



Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών
Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Τεχνολογία Υλικών II

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Δρ. Σκλήρη Ευαγγελία

Σύνθετα Υλικά

- ❑ Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από **δύο ή περισσότερες φάσεις**
Επιτρέπουν **συνδυασμό ιδιοτήτων** που δεν υπάρχουν σε κράματα **μετάλλων, κεραμικά ή πολυμερή.**

Μπορούμε να σχεδιάσουμε υλικά με:

- υψηλή αντοχή
- χαμηλό βάρος
- αντοχή σε διάβρωση

Εφαρμογές:

- αεροναυπηγική
- ενέργεια
- μεταφορές

- Τα σύνθετα υλικά μάς δίνουν τη δυνατότητα να σχεδιάζουμε υλικά με στοχευμένες ιδιότητες, ανάλογα με την εφαρμογή.

Σύνθετα Υλικά

☐ Σύνθετο είναι ένα **πολυφασικό υλικό** που παρασκευάζεται τεχνητά

Οι φάσεις:

- είναι **χημικά διαφορετικές**
- χωρίζονται με **διεπιφάνεια**

☐ **Αρχή της συνδυασμένης δράσης**

Οι ιδιότητες προκύπτουν από τη συνεργασία των φάσεων

➤ Σκοπός είναι να βελτιωθούν οι συνδυασμοί των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών όπως:

- δυσκαμψία
- δυθραυστότητα
- αντοχή σε περιβαλλοντικές συνθήκες
- αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες

Σύνθετα Υλικά

- Παράδειγμα σύνθετου υλικού είναι **οι χάλυβες περλίτη**

Αποτελείται από:

- **φερρίτη ($\alpha\text{-Fe}$)** → όλκιμος, μαλακός
- **σεμεντίτη (Fe_3C)** → σκληρός, εύθραυστος
-

➤ Όταν οι δύο φάσεις συνυπάρχουν στη μικροδομή δεν είναι ούτε πολύ μαλακός ούτε πολύ εύθραυστος

- **υψηλότερη αντοχή**
- **καλή ολκιμότητα**

Συνδυασμός όλκιμης φάσης και σκληρής φάσης → βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες

Σύνθετα Υλικά

☐ Φάσεις σε σύνθετα

Μήτρα (matrix):

- συνεχής φάση
- συγκρατεί το υλικό

Διασπαρμένη φάση (Dispersed phase)

- σωματίδια ή ίνες
- βελτιώνουν ιδιότητες

Χαρακτηριστικά της διασπαρμένης φάσης

(a) Συγκέντρωση (concentration)

Διαφορετική ποσότητα σωματιδίων μέσα στη μήτρα

(b) Μέγεθος (size)

Μεγάλα ή μικρά σωματίδια

(c) Σχήμα (shape)

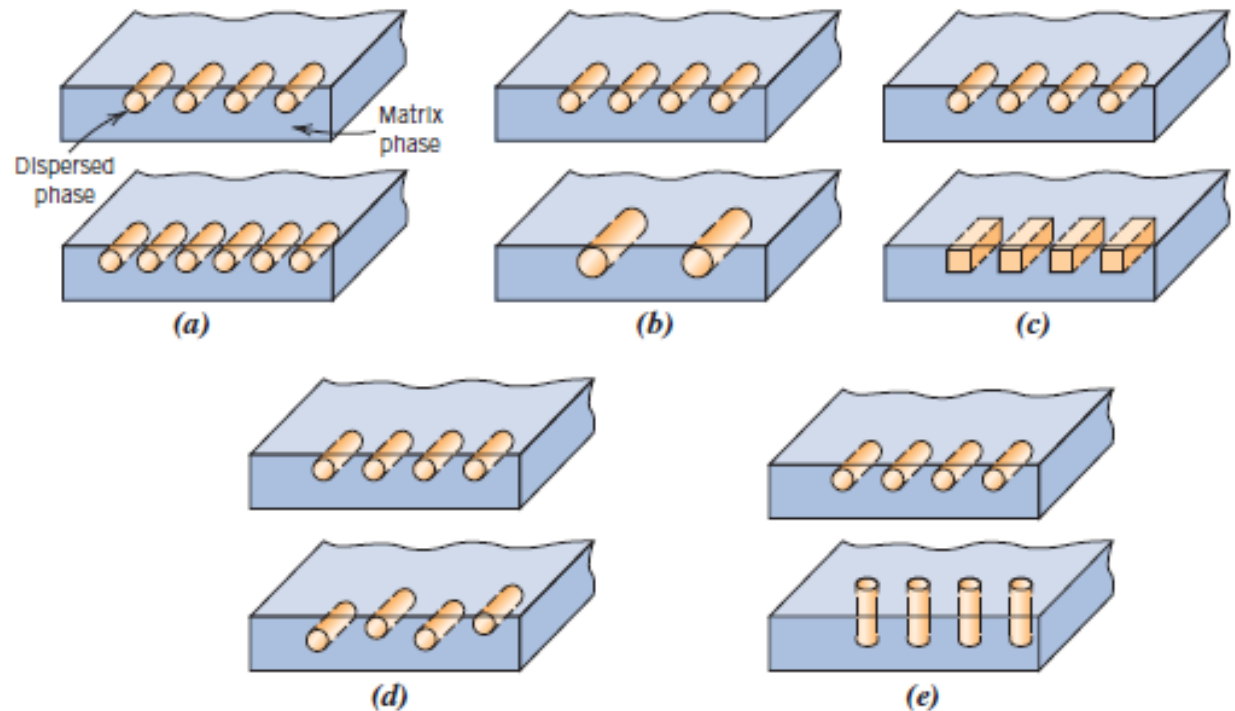
Ίνες ή κυβικά/άμορφα σωματίδια

(d) Κατανομή (distribution)

Ομοιόμορφη ή ανομοιόμορφη διασπορά

(e) Προσανατολισμός (orientation)

Ευθυγραμμισμένες ή τυχαίες ίνες



Σύνθετα Υλικά

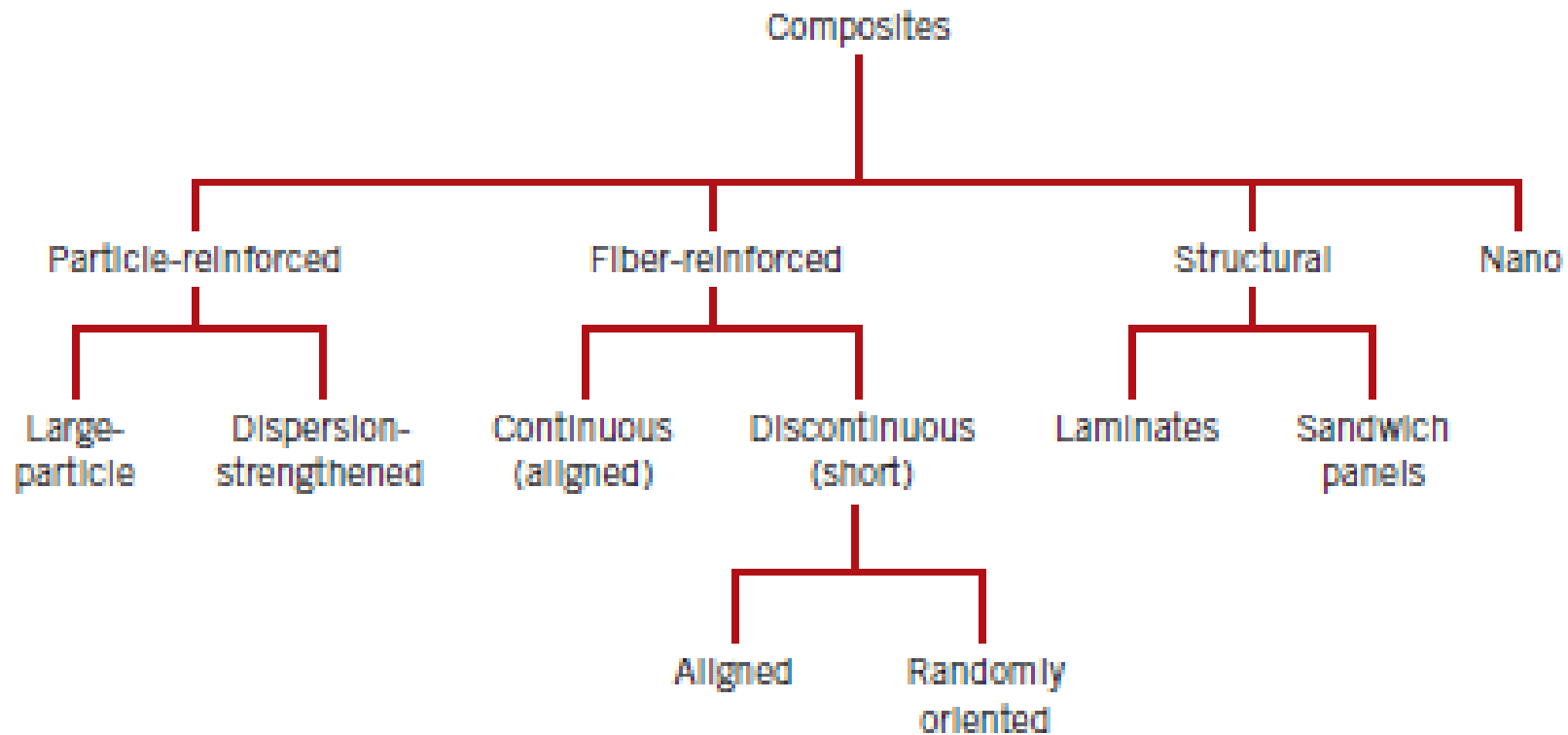
❑ Σύνθετα Υλικά με Ενίσχυση Κόκκου

- Τα σωματίδια είναι μεγάλα
- Η ενίσχυση γίνεται με μηχανική μεταφορά φορτίου
- Η μήτρα μεταφέρει τάση στα σωματίδια
- Τα σωματίδια είναι σκληρότερα και άκαμπτα
- Περιορίζουν την παραμόρφωση της μήτρας
- Η βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς εξαρτάται από την ισχύ του δεσμού στη διεπιφάνεια μεταξύ της μήτρας και του κόκκου.

