

Χημεία & Τεχνολογία Υλικών



Materials Chemistry & Technology



Πολυμερή
Polymers



Καταλύτες
Catalysts



Κολλοειδή
Colloids



Νανοδομές Άνθρακα
Carbon Nanostructures



Σύνθετα Υλικά
Composites



Κεραμικά
Ceramics



Δενδρομερή-
Δενδρόμορφα Πολυμερή



Σύνθετα Υλικά / *Composites*

Ο όρος σύνθετα υλικά (composites materials) περιγράφει εκείνα τα υλικά που απαρτίζονται από δύο ή περισσότερα διακριτά μέρη.

Δηλ. τα υλικά των οποίων τα επιμέρους συστατικά παρουσιάζουν σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους, ενώ και το τελικό σύνθετο υλικό, φέρει αρκετά διαφορετικές ιδιότητες από αυτές των επιμέρους συστατικών του.

Τα επιμέρους συστατικά ενός σύνθετου υλικού χαρακτηρίζονται από διακριτές διαστάσεις στη φυσική κλίμακα, δηλαδή της τάξης του $1 \mu m$ και συνδέονται σε ατομικό/μοριακό επίπεδο. Επιπλέον, τα επιμέρους συστατικά που απαρτίζουν τα σύνθετα, σχηματίζουν μεταξύ τους χημικές αντιδράσεις ή μετασχηματισμούς.

Στα σύνθετα υλικά, το ένα από τα συστατικά μέρη του υλικού, χαρακτηρίζεται ως **συστατικό ενίσχυσης** και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Το άλλο συστατικό χαρακτηρίζεται ως **μήτρα** και συνήθως είναι ένα υλικό χαμηλής πυκνότητας του οποίου η συμμετοχή στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης.

Τα σύνθετα υλικά ταξινομούνται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με
(α) τη μήτρα του κάθε σύνθετου,
(β) τα διαφορετικού τύπου και μεγέθους εγκλείσματα που περιέχουν και
(γ) τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή τους.

Τα σύνθετα υλικά υπερσχύουν έναντι των υφιστάμενων υλικών που αντικαθιστούν λόγω των ειδικών ιδιοτήτων τους

Ιστορική Ανάπτυξη των Πολυμερικών Συνθέτων Υλικών :

ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΑ	ΥΛΙΚΟ
5000 π.Χ.	Μίγμα παπύρου-πίσσας
1500 π.Χ.	Επίστρωση ξύλου (καπλαμάς)
1909 μ.Χ.	Φαινολικά σύνθετα
1928 μ.Χ.	Σύνθετα ουρίας-φορμαλδεΐδης
1938 μ.Χ.	Σύνθετα μελαμίνης-φορμαλδεΐδης
1942 μ.Χ.	Πολυεστέρας- ίνες υάλου
1946 μ.Χ.	Σύνθετα εποξειδικής ρητίνης
1946 μ.Χ.	Σύνθετα Nylon - ίνες υάλου
1951 μ.Χ.	Σύνθετα πολυστυρενίου-υάλου
1956 μ.Χ.	Σύνθετα φαινόλης-αμιάντου
1964 μ.Χ.	Πλαστικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα
1965 μ.Χ.	Πλαστικά ενισχυμένα με ίνες βορίου
1969 μ.Χ.	Υβριδικά σύνθετα άνθρακα-υάλου
1972 μ.Χ.	Πλαστικά ενισχυμένα με ίνες Aramid
1975 μ.Χ.	Υβριδικά σύνθετα aramid/γραφίτη



Σύνθετα Υλικά / Composites

παραδείγματα είναι: ο σύνδεσμος ινών γυαλιού με ένα πολυμερές, η ανάμειξη σκόνης του καρβιδίου του βολφραμίου με σκόνη κοβαλτίου, κλπ. Σε αυτές τις περιπτώσεις λαμβάνουμε ένα **εξαιρετικό συνδυασμό ιδιοτήτων** με την ανάμειξη δύο ή περισσότερων υλικών. **Αυτή η βελτιωμένη συμπεριφορά αναφέρεται σαν αρχή της συνδυασμένης δράσης.**

Ο σύγχρονος όρος “σύνθετα υλικά” αναφέρεται σε υλικά που **προκύπτουν τεχνητά** και όχι φυσικά.

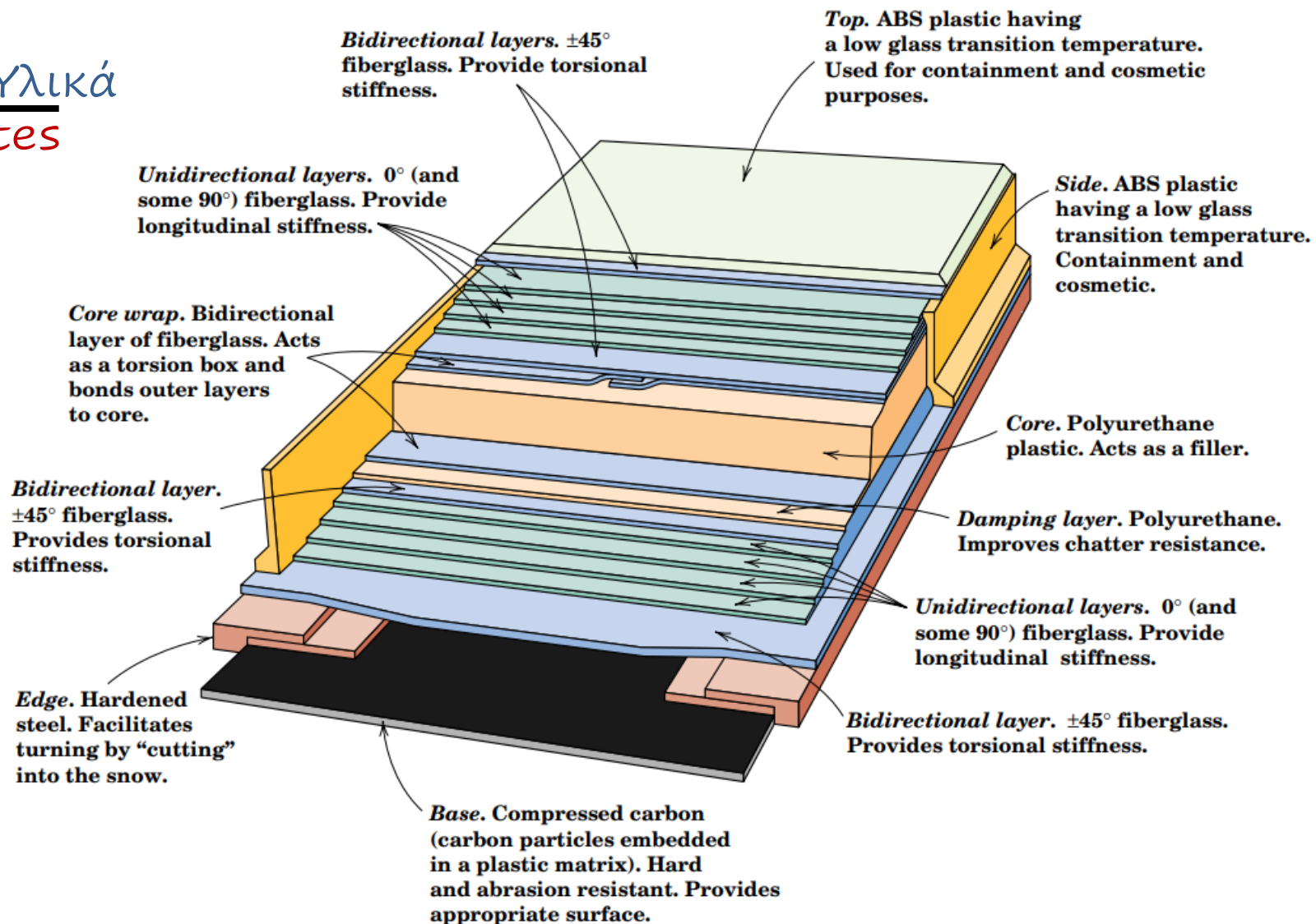
Οι δύο φάσεις του σύνθετου υλικού πρέπει να είναι χημικά ανόμοιες και χωρισμένες με διακριτή διεπιφάνεια.

Για τους λόγους αυτούς δεν θεωρούνται ως σύνθετα υλικά το ξύλο (παρ’ όλο που αποτελείται από δυνατές και ευλύγιστες ίνες κυτταρίνης περιβαλλόμενες και κρατημένες μαζί από σκληρότερο υλικό, τη λιγνίνη), ούτε τα οστά (παρ’ όλο που αποτελούνται από ανθεκτική και ταυτόχρονα μαλακή πρωτεΐνη, την κολλαγόνη, και σκληρό ψαθυρό απατίτη), ούτε τα μεταλλικά κράματα και τα περισσότερα κεραμικά (διότι οι πολλαπλές φάσεις τους σχηματίζονται σε συνέπεια φυσικών φαινομένων).

