορούν να μεταφερθούν πολλαπλάσιες ποσότητες. Επίσης η μηχανική αντοχή τους και το γεγονός ότι σε σχέση με το μέταλλο οι δονήσεις αποσβένονται πολύ γρηγορότερα τους δίνει ένα σημαντικό προβάδισμα έναντι του προκατόχου τους.



Σχήμα 4.4.3: Δοκάρια από σύνθετα υλικά.

δ) Ρυμουλκούμενο όχημα (trailers)

Κατά τη μεταφορά μεγάλων μαζών προϊόντων πάνω στα trailers, το πρόβλημα που παρουσιάζεται είναι ότι το συνολικό βάρος του φορτίου και οχήματος περιορίζεται από τους εκάστοτε τοπικούς νόμους οδικής κυκλοφορίας. Το επιθυμητό για κάθε μεταφορική εταιρία είναι η μεταφορά του μέγιστου δυνατού φορτίου. Αυτό επιτυγχάνεται με μείωση του βάρους του οχήματος αντικαθιστώντας κάποια βαριά τμήματά του με άλλα ελαφρύτερα. Προσπάθειες που έγιναν με την χρήση αλουμινίου, δεν στέφθηκαν με επιτυχία. Σήμερα με την αντικατάσταση κάποιων τμημάτων του trailer από σύνθετα υλικά γίνεται δυνατή η σημαντική μείωση του βάρους του οχήματος, αφήνοντας περιθώρια για την αύξηση του ωφέλιμου φορτίου.



Σχήμα 4.4.4: Trailer από σύνθετα υλικά.

ε) Υπερυψωμένα πατώματα

Έως τώρα τα υπερυψωμένα πατώματα κατασκευάζονταν αποκλειστικά από τσιμέντο τα οποία έχουν το μειονέκτημα ότι καταπονούνται από το ίδιο τους το βάρος. Το φαινόμενο των σύνθετων υλικών έρχεται να εισβάλλει δυναμικά και σε αυτό το κατασκευαστικό τομέα, παρέχοντας τη δυνατότητα κατασκευής λεπτών πατωμάτων με την ίδια αντοχή και με βάρος μέχρι και δέκα φορές μικρότερο. Τα σύνθετα πατώματα δίνουν το πλεονέκτημα της εύκολης μεταφοράς και τοποθέτησης αυτών ακόμη και σε δύσβατα σημεία. Επίσης όλα αυτά σε συνδυασμό με το γεγονός ότι χρειάζονται λιγότερη στήριξη συμβάλλουν στη μείωση του κόστους παραγωγής, τοποθέτησης και συντήρησης.

στ) Σκέπαστρα κτηρίων

Κάλυψη ανοιγμάτων, όπως κλειστών σταδίων και γυμναστηρίων καθώς και άλλων χώρων οποιουδήποτε εμβαδού οι οποίοι είτε είναι μόνιμοι και κατασκευασμένοι για παράδειγμα από μεταλλικά υλικά, είτε αποτελούν κατασκευές μη μόνιμες, αλλά και στις δύο περιπτώσεις απαιτούν οροφές με ισχυρή αντοχή και χαμηλό βάρος.



Σχήμα 4.4.5: Σκέπαστρο από σύνθετα υλικά.

4.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Η παρακάτω παρουσίαση projects-κατασκευών από σύνθετα υλικά που έχει υλοποιήσει η εταιρεία Fiberline παρέχει ένα μέτρο των δυνατοτήτων των υλικών αυτών και της παγκόσμιας τάσης για προτίμηση στη χρήση τους.

Πηγή: <http://www.fiberline.com/gb/casestories>

Γέφυρα Διαμέσου Εθνικής Οδού και Σιδηροδρομικών Γραμμών Ηλεκτρικού Τρένου Υψηλής Ταχύτητας



Μήκος 38m

Πλάτος 3m

Πλεονεκτήματα:

- Ηλεκτρική μόνωση
- Εύκολος χειρισμός και γρήγορη εγκατάσταση
- Αντοχή σε διάβρωση και σε δύσκολες καιρικές συνθήκες
- Χαμηλό βάρος συνδυασμένο με υψηλή αντοχή
- Ελάχιστη συντήρηση

Η γέφυρα είναι ένα περίπλοκο σχέδιο αποτελούμενο από δυο τόξα καθένα από τα οποία βρίσκονται υπό κλίση 10 μοιρών προς τα εσωτερικά. Δεν υπάρχουν απλά κάθετα στοιχεία στη γέφυρα, η οποία αποτελείται από μικρά, ευθύγραμμα στοιχεία.

Είναι κατασκευασμένη από ινώδη σύνθετα δομικά υλικά και έχει συναρμολογηθεί με ανοξειδωτους χαλύβδινους κόμβους. Για το κατάστρωμα της γέφυρας έχουν χρησιμοποιηθεί σανίδες με αντιολισθητικές επιφάνειες.

Γέφυρα West mill, Αγγλία



Η γέφυρα West Mill στην Οξφόρδη είναι από τις καλύτερες της Ευρώπης σε εθνικό οδικό δίκτυο. Είναι κατασκευασμένη από ινώδη πλαστικά δομικά υλικά και παρουσιάζει την ίδια αντοχή και ανθεκτικότητα με παρόμοιες γέφυρες οδικού δικτύου κατασκευασμένες από μέταλλο ή τσιμέντο.

Πλεονεκτήματα:

- Σύντομη φάση κατασκευής και εύκολη τοποθέτηση.
- Ανθεκτικότητα στο νερό, το αλάτι και τον πάγο.
- Υψηλό όριο ζωής με ελάχιστο κόστος συντήρησης.
- Χαμηλό κόστος κατασκευής και λιγότερα προβλήματα στην κυκλοφορία κατά την εγκατάστασή της.

Η γέφυρα έχει μήκος 10 μέτρα, πλάτος 6,8 μέτρα και ζυγίζει συνολικά 37 τόνους. Όλα τα στοιχεία που φορτίζονται είναι κατασκευασμένα από πολυεστέρα, ίνες γυαλιού και ανθρακονήματα.

Σταθμός Μετρό στο Lindevang, Κοπεγχάγη



Η σκεπή του σταθμού μετρό στο Lindevang, έχει μήκος 60 μέτρα και πλάτος 7,5 μέτρα και είναι μονοκόμματη κατασκευή από ινώδης σανίδες πλαισιωμένες από ατσάλι. Είναι κρεμαστεί από καλώδια μεταξύ δύο κολώνων στα άκρα της.

Πλεονεκτήματα:

- Χαμηλό βάρος σε συνδυασμό με υψηλή αντοχή και ακαμψία.
- Μεγάλο όριο ζωής και συντήρηση μόνο εμφάνισης.
- Γερή επιφάνεια με υψηλό υλικό τελειώματος.
- Ανθεκτική στο νερό, το αλάτι και τον πάγο.
- Ενσωματωμένος φωτισμός και σωληνώσεων καλωδίων.
- Μεγάλη σχεδιαστική ελευθερία.

Γέφυρα από Σύνθετα Υλικά στο Kolding της Δανίας



Η πρώτη γέφυρα από σύνθετα υλικά στη Σκανδιναβία, άνοιξε πρώτη φορά επίσημα στις 18 Ιουνίου το 1997. Η νέα γέφυρα, τηρεί τα αυστηρά στάνταρ ασφαλείας και έδειξε ότι τα GRP σύνθετα υλικά μπορούν μελλοντικά να αντικαταστήσουν τα παραδοσιακά δομικά υλικά συνδυάζοντας χαμηλό βάρος και ελάχιστο κόστος συντήρησης. Η γέφυρα περνάει πάνω από σιδηροδρομικές γραμμές και χρειάστηκαν μόνο τρεις νύχτες για την εγκατάστασή της.

Pontresina γέφυρα, Ελβετία



Η γέφυρα είναι κατασκευασμένη από δύο τμήματα 12,5 μέτρων το καθένα, εκ των οποίων το ένα είναι κολλημένο και το άλλο κινούμενο. Το χαμηλό της βάρος και ο εύκολος χειρισμός της κάνει την εγκατάστασή της δυνατή ακόμη και σε δύσβατες περιοχές. Γι' αυτό το λόγω την περίοδο της άνοιξης γίνεται πολύ εύκολα η αποσυναρμολόγησή της, προς αποφυγή των πλημμύρων και των χιονοστιβάδων όταν λιώνουν τα χιόνια.

Πλεονεκτήματα:

- Χαμηλό βάρος και υψηλή αντοχή.
- Εύκολος χειρισμός και εγκατάσταση.
- Υψηλή ανθεκτικότητα σε δυσμενής καιρικές συνθήκες.
- Δεν απαιτείται συντήρηση.
- Σχεδιασμός σύμφωνα με τις απαιτήσεις του κάθε πελάτη.

Γέφυρα Ανεφοδιασμού Πετρελαίου στη Βόρεια Θάλασσα



Πλεονεκτήματα:

- Υψηλή ανθεκτικότητα στη διάβρωση.
- Χαμηλό βάρος/Υψηλή αντοχή.
- Εύκολος χειρισμός και εγκατάσταση.
- Υψηλό όριο ζωής με μηδενικό κόστος συντήρησης.

Πλωτή Γέφυρα στη Ζυρίχη της Ελβετίας



Πλεονεκτήματα:

- Γρήγορη και απλή εγκατάσταση.
- Αντίσταση στη διάβρωση.
- Υψηλή αντοχή.
- Χαμηλό βάρος.
- Καθόλου συντήρηση.

4.5.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΕΦΥΡΑΣ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

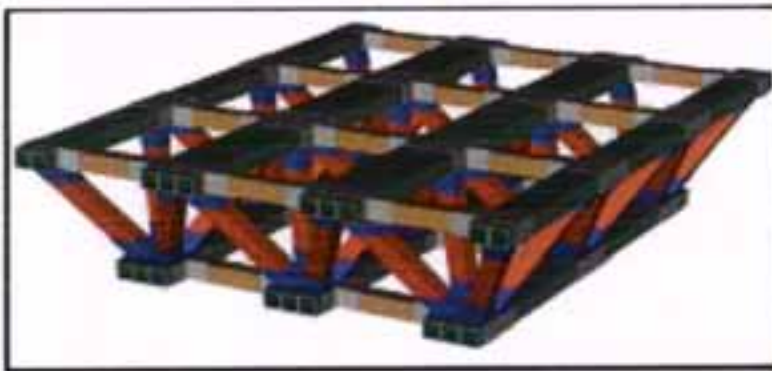
1. Χαμηλό βάρος

Οι γέφυρες από σύνθετα υλικά είναι κατά πολύ ελαφρότερες (περίπου 80%) σε σύγκριση με αυτές από σκυρόδεμα ή ατσάλι, με αποτέλεσμα την εύκολη συναρμολόγηση καθώς και τη μεταφορά της στο

σημείο τοποθέτησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συναρμολόγηση μπορεί να γίνει και επί τόπου.

