

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ

# 3

## Ενισχυτικές Ίνες

### 3.1 Τύποι Ινών

Στη σύγχρονη βιομηχανία συνθέτων υλικών, χρησιμοποιείται μία μεγάλη ποικιλία υλικών, σε μορφή ινών, για την ενίσχυση πλαστικών, μεταλλικών και κεραμικών υλικών, κανοντάς τα ισχυρότερα, πιο δύσκαμπτα και πιο σκληρά. Επιπλέον, μερικές ίνες έχουν και άλλες ιδιότητες εξίσου σημαντικές με τις παραπάνω, όπως χαμηλή πυκνότητα, ηλεκτρική αγωγιμότητα και θερμική αντίσταση.

Ο πρώτος τύπος ίνας που χρησιμοποιήθηκε για την ενίσχυση πλαστικού υλικού σε αεροπορικές κατασκευές ήταν οι ίνες από λινάρι. Με την προσθήκη ρητίνης δημιουργήθηκε το κατασκευαστικό υλικό για την ναυπήγηση του αεροσκάφους "Gordon Aerolite". Οι πιο συνηθισμένοι τύποι ινών για την κατασκευή αεροσκαφών είναι: οι ίνες αρωματικού πολυαμιδίου, βορίου, άνθρακα και γυαλιού. Υπάρχουν και άλλοι τύποι, όπως οι ίνες πυριτίου, βορίου, πολυαιθυλενίου και χαλαζία.

Αυτές που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι οι ίνες άνθρακα, συχνά σε συνδυασμό με ίνες αρωματικού πολυαμιδίου ή γυαλιού. Κάποιες φορές, οι ίνες βορίου αντικαθιστώνται από ίνες άνθρακα και πυριτίου, οι οποίες είναι και φθηνότερες. Οι ίνες άνθρακα αναφέρονται και ως ίνες γραφίτη. Στον Πίνακα 6.1 γίνεται μία σύγκριση τεσσάρων βασικών τύπων ινών.

### 3.2 Μορφές Ινών

Όλες οι παραπάνω ίνες, εκτός από αυτές που είναι από βόριο, παράγονται ως θύσανοι λεπτών νημάτων, οι οποίοι μπορούν να μετατραπούν σε ταινίες μιας διεύθυνσης σε μορφή υφαντών ή πλεκτών υφασμάτων, σωληνοειδών πλεξούδων, χαρτιών και ψαθών ή κομμένα σε μικρά κομμάτια σε σχήμα "U". Έτσι, όλες οι προαναφερθείσες μορφές, εάν διαποτιστούν με ρητίνες, δημιουργούν τα **προεμποτι-**

**σμένα υλικά** (prepregs or preimpregnated materials). Οι τεμαχισμένες ίνες συνδυάζονται, συνήθως, με θερμοπλαστικά υλικά. Τα υλικά αυτά τεμαχίζονται σε μικρούς, σκληρούς κόκκους (pellets), που ωθούνται σε καλούπια με την μέθοδο "injection moulding".

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1**  
Σύγκριση ιδιοτήτων διαφόρων τύπων ινών

Υλικό	E (GPa)	Αντοχή σε Εφελκυσμό (GPa)	Πυκνότητα (gcm <sup>-3</sup> )	Ειδικό Μέτρο (Mm)	Ειδική Αντοχή (Mm)
Aramid	124	3.6	1.45	8.5	.250
Boron	400	3.5	2.58	15.5	.136
Carbon/ UHM	690	3.3	2.17	31.8	.152
HM	400		1.86	21.5	.188
IM	295	5.6	1.74	16.9	.320
VHS		4.3	1.81	13.1	0.237
HS	235	3.5	1.76	13.3	0.200
GlassE	71	2.4	2.54	2.7	.095
R	86	4.4	2.55	3.4	.170
Steelwire	210	3.1	7.80	2.7	.040

Αυτές οι μεταποιημένες μορφές μπορούν να κατασκευαστούν από μίγματα ινών για να παράγουν **υβριδικά** (hybrid) σύνθετα, **ταινίες** ή "**πλεξούδες**". Το προεμποτισμένο υλικό μπορεί να κατασκευασθεί είτε από θερμοπλαστικά είτε από θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή. Για αυτό, λοιπόν, υπάρχουν εκατοντάδες διαφορετικά υλικά διαθέσιμα, το καθένα με συγκεκριμένες μηχανικές ή φυσικές ιδιότητες και εκατοντάδες τύποι, από τους οποίους μπορούμε να διαλέξουμε τα κατάλληλα υλικά για κάθε εφαρμογή.

### 3.2.1 Θύσανοι και "Στουπιά" Ινών

Οι θύσανοι λεπτών νημάτων φέρουν διαφορετικές ονομασίες, ανάλογα με την κατασκευαστική τους διαδικασία. Όσον αφορά, τις ίνες άνθρακα και αρωματικού πο-

λυαμιδίου το υλικό κατασκευάζεται ως ένα ελεύθερο **δέμα** από εκατοντάδες, χιλιάδες νήματα, χωρίς στρέψη, το οποίο ονομάζεται **"tow"** και μοιάζει με **"στυπί"**. Η ίνα γυαλιού κατασκευάζεται ως **"πλεξούδα"** από 102 ή 204 νήματα, τα οποία δένονται μεταξύ τους, χωρίς στρέψη, σε κυλινδρικά τύμπανα ή αν στριφτούν κατά την κατασκευή ονομάζονται **"yarn"**. Κάποιες πλεξούδες (**"yarn"**) μπορεί να στριφτούν μαζί και να σχηματίσουν ένα φύλλο **"yarn"**.

### 3.2.2 Ταινίες μίας Διεύθυνσης

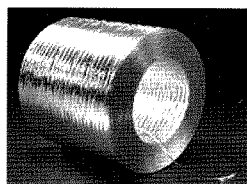
Οι μη υφαντές ταινίες αποτελούνται, συνήθως, από **"tows"** ή **"rovings"**, τα οποία ψεκάζονται σε καλούπια, χωρίς να δημιουργούνται κενά.

Για να παραμείνουν οι ίνες στη θέση τους προεμποτίζονται με ρητίνη, η οποία είναι μερικώς πολυμερισμένη έτσι ώστε να είναι παχύρευστη με σχετικά υψηλό ιξώδες ή με ένα θερμοπλαστικό πολυμερές. Για να μην κολλήσει η ρητίνη σε άλλα επίπεδα της ταινίας, επικαλύπτεται με ένα αποκολλητικό χαρτί **"release paper"**, το οποίο είναι επικαλυμμένο με σιλικόνη.

Πλεκτές ταινίες, μιας διεύθυνσης έχουν τα **"tows"** ή **"rovings"** στη διεύθυνση του στημονιού, δηλαδή κατά το μήκος, συγκρατούμενα μεταξύ τους με αραιά τοποθετημένα υφάδια, από ίνες πολυεστέρα ή γυαλιού υπό μορφή πολύ λεπτού νήματος **'yarn'** (Εικόνα 3.1).



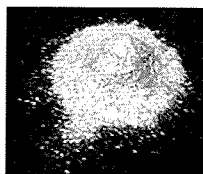
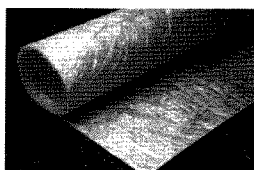
Νήμα Ινών



Ρολό Ινών



Ρολό Ινών

Τεμαχισμένο  
Νήμα

Ύφασμα Κοντών Ινών



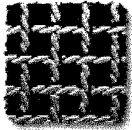
Ύφασμα Μακριών Ινών

**Εικόνα 3.1** Εικόνες διαφόρων τύπων ενίσχυσης.  
[Πηγή: [www.saint-gobainvetrotex.com](http://www.saint-gobainvetrotex.com)]

### 3.2.3 Υφαντά

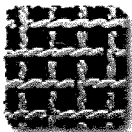
Έχουν αναπτυχθεί πολλά είδη ενισχυτικών υφασμάτων από ίνες, αλλά μόνο πέντε βασικοί τύποι με χαρακτηριστικές πλέξεις χρησιμοποιούνται. Αυτές είναι:

#### 1. Απλή πλέξη (Plain Weave)



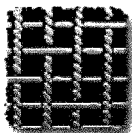
Σε αυτόν τον τύπο πλέξης, που είναι και ο πιο συνήθης, οι διαμήκεις και οι εγκάρσιοι θύσανοι ινών διασταυρώνονται κάθετα μεταξύ τους και βρίσκονται εναλλάξ η μία ομάδα πάνω από την άλλη. Η πλέξη αυτή χαρακτηρίζεται ως η πλέον σταθερή.

#### 2. Η Διαγώνια πλέξη (Twill)



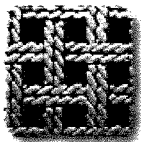
Αυτός ο τύπος πλέξης χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη πυκνότητα ινών ανά μονάδα επιφάνειας από ότι η απλή πλέξη, ενώ έχει διαφορετική μορφή αν κοιτάξουμε το ύφασμα από τις δύο όψεις του. Χαρακτηρίζεται από μία διαγώνια γραμμή από την οποία φέρει και την ονομασία της (twill).

#### 3. Η πλέξη Satin:



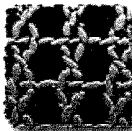
Σε αυτόν τον τύπο πλέξης η μπροστινή επιφάνεια κυριαρχείται από τις διαμήκεις θυσάνους ινών (warp) ενώ έχει διαφορετική μορφή αν κοιτάξουμε το ύφασμα από τις δύο όψεις του. Χρησιμοποιείται ευρύτατα στην βιομηχανία παραγωγής συνθέτων υλικών.

#### 4. Η Καλαθωτή πλέξη (Basket weave)



Αυτός ο τύπος πλέξης είναι μία παραλλαγή της απλής πλέξης στον οποίο δύο ή περισσότερες διαμήκεις θύσανοι διασταυρώνονται με δύο ή περισσότερους εγκάρσιους θυσάνους ινών. Η πλέξη αυτή είναι ισχυρότερη από την απλή αλλά λιγότερο σταθερή γιατί παρουσιάζει μία σχετική χαλαρότητα.

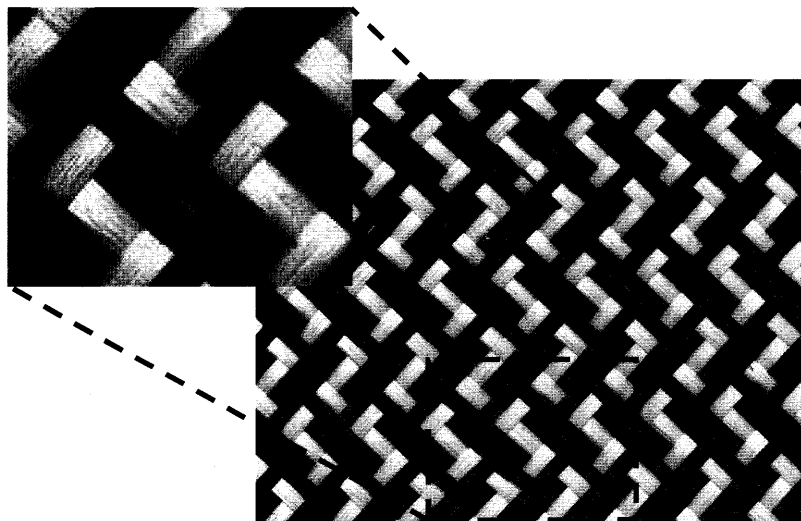
#### 5. Η πλέξη LENO:



Αυτός ο τύπος πλέξης χαρακτηρίζεται ως μία "κλειδωμένη" πλέξη η οποία περιορίζει στο ελάχιστο την μετατόπιση των θυσάνων.

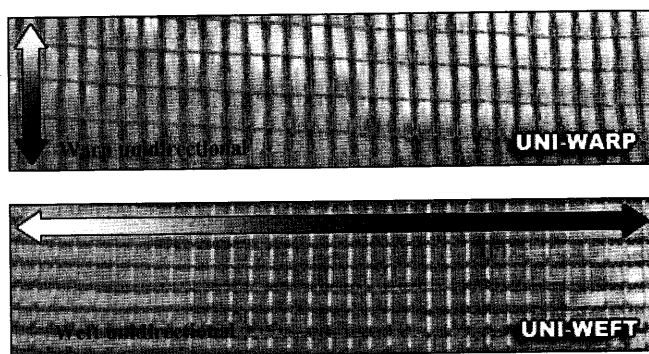
Στην απλή πλέξη κάθε "στημόνι" και "υφάδι" περνάει πάνω από ένα "τέλος" ή "κορυφή" και κάτω από το επόμενο. Το "τέλος" είναι το "στημόνι" και η "κορυφή" το "υφάδι".

Στην πλέξη με διαγώνιες γραμμές κάθε "τέλος" και "κορυφή" περνάει πάνω από δύο και καμία φορά τέσσερις διασταυρούμενες "κλωστές". Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα σχέδιο από διαγώνιες γραμμές στην επιφάνεια του "πλεκτού". Στην πλέξη τύπου Satin κάθε "στημόνι" και "υφάδι" περνάει πάνω από σχήμα "N" και κάτω από διασταυρούμενο νήμα. Η πλέξη περιγράφεται ως "N+1" και έχει δυο όψεις, την "warp face" και την "weft face", οι οποίες είναι σχετικά απαλές επιφάνειες. Όταν διαστρωματώνονται πολλά υφάσματα το ένα πάνω στο άλλο με σκοπό την ανάπτυξη πολύστρωτης πλάκας, είναι καλύτερα να τοποθετούνται οι ίδιες όψεις μαζί, για να μην δημιουργούνται κενά.



Εικόνα 3.2 Πλεκτό ύφασμα από ίνες άνθρακα

Σε όλες τις παραπάνω πλέξεις το κοινό σημείο είναι ότι οι διασταυρώσεις γίνονται στις  $90^\circ$ . Είναι, όμως, πιθανόν να κατασκευάσουμε "διαγώνια πλεκτά" με κλίση  $45^\circ$  ή  $60^\circ$ . Αν το "πλεκτό" δημιουργείται από πλέξιμο, είναι δυνατόν, να παραχθεί ένα "ύφασμα", στο οποίο τα "στημόνια" και τα "υφάδια" είναι ίσια ή παράλληλα, χωρίς στρέβλωση, όπως προέρχεται από την ύφανση. Τα νήματα κρατούνται στη θέση τους με πολύ λεπτά "yarns" από ίνες γυαλιού ή πολυεστερικές ίνες. Αυτού του είδους τα "πλεκτά", τα "non-crimp" (μη κατσαρά), δημιουργούν ισχυρότερα και πιο δύσκαμπτα σύνθετα υλικά, διότι οι ίνες είναι ευθύγραμμες.



**Εικόνα 3.3** Υφάσματα ινών όπου φαίνεται ότι τα νήματα κρατούνται στη θέση τους με πολύ λεπτά "yarns" από ίνες γυαλιού ή πολυεστερικές ίνες. [Πηγή: [www.cofab.com](http://www.cofab.com)]

Υφαντά με τρεις άξονες έχουν τρία "στημόνια" σε  $60^\circ$  μεταξύ τους. Αυτά είναι πολύ εύκαμπτα, χωρίς να επιτρέπουν στα νήματα να χωριστούν, όταν διπλώνονται σε διπλή στροφή. Τέτοιου είδους υλικά χρησιμοποιούνται στις διαστημικές στολές και συγκεκριμένα στα γόνατα και στους αγκώνες.

Με την σειρά που περιγράφηκαν παραπάνω, το απλό, αυτό με τις διαγώνιες γραμμές και το σατινένιο πλέξιμο, είναι πολύ εύκολο να μονταριστούν πάνω σε καμπύλες επιφάνειες και εξαιτίας των νημάτων τους, δεν στρεβλώνονται εύκολα, όταν είναι υφαντά και, άρα, γίνονται πολύ αποτελεσματικά ως ενισχυτικά. Όμως, είναι σημαντικό να κατανοηθεί ότι σε ένα σύνθετο υλικό η ενισχυτική ίνα καταλαμβάνει λιγότερο από το 70% του όγκου του υλικού, συνήθως είναι το 60%, και για υφαντούς σκελετούς, το παραπάνω ποσοστό μοιράζεται σε δυο διευθύνσεις, στα "στημόνια" και στα "υφάδια".

Έτσι, λοιπόν, αφού η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας είναι ανάλογα με την κατ' όγκο περιεκτικότητα των ινών στο σύνθετο, οι ιδιότητες ενός συνθέτου υλικού με υφαντή ενίσχυση είναι πολύ χαμηλότερες από τις τιμές των αντίστοιχων ιδιοτήτων των ινών, που δίνονται στον Πίνακα 3.1.

### 3.3 Ίνες Άνθρακα

Οι ποικιλίες ινών άνθρακα που φαίνονται στον Πίνακα 6.1 αντιπροσωπεύουν χαρακτηριστικούς τύπους μέσα σε κάθε κατηγορία της τρέχουσας παραγωγής. Όλοι οι τύποι ινών, οι οποίοι είναι διαθέσιμοι είναι καταχωρημένοι σε ειδικούς πίνακες.

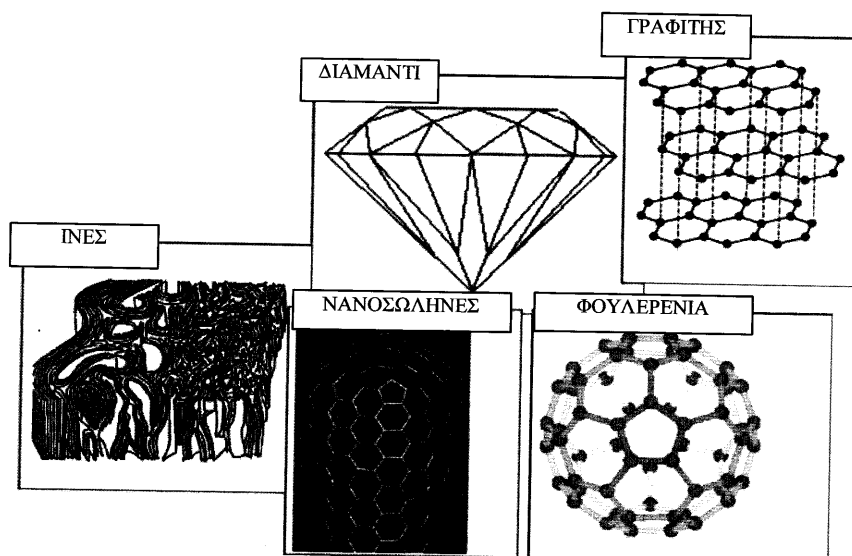
Οι ίνες άνθρακα κατασκευάζονται από δυο προγονικά υλικά, που αποτελούν κατά κάποιον τρόπο, τις πρώτες ύλες. Είναι πιθανόν, να χρησιμοποιηθεί σαν πρώτες ύλες μία μεγάλη ποικιλία υλικών, όπως ρητίνη φανικού οξέος, διάφορα πολυμερή, συν-

θετικό μετάξι και υδρογονάνθρακες. Αυτά όλα έχουν χρησιμοποιηθεί, αλλά τώρα χρησιμοποιούνται μόνο το P.A.N. (πολυ-ακρίλο-νιτρίλιο) και η πίσσα από πετρέλαιο ή κάρβουνο. Σε εξέλιξη βρίσκεται η παραγωγή κοντών ινών από αέριους υδρογονάνθρακες και μπορούν να παραχθούν άλλα εμπορικά προϊόντα, που θα είναι διαθέσιμα σε μερικά χρόνια.