Τα περισσότερα σύνθετα υλικά αποτελούνται από δύο φάσεις: τη **μήτρα**, που είναι συνεχής και περιβάλλει την άλλη φάση, και τη **δισπαρμένη φάση**.

Οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού είναι συνάρτηση των ιδιοτήτων των δύο φάσεων, των σχετικών τους ποσοστών αναλογίας, και της γεωμετρίας της δισπαρμένης φάσης.

Σύνθετα Υλικά Composites



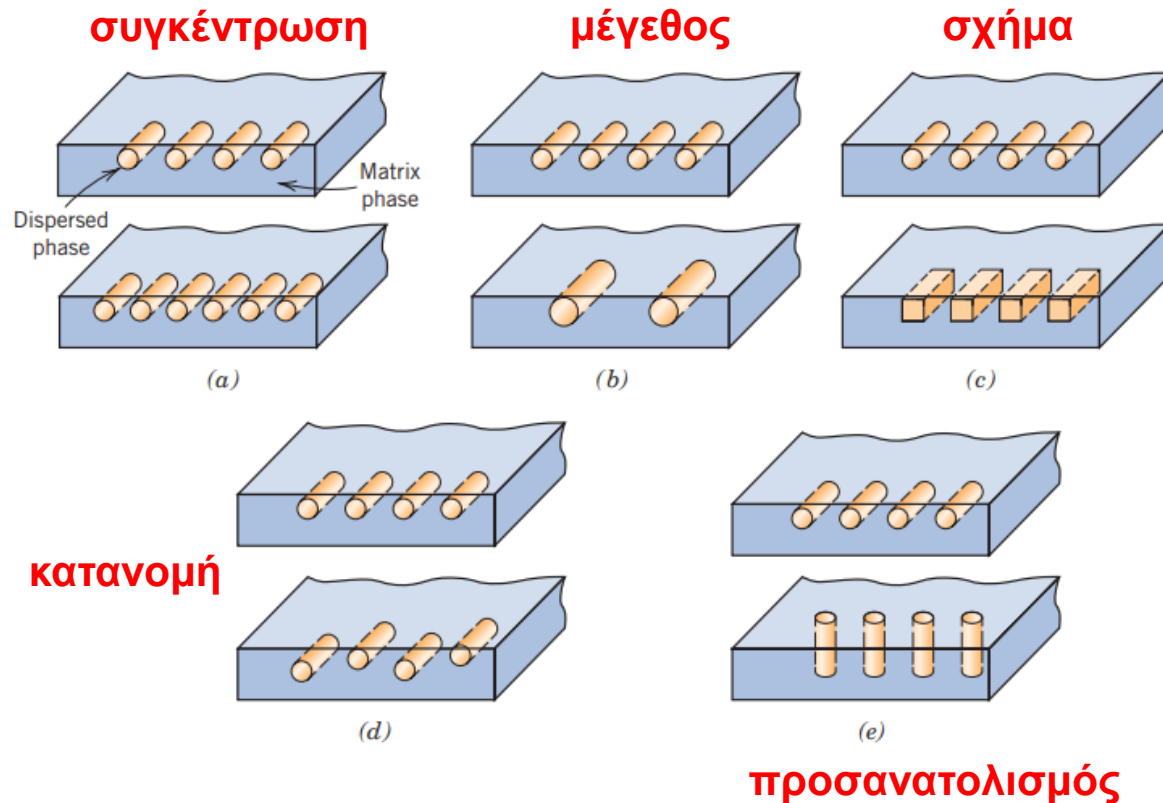
Τα σύγχρονα **πέδιλα του σκι**, αποτελούν ένα σχετικά **περίπλοκο πολυ-σύνθετο υλικό**. Στο σχέδιο φαίνεται η τομή ενός πέδilu σκι χιονιού υψηλής απόδοσης. Σημειώνεται η λειτουργία του κάθε τμήματος, καθώς και το υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του (Evolution Ski Company, Salt Lake City, Utah).

Σύνθετα Υλικά / Composites

Ένα σύνθετο υλικό θεωρείται **πολυφασικό υλικό**

Οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών είναι συνάρτηση των ιδιοτήτων των συνιστωσών τους φάσεων, των σχετικών ποσοτήτων τους και της γεωμετρίας της διασπαρμένης φάσης.

Η «γεωμετρία της διασπαρμένης φάσης» σε αυτό το πλαίσιο σημαίνει το σχήμα των κόκκων και το μέγεθος των κόκκων, η κατανομή και ο προσανατολισμός τους. Αυτά τα χαρακτηριστικά φαίνονται στο σχήμα



Σχηματική αναπαράσταση των διαφόρων γεωμετρικών και διασταλτικών χαρακτηριστικών των σωματιδίων της διασπαρμένης φάσης που επηρεάζει τις ιδιότητες των σύνθετων υλικών:

α) συγκέντρωση, β) μέγεθος, γ) σχήμα, δ) κατανομή και ε) προσανατολισμός.

Richard E. Flinn and Paul K. Trojan, Engineering Materials and their Applications, 4th Edition.

Τα κύρια συστατικά του σύνθετου υλικού:

Μήτρα: είναι η συνεχής φάση στο σύνθετο

Ρόλος:

- Μεταφορά τάσεων στις άλλες φάσεις
- Προστασία των φάσεων από το περιβάλλον
- Κατηγοριοποίηση:

MMC (Metal Matrix Composites)

CMC (Ceramic Matrix Composites)

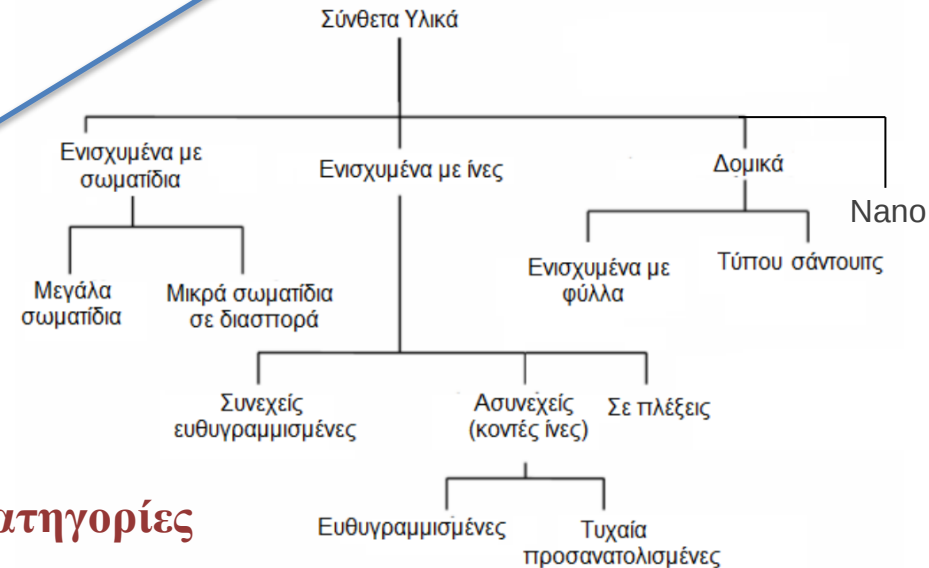
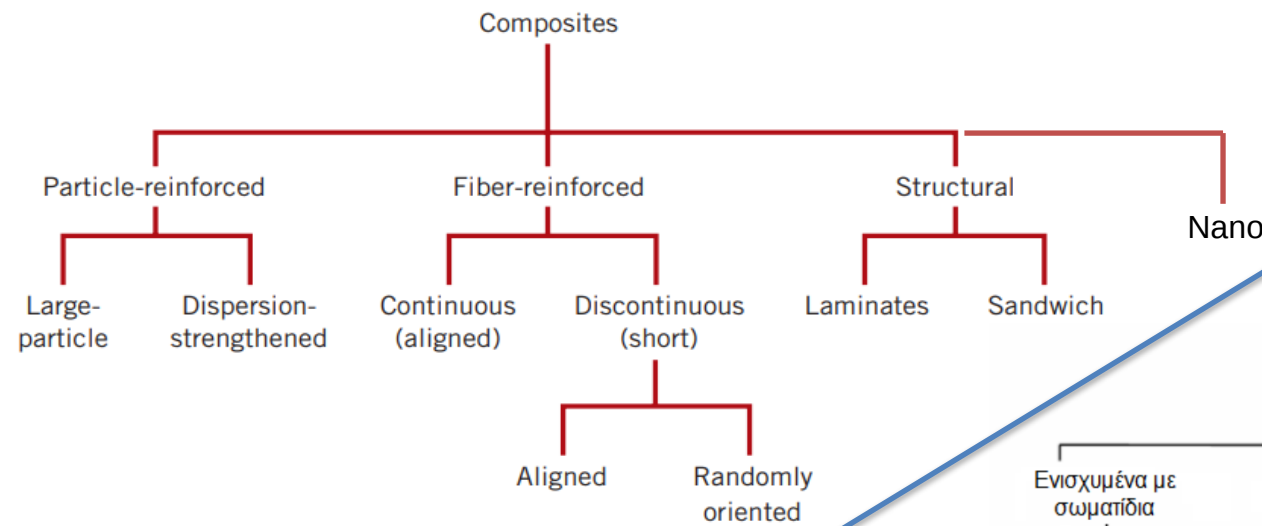
PMC (Polymer Matrix Composites)

Ενίσχυση: είναι η ασυνεχής ή διασκορπισμένη φάση στο σύνθετο

Ρόλος:

- Ενίσχυση της μήτρας
- Κατηγοριοποίηση: σωματίδια, ίνες, δομικά

classification



Τα σύνθετα υλικά ταξινομούνται σε **4 γενικές κατηγορίες**

(α) ενισχυμένα με **σωματίδια/κόκκους**,

(β) ενισχυμένα με **ίνες**, (γ) **δομικά** σύνθετα (δ) **νανοσύνθετα**.