2. Επαναχρησιμοποίηση

Λόγω της φιλοσοφίας κατασκευής της γέφυρας, που βασίζεται στην επαναστατική τεχνική της τμηματικής συναρμολόγησης από μικρότερα δομικά στοιχεία (modular design), η γέφυρα δεν αποτελεί αναλώσιμο προϊόν «μιας χρήσης» αλλά μπορεί να τοποθετηθεί για την αντιμετώπιση άμεσων αναγκών (βύθιση οδών, σεισμοί, πλημμύρες) και κατόπιν να αφαιρεθεί, να αποθηκευτεί και να επαναχρησιμοποιηθεί.



Σχήμα 4.5.1: Σχηματική απεικόνιση του modular design της γέφυρας σύνθετων υλικών.

3. Γρήγορη και εύκολη εγκατάσταση

Σε περιπτώσεις απομακρυσμένων και δύσβατων περιοχών η εγκατάσταση γίνεται εύκολα και σε μικρό χρονικό διάστημα. Σε αυτό συμβάλει η ευκολία συναρμολόγησης επί τόπου ή ακόμα και η εύκολη μεταφορά μιας συναρμολογημένης γέφυρας μέσω ελικοπτέρου (Σχήμα 4.5.2).



Σχήμα 4.5.2: Τοποθέτηση γέφυρας σύνθετων υλικών με ελικόπτερο στην Pontresina της Ελβετίας.

4. Φιλικότητα προς το περιβάλλον

Η γέφυρα από σύνθετα υλικά είναι ενεργειακά συμφέρουσα κατασκευή, καθώς η διαδικασία παραγωγής και εγκατάστασής της, απαιτεί ενέργεια περίπου 4 φορές μικρότερη απ' ό,τι οι αντίστοιχες κατασκευές από σκυρόδεμα ή μέταλλο. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως η γέφυρα δεν απαιτεί ελαιοχρωματισμό ή άλλου είδους βαφή, διαδικασία με την οποία μολύνεται ο υδροφόρος ορίζοντας. Στη γέφυρα είναι δυνατό να προσδοθεί χρώμα με εσωτερικό εμποτισμό χρωματοποιητών στην πολυεστερική μήτρα. Για την εξωτερική ανάπλαση της όψης της γέφυρας αρκεί ένας καθαρισμός με νερό, που είναι εύκολος και δεν έχει επιπτώσεις στο περιβάλλον. Οι παραδοσιακές κατασκευές από μέταλλο και σκυρόδεμα αποτελούν πηγές εκπομπής ρυπογόνων ουσιών που προέρχονται από τη φθορά ή τριβή των υλικών.

κυρίως του καταστρώματος (π.χ πίσσα) οι οποίες μολύνουν την ατμόσφαιρα εν αντιθέσει με τα ανθεκτικά αντιολισθητικά καταστρώματα από σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στην υπό εκμετάλλευση γέφυρα και τα οποία δεν επιβαρύνουν την ατμόσφαιρα με ρύπους.

5. Ευκολία επισκευής βλαβών

Χάρη στο modular design, η αντικατάσταση κατεστραμμένων τμημάτων αποτελεί διαδικασία απλή και ευέλικτη έτσι ώστε επιτυγχάνεται πλήρης ανάκτηση των ιδιοτήτων της γέφυρας, σε αντίθεση με τα παραδοσιακά υλικά στα οποία χρησιμοποιούνται «μπαλώματα», που πολλές φορές γίνονται εστίες ανάπτυξης ατελειών (π.χ. ρωγμών) θέτοντας σε κίνδυνο την κατασκευή.

4.6 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΥΠΟΥ ΣΑΝΤΟΥΙΤΣ

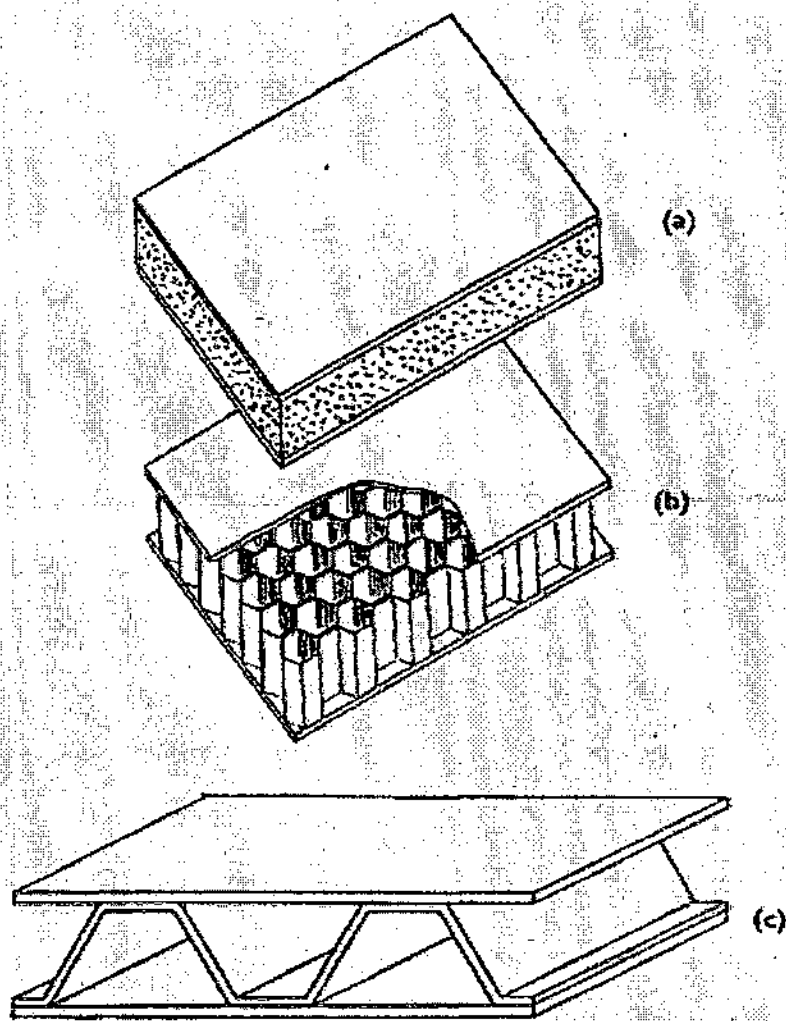
‘Σάντουιτς’ (Sandwich) είναι μια κατασκευή που περιέχει ένα συνδυασμό από εναλλασσόμενα, διαφορετικά, απλά (συμβατικά) ή σύνθετα υλικά, συνδεδεμένα μεταξύ τους κατά τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να χρησιμοποιούμε τις ιδιότητες του καθενός σε συγκεκριμένες εφαρμογές για όλη την κατασκευή, (ASTM).

Τα υλικά τύπου σάντουιτς έγιναν ιδιαίτερα γνωστά κατά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, όταν παρουσιάστηκε το μαχητικό “Mosquito”, με μεγάλο ποσοστό κυρίων τμημάτων του, κατασκευασμένα από σάντουιτς υλικά. Φυσικά, τα υλικά αυτά έχουν κάνει την εμφάνιση τους από πολύ νωρίς σε διάφορα κατασκευαστικά στοιχεία.

Τα σάντουιτς αποτελούν και σήμερα ένα σημαντικό κλάδο των κατασκευαστικών υλικών. Η ανάπτυξη τους βασίζεται κυρίως στη δυνατότητα που παρέχουν για ελαφρές και στιβαρές κατασκευές. Η σημαντικότερη χρήση τους και ίσως αυτή που έδωσε τη μεγαλύτερη ώθηση για έρευνα είναι στην αεροδιαστημική βιομηχανία. Το πότε ακριβώς, πρωτοεμφανίστηκαν, μάλλον φαίνεται συγκεχυμένο. Το σίγουρο πάντως είναι ότι η ιδέα της δομής «σάντουιτς» εκφράστηκε από διαφορετικούς μηχανικούς σε πολλά μήκη και πλάτη, σε ποικίλες χρονικές περιόδους, με εύρος πάνω από πέντε αιώνες. Κατά το παρελθόν, υπήρχαν πολύστρωτες πλάκες οι οποίες όμως δεν ήταν τύπου σάντουιτς. Ήταν συνήθως βαριές μεταλλικές πλάκες υψηλής αντοχής που με μηχανικό τρόπο τοποθετούνταν μαζί, έτσι ώστε ενεργώντας ανεξάρτητα βέβαια, να φτάνουν στην αύξηση της δυσκαμψίας της κατασκευής. Οι σχεδιαστές και οι κατασκευαστές όμως κατανόησαν τα πλεονεκτήματα

της χρήσης σύνθετων κατασκευών από επιστρώματα, πυρήνες και κόλλες. Η βασική αρχή των χωρισμένων επιστρωμάτων επινοήθηκε το 1820 από ένα Γάλλο επιστήμονα, τον DULEAU. Λαμαρίνες που είχαν σαν επιστρώματα ασβεστόπλακες και πυρήνα από φυτικές ίνες χρησιμοποιήθηκαν στον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο. Κατά τη διάρκεια του Δεύτερου Παγκοσμίου Πολέμου η ανάγκη για αποδοτικότερη χρήση της εργασίας και των υλικών, κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία, ώθησε τους επιστήμονες να χρησιμοποιήσουν sandwich panels. Τότε έκανε και την εμφάνιση του και το μαχητικό “Mosquito”, με μεγάλο ποσοστό κυρίων τμημάτων του, κατασκευασμένα από σάντουιτς υλικά.

Ο απλούστερος τρόπος δοκών σάντουιτς αποτελείται από δυο λεπτές δύσκαμπτες και ανθεκτικές επιφάνειες πυκνού υλικού, οι οποίες στο εξής θα αναφέρονται ως «εξωτερικές επιστρώσεις ή επιληπτικά (skins), διαχωριζόμενες από ένα παχύ στρώμα υλικού χαμηλής πυκνότητας, τον πυρήνα (core), ο οποίος είναι, συνήθως, λιγότερο δύσκαμπτος και ανθεκτικός, (Σχήμα 2.1.).



Σχήμα 2.1. Στοιχεία Σάντουιτς. α) πνήνας από αφρό πολυμερούς, β) κυψελωτής πνήνας, γ) πνήνας κυματωμένης μορφής.