### 3.3.1 Ίνες Ανθρακα με Βάση το P.A.N (Πολυ-Ακρίλο-Νιτρίλιο)

Ο πρόδρομος P.A.N. πρέπει να στροβιλιστεί, σε καθαρές συνθήκες, με πολυμερισμένο ακρίλο-νιτρίλιο μαζί με συμμονομερές και να διαλυθεί σε ένα διάλυμα για να δημιουργήσει ένα παχύρευστο υγρό. Αυτό πρέπει να είναι ελεύθερο από αέρια και ξένα σωματίδια. Στη συνέχεια, αντλείται μέσα σε ένα στερεωτικό μάνιο, το οποίο αφαιρεί το διαλυτό υπόλειμα των στερεών νημάτων P.A.N. Το "spinnerette" (σουρωτήρι) μπορεί να έχει μέχρι και 320000 χιλιάδες οπές, έτσι ώστε να παράγει ένα "στουπί" συνεχόμενων νημάτων. Αυτό το "στουπί" τεντώνεται, ενώ θερμαίνεται, πλένεται, στεγνώνεται και είτε τυλίγεται σε κυλίνδρους είτε χρησιμοποιείται για τα "στουπιά" των 160000 ή 320000 νημάτων, κατασρώνεται και τοποθετείται σε κουτιά. Τα συνηθισμένα "στουπιά" έχουν 1000, 3000, 6000, 12000, 40000, 160000 ή 320000 χιλιάδες νήματα.

Οι ειδικοί πρόδρομοι "στουπιών" από P.A.N. είναι, κανονικά, κατασκευασμένοι από μία από τις εταιρίες, που κατασκευάζουν υφαντές ίνες, αφού οι εμπορικές ίνες P.A.N., (διαφορετικής σύνθεσης από τις προηγούμενες), είναι η ακρυλική ίνα, που χρησιμοποιείται για χαλιά και είδη ρουχισμού. Οι κατασκευαστές της ίνας από άνθρακα αγοράζουν τα παραπάνω "στουπιά" από αυτές τις εταιρίες, παρόλο που όλο και πιο πολύ δημιουργούνται ενωμένες επιχειρήσεις με σκοπό να δώσουν στους κατασκευαστές ινών άνθρακα περισσότερο έλεγχο στην ποιότητα του προγονικού τους υλικού. Η μετατροπή του P.A.N. σε ίνα άνθρακα γίνεται σε δυο ή τρία στάδια. Εξαρτάται από τον τύπο της ίνας που κατασκευάζεται. Το πρώτο στάδιο είναι η οξείδωση, η οποία μετατρέπει το πολυμερές P.A.N. σε μία δομή σε κλιμακωτή μορφή. Δηλαδή, μία σειρά από δακτυλίους ενωμένους μεταξύ τους, που σχηματίζουν τη βάση της δομής της τελικής ίνας. Το ακρίλο-νιτρίλιο έχει τον εξής τύπο:  $\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{CN}$  και το P.A.N. είναι μία μακριά αλυσίδα από μόρια ακρίλο-νιτρίλιου συνδεδεμένα από ομάδες CH με την ομάδα CN από τη μία πλευρά. Η οξειδωμένη ίνα από P.A.N. δεν είναι εύφλεκτη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο του αμιάντου.



**Εικόνα 3.4** Μετατροπή της δομής του άνθρακα κατά την γραφίτιση, ανάλογα με την θερμοκρασία και τη μέθοδο-αλλοτροπικές μορφές άνθρακα

Η διαδικασία της οξείδωσης γίνεται με σύγχρονο εφελκυσμό στον αέρα στους 200 με 300°C. Ακολουθεί η ανθρακοποίηση σε ατμόσφαιρα αζώτου στους 1000 ή 1500°C, ώστε να παραχθούν οι τύποι *HS*, *VHS* και *IM*. Για τις υψηλού μέτρου ελαστικότητας ίνες, (δηλ. οι τύποι *HM* και *UHM*), είναι αναγκαία η παραπέρα θέρμανση στους 2000 και 3200°C. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, τόσο μεγαλύτερο είναι το μέτρο ελαστικότητας της υπό κατασκευή ίνας. Για να δεσμεύονται καλά τα "στουπιά" των ιών με τις ρητίνες ή τα θερμοπλαστικά υλικά, τους γίνεται μια επιφανειακή κατεργασία. Γενικά, είναι μία ηλεκτρολυτική διαδικασία, αλλά μερικές φορές είναι μία απλή οξείδωση. Μετά από όλα αυτά, για να είναι εύχρηστες, επικαλύπτονται με μια μικρή ποσότητα από μία κόλλα ζωικής προέλευσης, επιλεγμένη, έτσι ώστε να ταιριάζει με την ρητίνη ή το πολυμερές, που χρησιμοποιείται ως μήτρα. Τελικά, τυλίγονται σε κυλίνδρους.



### 3.3.2 Ίνες Άνθρακα με Βάση την Πίσσα

Η πίσσα από πετρέλαιο και κάρβουνο είναι ο δεύτερος σημαντικός πρόδρομος για την κατασκευή ινών άνθρακα. Ήλπιζαν, αρχικά, ότι η χρήση ενός παρά-προϊόντος φθηνά διαθέσιμου, θα είχε ως αποτέλεσμα την σημαντική μείωση του κόστους κατασκευής των ινών. Η σημερινή άποψη είναι ότι το κόστος καθαρισμού και μετατροπής της πίσσας σε κατάλληλη μορφή για την κατασκευή ινών αντισταθμίζει το χαμηλότερο κόστος του ακατέργαστου υλικού, έτσι ώστε για ίνες της ίδιας ποιότητας και με τις ίδιες ιδιότητες, οι τιμές των ινών με βάση το P.A.N. και αυτών με βάση την πίσσα να είναι όμοιες. Οπωσδήποτε, οι ίνες με βάση την πίσσα μπορεί να έχουν διαφορετικές ιδιότητες. Όπως, για παράδειγμα, μπορούν να έχουν υψηλότερα μέτρα ελαστικότητας σε εφελκυσμό και μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Μέχρι πρόσφατα, οι παραπάνω ίνες ήταν πιο αδύναμες από τις ίνες με βάση το P.A.N. για το ίδιο μέτρο ελαστικότητας, αλλά αυτό αλλάζει. Για την αεροναυπηγική, όπου το βάρος είναι κρίσιμο, η σημαντική σύγκριση είναι μεταξύ της ειδικής αντοχής και του ειδικού μέτρου ελαστικότητας. Η ηλεκτρική αντίσταση είναι, επίσης, σημαντική για την ηλεκτρομαγνητική μόνωση (EMI). Τιμές για μοντέρνες ίνες φαίνονται στον Πίνακα 6.2

Έτσι, για δορυφορικές κατασκευές, οι οποίες απαιτούν το υψηλότερο διαθέσιμο ειδικό μέτρο ελαστικότητας, κατάλληλες ίνες είναι οι Pitch P-100. Ενώ, για την αεροναυπηγική, όπου η αντοχή και η επιμήκυνση σε θραύση (αντοχή/μέτρο) είναι οι σημαντικές ιδιότητες, κατάλληλες ίνες είναι οι T650/42 ή T-300 με βάση το P.A.N.

Κατά την διάρκεια του 1989 πέντε εταιρίες ανακοίνωσαν την παραγωγή των ενισχυτικών ινών άνθρακα με βάση την πίσσα. Οι εταιρείες αυτές και οι ίνες που κατασκεύασαν είναι: *Dupont (PRD-172)*, *Osaka Gas Co (Donacarbo-F)*, *Nippon Petrochemical (Granoc)*, *Petoca (Carbonic)* και *Toa Nenryo Kogyu (Tonen)*. Αυτές οι ίνες έχουν τιμές μέτρου ελαστικότητας από 150 μέχρι 900 GPa και αντοχές σε εφελκυσμό γύρω στα 3 GPa με πυκνότητα περίπου 2.15 gr/cc. Η ειδική τους αντίσταση είναι χαμηλή (2 ως 5  $\mu\Omega\cdot m$ ) και η θερμική αγωγιμότητα τους υψηλή (200W/m  $^{\circ}K$ ). Η αντοχή σε θλίψη είναι πολύ πιο χαμηλή από την αντοχή σε εφελκυσμό. Οι ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες τους είναι πιο ενδιαφέρουσες από τις μηχανικές, εκτός από κατασκευές κρίσιμης δυσκαμψίας, όπου απαιτείται υψηλό μέτρο.

### 3.3.3 Δομή των Ινών Άνθρακα

Οι ίνες άνθρακα χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή και μέτρο, έχουν διάμετρο 7 με 8  $\mu\text{m}$  και αποτελούνται από κρυσταλλίτες γραφίτη του τύπου 'turbo static' που είναι μια αλλοτροπική μορφή του άνθρακα. Σε ένα μονοκρυστάλλο άνθρακα, τα άτομα του άνθρακα έχουν εξαγωνική διάταξη (Εικόνα 3.5) σε επίπεδα διατεταγμένα το ένα πάνω στο άλλο σε κανονική σειρά ABAB. Τα άτομα σε κάθε επίπεδο στρώση συνδέονται μεταξύ τους με ισχυρότατους ομοιοπολικούς δεσμούς, ενώ οι επίπεδες στρώσεις συγκρατούνται μεταξύ τους με αδύνατες δυνάμεις Van der Waals. Αυτό σημαίνει ότι οι βασικές κρυσταλλικές μονάδες είναι έντονα ανισότροπες. Έτσι, το μέτρο του Young παράλληλα προς τον  $c$ -άξονα, δηλαδή κάθετα προς τις επίπεδες στρώσεις είναι  $30 \text{ GNm}^{-2}$ . Η απόσταση μεταξύ των επιπέδων στρώσεων είναι  $0.335 \text{ nm}$ . Ο γραφίτης τύπου 'turbostatic' μοιάζει με τον μονοκρυσταλλικό γραφίτη με την διαφορά ότι οι επίπεδες στρώσεις δεν παρουσιάζουν κανονική διάταξη κατά την διεύθυνση του άξονα  $c$  και η απόσταση μεταξύ των επιπέδων στρώσεων είναι περίπου  $0.34 \text{ nm}$ .

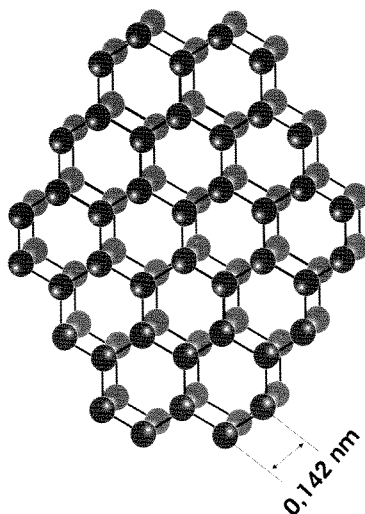
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2

Ιδιότητες Ινών Άνθρακα

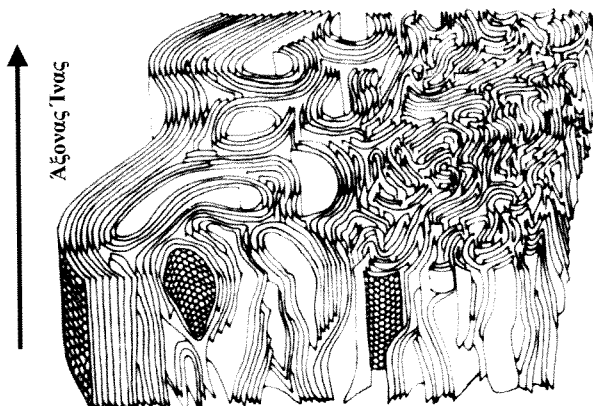
Προγονικό Υλικό και τύπος	Μέτρο Ινας (GPa)	Αντοχή Ινας (GPa)	Ποικνότητα ( $\text{g/cm}^3$ )	Ειδικό Μέτρο (Mm)	Ειδική Αντοχή (Mm)	Ειδική Αντίσταση ( $\mu\Omega\text{m}$ )
PitchP-100	724	2.2	2.15	33.6	.102	2.5
PANHM45	441	1.76	1.9	23.2	.093	7.8
PitchP-55	380	2.1	2.0	19.0	.105	7.5
PANHMS	370	2.75	1.86	19.9	.148	10
PANT650/42	290	4.83	1.787	16.2	.270	13
PANT-300	230	3.2	1.76	13.1	.182	18
PitchP25W	160	1.4	1.9	8.4	.074	13

Για να παρουσιάζουν οι ίνες του άνθρακα υψηλό μέτρο και αντοχή, πρέπει οι επίπεδες στρώσεις του γραφίτη να είναι διατεταγμένες κατά την διεύθυνση του άξονα της ίνας. Στην πράξη όμως, οι κρυσταλλικές μονάδες είναι πολύ μικρές, άτακτα διατεταγμένες και παρουσιάζουν ασυνέχειες δομής. Στην Εικόνα 3.6 φαίνεται σχηματικά η δομή των ινών άνθρακα έτσι όπως λαμβάνεται με την μέθοδο  $x\text{-ray small angle}$

scattering. Πλήρης περιγραφή της δομής των ιών άνθρακα έγινε από τους Johnson (1971), Fourdeux, Perret και Ruland (1971), Reynolds (1973) και Johnson (1980). Οι μέσες διαστάσεις των διαστρωματώσεων των επιπέδων στρώσεων γραφίτη κάθετα και παράλληλα προς την διεύθυνση της ίνας μπορούν να μετρηθούν με ακτίνες x (x-ray diffraction) και είναι μικρότερες των 10 nm.



Εικόνα 3.5 Διάταξη των ατόμων άνθρακα στις επίπεδες στρώσεις του γραφίτη



Εικόνα 3.6 Σχηματική αναπαράσταση της δομής των ιών άνθρακα, έτσι όπως προκύπτει από την μέθοδο X-ray diffraction και το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.  
[Πηγή: S.C. Bennett, PhD Thesis, University of Leeds, 1976.]

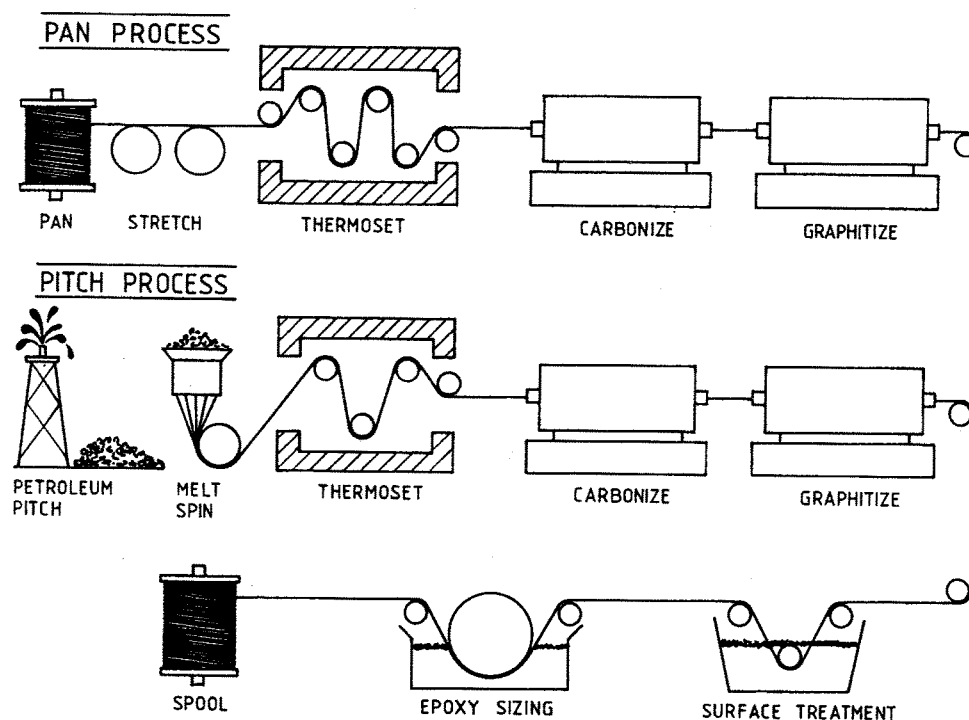
Το μέτρο των ινών άνθρακα εξαρτάται από τον βαθμό προσανατολισμού των στρώσεων, ο οποίος, με την σειρά του εξαρτάται από τον τρόπο κατασκευής των ινών. Ατέλειες δομής, όπως αυτές που φαίνονται στην Εικόνα 3.6, οδηγούν στην δημιουργία κενών αέρα (voids) πολύπλοκου σχήματος που διατάσσονται κατά μήκος της ίνας. Τα κενά αυτά, αποτελούν αδύναμα σημεία της δομής όπου παρουσιάζονται συγκεντρώσεις τάσεων με αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής της ίνας. Άλλες αδυναμίες δομής που συνδέονται άμεσα με τον τρόπο παρασκευής των ινών είναι οι επιφανειακές ατέλειες και οι μακροκρύσταλλοι. Η επίδραση των ατελειών δομής στην συμπεριφορά των ινών άνθρακα, εξετάστηκε από τους Reynolds και Moreton (1980).

Η διάταξη των επιπέδων στρώσεων κατά την διατομή της ίνας αποτελεί έναν άλλο σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει τις εγκεαρσιες και διατμητικές ιδιότητες της ίνας. Έτσι, για παράδειγμα, οι ίνες άνθρακα που έχουν σαν βάση το κανονικό πολυακρυλονιτρίλιο (PAN-based) και που χαρακτηρίζονται ως **Ινες Τύπου I** (Type I-carbon fibres) έχουν μια λεπτή επιδερμική επιφάνεια ενώ στο κέντρο τους περιέχουν κρυσταλλίτες τυχαίου προσανατολισμού. Αντίθετα, σε άλλες περιπτώσεις ινών, όπως εκείνες που βασίζονται στην πίσσα (pitch-based fibres). Οι επίπεδες στρώσεις έχουν μια ακτινική διάταξη. Αυτές οι διαφορές στη δομή έχουν σαν αποτέλεσμα να παρουσιάζονται μεγάλες διαφορές στις ιδιότητες των ινών.

