



Εισαγωγή στα Σύνθετα Υλικά

Γ. Παπανικολάου

**Introduction to
Composite Materials**

George Papanicolaou

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Το Μάθημα γίνεται κάθε **Τρίτη** και ώρα **14:00-17:00**

ΔΙΔΑΚΤΕΑ ΥΛΗ

Κεφάλαιο	Τίτλος	Διαφάνειες
1	Εισαγωγή στα Σύνθετα Υλικά και τα Πολυμερή	107
2	Ενισχυτικές Ίνες	91
3	Διεπιφανειακά Φαινόμενα	70
4	Θερμικές Ιδιότητες και Τεχνικές	100
5	Δυναμική Συμπεριφορά	72
6	Εισαγωγή στην Γραμμική Ελαστικότητα	48
7	Τανυστές	47
8	Ο Τανυστής των Τάσεων	53
9	Ο Τανυστής των Παραμορφώσεων	34
10	Μικρομηχανική της μίας στρώσης με παράλληλες ίνες	55

Join ZoomMeeting:

<https://upatrasgr.zoom.us/j/93905569043?pwd=VGNackVOKysvSzNrVWdJTUIZQ1VzZz09>

Χρονοδιάγραμμα Μαθημάτων

Αρ. Μαθ.	Ημ/νια	ΥΛΗ
1	Τρίτη. 1/3	Κεφάλαιο 1 Από 0 έως 59
2	Τρίτη. 8/3	Κεφάλαιο 1 Από 59 έως 98
3	Τρίτη. 15/3	Τέλος Κεφ.1 + Κεφάλαιο 2 έως 52
4	Τρίτη. 22/3	Κεφάλαιο 3 διαφ.62
5	Τρίτη. 29/3	Κεφάλαιο 4 διαφ.56
6	Τρίτη. 5/4	Κεφάλαιο 5 μέχρι τέλος
7	Τρίτη. 12/4	Κεφάλαιο 6 μέχρι διαφ.40
8	Τρίτη. 3/5	Κεφάλαιο 7 διαφ.36
9	Τρίτη. 10/5	Τάσεις διαφ.29
10	Τρίτη. 17/5	Τάσεις μέχρι και Παραμορφώσεις τέλος
11	Τρίτη. 24/5	Μικρομηχανική μίας Στρώσης, διαφ.29
12	Τρίτη. 31/5	Μικρομηχανική μίας Στρώσης

Τι είναι ένα σύνθετο υλικό ?

- **Τί είναι ένα Σύνθετο Υλικό?**

Δυστυχώς δεν υπάρχει ένας ευρέως αποδεκτός ορισμός για το τι ακριβώς είναι ένα σύνθετο υλικό. Ένας από τους ορισμούς είναι:

*“ Σύνθετο Υλικό (**composite material**) είναι ένα σύστημα υλικών που προκύπτει από την μίξη ή τον συνδυασμό δύο ή περισσότερων νάνο- , μικρο-, ή μάκρο - συνιστωσών (υλικών) τα οποία διαφέρουν στην δομή και την χημική σύσταση και είναι αδιάλυτα το ένα στο άλλο”.*

Ένας δεύτερος ορισμός είναι:

“Ένα Σύνθετο Υλικό παράγεται από τον συνδυασμό δύο ή περισσότερων υλικών με σκοπό να προκύψει ένα υλικό με ιδιότητες διαφορετικές εκείνων των αρχικών υλικών”.

Ενσωματώνοντας ίνες (**fibers**) ή κόκκους (**particles**) ενός υλικού σε ένα άλλο υλικό που ονομάζεται μήτρα (**matrix**), ο σχεδιαστής του συνθέτου (**composite**), μπορεί να επιτύχει ιδιότητες που κανένα από τα αρχικά υλικά δεν έχει.

ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

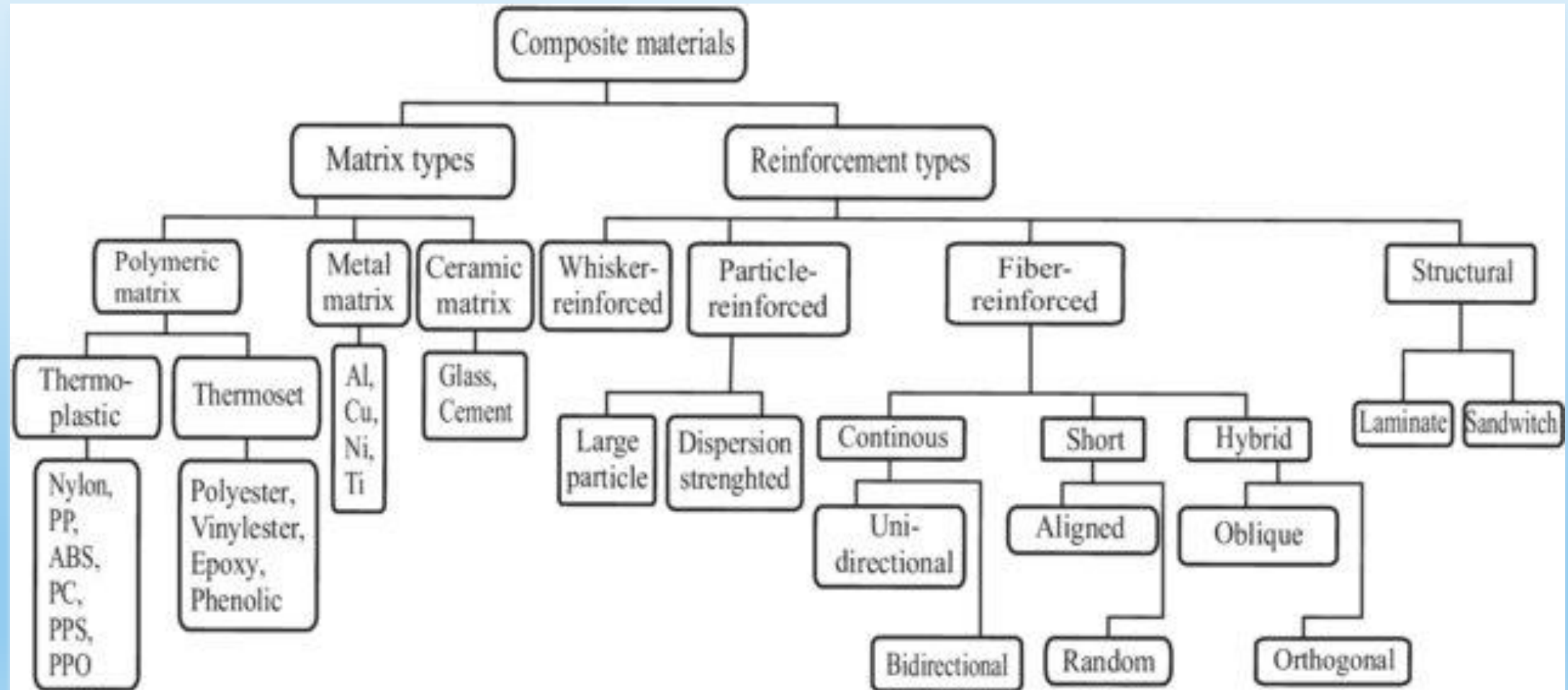
“Ονομάζουμε **σύνθετο υλικό** (*composite material*), ένα υλικό που προκύπτει από την φυσική ή μηχανική ανάμιξη δύο ή περισσότερων υλικών με σκοπό την ανάπτυξη ενός νέου υλικού το οποίο να έχει ενδιάμεσες ιδιότητες από εκείνες των συνιστωσών φάσεων”.

Έτσι, σε ένα σύνθετο υλικό, διακρίνουμε την **συνεχή φάση** (*continuous phase*) ή **μήτρα** (*matrix*) και την/τις φάση/φάσεις **ενίσχυσης** (*reinforcement*).

Π.χ. Σε ένα GFRP (**G**lass **F**iber **R**einforced **P**lastic), η μήτρα είναι το πλαστικό και η ενισχυτική φάση είναι οι ίνες γυαλιού.

Σε ένα CFRP (**C**arbon **F**iber **R**einforced **P**lastic), η μήτρα είναι το πλαστικό και η ενισχυτική φάση είναι οι ίνες άνθρακα.

Τύποι Μήτρας και Ενισχυτικών



Ειδικές Κατηγορίες Συνθέτων Υλικών

In addition to the above categories, there are the following categories:

Laminates: These usually consist of several layers in each of which long fibers are arranged in parallel in a different direction per layer.

Sandwich Composites: These usually consist of two metal surfaces (skins) and between them is a third material called the core (Core).

Hybrid Composites: These are composites that are reinforced by two or more types of inclusions that differ in either nature, or geometry, or both.

Composite materials reinforced with fiber fabrics (**Woven**)

Natural composites e.g., the wood, the bones, the tissues.

Green Composites, where the reinforcement and the matrix are made of natural raw materials.

Matrix: Function

Matrix

- Made from Metal, polymer or ceramic
- Continuous phase
- Some ductility is desirable
- Functions
 - Binds the reinforcements (fibers/particulates) together
 - Mechanically supporting the reinforcements
 - Load transfer to the reinforcements
 - Protect the reinforcements from surface damage due to abrasion or chemical attacks
 - High bonding strength between fiber and matrix is important



however the distribution of loads depends on the interfacial bondings

ΤΥΠΟΙ ΕΓΚΛΕΙΣΜΑΤΩΝ



Particulate



Random chopped fiber



Mixed fiber particulate (Hybrid)