Οι εφαρμογές των σάντουιτς για αεροδιαστημικές κατασκευές είναι σημαντικές και αποτελούν μια από τις σημαντικότερες περιοχές για

περαιτέρω ανάπτυξη. Τα πλεονεκτήματα των σάντουιτς κατασκευών σε σχέση με κατασκευές από συμπαγές υλικό, όπως ο υψηλός λόγος αντοχής προς βάρος, η σταθερότητα, η ικανότητα να φέρουν μεγάλο φορτίο, η υψηλή αντοχή τους σε κόπωση και η αντίσταση τους σε διάβρωση, του δίνουν προτεραιότητα όταν πρόκειται να κατασκευαστούν κρίσιμα στοιχεία, όπως φτερά αεροπλάνων, έλικες αλλά και οι βάσεις, η ουρά και η άτρακτος των ελικοπτέρων. Σήμερα, κατασκευαστικά στοιχεία από πλαστικά συνθετικά υλικά χρησιμοποιούνται σε σχολεία, νοσοκομεία και βιομηχανικά συγκροτήματα. Μεγάλη χρήση σάντουιτς κατασκευών παρατηρείται και σε ειδικά εσωτερικά χωρίσματα, τα γνωστά ψευδοχωρίσματα, αλλά και τις ψευδοροφές.

Τα κατασκευαστικά είναι ειδικός τύπος πολύστρωτης σύνθετης κατασκευής, στην οποία λεπτά άλλα στιβαρά επιστρώματα (facings) “συνεργάζονται” με σχετικά μαλακούς, ελαφρούς αλλά και πιο αδύναμους πυρήνες, έτσι ώστε να δίνουν ελαφρές κατασκευές, ισχυρότερες και στιβαρότερες από τις συνιστώσες του σάντουιτς. Για παράδειγμα, λεπτές ταινίες από ενισχυμένο πλαστικό (Reinforced Plastics, RP) κάμπτονται εύκολα, ενώ ένα κομμάτι από αφρώδες πολυμερές ή από (honeycomb), ειδικό πυρήνα κυψελλωτής μορφής, σπάει εύκολα. Όταν όμως οι πλαστικές ταινίες συνδέονται στις δυο πλευρές του αφρού ή του honeycomb, το προκύπτων στοιχείο αντέχει πολύ περισσότερο στην κάμψη, ενώ απαιτείται πολύ μεγαλύτερο φορτίο για να σπάσει.

Ένας γενικό οδηγός, για συνηθισμένες όμως σάντουιτς κατασκευές, ως προς τις αναλογίες είναι ο εξής: μια επιτυχημένη από πλευράς ειδικών αντοχών δοκός, κατασκευάζεται, όταν το βάρος του πυρήνα είναι περίπου το ίδιο με το άθροισμα του βάρους των εξωτερικών επιστρώσεων. Προφανώς η καμπτική δυσκαμψία (stiffness) αυτής της διάταξης είναι πολύ μεγαλύτερη από ότι μιας συμπαγούς διάταξης

κατασκευασμένης από υλικό ίδιο με αυτό των επιστρώσεων. Ο πυρήνας έχει διάφορες κρίσιμες λειτουργίες. Πρέπει να είναι αρκετά δύσκαμπτος στη διεύθυνση την κάθετη στις επιστρώσεις, έτσι ώστε να τις κρατά στη σωστή απόσταση. Επίσης πρέπει να είναι αρκετά δύσκαμπτος σε διάτμηση έτσι ώστε κατά την κάμψη οι επιστρώσεις να μην παρουσιάζουν σχετική οριζόντια μετατόπιση. Αν η τελευταία προϋπόθεση δεν πληρούται τότε οι επιστρώσεις συμπεριφέρονται σαν δυο ανεξάρτητες δοκοί, οπότε δε μπορούμε να μιλήσουμε για δικό τύπο σάντουιτς. Τέλος ο πυρήνας πρέπει να είναι αρκετά δύσκαμπτος ώστε να κρατά τις επιστρώσεις σχεδόν επίπεδες: αλλιώς είναι πιθανό να αναδιπλωθεί τοπικά (wrinkle) ή μια επίστρωση υπό τις θλιπτικές τάσεις που δημιουργούνται στο επίπεδο της λόγω κάμψης.

Είναι φανερό ότι ο δεσμός ανάμεσα στα επιστρώματα και τον πυρήνα πρέπει να είναι αρκετά ισχυρός ώστε να εξασφαλίζει τη σταθερότητα κατασκευής και να μην επιτρέπει τη σχετική μετατόπιση επιστρώσεων και πυρήνα. Αυτό είναι και το πιο ευαίσθητο σημείο σε ένα τέτοιο υλικό. Έτσι, πρέπει αυτός ο δεσμός να μπορεί να απορροφήσει τις διατμητικές και ορθές τάσεις που αναπτύσσονται ανάμεσα στα επιστρώματα και τον πυρήνα. Για το σκοπό αυτό βρίσκεται σε εξέλιξη, εκτεταμένη ερευνητική δραστηριότητα. Ο δεσμός στα πλαστικά υλικά δε γίνεται πλέον με ήλους ή με κοχλίες, με μηχανική δηλαδή σύνδεση, όπως στα συμβατικά υλικά. Για σύνδεση δύο υλικών χρησιμοποιούνται διάφορα συγκολλητικά (κόλλες) που μπορεί να είναι σε ρευστή μορφή, αλλά ακόμα και σε μορφή αυτοκόλλητων φύλλων. Οι κόλλες αυτές ονομάζονται συγκολλητικά (Adhesives), και παίζουν πρωταγωνιστικό ρόλο στην ποιότητα μιας κατασκευής. Κακή ποιότητα συνδετικού φιλμ, οδηγεί σε αποκόλληση ανάμεσα στα επιστρώματα και τον πυρήνα κάτω από πολύ μικρές τάσεις και κατά συνέπεια σε αστοχία ολόκληρου του στοιχείου.

Από τη άλλη μεριά, αν ο πυρήνας είναι αρκετά δύσκαμπτος μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στη συνολική καμπτική δυσκαμψία της διάταξης. Η συνεισφορά αυτή είναι μάλλον μικρή στη περίπτωση των πυρήνων χαμηλής πυκνότητας που συνήθως χρησιμοποιούνται, οπότε συχνά αγνοείται. Η παραδοχή αυτή οδηγεί σε σημαντική απλοποίηση της ανάλυσης των τάσεων και των μετατοπίσεων.

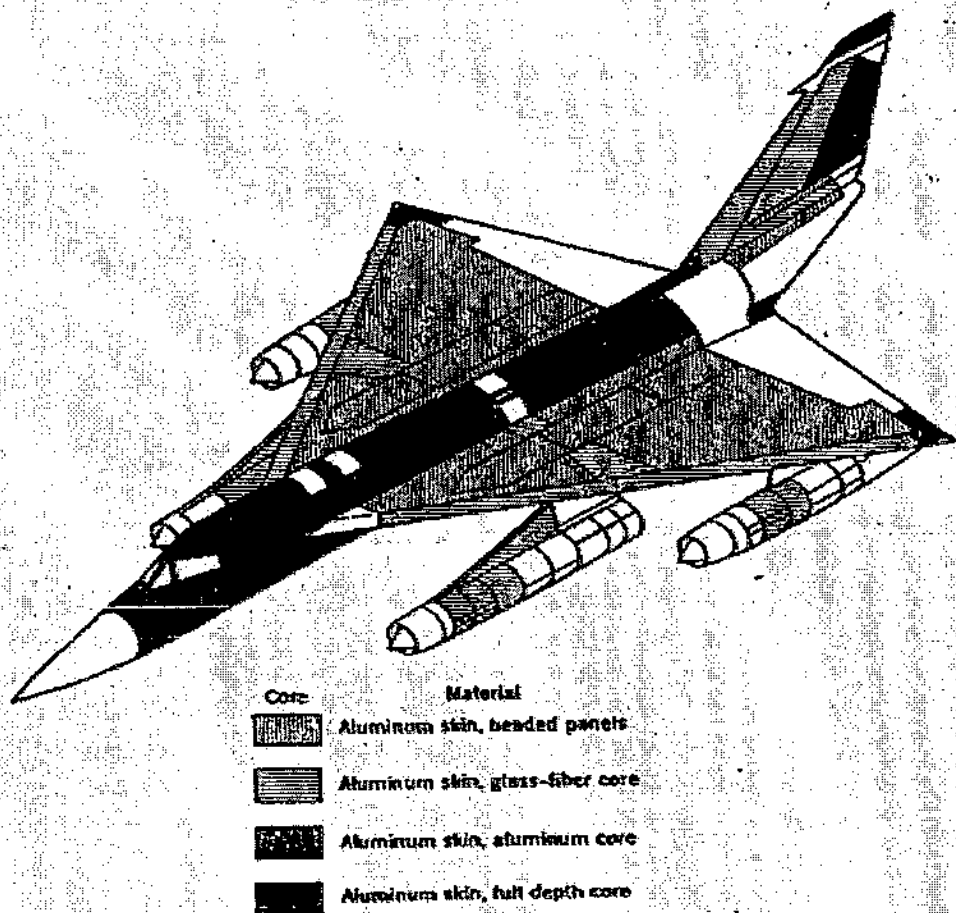
Η βασική αρχή του σχεδιασμού ενός σάντουιτς υλικού είναι περίπου ίδια με αυτή της δοκού διατομές διπλού ταύ (I-beam) που είναι ένα αρκετά ικανό κατασκευαστικό στοιχείο. Στο (I-beam) προσπαθούμε να τοποθετήσουμε όσο πιο πολύ υλικό μπορούμε στα πέλματα που απέχουν περισσότερο από τον ουδέτερο άξονα της διατομής. Στον κορμό μένει τόσο υλικό όσο χρειάζεται για να κάνει τα πέλματα να δρουν μαζί και να προφυλάσσει τη διατομή από λυγισμό και διάτμηση. Σε ένα sandwich τα επιστρώματα παίρνουν τη θέση των πέλμων και ο πυρήνας τη θέση του κορμού. Οι διαφορές τώρα είναι ότι τα επιστρώματα είναι από άλλο υλικό σε σχέση με τον πυρήνα και ότι ο πυρήνας είναι διασκορπισμένος μέσα στα επιστρώματα και όχι συγκεντρωμένος όπως στον κορμό του I-beam. Τα επιστρώματα και εδώ, ενεργούν μαζί, έτσι ώστε να δέχονται τις καμπτικές ροπές και ο πυρήνας δέχεται τις διατμητικές τάσεις που εφαρμόζονται εξαιτίας εξωτερικών φορτίων και ακόμα σταθεροποιεί την κατασκευή ώστε να μη λυγίζει.