### **3.3.4 Μέθοδοι Παραγωγής των Ινών Άνθρακα**

Υπάρχουν τρεις κύριες μέθοδοι παραγωγής ινών άνθρακα με τα επίπεδα του γραφίτη προσανατολισμένα παράλληλα προς τον άξονα της ίνας. Μια πλήρης περιγραφή των μεθόδων αυτών δίνεται από τον Gill (1972). Εδώ θα αναφερθούμε μόνο ονομαστικά στις μεθόδους, οι οποίες είναι οι εξής:

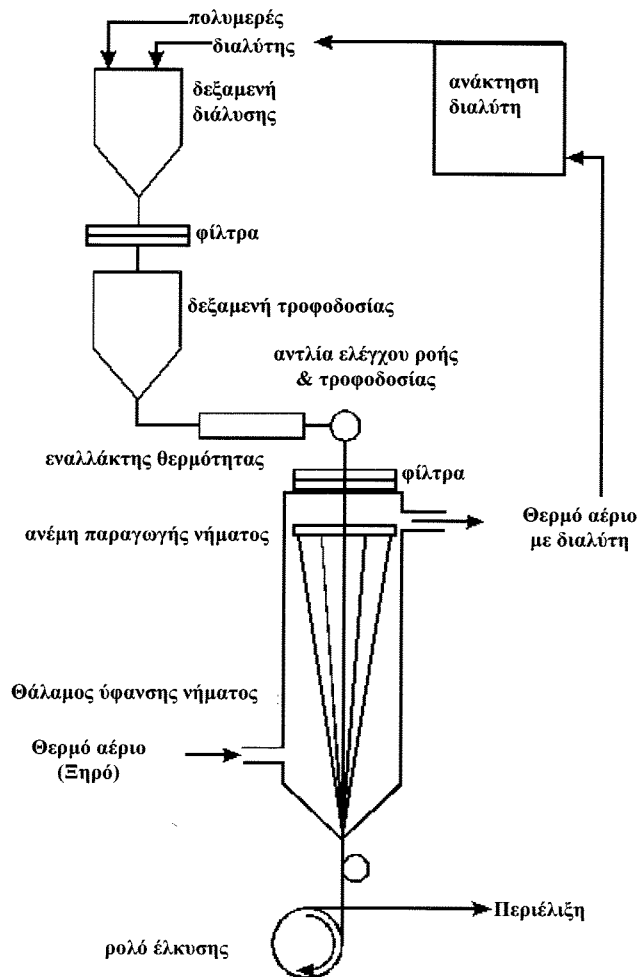
- (α) Προσανατολισμός του αρχικού πολυμερούς με προένταση
- (β) Προσανατολισμός με περιδίνηση
- (γ) Προσανατολισμός κατά την γραφίτιοποίηση



Εικόνα 3.7 Σχηματική αναπαράσταση παραγωγής ινών άνθρακα

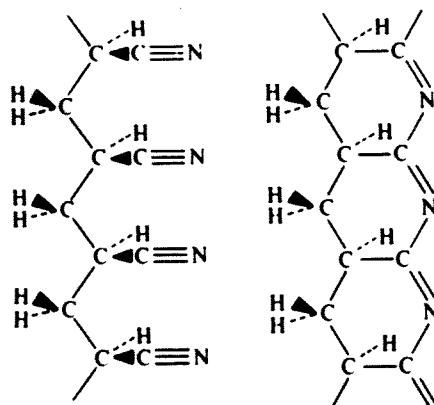
### (α) Προσανατολισμός του αρχικού πολυμερούς με προένταση

Σαν αρχικό πολυμερές χρησιμοποιείται το **πολυακρυλονιτρίλιο (PAN)**. Το PAN είναι ένα πολυμερές που μοιάζει στη δομή με το πολυαιθυλένιο, με τη διαφορά ότι ορισμένα υδρογόνα έχουν αντικατασταθεί με ρίζες κυανίου (-CN). Σε πρώτη φάση το PAN με εφελκυσμό μετατρέπεται σε ίνες με την κύρια αλυσίδα προσανατολισμένη κατά τον άξονα των ινών. Στη συνέχεια, οι προεντεταμένες ίνες θερμαίνονται, οπότε οι ενεργές ρίζες κυανίου αλληλεπιδρούν και σχηματίζουν ένα πολυμερές με δομή κλίμακας (ladder polymer) που περιέχει έξι δακτυλίους (Εικόνα 3.9). Ενώ η ίνα βρίσκεται κάτω από εφελκυστικό φορτίο, θερμαίνεται σε περιβάλλον οξυγόνου που το οδηγεί σε νέα χημική αντίδραση με αποτέλεσμα τη δημιουργία **σταυρωειδών δεσμών (cross-links)** μεταξύ των μορίων της κλίμακας.



Εικόνα 3.8 Κατασκευή ινών άνθρακα

Το οξειδωμένο PAN με περαιτέρω θέρμανση μετατρέπεται σε γραφίτη του τύπου “turbo static”. Το μέτρο και η αντοχή των ινών εξαρτάται από την τελική θερμοκρασία επεξεργασίας, που προσδιορίζει το μέγεθος των κρυστάλλων και τον προσανατολισμό τους. Μία παρόμοια μέθοδος χρησιμοποιεί σαν προγονικό υλικό (precursor) το rayon.



Εικόνα 3.9 Μεταβολή του μορίου του PAN σε δομή κλιμακωτού μορίου

### (β) Προσανατολισμός με περιδίνηση

Η μέθοδος αυτή που αναπτύχθηκε από τον Otani στην Ιαπωνία, συνίσταται στην περιδίνηση τηγμένης πίσσας με αποτέλεσμα την παραγωγή ινών. Η πίσσα θερμαίνεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των  $350^{\circ}\text{C}$  και μετατρέπεται με πολυμερισμό σε "μεσοφασική πίσσα" (mesophase pitch) που περιέχει ισότροπο και ανισότροπο (υγρή κρυσταλλική φάση) υλικό. Η τηγμένη πίσσα νηματοποιείται αφού περάσει μέσα από μικρές οπές. Κατά την φάση αυτή επιτυγχάνεται και ο προσανατολισμός των μορίων. Ανάλογα με τις συνθήκες της νηματοποίησης επιτυγχάνεται και διαφορετικός βαθμός προσανατολισμού. Στη συνέχεια τα νήματα οξειδώνονται σε θερμοκρασίες μικρότερες της θερμοκρασίας τήξης για να αποφευχθεί η σύντηξη των διαφορετικών στρώσεων των ινών. Τέλος, τα νήματα ανθρακοποιούνται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των  $2000^{\circ}\text{C}$ .

Σε μερικά από τα παραπάνω στάδια παραγωγής απαιτείται ο σύγχρονος εφελκυσμός των ινών έτσι ώστε να διατηρείται ο επιθυμητός προσανατολισμός και να αποφεύγεται η χαλάρωση. Οι ίνες που παράγονται με την μέθοδο αυτή χαρακτηρίζονται από κρυστάλλους μεγαλύτερου μεγέθους από τους αντίστοιχους των ινών από PAN.

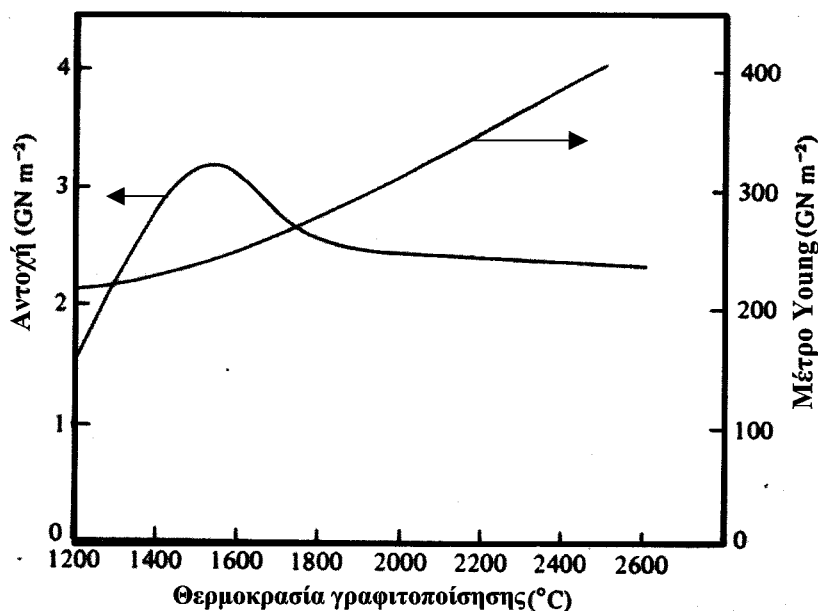
### γ) Προσανατολισμός κατά την γραφίτοποίηση

Κατά το στάδιο της γραφίτοποίησης, που συμβαίνει όπως είδαμε σε υψηλές θερμοκρασίες, οι ίνες που βασίζονται σε PAN, rayon ή πίσσα μπορούν συγχρόνως να

εφελκύνονται με αποτέλεσμα την ολίσθηση των επιπέδων του γραφίτη και τον περαιτέρω προσανατολισμό τους κατά την διεύθυνση του άξονα της ίνας.

Βέβαια, οι παραπάνω μέθοδοι απαιτούν περαιτέρω βελτίωση. Κάθε μία από αυτές παρουσιάζει τα προτερήματά της καθώς και τα μειονεκτήματά της ανάλογα με την λειτουργικότητα, το κόστος, την ευκολία κατασκευής και την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Με κατάλληλη επιλογή της μεθόδου, των παραμέτρων που υπεισέρχονται στην μέθοδο και του προσανατολισμού των στρώσεων μπορούμε να επιτύχουμε την κατασκευή ινών με συγκεκριμένες φυσικές ιδιότητες που απαιτούνται για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Δύο παραδείγματα είναι τα εξής: Οι ιδιότητες των ινών άνθρακα Τύπου I και Τύπου II που βασίζονται στο PAN και που κατασκευάζονται με τη μέθοδο (α), φαίνονται στον Πίνακα 3.3-3.4. Παρατηρούμε ότι οι ίνες Τύπου I έχουν γραφίτοποιηθεί σε τέτοια θερμοκρασία ώστε να παρουσιάζουν μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και σχετικά χαμηλή αντοχή ενώ οι ίνες Τύπου II έχουν γραφίτοποιηθεί σε τέτοια θερμοκρασία ώστε να παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή.

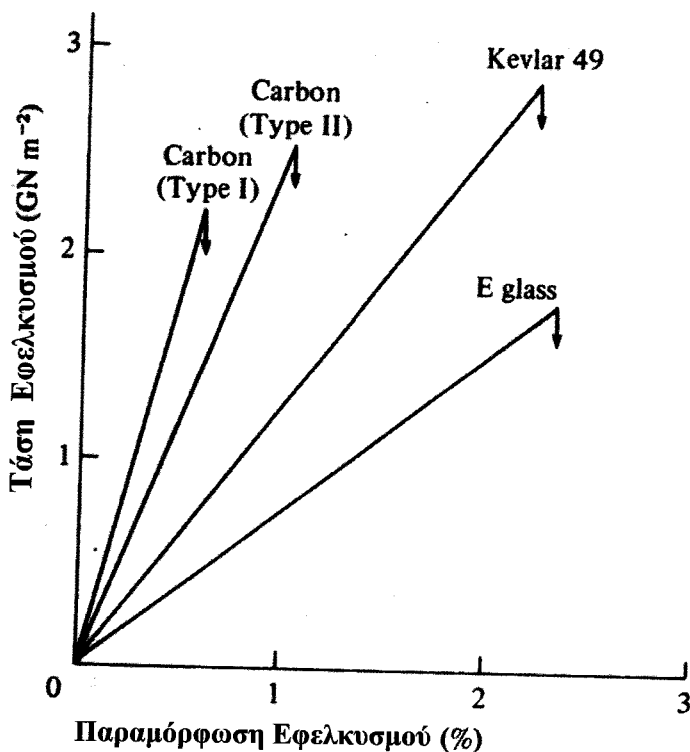
Η μεταβολή της αντοχής και του μέτρου συναρτήσει της τελικής θερμοκρασίας γραφίτοποίησης, φαίνεται στην Εικόνα 3.10 που βασίζεται στα αποτελέσματα της εργασίας των Watt, Phillips και Johnson (1966).



Εικόνα 3.10 Επίδραση της θερμοκρασίας γραφίτοποίησης στο μέτρο και την αντοχή των ινών άνθρακα



Οι ίνες άνθρακα παρουσιάζουν τέλεια ελαστική συμπεριφορά σχεδόν μέχρι την τάση θραύσεως. Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των ινών άνθρακα Τύπου I και II φαίνονται στην Εικόνα 3.11. Παρατηρούμε ότι οι ίνες με υψηλό μέτρο ελαστικότητας έχουν μικρότερη παραμόρφωση θραύσεως (0.5%) σε αντίθεση με τις ίνες υψηλής αντοχής που παρουσιάζουν παραμόρφωση θραύσεως της τάξης του 1%. Αυτό οφείλεται στην διαφορετική δομή των δύο τύπων ινών.



Εικόνα 3.11 Καμπύλες  $\sigma$ - $\epsilon$  διαφόρων τύπων ινών.

Τα κατακόρυφα βέλη αναφέρονται στη θραύση.

[Πηγή: D. Hull, An Introduction to Composite Materials, Cambridge Univ. Press 1981]

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των μηχανικών ιδιοτήτων των ινών είναι οι μεγάλες αποκλίσεις τους. Έτσι, πειράματα εφελκυσμού σε μεμονωμένες ίνες δίνουν αποτελέσματα αντοχής που κυμαίνονται μέσα σε ένα μεγάλο εύρος τιμών. Για παράδειγμα, ο Proctor (1972) ανέφερε ότι σε μία δεσμίδα ινών άνθρακα Τύπου I οι ίνες παρουσίασαν αντοχή που κυμαίνονταν μεταξύ 0.5 και 4.3 GNm<sup>2</sup> ενώ το μέτρο του Young κυμαινόταν μεταξύ 270 και 580 GNm<sup>2</sup>. Όμοια, πειράματα εφελκυσμού σε

ίνες έδειξαν ότι η μέση αντοχή των ινών εξαρτάται από το ελεύθερο μήκος του δοκιμίου. Για παράδειγμα, η αντοχή μεταβάλλεται από  $2.1 \text{ GNm}^{-2}$  όταν το ελεύθερο μήκος είναι 1cm, σε  $1.1 \text{ GNm}^{-2}$ , όταν το ελεύθερο μήκος είναι 20cm. Αυτός ο τύπος απόκρισης των αποτελεσμάτων, είναι τυπικός των ινών που περιέχουν μια κατανομή ατελειών κατά το μήκος τους, έτσι ώστε η πιθανότητα εμφάνισης ατελειών αυξάνει καθώς αυξάνει το ελεύθερο μήκος της ίνας. Γι' αυτό, η αποτίμηση των πειραματικών αποτελεσμάτων βασίζεται σε στατιστική ανάλυση. Η εξάρτηση της αντοχής των ινών από το μήκος τους έχει μελετηθεί στατιστικά από τους Hitchon και Phillips (1979).

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3 - 3.4**  
**Ιδιότητες Ινών Ανθρακα, Γυαλιού και Kevlar 49**

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΜΟΝΑΔΕΣ	Carbon TYPE I	Carbon TYPE II	E-glass	Kevlar 49
Διάμετρος	μm	7,0 - 9,7	7,6 - 8,6	8 - 14	11,9
Ποικνότητα	$10^3 \text{ Kgm}^{-3}$	1,95	1,75	2,56	1,45
Μέτρο $E_{//}$ Μέτρο $E_{\perp}$	$\text{GNm}^{-2}$	390 12	250 20	76 76	130 ---
Παραμ/ση θραύσης	%	0,5	1,0	1,8 - 3,2	2,2 - 2,8
Συντ/της Θερμικής Διαστολής	$10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	$\alpha_{//} : -0,5-1.2$ $\alpha_{\perp} : 7 - 12$	-0,1 - -0,5 7-12	4,9 4,9	-2 59
Θερμική Αγωγιμότητα	$\text{W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} //$	105	24	1,04	0,04
Ευκαμψία με βάση την ευκαμψία των ινών Carbon TYPE I που θεωρείται =1	----	1,00	1,56	1,44	0,59
Αντοχή σε εφέλκυσμό	$\text{GNm}^{-2}$	2,2	2,7	1,4 - 2,5	2,8 - 3,6
Ελάχιστη Ακτίνα Καμπυλότητας	mm	0,71	0,37	0,12	---

### 3.4 Ίνες Γυαλιού

Ένας αριθμός από διαφορετικές συνθέσεις γυαλιού χρησιμοποιούνται με συγκεκριμένες διαφορετικές ιδιότητες. Ειδικότερα, ο τύπος γυαλιού A, υλικό που χρησιμοποιείται για παράθυρα, είναι τώρα απαρχαιωμένος για την κατασκευή ινών, αλλά αυτός ο τύπος ήταν φθηνός και είχε καλή αντίσταση στα οξέα. Η ανάγκη για ειδικές ηλεκτρικές ιδιότητες για εφαρμογές όπως, κελύφη ραντάρ, οδήγησε στην ανάπτυξη του γυαλιού τύπου E, το οποίο είναι τώρα η ποικιλία που παράγεται στην μεγαλύτερη κλίμακα. Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές, όπως συνθέσεις χωρίς μαγνήσιο ή χωρίς φθόριο, που παράγονται λόγω της διαθεσιμότητας των τοπικών ακατέργαστων υλικών ή λόγω περιορισμένης προμήθειας του φθορίου. Το γυαλί τύπου C αναπτύχθηκε εξαιτίας της χημικής του αντίστασης. Το γυαλί τύπου D αναπτύχθηκε ως ένας βελτιωμένος ηλεκτρικός τύπος για μοντέρνα κελύφη ραντάρ και το S ή R γυαλί, η αμερικανική και ευρωπαϊκή έκδοση, αναπτύχθηκαν λόγω της υψηλότερης αντοχής και μέτρου σε σχέση με το γυαλί τύπου E, για την ενίσχυση των πλαστικών υλικών.

Η εταιρεία *Nittobo Boseki Co.Ltd* παρουσίασε τον τύπο γυαλιού T ("*Texxes*"), το οποίο λέγεται ότι έχει 36% υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό, 16% υψηλότερο μέτρο και 40% χαμηλότερη σταθερά θερμικής διαστολής από ότι ο τύπος γυαλιού E, αλλά δεν υπάρχουν αποτελέσματα από δοκιμές. Οι διάμετροι των νημάτων γυαλιού κυμαίνονται μεταξύ 6 και 15 μικρομέτρων. Νήματα μεγαλύτερης διαμέτρου αυξάνουν την παραγωγικότητα.

Οι ίνες γυαλιού παράγονται από λιωμένο γυαλί εφελκύνοντας το μέσα από συστήματα οπών, τα οποία έχουν, κανονικά, 102 ή 204 οπές με μέγιστη ταχύτητα 3000 ως 4000 μέτρων ανά λεπτό. Έτσι, τα νήματα εκτείνονται και μειώνεται η διάμετρος τους. Τα νήματα αυτά ψύχονται πολύ γρήγορα με ακτινοβολία και με αγωγή, πριν επικαλυφθούν με τη ζωική κόλλα, η οποία εμποδίζει τα νήματα να τριφτούν μεταξύ τους, όταν τοποθετούνται μαζί για να δημιουργήσουν μια πλεξούδα. Το σύνολο των ινών τυλίγεται σε έναν κύλινδρο στεγνό και θερμό.

Ανάλογα με την χρήση για την οποία προορίζεται η ίνα γυαλιού, μία "πλαστική" ή μια "υφαντή" ζωική κόλλα μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Για ύφανση και για άλλες παρόμοιες διαδικασίες η κόλλα ζωικής προέλευσης αποτελείται, συνήθως, από άμυλο και λιπαντικά φυτικά έλαια. Μετά την ύφανση η κόλλα καίγεται από το "υφαντό" (καθαρισμός με θέρμανση) και τότε προστίθεται ένα χημικό πρόσθετο. Η "πλαστική" κόλλα χρησιμοποιείται σε ίνες, οι οποίες μετατρέπονται σε "rovings", ψάθες, "yarns" και τεμαχισμένες πλεξούδες για ενίσχυση. Οι συνθέσεις αυτών των κολλών είναι εμπιστευτικές, αλλά, συνήθως, περιλαμβάνουν πρόσθετα, όπως είναι

το πολυβινυλικό οξικό άλας, μία ρητίνη, ένα λιπαντικό ή ένα πρόσθετο σύζευξης και μερικές φορές ένα αντιστατικό πρόσθετο.

Διάφοροι συνδυασμοί ορυκτών γυαλιών έχουν δοκιμαστεί για την κατασκευή ινών. Ο πιο κοινός τύπος ινών γυαλιού βασίζεται στο διοξείδιο του πυριτίου (silica) ( $\text{SiO}_2$ ) με προσθήκη οξειδίων του Ασβεστίου, Βορίου, Νατρίου, Σιδήρου και Αλουμινίου. Τα γυαλιά αυτά είναι συνήθως άμορφα ενώ αν θερμανθούν σε υψηλές θερμοκρασίες επί πολύ διάστημα αποκτούν κάποια κρυσταλλικότητα. Αυτό συνήθως οδηγεί σε κάποια μείωση της αντοχής τους. Η σύνθεση τριών τύπων γυαλιού δίνονται στον Πίνακα 3.5.

Ο **τύπος E** (E-glass, E for electrical) είναι ο πιο κοινός τύπος γυαλιού που συνήθως χρησιμοποιείται, έχει μεγάλη αντοχή και μέτρο, καλές ηλεκτρικές ιδιότητες και δεν επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες.