Flakes



Oriented short fibers



Filament wound unidirectional



Filament wound cylindrical



Plain

Twill Woven fiber



Laminated sheet



Random hybrid



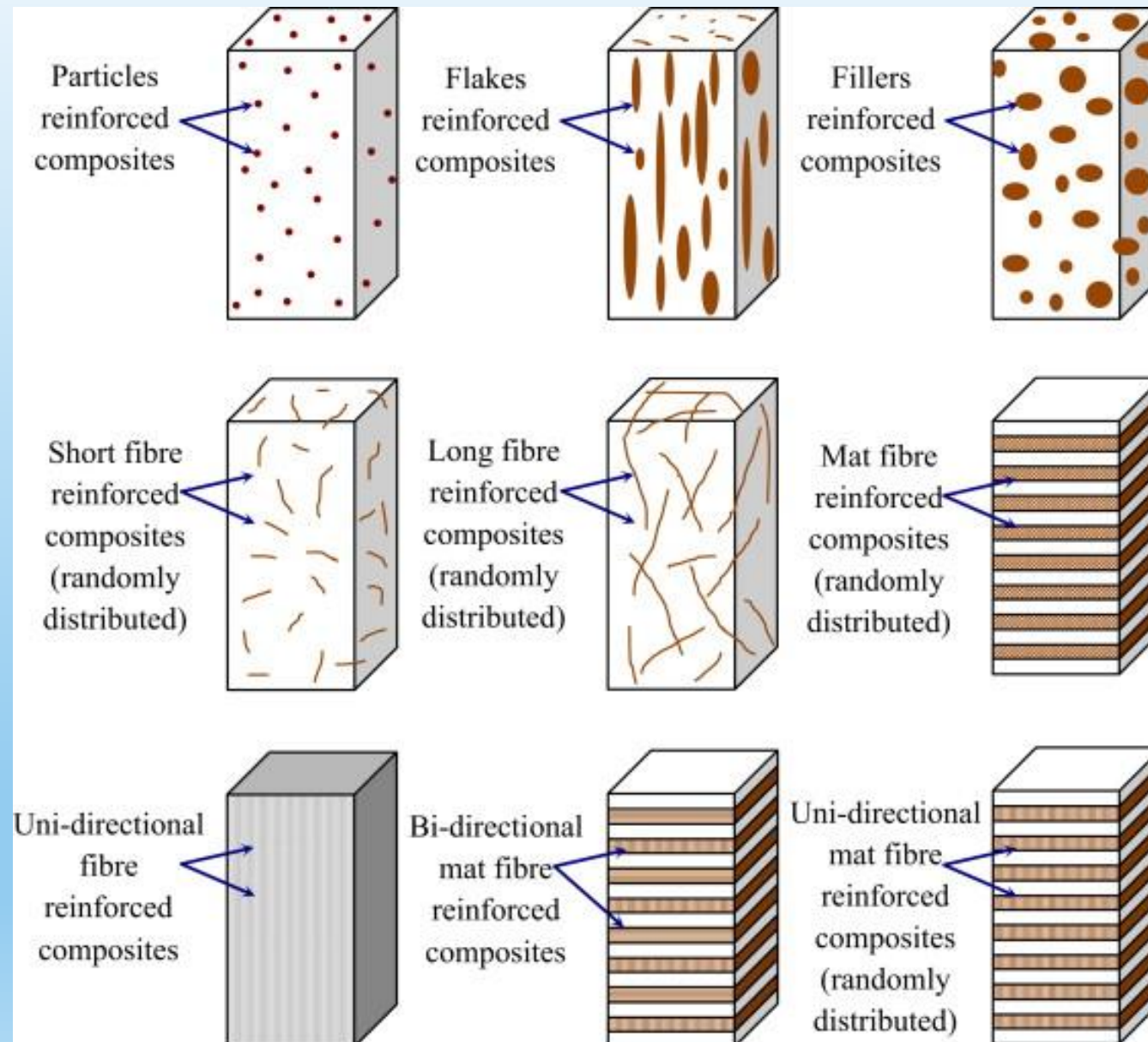
Woven hybrid



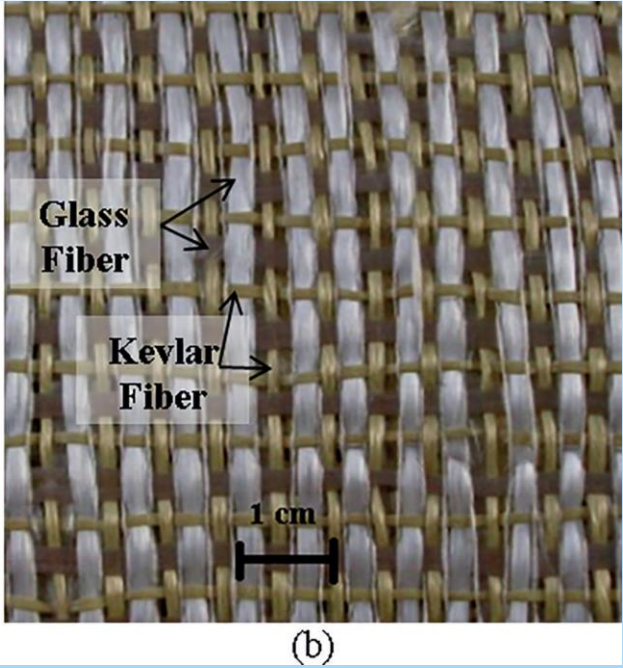
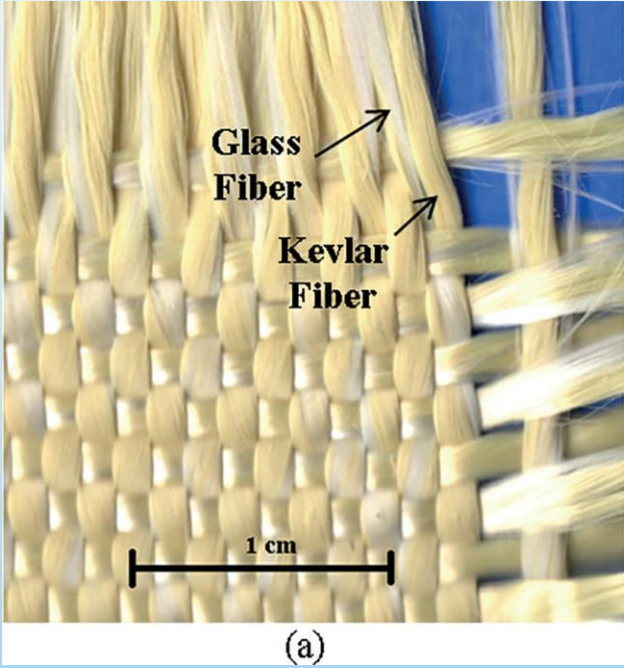
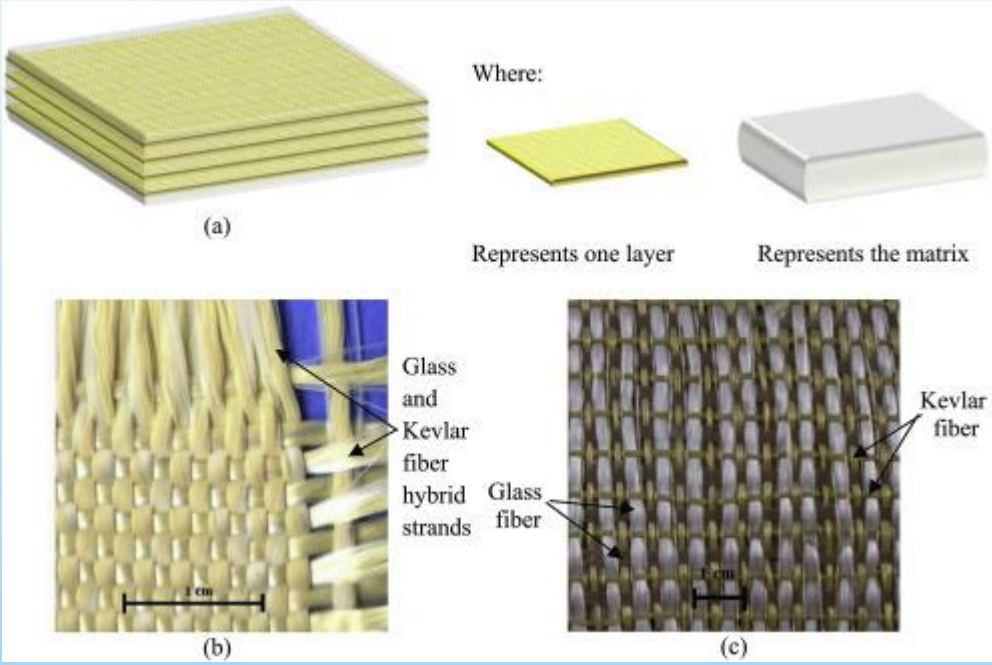
Interpenetrating network