Σε απευθείας θλίψη, η ίδια υποστήριξη είναι απαραίτητη. Μια λεπτή πλάκα λυγίζει εύκολα όταν εφαρμόζεται μια αξονική θλιπτική τάση. Τα επιστρώματα είναι δυο στρώσεις από λεπτό αλλά στιβαρό υλικό ανάμεσα στις οποίες είναι τοποθετημένο ένα παχύτερο στρώμα από αδύναμο και πολύ ελαφρύ υλικό, ο πυρήνας. Ο σκοπός της χρήσης αυτού του υλικού είναι να διατηρήσει την απόσταση ανάμεσα στα δύο εξωτερικά φύλλα, τα επιστρώματα. Εξαιτίας αυτής της απόστασης η ροπή αδράνειας μιας διατομής του και η καμπτική του δυσκαμψία είναι

μεγάλες. Ο πυρήνας από την πλευρά του πρέπει να είναι αρκετά άκαμπτος κάθετα στα επιστρώματα για να προστατεύει από διατμητικά φορτία και φορτία λυγισμού. Η διατμητική του δυσκαμψία πρέπει να είναι ικανή να εμποδίζει μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις, μεγέθους τέτοιου που να μπορούν να ‘καταστρέψουν’ τα πλεονεκτήματα που επιτυγχάνονται με την αύξηση της καμπτικής δυσκαμψίας λόγω της απομάκρυνσης των επιστρωμάτων. Η διατμητική δυσκαμψία ενός στοιχείου σάντουιτς είναι πάντα μικρότερη από την αντίστοιχη ενός συμπαγούς υλικού. Για το λόγο αυτό οι διατμητικές παραμορφώσεις δε μπορούν σε καμία περίπτωση να παραλειφθούν, κατά τον υπολογισμό της δυσκαμψίας αλλά και της σταθερότητας μιας sandwich κατασκευής.

Τα στοιχεία τύπου σάντουιτς που κατασκευάζονται για αεροπορικές εφαρμογές τις περισσότερες φορές περιλαμβάνουν μεταλλικές επιστρώσεις και μεταλλικούς πυρήνες με κυψελοειδή (honeycomb) ή κυματοειδή (corrugated) μορφή. Η κυψελοειδής διάταξη δημιουργείται από λεπτές λωρίδες κράματος αλουμινίου ή χάλυβα που έχουν μορφοποιηθεί και ενωθεί όπως φαίνεται στο *Σχήμα 2.1. (b)*. Η κυματοειδής μορφή σχηματίζεται από ένα μεταλλικό φύλλο με μορφή όπως στο *Σχήμα 2.1.(c)* το οποίο συγκολλείται εναλλάξ με τις δύο εξωτερικές επιστρώσεις.

Οι κυψελοειδείς διατάξεις αποτελούν βασική ιδέα στις αεροπορικές κατασκευές πάνω από 40 χρόνια. Ουσιαστικά κάθε σημερινό αεροσκάφος εξαρτάται από την αξιοπιστία και την ακεραιότητα που προσφέρουν αυτές οι κατασκευές. Στο *Σχήμα 2.2* βλέπουμε την εκτεταμένη χρήση των σάντουιτς με διάφορα είδη κυψελλωτών πυρήνων σε ένα σύγχρονο μαχητικό αεροσκάφος όπως είναι το “Convaír B-58”.

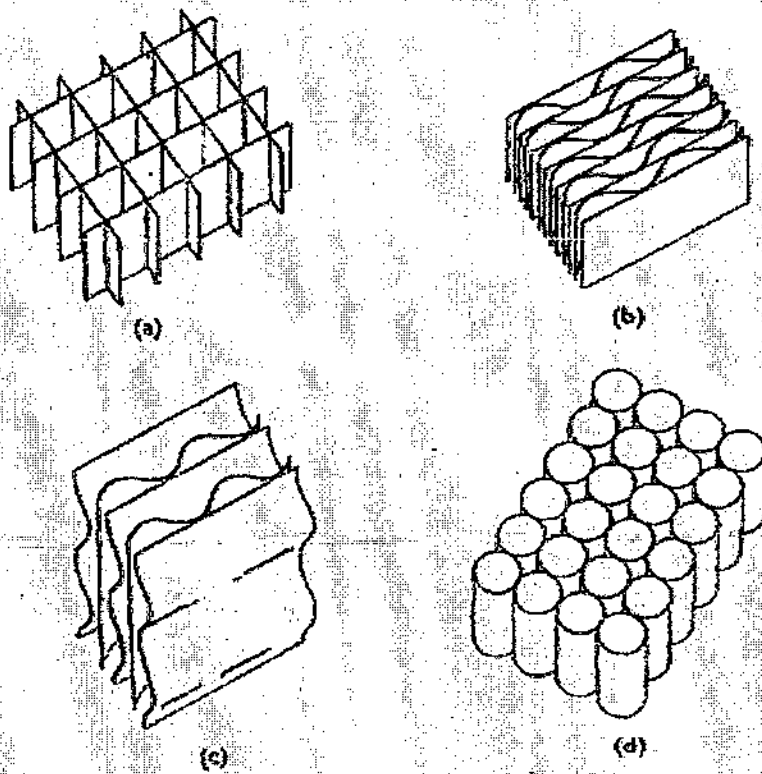


Σχήμα 2.2. Χρήση σύνθετων υλικών με κομμελωτό παρήμα στο μαχητικό Conquest B-58.

Στην κατασκευή κτιρίων χρειάζονται τέτοια στοιχεία προκειμένου να μεταφερθούν σχετικά μικρά φορτία για αρκετά μεγάλα ανοίγματα. Στην περιοχή αυτή, όπως και στις αεροπορικές εφαρμογές το στοιχείο πρέπει να είναι ελαφρά, αλλά, σε αντίθεση με την αεροπορική βιομηχανία, εδώ υπάρχει μεγάλη ανάγκη για χαμηλό κόστος. Όλες οι μεταλλικές διατάξεις μπορούν να έχουν σημαντικές εφαρμογές στην κατασκευή κτιρίων, αλλά υπάρχει πεδίο και για πολλά άλλα υλικά. Για επιστρώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν τσιμέντο, πλαστικά

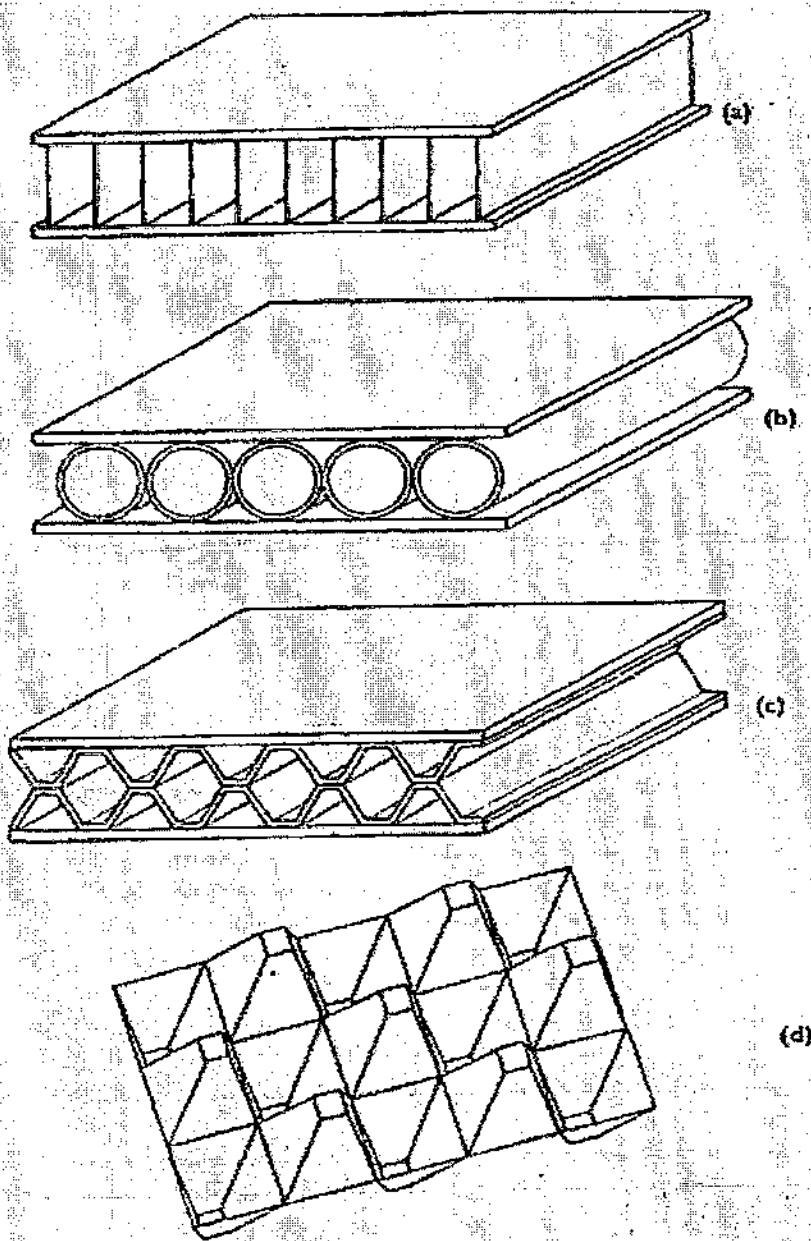
ενισχυμένα με ίνες γυαλιού, κόντρα-πλακέ, ενισχυμένο τσιμέντο και φύλλα εμποτισμένα με ρητίνη. Οι μη μεταλλικοί πυρήνες κυψελοειδούς ή κυματοειδούς μορφής κατασκευάζονται από φύλλα εμποτισμένα με ρητίνη, και ενισχυμένα πλαστικά. Οι συμπαγείς πυρήνες κατασκευάζονται από διάτρητο νοβοπάν, ελαφρύ ξύλο, διάφορα είδη διογκούμενων πλαστικών, αφρώδεις διατάξεις και ελαφρύ σκυρόδεμα. Νέα υλικά και νέοι σύνδεσμοι ήδη χρησιμοποιούμενων υλικών προτείνονται και χρησιμοποιούνται συνεχώς.

Ορισμένες παραλλαγές της ιδέας του κυψελοειδούς πυρήνα εμφανίζονται στο *Σχήμα 2.3*. Οι διασταυρούμενες λωρίδες του *Σχ. 2.3 (a)*, αποτελούν την πιο εύκολα αλλά όχι ευρέως χρησιμοποιούμενη λύση. Οι πυρήνες των *Σχ. 2.3.(b)* και *(c)* κατασκευάζονται με συγκόλληση μεγάλου αριθμού επιπέδων και κυματοειδών φύλλων με διάφορους τρόπους. Το *Σχ. 2.3.(d)* τέλος, παρουσιάζει μια αρχική πρόταση που χρησιμοποιεί ξύλο με τις ίνες κάθετα στις εξωτερικές επιστρώσεις. Η συνηθισμένη μεταλλική κυψελοειδής διάταξη δεν μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί σε μια κυλινδρική επιφάνεια. Για τις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιούνται παραμορφωμένα κυψελοειδή στοιχεία όπως αυτό στο *Σχήμα 2.3 (e)*. Οι κυψελίδες πολλαπλής κυματοειδούς μορφής (*Σχήμα 2.3 (f)*) έχουν και αυτές αντίστοιχες ιδιότητες



Σχήμα 2.3. Διαφορετικές μορφές πυρήνων, σάντουιτς ολικών.

