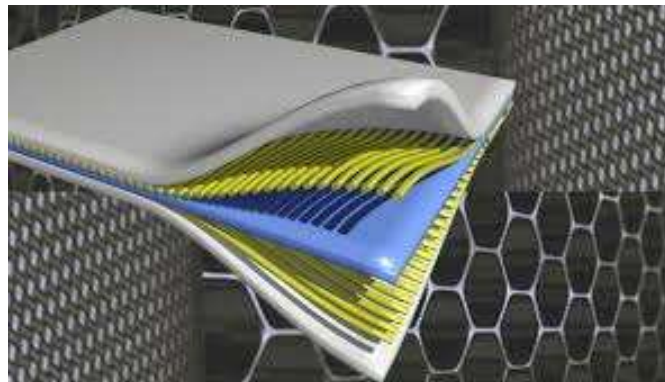


Σύνθετα υλικά



Περιέχει περιεχόμενο και υλικό από τα συγγράμματα:

Callister W. D., Rethwisch D. G. Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών, 10η Έκδοση, Εκδ. Α. Τζιόλα & Υιοί, 2022

Β. Ζασπάλης, Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών, 2η Έκδοση, Εκδ. Α. Τζιόλα & Υιοί, 2020

- Κατηγορίες και τύποι σύνθετων υλικών.
- Ποια πλεονεκτήματα παρέχει η χρήση σύνθετων υλικών;
- Πώς μπορεί να προβλεφθεί η ακαμψία και η αντοχή των διάφορων τύπων σύνθετων υλικών;



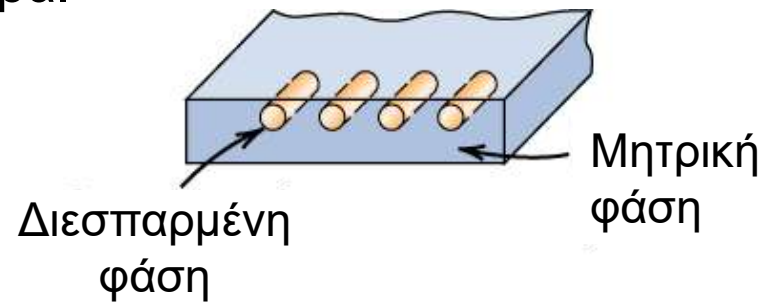
ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Σύνθετα Υλικά: Εισαγωγή

- **Είναι:** Συνδυασμός δύο ή περισσότερων ξεχωριστών υλικών.
- **Στόχος που εξυπηρετούν:** Επίτευξη ενός συνδυασμού “περισσότερο επιθυμητών” ιδιοτήτων (βάσει της αρχής της συνδυασμένης δράσης)
 - π.χ., χαμηλή πυκνότητα και υψηλή αντοχή

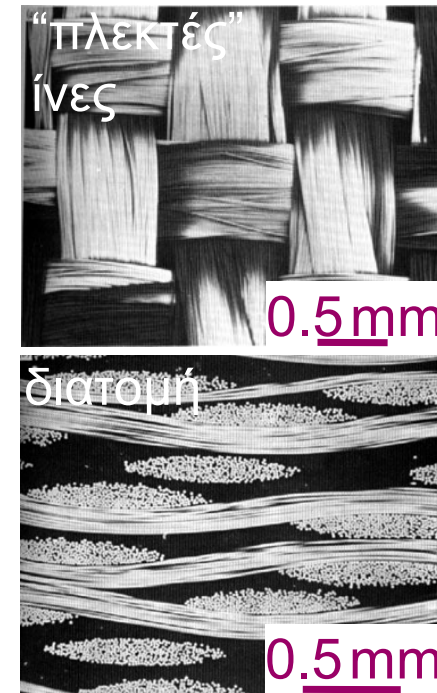
Ορισμοί & ορολογία

- **Σύνθετο:**
 - Τεχνητά κατασκευασμένο υλικό, αποτελούμενο από περισσότερες της μιας φάσεις.
- **Τύποι φάσεων:**
 - Συνεχής: το μητρικό υλικό (μήτρα).
 - Διεσπαρμένη: ασυνεχής, περιβάλλεται από τη μήτρα.