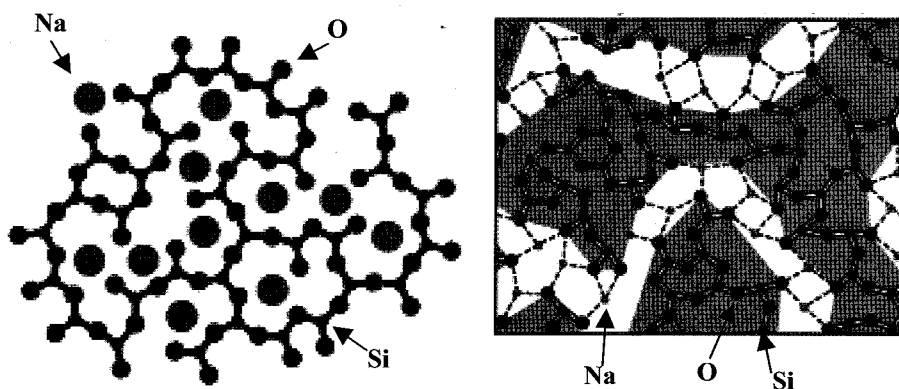
Ο **τύπος C** (C-glass, C for corrosion) είναι ανθεκτικότερος στη χημική διάβρωση σε σχέση με τον τύπο E αλλά είναι πιο ακριβός και χαρακτηρίζεται από μικρότερη αντοχή.

Ο **τύπος S** είναι πιο ακριβός από τον τύπο E αλλά έχει υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας και αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες. Χρησιμοποιείται σε ειδικές εφαρμογές, όπως στην βιομηχανία αεροσκαφών, όπου το υψηλό κόστος τους αντισταθμίζεται από το υψηλό μέτρο ελαστικότητας.

Συνεχείς ίνες γυαλιού μπορούν να παρασκευασθούν με διάσπαση τήγματος γυαλιού σε δεξαμενές που στο κάτω άκρο διαθέτουν οπές νηματοποιήσεως. Το γυαλί ρέει λόγω του βάρους του, οπότε μετά την έξοδό του από τις τρύπες σχηματίζονται πολύ λεπτές ίνες. Στην συνέχεια οι ίνες περιτυλίσσονται σε τύμπανα με ταχύτητες της τάξεως μερικών χιλιομέτρων ανά λεπτό. Ο έλεγχος της διαμέτρου των ινών γίνεται με κατάλληλη μεταβολή της διαμέτρου των οπών της δεξαμενής, και του ιξώδους, ενώ το αποτέλεσμα με τη σειρά του εξαρτάται από τη σύνθεση, τη θερμοκρασία, τη διάμετρο των οπών και την ταχύτητα περιελίξεως. Η διάμετρος του βιομηχανικού E-glass-fibre είναι της τάξεως των 8-15  $\mu\text{m}$  και η συνήθης τιμή είναι 11  $\mu\text{m}$ .

Η αντοχή και το μέτρο του γυαλιού καθορίζεται κατ' αρχήν από την τρισδιάστατη δομή των οξειδίων από τα οποία συνίσταται. Μία εικόνα της άμορφης δομής δίνεται στην Εικόνα 3.12, όπου φαίνεται η διδιάστατη αναπαράσταση του τρισδιάστατου πλέγματος ενός απλού γυαλιού. Στο πλέγμα αυτό, κάθε πολύεδρο είναι ένας

συνδυασμός ατόμων οξυγόνου γύρω από ένα άτομο πυριτίου που συνδέονται μεταξύ τους με ισχυρούς ομοιοπολικούς δεσμούς. Τα ιόντα Νατρίου σχηματίζουν ιοντικούς δεσμούς με τα άτομα του οξυγόνου και δεν συνδέονται αμέσως με το πλέγμα.



Εικόνα 3.12 Τα προτεινόμενα μοντέλα δομής του γυαλιού

[Πηγή: Warren & Bischoe (1930s) — Greaves, J. Non-Cryst Solids, 71, 2003 (1989)]

Η δομή του πλέγματος καθώς και η αντοχή των δεσμών μεταβάλλεται με την προσθήκη οξειδίων οπότε είναι δυνατόν να παράγουμε ίνες γυαλιού με διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες. Σε αντίθεση με τις ίνες Ανθρακα και Kevlar 49, οι ιδιότητες των ιών γυαλιού είναι ισότροπες, έτσι ώστε π.χ. το μέτρο του Young κατά μήκος και εγκάρσια προς τον άξονα της ίνας να είναι το ίδιο. Αυτό είναι άμεση συνέπεια της τρισδιάστατης δομής του γυαλιού.

Η αντοχή των ιών εξαρτάται από τις συνθήκες παραγωγής τους και το περιβάλλον ελέγχου. Ίνες που μόλις έχουν παρασκευασθεί και όπου έχουν ληφθεί όλα τα μέτρα προστασίας τους κατά την παρασκευή τους, έχουν αντοχή  $3,5 \text{ GNm}^{-2}$ , και η διασπορά της αντοχής τους είναι πολύ μικρή. Η αντοχή τους ελαττώνεται όταν ελέγχονται σε υγρό περιβάλλον λόγω της απορρόφησης υγρασίας από την επιφάνειά τους. Η επίδραση του περιβάλλοντος είναι ακόμα μεγαλύτερη όταν οι ίνες έρχονται σε επαφή με οξέα. Η αντοχή και το μέτρο εξαρτώνται από την θερμοκρασία και οι ίνες υπόκεινται σε στατική κόπωση.

Ο πιο σημαντικός παράγοντας που προσδιορίζει την αντοχή των ινών είναι οι βλάβες που υφίστανται οι ίνες κατά την παρασκευή τους και ιδιαίτερα κατά το στάδιο της περιέλιξής τους πάνω στο τύμπανο. Η επικάλυψή τους με ειδικό επικαλυπτικό (size coating) στα πρώτα στάδια της παρασκευής τους βοηθάει στην ελαχιστοποίηση των βλαβών. Μερικές από τις βλάβες είναι αναπόφευκτες και συμβαίνουν τυχαία κατά μήκος της ίνας και αυτό οδηγεί σε διασπορά της αντοχής, η οποία εξαρτάται από το ελεύθερο μήκος των ινών, ακριβώς όπως και στις ίνες του άνθρακα. Στην Εικόνα 3.13, έχει γίνει σύγκριση της αντοχής παρθένων ινών E-glass που έχουν ληφθεί πάνω από το τύμπανο περιέλιξης.

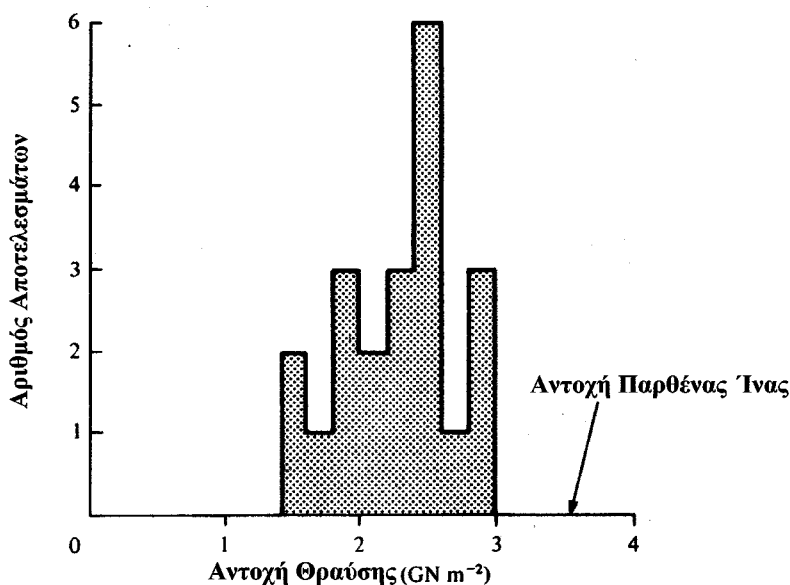
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.5

Σύσταση % κατά βάρος σε Οξειδία Τριών Τύπων Ινών Γυαλιού

	E glass	C glass	S glass
SiO <sub>2</sub>	52,4	64,4	64,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,4	4,1	25,0
CaO	17,2	13,4	—
MgO	4,6	3,3	10,3
Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O	0,8	9,6	0,3
Ba <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,6	4,7	—
BaO	—	0,9	—

Οι μηχανικές βλάβες είναι υπό την μορφή επιφανειακών μικρορωγμών. Η επικάλυψη των ινών εφαρμόζεται επιδερμικά με spray που περιέχει νερό με γαλάκτωμα πολυμερούς. Το είδος του επικαλυπτικού εξαρτάται μεταξύ των άλλων και από τον σκοπό για τον οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθούν οι ίνες και εξυπηρετεί τους ακόλουθους σκοπούς:

- (1) Προφυλάσσει την επιφάνεια των ινών από φθορά.
- (2) Συνδέει τις ίνες μεταξύ τους.
- (3) Λιπαίνει τις ίνες έτσι ώστε να αντέχουν στην τάνυση.
- (4) Τους προσδίδει αντι-στατικές ιδιότητες.
- (5) Αυξάνει την πρόσφυση των ινών στην μήτρα.



**Εικόνα 3.13** Αντοχή σε εφελκυσμό ινών E-glass μήκους 2cm που έχουν εξαχθεί από έναν θύσανο ινών και σύγκριση με την αντίστοιχη αντοχή της παρθένας ίνας.

[Πηγή: D. Hull, An Introduction to Composite Materials, Cambridge Univ. Press 1981]

## 3.5 Οργανικές Ίνες

Μία σχετικά νέα και συγχρόνως σημαντική τάξη ινών, είναι εκείνη που βασίζεται σε υψηλής αντοχής και μέτρου πολυμερικών ινών που προκύπτουν από πλήρως προσανατολισμένα πολυμερή.

### 3.5.1 Ίνες Πολυαιθυλενίου

Ίνες πολυαιθυλενίου, των οποίων τα μακρομόρια είναι σχεδόν παράλληλα μεταξύ τους, ανήκουν στην κατηγορία αυτή των ινών. Θεωρητικά, οι ίνες αυτές πρέπει να έχουν ένα μέτρο ελαστικότητας της τάξης των 220 GNm<sup>2</sup>. Όμως τεχνικά είναι αδύνατο να έχουμε πλήρη προσανατολισμό των ινών. Ο Ward και οι συνεργάτες του (1980) παρήγαγαν ίνες πολυαιθυλενίου με μέτρο Young 60 GNm<sup>2</sup> και αντοχή σε εφελκυσμό 1,3 GNm<sup>2</sup>. Ο προσανατολισμός των μακρομορίων επιτυγχάνεται κατά τον εφελκυσμό του πολυαιθυλενίου. Όπως και στην περίπτωση των ινών του άνθρακα, το μέτρο του Young κατά το μήκος των ινών είναι μεγαλύτερο από εκείνο εγκάρσια του άξονα των ινών.

Υψηλής αντοχής ίνες μπορούν να κατασκευαστούν από πολυαιθυλένιο με δύο διαδικασίες. Ένα ειδικό πολυμερές μεσαίου μοριακού βάρους μπορεί να εξωθηθεί και μετά να "τανυστεί" ή ένα πολυμερές πολύ υψηλού μοριακού βάρους μπορεί να διαλυθεί σε ένα διάλυμα, παίρνοντας την μορφή "ζελέ" και να φυγοκεντριστεί.

Στη διαδικασία φυγοκέντρισης του "ζελέ" ο διαλύτης μπορεί να είναι παραφινέλαιο, κερί, δεκαλίνη ή ορυκτό πετρέλαιο στο οποίο προστίθεται ένας φαινολικός σταθεροποιητής. Από 2% έως 15% του UHMWPE διαλύεται και φυγοκεντρίζεται στους 140°C. Οι ίνες είναι ακανόνιστες σε κομμάτια.

Οι ίνες αυτές έχουν αντοχή σε εφελκυσμό 2.6 με 3.2 GPa ( εξαρτάται από τον τύπο της ίνας ) και μέτρο ελαστικότητας 119 με 170 GPa. Αλλά, καθώς η πυκνότητά τους είναι 0.97 gr/cc, οι ειδικές ιδιότητες είναι πολύ υψηλές - αντοχή  $3.3 \cong 10^6$  Nm/Kg, μέτρο ελαστικότητας  $175 \cong 10^6$  Nm/Kg για τις καλύτερες ίνες. Αυτό συγκρίνεται με τις ειδικές τιμές αντοχής του πολυαμιδίου ( 2.5 ) και με τις HS ίνες άνθρακα ( 3.16 ). Το μειονέκτημά τους είναι το σημείο τήξης, το οποίο βρίσκεται στους 150°C.

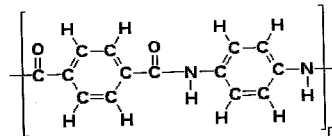
Οι αρχικές εφαρμογές των ινών πολυαιθυλενίου ήταν σε σχοινιά και σε πανιά ιστοπλοϊκών. Όμως, σύνθετα υλικά με εποξειδικές ρητίνες, που δοκιμάστηκαν με ίνες πολυαιθυλενίου, βρέθηκε ότι έχουν καλή αντίσταση σε κρούση και υψηλή αντοχή εφελκυσμού. Τα υβριδικά σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα σε εποξειδικές ρητίνες είναι επίσης υπό έρευνα.

### 3.5.2 Ίνες Αρωματικού Πολυαμιδίου

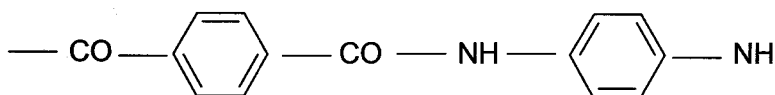
Η πιο επιτυχής οργανική ίνα που παρασκευάστηκε βιομηχανικά είναι εκείνη που αναπτύχθηκε από την εταιρεία Du Pont με την επωνυμία Kevlar. Δεν υπάρχουν λεπτομέρειες για τον τρόπο παρασκευής της αλλά σύμφωνα με την αρχική πατέντα του 1968 οι ίνες Kevlar βασίζονται στο πολυ-παρα-βενζαμίδιο και έχουν μέτρο ελαστικότητας 130 GNm<sup>2</sup>.

Υπάρχουν δύο τύποι ινών Kevlar: Kevlar 29 και Kevlar 49. Το Kevlar 49 είναι γνωστό με τον κωδικό αριθμό PDR 49, έχει υψηλή αντοχή και μέτριο μέτρο ελαστικότητας. Το Kevlar 49 έχει υψηλότερο μέτρο αλλά την ίδια αντοχή με το Kevlar 29 και είναι το πλέον κατάλληλο για ενίσχυση συνθέτων υλικών.

Σήμερα, το Kevlar είναι ένα αρωματικό πολυαμίδιο που ονομάζεται πολυ(παραφενύλ-τερεφθαλαμίδιο) με τύπο:







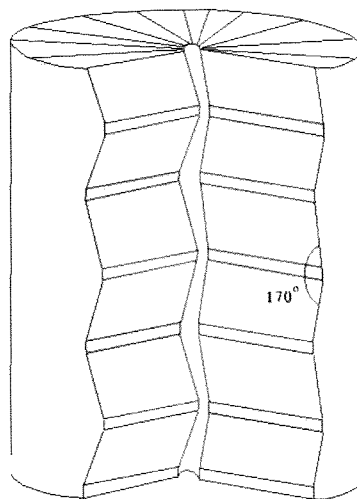
Οι αρωματικοί διακτύλιοι, έχουν σαν αποτέλεσμα να δημιουργούνται μακρομόρια με ιδιότητες ισχυρής αλυσίδας. Κατά την παρασκευή των ινών Kevlar, ένα διάλυμα του πολυμερούς βρίσκεται σε θερμοκρασία μεταξύ  $-50^{\circ}\text{C}$  και  $-80^{\circ}\text{C}$  πριν την εξέλασή του μέσα σε κύλινδρο με θερμαινόμενα τοιχώματα θερμοκρασίας  $200^{\circ}\text{C}$ , όπου ο διαλύτης εξατμίζεται. Οι ίνες που προκύπτουν περιτυλίσσονται σε τύμπανο. Στην φάση αυτή οι ίνες έχουν αντοχή σε εφελκυσμό  $840 \text{ MNm}^{-2}$  και μέτρο σε εφελκυσμό  $3,6 \text{ GNm}^{-2}$ . Στην συνέχεια οι ίνες τείνονται έτσι ώστε να αυξηθεί το μέτρο και η αντοχή τους. Με την τάνυση των ινών συμβαίνει προσανατολισμός των μακρομορίων κατά την διεύθυνση του εξωτερικού φορτίου και η υψηλή τιμή του μέτρου,  $130 \text{ GNm}^{-2}$ , αποτελεί ένδειξη του τέλει προσανατολισμού των ινών.

Η δομή των ινών είναι ακτινικής μορφής και έχει μελετηθεί από τον Johnson και τους συνεργάτες του (1980), (βλέπε Εικόνα 3.14). Ίνες με αυτή τη δομή παρουσιάζουν χαμηλό μέτρο διάτμησης κατά την διεύθυνση του άξονα των ινών, ενώ οι εγκάρσιες ιδιότητές τους είναι πολύ φτωχές. Τα αρωματικά πολυαμιδία είναι ανθεκτικά στην θερμότητα, δεδομένου ότι είναι οργανικά πολυμερή. Έτσι, για παράδειγμα, παρουσιάζουν μόνο 12% ελάττωση της αντοχής τους μετά από παραμονή 10 h στους  $250^{\circ}\text{C}$ , ενώ η ελάττωση της αντοχής τους μετά από παραμονή 500 h στους  $160^{\circ}\text{C}$  είναι μόλις 5%.

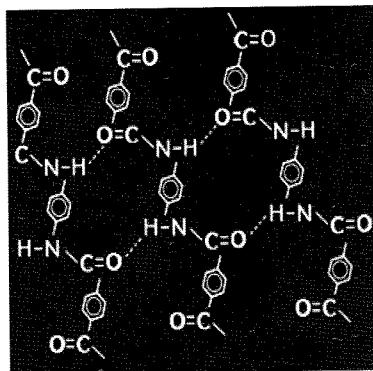
Οι ίνες αρωματικού πολυαμιδίου είναι δυο ειδών. Βασίζονται στο ίδιο οργανικό μόριο, αλλά ο διαχωρισμός γίνεται στο πως είναι τοποθετημένα τα άτομα στο μόριο. Έτσι, έχουμε: το "*meta-aramid paper*", γνωστό με το εμπορικό όνομα "*Nomex*", το οποίο είναι σε μορφή κερήθρας και αποτελεί υλικό για δομές τύπου "*sandwich*", για κατασκευές όπως τα πατώματα των αεροπλάνων. Τις ίνες "*para-aramid*", οι οποίες είναι διαθέσιμες από πολλούς κατασκευαστές, γνωστές ως σειρά του *Dupont Kevlar*. Άλλοι κατασκευαστές είναι οι *Enka AG & Teijin (Technora)*. Ο *Dupont* ήταν ο εφευρέτης των "*para-aramid*" ινών και είχαν 86 βασικά προνόμια ευρεσιτεχνίας σε 32 χώρες το 1985.

Η βαθμίδα της "*para-aramid*" ίνας που έχει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι αυτή με το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας. Οι υπόλοιπες ίνες με το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας χρησιμοποιούνται για σχοινιά, για προστατευτικά ρούχα, πανοπλίες και ως εναλλακτικό του αμιάντου. Μια τρίτη βαθμίδα, η "*RI*", χρησιμοποιείται για την ενίσχυση ελαστικών και ιμάντων. Στον Πίνακα 3.6 φαίνονται οι διαθέσιμοι τύποι από διάφορους κατασκευαστές.

Dobb & Robson 1990



Εικόνα 3.14 Σχηματική αναπαράσταση της υπερμοριακής δομής των ινών του αρωματικού πολυαμιδίου (Kevlar 49) όπου παρατηρείται μία ακτινική διάταξη.