❑ Σύνθετα Υλικά με Ενίσχυση Διασποράς

- Πολύ μικρά σωματίδια (10–100 nm)
- Αλληλεπιδράσεις σε ατομικό/μικροσκοπικό επίπεδο
- Εμποδίζουν την κίνηση των διαταραχών (dislocations)
- Αυξάνεται η αντοχή διαρροής
- Αυξάνεται η αντοχή σε εφελκυσμό
- Αυξάνεται η σκληρότητα

Σύνθετα Υλικά



Τα σύνθετα υλικά ταξινομούνται με βάση:

- **τύπο ενίσχυσης (σωματίδια / ίνες)**
- **γεωμετρία**
- **δομή (στρωματική)**

Σύνθετα Υλικά

☐ Κανόνας των μειγμάτων

Το μέτρο ελαστικότητας ενός σύνθετου εξαρτάται από:

- τα μέτρα ελαστικότητας των φάσεων
- τα ποσοστά τους (volume fractions)

▪ Άνω όριο (upper bound)

$$E_c = E_m V_m + E_p V_p$$

τέλεια μεταφορά φορτίου

Οι φάσεις δουλεύουν μαζί

▪ Κάτω όριο (lower bound)

$$E_c = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m}$$

λιγότερο αποτελεσματική συνεργασία φάσεων

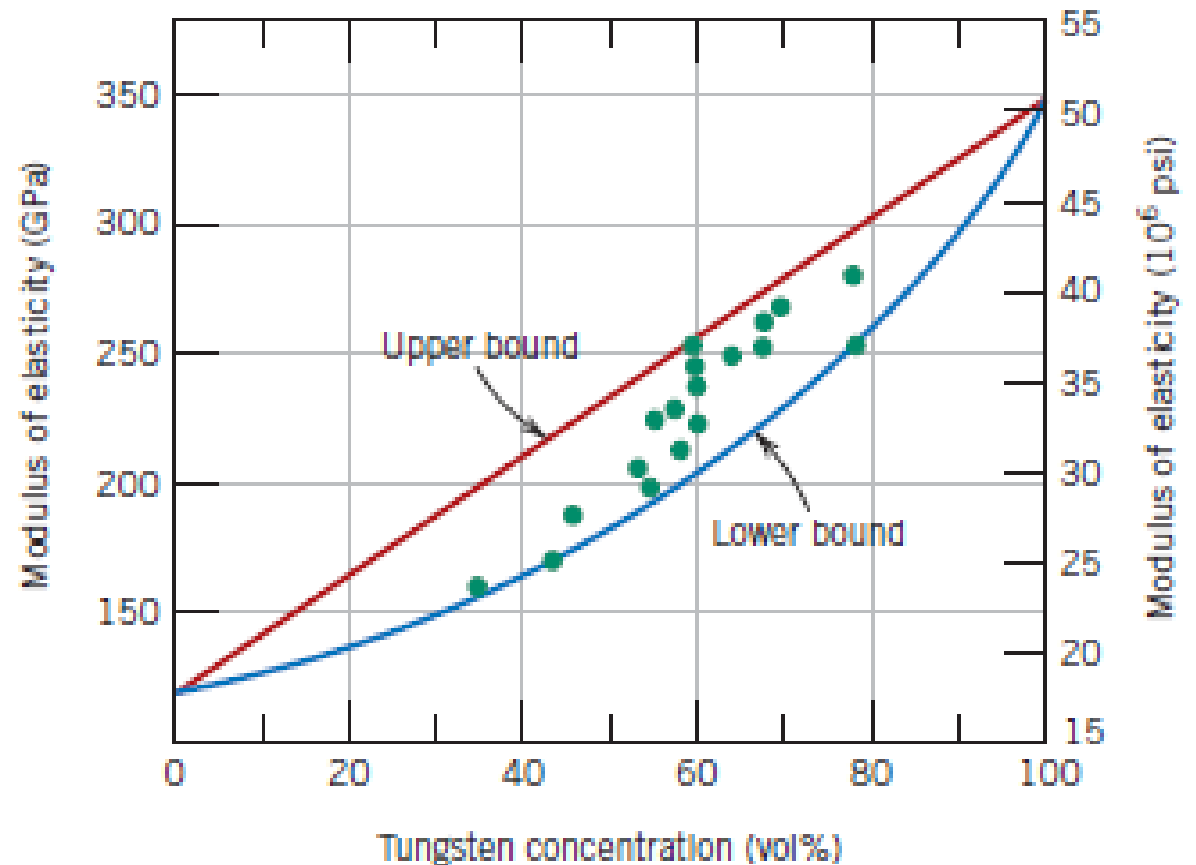
E_c : μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου (composite)

E_m : μέτρο ελαστικότητας της μήτρας (matrix)

E_p : μέτρο ελαστικότητας της ενίσχυσης (particles ή fibers)

V_m : κλασματικός όγκος της μήτρας (volume fraction)

V_p : κλασματικός όγκος της ενίσχυσης



Σύνθετα Υλικά

Κέρμετ (Cermets)

Σύνθετα από:

- σκληρά κεραμικά (π.χ. WC, TiC)
- μεταλλική μήτρα (Co, Ni)

Ιδιότητες

πολύ υψηλή σκληρότητα

αντοχή σε φθορά

βελτιωμένη ανθεκτικότητα (λόγω μετάλλου)

Χρήσεις

εργαλεία κοπής

εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας

Σκυρόδεμα (Concrete)

- Το σκυρόδεμα είναι ένα σύνθετο υλικό μεγάλου κόκκου
- Η μήτρα όσο και η ενισχυτική φάση είναι κεραμικά υλικά (σκυρόδεμα Portland)
- Αποτελείται από σωματίδια (άμμος, χαλίκι) που συνδέονται μεταξύ τους με ένα συνδετικό μέσο (τσιμέντο)

Τύποι σκυροδέματος

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι:

Σκυρόδεμα Portland (δομικό υλικό)

Ασφαλτικό σκυρόδεμα (οδοστρώματα)

Ιδιότητες σκυροδέματος Portland

- Πολύ καλή αντοχή σε θλίψη
- Χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό → εύθραστο
- Υφίσταται θερμικές διαστολές/συστολές με μεταβολή θερμοκρασίας
- Ευαίσθητο σε κύκλους ψύξης-απόψυξης

Ενισχυμένο Σκυρόδεμα (Reinforced Concrete)

➤ Η αντοχή σε εφελκυσμό αυξάνεται με την ενίσχυση (reinforcement)

Χρησιμοποιούνται:

- ράβδοι
- σύρματα
- πλέγματα

Αντέχει καλύτερα σε:

- εφελκυσμό
- Διάτμηση

Το σκυρόδεμα παραλαμβάνει θλιπτικά φορτία, ενώ ο χάλυβας τα εφελκυστικά.

Γιατί χρησιμοποιείται χάλυβας

Παρόμοιος συντελεστής θερμικής διαστολής με το σκυρόδεμα

Ισχυρό δεσμό συγκόλλησης μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος

Αυξημένη αντοχή στη διάβρωση

Μηχανική αγκύρωση μέσω τραχύτητας της επιφάνειας

Σύνθετα Υλικά

Ενίσχυση με ίνες:

- γυαλί
- χάλυβας
- νάιλον
- πολυαιθυλένιο

- Καθυστερούν τη δημιουργία ρωγμών
- Περιορίζουν την εξάπλωση ρωγμών
- Αυξάνουν τη δυσθραυστότητα
- Βελτιώνει μηχανικές ιδιότητες
- Έτσι βελτιώνεται η συμπεριφορά του υλικού μετά την έναρξη της ρωγμής.

Σύγκριση ενισχύσεων

Χάλυβας → εφελκυστικά φορτία

Ίνες → ελέγχουν και περιορίζουν τις ρωγμές

Μπορούν να συνδυαστούν - οι δύο τύποι ενίσχυσης έχουν συμπληρωματικούς ρόλους.

Προεντεταμένο Σκυρόδεμα (Prestressed Concrete)

- Εισαγωγή θλιπτικών τάσεων πριν τη φόρτιση ώστε να μειωθούν οι εφελκυστικές τάσεις κατά τη φόρτιση.
 - Μείωση ρωγμών
 - Βελτιωμένη μηχανική συμπεριφορά
- Σύρματα χάλυβα υψηλής αντοχής τοποθετούνται σε κενά καλούπια και εφελκύνονται με πολύ μεγάλη εφελκυστική δύναμη.
- Μετά την τοποθέτηση του σκυροδέματος η εφελκυστική τάση ελευθερώνεται.
- Καθώς τα σύρματα επανέρχονται στο αρχικό τους μήκος θέτουν όλη την κατασκευή σε κατάσταση θλίψης.