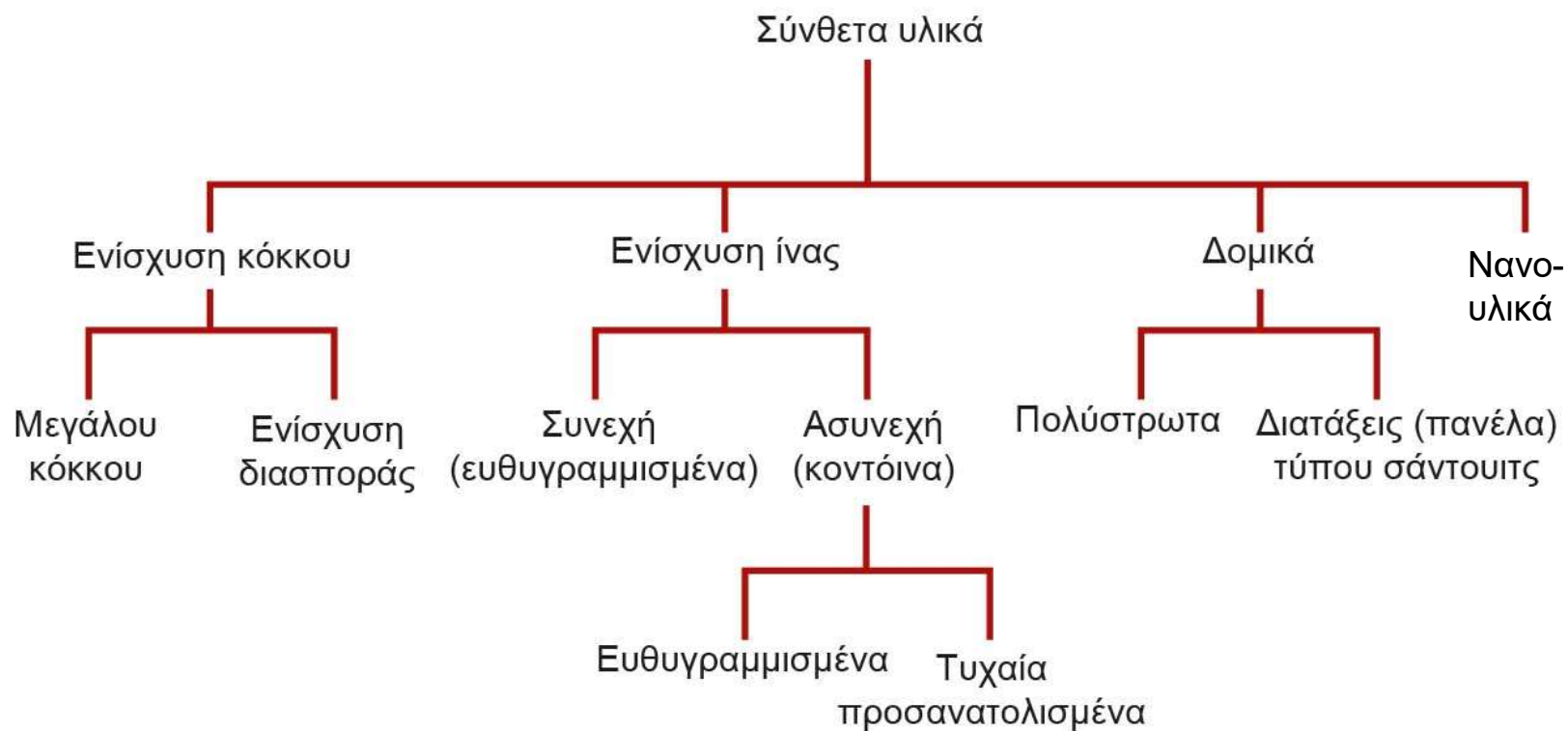
Ορισμοί & ορολογία

- **Φάση μήτρας:**
 - Σκοποί που εξυπηρετεί:
 - μεταφορά τάσης στη διεσπαρμένη φάση
 - προστασία της διεσπαρμένης φάσης από το περιβάλλον
 - Τύποι: **MMC**, **CMC**, **PMC**
 - μέταλλο κεραμικό πολυμερές
- **Διεσπαρμένη φάση:**
 - Σκοπός που εξυπηρετεί:
 - MMC**: αύξηση σ_y , TS , αντοχής σε ερπυσμό.
 - CMC**: αύξηση δυσθραυστότητας
 - PMC**: αύξηση E , σ_y , TS , αντοχής σε ερπυσμό.
 - Τύποι: **σωματίδια (κόκκοι)**, **ίνες**, **δομικά υλικά**



Αναπαράγεται από D. Hull and T.W. Clyne, *An Introduction to Composite Materials*, 2nd ed., Cambridge University Press, New York, 1996, Σχ. 3.6, p. 47.

Κατηγοριοποίηση σύνθετων υλικών

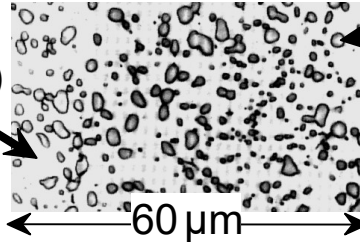


Σύνθετα με ενίσχυση κόκκου (1)

- Παραδείγματα:

- Σφαιροειδίτης χάλυβας

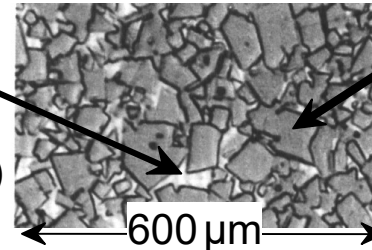
μήτρα:
φερρίτης (α)
(όλκιμο)



σωματίδια:
σεμεντίτης
(Fe_3C)
(ψαθυρό)

- WC/Co
“τσιμεντο-
ποιημένο”
καρβίδιο

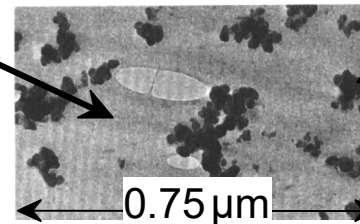
μήτρα:
κοβάλτιο
(όλκιμο,
δύσθραυστο)



σωματίδια:
WC
(ψαθυρό,
σκληρό)

- Ελαστικά
αυτοκινήτου

μήτρα:
καουτσούκ
(σύμμορφο)



σωματίδια:
άνθρακας
(άκαμπτο)

Σύνθετα με ενίσχυση κόκκου (2)

Σκυρόδεμα – χαλίκι + άμμο + τσιμέντο + νερό

- Γιατί και άμμο και χαλίκι; Η άμμος “γεμίζει” τα κενά μεταξύ των “κόκκων” χαλικιού