Examples of different composite geometrical arrangements

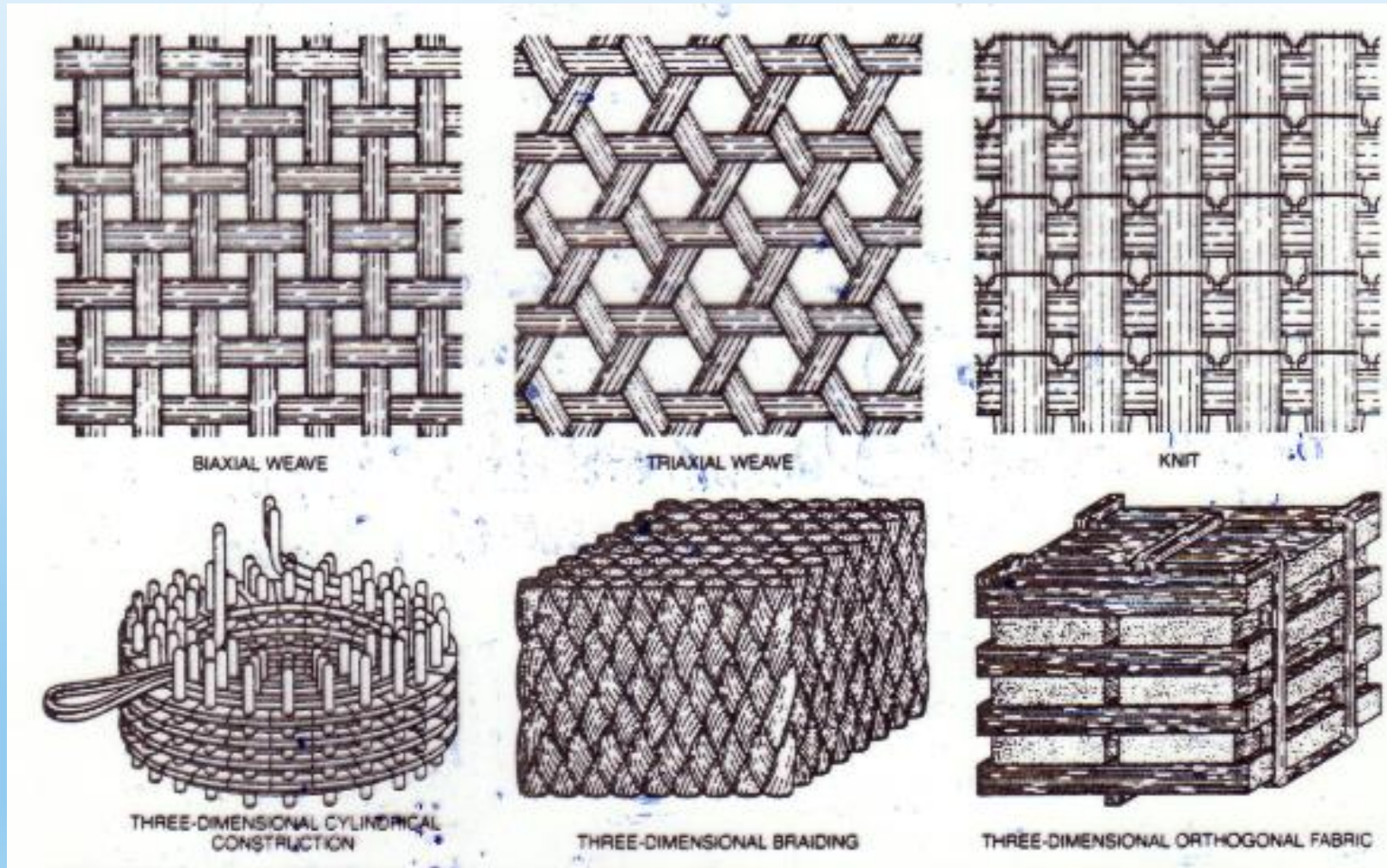
Κοκκώδη - Πολύστρωτα - Κοντόινα



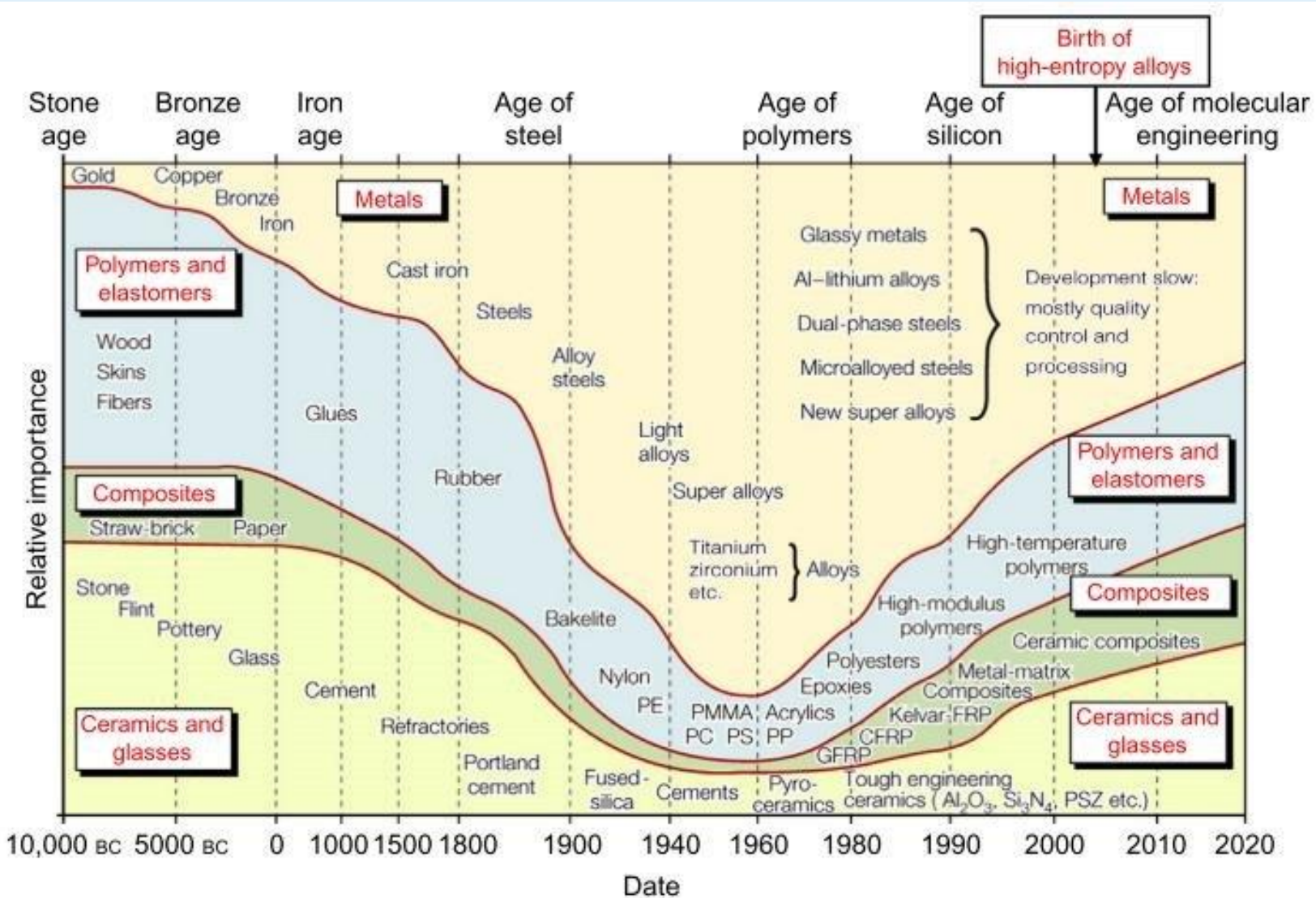
Πλεκτά (Woven)



Τύποι Πλάξης (Types of Knitting)



Ιστορική ανάπτυξη και Χρήση των Υλικών



Ευρεία Ταξινόμηση των Συνθέτων Υλικών

1. Φυσικά Σύνθετα

2. Μικροσύνθετα

3. Μακροσύνθετα

4. Νανοσύνθετα

Classification of Composites (I)

1) Natural Composite Materials:

Wood; bamboo; bones; muscles and other tissues

2) Microcomposites

Metallic alloys, Polymer blends, Fibre reinforced composites (PMCs, MMCs, CMCs); Particulate reinforced composites

3) Macrocomposites

Coated sheets-galvanized steel

Laminate composites

Sandwiches-honeycomb and foam structure

4) Nanocomposites

Polymer composites reinforced with clay minerals, BN, fullerenes, Carbon nanotubes, Graphene.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΜΙΚΡΟΣΥΝΘΕΤΩΝ

- 1. Συνεχείς (μακρές) ίνες μέσα σε μία συνεχή μήτρα** (*continuous or long fibers in a matrix*): παράλληλες ίνες (*aligned fibers*) ή τυχαίου προσανατολισμού (*random*).
- 2. Ίνες μικρού μήκους (short fibers) μέσα σε μία συνεχή μήτρα:** Παράλληλες ίνες (*aligned*) ή τυχαίου προσανατολισμού (*random*).
- 3. Κοκκώδη σύνθετα υλικά** (*Particulate composites*): (Τα σωματίδια μπορεί να είναι σφαιρικά, επίπεδα, ελλειψοειδή, ακανόνιστου σχήματος, κενά ή συμπαγή) (*spheres, plates, ellipsoids, irregular, hollow or solid*).
- 4. Διασπορά σωματιδίων σε μία μήτρα** (*Dispersion strengthened*), είναι όπως και στη τρίτη περίπτωση, με τη διαφορά ότι τα σωματίδια έχουν διαστάσεις $<10^{-8}\text{m}$.
- 5. Πολύστρωτα και στρωματικές δομές** (*Laminates and Lamellar structures*).
- 6. Αλληλοδιαχεόμενα δίκτυα** συνθέτων πολυμερούς-πολυμερούς (*Polymer-Polymer Interpenetrating Networks IPN*).
- 7. Υβριδικά σύνθετα υλικά** με ενισχύσει δύο ή περισσότερων υλικών διαφορετικής φύσης ή και διαφορετικής γεωμετρίας (*hybrid composites*).

ΜΙΚΡΟ-ΣΥΝΘΕΤΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟ-ΣΥΝΘΕΤΑ

Γενικά, ένα **μικροσύνθετο** υλικό (*micro-composite*) αποτελείται συνήθως από δύο ή περισσότερα υλικά που έχουν δύο ή περισσότερες φάσεις με ετερογενείς χαρακτήρες, όπου τουλάχιστον η μία είναι σε μικροσκοπική κλίμακα.

Επιπλέον, ένα σύνθετο μπορεί να ταξινομηθεί ως **νανοσύνθετο** (*nano-composite*) όταν τουλάχιστον μία από τις διαστάσεις ενίσχυσης βρίσκεται στην περιοχή νανομέτρων (από 10 έως 200 nm).

Τόσο τα μικρο-σύνθετα όσο και τα νανο-σύνθετα έχουν πολλές υποσχόμενες μηχανικές, θερμικές, ηλεκτρικές, οπτικές και άλλες ενδιαφέρουσες ιδιότητες που τις καθιστούν ένα πεδίο ενεργού ερευνητικού ενδιαφέροντος τόσο στον ακαδημαϊκό όσο και στον βιομηχανικό χώρο.

Ένα μικρο-σύνθετο ενισχυμένο με ίνες περιέχει ίνες υψηλής αντοχής και μέτρου, με διαστάσεις της τάξης των μικρών, ενσωματωμένες σε μια μήτρα με διακριτές μεταξύ τους **διεπιφάνειες** (*interfaces/interphases*).

Τυπικές Ιδιότητες των UD-FRP

Typical properties of unidirectional-fiber-reinforced epoxy resins

Property	Fiber type		
	E-Glass	Kevlar 49	Graphite (Thornel 300)
Fiber volume fraction	46	60–65	63
Specific gravity	1.80	1.38	1.61
Tensile strength, 0° (MPa)	1104	1310	1725
Tensile modulus, 0° (GPa)	39	83	159
Tensile strength, 90° (MPa)	36	39	42
Tensile modulus, 90° (GPa)	10	5.6	10.9
Compression strength, 0° (MPa)	600	286	1366
Compression modulus, 0° (GPa)	32	73	138
Compression strength, 90° (MPa)	138	138	230
Compression modulus, 90° (GPa)	8	5.6	11
In-plane shear strength (MPa)	—	60	95
In-plane shear modulus (GPa)	—	2.1	6.4
Longitudinal Poisson ratio (ν_{LT})	0.25	0.34	0.38
Interlaminar shear strength (MPa)	31	69	113
Longitudinal coefficient of thermal expansion ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	5.4	−2.3 to −4.0 ^a	0.045
Transverse coefficient of thermal expansion ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	36	35 ^b	20.2

^a −79°C to +100°C.

^b −195°C to +120°C.

Ειδικές Ιδιότητες (Specific Properties)

Με τον όρο “**ειδική ιδιότητα**” (*specific property*) εννοούμε τον λόγο της τιμής της ιδιότητας προς την πυκνότητα του υλικού.

Έτσι, έχουμε τους όρους ειδικό μέτρο (*specific modulus*), ειδική αντοχή (*specific strength*), κτλ.

Ειδικό μέτρο = μέτρο ελαστικότητας / πυκνότητα = E/ρ

Ειδική αντοχή = αντοχή / πυκνότητα = σ_u/ρ

Η ειδική ιδιότητα εκφράζει την τιμή της ιδιότητας ανά μονάδα μάζας ή βάρους του υλικού.

Τα πολυμερικά σύνθετα υλικά έχουν πολύ υψηλότερες ειδικές ιδιότητες από τις αντίστοιχες ιδιότητες των παραδοσιακών μονολιθικών υλικών. Αυτός είναι και ο κυριότερος λόγος κατασκευής και χρήσης των συνθέτων υλικών.

Σύγκριση των Ειδικών Ιδιοτήτων των Παραδοσιακών και των Συνθέτων Υλικών

Material	Specific Gravity	Young's Modulus	Ultimate Strength	Specific Modulus	Specific Strength
Units		GPa	MPa	GPa-m ³ /kg	MPa-m ³ /kg
Graphite	1.8	230	2067	0.13	1.1
Unidirectional Graphite/Epoxy	1.6	181	1500	0.11	0.94
Cross-Ply Graphite/Epoxy	1.8	96	373	0.060	0.23
Quasi-Isotropic Gr/Epoxy	1.8	70	276	0.043	0.17
Steel	7.8	207	648	0.026	0.083
Aluminum	2.6	69	276	0.026	0.106