Στην πρώτη περίπτωση η διεσπαρμένη φάση έχει ίδιες περίπου διαστάσεις σε όλες τις κατευθύνσεις.

Στη δεύτερη περίπτωση, η διεσπαρμένη φάση έχει τη γεωμετρία ίνας (δηλ. μεγάλη αναλογία λόγου μήκους/διάμετρο).

Τα δομικά είναι πολυστρωματικά, με χαμηλή πυκνότητα και μεγάλο βαθμό δομικής ακεραιότητας.

Στα νανοσύνθετα οι διαστάσεις κόκκων της διεσπαρμένης φάσης είναι της τάξης νανομέτρων.

Τύποι Ενίσχυσης



Κοκκώδη



Κοντές Ίνες Τυχαίας
Διεύθυνσης



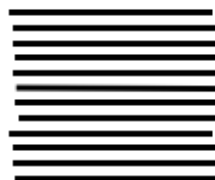
Μικτό Κοκκώδες με τυχαία
κατανομή κοντών ινών



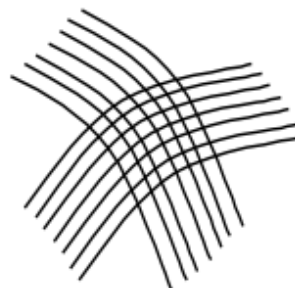
Νιφάδες



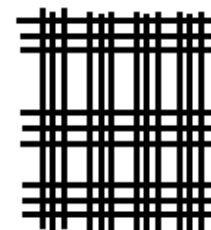
Προσανατολισμένες
Κοντές Ίνες



Συνεχείς Ίνες μιας
Διεύθυνσης



Λιασταυρούμενες Ίνες
τυχαίας διεύθυνσης



Λιασταυρούμενες Ίνες
σε γωνία 90o



Αλληλοδιαχέσιμα
Δίκτυα (IPN)



Σάντουιτς με Αφρό



Διάφορες Πλέξεις Ινών



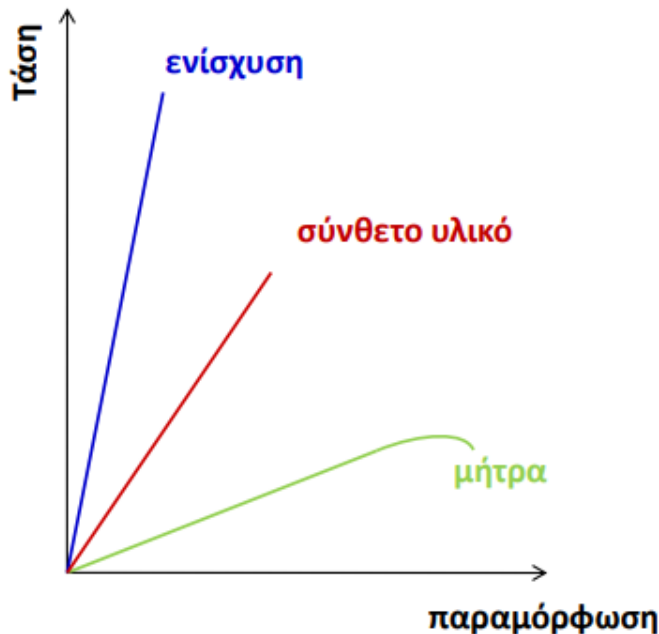
Πολύστρωτο Σύστημα

Οι ιδιότητες του συνθέτου

είναι συνδυασμός των ιδιοτήτων της μήτρας και αυτών της ενίσχυσης.

Συνολικά, οι ιδιότητες του συνθέτου καθορίζονται από:

- Ιδιότητες της μήτρας
- Ιδιότητες της ενίσχυσης
- Ποσοστό των δύο φάσεων
- Γεωμετρία και προσανατολισμός της ενίσχυσης
- Πρόσφυση μήτρας/ενίσχυσης
- Κατασκευαστική τεχνολογία

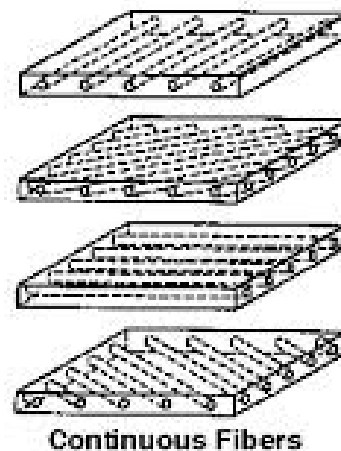


Ενίσχυση

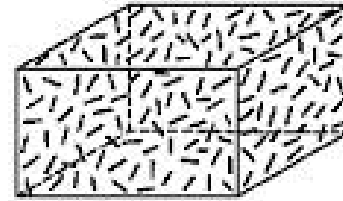
Ο ρόλος του οπλισμού-ενίσχυσης στα σύνθετα υλικά είναι πρωτίστως να προσθέτει μηχανικές ιδιότητες στο υλικό όπως **αντοχή** και **ακαμψία**

Οι ενισχύσεις βασικά έρχονται σε τρεις μορφές :

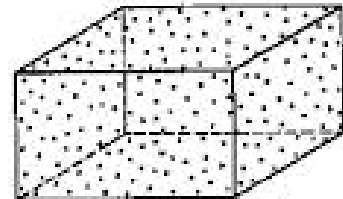
- **κόκκους-σωματίδια**
- **ασυνεχής ίνες**
- **συνεχής ίνες**



Continuous Fibers



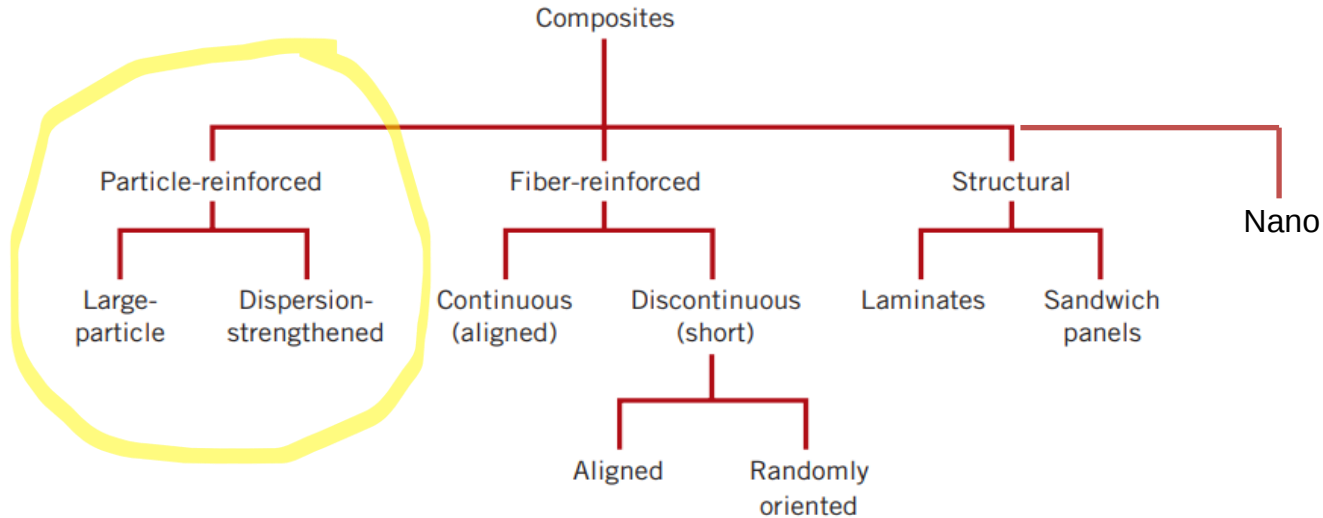
Short Fibers



Particles

Reinforcements become fibers when one dimension becomes long compared to others. Discontinuous reinforcements (chopped fibers, milled fibers) vary in length from a few millimeters to a few centimeters.