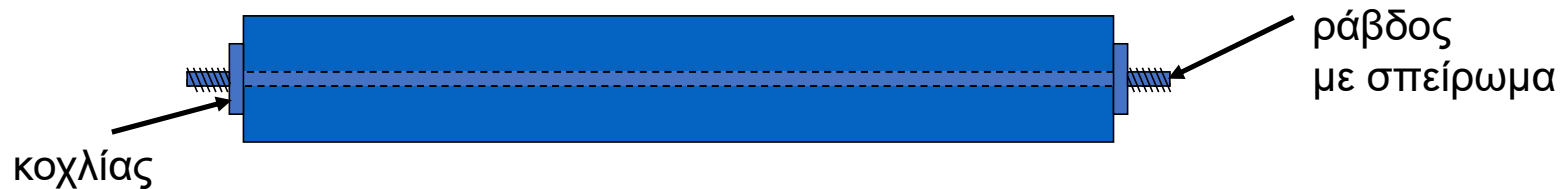
Ενισχυμένο σκυρόδεμα – Ενίσχυση με βέργες, σύρματα, δίχτυα από χάλυβα

- αυξημένη αντοχή – ακόμα κι αν υπάρξουν ρωγμές στο υλικό μήτρας (τσιμέντο)

Προ-τανυσμός (προεντεταμένο σκυρόδεμα)

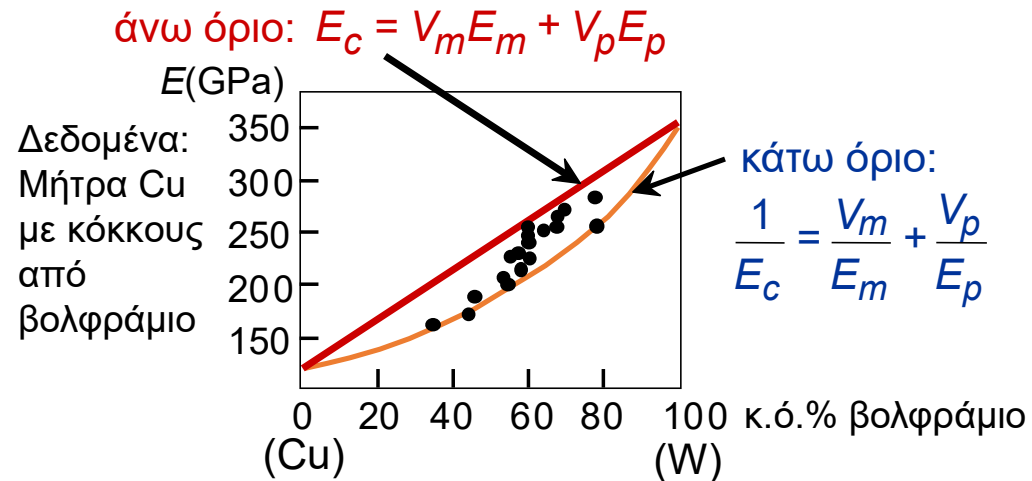
- Τα στοιχεία ενίσχυσης τίθενται υπό εφελκυσμό κατά τη διάρκεια σκλήρυνσης του σκυροδέματος
- Η άρση του εφελκυσμού μετά τη σκλήρυνση οδηγεί το σκυρόδεμα σε κατάσταση θλίψης
- Για θραύση του σκυροδέματος, θα πρέπει να εφαρμοστεί τάση μεγαλύτερη από αυτή τη θλιπτική τάση

Μετα-τανυσμός – η σύσφιγξη των ενισχ. στοιχείων θέτει το σκυρόδεμα υπό θλίψη



Σύνθετα με ενίσχυση κόκκου (3)

- Μέτρο ελαστικότητας, E_c , των σύνθετων υλικών:
-- δύο οριακές περιπτώσεις του “κανόνα μειγμάτων”:



- Εφαρμογή, κατ' αναλογία σε άλλες ιδιότητες:
-- Ηλεκτρική αγωγιμότητα, σ_e : Αντικατάσταση του E στις εξισώσεις με σ_e .
-- Θερμική αγωγιμότητα, k : Αντικατάσταση του E στις εξισώσεις με k .

Σύνθετα με ενίσχυση ίνας (1)

- Οι ίνες έχουν πολύ υψηλή αντοχή στον εφελκυσμό
 - Παρέχουν σημαντική βελτίωση της αντοχής του σύνθετου
 - Π.χ.: fiber-glass – συνεχή υαλονήματα σε πολυμερική μήτρα
 - ίνες υάλου (υαλονήματα)
 - παρέχουν αντοχή και ακαμψία
 - πολυμερική μήτρα
 - συγκρατεί τις ίνες στη θέση τους
 - προστατεύει τις επιφάνειες των ινών
 - μεταφέρει φορτίο στις ίνες

Σύνθετα με ενίσχυση ίνας (2)

- Τύποι ινών

- Βελόνες - λεπτοί μονοκρύσταλλοι – μεγάλοι λόγοι μήκους προς διάμετρο

- γραφίτης, νιτρίδιο πυριτίου, καρβίδιο πυριτίου
 - υψηλός βαθμός κρυσταλλικής τελειότητας – εξαιρετικά μεγάλες αντοχές
 - πολύ υψηλό κόστος, δυσκολία διασποράς