Εικόνα 3.15 Επίπεδη διάταξη μορίων Πολυ-p-φαινυλ-τερεφθαλαμίδιου όπου φαίνονται οι δεσμοί υδρογόνου που συνδέουν μεταξύ τους τις αλυσίδες.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.6**  
**Οι εμπορικοί τύποι KEVLAR**

Κατασκευαστής και Εμπορική Ονομασία	Μέτρο σε Εφελκυσμό (GPa)	Αντοχή σε Εφελκυσμό (GPa)
Dupont: Kevlar 49	124	3.6
# 29	58	3.6
# RI	58	3.6
Enka *: Twaron HM	121	3.15
Twaron	80	3.15
Teijin: Technora	70	3.01

\*: Τώρα ονομάζεται: *AKZO F&P Divn.*

Σημείωση: οι τύποι των ινών *Kevlar HM, HT & 149* με υψηλότερες ιδιότητες βρίσκονται υπό ανάπτυξη.

Οι ίνες από "*Kevlar*" και "*Twaron*" έχουν πυκνότητα γύρω στο 1.45 gr/cc, οι "*Technora*" γύρω στο 1.39 gr/cc, πολύ λιγότερο από τις ίνες άνθρακα (1.75 ως 2 gr/cc), οπότε η ειδική αντοχή σε εφελκυσμό είναι υψηλή, παρόλο που υπερβαίνουν τις πιο πρόσφατες ίνες άνθρακα, του τύπου "*IM*". Όμως, η αντοχή τους σε θλίψη είναι χαμηλή. Σε ένα υλικό μιας διεύθυνσης είναι μόνο 275 MPa, όπου η αντοχή σε εφελκυσμό είναι 1380 MPa και η αντοχή σε θλίψη ενός συνθέτου υλικού με ίνες άνθρακα είναι 1100 MPa. Η χαμηλή αντοχή σε θλίψη και η σκληρότητα των "*para-aramid*" ινών είναι κληρονομικά χαρακτηριστικά, δηλαδή οφείλονται στην δομή των νημάτων. Τα μόρια σχηματίζουν αλύγιστα, επίπεδα φύλλα τοποθετημένα ακτινικά, αλλά με πτυχές διαταγμένες αξονικά σε διάστημα 500 nm, έτσι ώστε οι γειτονικοί τομείς να σχηματίζουν γωνία 170°. Συνήθως, σε ένα σύνθετο υλικό είναι καλύτερα, να χρησιμοποιείται ένα μίγμα από ίνες άνθρακα και ίνες αρωματικού πολυαμιδίου. Διότι, ο άνθρακας δίνει μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και υψηλή αντοχή σε θλίψη, ενώ το αρωματικό πολυαμίδιο δίνει στερρότητα και μειωμένη πυκνότητα.

Η στερρότητα μετρείται από το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη σε ένα διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης. Αν χρησιμοποιηθεί και η καμπτική τάση, λαμβάνοντας υπ'όψη τις θλιπτικές και εφελκυστικές ιδιότητες, τότε την μεγαλύτερη στερρότητα την παρουσιάζουν τα σύνθετα υλικά τα ενισχυμένα με ίνες από αρωματικό πολυαμίδιο.

Αυτή η στερρότητα κάνει το υλικό πολύ δύσκολο στο να κοπεί ή να σπάσει. Γι' αυτόν τον λόγο έχουν δημιουργηθεί ειδικά εργαλεία για την κοπή των παραπάνω υλικών.

Οι ίνες από αρωματικό πολυαμιδίο σε μορφή "στουπιών" διατίθενται σε ποικιλία αριθμού νημάτων, σύμφωνα με τις παρακάτω προδιαγραφές: στις "Kevlar" ο αριθμός είναι 1000 και 10000 για σχοινιά, για ύφανση είναι 134, 267, 768 και 1000, 3068 και 5000 για ρολά λεπτών νημάτων. Στις "Twaron" ο αριθμός των λεπτών νημάτων είναι 125, 250, 750, 1000, 2000 ή 5000. Υφάσματα σε μια μεγάλη ποικιλία είναι διαθέσιμα από τις εταιρίες που υφαίνουν ίνες γυαλιού. Επίσης, υφάσματα από μίγματα ινών αρωματικού πολυαμιδίου με ίνες άνθρακα ή γυαλιού χρησιμοποιούνται ευρέως και μπορεί να περιλαμβάνει ένα "στημόνι" από το ένα υλικό και ένα "υφάδι" από το άλλο ή ένα μίγμα από "στουπιά" σε κάποια από τις παραπάνω διευθύνσεις ή και στις δύο. Πολτός από ίνες αρωματικού πολυαμιδίου, δηλαδή τεμαχισμένες ίνες μέσα σε καλούπι, χρησιμοποιείται ως αντικαταστάτης του αμιάντου.

### 3.6 Ίνες Βορίου

Τα νήματα βορίου δεν μοιάζουν καθόλου με τα υπόλοιπα ενισχυτικά. Κατ'αρχήν, παράγονται ως μονά, μεγάλης διαμέτρου νήματα. Κάθε νήμα αποτελείται από ένα πυρήνα, είτε από σύρμα τανγκστενίου είτε από ένα άνθρακα και μια λεπτή στρώση από βόριο, η οποία έχει αποτεθεί με ατμό πάνω σε πυρήνα από μίγμα τριγλωριδικού, υδρογονωμένου βορίου. Το βόριο και ο άνθρακας επιλέχθηκαν ως υλικά για την παραγωγή ινών, διότι είναι τα δύο πιο ελαφρά στερεά και είναι πρακτικά στη χρήση τους. Το λίθιο και το βηρύλλιο, τα δύο προηγούμενα στερεά στον περιοδικό πίνακα, είναι πολύ ενεργά, παρόλο που το λίθιο χρησιμοποιείται σε κράματα αλουμινίου για να μειώσει την πυκνότητα τους. Ενώ, το βηρύλλιο χρησιμοποιήθηκε, παρ' όλα τα μηχανουργικά προβλήματα του σε αδρανή ατμόσφαιρα, στα φρένα του αεροσκάφους "C-5A Galaxy", του μεγαλύτερου μεταφορικού σκάφους της εποχής του.

Συνηθίζεται να λέγεται ότι οι Αμερικάνοι μετεξέλιξαν τις ίνες βορίου –παρά αυτές από άνθρακα– γιατί είχαν τεράστιες ποσότητες χλωριούχου βορίου. Αλήθεια ή ψέματα, γεγονός είναι ότι έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη του βορίου. Τα νήματα αυτά έχουν μέτρο ελαστικότητας ίσο με 400 GPa και αντοχή ίση με 3.52 GPa σε πυκνότητα 2.58 gr/cc και διάμετρο 100, 142 ή 203 μικρόμετρα. Αυτή η μεγάλη διάμετρος εξηγεί την πολύ μεγάλη αντοχή σε θλίψη των συνθέτων υλικών με ίνες από βόριο (3.29 GPa σε θερμοκρασία δωματίου και 1.27 GPa στους 190 °C), ενώ αντίθετα οι ιδιότητες τους σε εφελκυσμό δεν είναι αξιόλογες (210 GPa μέτρο

ελαστικότητας, 1.54 GPa σε θερμοκρασία δωματίου και 1.4 GPa στους 190 °C). Μετά από εκτεταμένη χρήση στην αεροναυπηγική στη δεκαετία του '70, το υλικό αυτό τώρα κυριαρχεί ως ενίσχυση σε μεταλλικές μήτρες, ειδικά σε μήτρες από αλουμίνιο και μαγνήσιο. Για αυτό το σκοπό, συχνά, επικαλύπτεται με καρβίδιο πυριτίου "Borsic", το οποίο εμποδίζει την διάχυση.

Οι ταινίες από καρβίδια πυριτίου και τα φύλλα τα αποτελούμενα από ένα επίπεδο νημάτων βορίου μέσα σε "plasma" κράμα αλουμινίου, υποβοηθούμενο από λαμαρίνα αλουμινίου μπορούν να διαχυθούν ή να εμποτιστούν με ορείχαλκο και μαζί να παράγουν σύνθετα υλικά με μεταλλική μήτρα.

Μεγάλα ποσά από 'prepregs' βορίου χρησιμοποιήθηκαν στη διάρκεια του 1970 στους σταθεροποιητές των αεροσκαφών F-14 & F-15, στο φτερό του αεροσκάφους F-111 και σε τμήματα του αεροσκάφους "B-1". Μερικές ίνες βορίου χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση των καλαμιών ψαρέματος καθώς και στα μπαστούνια του γκόλφ, στα σημεία όπου αναπτύσσονται θλιπτικές τάσεις.

### 3.7 Ίνες Χαλαζία

Ίνες από καθαρό πυρόλιθο, διαμέτρου 9 μικρομέτρων, έχουν παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες με αυτές των ινών γυαλιού, αλλά έχουν χαμηλότερη διηλεκτρική σταθερά (3.78 αντί 6), μικρότερο συντελεστή θερμικής διαστολής (.54 ppm/°C αντί 4.8) και διατηρούν τις ιδιότητες τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε 1100°C. "Rovings", ταινίες και υφάσματα από αυτές τις ίνες είναι διαθέσιμα στην αγορά.

### 3.8 Ίνες Αμιάντου

Η χρήση του αμιάντου για οποιοδήποτε σκοπό περιορίζεται από την ανησυχία για τον κίνδυνο που αποτελεί για την υγεία. Πάντως, παρέχει ιδιότητες, οι οποίες είναι πολύ δύσκολο να αντικατασταθούν. Είναι ένα ορυκτό, το οποίο απαντάται σε πέντε διαφορετικές μορφές. Αυτές είναι ο χρυσόλιθος, ο ανθοφιλλύτης, ο κροκιδολύτης, ο αμοσύτης και ο τρεμολύτης. Ο χρυσόλιθος είναι η κύρια πηγή για την κατασκευή μακριών ινών. Έχει πυκνότητα 2.5 gr/cc, μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό 200 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 2.4 GPa, με διαμέτρους νημάτων μεταξύ 5 και 10 μικρομέτρων. Το υψηλό του μέτρο ελαστικότητας και η καλή αντίστασή του στα οξέα και στη θέρμανση, ήταν τα κύρια πλεονεκτήματά του. Αλλά, οι μικρές ίνες, μικρότερης διαμέτρου από την κρίσιμη διάμετρο ενός μικρομέτρου, τις οποίες δημιουργεί η ίνα μεγάλου μήκους όταν σπάει, κάνουν τον άσβεστο επικίν-

δυνα για την υγεία, καθώς αυτές οι μικρές ίνες μπορούν να εισχωρήσουν στους πνεύμονες και να προκαλέσουν ασβεστίωση ή και καρκίνο.

### 3.9 Ίνες Πυριτίου

Αυτές οι ίνες επικρατούν στην ενίσχυση μετάλλων, καθώς είναι περισσότερο ανθεκτικές στην οξείδωση και λιγότερο επιδεκτικές στην προσβολή από λιωμένο αλουμίνιο από ότι το βόριο. Στα πλαστικά, η υψηλή τους αντίσταση σε οξείδωση στους 1200°C τις κάνει υποψήφιες για την ενίσχυση των πολυαμιδικών ρητινών, για λειτουργία στους 300°C και έχουν, επίσης, προταθεί για χρήση μαζί με το νάιλον για εμφυσιές σε καλούπια, όπου παρέχουν αντίσταση σε τριβή, όπως αντοχή και δυσκαμψία.

Μια ποικιλία ινών πυριτίου παράγεται από  $\beta$ -SiC με εναπόθεση ατμού σε πυρήνα από ίνα άνθρακα. Αυτές έχουν διάμετρο 140 μικρομέτρων και πυκνότητα 2.55 gr/cc. Το μέτρο ελαστικότητας τους είναι περίπου 430 GPa και η αντοχή τους σε εφελκυσμό περίπου 3.5 GPa.

Μια άλλη ποικιλία ινών συντίθεται από κρυστάλλους  $\beta$ -SiC με χημική εναπόθεση ατμού. Είναι σε μορφή ενός "στουπιού" 500 νημάτων, με διάμετρο κάθε νήματος 10 με 15 μικρόμετρα. Η πυκνότητα είναι 2.55 gr/cc, το μέτρο ελαστικότητας είναι γύρω στα 200 GPa και η αντοχή γύρω στα 3.3 GPa. Επίσης, διατίθενται και σε μορφή υφαντών σκελετών, ψαθών, πλεξούδων, χαρτιών και τεμαχισμένων ινών σε διάφορα μήκη. Ο τύπος των κοντών ινών whiskers προτείνεται από τον κατασκευαστή για ενίσχυση πλαστικών αλλά και μετάλλων. Αυτά τα "μουστάκια" από  $\beta$ -SiC είναι 0.1 ως 0.5 μικρόμετρα διαμέτρου και 50 ως 200 μικρόμετρα μήκους και πυκνότητας 0.1 gr/cc. Το μέτρο ελαστικότητας τους είναι 400 με 700 GPa και έχουν αντοχή 3 με 14 GPa.

Ακόμα, στο στάδιο ανάπτυξης βρίσκεται μια "προσθετική ίνα από SiC", η οποία ονομάζεται "XPW2" και περιγράφεται ως 40-90% του βάρους των ινών από SiC και 1-60% των μορίων του SiC, οι οποίες είναι στη μορφή "μουστακιών" σε μορφή "ιστού αράχνης", από ίνες μήκους της τάξης του Angstrom.

### 3.10 Ίνες Αλουμίνιας

Για μεταλλική ενίσχυση, η αλουμίνια είναι σταθερή στους 1300°C και ως ίνα διαμέτρου 3 μικρομέτρων δίνει μέτρο ελαστικότητας γύρω στα 300 GPa και αντοχή γύρω στα 2 GPa με πυκνότητα 3.3 gr/cc.

### 3.11 Ίνες από Αλουμίνα-Βόριο-Πυρίτιο

Πιθανόν, οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες ακόμα και από τις κεραμικές ίνες στην αεροναυπηγική είναι οι ίνες από αλουμίνα - βόριο - πυρίτιο. Το υλικό αυτό έχει εμπορικό όνομα " Nextel " και είναι διαθέσιμο στις εξής μορφές: *rovings*, *yarns*, υφάσματα και σωληνοειδείς πλεξούδες. Δύο τύποι ινών, οι 312 και 440 περιέχουν 62% και 70% αλουμίνα και μπορούν να λειτουργήσουν σε 1200°C και 1370°C. Χρησιμοποιούνται στην αεροναυπηγική σε σύνθετα υλικά που περιορίζουν την φωτιά και είναι μονωτικά. Μερικές φορές, αυτές οι ίνες χρησιμοποιούνται για ενίσχυση μεταλλικών μητρών, αλλά στην πλειονότητά τους χρησιμοποιούνται για θερμική μόνωση.

### 3.12 Ίνες Φωσφόρου

Οι ίνες από μεταφωσφορικό ασβέστιο και νάτριο ερευνήθηκαν από την "Monsanto Chemical Co", ως αντικαταστάτες του αμιάντου. Η κύρια αλυσίδα τους είναι μια αλυσίδα από οξειδία του φωσφόρου και άτομα οξυγόνου τοποθετημένα εναλλάξ, κατά μήκος της αλυσίδας. Η διάμετρος της ίνας είναι 1-5 μm και η πυκνότητα της είναι 2.86 gr/cc. Το μήκος της ίνας είναι 50-400 μm με αντοχή σε εφελκυσμό 2.6GPa και μέτρο ελαστικότητας 124GPa. Το σημείο τήξης της είναι στους 740°C. Σύνθετα υλικά με ρητίνη φανικού οξέος και άλλες ρητίνες και θερμοπλαστικά έχουν δοκιμαστεί, αλλά η παραγωγή ινών από αυτά δεν έχει αρχίσει ακόμα.

### 3.13 Μεταλλικές Ίνες

Εκτός από τις ίνες γυαλιού και άνθρακα, οι οποίες μπορεί να είναι επικαλυμμένες με μεταλλικά υλικά, που αυξάνουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα και παρέχουν ηλεκτρομαγνητική ασπίδα προστασίας ή προστασία από κεραυνούς για σύνθετα, υπάρχουν σύρματα από ανοξείδωτο ατσάλι και νικέλιο (Fibrex). Αυτά έχουν διάμετρο γύρω στα 10-20μm και είναι διαθέσιμα για τους ίδιους σκοπούς. Συνεχείς ή τεμαχισμένες ίνες και υφάσματα ινών, συμπεριλαμβανομένου υφαντών υβριδικών υλικών με ίνες γυαλιού ή άνθρακα, χρησιμοποιούνται στις εμφυσέςεις των θερμοπλαστικών υλικών σε καλούπια.

### 3.14 Σύγκριση των Ινών

Από τις ιδιότητες των ινών που αναπτύξαμε μέχρι τώρα, προκύπτουν ορισμένες διαφορές μεταξύ των ινών άνθρακα, γυαλιού και Kevlar 49, που κυρίως οφείλονται στην διαφορετική δομή τους.

Πιο αναλυτικά, οι διαφορές αυτές έχουν ως εξής:

#### Ειδικές Ιδιότητες

Ο σημαντικότερος παράγοντας που οδηγεί στην ταχεία ανάπτυξη των συνθέτων υλικών είναι η εξοικονόμηση μάζας που μπορούμε να επιτύχουμε με την χρησιμοποίηση ινών μικρής πυκνότητας και υψηλού μέτρου ή αντοχής. Ως "ειδικό μέτρο του Young" και "ειδική αντοχή σε εφελκυσμό" ορίζονται ο λόγος του μέτρου του Young και της αντοχής προς την πυκνότητα αντίστοιχα. Μερικές τιμές δίνονται στον Πίνακα 6.7. Οι τιμές αυτές βασίζονται στις αντίστοιχες τιμές του Πίνακα 6.3. Με βάση το ειδικό μέτρο του Young παρατηρούμε ότι οι ίνες άνθρακα είναι πολύ ανώτερες των ινών E-glass, ενώ οι ίνες Kevlar 49 είναι ανώτερες των E-glass και κατώτερες των ινών άνθρακα. Το Kevlar 49 έχει ειδική αντοχή 40-50% μεγαλύτερη εκείνης των ινών E-glass καθώς και των Τύπου II ινών άνθρακα. Για σύγκριση, αναφέρουμε ότι το ειδικό μέτρο του χάλυβα υψηλής αντοχής είναι 27 και η ειδική αντοχή είναι 0,2 (στις ίδιες μονάδες του Πίνακα 6.7.). Η σύγκριση αυτή δεν είναι απόλυτα σωστή, γιατί οι ίνες πρέπει να ενσωματωθούν μέσα σε πολυμερική μήτρα για να αποτελέσουν το σύνθετο υλικό. Η μέγιστη κατ' όγκο περιεκτικότητα ινών που επιτυγχάνεται σε σύνθετα υλικά με παρόμοιες ίνες είναι 0,70 και επομένως οι τιμές αυτές πρέπει να αναχθούν κατά τον παράγοντα αυτό. Επίσης θα πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι οι μηχανικές ιδιότητες των ινωδών συνθέτων υλικών με ίνες παράλληλες είναι μικρότερες κατά την εγκάρσια διεύθυνση από ότι κατά τη διαμήκη (παράλληλη προς τις ίνες) διεύθυνση.

#### Θερμική Σταθερότητα

Σε μη οξειδωτική ατμόσφαιρα, οι ίνες άνθρακα παρουσιάζουν εξαιρετικές ιδιότητες σε υψηλές θερμοκρασίες, ακόμα και πάνω από τους 2000°C. Στις εφαρμογές όμως, όπου οι ίνες άνθρακα χρησιμεύουν ως ενισχυτικά των πολυμερών, η ιδιότητα αυτή δεν έχει και τόσο μεγάλη σημασία δεδομένου ότι τα περισσότερα πλαστικά χάνουν τις ιδιότητές τους πάνω από τους 200°C.