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ



Όπως αναφέρθηκε υπάρχουν δύο τύποι ενίσχυσης με σωματίδια:

(α) με μεγάλα σωματίδια (β) ενισχυμένα με διασπορά

Στην πρώτη περίπτωση, το σύνθετο υλικό προϋποθέτει ότι τα σωματίδια έχουν **διάμετρο μεγαλύτερη από 1 μm** και το ποσοστό του όγκου τους είναι **μεγαλύτερο από 25%**. Στην περίπτωση αυτή, η εφαρμοζόμενη μηχανική τάση πάνω στο σύνθετο υλικό διαμοιράζεται και στη μήτρα και στα σωματίδια του υλικού.



ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

Στην κατηγορία της σωματιδιακής ενίσχυσης ανήκουν και τα σύνθετα υλικά **κεραμομέταλλα (cermets)**, που αποτελούνται από σύνθεση κεραμικών με μέταλλα. Το πιο κοινό είναι το **ενισχυμένο καρβίδιο**, που αποτελείται από εξαιρετικά σκληρά σωματίδια πυρίμαχου κεραμικού καρβιδίου (π.χ. καρβίδιο του βολφραμίου ή του τιτανίου), μέσα σε μήτρα μετάλλου (π.χ. κοβαλτίου ή νικελίου). *Τα σύνθετα αυτά χρησιμοποιούνται σαν κοπτήρες σκληρυνθέντα χάλυβα.*

Άλλη περίπτωση σωματιδιακής ενίσχυσης αποτελεί η προσθήκη μικρών σφαιρικών κόκκων γραφίτη στο βουλκανισμένο καουτσούκ για την παραγωγή **ελαστικών αυτοκινήτων**. Τα σωματίδια του γραφίτη έχουν διάμετρο 20 με 50 nm (0.02 με 0.05 μm) και συγκέντρωση 15 με 30% κατ' όγκο.

Η ενίσχυση μεταλλικών υλικών με **διασπορά σωματιδίων**, ισχύει όταν τα σωματίδια έχουν διάμετρο μικρότερη από 0.1 μm και όγκο 10-15% του όλου υλικού. Στην περίπτωση αυτή, η μήτρα δέχεται όλη την εφαρμοζόμενη μηχανική τάση.

Ένα παράδειγμα σύνθετου υλικού με **ενίσχυση διασποράς** είναι και η κατανομή αλουμίνας μέσα σε αλουμίνιο. όπου στη μήτρα αλουμινίου εισάγονται με πυροσυσσωμάτωση μικρά σωματίδια Al_2O_3 , οπότε μπορούμε να αυξήσουμε την αντοχή σε διάφορες μηχανικές καταπονήσεις του αλουμινίου και ιδιαίτερα σε υψηλές θερμοκρασίες.

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

Οι μαθηματικές εκφράσεις που έχουν αναπτυχθεί για την περίπτωση σωματιδιακής ενίσχυσης αφορούν το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου σε σχέση με το μέτρο ελαστικότητας της κάθε φάσης.

Ισχύει ο **νόμος των μειγμάτων** που καθορίζει το ανώτατο (upper) και το κατώτερο (lower) όριο του E , σύμφωνα με τις σχέσεις

μέτρο ελαστικότητας E

ανώτατο (upper) όριο

$$E_c(u) = E_m V_m + E_p V_p$$

κατώτερο (lower) όριο

$$E_c(l) = E_m E_p / (V_m E_p + V_p E_m)$$

όπου

E είναι το μέτρο ελαστικότητας,

V είναι το ποσοστό όγκου,

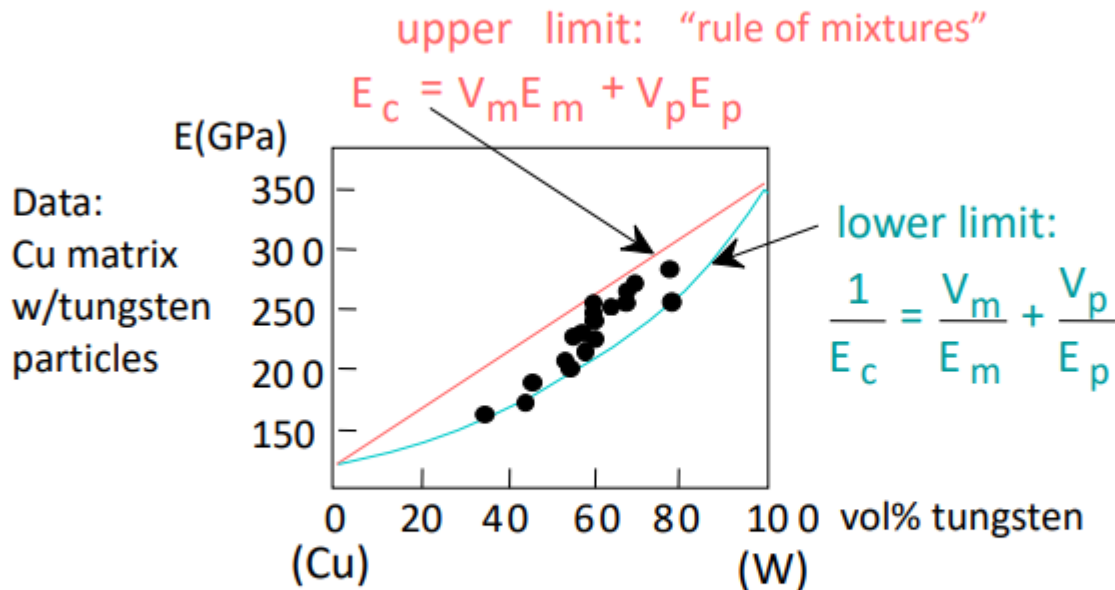
οι δείκτες c , m , p αναφέρονται στο σύνθετο υλικό, τη μήτρα και τα σωματίδια

- σωματίδια ίδιου μεγέθους σε όλες τις διευθύνσεις (ισοαξονική)
- ομοιογενής κατανομή/διασπορά στη μήτρα
- βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων με αύξηση του ποσοστού του κόκκου

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

Μέτρο ελαστικότητας, E_c :

-- Δύο προσεγγίσεις.



Adapted from Fig. 16.3, *Callister 6e*. (Fig. 16.3 is from R.H. Krock, *ASTM Proc*, Vol. 63, 1963.)

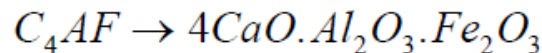
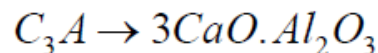
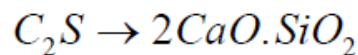
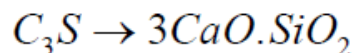
Κατ' αναλογία:

- Ηλεκτρική αγωγιμότητα, s_e : Αντικατάσταση E με s_e .
- Θερμική αγωγιμότητα, k : Αντικατάσταση E με k .

Modulus of elasticity versus volume percent tungsten for a composite of tungsten particles dispersed within a copper matrix. Upper and lower bounds are according to Equations; experimental data points are included. (From R. H. Krock, *ASTM Proceedings*, Vol. 63, 1963. Copyright ASTM, 1916 Race Street, Philadelphia, PA 19103.)

ΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Το σκυρόδεμα είναι ένα σημαντικό οικοδομικό υλικό, που χρησιμοποιείται από τους αρχαίους χρόνους μέχρι σήμερα. Στην ουσία πρόκειται για **σύνθετο υλικό με μεγάλα σωματίδια**, αφού είναι μίγμα πολτού (αποτελούμενου από τσιμέντο, νερό και εγκλωβισμένο αέρα) με ένα σύνολο σωματιδίων, π.χ. άμμος. Σημειωτέον ότι και η μήτρα και η διεσπαρμένη φάση είναι κεραμικά υλικά. Το σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται από χαμηλή τιμή της εφελκυστικής τάσης, υψηλή τιμή της θλιπτικής τάσης, και έλλειψη μεγάλης ευελιξίας. Σήμερα χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι σκυροδέματος, οι οποίοι περιέχουν τσιμέντο διάφορης χημικής σύστασης. Η πιο καλή ποιότητα τσιμέντου είναι αυτή του **τύπου Πόρτλαντ**. Το τσιμέντο Πόρτλαντ αποτελείται από τα ακόλουθα υλικά:



Το τσιμέντο σκληραίνει με την προσθήκη νερού και τη δημιουργία μιας χημικής αντίδρασης (υδρόλυσης), η οποία έχει σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό μιας γλυώδους ουσίας (gel) και διαφόρων κρυστάλλων.

ΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

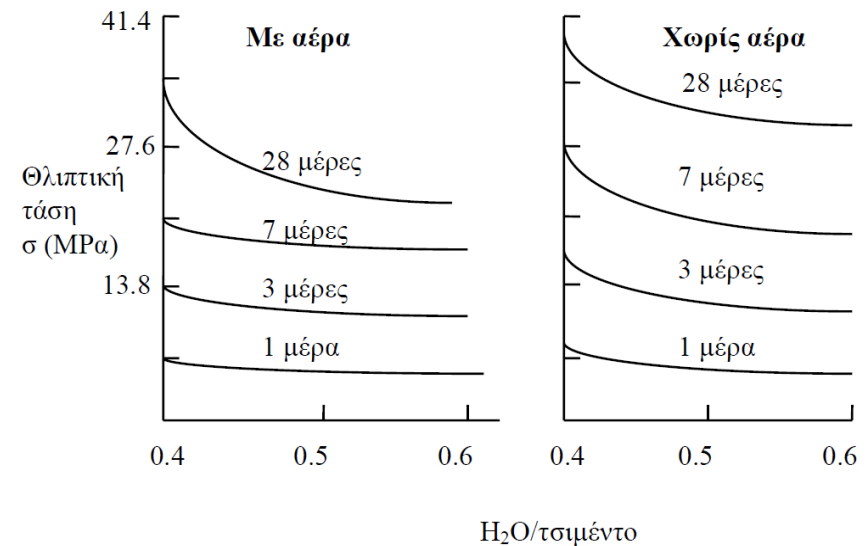
Επιθυμητό: παρασκευή κατάλληλου τσιμέντου με πολύ υψηλή μηχανική αντοχή αλλά με ελάχιστο δυνατό κόστος.

Η μηχανική αντοχή του σκυροδέματος αυξάνεται με τη μείωση του λόγου νερό/τσιμέντο. Η αντίδραση υδρόλυσης του τσιμέντου ελευθερώνει ενέργεια, και ο ρυθμός της υδρόλυσης είναι υψηλότερος σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Συνεπώς ο σωστός τύπος τσιμέντου, ο λόγος νερό/τσιμέντο, και η κατεργασία του εξαρτώνται και από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Οπλισμένο σκυροδέμα

Όπως με τα ενισχυμένα με ίνες σύνθετα υλικά, το σκυρόδεμα μπορεί να ενισχυθεί με διάφορους τρόπους για να βελτιωθούν οι μηχανικές του ιδιότητες. Τότε λέγεται οπλισμένο σκυρόδεμα (ή μπετόν αρμέ, γαλ. beton armé).

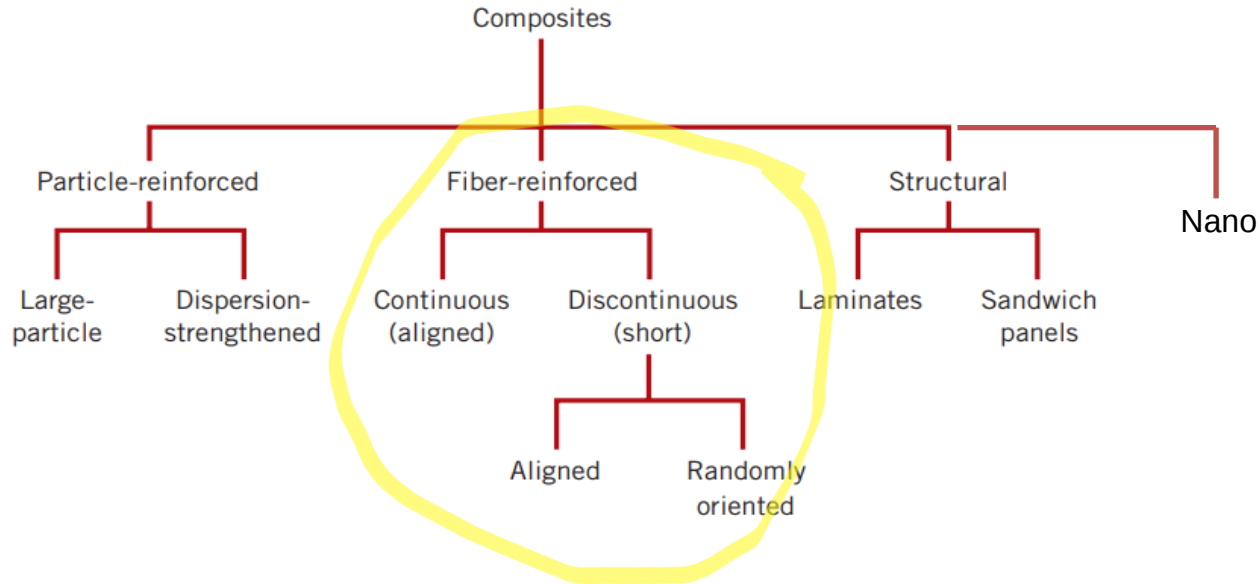
Ο συνηθέστερος τρόπος ενίσχυσης είναι με σιδερένιες βέργες, σύρματα, ή σιδερένια πλέγματα, τα οποία εμπερικλείονται στο νωπό και πριν την στερεοποίησή του σκυρόδεμα. Η ενίσχυση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα τη δυνατότητα του σκυροδέματος να υφίσταται μεγαλύτερες εφελκυστικές, θλιπτικές, και διατμητικές τάσεις, ακόμα και σε περίπτωση που εμφανίζονται ρωγμές.



τάση θλίψης σα συνάρτηση του χρόνου για σκυρόδεμα που περιέχει και δεν περιέχει αέρα

παρατηρείται ότι ο εγκλωβισμένος αέρας στο σκυρόδεμα μειώνει την τάση θλίψης του. όμως ο παγιδευμένος αέρας στο σκυρόδεμα του δίνει μεγαλύτερη χρονική διάρκεια χρήσης

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΙΝΕΣ



Από όλα τα χρησιμοποιούμενα σύνθετα υλικά, τα πλέον γνωστά είναι εκείνα τα οποία αποτελούνται από πολυμερική μήτρα στην οποία έχουν εισαχθεί ίνες. Οι ιδιότητές τους επηρεάζονται από πολλές παραμέτρους, οι κυριότερες των οποίων είναι η γεωμετρία, ο προσανατολισμός, και η κατανομή των ινών.

Στόχος

υψηλή αντοχή και/ή δυσκαμψία όπως εκφράζονται από τους όρους

ειδική αντοχή = εφελκυστική αντοχή / ειδικό βάρος

ειδικό μέτρο ελαστικότητας = μέτρο ελαστικότητας / ειδικό βάρος

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΙΝΕΣ

Τύπος Ίνας	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Ίνες Γυαλιού (<i>E-glass, S-glass</i>)	Υψηλή αντοχή Χαμηλό κόστος	Χαμηλό μέτρο ελαστικότητας Μικρή διάρκεια ζωής σε κόπωση Μεγάλη ευαισθησία σε υψηλές θερμοκρασίες
Ίνες Αραμιδίων (<i>Aramid - Kevlar</i>)	Υψηλή εφελκυστική αντοχή Μικρή πυκνότητα	Χαμηλή θλιπτική αντοχή Μεγάλη απορρόφηση υγρασίας
Ίνες Βορίου (<i>Boron</i>)	Υψηλό μέτρο ελαστικότητας Υψηλή θλιπτική αντοχή	Υψηλό κόστος
Ίνες Άνθρακα (<i>Carbon - AS4, T300, C6000</i>)	Υψηλή αντοχή Υψηλό μέτρο ελαστικότητας	Σχετικά υψηλό κόστος
Ίνες Γραφίτη (<i>Graphite - GY-70, pitch</i>)	Πολύ υψηλό μέτρο ελαστικότητας	Χαμηλή αντοχή Υψηλό κόστος
Κεραμικές Ίνες (<i>Ceramic - silicon carbide, alumina</i>)	Υψηλό μέτρο ελαστικότητας Υψηλή αντοχή σε μεγάλες θερμοκρασίες	Χαμηλή αντοχή Υψηλό κόστος