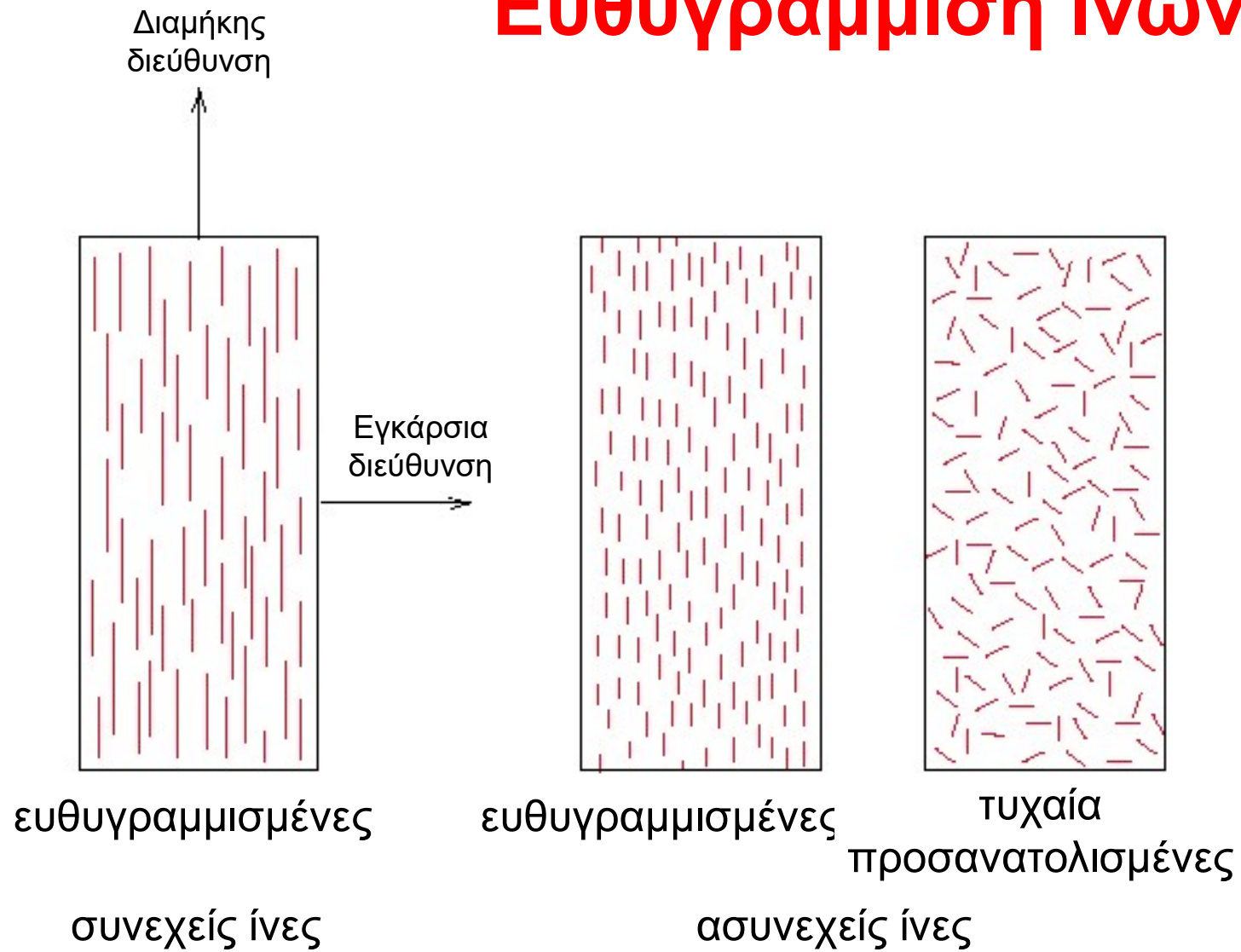
- Ίνες

- πολυκρυσταλλικά ή άμορφα υλικά
 - γενικά πολυμερή ή κεραμικά
 - π.χ.: αλουμίνα, αραμίδια, γυαλί Ε-τύπου, βόριο, πολυαιθυλένιο υπερυψηλού μοριακού βάρους (UHMWPE)

- Σύρματα

- μέταλλα – χάλυβας, μολυβδαίνιο, βολφράμιο

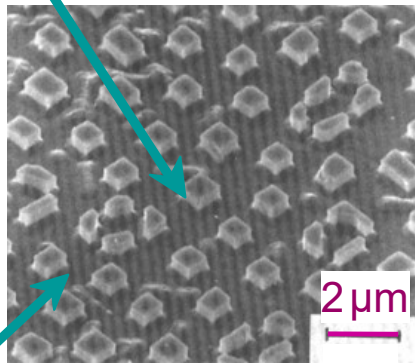
Ευθυγράμμιση ινών



Σύνθετα με ενίσχυση ίνας (3)

- Ευθυγραμμισμένες συνεχείς ίνες
- Παραδείγματα:

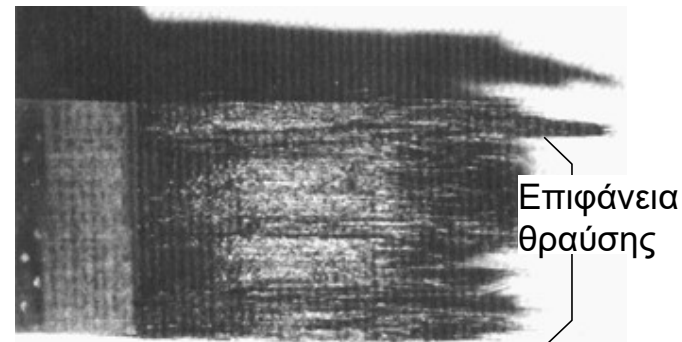
-- **Μέταλλο:** γ' (Ni₃Al)- α (Mo)
μέσω ευτηκτικής στερεοποίησης.
Μήτρα: α (Mo) (όλκιμο)



Ίνες: γ' (Ni₃Al) (ψαθυρό)

Από W. Funk and E. Blank, "Creep deformation of Ni₃Al-Mo in-situ composites", *Metall. Trans. A* Vol. 19(4), pp. 987-998, 1988. Χρησιμοποιείται με άδεια.

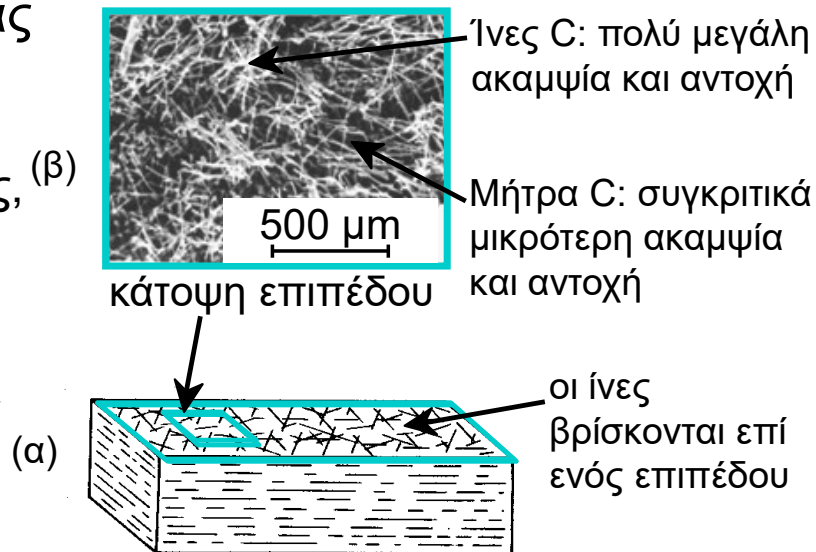
-- **Κεραμικό:** ύαλος με ίνες SiC
διαμόρφωση από πολτό (υαλόμαζα)
 $E_{\text{glass}} = 76 \text{ GPa}$; $E_{\text{SiC}} = 400 \text{ GPa}$.



Από F.L. Matthews and R.L. Rawlings, *Composite Materials; Engineering and Science*, Reprint ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2000. Με άδεια από CRC Press, Boca Raton, FL.

Σύνθετα με ενίσχυση ίνας (4)

- **Ασυνεχείς ίνες**, τυχαίος προσανατολισμός στις 2 διαστάσεις
- Παράδειγμα: άνθρακας-άνθρακας
 - Διαδικασία κατασκευής:
 - ίνες άνθρακα ενσωματώνονται σε μήτρα πολυμερικής ρητίνης, (β)
 - πυρόλυση της πολυμερικής ρητίνης σε θερμοκρασία έως 2500° C.
 - Χρήσεις: φρένα δίσκων, πτερύγια εξαγωγής αεριοστροβίλων, κώνοι ρύγχους πυραύλων.
- Άλλες δυνατότητες:
 - **Ασυνεχείς, τυχαίος προσανατολισμός 3D**
 - **Ασυνεχείς, ευθυγραμμισμένες**



Διασκευή από F.L. Matthews and R.L. Rawlings, *Composite Materials; Engineering and Science*, Reprint ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2000. (α) Σχ. 4.24(α), p. 151; (β) Σχ. 4.24(β) p. 151. (Πηγή: I.J. Davies) Αναπαράγεται με άδεια από CRC Press, Boca Raton, FL.

Σύνθετα με ενίσχυση ίνας (5)

- Κρίσιμο μήκος ίνας για αποτελεσματική ισχυροποίηση & αύξηση ακαμψίας:
μέγιστη αντοχή ίνας σε εφελκυσμό

$$\text{μήκος ίνας} > \frac{\sigma_f d}{2\tau_c}$$

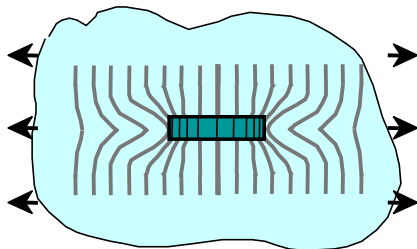
διάμετρος ίνας

διατμητική αντοχή διεπαφής ίνας-μήτρας

- Π.χ.: Για υαλονήματα, απαιτείται συνήθως μήκος ίνας $> 15 \text{ mm}$
- Με ίνες μεγαλύτερου μήκους, η μεταφορά τάσης από τη μήτρα είναι πιο αποτελεσματική

Παχιές ίνες μικρού μήκους:

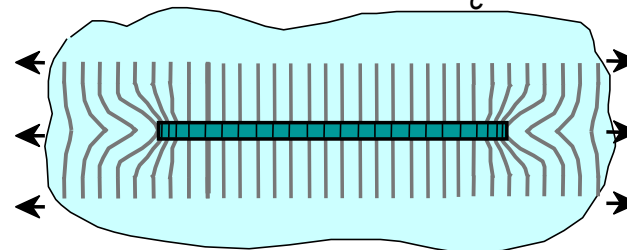
$$\text{μήκος ίνας} < \frac{\sigma_f d}{2\tau_c}$$