Σύνθετα Υλικά

❑ Σύνθετα Υλικά με Ενίσχυση Διασποράς

Μέταλλα ή κράματα που ενισχύονται με **ομοιόμορφη διασπορά πολύ μικρών, σκληρών σωματιδίων**

Τα σωματίδια μπορεί να είναι:

- Μεταλλικά ή μη μεταλλικά (συχνά οξειδία μετάλλων)

❑ Μηχανισμός ενίσχυσης

Αλληλεπίδραση μεταξύ σωματιδίων και διαταραχών

Τα σωματίδια εμποδίζουν την κίνηση των διαταραχών

Αποτέλεσμα → **αύξηση αντοχής**

- Διατηρείται σε υψηλές θερμοκρασίες
- Σταθερή με τον χρόνο (δεν διαλύονται/μεγαλώνουν τα σωματίδια)

Παραδείγμα:

Ni + ~3% κ.ο. οξειδίου θορίου (ThO_2)

Πλεονεκτήματα:

- Υψηλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες
- Μεγάλη θερμική σταθερότητα

Σύνθετα Υλικά

☐ Σύνθετα Υλικά με Ενίσχυση Ινών

➤ Σύνθετα υλικά όπου η ενισχυτική φάση είναι **ίνες (fibers)**

Αποτελούνται από:

- **Μήτρα (matrix)** (π.χ. πολυμερές, μέταλλο)
- **Ίνες** (π.χ. γυαλί, άνθρακας, κεραμικά)

Υψηλή αντοχή (strength) και ακαμψία (stiffness) σε σχέση με το βάρος

• **Specific strength (ειδική αντοχή)** → λόγος αντοχής / πυκνότητα

• **Specific modulus (ειδικό μέτρο ελαστικότητας)** → λόγος μέτρο ελαστικότητας / πυκνότητα

Εκφράζουν απόδοση υλικού σε σχέση με το βάρος

Χαρακτηριστικά:

Πολύ υψηλές τιμές ειδικής αντοχής & ακαμψίας

Ιδανικά για ελαφριές κατασκευές

Σύνθετα Υλικά

□ Επίδραση του Μήκους της Ίνας

Η μήτρα μεταφέρει την τάση στις ίνες μέσω της **διεπιφάνειας ίνας-μήτρας**

Αν ο δεσμός είναι ασθενής → δεν μεταφέρεται αποτελεσματικά η τάση → κακή ενίσχυση

□ Κρίσιμο μήκος ίνας (l_c)

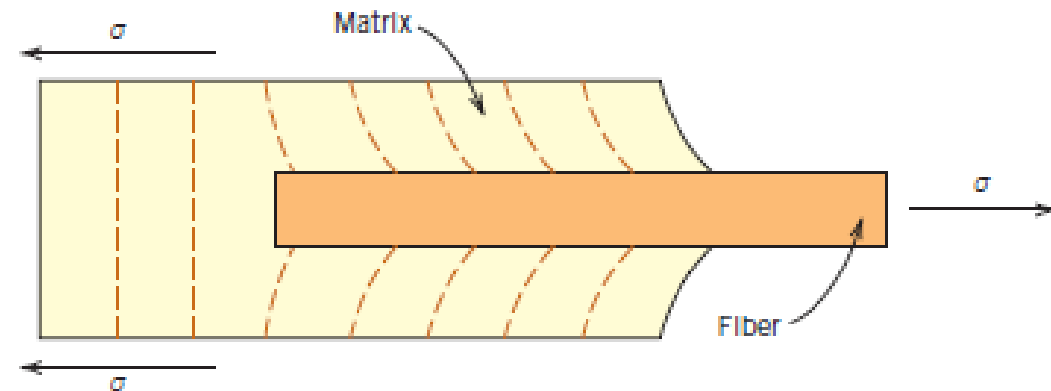
$$l_c = \frac{\sigma_f^* d}{2\tau_c}$$

σ_f^* : αντοχή ίνας

d : διάμετρος ίνας

τ_c : διατμητική αντοχή στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας

Είναι το ελάχιστο μήκος ώστε η ίνα να φτάσει τη μέγιστη αντοχή της.



Σύνθετα Υλικά

□ Επίδραση του Μήκους της Ίνας

➤ $l < l_c$ πολύ κοντές ίνες

- μη αποτελεσματική μεταφορά τάσης
- η ίνα δεν φτάνει ποτέ τη μέγιστη αντοχή της
- πολύ μικρή ενίσχυση

➤ $l = l_c$

- Μέγιστη τάση μόνο στο κέντρο της ίνας
- Οριακή αξιοποίηση

➤ $l > l_c$

- Η ίνα φτάνει την αντοχή της σε μεγάλο τμήμα
- Αποτελεσματική ενίσχυση

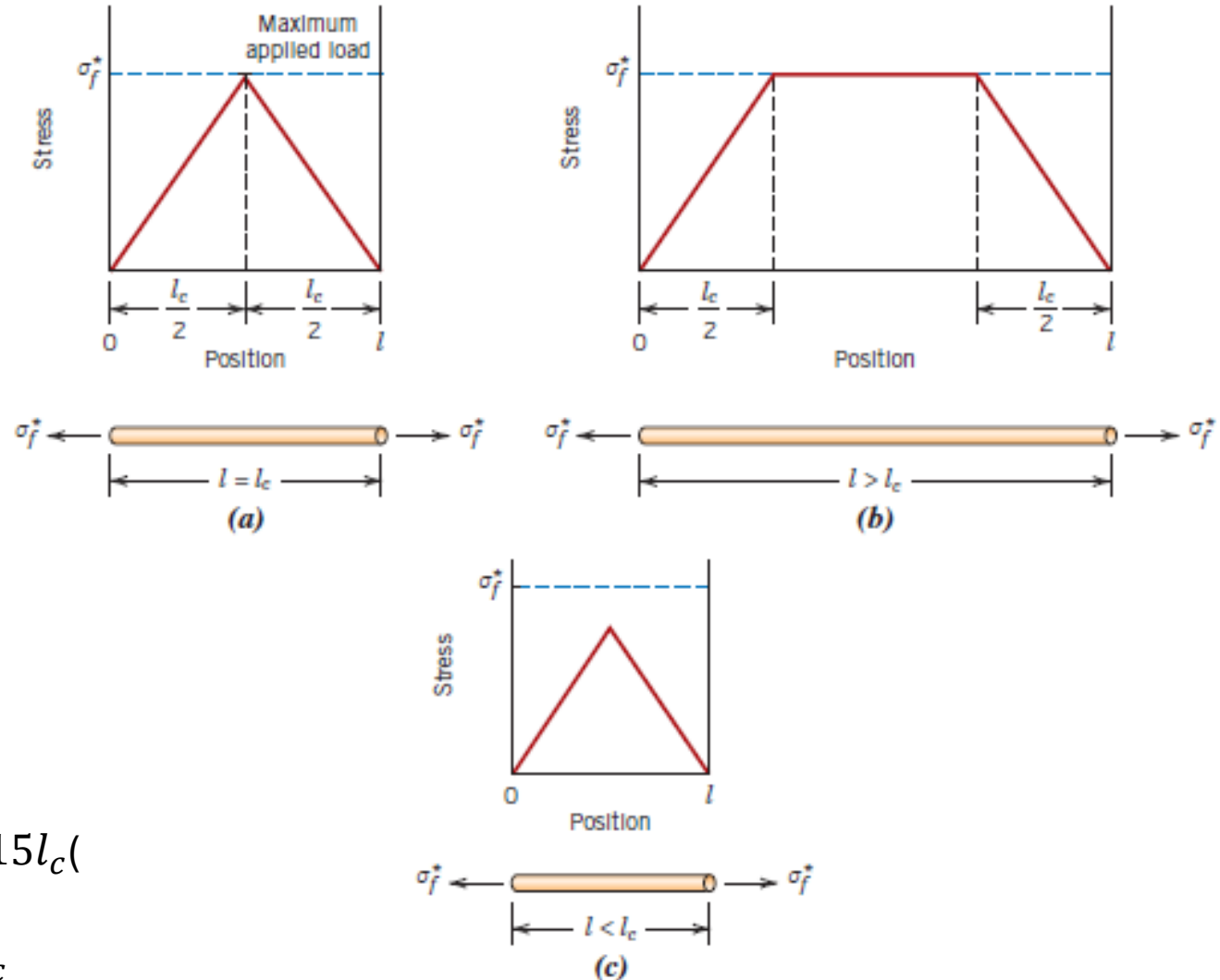
Τύποι ινών ως προς το μήκος

• **Συνεχείς Ίνες (Continuous fibers):** $l \gg l_c$ (τυπικά $l > 15l_c$)

→ Μέγιστη ενίσχυση

• **Ασυνεχείς ή κοντές ίνες (Discontinuous fibers):** $l < l_c$

→ Συμπεριφέρονται σχεδόν σαν σωματίδια



Σύνθετα Υλικά

□ Επίδραση του Προσανατολισμού και της Συγκέντρωσης Ινών

Ο προσανατολισμός και η κατανομή των ινών επηρεάζουν σημαντικά τις ιδιότητες του σύνθετου

Δύο ακραίες περιπτώσεις:

πλήρης ευθυγράμμιση

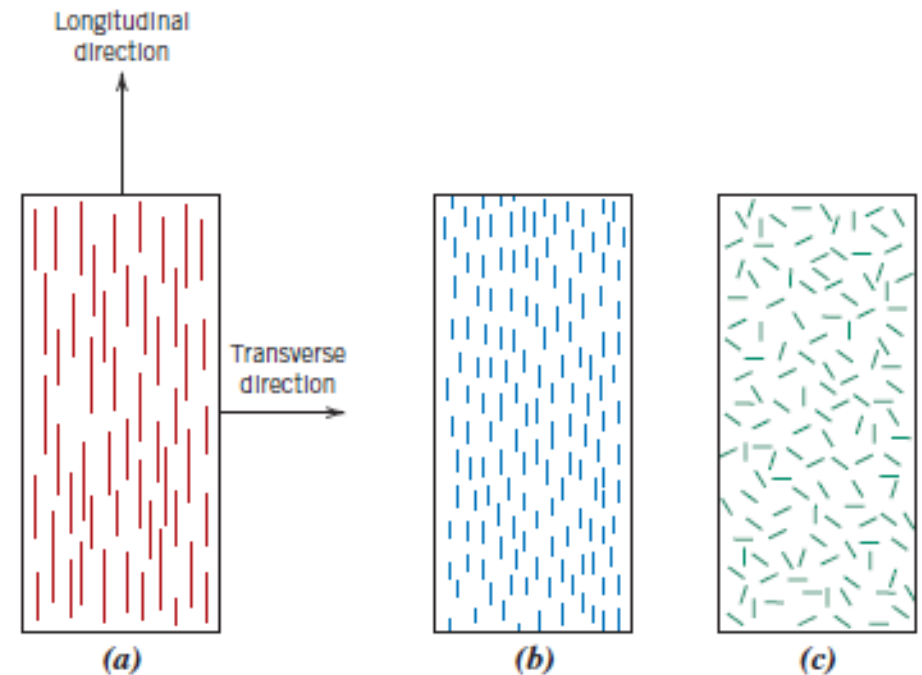
τυχαίος προσανατολισμός

➤ Η διάταξη των ινών καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο μεταφέρεται το φορτίο στο σύνθετο.

Τύποι διάταξης ινών

- Συνεχείς και ευθυγραμμισμένες ίνες (a)
- Μη συνεχείς (discontinuous) ίνες και ευθυγραμμισμένες (b)
- Ασυνεχείς και τυχαία ή μερικώς προσανατολισμένες (c)

➤ Κάθε τύπος διάταξης οδηγεί σε διαφορετική μηχανική συμπεριφορά.



Σύνθετα Υλικά

Συνεχή και Ευθυγραμμισμένα Ινώδη Υλικά

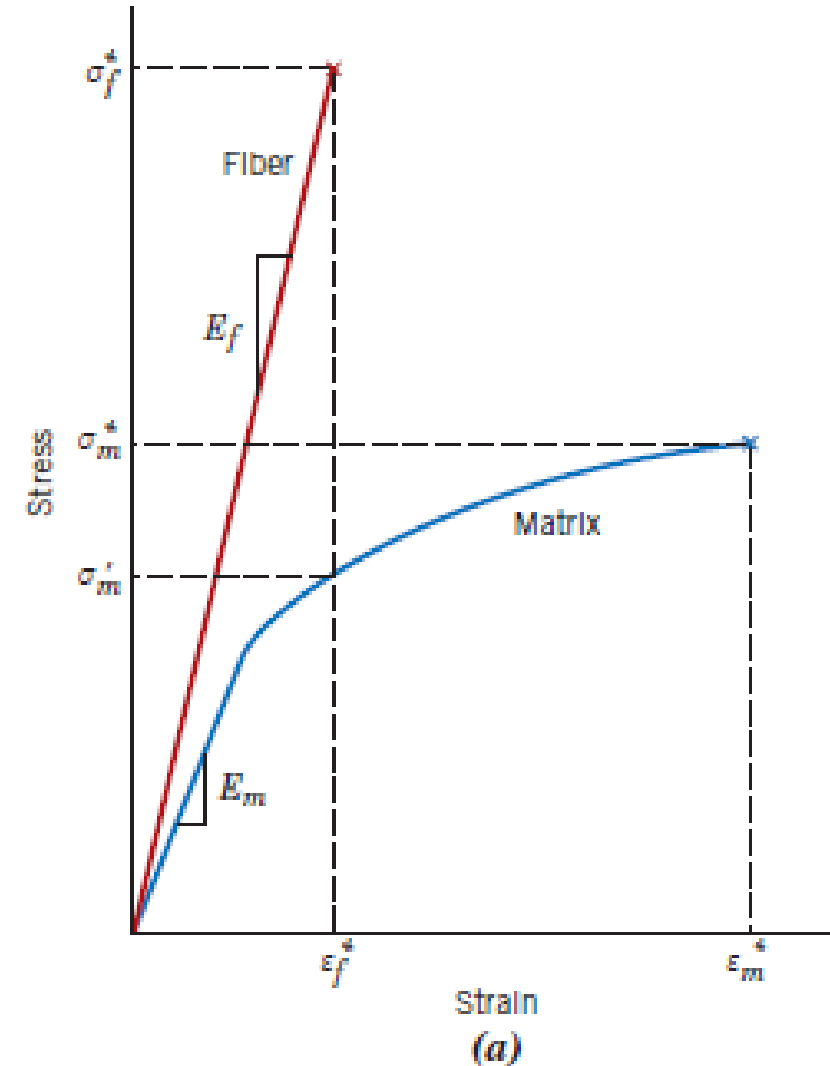
Συμπεριφορά Τάσης – Παραμόρφωσης σε Εφελκυσμό- Διαμήκης Φόρτιση

- Η τάση εφαρμόζεται κατά μήκος της διεύθυνσης της ευθυγράμμισης, τη **διαμήκη διεύθυνση (longitudinal direction)**
 - Ίνες: υψηλό μέτρο ελαστικότητας E_f , ψαθυρή συμπεριφορά
 - Μήτρα: μικρότερο μέτρο ελαστικότητας E_m , όλκιμη συμπεριφορά
 - Διαφορετική συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης
- Η συνολική συμπεριφορά του σύνθετου προκύπτει από τον συνδυασμό των δύο φάσεων.

Στην ίδια παραμόρφωση \rightarrow η ίνα φέρει μεγαλύτερη τάση ($\sigma_f > \sigma_m$)

Η ίνα φτάνει πρώτη τη μέγιστη αντοχή της (σ_f^*) και αστοχεί

Η μήτρα συνεχίζει να παραμορφώνεται μετά την αστοχία της ίνας



Σύνθετα Υλικά

Καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης για ένα ευθυγραμμισμένο σύνθετο με ενίσχυση ίνας

Στάδιο I

Ίνες και μήτρα παραμορφώνονται ελαστικά

Στάδιο II

Η μήτρα παραμορφώνεται πλαστικά

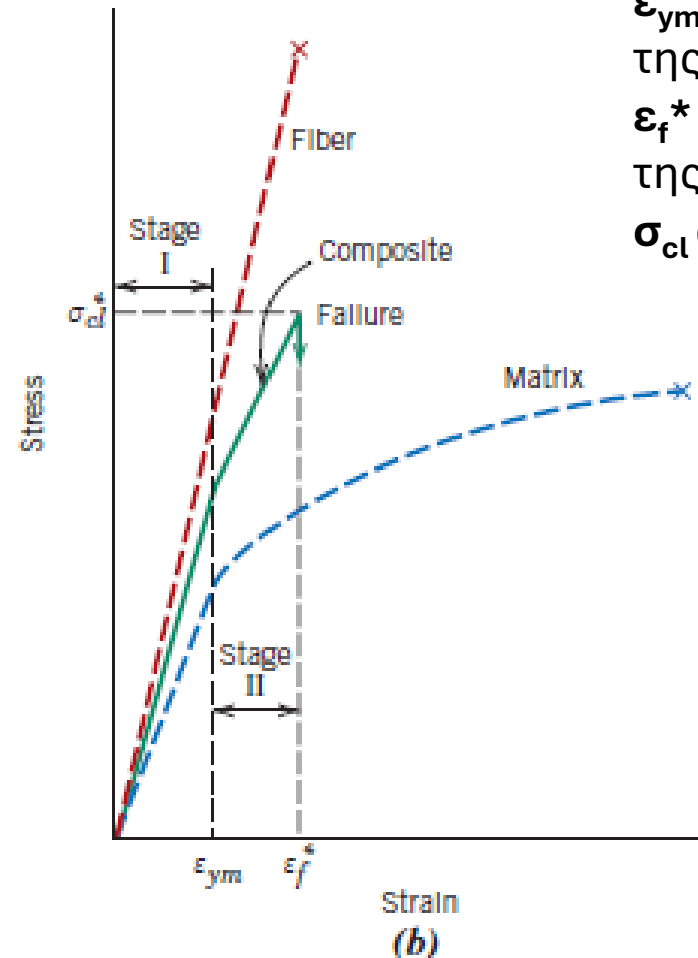
Οι ίνες συνεχίζουν να φέρουν το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου

Αστοχία (Failure)

Αρχίζουν να σπάνε οι ίνες

Failure Mechanism

- Οι ίνες σπάνε πρώτες
- Η αστοχία είναι προοδευτική (όχι στιγμιαία)
- Η μήτρα συνεχίζει να παραμορφώνεται
- Αυξάνεται η δυσθραυστότητα του σύνθετου



ϵ_{ym} παραμόρφωση διαρροής της μήτρας

ϵ_f^* παραμόρφωση θραύσης της ίνας

σ_{cl} αντοχή του σύνθετου

Σύνθετα Υλικά

□ Ελαστική Συμπεριφορά, Διαμήκης Φόρτιση

Υποθέσεις:

- Ίνες συνεχείς & ευθυγραμμισμένες
- Ισχυρός δεσμός ίνας-μήτρας
- Ίδια παραμόρφωση: $\epsilon_c = \epsilon_m = \epsilon_f$ (isostrain)

Συνολικό φορτίο: $F_c = F_m + F_f$

Ισχύει $\sigma = \frac{F}{A}$

Άρα:

$$F_c = \sigma_c A_c, F_m = \sigma_m A_m, F_f = \sigma_f A_f$$

Οπότε

$$\sigma_c A_c = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f$$

Διαίρεση με A_c

$$\sigma_c = \sigma_m \frac{A_m}{A_c} + \sigma_f \frac{A_f}{A_c}$$

Για συνεχή ίνα:

$$V_m = \frac{A_m}{A_c}, V_f = \frac{A_f}{A_c}$$

Άρα:

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f$$

Σύνθετα Υλικά

Ισοπαραμόρφωση (isostrain condition)

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f$$

(λόγω ισχυρού δεσμού)

Νόμος Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon$$

Άρα:

$$\sigma_c = E_c\varepsilon, \sigma_m = E_m\varepsilon, \sigma_f = E_f\varepsilon$$

Βάζουμε στον τύπο τάσης

$$E_c\varepsilon = E_m\varepsilon V_m + E_f\varepsilon V_f$$

Διαιρούμε με ε

$E_{cl} = E_m V_m + E_f V_f$ <p style="text-align: center;">ή</p> $E_{cl} = E_m(1 - V_f) + E_f V_f \quad \text{ισχύει } V_m + V_f = 1$
--

Σύνθετα Υλικά

□ Ελαστική Συμπεριφορά – Εγκάρσια Φόρτιση

- Φόρτιση κάθετα στις ίνες (90°)

➤ Ισοτασική κατάσταση

Η τάση είναι ίδια σε όλες τις φάσεις

Η παραμόρφωση είναι διαφορετική

$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f = \sigma$$

- Συνολική παραμόρφωση:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m V_m + \varepsilon_f V_f$$

Νόμος Hooke:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

άρα

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f}$$

E_c (εγκάρσια διεύθυνση)

$$E_{ct} = \frac{E_m E_f}{V_m E_f + V_f E_m}$$

ή

$$E_{ct} = \frac{E_m E_f}{(1 - V_f) E_f + V_f E_m}$$

Σύνθετα Υλικά

□ Διαμήκης Εφελκυστική Αντοχή

Για εφελκυστική φόρτιση

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f$$

Αντοχή είναι η **μέγιστη τάση πριν την αστοχία**

Στο σύνθετο συνήθως **σπάνε πρώτα οι ίνες**

Άρα:

$$\varepsilon_f^* < \varepsilon_m^*$$

Όταν σπάνε οι ίνες

Η τάση στην ίνα:

$$\sigma_f = \sigma_f^*$$

Η μήτρα δεν έχει σπάσει ακόμα → έχει κάποια τάση:

$$\sigma_m = \sigma_m'$$

Βάζουμε αυτά στον γενικό τύπο

$$\sigma_c^* = \sigma_m' V_m + \sigma_f^* V_f$$

Ισχύει

$$V_m = 1 - V_f$$

Διαμήκης εφελκυστική αντοχή για συνεχείς και ευθυγραμμισμένο σύνθετο

$$\sigma_c^* = \sigma_m' (1 - V_f) + \sigma_f^* V_f$$

σ_c^* :αντοχή σύνθετου

σ_f^* :αντοχή ίνας

σ_m' :τάση στη μήτρα όταν σπάνε οι ίνες

V_f :ποσοστό ινών

Σύνθετα Υλικά

Εγκάρσια Εφελκυστική Αντοχή (Transverse)

- Η αντοχή είναι πολύ μικρότερη από τη διαμήκη

Γιατί;

- Η φόρτιση εφαρμόζεται κάθετα στις ίνες
- Οι ίνες δεν φορτίζονται κατά μήκος τους
- Δεν μπορούν να αξιοποιήσουν την υψηλή αντοχή τους

Μηχανική συμπεριφορά

Κυριαρχεί η μήτρα

Η μήτρα έχει χαμηλότερη αντοχή

Οι ίνες συμβάλλουν ελάχιστα

- Η εγκάρσια φόρτιση οδηγεί σε πρόωρη αστοχία

Σύνθετα Υλικά

Ασυνεχείς (κοντές) αλλά ευθυγραμμισμένες ίνες

- Μικρότερη ενίσχυση από τις συνεχείς
- Πιο εύκολη και οικονομική παραγωγή

Ασυνεχή και Ευθυγραμμισμένα Ινώδη Σύνθετα Υλικά ($l > l_c$)

αρκετά μεγάλες ίνες

$$\sigma_{cd}^* = \sigma_f^* V_f \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + \sigma'_m (1 - V_f)$$

- Οι ίνες δεν αξιοποιούνται πλήρως
- Εξαρτάται από το μήκος

Όσο αυξάνεται το μήκος της ίνας, αυξάνεται η αντοχή.

Ασυνεχή και Ευθυγραμμισμένα Ινώδη Σύνθετα Υλικά ($l < l_c$)

$$\sigma_{cd}^* = \frac{l\tau_c}{d} V_f + \sigma'_m (1 - V_f)$$

- Οι ίνες είναι πολύ μικρές
- Η ενίσχυση είναι περιορισμένη

Όταν το μήκος είναι μικρότερο από το κρίσιμο, η ενίσχυση μειώνεται σημαντικά.

Σύνθετα Υλικά

- Διαμήκης φόρτιση → μέγιστη αντοχή και ακαμψία
- Εγκάρσια φόρτιση → ελάχιστη αντοχή και ακαμψία
- Το μήκος και ο προσανατολισμός των ινών είναι κρίσιμοι παράγοντες

Η μηχανική συμπεριφορά του σύνθετου εξαρτάται κυρίως από:

- τις ιδιότητες των ινών
- τη γεωμετρία και τον προσανατολισμό τους

Σύνθετα Υλικά

Ασυνεχή και Τυχαία Προσανατολισμένα Ινώση Σύνθετα Υλικά

$$E_{cd} = KE_fV_f + E_mV_m$$

- K: παράμετρος αποτελεσματικότητας της ίνας (0.1–0.6)
- Μειωμένη ενίσχυση

Η τυχαία διάταξη μειώνει την αποτελεσματικότητα των ινών.

Σύνθετα Υλικά

Άσκηση:

Οι μηχανικές ιδιότητες του αλουμινίου μπορούν να βελτιωθούν εάν εισαχθούν σε αυτό λεπτοί κόκκοι του οξειδίου του αλουμινίου (Al_2O_3). Δεδομένου ότι τα μέτρα ελαστικότητας είναι 69 GPa και 393 GPa, αντίστοιχα, δείξτε τη γραφική παράσταση του μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει επί τοις % κλασματικού όγκου Al_2O_3 σε Al από 0 μέχρι 100% κ.ό., χρησιμοποιώντας και τις δύο εκφράσεις για το άνω και κάτω όριο.

Σύνθετα Υλικά

Απάντηση:

για 0% έχουμε μόνο αλουμίνιο, άρα $E = 69 \text{ GPa}$
για 100% έχουμε μόνο Al_2O_3 , άρα $E = 393 \text{ GPa}$

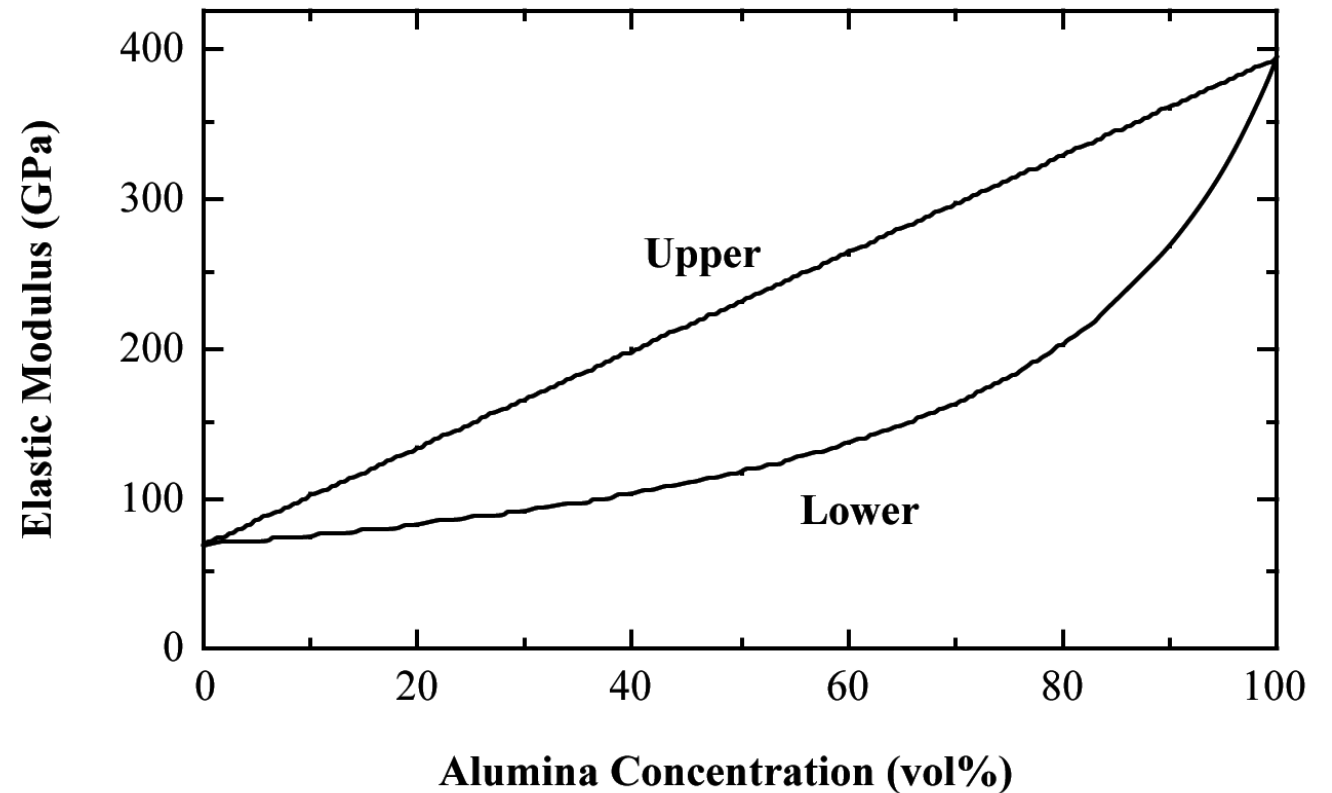
Ισχύει:

- Άνω όριο (upper bound)

$$E_c = E_m V_m + E_p V_p$$

- Κάτω όριο (lower bound)

$$E_c = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m}$$



Σύνθετα Υλικά

Άσκηση:

Για ένα σύνθετο υλικό με ίνες υάλου (E-glass) σε εποξειδική μήτρα, η αντοχή της ίνας είναι 3.45 GPa και ο κρίσιμος λόγος μήκους προς διάμετρο της ίνας είναι 50. Να υπολογιστεί η αντοχή του δεσμού μεταξύ ίνας - μήτρας.

Σύνθετα Υλικά

Απάντηση:

Κρίσιμο μήκος ίνας (l_c)

$$l_c = \frac{\sigma_f^* d}{2\tau_c}$$

Άρα:

$$\tau_c = \sigma_f^* \left(\frac{d}{2l_c} \right) = (3.45 \times 10^3 \text{ MPa}) \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{1}{50} \right) = 34.5 \text{ MPa}$$

Σύνθετα Υλικά

Άσκηση:

Ένα σύνθετο υλικό με ενίσχυση συνεχών και ευθυγραμμισμένων ινών πρόκειται να παραχθεί περιέχοντας 30% κ.ό. ίνες αραμιδίου και 70% πολυκαρβονική μήτρα. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά είναι τα ακόλουθα:

	Μέτρο Ελαστικότητας (Gpa)	Εφελκυστική Αντοχή (MPa)
Ίνα αραμιδίου	131	3600
Πολυκαρβονική μήτρα	2.4	65

Η τάση στην πολυκαρβονική μήτρα όταν οι ίνες αραμιδίου αστοχούν είναι 45 MPa.

Για αυτό το σύνθετο υλικό υπολογίστε τα ακόλουθα:

(α) Τη διαμήκη εφελκυστική αντοχή

(β) Το διαμήκες μέτρο ελαστικότητας

Απάντηση:

(α) Διαμήκης εφελκυστική αντοχή

Για σύνθετο με συνεχείς και ευθυγραμμισμένες ίνες, όταν δίνεται η τάση της μήτρας τη στιγμή που αστοχεί η ίνα, χρησιμοποιούμε:

$$\sigma_{cL}^* = \sigma_f^* V_f + \sigma'_m V_m$$

Άρα:

$$\sigma_{cL}^* = (3600)(0.30) + (45)(0.70)$$

$$\sigma_{cL}^* = 1080 + 31.5 = 1111.5 \text{ MPa}$$

(β) Διαμήκης μέτρο ελαστικότητας

Για το διαμήκες μέτρο ελαστικότητας:

$$E_{cL} = E_f V_f + E_m V_m$$

Αντικατάσταση:

$$E_{cL} = (131)(0.30) + (2.4)(0.70)$$

$$E_{cL} = 39.3 + 1.68 = 40.98 \text{ GPa}$$

Σύνθετα Υλικά

Άσκηση:

Για ένα σύνθετο υλικό ενισχυμένο με συνεχή και προσανατολισμένη ίνα, τα μέτρα ελαστικότητας στις διαμήκεις και εγκάρσιες διευθύνσεις είναι 19.7 και 3.66 GPa, αντίστοιχα. Εάν ο κλασματικός όγκος των ινών είναι 0.25, προσδιορίστε τα μέτρα ελαστικότητας των φάσεων μήτρας και ίνας.

Σύνθετα Υλικά

Απάντηση:

Διαμήκης διεύθυνση:

$$E_{cl} = E_m V_m + E_f V_f$$

$$19.7 = 0.75E_m + 0.25E_f$$

$$0.25E_f = 19.7 - 0.75E_m$$

$$E_f = \frac{19.7 - 0.75E_m}{0.25}$$

Εγκάρσια διεύθυνση

$$\frac{1}{E_{ct}} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f}$$

$$\frac{1}{3.66} = \frac{0.75}{E_m} + \frac{0.25}{E_f}$$

$$0.273 = \frac{0.75}{E_m} + \frac{0.25}{E_f}$$

εγκάρσια διεύθυνση → transverse direction

διαμήκης διεύθυνση → longitudinal direction

Σύνθετα Υλικά

Αντικατάσταση του E_f

$$0.273 = \frac{0.75}{E_m} + \frac{0.25}{\frac{19.7 - 0.75E_m}{0.25}}$$

$$0.273 = \frac{0.75}{E_m} + \frac{0.0625}{19.7 - 0.75E_m}$$

Πολλαπλασιάζουμε με:

$$E_m(19.7 - 0.75E_m)$$

$$0.273 E_m(19.7 - 0.75E_m) = 0.75(19.7 - 0.75E_m) + 0.0625E_m$$

$$5.3781E_m - 0.20475E_m^2 = 14.775 - 0.5E_m$$

$$-0.20475E_m^2 + 5.3781E_m + 0.5E_m - 14.775 = 0$$

$$-0.20475E_m^2 + 5.8781E_m - 14.775 = 0$$

$$0.20475E_m^2 - 5.8781E_m + 14.775 = 0$$

Δευτεροβάθμια εξίσωση

$$a = 0.20475, b = -5.8781, c = 14.775$$

Διακρίνουσα:

$$\begin{aligned}\Delta &= b^2 - 4ac \\ &= (-5.8781)^2 - 4(0.20475)(14.775) \\ &= 34.55 - 12.10 = 22.45\end{aligned}$$

$$E_m = \frac{5.8781 \pm \sqrt{22.45}}{2 \cdot 0.20475}$$

$$\sqrt{22.45} = 4.74$$

Σύνθετα Υλικά

1η λύση:

$$E_m = \frac{5.8781 + 4.74}{0.4095} = 25.9$$

Για

$$E_m = 25.9 \text{ GPa}$$

τότε:

$$E_f = \frac{19.7 - 0.75(25.9)}{0.25}$$

$$E_f = \frac{19.7 - 19.425}{0.25} = \frac{0.275}{0.25} = 1.1 \text{ GPa}$$

Η λύση απορρίπτεται διότι το μέτρο ελαστικότητας της ίνας είναι μικρότερο από της μήτρας.

Σύνθετα Υλικά

2η λύση:

$$E_m = \frac{5.8781 - 4.74}{0.4095} = 2.8$$

Άρα $E_m = 2.8$ GPa

Βρίσκω E_f

$$\begin{aligned} E_f &= \frac{19.7 - 0.75(2.8)}{0.25} \\ &= \frac{17.6}{0.25} = 70.4 \end{aligned}$$

Άρα $E_f = 70.4$ GPa

Σύνθετα Υλικά

Άσκηση:

(α) Να επαληθευτεί ότι η Εξίσωση $\frac{F_f}{F_m} = \frac{E_f V_f}{E_m V_m}$, δηλαδή η έκφραση για τον λόγο φορτίου ίνας-μήτρας (F_f/F_m), είναι σωστή.

(β) Να βρεθεί ο λόγος (F_f/F_c) σε όρους E_f , E_m και V_f .

Σύνθετα Υλικά

Απάντηση:

(α) Από $F = \sigma A$

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{\sigma_f A_f}{\sigma_m A_m}$$

ισχύει ισοπαραμόρφωση: $\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f = \varepsilon$

Νόμος Hooke

$$\begin{aligned}\sigma_f &= E_f \varepsilon \\ \sigma_m &= E_m \varepsilon\end{aligned}$$

Άρα:

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{E_f \varepsilon A_f}{E_m \varepsilon A_m} = \frac{E_f A_f}{E_m A_m}$$

Κλάσμα όγκου:

$$V_f = \frac{A_f}{A_c}, V_m = \frac{A_m}{A_c}$$

άρα:

$$\frac{A_f}{A_m} = \frac{V_f}{V_m}$$

Λόγος φορτίου που φέρεται από τις φάσεις ινών/μήτρας

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{E_f V_f}{E_m V_m}$$

Σύνθετα Υλικά

(β) Θέλουμε τον λόγο $\frac{F_f}{F_c}$

Ισχύει :

$$F_c = F_f + F_m$$

άρα

$$\frac{F_f}{F_c} = \frac{F_f}{F_f + F_m}$$

Ισχύει ισοπαραμόρφωση: $\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f = \varepsilon$

$$F_f = E_f \varepsilon A_f$$

$$F_m = E_m \varepsilon A_m$$

Αντικαθιστώ:

$$\frac{F_f}{F_c} = \frac{E_f \varepsilon A_f}{E_f \varepsilon A_f + E_m \varepsilon A_m}$$

Χρησιμοποιώ κλασματικούς όγκους

$$A_f = V_f A_c, A_m = V_m A_c$$

άρα:

$$\frac{F_f}{F_c} = \frac{E_f V_f}{E_f V_f + E_m V_m}$$

Όσο μεγαλύτερο είναι το $E_f V_f$ σε σχέση με το $E_m V_m$, τόσο μεγαλύτερο ποσοστό φορτίου αναλαμβάνουν οι ίνες.