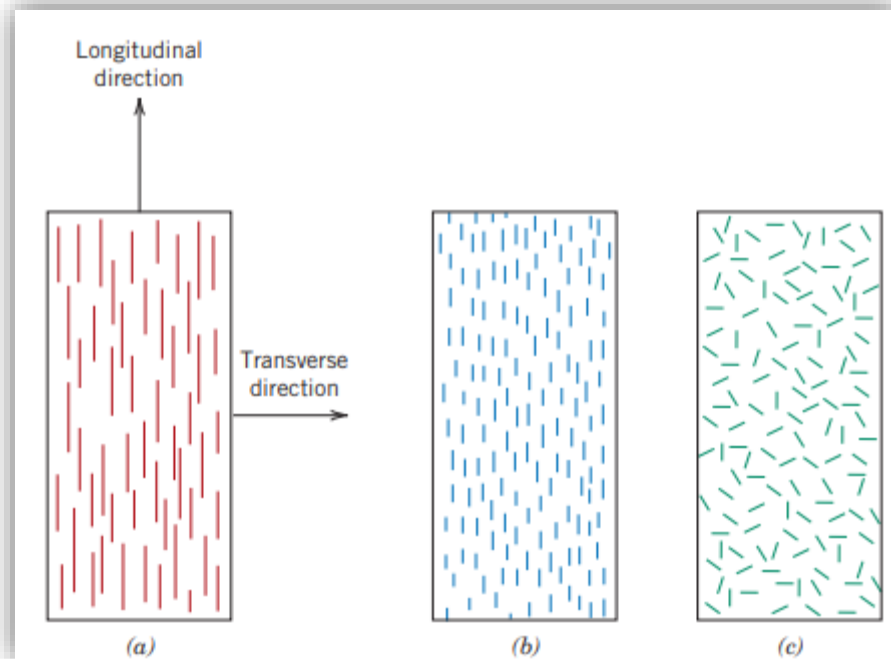
ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΙΝΕΣ

Επίδραση Προσανατολισμού και Συγκέντρωσης της Ίνας

Η ταξινόμηση ή ο προσανατολισμός των ινών αναφορικά της μιας με την άλλη, η συγκέντρωση και η κατανομή των ινών, όλα έχουν μια σημαντική επίδραση πάνω στην αντοχή και στις άλλες ιδιότητες των ινωδών σύνθετων υλικών. Όσον αφορά τον προσανατολισμό δύο ακραίες περιπτώσεις είναι πιθανές:

- 1) παράλληλη ευθυγράμμιση του διαμήκους άξονα των ινών σε μια και μοναδική διεύθυνση
- 2) πλήρως τυχαία ευθυγράμμιση.

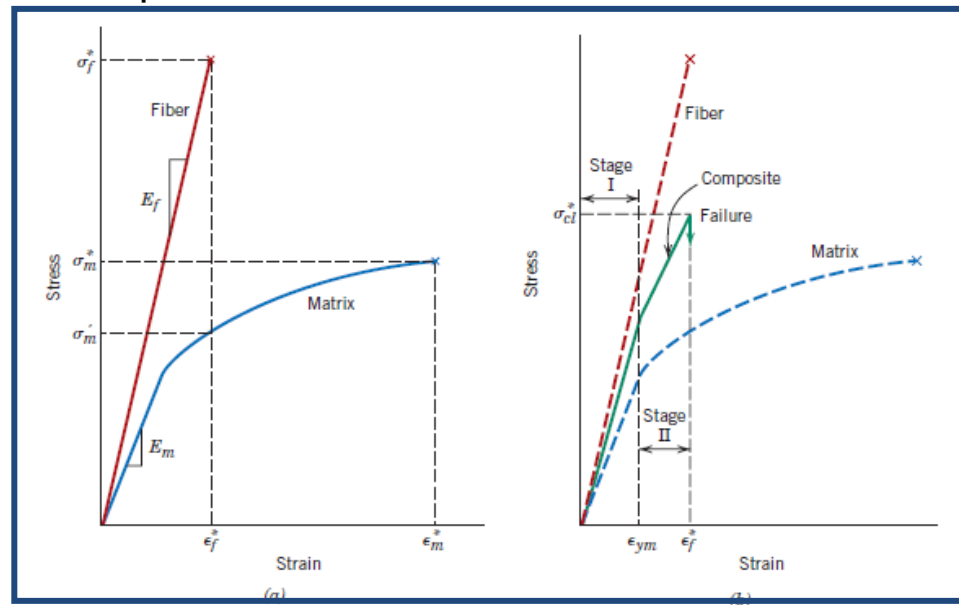
Σχηματική αναπαράσταση α) συνεχών και ευθυγραμμισμένων, β) ασυνεχών και ευθυγραμμισμένων και γ) ασυνεχών και τυχαία προσανατολισμένων σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες.



ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΙΝΕΣ

Συνεχή και Ευθυγραμμισμένα Ινώδη Σύνθετα Υλικά

Η αρχή της **αστοχίας του σύνθετου υλικού** λαμβάνει χώρα όταν οι ίνες αρχίζουν να **θραύονται**. Η αστοχία του σύνθετου υλικού **δεν είναι καταστροφική** για δυο λόγους. Πρώτα απ' όλα, οι ίνες δεν θραύονται όλες της ίδια στιγμή αφού υπάρχουν πάντα σημαντικές αποκλίσεις στην τάση θραύσης των ψαθυρών ινωδών υλικών. Επιπρόσθετα ακόμα και μετά την αστοχία της ίνας η μήτρα είναι ακόμα άθικτη.



α) Σχηματικές καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για ψαθυρά ινώδη και όλκιμα υλικά μήτρας. Σημειώνονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις θραύσης και για τα δυο υλικά, β) Σχηματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για ένα ευθυγραμμισμένο σύνθετο με ενίσχυση ίνας που υπόκειται σε μονοαξονική τάση κατά τη διεύθυνση της ευθυγράμμισης. Στο ίδιο διάγραμμα φαίνονται επίσης και οι καμπύλες για την ίνα και το υλικό της μήτρας του διαγράμματος (α).

ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Κρίσιμο μήκος ίνας:

Αντοχή ίνας σε εφελκυσμό

Διάμετρος ίνας

$$\text{fiber length} > 15 \frac{\sigma_f d}{\tau_c}$$

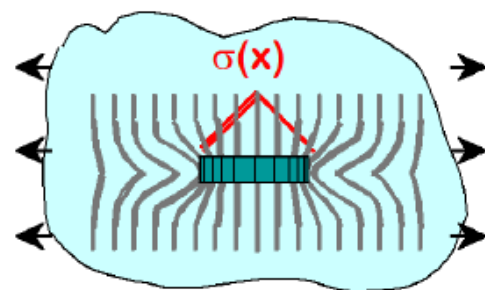
Διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας

Π.χ. για fiberglass μήκος ίνας > 15mm

Γιατί; Οι μακρύτερες ίνες ευνοούν τη μεταφορά τάσης

Κοντή ίνα:

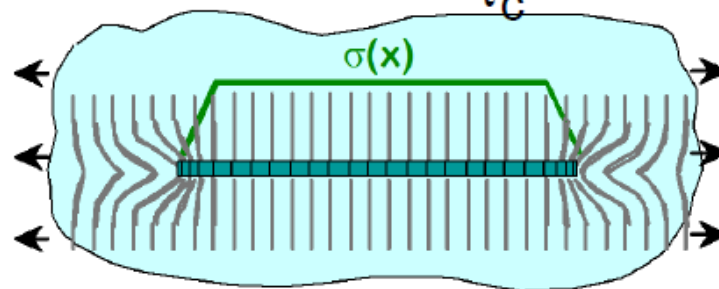
$$\text{fiber length} < 15 \frac{\sigma_f d}{\tau_c}$$



Ανεπαρκής μεταφορά τάσης

Μακρία ίνα:

$$\text{fiber length} > 15 \frac{\sigma_f d}{\tau_c}$$



Καλύτερη μεταφορά τάσης

Adapted from Fig. 16.7,
Callister 6e.

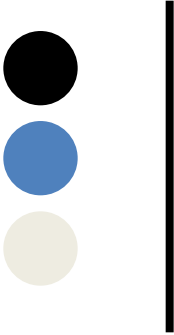


Σύνθετα Υλικά / *Composites*

Κατηγοριοποιούνται βάση του υλικού της **μήτρας** σε:

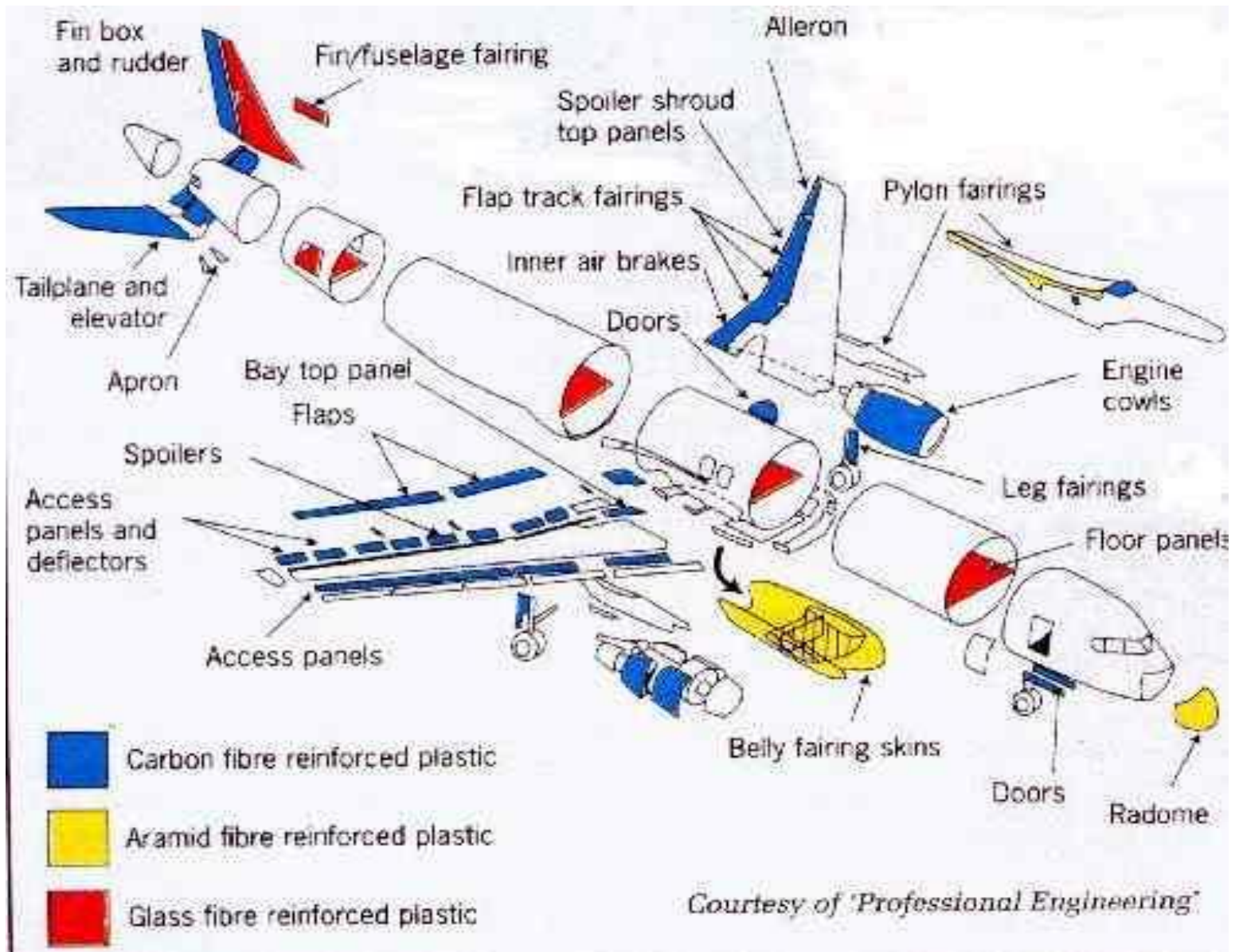
- **Μεταλλικής μήτρας** (metal matrix composites MMC's)
- **Κεραμικής μήτρας** (ceramic matrix composites CMC's)
- **Πολυμερικής μήτρας** (polymer matrix composites PMC's)

ή αναφέρονται ως οργανικής μήτρας (organic matrix composites (OMC's)



Σύνθετα Υλικά Πολυμερούς Μήτρας

Τα σύνθετα υλικά πολυμερούς μήτρας (ΣΥΠΜ) αποτελούνται από μια πολυμερή ρητίνη ως μήτρα και ίνες ως το μέσον ενίσχυσης. Αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών συνθέτων υλικών, επίσης σε πολλές ποσότητες, όσον αφορά τις ιδιότητες τους σε θερμοκρασία δωματίου, την ευκολία παραγωγής, και το κόστος.





Πολυμερή Σύνθετα Υλικά με Ενίσχυση **Ινών Γυαλιού**

Το φάιμπεργκλας (fiberglass) είναι απλά ένα σύνθετο υλικό που αποτελείται από ίνες γυαλιού, είτε συνεχείς ή ασυνεχείς, οι οποίες περιέχονται μέσα σε μια πολυμερή μήτρα. Αυτό το είδος του σύνθετου υλικού παράγεται σε πολύ μεγάλες ποσότητες. Η σύνθεση του γυαλιού το οποίο συνήθως ελκύεται σε ίνες. Οι διάμετροι των ινών συνήθως κυμαίνονται από 3 μέχρι 20 μm . Το γυαλί είναι πολύ δημοφιλές ως υλικό ινώδους ενίσχυσης για πολλούς λόγους:

- 1.Ελκύεται εύκολα** από το τήγμα σε ίνες υψηλής αντοχής
- 2.Είναι άμεσα διαθέσιμο** και μπορεί να παραχθεί οικονομικά σε πλαστικό ενισχυμένο με γυαλί χρησιμοποιώντας μια ευρεία ποικιλία τεχνικών παραγωγής συνθέτων
- 3.Ως ίνα είναι σχετικά ισχυρή**, και όταν εμβαπτίζεται σε μια πλαστική μήτρα παράγεται ένα σύνθετο υλικό το οποίο έχει πολύ **υψηλή ειδική αντοχή**
- 4.Όταν συζευχθεί με διάφορα πλαστικά έχει μια χημική αδράνεια** η οποία καθιστά το σύνθετο υλικό χρήσιμο σε μια μεγάλη ποικιλία διαβρωτικών μέσων



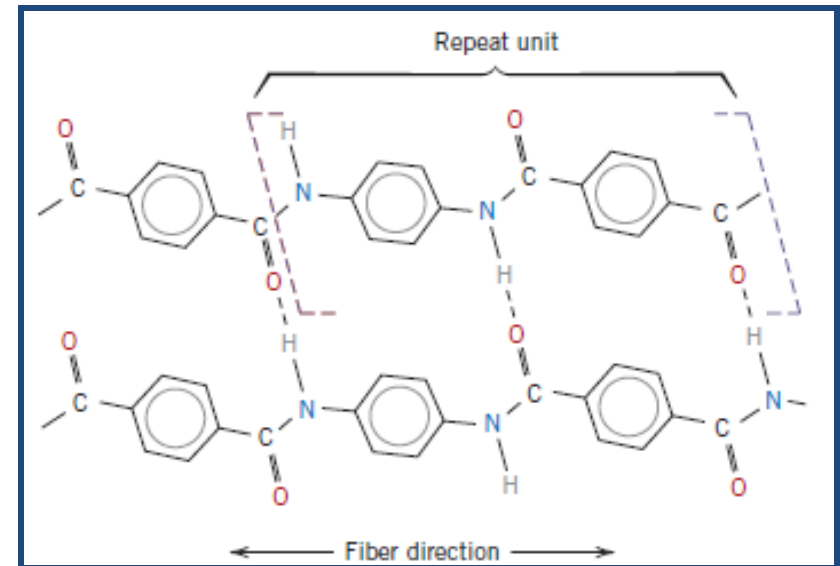
Πολυμερή Σύνθετα Υλικά με Ενίσχυση **Ινών Άνθρακα**

Τα ανθρακονήματα είναι ίνες υψηλής απόδοσης και είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα ενισχυτικά μέσα σε προηγμένα (π.χ. μη fiberglass) σύνθετα υλικά πολυμερούς μήτρας. Οι λόγοι γι' αυτό είναι ως εξής:

- 1. Οι ίνες άνθρακα έχουν το υψηλότερο ειδικό μέτρο ελαστικότητας και την υψηλότερη ειδική αντοχή από όλα τα ινώδη ενισχυτικά υλικά.**
- 2. Διατηρούν τα υψηλά μέτρα ελαστικότητας σε εφελκυσμό και την υψηλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Ωστόσο η οξείδωση σε υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να είναι πρόβλημα.**
- 3. Στη θερμοκρασία δωματίου οι ίνες άνθρακα δεν επηρεάζονται από την υγρασία ή από μια μεγάλη ποικιλία διαλυτών, οξέων και βάσεων.**
- 4. Αυτές οι ίνες παρουσιάζουν ένα εύρος φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών, δίνοντας τη δυνατότητα στα σύνθετα υλικά που τις εμπεριέχουν να έχουν ειδικά σχεδιασμένες ιδιότητες.**
- 5. Έχουν αναπτυχθεί διαδικασίες παραγωγής ινών για σύνθετα υλικά οι οποίες είναι σχετικά φθηνές και αποτελεσματικές ως προς το κόστος τους.**

Σύνθετα Υλικά Ενισχυμένα με Αραμιδικές Ίνες

Οι αραμιδικές ίνες είναι υλικά υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας τα οποία παρήχθησαν στις αρχές της δεκαετίας του '70. Τα υλικά αυτά είναι επιθυμητά κυρίως για τις έξοχες τιμές των λόγων αντοχής ανά βάρος οι οποίοι είναι ανώτεροι των αντίστοιχων των μετάλλων. Χημικά, αυτή η ομάδα των υλικών είναι γνωστή ως πολύ(-παραφαινυλο-τερεφθαλαμίδιο). Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός αραμιδικών υλικών. Τα εμπορικά ονόματα των δυο πλέον κοινών τύπων είναι το Kevlar και το Nomex. Για το πρώτο υπάρχουν διάφορες διαβαθμίσεις (ήτοι Kevlar 29,49 και 149) οι οποίες έχουν διαφορετικές μηχανικές συμπεριφορές. Κατά τη διάρκεια της χημικής σύνθεσης τα άκαμπτα μόρια προσανατολίζονται στη διεύθυνση του άξονα της ίνας ως υγροκρυσταλλικές περιοχές. Η χημεία των ξεχωριστών ομάδων μονομερών και ο τρόπος της ευθυγράμμισης των αλυσίδων παρουσιάζονται στο Σχήμα 10.