Χαμηλή αποτελεσματικότητα

Λεπτές ίνες μεγάλου μήκους:

$$\text{μήκος ίνας} > \frac{\sigma_f d}{2\tau_c}$$



Υψηλή αποτελεσματικότητα

Ακαμψία, διαμήκης φόρτιση

(σύνθετα με ενίσχυση ίνας)

Συνεχείς ίνες - Εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας
για ινοενισχυμένο σύνθετο με συνεχείς ίνες

- Διαμήκης παραμόρφωση

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

κλάσμα όγκου

και

$$e_c = e_m = e_f$$

ισοπαραμορφωσιακή κατάσταση

∴

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

E_{cl} = μέτρο ελαστ.,
διαμήκης διεύθυνση

c = σύνθετο

f = ίνα

m = μήτρα

Ακαμψία, διαμήκης φόρτιση (σύνθετα με ενίσχυση ίνας)

- Σε εγκάρσια φόρτιση, οι ίνες φέρουν μικρότερο μέρος του φορτίου

$$e_c = e_m V_m + e_f V_f$$

και

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

↖
ισοτασική κατάσταση

∴

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

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

E_{ct} = μέτρο ελαστ.,
εγκάρσια διεύθυνση

c = σύνθετο

f = ίνα

m = μήτρα

Ακαμψία

(σύνθετα με ενίσχυση ίνας)

- Υπολογισμός του E_{cd} για ασυνεχείς ίνες:
 - έγκυρος όταν το μήκος ίνας $< 15 \frac{\sigma_f d}{\tau_c}$
 - Μέτρο ελαστικότητας στη διεύθυνση των ινών:

$$E_{cd} = E_m V_m + K E_f V_f$$

↑
δείκτης αποτελεσματικότητας:

- ευθυγραμμισμένες ίνες: $K = 1$ (ευθυγρ. παράλληλα)
- ευθυγραμμισμένες ίνες: $K = 0$ (ευθυγρ. κάθετα)
- τυχ. προσανατολισμού, 2Δ: $K = 3/8$ (ισοτροπία 2Δ)
- τυχ. προσανατολισμού, 3Δ: $K = 1/5$ (ισοτροπία 3Δ)

Αντοχή

(σύνθετα με ενίσχυση ίνας)

- Υπολογισμός του σ_{cd}^* για ασυνεχείς ίνες:

1. Όταν $l > l_c$

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

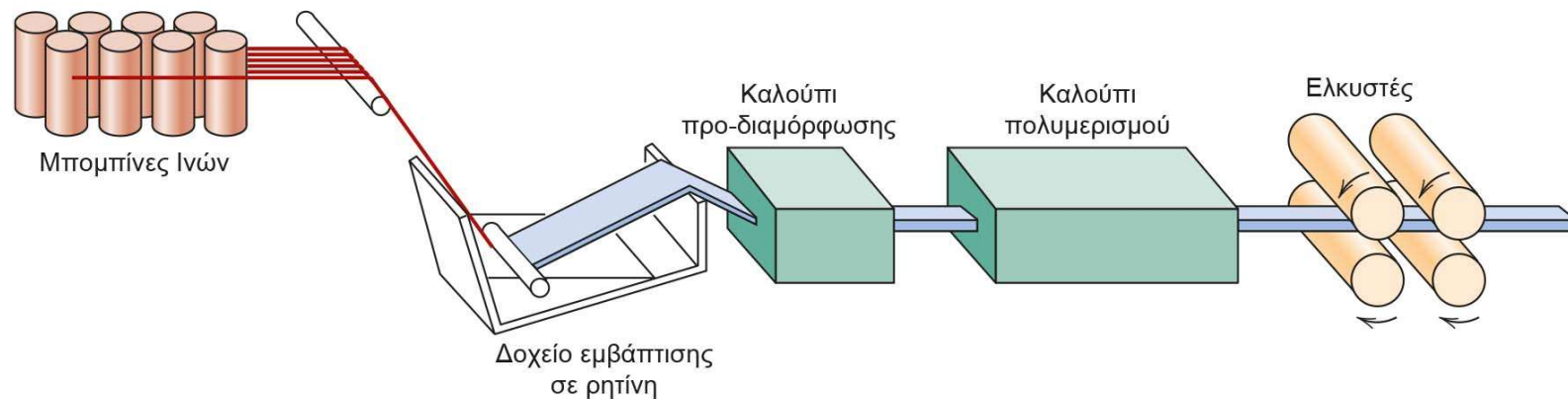
2. Όταν $l < l_c$

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

Μέθοδοι παραγωγής σύνθετων υλικών (1)

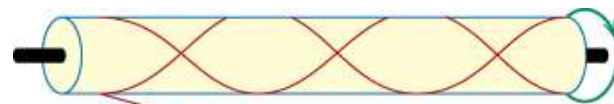
Μορφοποίηση με έλξη

- Συνεχείς ίνες (ή πλέξεις/δέσμες ινών) εμποτίζονται κατ' αρχάς με θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη
- Οι εμποτισμένες ίνες διέρχονται από χαλύβδινο καλούπι προ-διαμόρφωσης στο επιθυμητό σχήμα.
- Το προ-διαμορφωμένο υλικό διέρχεται από καλούπι πολυμερισμού, το οποίο είναι:
 - κατασκευασμένο με κατεργασία ακριβείας ώστε να προσδώσει το τελικό σχήμα στο υλικό
 - θερμαινόμενο, ώστε να εκκινεί τη σκλήρυνση της πολυμερικής ρητίνης