Σύνθετα Υλικά

Άσκηση:

Σε ένα σύνθετο υλικό με συνεχείς και ευθυγραμμισμένες ίνες υάλου σε μήτρα νάιλον 6,6, οι ίνες φέρουν το 94% του εφαρμοζόμενου φορτίου κατά τη διαμήκη διεύθυνση.

(α) Να υπολογιστεί ο κλασματικός όγκος των ινών που απαιτείται

(β) Να υπολογιστεί η εφελκυστική αντοχή του σύνθετου. Δίνεται ότι η τάση στη μήτρα κατά τη θραύση της ίνας είναι 30 MPa.

	<i>Modulus of Elasticity</i> [GPa (psi)]	<i>Tensile Strength</i> [MPa (psi)]
Glass fiber	72.5 (10.5×10^6)	3400 (490,000)
Nylon 6,6	3.0 (4.35×10^5)	76 (11,000)

Modulus of elasticity: μέτρο ελαστικότητας

Tensile strength: εφελκυστική αντοχή

Σύνθετα Υλικά

Δεδομένα:

$$E_m = 3.0 \text{ GPa}$$

$$\sigma_f^* = 3400 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_m = 30 \text{ MPa}$$

$$F_f = 0.94 F_c$$

$$\frac{F_f}{F_c} = 0.94$$

(a) Χρησιμοποιούμε:

$$\frac{F_f}{F_c} = \frac{E_f V_f}{E_f V_f + E_m V_m}$$

και $V_m = 1 - V_f$

$$0.94 = \frac{72.5 V_f}{72.5 V_f + 3(1 - V_f)}$$

$$0.94(72.5 V_f + 3 - 3 V_f) = 72.5 V_f$$

$$0.94(69.5 V_f + 3) = 72.5 V_f$$

$$65.33 V_f + 2.82 = 72.5 V_f$$

$$V_f = 0.393$$

Σύνθετα Υλικά

(β) Ισχύει για την εφελκυστική αντοχή σύνθετου υλικού:

$$\sigma_c^* = \sigma_f^* V_f + \sigma'_m (1 - V_f)$$

$$\sigma_c^* = 3400(0.393) + 30(0.607)$$

$$= 1336.2 + 18.2 = 1354.4 \text{ MPa}$$

Σύνθετα Υλικά

Άσκηση:

Ένα σύνθετο υλικό με συνεχείς και ευθυγραμμισμένες ίνες έχει συνολική επιφάνεια διατομής 1130 mm^2 και υποβάλλεται σε εφελκυστικό φορτίο. Οι τάσεις που αναπτύσσονται στην ίνα και στη μήτρα είναι 156 MPa και 2.75 MPa , αντίστοιχα. Η δύναμη που φέρει η φάση των ινών είναι $74,000 \text{ N}$, ενώ η συνολική διαμήκης παραμόρφωση είναι 1.25×10^{-3} .

Να υπολογιστούν:

- α) Η δύναμη που φέρει η μήτρα
- β) Το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου στη διαμήκη διεύθυνση
- γ) Τα μέτρα ελαστικότητας της ίνας και της μήτρας

Σύνθετα Υλικά

Απάντηση:

(α) Δύναμη που φέρει η μήτρα

Ισχύει:

$$\sigma_f = \frac{F_f}{A_f} \text{ και } V_f = \frac{A_f}{A_c}$$

άρα:

$$\sigma_f = \frac{F_f}{V_f A_c}$$

Λύνω ως προς V_f :

$$V_f = \frac{F_f}{\sigma_f A_c}$$

$$V_f = \frac{74000}{(156 \times 10^6)(1.13 \times 10^{-3})}$$
$$V_f = \frac{74000}{176280} = 0.420$$

Υπολογίζω V_m

$$V_m = 1 - V_f = 1 - 0.420 = 0.580$$

Υπολογίζω F_m

$$\sigma_m = \frac{F_m}{A_m} = \frac{F_m}{V_m A_c}$$

άρα:

$$F_m = V_m \sigma_m A_c$$

Υπολογισμός

$$F_m = (0.580)(2.75 \times 10^6)(1.13 \times 10^{-3})$$

$$F_m = 1802 \text{ N}$$

Σύνθετα Υλικά

(β) Μέτρο ελαστικότητας σύνθετου στη διαμήκη διεύθυνση

Συνολική δύναμη:

$$F_c = F_f + F_m = 74000 + 1804 = 75804 \text{ N}$$

Συνολική τάση:

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A_c} = \frac{75804}{1.13 \times 10^{-3}} = 67.1 \text{ MPa}$$

Νόμος Hooke:

$$E_c = \frac{\sigma_c}{\varepsilon}$$

$$E_c = \frac{67.1}{1.25 \times 10^{-3}} = 53.7 \text{ GPa}$$

(γ) Μέτρα ελαστικότητας ίνας και μήτρας

Ισοπαραμόρφωση:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon$$

Άρα:

$$E_f = \frac{\sigma_f}{\varepsilon} = \frac{156}{1.25 \times 10^{-3}} = 124.8 \text{ GPa}$$

$$E_m = \frac{\sigma_m}{\varepsilon} = \frac{2.75}{1.25 \times 10^{-3}} = 2.2 \text{ GPa}$$

Σύνθετα Υλικά

☐ Ινώδης Φάση

Οι ίνες αποτελούν την **ενισχυτική φάση** των σύνθετων υλικών

Προσδίδουν:

υψηλή αντοχή

υψηλό μέτρο ελαστικότητας

Οι ίνες είναι τόσο ισχυρές γιατί:

- Μικρή διάμετρος → λιγότερες ατέλειες
- Μικρή πιθανότητα δημιουργίας κρίσιμης ρωγμής
- Αυξημένη αντοχή (ιδιαίτερα σε ψαθυρά υλικά)

Κατηγορίες Ινών

❑ Βελόνες (Whiskers)

Μονοκρυσταλλικές, πολύ λεπτές

Σχεδόν χωρίς ατέλειες

Εξαιρετικά υψηλή αντοχή

Μειονεκτήματα:

- υψηλό κόστος
- δύσκολη χρήση

Παραδείγματα: SiC, Si₃N₄

❑ Ίνες (Fibers)

Πολυκρυσταλλικές ή άμορφες

Μικρή διάμετρος

Πιο συνηθισμένες σε εφαρμογές

Παραδείγματα:

- Carbon
- Glass
- Kevlar (Aramid)
- Al₂O₃

❑ Σύρματα (Wires)

Μεγαλύτερη διάμετρος

Κυρίως **μεταλλικές ίνες**

Παραδείγματα:

- χάλυβας
- W (βολφράμιο)
- Mo (μολυβδαίνιο)

Σύνθετα Υλικά

□ Η Μητρική Φάση

Η μήτρα μπορεί να είναι:

- πολυμερές
- μέταλλο
- κεραμικό

Βασικές λειτουργίες:

- Συγκρατεί τις ίνες και διατηρεί τη δομή
- Μεταφέρει και κατανέμει τα φορτία στις ίνες
- Προστατεύει από μηχανική φθορά και περιβαλλοντική επίδραση
- Περιορίζει τη διάδοση ρωγμών → λειτουργεί ως εμπόδιο

□ Πρόσφυση ίνας-μήτρας

- Η καλή πρόσφυση μεταξύ ίνας και μήτρας είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική μεταφορά φορτίου.
- Αν η πρόσφυση είναι χαμηλή, οι ίνες αποκολλώνται και το υλικό αστοχεί πρόωρα.
- Η αντοχή του σύνθετου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα αυτού του δεσμού.

Σύνθετα Υλικά

❑ Σύνθετα Υλικά Πολυμερούς Μήτρας - Polymer Matrix Composites (PMCs)

Αποτελούνται από πολυμερική μήτρα και ενισχυτικές ίνες.

Είναι τα πιο διαδεδομένα σύνθετα υλικά λόγω χαμηλού κόστους, ευκολίας παραγωγής και των καλών ιδιοτήτων σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

❑ Ίνες γυαλιού-Glass Fiber Composites (GFRP)

Οι ίνες γυαλιού χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω χαμηλού κόστους και καλής αντοχής.

Παρουσιάζουν υψηλή ειδική αντοχή και καλή ανθεκτικότητα σε διαβρωτικά περιβάλλοντα.

Διάμετρος από 3-20 μm

Ωστόσο, δεν έχουν πολύ υψηλή ακαμψία και περιορίζονται σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας (< 200 °C)

Σκελετοί αυτοκινήτων, βιομηχανικά δάπεδα, πλαστικοί σωλήνες

❑ Carbon Fiber Composites (CFRP)

Έχουν το υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό και την υψηλότερη ειδική αντοχή από όλα τα ινώδη ενισχυτικά υλικά

Διατηρούν τις ιδιότητές τους και σε υψηλές θερμοκρασίες και είναι ανθεκτικές σε χημικές επιδράσεις.

Χρησιμοποιούνται σε προηγμένες εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή απόδοση και χαμηλό βάρος.