Παραλλαγές του πυρήνα κυματοειδούς μορφής φαίνονται στο Σχήμα 2.4. Η απλή διαμόρφωση με παράλληλες λωρίδες (Σχήμα 2.4 (α)) συχνά ενισχύεται με προσθήκη διογκούμενων πλαστικών στα υπάρχοντα κενά. Περιπτώσεις σωληνωτού (Σχήμα 2.4 (b)) και οριζόντια (Σχήμα 2.4 (c)) κυψελοειδούς πυρήνα είναι μάλλον σπάνια. Η διάταξη του Σχήματος 2.4 (d) είναι παρόμοια με αυτή των θηκών που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά αυγών. Σε αντίθεση με τους κυματοειδείς πυρήνες, έχει παρόμοιες ιδιότητες στους δύο άξονες, αλλά έχει και το πλεονέκτημα της εύκολης μορφοποίησης και συγκόλλησης στις εξωτερικές επιστρώσεις.



Σχήμα 2.4. Διαφορετικές μορφές πυρήνων, κυματοειδούς μορφής.

-Πέρα από τις μη συνεκτικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του πυρήνα όπως οι κυψελοειδείς οι κυματοειδείς και οι περιπτώσεις των αφρών, υπάρχουν και οι συνεκτικές. Μια τέτοια περίπτωση είναι και οι ενισχυμένες με ίνες ρητίνες, όπου η ίδια η ρητίνη του πυρήνα ενεργεί και σαν συγκολλητικό, του πυρήνα με τα

επιστρώματα. Στην περίπτωση αυτή έχουν παρατηρηθεί σημαντικά φαινόμενα ερπυσμού, σε επίπεδα αστοχίας κατώτερα από το όριο αναλογίας.

Τελευταία αναπτύχθηκε ένα υβρίδιο υλικό το οποίο συνδυάζει τις εξαιρετικές ιδιότητες σε κόπωση και την υψηλή αντοχή των ινών γυαλιού ή αραμιδίου και την κατεργασιμότητα των κραμάτων αλουμινίου. Το υλικό αυτό που ονομάζεται 'ARALL', και έχει την ίδια περίπου δομή με τα υπό μελέτη υλικά της εργασίας αυτής, θα παρουσιαστεί εκτενέστερα στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου.

Ο σωστός σχεδιασμός των λεπτομερειών μιας κατασκευής τύπου σάντουιτς, είναι τουλάχιστον εξίσου σημαντική με την ανάλυση των μετατοπίσεων, των τάσεων και των φορτίων λυγισμού. Οι λεπτομέρειες αυτές περιλαμβάνουν το σχεδιασμό των άκρων, τις συνδέσεις των εξωτερικών επιστρώσεων με τον πυρήνα, διάφορες ενισχύσεις, όπως αυτές για την κατανομή των συγκεντρωμένων φορτίων, το είδος της συγκολλητικής ουσίας, τον τρόπο κατασκευής, τη θερμοκρασία και το χρόνο πολυμερισμού της κ. λ. π. . Αν οι θερμοκρασίες ή οι συγκεντρώσεις υγρασίας μεταξύ των δυο επιστρώσεων διαφέρουν (όπως για παράδειγμα στην περίπτωση του κόντρα πλακέ) τότε είναι δυνατό η διαφορική διόγκωση των επιστρώσεων να οδηγήσουν την κατασκευή σε σημαντική διατμητική παραμόρφωση.

Οι τύπου σάντουιτς κατασκευές χρησιμοποιούνται από τους σχεδιαστές (designers) σε πολλές εφαρμογές που μεταφέρουν φορτία, γιατί καταφέρνουν να πετύχουν τους βέλτιστους συνδυασμούς σε δυσκαμψία και αντοχή για το ίδιο μικρό, σχετικά, βάρος. Εξαιτίας αυτού του βασικού πλεονεκτήματος που έχουν τα σύνθετα υλικά σε σχέση με τα συμβατικά, έχει γίνει τα τελευταία χρόνια μεγάλη εξάπλωση των συνθέτων κατασκευών τύπου σάντουιτς σε ποικίλες κατασκευές. Παρά τη μεγάλη ανάπτυξη και εφαρμογή που γνωρίζουν τα υψηλής αντοχής

σάντουιτς υλικά, οι κατασκευαστές δεν έχουν εκμεταλλευτεί στο έπακρον τις ανώτερες ιδιότητές τους. Αυτό συμβαίνει γιατί οι κατασκευαστικές δυσκολίες των συνθέτων υλικών, όπως για παράδειγμα η προβληματική και αναξιόπιστη συγκόλληση των συνθετικών στοιχείων τους, δεν επιτρέπουν την ολοκληρωτική χρησιμοποίηση των ιδιοτήτων που θεωρητικά μπορούν να κατέχουν.

Τα πλεονεκτήματα τέτοιων κατασκευών είναι πολύ γνωστά σήμερα, όπως για παράδειγμα η υψηλή αντοχή ως προς το βάρος τους, η υψηλή αντοχή στη διάβρωση, ή η αυξημένη αντίσταση τους σε φορτία κόπωσης. Από τα υπάρχοντα αναγνωρισμένα επιστημονικά δεδομένα, μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε ότι δεν υπάρχει μοναδική πηγή από την οποία να δίνονται οι μηχανικές ιδιότητες όλων των υλικών που χρησιμοποιούνται ως εξωτερικές επιστρώσεις και ως πυρήνες στις κατασκευές τύπου σάντουιτς. Οι μηχανικές ιδιότητες των κατασκευών αυτών εξαρτώνται άμεσα από τα συγκολλητικά στρώματα που χρησιμοποιούνται, την θερμοκρασία και την πίεση στην οποία πραγματοποιείται η θερμική κατεργασία, ο πολυμερισμός (curing), των συνθέτων υλικών. Οι παραπάνω ευμετάβλητοι παράγοντες σε συνδυασμό με την ανισότροπη φύση των πολύστρωτων πλακών από σύνθετα υλικά και κυψελοειδούς μορφής πυρήνων, καθιστούν απαραίτητο το σχολαστικό έλεγχο των δοκιμών για αποτελεσματικό και αξιόπιστο σχεδιασμό των σάντουιτς κατασκευών.

Συνιστώσες των σάντουιτς υλικών

Τα διαφορετικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σάντουιτς υλικών έχουν σκοπό την αντιμετώπιση διαφορετικών απαιτήσεων σε αντοχή, κόστος αλλά και αντίσταση κατά των επιδράσεων

από το περιβάλλον. Τα τελευταία 20 χρόνια η χρήση ελαφρών κατασκευών τύπου σάντουιτς σε κτίρια και στην αεροναυπηγική, ξεπέρασε κάθε προσδοκία. Ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια η μεγάλη βελτίωση των συνδετικών υλικών (adhesives), αλλά και η βελτίωση των σύνθετων υλικών που χρησιμοποιούνται, έδωσε μια νέα ώθηση στην κατασκευή τέτοιων κατασκευαστικών στοιχείων. Αν και η ιδέα για την κατασκευή των στοιχείων αυτών είναι πολύ απλή, το βασικό πρόβλημα που απασχολεί τους σχεδιαστές μηχανικούς είναι το ότι τέτοια στοιχεία δεν είναι δοκιμασμένα σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Έτσι, δεν υπάρχουν δεδομένα και συγκεκριμένες οδηγίες για την κατασκευή ενός εξαρτήματος και ότι γίνεται, γίνεται για πρώτη φορά. Με τα σημερινά δεδομένα είναι πολύ δύσκολο να προσδιορίσουμε ποιος είναι ο καλύτερος συνδυασμός υλικών για τις βέλτιστες ιδιότητες και το ελάχιστο κόστος. Σε πολλές περιπτώσεις, το πλαστικά υλικά, χρησιμοποιούνται με βάση εμπειρικές πιο πολύ, παρά αναλυτικές μεθόδους.

4.7 ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΑ

Σχεδόν οποιοδήποτε υλικό που μπορεί να πάρει τη μορφή λεπτής πλάκας, όπως το χαρτί, το ξύλο, τα μέταλλα, τα πολυμερή και τα ενισχυμένα πολυμερή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν υλικό για την κατασκευή επιστρώματος sandwich. Τα περισσότερα χρησιμοποιούμενα όμως υλικά είναι το αλουμίνιο και τα ενισχυμένα με ίνες πολυμερή. Κατά την κατασκευή επιστρώματος από διαφορετικά υλικά, είναι σημαντικό να

εξεταστεί η επίδραση που θα έχουν οι διαφορετικού θερμικοί συντελεστές διαστολής πυρήνα και επιστρώματος. Σε τέτοιες περιπτώσεις, πολλές φορές, παρατηρείται στρέβλωση της κατασκευής όταν λειτουργήσει σε κρίσιμες περιοχές θερμοκρασίας. Η χρήση διαφορετικών υλικών μπορεί να προκαλέσει και προβλήματα διάβρωσης. Τέλος, εάν χρησιμοποιούνται μεταλλικά υλικά, τότε απαιτούνται ειδικές προεργασίες, όπως επιφανειακή κατεργασία και βαφή. Τα επιστρώματα μπορούν και πρέπει να μορφοποιούνται πριν τη συγκόλληση τους με τον πυρήνα για να αποφεύγονται η τουλάχιστον να μειώνονται στο ελάχιστο δυνατό οι παραμορφώσεις του πυρήνα κατά τη μορφοποίηση. Παρόλα αυτά, πολλές φορές η μορφοποίηση του τελικού στοιχείου πραγματοποιείται μετά τη συγκόλληση των επιστρωμάτων με τον πυρήνα. Χρειάζεται όμως εξαιρετικά μεγάλη προσοχή και πάνω απ' όλα ειδικά μηχανήματα για την κατεργασία αυτή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4

- ❖ Hull D. , “An Introduction to Composite Materials”, 1992. Cambridge University Press, U.K.
- ❖ Tsai S. , “Introduction to Composite Materials”, 1980. Technomic Publishing Co., U.S.A.
- ❖ Jones R. , “Mechanics of Composite Materials”, 1975. Scripta book Company, Washington D. C.
- ❖ Sheldon R. “Composite Polymeric Materials” 1982. Applied Science Publishing Co. Ltd, Essex, U.K.
- ❖ Concise Encyclopedia of Polymer Processing & Applications, 1992. Pergamon Press, Oxford-New York- Tokyo, Vol. I & II.
- ❖ Phillips L. “Design with Advanced Composite Materials”, 1989, The Design Council, London, U.K..
- ❖ Matthews F. L. & Rawlings R. D. , 1994. “Composite Materials : Engineering and Science”, Chapman & Hall, Oxford, U.K.
- ❖ Weeton J. W., Peters D. M. and Thomas K. L. , 1988. “Engineers’ Guide to Composite Materials”, American Society for Metals, U.S.A.
- ❖ Middleton D. H. , 1990. “Composite Materials in Aircraft Structures”, Longman Scientific & Technical, U.K.