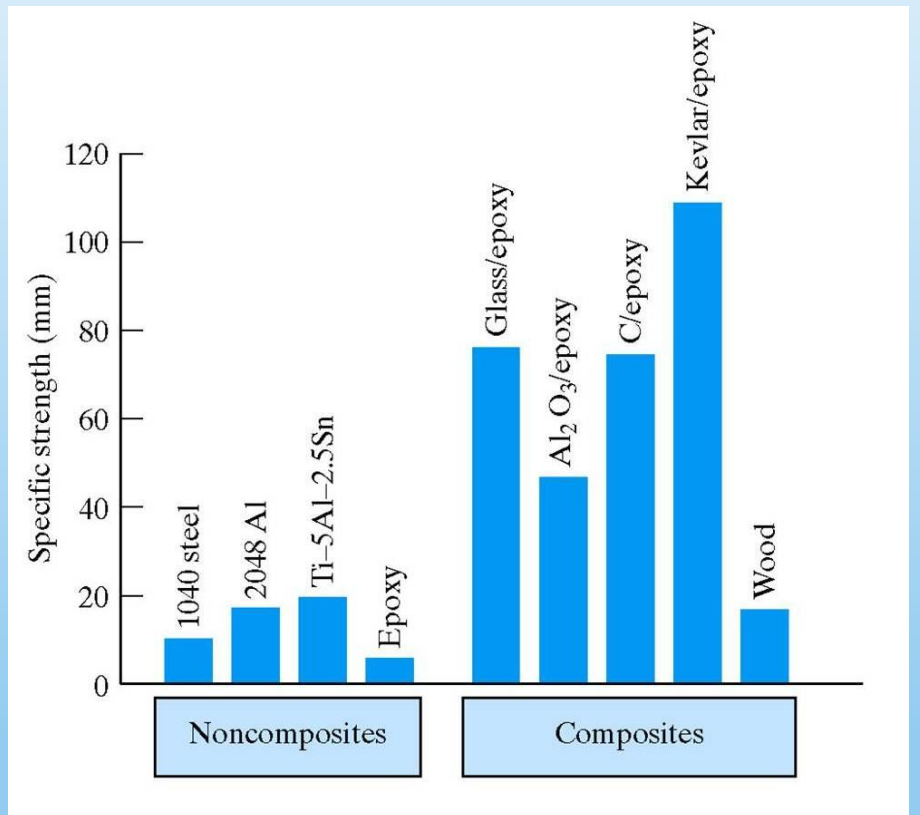


Table 1.4. Comparison of some typical values of the properties of engineering materials at 20 °C

Material	Density (Mg m ⁻³)	Young's modulus (GN m ⁻²)	Tensile strength (MN m ⁻²)	Elonga- tion to fracture (%)	Coef- ficient of thermal expan- sion (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	Specific Young's modulus, Y. modulus density (GN m ⁻²)	Specific tensile strength, T. strength density (MN m ⁻²)	Heat resist- ance (°C)
High strength Al-Zn-Mg alloy	2.80	72	503	11	24	25.7	180	350
Quenched and tempered low alloy steel	7.85	207	2050-600	12-28	11	26.4	261-76	800
Nimonic 90 (nickel-based alloy)	8.18	204	1200	26	16	24.9	147	1100
Nylon 6.6	1.14	2	70	60	90	1.8	61	150
Glass-filled nylon ($V_f = 0.25$)	1.47	14	207	2.2	25	9.5	141	170
Carbon fibre-epoxy resin unidirectional laminae ($V_f = 0.60$)								
(i) parallel to fibres	1.62	220	1400	0.8	-0.2	135	865	260
(ii) perpendicular to fibres	1.62	7	38	0.6	30			
Glass fibre-polyester resin unidirectional laminae ($V_f = 0.50$)								
(i) parallel to fibres	1.93	38	750	1.8	11	19.7	390	250
(ii) perpendicular to fibres	1.93	10	22	0.2				
Glass fibre-polyester resin planar random fibres ($V_f = 0.20$)	1.55	8.5	110	2	25	5.5	71	230

Σύνθετα Υλικά Τύπου Sandwich με πυρήνα HONEYCOMB

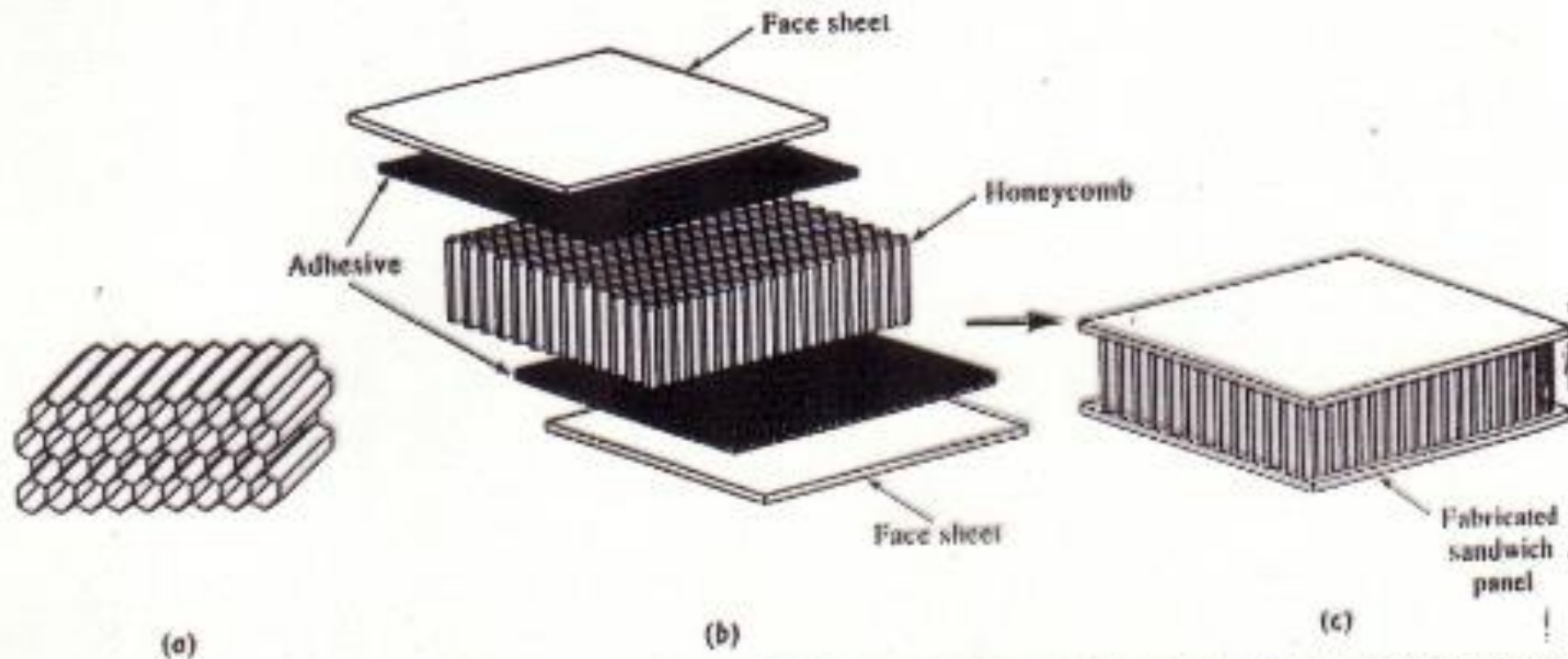
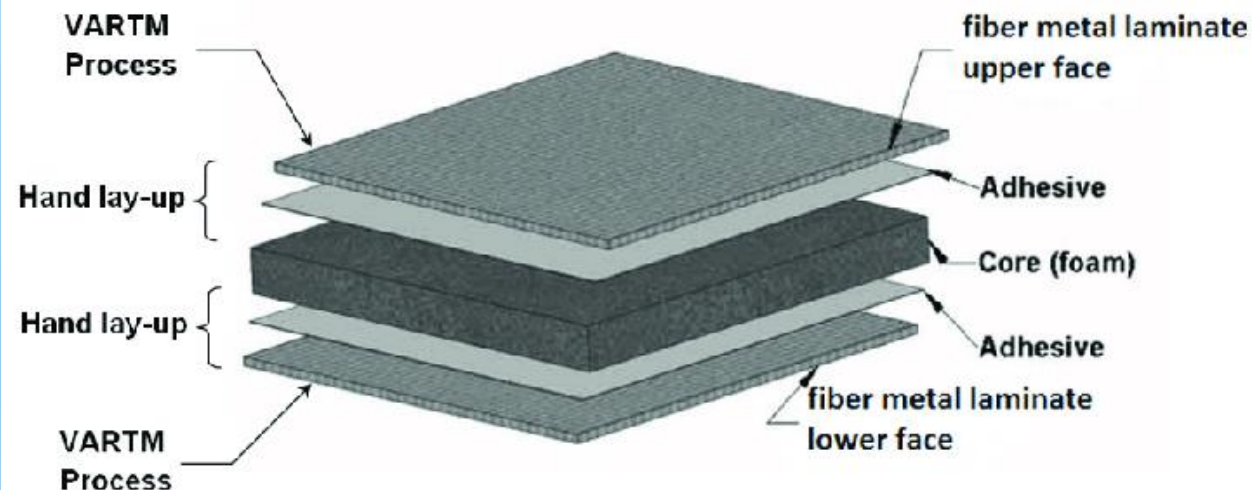
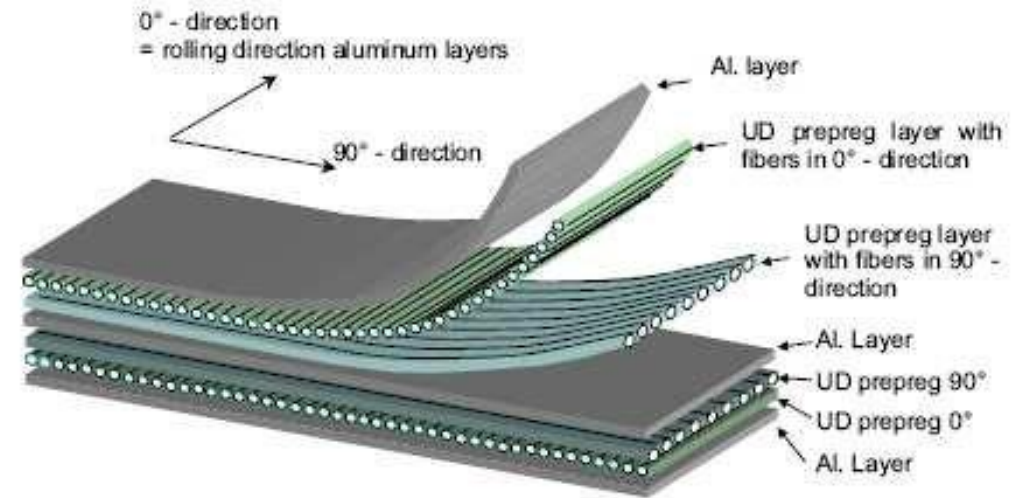
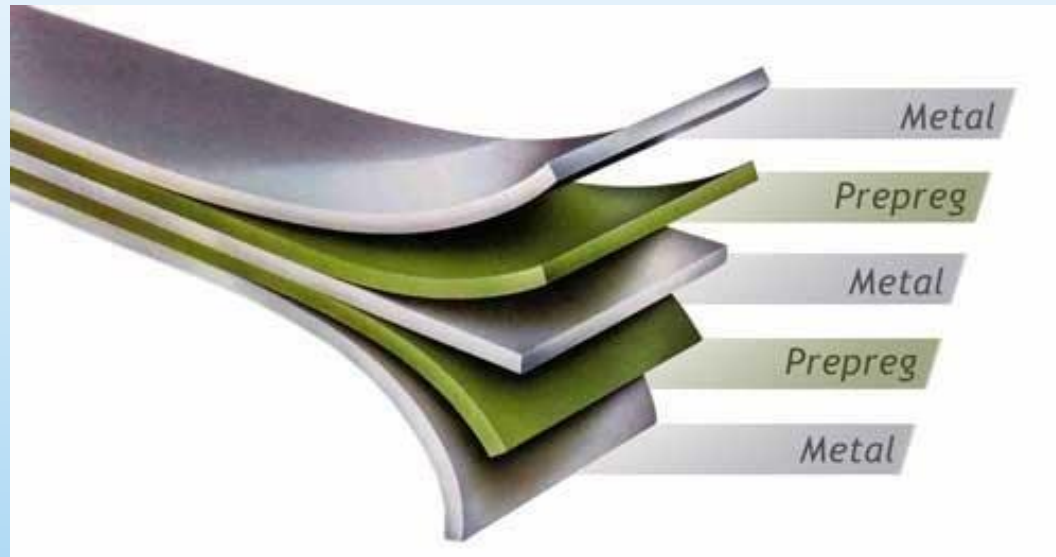
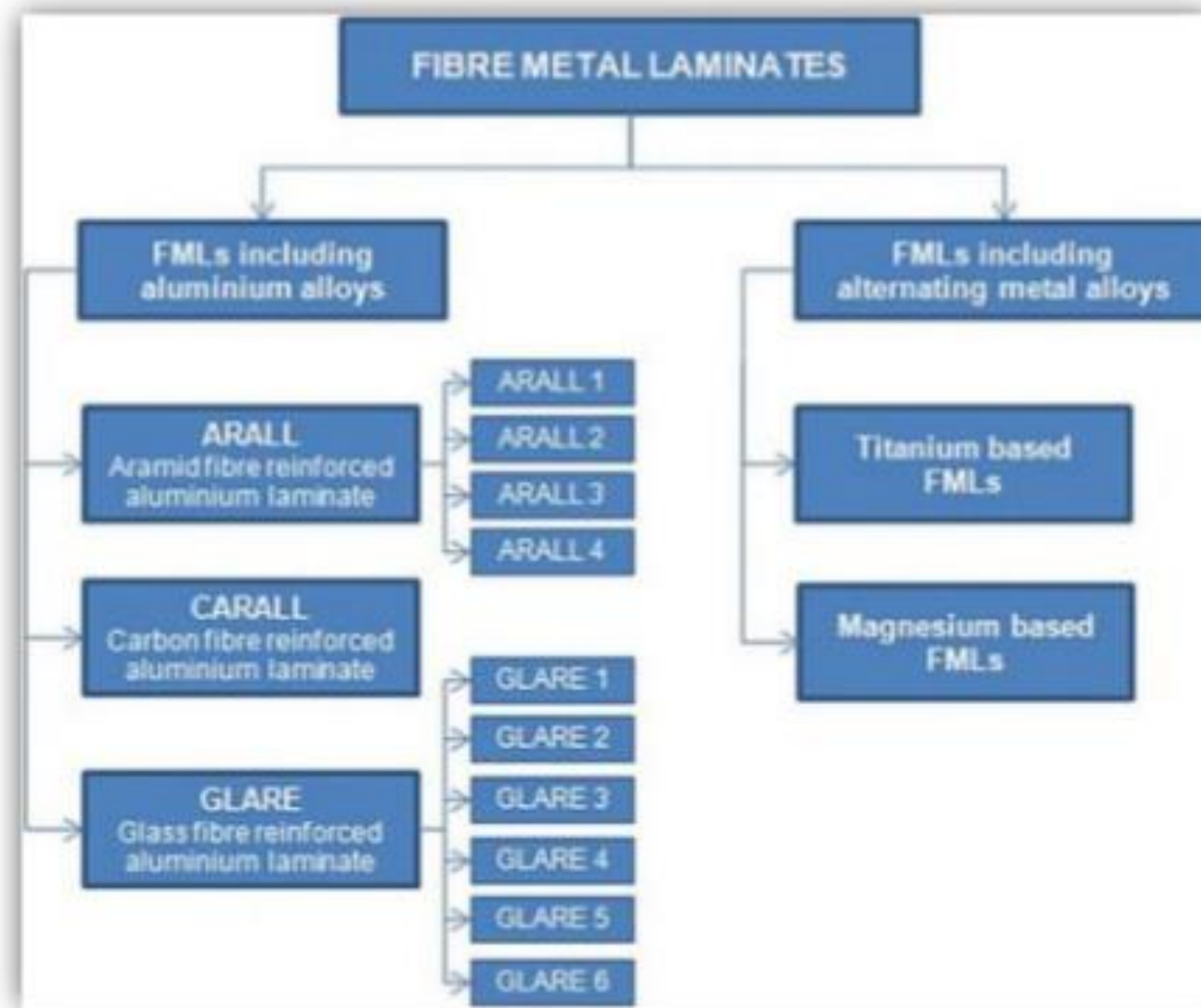