**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.7**  
**Σύγκριση Ειδικών Ιδιοτήτων Ίνών**

Τύπος Ίνας	Άνθρακας PAN Type I	Άνθρακας PAN Type II	Γυαλί E-glass	Kevlar 49
Μονάδες	GPa/10 <sup>3</sup> Kgm <sup>-3</sup>	GPa/10 <sup>3</sup> Kgm <sup>-3</sup>	GPa/10 <sup>3</sup> Kgm <sup>-3</sup>	GPa/10 <sup>3</sup> Kgm <sup>-3</sup>
Ειδικό Μέτρο (Μέτρο/ Ποκνότητα)	200	143	30	86
Ειδική Αντοχή (Αντοχή/ Ποκνότητα)	1,1	1,5	1,4	2,2

Το γυαλί μαλακώνει περίπου στους 850°C αλλά το μέτρο και η αντοχή του ελατώνονται πολύ γρήγορα πάνω από τους 250°C. Αν και η θερμική σταθερότητα του Kevlar 49 είναι κατώτερη τόσο του γυαλιού όσο και του άνθρακα, είναι αρκετή για να χρησιμεύσει σαν ενισχυτικό στις περισσότερες πολυμερικές μήτρες. Εκείνο που μας ενδιαφέρει σε όλους τους τύπους των ινών είναι να διατηρούν τις ιδιότητές τους σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών καθώς επίσης οι ιδιότητες αυτές να μην υποβαθμίζονται κατά το στάδιο της παραγωγής. Οι ιδιότητες του γυαλιού επανακτώνται με την μεταβολή της θερμοκρασίας ενώ η μεταβολή των ιδιοτήτων των ινών Kevlar με την θερμοκρασία δεν είναι αντιστρεπτή. Έτσι, η θερμοκρασία κατά την διαδικασία injection moulding του nylon και των πολυανθρακικών κυμαίνεται στην περιοχή θερμοκρασιών 270 - 320°C.

Τέλος, οι ίνες Kevlar επηρεάζονται από το ηλιακό φως, τόσο το ορατό όσο και το υπεριώδες που έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή του χρώματός τους και την μείωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Μπορούμε να αποφύγουμε επίδραση του φωτός κάνοντας μία φωτοαπορροφητική επικάλυψη.

### Συμπεριφορά σε Θλίψη

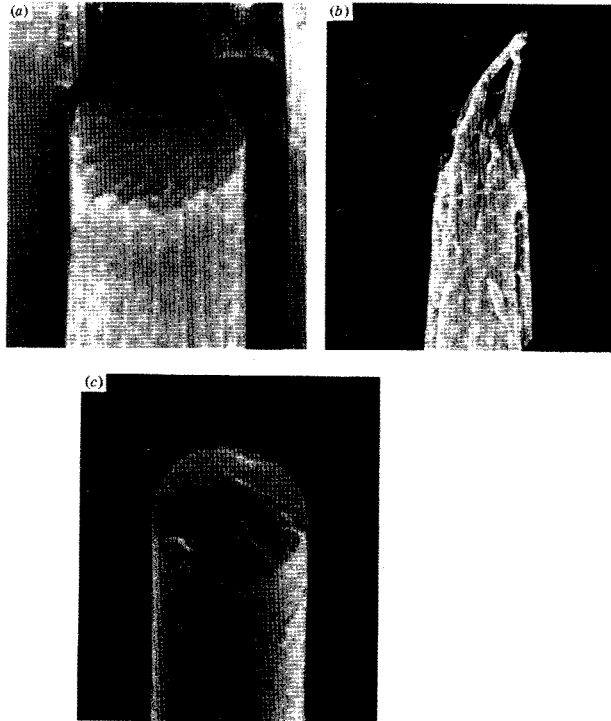
Στον Πίνακα 6.3 δεν δίνονται οι ιδιότητες των ινών σε θλίψη. Οι ιδιότητες αυτές των ινών είναι δύσκολο να μετρηθούν πειραματικά και αυτό είναι μπορεί να γίνει μόνο αν αυτές προκύψουν έμμεσα από τις ιδιότητες των συνθέτων υλικών που είναι ενισχυμένες με τις ίνες αυτές. Έχει βρεθεί ότι το μέτρο σε εφελκυσμό είναι σχεδόν το ίδιο με το μέτρο σε θλίψη για όλους τους τύπους των ινών. Όμως στην περίπτωση των ινών Kevlar, η αντοχή σε θλίψη είναι μόλις το 20% της αντοχής σε

εφελκυσμό. Αντίθετα, στην περίπτωση των ινών άνθρακα και γυαλιού έχει βρεθεί ότι αυτές έχουν περίπου ίσες αντοχές σε εφελκυσμό και θλίψη.

Η μικρή αντοχή σε θλίψη των ινών Kevlar οφείλεται στην ανισότροπη δομή τους και στο χαμηλό μέτρο διάτμησης. Κατά τον εφελκυσμό το φορτίο φέρεται από τους ισχυρούς ομοιοπολικούς δεσμούς, αλλά κατά την θλίψη οι ασθενείς δυνάμεις Van der Waals καθώς και οι δεσμοί υδρογόνου δεν αντέχουν οπότε δημιουργείται τοπική διαρροή με αποτέλεσμα την πολλαπλή κάμψη και λυγισμό των ινών.

### Θραύση και Ευκαμψία των Ινών

Οι ίνες άνθρακα και γυαλιού παρουσιάζουν ψαθυρή θραύση (Εικόνα 3.16a), ενώ οι ίνες Kevlar παρουσιάζουν όλκιμη θραύση (λαιμός) (Εικόνα 3.16b). Η διάμετρος των ινών παίζει σημαντικό ρόλο στον τρόπο που κάμπτονται οι ίνες.



**Εικόνα 3.16** Μικροφωτογραφίες SEM ινών μετά από θραύση σε εφελκυσμό.

(a) Carbon, (b) Kevlar, (c) Glass.

[Πηγή: D. Hull, An Introduction to Composite Materials, Cambridge Univ. Press 1981]

Η ευκαμψία των ινών μπορεί να εκφραστεί σαν συνάρτηση της ροπής κάμψης. Έτσι, για ίνες κυκλικής διατομής που κάμπτονται και παρουσιάζουν ακτίνα καμπυλότητας  $\rho$ . Ισχύει η σχέση:

$$M = \frac{\pi E d^4}{64 \rho} \quad (3.1)$$

όπου  $E$  το μέτρο του Young και  $d$  η διάμετρος της διατομής της ίνας. Ως ευκαμψία ορίζεται ο λόγος:

$$\text{Ευκαμψία (flexibility)} = \frac{1}{M \rho} \quad (3.2)$$

εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την διάμετρο  $d$  και από το μέτρο ελαστικότητας  $E$  των ινών. Μία σύγκριση της ευκαμψίας των διαφόρων τύπων ινών φαίνεται στον Πίνακα 3.3 Παρατηρούμε ότι η ευκαμψία των ινών άνθρακα Τύπου II και των E-glass είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη των ινών του Τύπου I, λόγω του μικρότερου μέτρου ελαστικότητας των ινών αυτών. Κατά την κάμψη των ινών αναπτύσσονται υψηλές εφελκυστικές τάσεις που οδηγούν στη θραύση τους. Υποθέτοντας ότι παραμορφώνονται ελαστικά, οι επιφανειακές τάσεις θα είναι:

$$\sigma = \frac{E d}{2 \rho} \quad (3.3)$$

όπου  $\rho$  η ακτίνα καμπυλότητας της ίνας που έχει καμφθεί.

Για δεδομένη αντοχή σε θραύση  $\sigma_f$  υπάρχει μια ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας λίγο πριν από την θραύση που δίνεται από την σχέση:

$$\rho_{\min} = \frac{E d}{2 \sigma_f} \quad (3.4)$$

Τιμές του  $\rho_{\min}$  δίνονται στον Πίνακα.6.3 όπου δεν έχει ληφθεί υπόψιν η στατιστική μεταβολή της αντοχής των ινών κατά το μήκος τους. Έτσι, οι παρθένες ίνες γυαλιού έχουν μεγαλύτερη αντοχή σε κάμψη από ότι οι ίνες άνθρακα. Λόγω της χαμηλής αντοχής σε θλίψη, οι ίνες Kevlar δεν μπορούν να χαρακτηριστούν από  $\rho_{\min}$ . Επειδή κατά την κάμψη αναπτύσσονται στα εξωτερικά στρώματα των ινών οι μέγιστες εφελκυστικές και οι μέγιστες θλιπτικές τάσεις, πολύ πριν την αστοχία σε εφελκυσμό, οι ίνες kevlar, διαρρέουν στην θλιβόμενη περιοχή με αποτέλεσμα, στην περιοχή αυτή να παρατηρούνται επιφανειακές πτυχώσεις. Έτσι, να παρατηρούνται επιφανειακές πτυχώσεις. Έτσι, στην περιοχή αυτή, παρατηρούνται, πολύ πριν την θραύση, μόνιμες παραμορφώσεις (Εικόνα 3.17).



**Εικόνα 3.17** Μικροφωτογραφία ίνας Kevlar 49 όπου φαίνονται οι πτυχώσεις στην θλιβόμενη πλευρά

[Πηγή: D. Hull, An Introduction to Composite Materials, Cambridge Univ. Press 1981]

Υψηλές αξονικές εφελκυστικές τάσεις μπορούν να αναπτυχθούν και κατά το στάδιο της παρασκευής των ινών οπότε αυξάνεται και η πιθανότητα θραύσης τους.

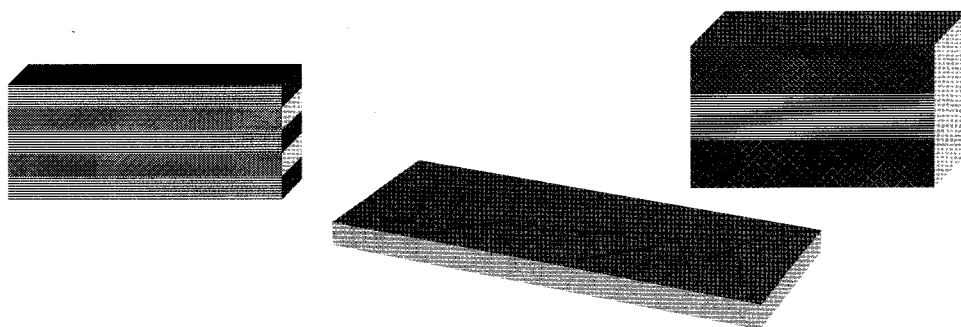
### 3.15 Επίδραση της Γεωμετρίας της Δομής και της Διάταξης των Ινών στις Ιδιότητες των Συνθέτων Υλικών

Πολλές από τις ιδιότητες των ινωδών συνθέτων υλικών εξαρτώνται άμεσα από παραμέτρους της μικροδομής, όπως:

1. Διάμετρος της ίνας
2. Μήκος της ίνας
3. Κατανομή του μήκους των ινών
4. Κ.ο. περιεκτικότητα των ινών
5. Τον προσανατολισμό των ινών
6. Την διάταξη των ινών

Η επίδραση καθεμιάς από τις τελικές ιδιότητες των συνθέτων υλικών, είναι διαφορετική. Είναι απαραίτητο να χαρακτηρίσουμε αυτές τις παραμέτρους αν θέλουμε να προβούμε στον σωστό σχεδιασμό των συνθέτων υλικών.

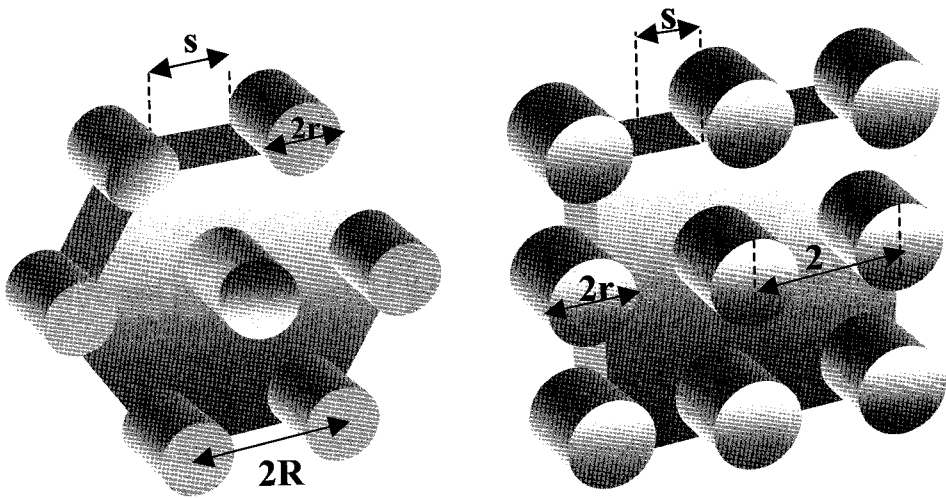
Τα σύνθετα υλικά υψηλής τεχνολογίας αποτελούνται από πολλές στρώσεις που η διεύθυνση των ινών σε καθεμιά από αυτές είναι αυστηρά προσδιορισμένη. Για την πρόβλεψη των ελαστικών ιδιοτήτων των συνθέτων υλικών, κάθε στρώση θεωρείται ομογενής με την προϋπόθεση ότι η διάταξη και η κ.ο. περιεκτικότητα των ινών είναι ομοιόμορφη. Οι ίνες στις στρώσεις μπορεί να είναι συνεχείς ή μικρού μήκους και μπορεί να είναι προσανατολισμένες προς μία ή περισσότερες διευθύνσεις ή να έχουν τυχαίο προσανατολισμό σε δύο ή τρεις διαστάσεις. Δύο απλές διατάξεις στρώσεων φαίνονται στην Εικόνα 3.18. Το σύνολο των στρώσεων (*laminie*) ονομάζεται πολύστρωτο σύνθετο υλικό (laminated) Γενικά, η διάταξη των στρώσεων είναι περίπλοκη διότι θα πρέπει να ικανοποιεί συγκεκριμένες απαιτήσεις. Ακόμη πιο περίπλοκη είναι η γεωμετρία της δομής όταν θεωρήσουμε την διάταξη των ινών μικρού μήκους σε σύνθετα υλικά που κατασκευάζονται με συμπίεση (compression) ή με την μέθοδο injection moulding.



Εικόνα 3.18 Διατάξεις ινών σε στρώσεις πολύστρωτων συνθέτων υλικών

### 3.16 Στρώσεις με Συνεχείς Ίνες μίας Διεύθυνσης

Σε μια στρώση με ίνες μίας διεύθυνσης (Εικόνα 3.19) όλες οι ίνες είναι παράλληλες μεταξύ τους. Για την θεωρητική ανάλυση θεωρούμε ότι οι ίνες είναι διατεταγμένες σε τετραγωνική ή εξαγωνική διάταξη (Εικόνα 3.19), όπου οι ίνες έχουν κυκλική διάταξη και είναι όλες της ίδιας διαμέτρου. Στην πράξη, οι ίνες γυαλιού και οι οργανικές ίνες πλησιάζουν την κυκλική διατομή, με ομαλή επιφάνεια, αλλά οι ίνες άνθρακα αν και έχουν περίπου κυκλική διατομή, χαρακτηρίζονται από ανώμαλη επιφάνεια. Πάντοτε όμως παρατηρείται μία ανομοιομορφία ως προς την διάμετρο των ινών για όλους τους τύπους υλικών, και αυτό εξαρτάται από τον τρόπο κατασκευής τους.



Εικόνα 3.19 (α) Εξαγωνική και (β) Τετραγωνική διάταξη ινών

Ανάλογα με τον τύπο ιδανικής διάταξης των ινών, η κατ' όγκο περιεκτικότητα των ινών  $V_f$  συνδέεται με την ακτίνα της ίνας με την σχέση:

$$V_f = \frac{\pi}{4} \left( \frac{r}{R} \right)^2 \quad (\text{εξαγωνική}) \quad \text{ή} \quad V_f = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left( \frac{r}{R} \right)^2 \quad (\text{τετραγωνική}) \quad (3.5)$$

όπου  $2R$  η είναι η διάκεντρος, δηλ. η απόσταση των κέντρων των ινών. Η μέγιστη τιμή του  $V_f$  θα συμβεί όταν οι ίνες εφάπτονται μεταξύ τους, δηλαδή όταν  $r = R$ .

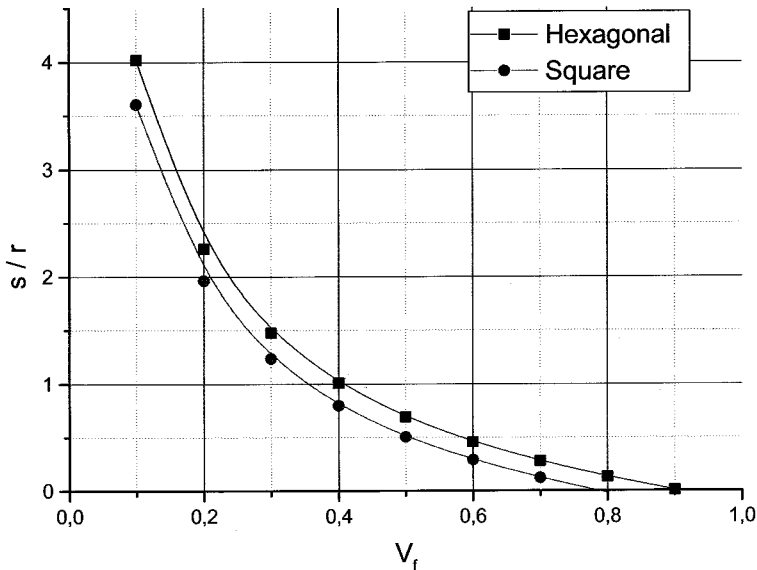
Για την εξαγωνική διάταξη, έχουμε  $V_{fmax} = 0,907$  ενώ

για την τετραγωνική διάταξη έχουμε  $V_{fmax} = 0,785$ .

Η απόσταση των ινών  $s$ , συνδέεται με το  $V_f$  με τις σχέσεις:

$$s = 2 \left[ \left( \frac{\pi}{2\sqrt{3}V_f} \right)^{1/2} - 1 \right] \cdot r \quad (\text{εξαγωνική διάταξη}) \quad (3.6)$$

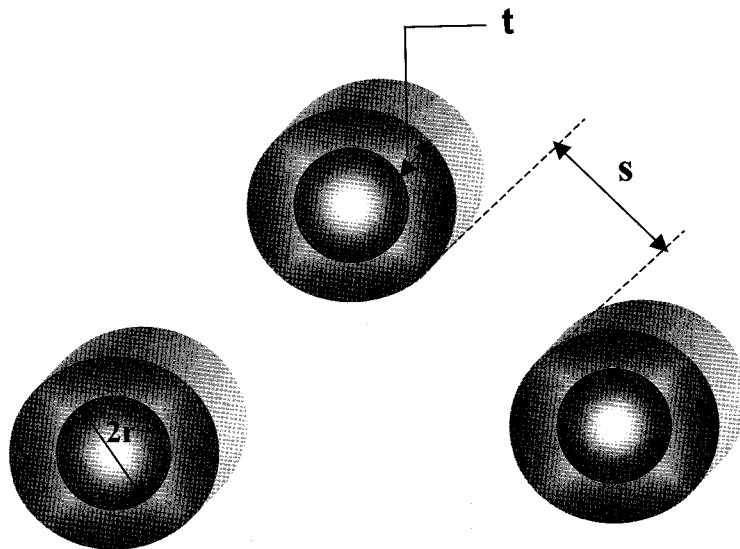
$$s = 2 \left[ \left( \frac{\pi}{4V_f} \right)^{1/2} - 1 \right] r \quad (\text{τετραγωνική διάταξη}) \quad (3.7)$$



Εικόνα 3.20 Μεταβολή του λόγου  $s/r$  για τις δύο ιδανικές διατάξεις ινών

Η γραφική παράσταση των εξισώσεων αυτών φαίνεται στην Εικόνα 3.20. Παρατηρούμε ότι ακόμα και για μικρές περιεκτικότητες ινών  $V_f = 0,30$ , η απόσταση των ινών είναι μικρότερη του  $2r$ , ενώ για μεγαλύτερες τιμές του  $V_f$ , δηλαδή για  $V_f = 0,70$  η απόσταση των ινών γίνεται πολύ μικρή. Αυτό, έχει σαν αποτέλεσμα, η παρουσία των ινών να επηρεάζει σημαντικά το υλικό της μήτρας που βρίσκεται σε άμεση επαφή με τις ίνες.