- ❖ Flinn R. A. & Trojan P. K. , 1975. "Engineering Materials and Their Applications", Houghton Mifflin Company, Boston, U.S.A.
- ❖ Chen Wai-Fah & Salleb A. F. , 1982. "Constitutive Equations for Engineering Materials", John Wiley & Sons, New York, U.S.A.
- ❖ Moore H. F. & Moore M. B. , 1953. "Textbook of the Materials of Engineering", McGraw-Hill Book Co. , U.S.A.
- ❖ Lubin, G. & Donohue, P., 1980. "Real Life Ageing Properties of Composites". Proc. 35 Annual Tech Conf New Orleans, The Society for Plastics Industry Inc.
- ❖ Oliver P. C. , 1980. "Applications for Composites in the Offshore Environment". Advances in Composite Materials. Proc 3rd Conf on Composite Materials, Paris, Apr., Pergamon Press.
- ❖ Ferrarini, L. J. , Spence, D. H. and Walker, M. G. , 1984. "Broadening the Limits of Reinforced Polyurethane RIM". Proc 1st Conf on Fibre Reinforced Composites, University of Liverpool.
- ❖ Buisson, G. "SMC and the Car", Fibreworld 17, 10, 1983, Vetrotex,(U.K.), Ltd.
- ❖ Riddell, J. C. , "Composite Materials and the Sailplane Market", Proc Second Conf on Composite Materials Engineering, London, p253.

- ❖ Wood, A. S. , “The Majors are Taking Over in Advanced Composites”, *Modern Plastics Int.* , April 1986, p. 40.

- ❖ Clarke, G. P. , “The Use of Composite Materials in Racing Car Design”, *Proc. 3rd Int Conf on Carbon Fibres – Uses and Prospects*, London 8-10 Oct., 1985.

- ❖ Zweben, C. , “Advanced Composites for Aerospace Applications”, *Composites*, 1981, 12 (4), p. 235.

- ❖ Richardson, M. O. W., “*Polymer Engineering Composites*, Applied Sci. Publishers Ltd. , London 1977

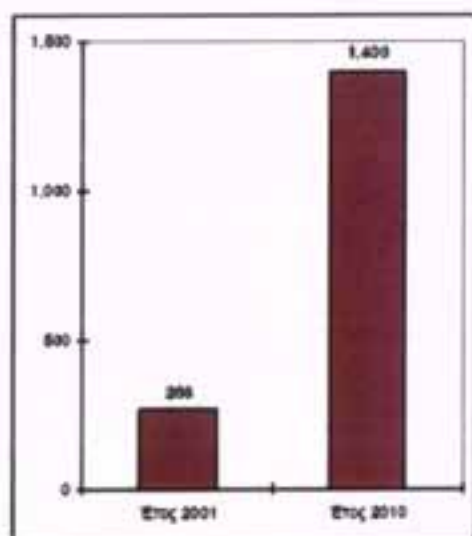
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5.1 ΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑΣ ΑΓΟΡΑΣ

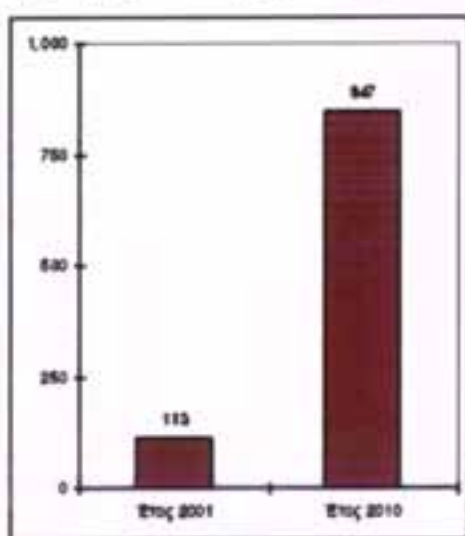
Η παγκόσμια τάση της αγοράς, αρχίζει να φαίνεται ξεκάθαρα, ότι οδεύει προς τα σύνθετα υλικά και μάλιστα με γοργούς ρυθμούς. Μια έκθεση που δημοσιεύεται από την Composites Worldwide Inc. προβλέπει μια άκρως ισχυρή μελλοντική αύξηση της αγοράς των ενισχυμένων με ίνες σύνθετων υλικών FRP (Fiber Reinforced Polymers). Επίσης η Infrastructure Composites Report 2001 προβλέπει ότι ο τομέας της υποδομής των βιομηχανικών αγορών για τις τρέχουσες και αναδυόμενες εφαρμογές συνθέτων FRP, θα αυξηθεί κατά περισσότερο από 500% μεταξύ 2000 και 2010, με την μεγαλύτερη αύξηση να αναμένεται στη Βόρεια Αμερική, που ακολουθείτε από την Ασία και την Ευρώπη. Η ίνα γυαλιού θα έχει τη μέγιστη αύξηση, ακολουθεί η ίνα άνθρακα, ο ακόρεστος πολυεστέρας (UPR), ο βινυλικός εστέρας και οι εποξικές ρητίνες.

Η βορειοαμερικανική αγοραστική αξία των κατασκευασμένων σύνθετων δομών FRP για τις αναδυόμενες εφαρμογές υποδομής, υπολογίζεται σε \$113 εκατομμύρια και, σύμφωνα με την έκθεση, θα αυξηθεί σε \$847 εκατομμύρια μέχρι το 2010 (μια αύξηση 750% στα επόμενα 10 έτη). Η έκθεση επιπλέον προβλέπει ότι η παγκόσμια

αγοραστική αξία θα αυξηθεί σε \$1,4 δισεκατομμύρια κατά τη διάρκεια της ίδιας περιόδου (μια αύξηση 525% για τα επόμενα 10 έτη).⁶



Σχήμα 1: Τάση παγκόσμιας αγοραστικής αξίας σύνθετων υλικών για εφαρμογές υποδομής (τιμές σε εκατομμύρια δολάρια).



Σχήμα 2: Τάση αγοραστικής αξίας σύνθετων υλικών για εφαρμογές υποδομής στη Βόρειο Αμερική (τιμές σε εκατομμύρια δολάρια).

⁶ Πηγή: Composites Worldwide Inc. (2002): Press Release – 500%-700% Growth for FRP Composites Aiding Global Infrastructure Sector: Glass, Fibre, Upr/Vinyl Ester/Epoxy Resin Composites Big Business Investment Winners in Next Decade.

Σε αυτό το σημείο είναι ενδιαφέρον να αναφερθούν οι στόχοι της Τεχνολογίας Κατασκευών (Construction Technology Goals) όπως αυτοί προσδιορίστηκαν το 1995 από τους εξής οργανισμούς στις ΗΠΑ: α) The National Institute of Building Sciences, β) The Construction Industry Institute και γ) The American Public Work Association και οι οποίοι εντοπίζονται στα ακόλουθα σημεία:

- Μείωση κατά 50% των διαδικασιών, της συντήρησης και των ενεργειακών δαπανών.
- Αύξηση κατά 30% στην παραγωγικότητα και την άνεση κατόχων.
- 50% λιγότεροι κίνδυνοι σχετικοί με ασθένειες και τραυματισμούς κατά την αποπεράτωση-παράδοση του έργου.
- 50% λιγότερα απόβλητα και ρύπανση.
- Κατασκευές με μεγαλύτερη αντοχή στο χρόνο και ευελιξία κατά 50%.

Μερικά ενδιαφέροντα στοιχεία για την τάση της αγοράς προς γέφυρες από σύνθετα υλικά αντλήσαμε από την The Market Development Alliance of the FRP Composites Industry (MDA)⁷, μια μη κερδοσκοπική οργάνωση με έδρα τη Νέα Υόρκη, που έχει ως σκοπό να προωθήσει κατασκευές από σύνθετα υλικά, να αυξήσει την αποδοχή τους από το ευρύ κοινό και να βοηθήσει νέες εταιρίες που έχουν ως αντικείμενο κατασκευές από σύνθετα υλικά.

Οι σημερινοί ιδιοκτήτες γεφυρών βρίσκονται αντιμέτωποι με τις μοναδικές προκλήσεις ως αποτέλεσμα μιας σοβαρά επιδεινωμένης υποδομής, μιας ανεπαρκούς χρηματοδότησης και ενός απαιτητικού

⁷ <http://www.mdacomposites.org>

κοινού. Ο παραπάνω ισχυρισμός ενισχύεται από μια πρόσφατα δημοσιευμένη μελέτη (Report FHWA-RD-01-156) που χρηματοδοτείται από το FHWA, με τίτλο «Δαπάνες διάβρωσης και προληπτικές στρατηγικές στις Ηνωμένες Πολιτείες», υπολογίζει το ετήσιο άμεσο κόστος της διάβρωσης για τις γέφυρες εθνικών οδών για να είναι \$6,43 δισεκατομμύρια έως \$10,15 δισεκατομμύρια. Αυτό περιλαμβάνει \$3,79 δισεκατομμύρια για να αντικαταστήσει δομικά τις ανεπαρκείς γέφυρες κατά τη διάρκεια των επόμενων 10 ετών και \$1,07 δισεκατομμύριο έως \$2,93 δισεκατομμυρίων για τη συντήρηση και το κόστος του κεφαλαίου για τις συγκεκριμένες γέφυρες. Εκτός από αυτές τις άμεσες δαπάνες, η ανάλυση κύκλου της ζωής της μελέτης υπολογίζει τις έμμεσες δαπάνες στο χρήστη λόγω των καθυστερήσεων κυκλοφορίας και της χαμένης παραγωγικότητας με περισσότερες από 10 φορές άμεσο κόστος της διάβρωσης. Το κοινό έχει γίνει αδιάλλακτο των καθυστερήσεων κατασκευής και απαιτεί τις δομές εκείνες που θα διαρκέσουν περισσότερο και θα παράσχουν τη μεγαλύτερη αξία για τις φορολογικές εισφορές που καλούνται να πληρώνουν για δημόσια έργα κάθε χρόνο. Κατά συνέπεια, υπάρχουν τεράστιες ευκαιρίες για τις γέφυρες γεφυρών FRP που είναι ανθεκτικές στη διάβρωση, ελαφριές και μπορούν να εγκατασταθούν γρήγορα.

Αξίζει να αναφερθεί πως από τον παραπάνω οργανισμό (MDA) έχουν καταγραφεί 8 πεζογέφυρες στην Κίνα, 11 στην Ιαπωνία, 2 στη Δανία, 1 στη Γαλλία, 3 στη Γερμανία, 3 στην Ολλανδία, 1 στη Νορβηγία, 1 στην Ισπανία, 1 στην Ελβετία, 8 στην Αγγλία, 1 στον Καναδά και 121 στις ΗΠΑ.