FIGURE 16-37 A hexagonal cell honeycomb core (a) can be joined to two face sheets by means of adhesive sheets (b), producing an exceptionally lightweight yet stiff, strong honeycomb sandwich structure (c).

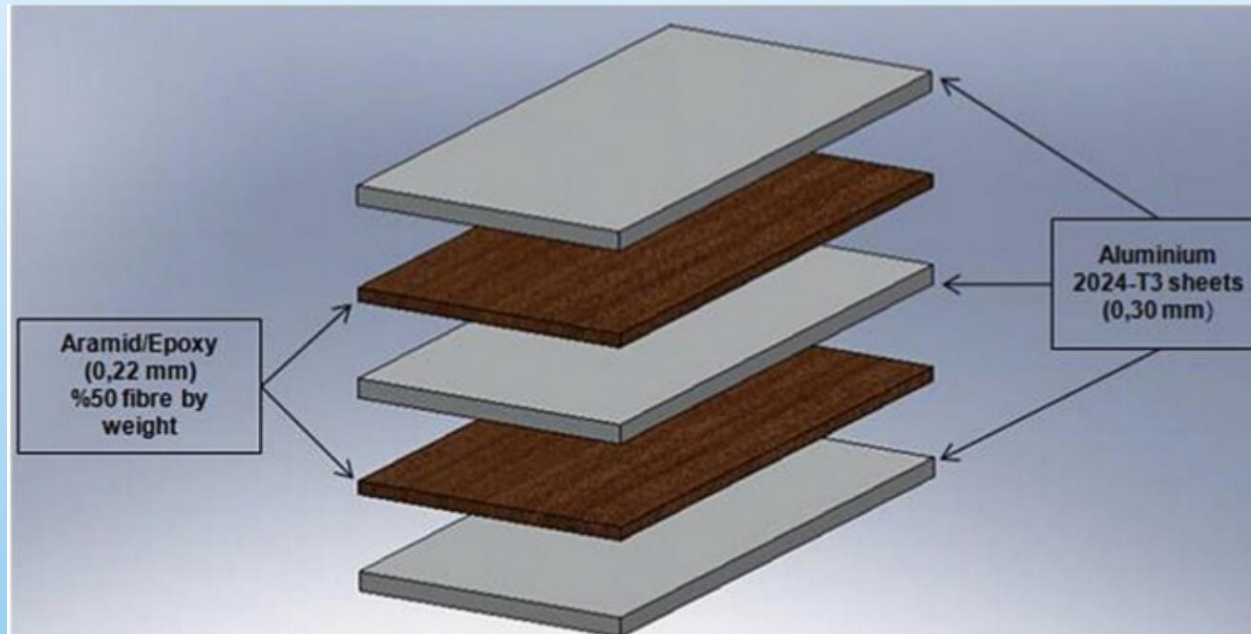
FIBER – METAL - LAMINATES



Classification of FMLs



ARAMID – ALUMINUM - LAMINATE (ARALL)



Material	Thickness (mm)	Length (mm)	Width (mm)	Volume Fraction
Aluminum 2024-T4	0.305	255	25.5	0.68
Kevlar/ Epoxy Composite	0.45	255	25.5	0.32

AL 2024-T4

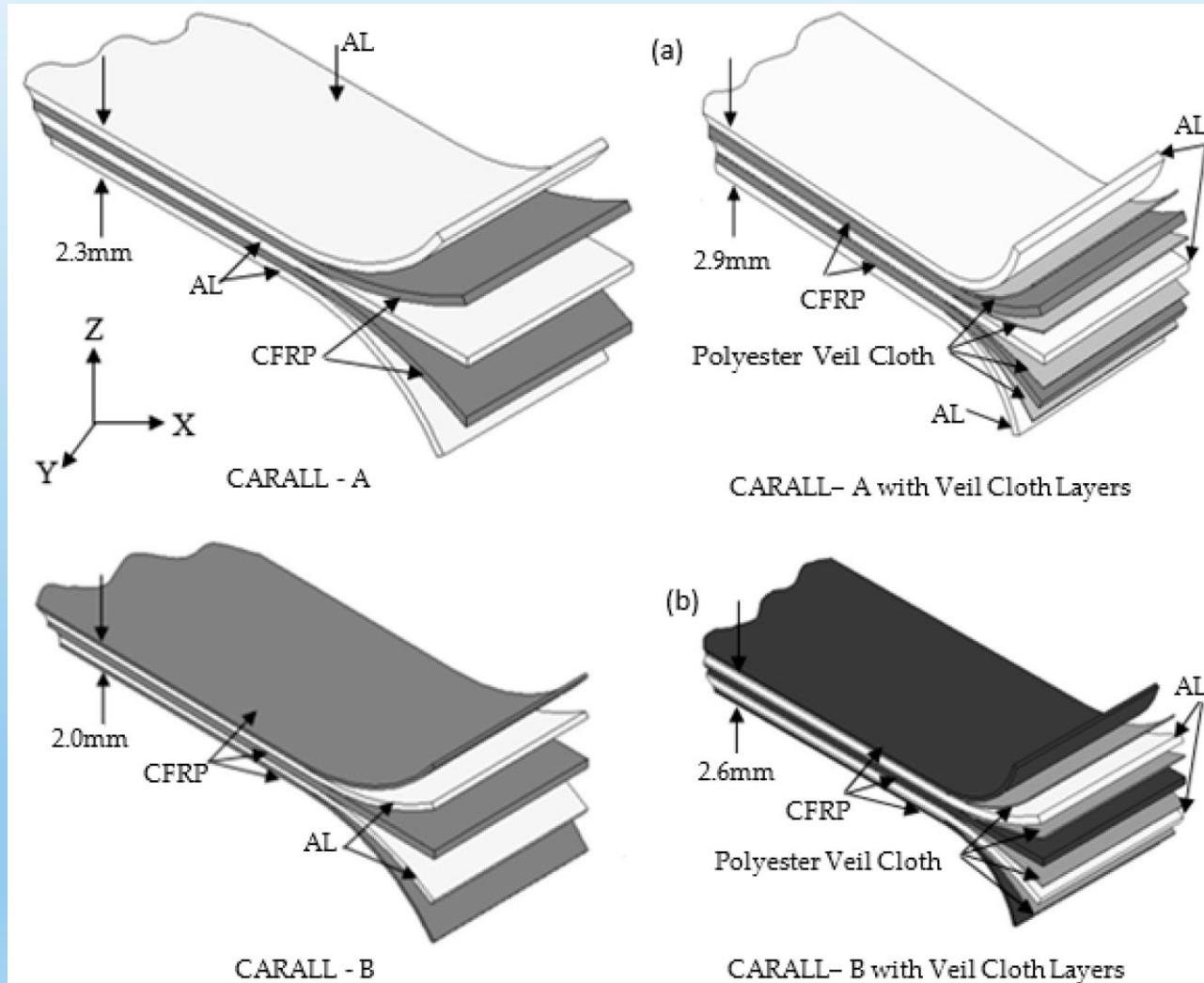
0 Kevlar/Epoxy
90 Kevlar/Epoxy
0 Kevlar/Epoxy