Σχήμα 10. Σχηματική αναπαράσταση της δομής της ομάδας μονομερούς και της αλυσίδας των αραμιδικών ινών (Kevlar). Φαίνεται επίσης η ευθυγράμμιση των αλυσίδων με τη διεύθυνση της ίνας και οι δεσμοί υδρογόνου που σχηματίζονται μεταξύ των διαδοχικών αλυσίδων. (Από F.R. Jones, editor, Handbook of Polymer-Fibre Composites)



Σύνθετα Υλικά Ενισχυμένα με Αραμιδικές Ίνες

Μηχανικά αυτές οι ίνες έχουν διαμήκεις εφελκυστικές αντοχές και εφελκυστικά μέτρα ελαστικότητας τα οποία είναι υψηλότερα από τα αντίστοιχα των άλλων πολυμερών ινών, όμως είναι σχετικά αδύνατες σε θλίψη. Επιπρόσθετα, αυτό το υλικό είναι γνωστό για τη δυσθραυστότητα του, την αντοχή σε κρούση, και την αντοχή σε ερπυσμό και αστοχία στην κόπωση. Αν και τα αραμιδικά είναι θερμοπλαστικά υλικά είναι εντούτοις ανθεκτικά στην καύση και σταθερά σε σχετικά μεγάλες θερμοκρασίες. Το εύρος θερμοκρασιών στο οποίο διατηρούν τις υψηλές μηχανικές ιδιότητες είναι από -200°C σε 200°C (-330°F σε 390°F). Χημικά τα υλικά αυτά είναι επιρρεπή σε υποβάθμιση κάτω από την επίδραση ισχυρών οξέων και βάσεων αλλά είναι σχετικά αδρανή σε άλλους διαλύτες και χημικές ουσίες.

Οι αραμιδικές ίνες χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε σύνθετα υλικά τα οποία έχουν πολυμερείς μήτρες. Συνήθη μητρικά υλικά είναι οι εποξειδικές ρητίνες και πολυεστέρες.

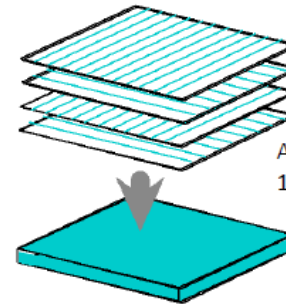
ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ: ΔΟΜΙΚΑ

σωματίδια

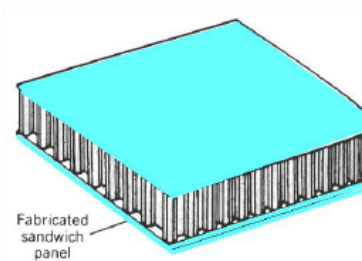
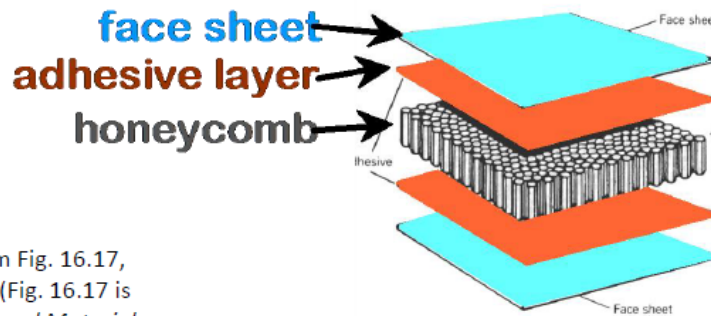
Ίνες

Δομικά

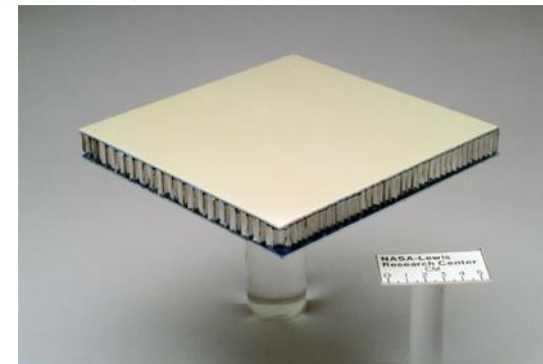
- Πολύστρωτα σύνθετα υλικά
 - Διαστρωμάτωση: e.g., $[0/90]_s$
 - κέρδος: ισοσταθμισμένα, συνεπίπεδη δυσκαμψία
- Σύνθετα Sandwich
 - χαμηλής πυκνότητας, κυψελωτός πυρήνας
 - Κέρδος: βάρος, καμπτική ακαμψία



Adapted from Fig. 16.16, Callister 6e.



Adapted from Fig. 16.17, Callister 6e. (Fig. 16.17 is from *Engineered Materials Handbook*, Vol. 1, *Composites*, ASM International, Materials Park, OH, 1987.)



Nanocomposites—composites that consist of nanosized particles embedded in some type of matrix—are a group of promising new materials that will undoubtedly become infused with some of our modern technologies. In fact, one type of nanocomposite is currently being used in high-performance tennis balls. These balls retain their original pressure and bounce twice as long as conventional ones. Air permeation through the walls of the ball is inhibited by a factor of two due to the presence of a flexible and very thin (10 to 50 μm) nanocomposite barrier coating that covers the inner core;⁴ a schematic diagram of the cross-section of one of these tennis balls is shown in Figure 15.19.

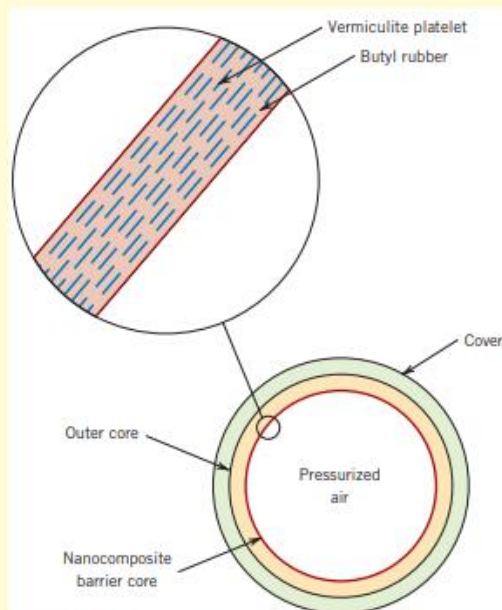


Figure 15.19 Schematic diagram showing the cross-section of a high-performance Double Core™ tennis ball. The inset drawing presents a detailed view of the nanocomposite coating that acts as a barrier to air permeation.

Because of their outstanding characteristics, these Double Core™ balls have recently been selected as the official balls for some of the major tennis tournaments.

This nanocomposite coating consists of a matrix of butyl rubber, within which is embedded thin platelets of vermiculite,⁵ a natural clay mineral. The vermiculite platelets exist as single-molecule thin sheets—on the order of a nanometer thick—that have a very large aspect ratio (of about 10,000); *aspect ratio* is the ratio of the lateral dimensions of a platelet to its thickness. Furthermore, the vermiculite platelets are *exfoliated*—that is, they remain separated from one another. Also, within the butyl



Photograph of a can of Double Core™ tennis balls and an individual ball. (Photograph courtesy of Wilson Sporting Goods Company.)

⁴ This coating was developed by InMat Inc., and is called Air D-Fense™. Wilson Sporting Goods has incorporated this coating in its Double Core™ tennis balls.

⁵ Vermiculite is one member of the layered silicates group that is discussed in Section 3.8.

Βιβλιογραφία

- **“Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών”**

William D. Callister, JR & David G. Rethwisch. Tziolas Edition, 9th Edition

- **Βασικές Αρχές Ανόργανων Χημικών Βιομηχανιών”**

IK Καλλίτσης, ΝΚ Καλφόγλου Εκδόσεις ΠΠ

- **Lecture 15 “Composite Materials”**

Keulen Casey, <https://slideplayer.com/slide/4135023/>

- **Lecture 1 “Composite Materials”**

PMC Lecture 1, 2015,

<http://web.deu.edu.tr/metalurjimalzeme/pdf/mme4020TechnologyOfCompositeMaterials/CompositeMaterialsPMCLecture1-2015.pptx>

- **Fundamentals of Materials Science and Engineering**

William D. Callister, Jr. David G. Rethwisch

<https://www.hzu.edu.in/engineering/Fundamentals%20of%20Materials%20Science%20and%20Engineering.pdf>