Επίσης έχουν καταγραφεί γέφυρες για αυτοκίνητα από 1 σε Αυστραλία, Κίνα, Αυστρία, Βουλγαρία, Ολλανδία, Ελβετία, 11 στην Ιαπωνία, 6 στην Αγγλία, 13 στον Καναδά και 135 στις ΗΠΑ, οι οποίες χρησιμοποιούν σύνθετα υλικά σε ένα μέρος της κατασκευής τους ή και

σαν αυτούσιες κατασκευές από σύνθετα υλικά. Είναι εξαιρετικά ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η συντριπτική πλειοψηφία των παραπάνω γεφυρών κατασκευάστηκαν την τελευταία 6-ετία. Τα παραπάνω στοιχεία είναι ενδεικτικά μιας άκρως αναπτυσσόμενης αγοράς στη παγκόσμια κοινότητα και επακόλουθα και στην Ελλάδα.

5.2 ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΔΙΚΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΣΕ ΟΛΟ ΤΟΝ ΠΛΑΝΗΤΗ

Bridge Name	City	State / Prov	Date	L (ft)	W (ft)	deck	beam/column	rebar/gird	tendon/cable	panel	soiling	sidewalk, guardrail enclosures	Bridge piling	Bridge Fending Systems	tower	glulam	System Provider or FRP Manufacturer
ASIA / FAR EAST																	
Australia (1)																	
Toowoomba Bridge	Toowoomba		2002	33	18	X				X							Univ Southern Queensland
China (1)																	
Miyun Bridge	Beijing		1982	63	32		X										Chongqing Glass Fiber Product Factory
Japan (11)																	
Shinetsu Bridge	Ishikawa Prefecture		1988	20	23				X								Tokyo Rope
Sachigawa Minami Bridge	Fukuoka Prefecture		1989	118	40				X								Mitsubishi Chemical
Kitakyushu Bridge	N/A		1959	118	40				X								N/A
Sumitomo Demonstration Bridge (1)	Oyama Works	Tochigi Prefecture	1988	41	13				X								Teijin Ltd.
Sumitomo Demonstration Bridge (2)	Oyama Works	Tochigi Prefecture	1981	82	13				X								Teijin Ltd.
Hishinogawa Bridge, Hakui Kenmin Bicycle Route	Ishikawa Prefecture		1992	49	40				X								Tokyo Rope
Yamanaka Bridge	Tochigi Prefecture		1993	31	18				X								Shinko Wire Co., Ltd.
Sone Viaduct	Hyogo Prefecture		1995	N/A	N/A				X								Teijin Ltd.
Mukai Bridge	Ishikawa Prefecture		1985	49	47				X								Tokyo Rope
Shin-hokkai Bridge	Ishikawa Prefecture		1998	85	11				X								NEFMAC
Benten Bridge	Fukushima Prefecture		2002	197	10	X	X										NEFMAC
EUROPE																	
Austria (1)																	
Neisch Bridge	Nörsch Kammen	Kammen	1998	144	39				X								Bayer AG
Bulgaria (1)																	
Ginzl Highway Bridge			1952	39	20		X										N/A
Germany (4)																	
Lunenschlag Bridge	Dusseldorf		1950	21	20				X								Bayer AG
Uferbergstrasse Bridge	Dusseldorf		1958	154	48				X								Bayer AG
Sohl essbergstrasse Bridge	Leverkusen		1991	174	32				X								Bayer AG
Oststrasse Bridge	Ludwigshafen		1991	268	37				X								Tokyo Rope
The Netherlands (1)																	
Den Dungen Bridge	Den Dungen		2001	33	12	X	X										N/A
Switzerland (1)																	
Sterchenbrücke (Stark) Bridge	Winnarhor		1998	408	20				X								BER Ltd.
United Kingdom (6)																	
A19 Tees Viaduct deck enclosure	Middlesborough	England	1988	2870	60							X					Maunsell Structural Plastics
Bromley South Bridge	Kent		1992	669	138	X											Maunsell Structural Plastics
Bonds Mid L/A Bridge	Stroud, Gloucestershire	England	1994	27	14	X	X		X								GEC Reinforced Plastics
Second Severn Bridge-deck enclosures	Bristol	England	1996	95	30				X								GEC Reinforced Plastics
Rogiet Bridge Enclosure	Gwent		1996	N/A	N/A	X											Maunsell Structural Plastics
West Mill Bridge over River Cole	Strivenham	Oxfordshire	2002	33	23	X	X								X		Fiberline Composites
NORTH AMERICA																	
Canada (13)																	
Beddenon Trail Bridge/Central Street	Calgary	Alberta	1993	136	50				X								Tokyo Rope Mfg. Ltd.
Crowchild Trail Bridge	Calgary	Alberta	1997	293	38			X				X					Marshall Industries Composites
Centre Street Bridge	Calgary	Alberta	2000	444	20			X									Autocon Composites
Waterloo Creek Bridge	Vancouver Island	British Columbia	1997	22	39			X				X					Autocon Composites
Taylor Bridge	Headingley	Manitoba	1997	433	56			X	X								Tokyo Rope Mfg. Ltd.
Salmon River Bridge	Kemptown	Nova Scotia	1995	182	48			X				X					Autocon Composites

Bridge Name	City	State / Prov	Date	L (ft)	W (ft)	deck	beam / column	rebar / grid	tendon / cable	panel	footing	sidewalk, guardrail, enclosure	Bridge piling	Bridge Fending Systems	tower	glulam	System Provider or FRP Manufacturer
Halifax Harbor Wharf	Halifax Harbor	Nova Scotia	1999	131	16			X		X			X				Pultrall, ADS Composites Group
Chatham Bridge	Chatham	Ontario	1998	216	33			X				X					Autocon Composites
Mederick Martin Bridge	Laval	Quebec	1981	75	20							X					Pultrall, ADS Composites Group
Pike River Bridge	Montreal	Quebec	1987	30	20							X					Pultrall, ADS Composites Group
Jeffre Bridge	Sherbrooke	Quebec	1997	24	38			X									Pultrall, ADS Composites Group
Wotton Bridge	Wotton	Quebec	2001	100	28			X									Pultrall, ADS Composites Group
Magog Bridge	Magog	Quebec	2002	280	50			X									Pultrall, ADS Composites Group
USA (135)																	
Sunes Road over Bedsole Creek	Crestshaw City	Alabama	2002	75	24											X	Structural Wood Systems
UCSD Road Test Panels	San Diego	California	1990	6	15	X											Martin Marietta Composites
Kings Stormwater Channel Bridge	Indio / Riverside County	California	2000	68	44	X											Martin Marietta Composites
Schuyler Heim Lit. Bridge	Long Beach	California	2003	35	30	X											Martin Marietta Composites
Parker @ I-225 Bridges	Denver	Colorado	2000	130	36			X	X								Marshall Industries Composites
I-225 & SH53 Interchange	Aurora	Colorado	2002	1345	42			X	X								Hughes Bros., Inc.
Magazine Ditch Bridge (Del Memorial Bridge)	New Castle	Delaware	1997	70	20	X											Hardcore Composites
Muddy River Route 826	Newark	Delaware	1998	32	26	X											Hardcore Composites
Greensbranch - Vehicular	Smyrna	Delaware	1999	21	12	X											Hardcore Composites
Mill Creek Bridge	Wilmington	Delaware	1999	30	17	X											Hardcore Composites
150052 SR 452	St Petersburg	Florida	2000	250	45								X				Seaward International
Seabreeze Bridge SR 430	Volusia County	Florida	2000	320	37			X					X				Seaward International
Moon River	Chatham County	Georgia	2000	1313	35								X				Seaward International
Stidway Narrows	Chatham County	Georgia	2000	1003	35								X				Seaward International
INEEL Bridge	Idaho Falls	Idaho	1997	30	18	X	X										Martin Marietta Composites
South Fayette Street over Town Brook	Jacksonville	Illinois	2001	50	23	X											Martin Marietta Composites
53rd Ave Bridge (1)	Bettendorf	Iowa	2001	82	28			X									Hughes Bros. Inc.
53rd Ave Bridge (2)	Bettendorf	Iowa	2001	47	28	X											Martin Marietta Composites
Crow Creek Bridge	Bettendorf	Iowa	2001	47	28	X											Martin Marietta Composites
216 Ave over Lime Creek	Delaware County	Iowa	2001	75	N/A											X	N/A
Route 141 over W-Low Creek	Guthrie County	Iowa	2001	210	20				X								Fiber Reinforced Systems Inc.
No-Name Creek Bridge	Russell	Kansas	1998	24	27	X											Kansas Structural Composites, Inc.
Crawford County Bridge #1 (Rt 126)	Pittsburgh	Kansas	1999	45	32	X											Kansas Structural Composites, Inc.
Crawford County Bridge #2 (Rt 126)	Pittsburgh	Kansas	1999	45	32	X											Kansas Structural Composites, Inc.
Kansas Detour Bridge #1	Kansas	Kansas	2003	60	30	X											Kansas Structural Composites, Inc.
Kansas Detour Bridge #2	Kansas	Kansas	2003	60	30	X											Kansas Structural Composites, Inc.
Roger's Creek (US 480)	Sourbon County	Kentucky	1997	39	36			X									Marshall Industries Composites
Two Mile Creek	Clark County	Kentucky	2001	64	26			X									Marshall Industries Composites
Summer Street	Boston	MA	2000	504	100								X				Seaward International
Medway Bridge	Medway	Maine	1997	54	30		X									X	Unadilla Laminated Products
Milbridge Bridge	Milbridge	Maine	1997	16	24				X								South Dakota School of Mines
West Sebets Bridge	West Sebets	Maine	1997	44	16		X									X	Strongwell, Inc.
Cloies Mill Rd, Rockland Branch RR Crossing	Waldoboro	Maine	1998	40	2												N/A