AL 2024-T4

0 Kevlar/Epoxy
90 Kevlar/Epoxy
0 Kevlar/Epoxy

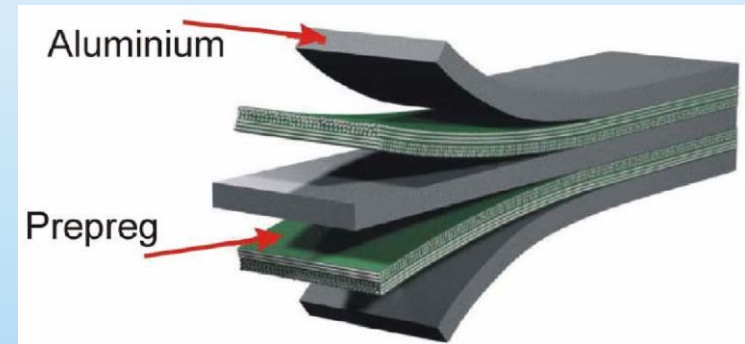
AL 2024-T4

CARBON – ALUMINUM – LAMINATE (CARALL)



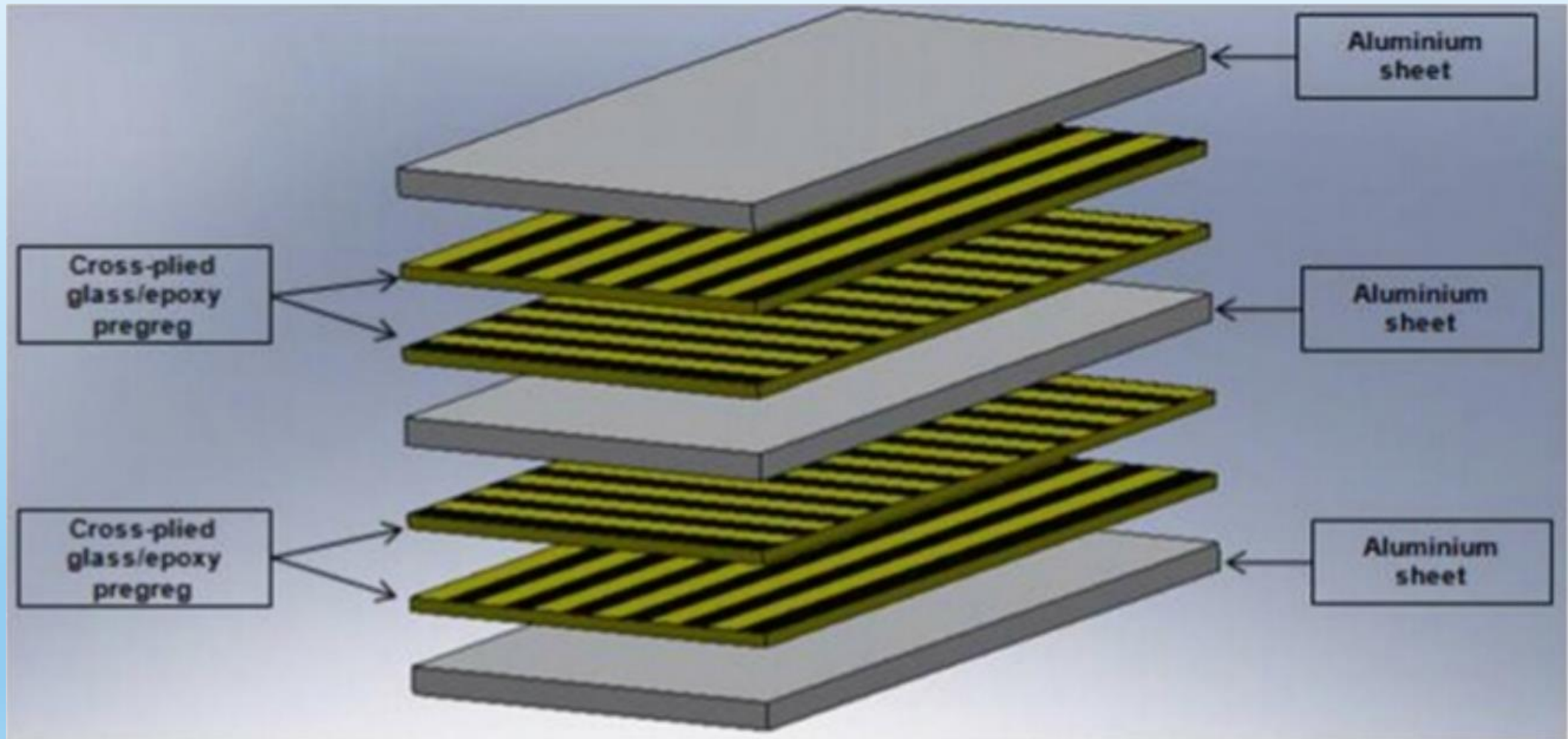
Glass Laminate Aluminium Reinforced Epoxy (GLARE)

Το **G**lass **L**aminate **A**luminium **R**einforced Epoxy (**GLARE**) είναι ένα πολυστρωματικό **F**iber-**M**etal **L**aminate (**FML**) που αποτελείται από πολλά πολύ λεπτά στρώματα μετάλλου (συνήθως αλουμίνιο) με στρώματα Prepregs υάλου S-2, συνδεδεμένα μεταξύ τους με κόλλα από εποξειδικό. Τα prepregs με ίνες μονής κατεύθυνσης μπορούν να ευθυγραμμιστούν σε διαφορετικές κατευθύνσεις για να ταιριάζουν στις προβλεπόμενες συνθήκες καταπόνησης.



- Διαθέτουν καλύτερο "**damage tolerance**" (ανοχή σε βλάβη), ειδικά σε κρούση και κόπωση. Δεδομένου ότι η ελαστική καταπόνηση είναι μεγαλύτερη από άλλα μεταλλικά υλικά, μπορεί να καταναλώσει περισσότερη ενέργεια κρούσης. Σπάει πιο εύκολα αλλά έχει μεγαλύτερη αντίσταση διείσδυσης.
- Καλύτερη αντοχή στη διάβρωση.
- Καλύτερη αντοχή στη φωτιά.
- Χαμηλότερο ειδικό βάρος.

Glass Laminate Aluminum Reinforced Epoxy (GLARE)



Τύποι και Ιδιότητες GLARE

Glare grade	Sub	Al sheet thickness (mm)	Prepreg orientation in each fiber layer	Main beneficial characteristics
Glare 1	-	0.3-0.4 (7475-T761)	0/0	Fatigue, strength, yield stress
Glare 2	Glare 2A	0.2-0.5 (2024-T3)	0/0	fatigue, strength
	Glare 2B	0.2-0.5 (2024-T3)	90/90	fatigue, strength
Glare 3	-	0.2-0.5 (2024-T3)	0/90	fatigue, impact
Glare 4	Glare 4A	0.2-0.5 (2024-T3)	0/90/0	Fatigue, strength, in 0° direction
	Glare 4B	0.2-0.5 (2024-T3)	90/0/90	Fatigue, strength, in 90° direction
Glare 5	-	0.2-0.5 (2024-T3)	0/90/90/0	Shear, off-axis properties
Glare 6	Glare 6A	0.2-0.5 (2024-T3)	+ 45/- 45	Shear, off-axis properties
	Glare 6B	0.2-0.5 (2024-T3)	- 45/+ 45	

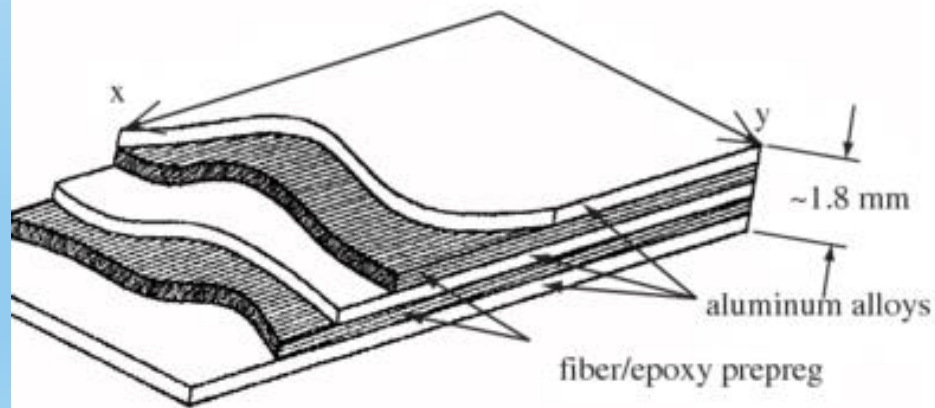


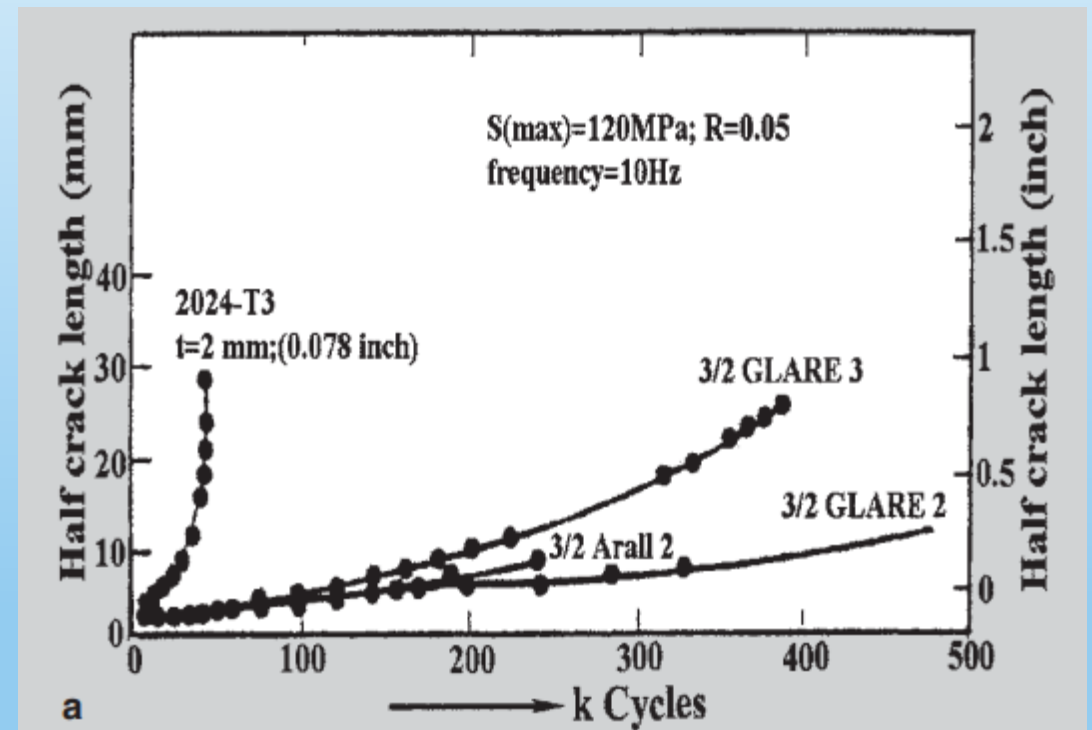
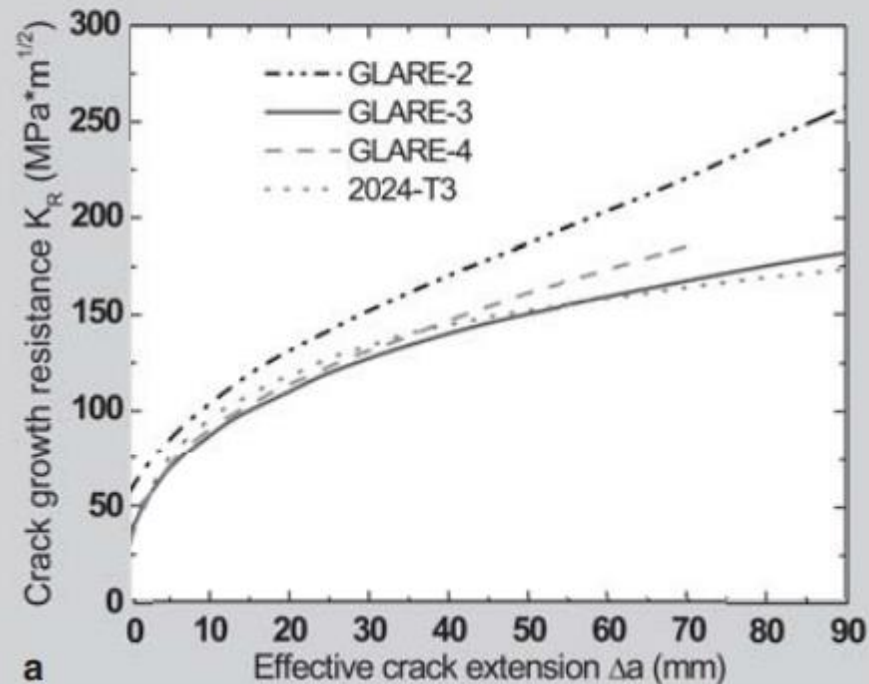
Table A. Commercially Available GLARE Grades¹