Έτσι, για εξαγωνική διάταξη ινών που περιβάλλονται από ενδιάμεση φάση πάχους  $t$ , όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.21, ο λόγος της κ.ο. περιεκτικότητας της ενδιάμεσης φάσης  $V_{mm}$  (modified matrix) προς την κ.ο. περιεκτικότητα όλης της μήτρας  $V_m = 1 - V_f$ , είναι:



Εικόνα 3.21 Ίνες σε ιδανική εξαγωνική διάταξη με ενδιάμεση φάση πάχους  $t$

$$\frac{V_{mm}}{V_m} = t(2r + t)/r^2 \left( \frac{1}{V_f} - 1 \right) \text{ (εξαγωνική διάταξη)} \quad (3.8)$$

Μερικά παραδείγματα δίνονται στον Πίνακα 6.8 για σύνθετα υλικά με ίνες μιας διεύθυνσεως με διάμετρο  $2r = 10\mu\text{m}$ , και  $V_f = 0,4$  και  $0,6$ . Παρατηρούμε ότι η ενδιάμεση φάση πάχους  $0,5\mu\text{m}$  μπορεί να φτάσει το 31,5% του συνολικού όγκου της μήτρας όταν  $V_f = 0,6$ .

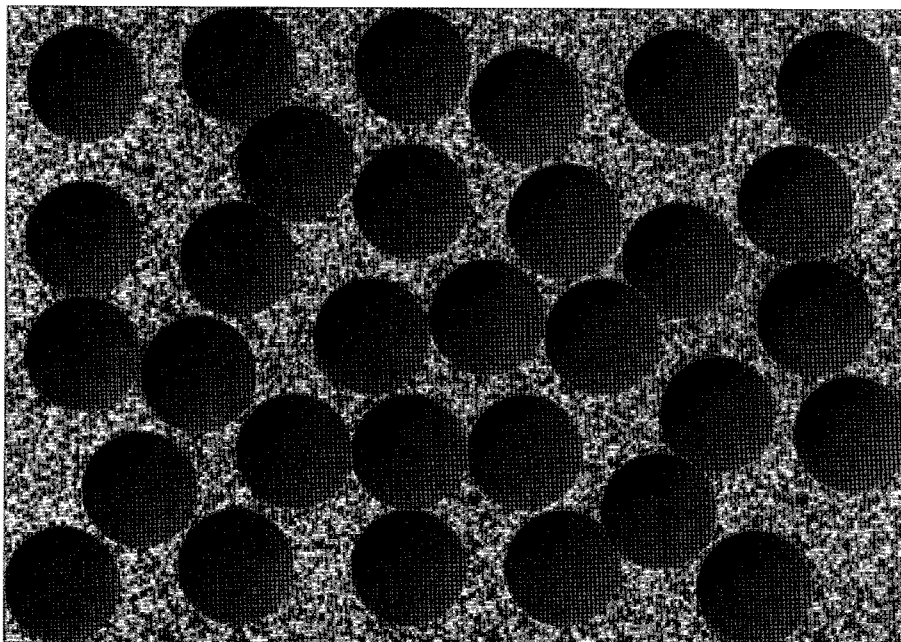
Πειραματικά έχει αποδειχθεί ότι δεν υπάρχει ιδανική διάταξη ινών, εκτός από περιορισμένες περιοχές του συνθέτου (Εικόνα 3.22).

Ανώμαλη διάταξη παρατηρείται ιδιαίτερα σε χαμηλές περιεκτικότητες και έχει επίδραση στην αντοχή κατά την εγκάρσια διεύθυνση καθώς και στο μέτρο κατά την διεύθυνση αυτή. Επίσης, λόγω της ανώμαλης διάταξης των ινών είναι δυνατόν στην πράξη να επιτύχουμε περιεκτικότητες ινών μεγαλύτερες του  $V_f = 0,7$ . Μία άλλη σημαντική παράμετρος είναι η διαβροχή των ινών από την ρευστή ρητίνη. Όταν το  $V_f$  είναι μεγάλο και η διάμετρος των ινών μικρή, τότε απαιτούνται υψηλές πιέσεις για να διαβραχούν οι ίνες.



ΠΙΝΑΚΑΣ 3.8  
Επίδραση του  $V_f$  και του  $t$  στον λόγο  $V_{mm} / V_m$

$V_f$	$s$ ( $\mu\text{m}$ )	$t$ ( $\mu\text{m}$ )	$V_{mm} / V_m$
0,4	5,06	0,1	0,027
0,4	5,06	0,2	0,054
0,4	5,06	0,5	0,140
0,4	5,06	1,0	0,293
0,6	2,29	0,1	0,061
0,6	2,29	0,2	0,122
0,6	2,29	0,5	0,315
0,6	2,29	1,0	0,660



Εικόνα 3.22 Σχηματική αναπαράσταση μίας πραγματικής διάταξης ινών

### 3.17 Κατ' Όγκον και Κατά Βάρος Περιεκτικότητα

Αν και συνήθως χρησιμοποιούμε την κ.ο. περιεκτικότητα των ινών, όμως σε περιπτώσεις που υπολογίζουμε την πυκνότητα των συνθέτων υλικών χρησιμοποιούμε την κατά βάρος περιεκτικότητα. Οι σχέσεις που δίνουν τους δύο τύπους περιεκτικότητας είναι:

$$V_1 = \frac{W_1/\rho_1}{W_1/\rho_1 + W_2/\rho_2 + W_3/\rho_3 + \dots} \quad (3.9)$$

και

$$W_1 = \frac{\rho_1 V_1}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 + \rho_3 V_3 + \dots} \quad (3.10)$$

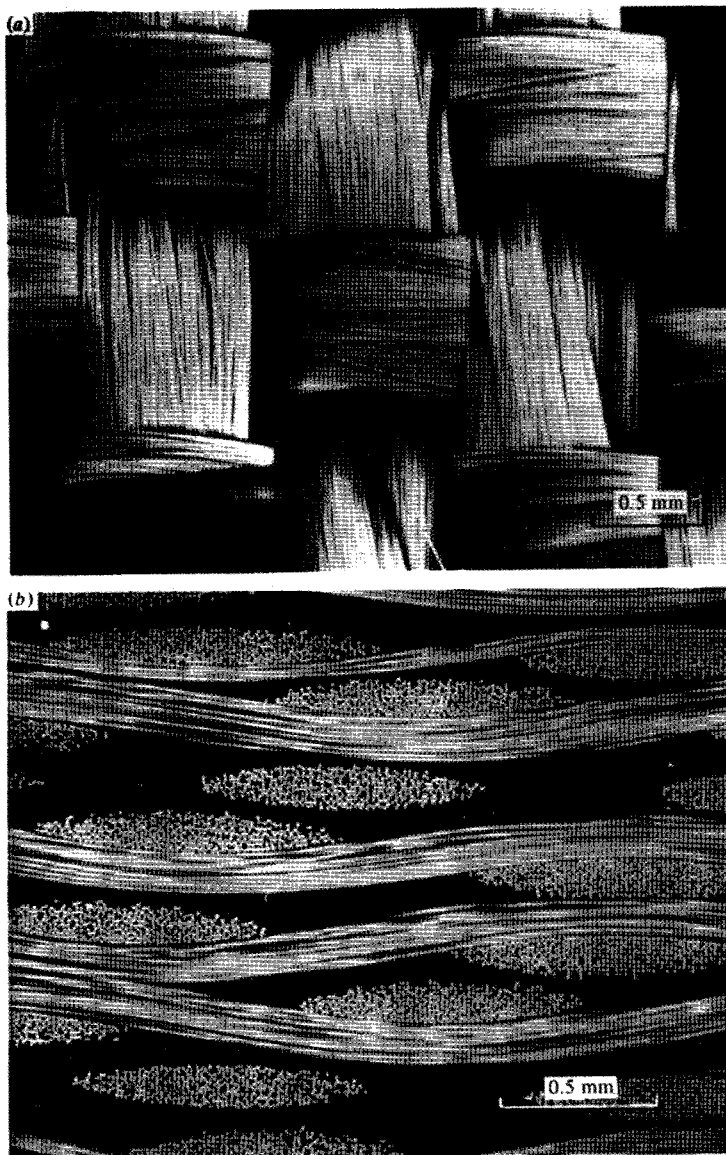
όπου  $V_1, V_2$ , κλπ είναι τα ποσοστά όγκου των συνιστωσών,  $W_1, W_2$ , κλπ, είναι τα ποσοστά βάρους των συνιστωσών,  $\rho_1, \rho_2$  είναι οι πυκνότητες των συνιστωσών.

### 3.18 Σύνθετα Ενισχυμένα με Πλεκτές Ίνες: Συνεχείς ίνες (woven roving: continuous fibres)

Σε πολλές περιπτώσεις οι ίνες πλέκονται πριν τοποθετηθούν μέσα στην μήτρα (Εικόνα 3.23 a, b). Εκτός των παραμέτρων που αναφέρθηκαν προηγουμένως, στην περίπτωση πλεγμένων ινών, ο χαρακτηρισμός του συνθέτου εξαρτάται και από:

1. τον τρόπο πλέξης (weave spacing)
2. τον αριθμό των ινών σε κάθε πλέξη
3. την γωνία που σχηματίζουν οι ίνες κατά την πλέξη (weave and weft direction).

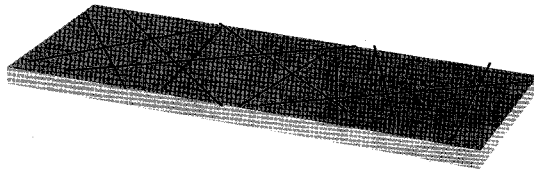
Η πλέξη δημιουργεί θύλακες ρητίνης στα σημεία συνάντησης των δεσμίδων των ινών, και το  $V_f \max$  στην περίπτωση των πλεκτών ινών είναι μικρότερο από το αντίστοιχο  $V_f \max$  των προσανατολισμένων ινών.



**Εικόνα 3.23** (α) Μικροφωτογραφία ενός woven roving πριν τον εμποτισμό του με ρητίνη.  
(β) Μικροφωτογραφία τομής παράλληλης προς τις ίνες σε ένα woven roving  
[Πηγή: D. Hull, An Introduction to Composite Materials, Cambridge Univ. Press 1981]

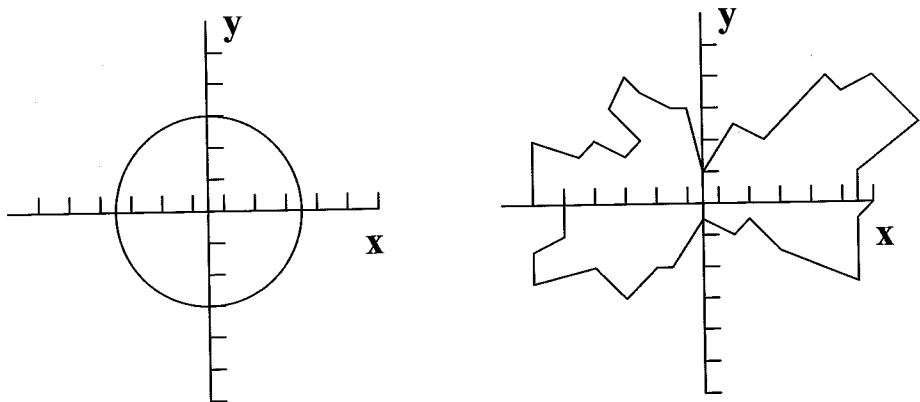
### 3.19 Ομοεπίπεδες Ίνες, Τυχαίου Προσανατολισμού (In-plane random fibres)

Οι στρώσεις, μπορεί να αποτελούνται από ομάδες ινών είτε από μεμονωμένες ίνες που σχεδόν βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο (Εικόνα 3.24). Στα σημεία διασταρώσεως παρατηρείται κάμψη των ινών και το  $V_{fmax}$  είναι πολύ μικρότερο εκείνου των προσανατολισμένων ινών. Τυπικές τιμές για τα εμπορικά σύνθετα αυτού του τύπου βρίσκονται ( $V_f = 0,10-0,30$ ). Η πιο σημαντική παράμετρος στην περίπτωση αυτή είναι ο προσανατολισμός των ινών.



Εικόνα 3.24 Σχηματική αναπαράσταση συνθέτου με μακρές ίνες τυχαίου προσανατολισμού

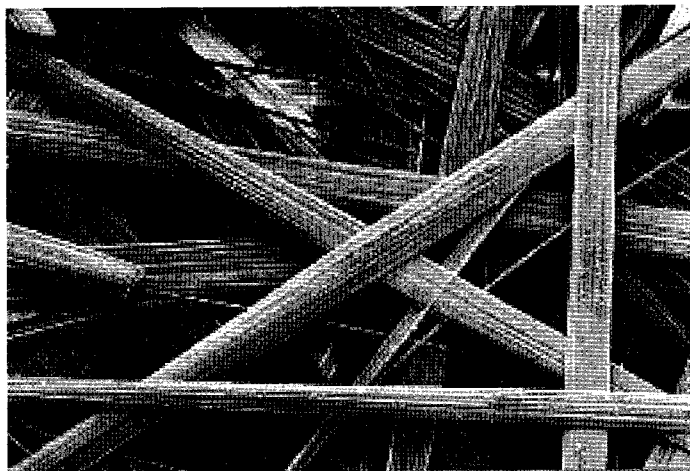
Η κατανομή του προσανατολισμού μπορεί να μελετηθεί με το ιστόγραμμα της Εικόνας 3.25. Στην περίπτωση τυχαίου προσανατολισμού το ιστόγραμμα είναι κύκλος (Εικόνα 3.25 a). Ενώ στην περίπτωση μιας προτιμητέας διεύθυνσης το ιστόγραμμα θα έχει την μορφή του (Εικόνα 6.25 b).



Εικόνα 3.25 Πολικό διάγραμμα που δείχνει την ποσοστιαία κατανομή των ινών ανά διεύθυνση

Πειραματικά, η κατανομή του προσανατολισμού των ινών μπορεί να γίνει με δύο απλούς τρόπους:

- (α) Στην περίπτωση μη οργανικών ινών, καίμε τη μήτρα και κάνουμε μικροσκοπική εξέταση των ινών.
- (β) Με ακτίνες X ενός τμήματος τού συνθέτου που έχει κοπεί παράλληλα προς το επίπεδο των ινών.



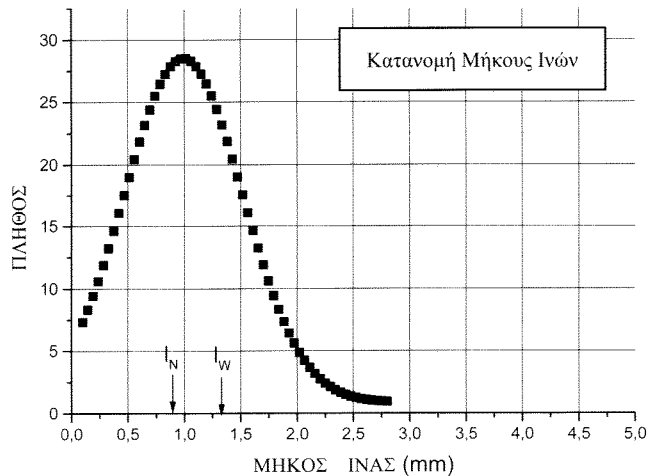
Εικόνα 3.26 Ίνες chopped strand mat πριν τον εμποτισμό τους με ρητίνη

### 3.20 Κατανομή του Μήκους των Ίνών (Fibre length distribution)

Οι ίνες που φαίνονται στην Εικόνα 6.26 κοπήκανε σε σταθερά προκαθορισμένο μήκος πριν ενσωματωθούν στην μήτρα. Αν η μήτρα είναι θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη μικρού ιξώδους, τότε οι ίνες διαβρέχονται πλήρως και δεν παρατηρείται οποιαδήποτε θραύση των ινών. Στην περίπτωση όμως θερμοπλαστικής μήτρας, όπου η ανάμιξη των ινών γίνεται σε έναν extruder, τότε αναπτύσσονται ισχυρές διατμητικές τάσεις με αποτέλεσμα την θραύση των ινών. Επειδή οι ιδιότητες των συνθέτων υλικών εξαρτώνται από το μήκος των ινών είναι βασικό να γνωρίζουμε την κατανομή του μήκους τους.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της κατανομής του μήκους των ινών μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: Τις έμμεσες και τις άμεσες. Στις έμμεσες μεθόδους περιλαμβάνονται οι μετρήσεις των φυσικών ιδιοτήτων

των συνθέτων υλικών, όπως της αντοχής και του μέτρου, που εξαρτώνται από το μήκος των ινών. Αυτές όμως οι μέθοδοι δεν είναι ακριβείς. Στις άμεσες μεθόδους, αφού καίγεται η μήτρα και διαλύεται, μένουν οι ίνες των οποίων το μήκος μετράται και κατασκευάζεται ένα ιστόγραμμα (Εικόνα 3.27). Παρατηρούμε ότι ενώ το αρχικό μήκος των ινών ήταν 6mm, μετά το τέλος της κατασκευής του συνθέτου οι περισσότερες ίνες έχουν μήκος 1mm. Το ποσοστό των ινών που θραύονται εξαρτάται από τον τρόπο κατασκευής του συνθέτου, το ιξώδες της μήτρας και την κ.ο. περιεκτικότητα των ινών.



**Εικόνα 3.27** Κατανομή μήκους ινών που έχουν εξαχθεί από ένα σύνθετο που κατασκευάστηκε με την μέθοδο injection moulding και είχε ως μήτρα θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη. Το αρχικό μήκος των ινών πριν την κατασκευή του συνθέτου, ήταν 6mm.

**Το μέσο αριθμητικό μήκος των ινών** (number average fibre length) είναι:

$$l_N = \frac{\sum N_i l_i}{\sum N_i} \quad (3.11)$$

όπου  $N_i$  το πλήθος των ινών μήκους  $l_i$

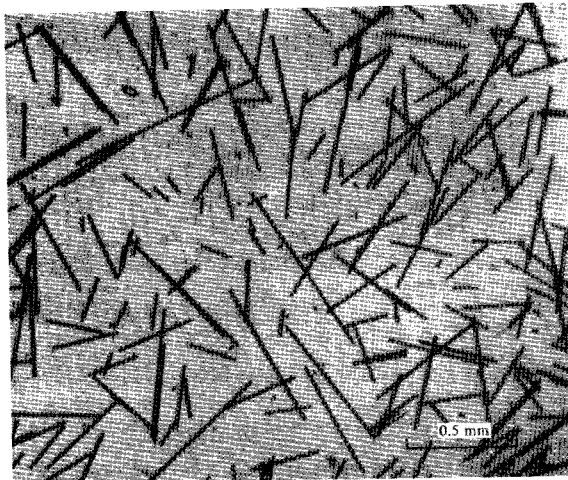
**Το μέσο βαρυντικό μήκος των ινών** (weight average fibre length) ορίζεται ως εξής:

$$l_w = \frac{\sum W_i l_i}{\sum W_i} \quad (3.12)$$

όπου  $W_i$  το βάρος των ινών μήκους  $l_i$ . Για ίνες σταθερής διαμέτρου έχουμε:

$$l_w = \frac{\sum \alpha N_i l_i^2}{\sum \alpha N_i l_i} = \frac{\sum N_i l_i^2}{\sum N_i l_i} \quad (3.13)$$

όπου  $\alpha = \pi r^2 \rho$  ( $2r =$  διάμετρος των ινών,  $\rho =$  πυκνότητα). Η διαφορά των δύο αυτών μέσων όρων φαίνεται στην Εικόνα 3.27. Συνήθως συμβαίνει  $l_N < l_w$ .