Bridge Name	City	State / Prov	Date	L (ft)	W (ft)	deck	beam / column	rebar / grid	tendon / cable	panel	teeling	sidewalk, guardrail, enclosures	Bridge piling	Bridge Fending Systems	tower	gullin	System Provider or FRP Manufacturer
East Dixfield Bridge	East Dixfield	Maine	2000	45	30		X									X	University of Maine
Milbridge Municipal Pier	Milbridge	Maine	2000	175	16	X										X	University of Maine
Skidmore Bridge	Washington - Union	Maine	2001	62	23	X											Kenway Corporation
Emory Brook Bridge	Fairfield	Maine	2003	72	35		X									X	Gordon Composites
Washington Schoolhouse Road	Cecil County	Maryland	1997	20	25	X											Hardcore Composites
Whealey Road	Cecil County	Maryland	2000	34	24	X											Hardcore Composites
MD 24 over Deer Creek	Harford County	Maryland	2001	128	32	X											Martin Marietta Composites
Snuffer School Road	Montgomery County	Maryland	2001	29	33	X											Hardcore Composites
M-15 over Goodings Creek	Vassar	Michigan	2000	49	45			X									Teijin Ltd.
Bridge St Bridge over Rouge River	Southfield	Michigan	2001	105	30	X		X	X								Mitsubishi Chemical
Walker Street Bridge	Rolla	Missouri	1999	10	30			X									Hughes Bros., Inc.
St. Johns Street Bridge	St. James	Missouri	2000	27	28	X				X							Kansas Structural Composites, Inc.
Jay Street Bridge	St. James	Missouri	2000	27	28	X				X							Kansas Structural Composites, Inc.
St. Francis Street Bridge	St. James	Missouri	2000	28	28	X				X							Kansas Structural Composites, Inc.
Walters Street Bridge	St. James	Missouri	2001	24	26			X									Marshall Industries Composites
Rollinsford Bridge, Rollins Road over Main St and E&M	Rollinsford	New Hampshire	2000	100	32			X									Autobon Composites
Rt 243 over Bennet's Creek	West Union	New York	1998	25	30	X											Hardcore Composites
Rt 367 over Bentley Creek	Elmira	New York	1999	140	25	X											Hardcore Composites
Bayonne Bridge	New York	New York	1999	81	40			X									Marshall Industries Composites
Cayuta Creek Bridge	Van Eten	New York	2000	129	29	X											Hardcore Composites
SR 418 over Schroon River	Warrensburg	New York	2000	150	26	X											Martin Marietta Composites
South Broad Street Bridge	Wesville	New York	2000	120	29	X											Hardcore Composites
Osceola Road over East Branch Salmon River (Rt 46)	Lewis County	New York	2001	30	26	X											Martin Marietta Composites
Triphammer Road over Conesus Outlet	Livingston County	New York	2001	41	33	X											Hardcore Composites
Rt 36 over Tributary to Troups Creek	Troupsburg	New York	2001	32	37	X											Kansas Structural Composites, Inc.
County Road 153	Washington County	New York	2002	54	27	X											Hardcore Composites
Wood Road Bridge over Cohocton River	Campbell	New York	2003	207	18		X										N/A
Whitestone Bridge Failings	New York	New York	2003	7400	8							X					Hardcore Composites
Service Route 1627 over Mill Creek	Union County	North Carolina	2001	40	26	X											Martin Marietta Composites
Smith Creek Bridge	Hamilton / Butler County	Ohio	1997	33	24	X	X										Martin Marietta Composites
Shawnee Creek Bridge	Xenia	Ohio	1997	24	12	X											Creative Pultrusions, Inc.
SR 47 over Woodington Run	Darke County	Ohio	1999	50	46	X											Martin Marietta Composites
Salem Ave Bridge (1) (State Rt 49)	Dayton	Ohio	1999	168	50	X											Creative Pultrusions, Inc.
Salem Ave Bridge (2) (State Rt 42)	Dayton	Ohio	1999	168	50	X											Hardcore Composites
Salem Ave Bridge (3) (State Rt 42)	Dayton	Ohio	1999	55	50	X											Infrastructure Composites Int.
Salem Ave Bridge (4) (State Rt 42)	Dayton	Ohio	1999	985	50			X	X								Diversified Composites
Salem Ave Bridge (5) (State Rt 42)	Dayton	Ohio	1999	985	6			X									Hughes Bros., Inc.
Pierce St Bridge	Lima	Ohio	1999	187	48			X									Marshall Industries Composites
SR 765 over Mill Creek	Shelby County	Ohio	1999	118	37								X				Xenes
Smitz Road Bridge	Clark County	Ohio	2000	82	30	X											Harbors Composites
Salem Ave Bridge (5) (State Rt 49)	Dayton	Ohio	2000	110	50												Composite Deck Solutions

Bridge Name	City	State / Prov	Date	L (ft)	W (ft)	deck	beams/columns	rebar / grid	tondion / rebar	panel	sooting	sidewalk, guardrail, enclosures	Bridge piling	Bridge Fending Systems	formwork	glulam	System Provider or FRP Manufacturer
Five Mile Road Bridge # 0171	Hamilton County	Ohio	2000	44	28	X											Hardcore Composites
Ebrot Run (Highway 14 over Ebrot Run)	Knox County	Ohio	2000	32	26	X											Hardcore Composites
Westbrook Road Bridge over Dry Run Creek	Montgomery County	Ohio	2000	34	33	X											Hardcore Composites
Shaffer Road Bridge	Ashabula County	Ohio	2001	175	17	X											Hardcore Composites
Stetzer Road Bridge	Columbus	Ohio	2001	267	56	X											Fiber Reinforced Systems Inc.
Hubble Creek (Wright Patterson AFB)	Dayton	Ohio	2001	32	20				X								Comptek Structural Composites
Tyler Road over Backs Creek	Delaware County	Ohio	2001	120	20	X											Fiber Reinforced Systems Inc.
Five Mile Road Bridge # 0027	Hamilton County	Ohio	2001	47	30	X											Hardcore Composites
Five Mile Road Bridge # 0071	Hamilton County	Ohio	2001	43	30	X											Hardcore Composites
Spaulding Road Bridge	Kebefing	Ohio	2001	83	56	X											Hardcore Composites
Miles Road Bridge	Cayahoga County	Ohio	2002	45	40		X										Martin Marietta Composites
Fatgrounds Road Bridge	Greene County	Ohio	2002	228	32	X											Martin Marietta Composites
Ca's Creek Bridge	Washington County	Ohio	2002	81	24	X											Martin Marietta Composites
Hales Branch Road Bridge	Clinton County	Ohio	2003	65	24	X											Martin Marietta Composites
County Line Rd over Tiffin River	Defiance County	Ohio	2003	167	28	X											Martin Marietta Composites
Hotchkiss Road Bridge	Geauga County	Ohio	2003	65	28	X											Martin Marietta Composites
Hudson Road / Wolf Creek Bridge	Summit County	Ohio	2003	117	34	X											Martin Marietta Composites
Lewis & Clark Bridge (Warrenton - Astoria)	Clatsop County	Oregon	2001	124	21	X											Martin Marietta Composites
Old Youngs Bay Bridge (Warrenton - Astoria)	Clatsop County	Oregon	2002	178	21	X											Martin Marietta Composites
US 101 over Shuslaw River	Florence	Oregon	2003	154	28	X											N/A
Rovser Farm Bridge	Bedford County	Pennsylvania	1998	15	12	X											Creative Pultrusion, Inc.
Wilson's Bridge	Chester County	Pennsylvania	1998	85	16	X											Hardcore Composites
Wall Whitman Bridge	Philadelphia	Pennsylvania	1999	N/A	N/A			X									Seaward International
Laurel Run Road Bridge (Route 400)	Somerset County	Pennsylvania	1990	22	26	X											Creative Pultrusion, Inc.
SR 4012 over Slippery Rock Creek	Boyers	Pennsylvania	2001	42	26	X											Martin Marietta Composites
SR 1037 over Dubois Creek	Susquehanna County	Pennsylvania	2001	22	33	X											Hardcore Composites
SR 505 over Dunning Creek	Bedford County	Pennsylvania	2002	91	22	X											Martin Marietta Composites
RT 5855 over Norfolk Southern RR	Spartanburg County	South Carolina	2001	63	37	X											Martin Marietta Composites
Access Road to Rapid City Cement Plant	Rapid City	South Dakota	1991	30	17				X								South Dakota School of Mines
Sierra de la Cruz Creek Bridge	Amarillo	Texas	2000	160	45		X										Hughes Bros., Inc.
FM 3254 bridge	San Patricio county	Texas	2003	30	28		X										MFG Construction Products, Inc.
Route 180 over Ryder Brook (Bridge #213)	Morris-town	Vermont	2002	144	34			X									Pultrall, ADS Composites Group
Tom's Creek Bridge	Blacksburg	Virginia	1997	18	22	X											Strongwell, Inc.
Trouville Weigh Station Ramp I-31 (1)	Trouville	Virginia	1999	16	20	X											Strongwell, Inc.
Trouville Weigh Station Ramp I-31 (2)	Trouville	Virginia	1999	29	20	X											Creative Pultrusions, Inc.
Route 601 (Cicky Creek Bridge)	Sugar Grove	Virginia	2001	38	30	X											Strongwell, Inc.
Route 250 Broad Street River over Tuckahoe Creek	N/A	Virginia	2001	N/A	N/A			X									N/A
Lighthouse Bridge	Clallam Bay	Washington	1995	161	32										X		American Wood Laminators
Upper Salt Creek Bridge	Clallam Bay	Washington	1997	103	38										X		American Wood Laminators
Chief Joseph Dam Bridge	Bridgeport	Washington	2003	296	32	X											N/A
Buffalo Creek Bridge	McKinleyville	West Virginia	1998	177	30			X									Marshall Industries Composites

Bridge Name	City	State / Prov	Date	L (ft)	W (ft)	deck	beam / column	rebar / grid	tendon / cable	panel	loading	sidewalk, guardrail, enclosure	Bridge piling	Bridge Fencing Systems	tower	glulam	System Provider or FRP Manufacturer
Wickwire Run Bridge	Grafton / Taylor County	West Virginia	1997	30	22	X											Creative Pultrusions, Inc.
Laurel Lick Bridge	Lewis County	West Virginia	1997	20	16	X	X				X						Creative Pultrusions, Inc.
South Acme Bridge	Charleston	West Virginia	2000	24	30			X									Hughes Bros., Inc.
Dans Run Slab Bridge	Mineral County	West Virginia	2000	12	14			X									N/A
Market Street Bridge	Wheeling	West Virginia	2000	100	56	X											Creative Pultrusion, Inc.
North Acme Bridge	Charleston	West Virginia	2001	24	30			X									Hughes Bros., Inc.
North Kayford Bridge	Charleston	West Virginia	2001	24	30			X									Hughes Bros., Inc.
Montrose Bridge	Elkins	West Virginia	2001	38	25	X											Hardcore Composites
West Buckeye Bridge	Morgantown	West Virginia	2001	148	38	X				X							Kansas Structural Composites, Inc.
Hanover Bridge	Pendleton County	West Virginia	2001	120	28	X				X							Kansas Structural Composites, Inc.
Boy Scout Bridge	Princeton	West Virginia	2001	31	20	X											Hardcore Composites
Kathy Truss Bridge	Bridgeport	West Virginia	2002	00	14	X											Creative Pultrusions, Inc.
Martha Queen's Bridge	Lewis County	West Virginia	2002	50	30			X									Marshall Industries Composites
Howell's Mill Bridge	Cabell County	West Virginia	2003	245	33	X											Martin Marietta Composites
Goat Farm Bridge	Jackson County	West Virginia	2003	40	15	X											Kansas Structural Composites, Inc.
Kite Creek Bridge	Monroe County	West Virginia	2003	35	24			X									N/A
La Chen Bridge	Monroe County	West Virginia	2003	32	24	X											Bedford Reinforced Plastics
Milwaukee 8th Project	Milwaukee	Wisconsin	2002	530	10							X					RL Industries
US 151 over SH 28	Fond du Lac	Wisconsin	2003	107	43	X	X		X								Hughes Bros., Inc.
US 151 over SH 28	Fond du Lac	Wisconsin	2003	214	39	X	X										Diversified Composites

πηγη: <http://www.mdacomposites.org>