Grade	Al Layers		Fiber Layers		Typical Density (g/cm³)
	Alloy	Thickness per Layer(mm)	Orientation	Thickness per Layer(mm)	
GLARE 1	7475-T76	0.3–0.4	Unidirectional	0.25	2.52
GLARE 2	2024-T3	0.2–0.5	Unidirectional	0.25	2.52
GLARE 3	2024-T3	0.2–0.5	0°/90° Cross-ply(50%-50%)	0.25	2.52
GLARE 4	2024-T3	0.2–0.5	0°/90°/0° Cross-ply(67%-33%)	0.375	2.45
GLARE 5	2024-T3	0.2–0.5	0°/90°/90°/0° Cross-ply(50%-50%)	0.5	2.38
GLARE 6	2024-T3	0.2–0.5	+45°/-45° Cross-ply(50%-50%)	0.25	2.52

Note: The typical density here refers to laminates with 0.3 mm aluminum thickness and 2/1 lay-up.

Συμπεριφορά σε θραύση και Κόπωση του GLARE

Figure 2. The fracture behavior of GLARE laminates. (a) Fracture toughness at room temperature by R-curve method;^{26,27} (b) fracture process within GLARE 2 and 3 originating from a fatigue starter crack.²⁸



Συμπεριφορά σε Κρούση του GLARE

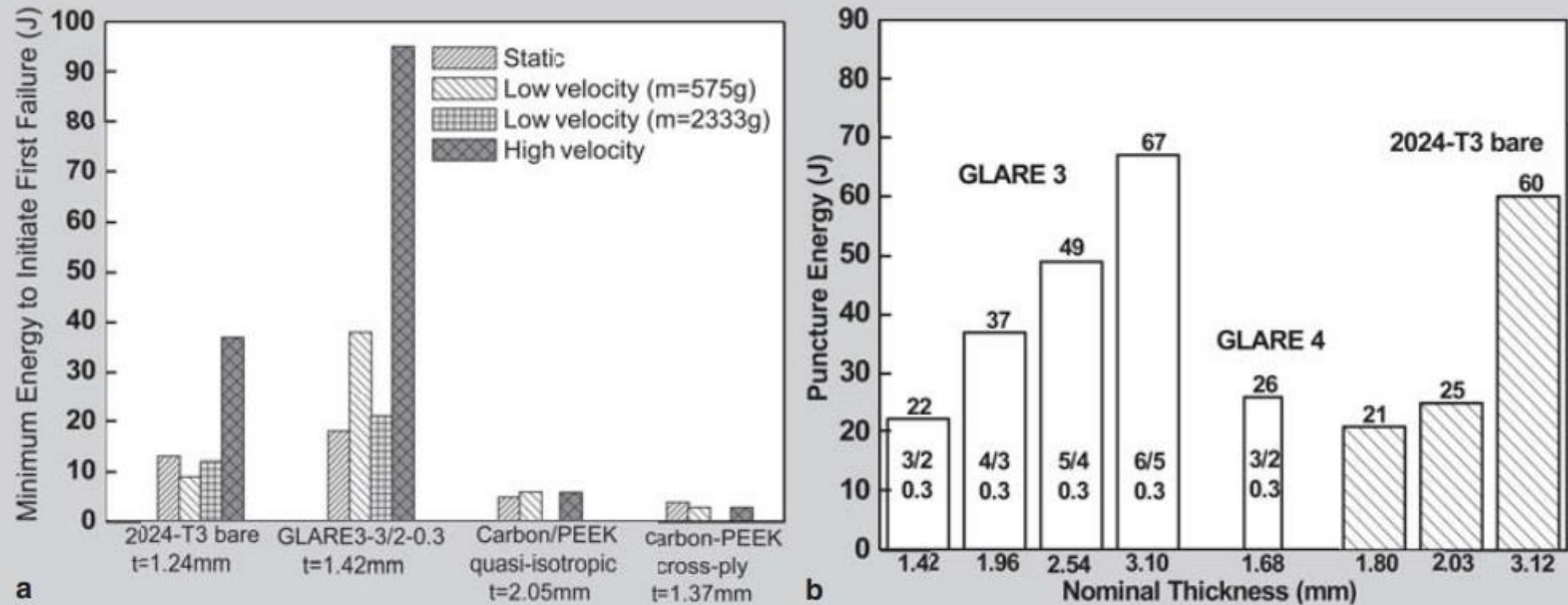


Figure 4. The impact behavior of GLARE. (a) A comparison of impact performance of GLARE 3 and other aerospace materials; (b) low-velocity impact performance of cross-ply GLARE laminates.^{3,58,60}

Examples of Natural Composites

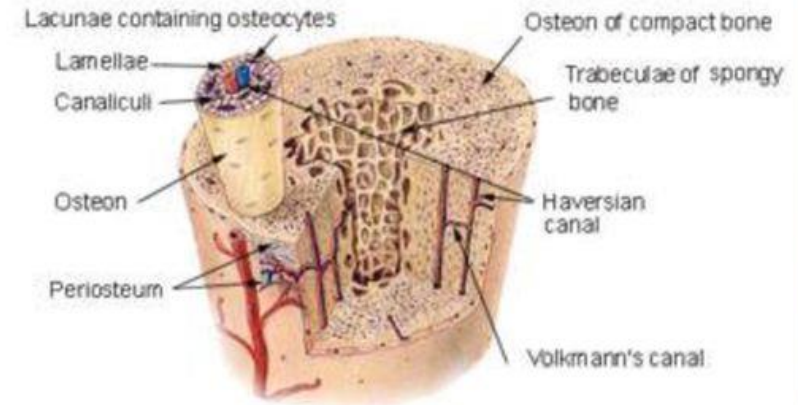
❖ Wood

- Cellulose Fibers
- Lignin Matrix

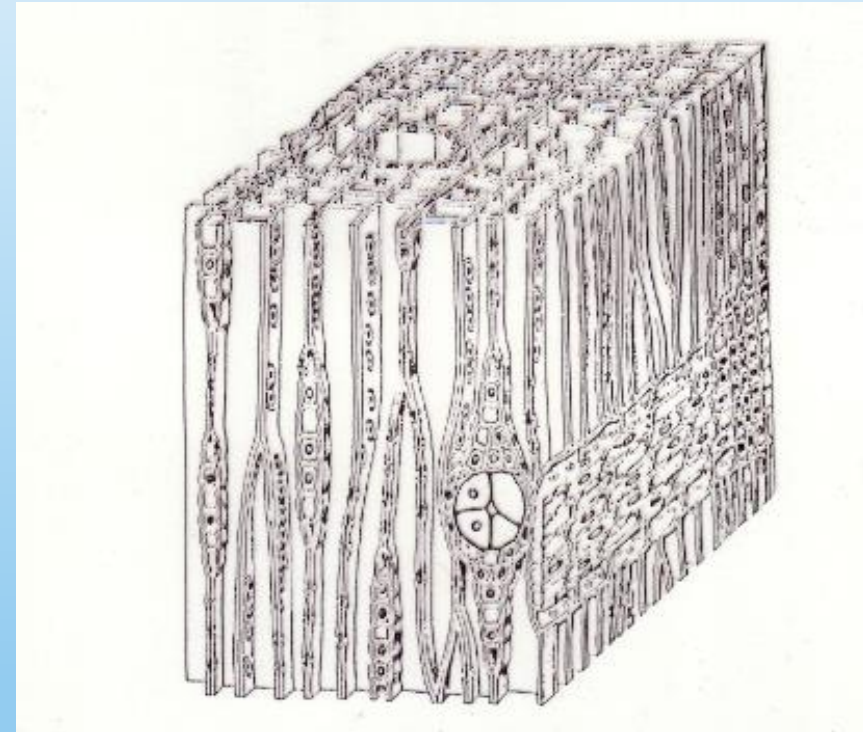
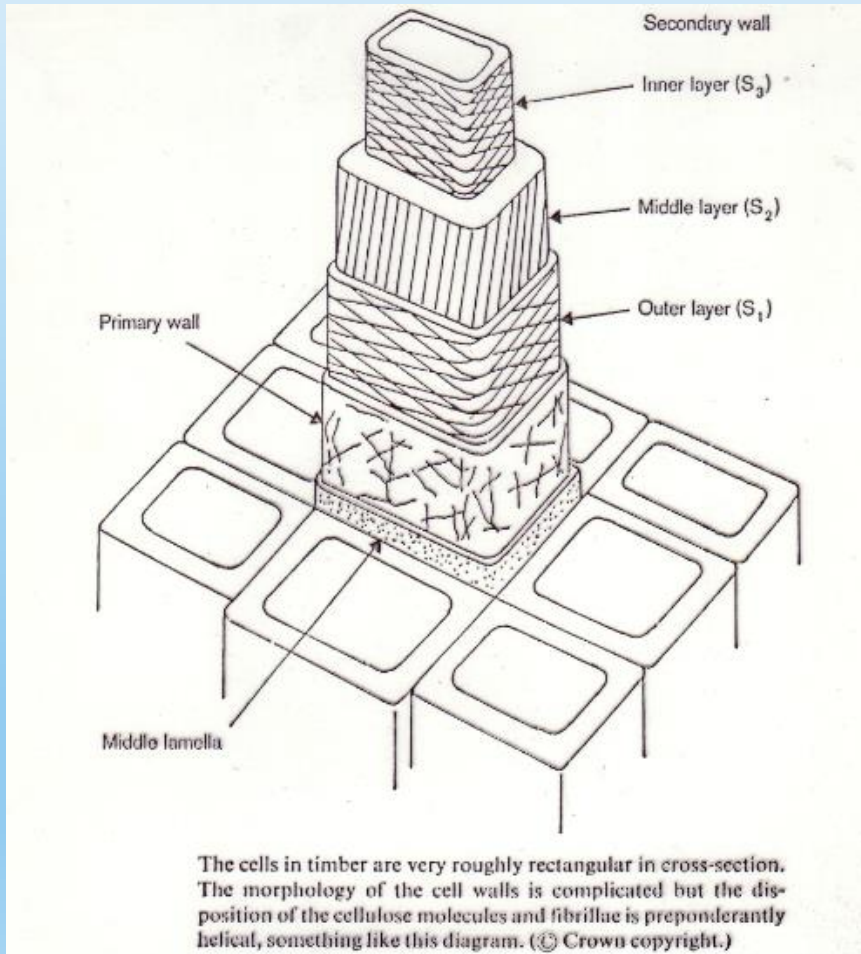
❖ Bones