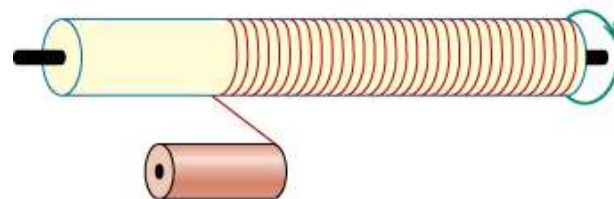


Μέθοδοι παραγωγής σύνθετων υλικών (2)

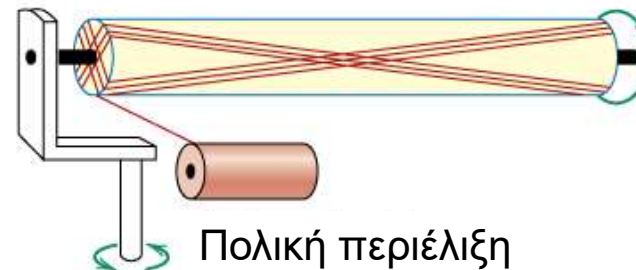
- **Μορφοποίηση με περιέλιξη ινών**
 - Συνεχείς ενισχυτικές ίνες τοποθετούνται επακριβώς σε προκαθορισμένο μοτίβο ώστε να σχηματιστεί ένα κοίλο (συνήθως κυλινδρικό) σχήμα
 - Οι ίνες (ανεξάρτητες ή δέσμες) οδηγούνται σε λουτρό ρητίνης
 - Οι εμποτισμένες ίνες περιελίσσονται συνεχώς πάνω σε κυλινδρικό άξονα (συνήθως μέσω αυτοματοποιημένων διατάξεων περιέλιξης)
 - Αφού εναποτεθεί ο κατάλληλος αριθμός στρώσεων, ο πολυμερισμός (σκλήρυνση) διεξάγεται είτε σε φούρνο είτε σε θερμοκρασία δωματίου
 - Ο κυλινδρικός άξονας απομακρύνεται και απομένει το τελικό προϊόν



Ελικοειδής περιέλιξη



Περιφερειακή περιέλιξη

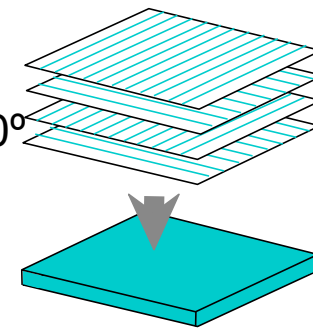


Πολική περιέλιξη

Δομικά σύνθετα υλικά

- **Πολύστρωτα** -

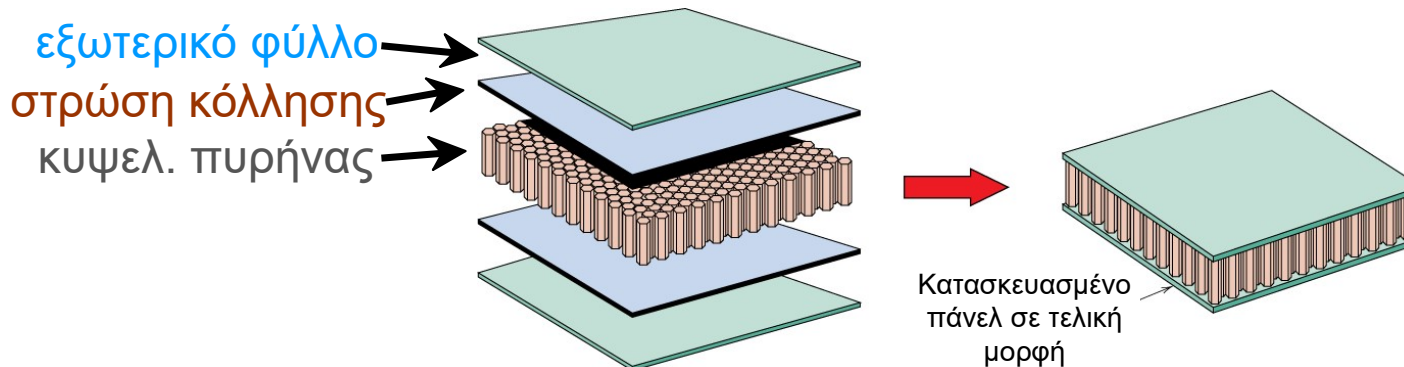
- πολλαπλές στρώσεις (στοίβαση) ινοενισχυμένων φύλλων, κολλημένων μεταξύ τους
 - αλληλουχία στοίβασης στρώσεων: π.χ., $0^\circ/90^\circ$
 - πλεονέκτημα: ισορροπημένη ακαμψία στο μέσο επίπεδο του πολύστρωτου



Διασκευή από
Σχ. 16.16,
Callister &
Rethwisch 8e.