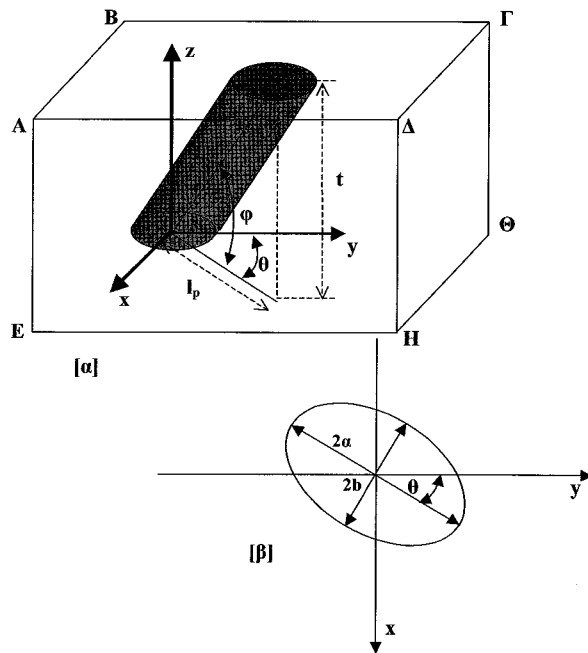


Εικόνα 3.28 Μικροφωτογραφία σύνθετου υλικού ενισχυμένου με κοντές ίνες όπου φαίνεται η ανομοιομορφία κατανομής του μήκους των ινών.

### 3.21 Κατανομή Προσανατολισμού των Ίνών

Η κατανομή προσανατολισμού των κοντών ινών μέσα στο σύνθετο υλικό είναι αρκετά δύσκολο να προσδιοριστεί με ικανοποιητική ακρίβεια. Η αρχή πάνω στην οποία στηρίζονται οι μέθοδοι προσδιορισμού της κατανομής προσανατολισμού των κοντών ινών, φαίνεται στην Εικόνα 3.29.

Το ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο ABΓΔΕΖΗΘ της Εικόνας 3.29 αναπαριστά μία λεπτή τομή ενός συνθέτου υλικού που έχει κοπεί σε προκαθορισμένη θέση και διεύθυνση ενός προϊόντος που έχει παραχθεί με την μέθοδο injection moulding. Το σύστημα xyz είναι ένα σταθερό σύστημα αναφοράς. Ο προσδιορισμός της κατανομής προσανατολισμού των ινών γίνεται με δύο τρόπους:



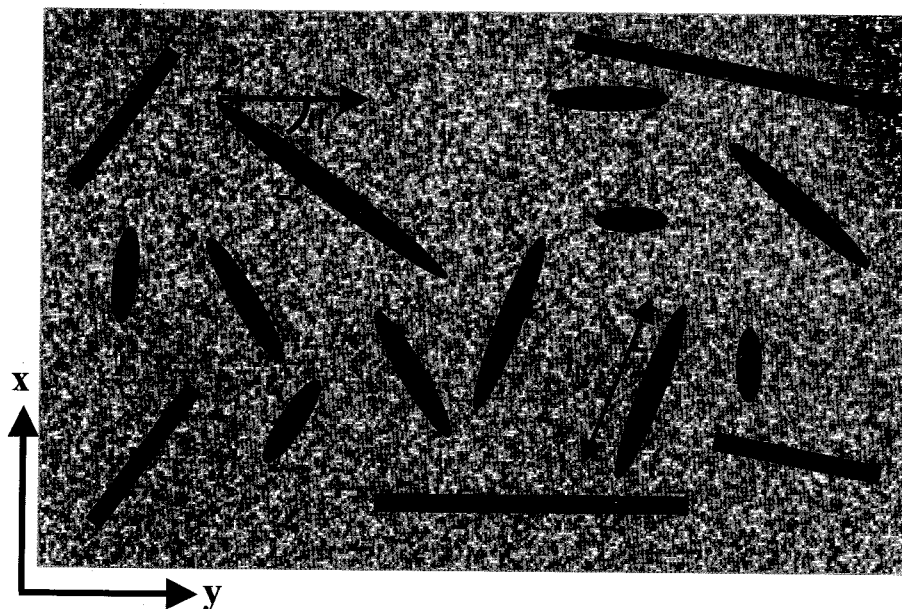
Εικόνα 3.29 Προσδιορισμός της κατανομής προσανατολισμού των ινών με βάση (α) τις γωνίες  $\varphi, \theta$  και (β) το σχήμα της διατομής της ίνας.

- 1. Προσδιορισμός με βάση τις γωνίες  $\varphi$  και  $\theta$ :** Σύμφωνα με αυτήν την μέθοδο, οι παράμετροι που καθορίζουν τον προσανατολισμό των ινών είναι οι γωνίες  $\varphi$  και  $\theta$ . Αυτές μπορούμε να τις μετρήσουμε πειραματικά, είτε με ακτίνες X είτε με την βοήθεια ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Οι ίνες, αν και διευθύνονται σε τρεις διαστάσεις, στο μικροσκόπιο και σε επίπεδη τομή θα παρουσιάζουν την εικόνα που φαίνεται στην Εικόνα 3.30. Η γωνία  $\theta$  μετράται απ'ευθείας από την φωτογραφία, ενώ η γωνία  $\varphi$  μετράται από το μήκος της προβολής  $I_p$  και το πάχος  $t$  του δοκιμίου (βλέπε Εικόνα 3.29):

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{t}{I_p} \right) \quad (3.14)$$



και όλα αυτά με την υπόθεση ότι η ίνα τέμνει και τις δύο οριζόντιες έδρες του δοκιμίου.



Εικόνα 3.30 Σχηματική αναπαράσταση της προβολής των ινών σε οριζόντιο επίπεδο

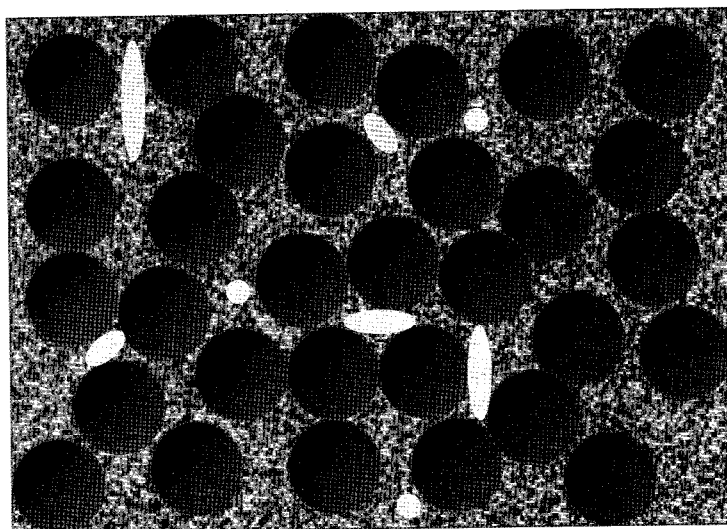
2. **Προσδιορισμός με βάση το σχήμα της τομής της ίνας:** Στην περίπτωση αυτή, υποθέτουμε ότι η ίνα έχει κυκλική διατομή οπότε η τομή της από τα δύο οριζόντια επίπεδα του ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου είναι δύο ελλείψεις των οποίων οι δύο κύριοι άξονες είναι  $2a$  και  $2b$ , ενώ ο προσανατολισμός της σε σχέση με το σταθερό σύστημα αναφοράς  $xyz$  προσδιορίζεται από την γωνία  $\theta$ . Από το Σχήμα 3.29β και από την γεωμετρία της ελλειπτικής τομής, προκύπτει ότι:

$$\varphi = \sin^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \quad (3.15)$$

Τα μεγέθη,  $a$ ,  $b$ , και  $\theta$  υπολογίζονται άμεσα από την μικροφωτογραφία του δοκιμίου. Τα αποτελέσματα και από τις δύο μεθόδους πρέπει στη συνέχεια να επεξεργασθούν στατιστικά.

### 3.22 Κενά (Voids)

Από μεγάλο αριθμό πειραματικών αποτελεσμάτων έχει προκύψει ότι ανεξάρτητα από τον τύπο της ρητίνης, τον τύπο της ίνας και την τυχόν επικάλυψη των ινών, η διαστρωματική διατμητική αντοχή (interlaminar shear strength) ενός συνθέτου υλικού μειώνεται κατά 7% για κάθε 1% περιεκτικότητα του συνθέτου σε κενά και ότι αυτό συνεχίζεται μέχρι το ποσοστό των 4% σε κενά. Επειδή και οι υπόλοιπες ιδιότητες επηρεάζονται από την ύπαρξη των κενών, είναι απαραίτητο να εξετάσουμε τον τύπο των κενών, την περιεκτικότητά τους και τους λόγους για τους οποίους αυτά εμφανίζονται.



Εικόνα 3.31 Σχηματική αναπαράσταση κενών μέσα στη δομή ενός συνθέτου υλικού

Εκτός από τα μεγάλα κενά τα οποία δημιουργούνται κατά την φάση της παραγωγής των συνθέτων υλικών, υπάρχουν δύο βασικοί τύποι κενών που αναπτύσσονται στα σύνθετα οι οποίοι είναι:

#### Τύποι κενών

- α) Κενά που αναπτύσσονται κατά μήκος της επιφάνειας των ινών και τα οποία μπορεί να είναι σφαιρικά ή ελλειψοειδή. Η διάμετρος αυτών των κενών εξαρτάται από την σχετική απόσταση των ινών και κυμαίνεται στην περιοχή 5-20μm.

- β) Κενά τα οποία αναπτύσσονται μεταξύ των στρώσεων και σε περιοχές πλούσιες σε ρητίνη.

### Αιτίες:

Τα κενά αναπτύσσονται για δύο κυρίως λόγους:

1. Λόγω κακής διαβροχής των ινών από την ρητίνη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τον εγκλωβισμό αέρα πράγμα το οποίο συμβαίνει συνήθως σε συστήματα όπου οι ξηρές ίνες βρίσκονται πολύ κοντά η μία στην άλλη και το ιξώδες της ρητίνης είναι πολύ υψηλό.
2. Λόγω της παρουσίας πτητικών αερίων που παράγονται κατά το στάδιο της παραγωγής και ιδιαίτερα κατά το στάδιο του curing στις θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες ή κατά το στάδιο της τήξης στις θερμοπλαστικές μήτρες. Τα πτητικά μπορεί να είναι τα κατάλοιπα διαλυτών, προϊόντων χημικών αντιδράσεων ή κλάσματα μικρού μοριακού βάρους.

### Παράγοντες που επηρεάζουν

Η περιεκτικότητα σε κενά καθώς και η κατανομή τους, εξαρτώνται από την κατ' όγκο περιεκτικότητα των ινών, την κατανομή των ινών, τις ιδιότητες της ρητίνης (μήτρας) και τις συνθήκες παραγωγής, όπως είναι η θερμοκρασία, η πίεση και ο χρόνος.

### Τρόποι μελέτης

Τα κενά μπορούμε να τα παρατηρήσουμε με την βοήθεια μικροσκοπίου σε δοκίμια τα οποία είναι πολύ καλά στιλβωμένα.

1. Μία μέθοδος προσδιορισμού της κατ' όγκον περιεκτικότητας σε κενά,  $V_v$ , είναι η πραγματοποίηση ποσοτικής ανάλυσης σε μικροφωτογραφίες που έχουν ληφθεί από διάφορα σημεία του συνθέτου. Η μέθοδος αυτή μας επιτρέπει να έχουμε μία πρώτη εκτίμηση για τον τύπο, την ποσότητα και την κατανομή των κενών. Όμως, για να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα, η μέθοδος αυτή απαιτεί έναν πολύ μεγάλο αριθμό δοκιμίων.
2. Μία πιο απλή και συνήθως χρησιμοποιούμενη μέθοδος, είναι αυτή που στηρίζεται στην μέτρηση της πυκνότητας. Η κατ' όγκον περιεκτικότητα σε κενά ορίζεται ως:

$$V_v = 1 - (V_f + V_R) \quad (3.16)$$

ή

$$V_v = 1 - \left( \frac{W_f}{\rho_f} + \frac{W_R}{\rho_R} \right) \quad (3.17)$$

όπου  $W$  είναι το κλάσμα βάρους και ο δείκτης  $R$  αναφέρεται στην πολυμερική μήτρα. Εδώ θα πρέπει να τονίσουμε ότι η γνωστή σχέση

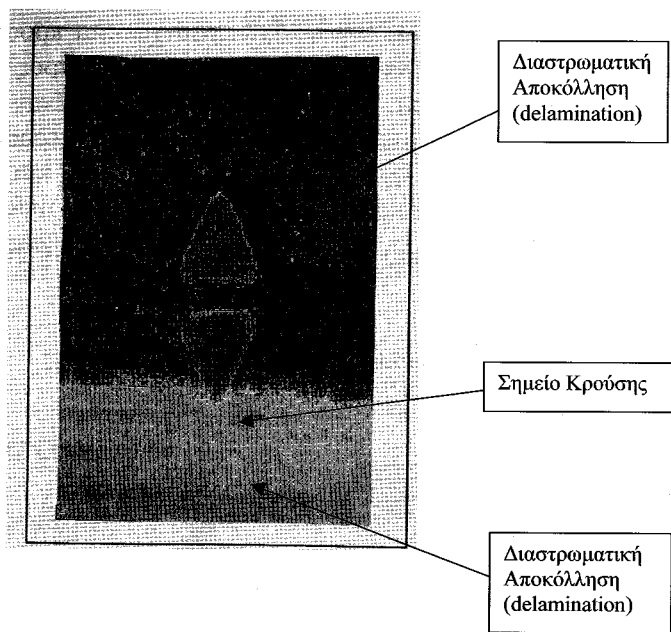
$$V_m = 1 - V_f \quad (3.18)$$

ισχύει υπό την προϋπόθεση ότι στο σύνθετο δεν υπάρχουν κενά ( $V_v = 0$ ) οπότε τότε θα ισχύει  $V_m = V_R$ . Με άλλα λόγια, η κατ' όγκον περιεκτικότητα σε κενά δεν υπολογίζεται ξεχωριστά. Από την σχέση (3.17) προκύπτει ότι η κ.ο. περιεκτικότητα σε κενά μπορεί να υπολογιστεί αν είναι γνωστά το βάρος των ινών και της μήτρας σε συγκεκριμένο βάρος του συνθέτου. Το βάρος της ρητίνης μπορεί να προσδιοριστεί από την πυκνότητα του συνθέτου και από το βάρος του αντίστοιχου συνθέτου υποθέτοντας ότι είναι ελεύθερο κενών γνωρίζοντας τα  $V_f$ ,  $\rho_f$  και  $\rho_R$ . Η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται από ένα σφάλμα  $\pm 0,5\%$ .

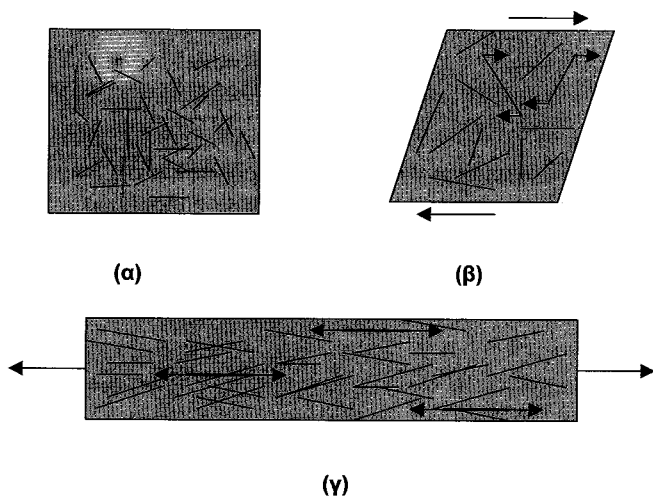
1. Τέλος, μία άλλη μέθοδος είναι αυτή των υπερήχων (ultrasonic scanning technique, C-scan) η οποία είναι μία μέθοδος μη-καταστροφικού ελέγχου με την βοήθεια της οποίας μπορούμε να εντοπίσουμε κενά καθώς και αποκολλήσεις στρώσεων στα πολύστρωτα σύνθετα υλικά. Το δοκίμιο σαράνεται από έναν υπερηχητικό παλμό και μετράται η απόκριση του υλικού. Η πληροφορία επεξεργάζεται και καταγράφεται σε διδιάστατη εικόνα. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για τον ποιοτικό έλεγχο των φύλλων των συνθέτων υλικών.

### 3.23 Προσανατολισμός των Ινών κατά την Ροή του Πολυμερούς

Μεταβολή του προσανατολισμού των ινών συμβαίνει κατά την διαδικασία παραγωγής κοντίνων συνθέτων υλικών. Η μεταβολή αυτή συνδέεται με περίπλοκο τρόπο με τις γεωμετρικές ιδιότητες των ινών, τις βισκοελαστικές ιδιότητες της μήτρας και το σχήμα του παραγόμενου προϊόντος. Στις μεθόδους παραγωγής των συνθέτων υλικών το τήγμα του πολυμερούς υφίσταται εφελκυστική (extensional flow) και διατμητική ροή (shear flow) (Εικόνα 3.32).

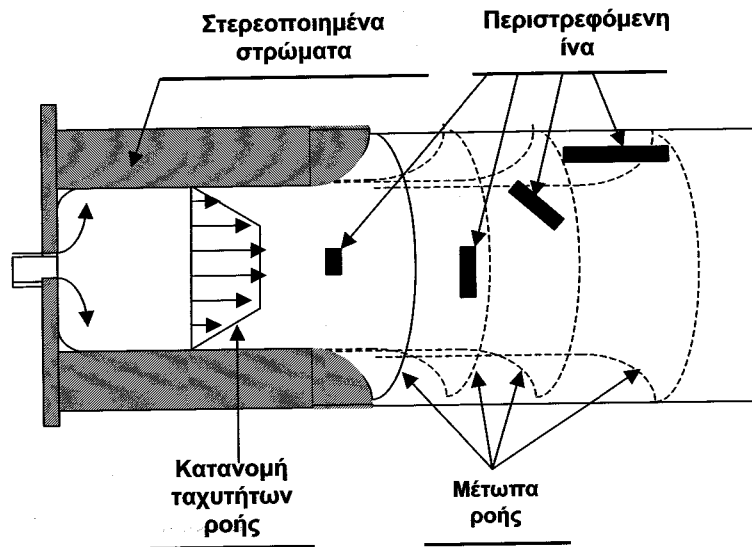


**Εικόνα 3.32** Σχηματική αναπαράσταση γραφήματος C-scan σε δοκίμιο από ανθρακονήματα και εποξεική ρητίνη που υπέστη κρούση στο κέντρο του



**Εικόνα 3.33** Σχηματική αναπαράσταση της μεταβολής του προσανατολισμού κοντών ινών σε ένα πολυμερικό σύνθετο κατά την ροή της ρευστής ρητίνης. (α) Αρχικός τυχαίος προσανατολισμός των ινών, (β) Στροφή των ινών λόγω διάτμησης, (γ) Διαμήκης προσανατολισμός λόγω εφελκυστικών δυνάμεων.

Κατά την στροφή των ινών λόγω διάτμησης δεν επιτυγχάνεται προσανατολισμός προς μία και μοναδική διεύθυνση γιατί κάποιες ίνες στρέφονται προς την μία φορά και κάποιες προς την άλλη. Αντίθετα, με τον εφελκυσμό έχουμε έναν αρκετά καλό προσανατολισμό προς την διεύθυνση του φορτίου. Γενικά, ο προσανατολισμός των ινών εξαρτάται από το πεδίο ροής, το ιξώδες του πολυμερούς και τον τρόπο με τον οποίο πληρείται το καλούπι. Έτσι, κατά την μέθοδο injection υπάρχει μία προτιμητέα διεύθυνση των ινών παράλληλα προς τα τοιχώματα του καλουπιού (Εικόνα 3.34).



Εικόνα 3.34 Σχηματική αναπαράσταση της περιστροφής κοντής ίνας κατά την ροή του πολυμερούς σε μία μηχανή injection moulding