Διάμετρος από 4-10 μm

Σύνθετα Υλικά

❑ **Aramid Fiber Composites (Kevlar)**

Οι ίνες αραμιδίου παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή σε σχέση με το βάρος και υψηλή ανθεκτικότητα σε κρούση.

Έχουν **πολύ υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό**

Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως αλεξίσφαιρα υλικά και εξοπλισμός προστασίας.

Σύνθετα Υλικά

❑ Σύνθετα Υλικά Μεταλλικής Μήτρας (MMCs)

μήτρα = μέταλλο

ενίσχυση = ίνες / σωματίδια / βελόνες
(whiskers)

Πλεονεκτήματα (σε σχέση με PMCs)

Λειτουργούν σε **υψηλότερες θερμοκρασίες**

Υψηλή αντοχή και ακαμψία

Καλή αντοχή σε:

- **ερπυσμό**
- **φθορά**

• **Υψηλή θερμική αγωγιμότητα**

Μειονεκτήματα

• **Υψηλό κόστος**

• **Δύσκολη κατεργασία**

Εφαρμογές

- **Αεροναυπηγική**
- **Κινητήρες / εξαρτήματα υψηλής θερμοκρασίας**
- **Δομικά μέρη υψηλών απαιτήσεων**

Σύνθετα Υλικά

❑ Σύνθετα Υλικά Κεραμικής Μήτρας (CMCs)

μήτρα = κεραμικό

ενίσχυση = σωματίδια / ίνες / βελόνες (whiskers)

Τα κεραμικά έχουν:

- υψηλή αντοχή σε θερμοκρασία & οξείδωση
- αλλά είναι **ψαθυρά (χαμηλή δυσθραυστότητα)**

➤ Τα CMCs σχεδιάζονται για **βελτίωση της δυσθραυστότητας**

Πλεονεκτήματα

- Υψηλή αντοχή σε:
 - **θερμοκρασία**
 - **οξείδωση**
- Βελτιωμένη **δυσθραυστότητα** σε σχέση με κεραμικά

Εφαρμογές

- Τουρμπίνες
- Εργαλεία κοπής
- Εξαρτήματα υψηλής θερμοκρασίας

❑ Πολυστρωτά Σύνθετα Υλικά - **Laminar Composites**

- Αποτελούνται από διαδοχικά στρώματα (laminae) που συγκολλούνται μεταξύ τους.
- Κάθε στρώμα έχει συγκεκριμένη διεύθυνση υψηλής αντοχής, ανάλογα με τον προσανατολισμό των ινών.
- Η συνολική συμπεριφορά του υλικού εξαρτάται από τον συνδυασμό των στρώσεων.

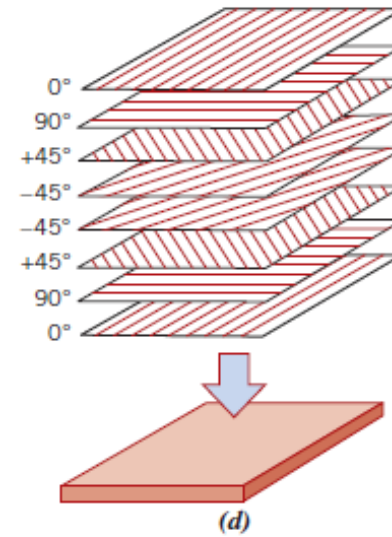
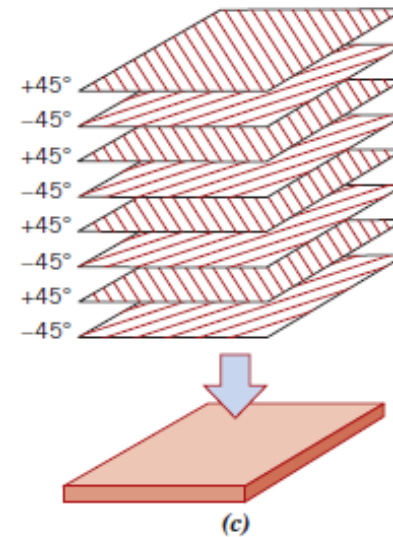
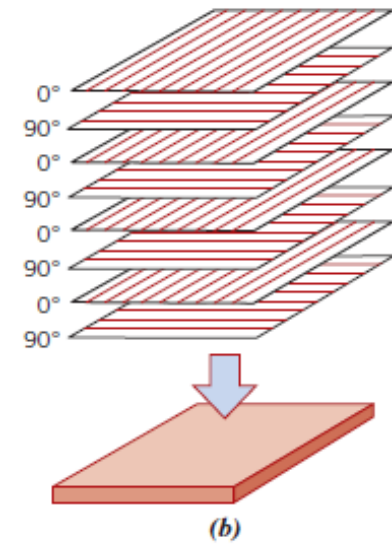
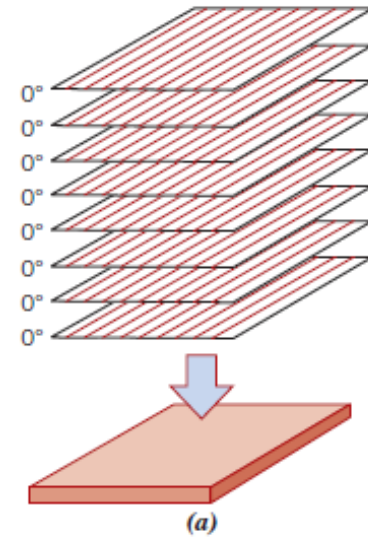
Εφαρμογές Laminar Composites

- Αεροναυπηγική (πτέρυγες, άτρακτος)
- Αυτοκινητοβιομηχανία
- Ναυπηγική
- Κατασκευές
- Αθλητικός εξοπλισμός
- Υψηλή αντοχή με χαμηλό βάρος

Σύνθετα Υλικά

Τύποι Laminar Composites

- (a) μονοαξονικά
- (b) σταυρωτής στρώσης
- (c) Γωνιακής στρώσης
- (d) Πολλαπλών διευθύνσεων



Σύνθετα Υλικά

Διατάξεις Τύπου Σάντουιτς

Δομή:

δύο εξωτερικά φύλλα (faces)

ενδιάμεσος πυρήνας (core)

Πυρήνας

Χαμηλή πυκνότητα → μικρό βάρος

Διατηρεί απόσταση μεταξύ των εξωτερικών φύλλων

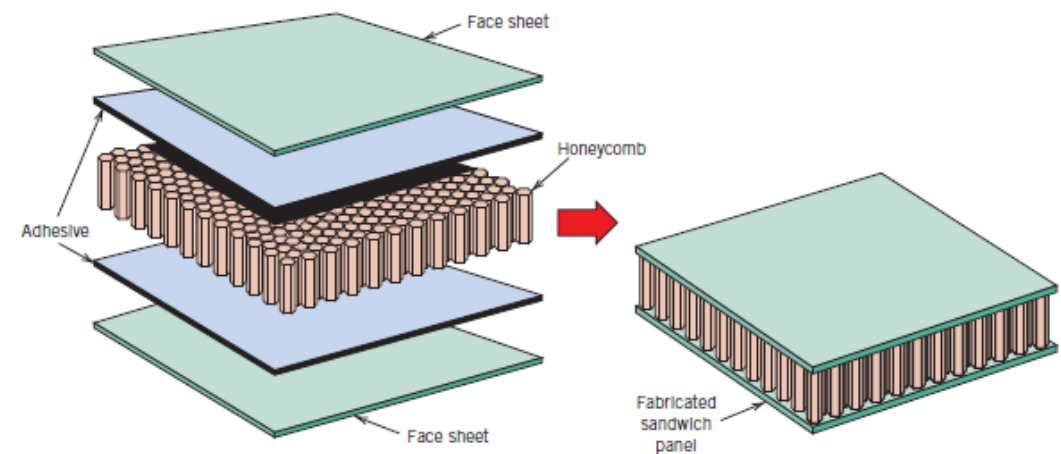
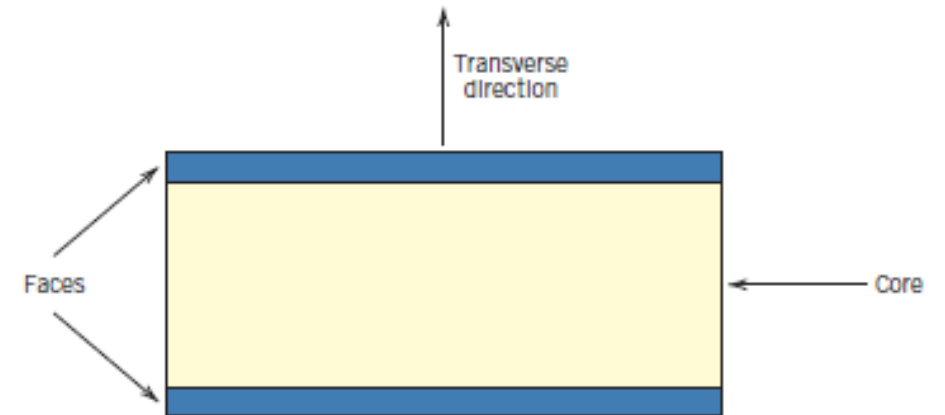
Αυξάνει σημαντικά την **καμπτική ακαμψία**

Τα εξωτερικά φύλλα φέρουν τα φορτία

Παρέχουν:

υψηλή **αντοχή**

υψηλή **ακαμψία**



Figures adapted from:

Materials Science and Engineering: An Introduction (W. D. Callister Jr. & D. Rethwisch),
10th ed., Chapter 16.