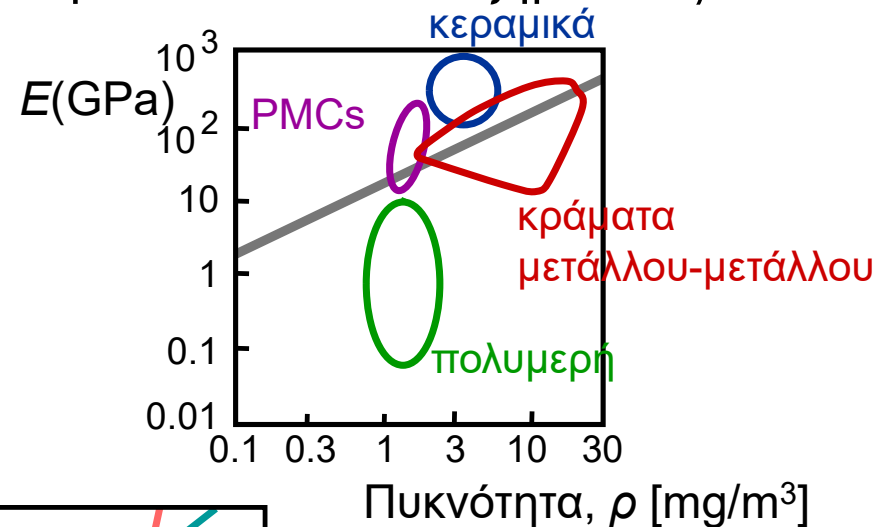
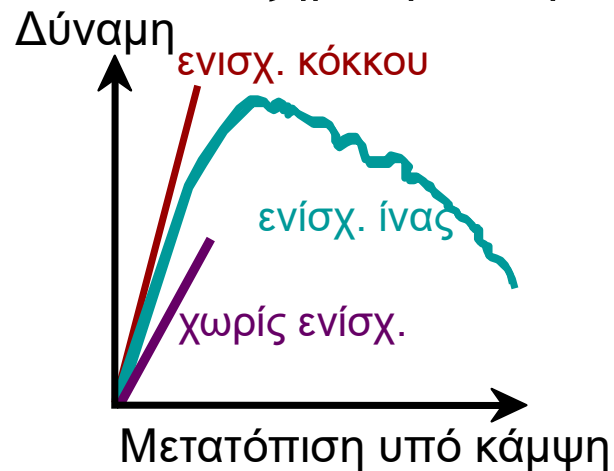
- **Διατάξεις (πάνελ) τύπου σάντουιτς**

- πυρήνας κυψελωτής δομής μεταξύ δύο εξωτερικών φύλλων
 - πλεονεκτήματα: χαμηλή πυκνότητα, μεγάλη αντίσταση σε κάμψη

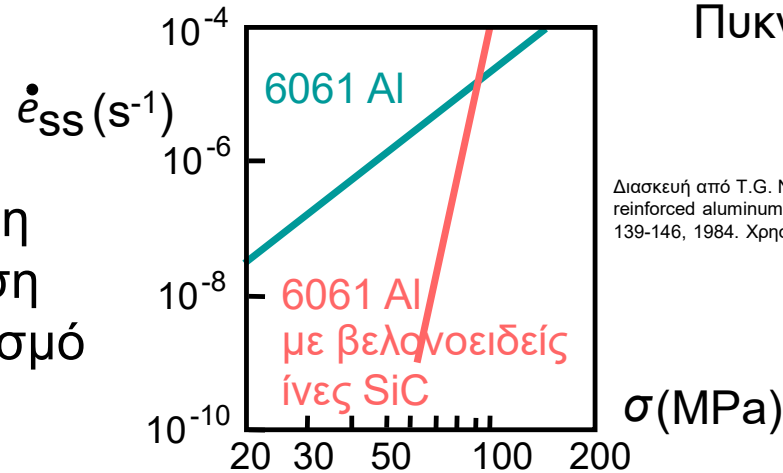


Πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών

- CMCs: Αυξημένη δυσθραυστότητα
- PMCs: Αυξημένο E/ρ



- MMCs: Αυξημένη αντίσταση σε ερπυσμό



Διασκευή από T.G. Nieh, "Creep rupture of a silicon-carbide reinforced aluminum composite", *Metall. Trans. A* Vol. 15(1), pp. 139-146, 1984. Χρησιμοποιείται με άδεια.



ΣΥΝΟΨΗ



- Οι τύποι των σύνθετων υλικών κατηγοριοποιούνται βάσει:
 - του υλικού μήτρας (**CMC**, **MMC**, **PMC**)
 - της ενίσχυσης (κόκκοι, ίνες, δομικά υλικά)
- Πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τις ιδιότητες των σύνθετων:
 - **MMC**: βελτίωση των E , σ^* , απόκριση σε ερπυσμό
 - **CMC**: βελτίωση του K_{Ic}
 - **PMC**: βελτίωση των E/ρ , σ_y , TS/ρ
- **Σύνθετα με ενίσχυση κόκκου**:
 - Τύποι: μεγάλων κόκκων, ενίσχυσης με διασπορά
 - Ιδιότητες: ισότροπες
- **Σύνθετα με ενίσχυση ίνας**:
 - Τύποι: συνεχείς ίνες (ευθυγραμμισμένες)
ασυνεχείς ίνες (ευθυγραμμισμένες ή τυχαίου προσανατολισμού)
 - Ιδιότητες: είτε ισότροπες είτε ανισότροπες
- **Δομικά σύνθετα υλικά**:
 - Πολύστρωτα και διατάξεις (πάνελ) τύπου σάντουιτς