- Collagen Fibers
- Mineral Matrix

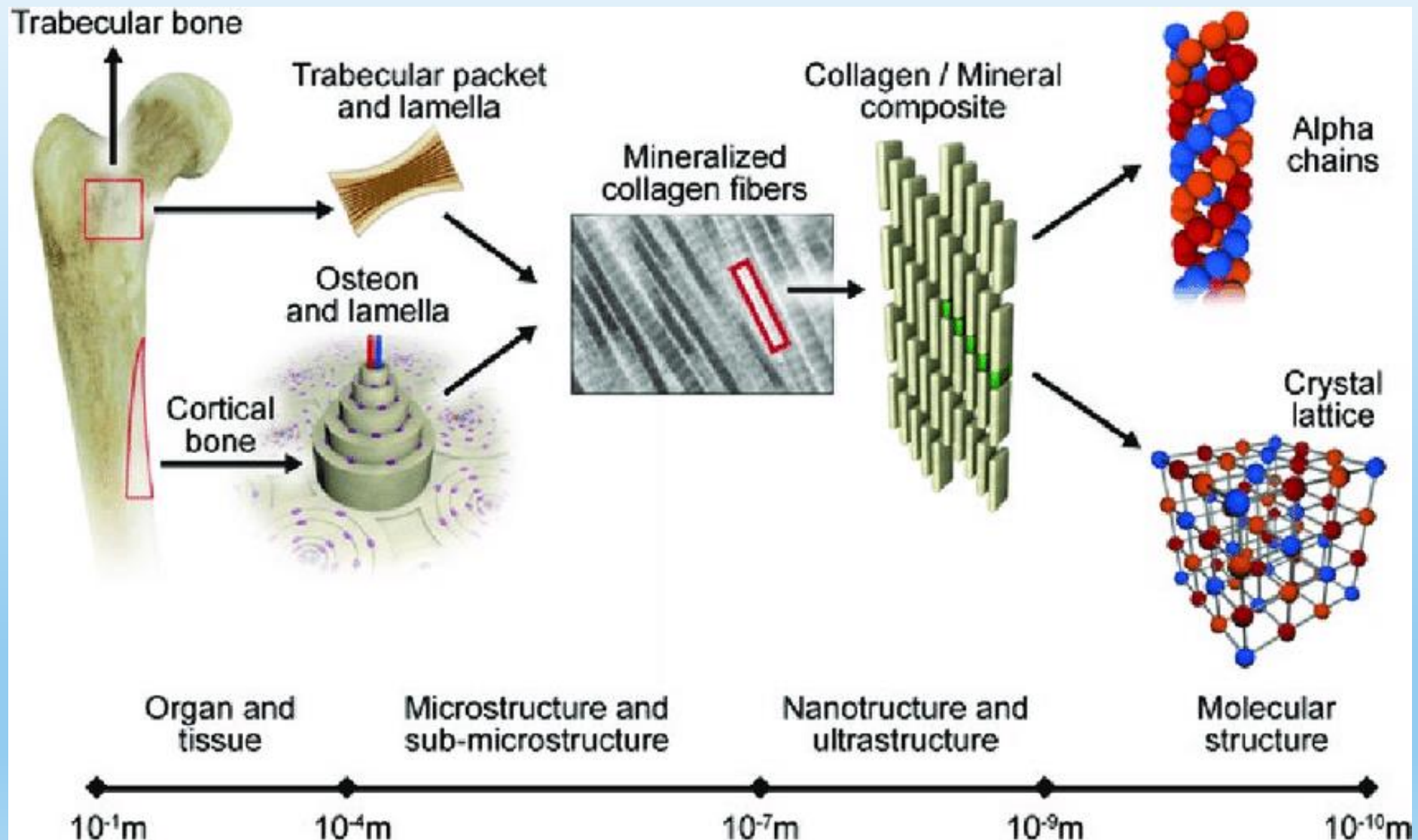
Compact Bone & Spongy (Cancellous Bone)



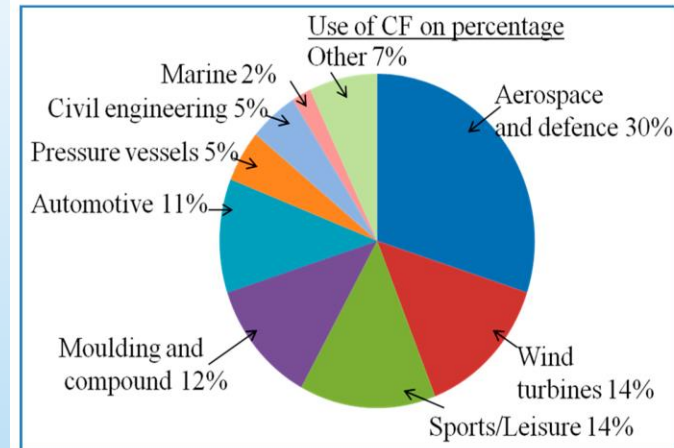
Φυσικά Σύνθετα - Ξύλο



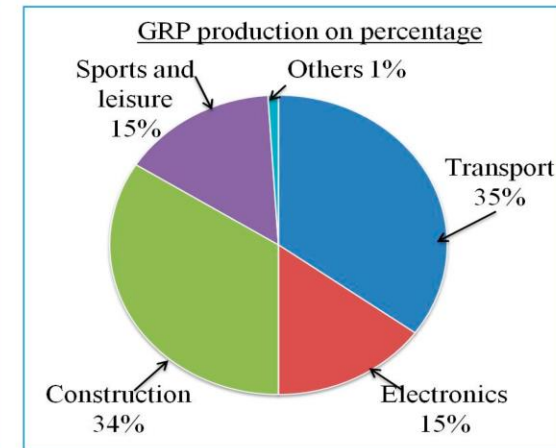
Η Ανισότροπη δομή του οστού



Εφαρμογές των FRPs



(a)



(b)

Aircraft composite content over time



Source: Hexcel Corp., Aerostrategy

(c)

Χρονική Εξέλιξη των Εφαρμογών των Συνθέτων Υλικών στην Αεροναυπηγική



Application of Composites on Flight Vehicles



Structural Components

Fuselage

Wings

Elevators

Vertical Stabilizers

Rudders

Ailerons

Doors

Rotors

Tank Structure

B727 Elevator



DC 10 Rudder and Vertical Stabilizer



Beech Star Ship



F-18



F-14



L 1011 Aileron



B737 Hor. Stab.



Shuttle – Cargo Bay Doors



B2



B777



A380



B787



ARES V



ARES I



Composite Crew Module



F 22



Honda Jet Composite Fuselage



A310



V-22



Material Systems

Gr/Epoxy

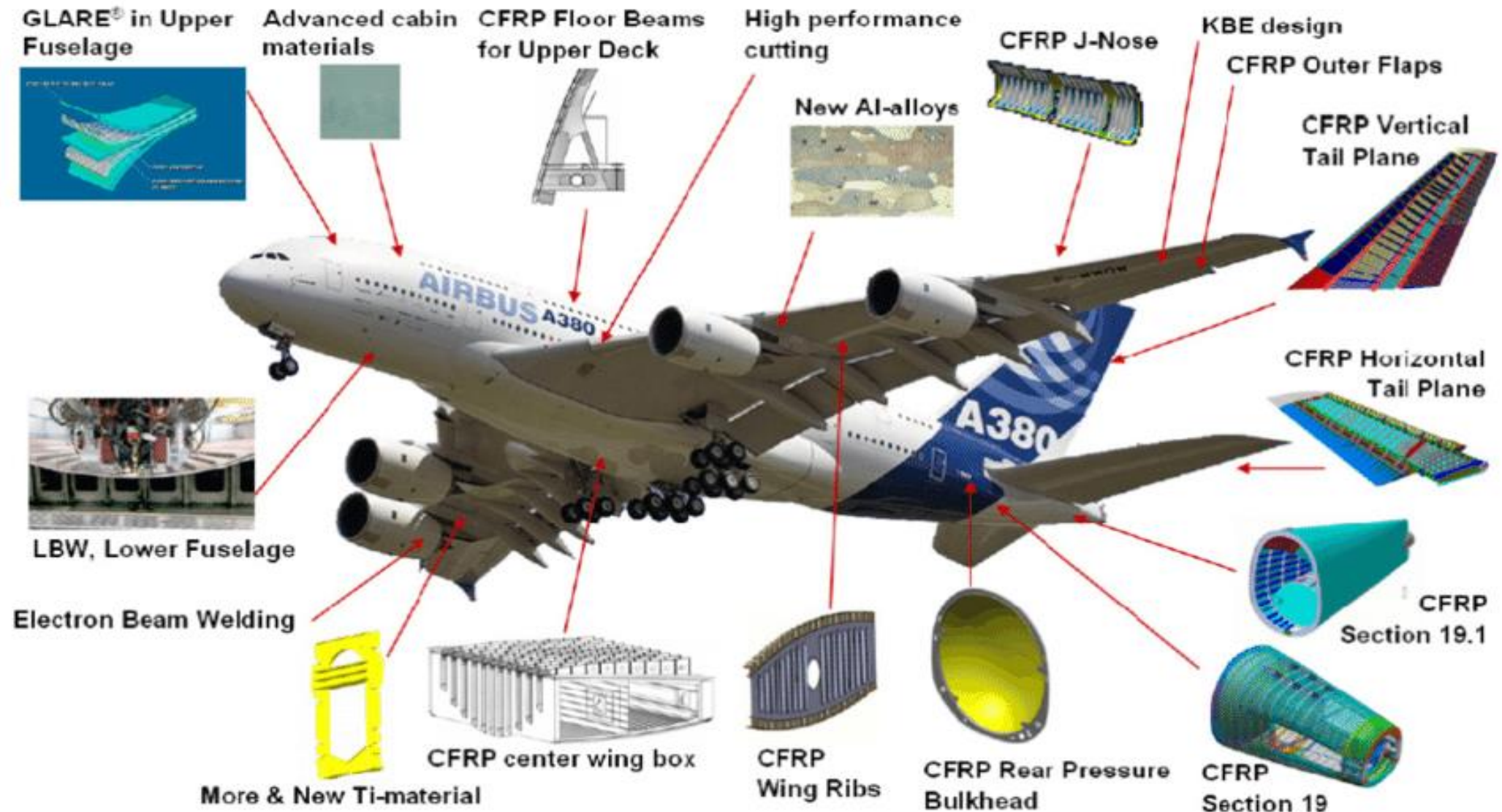
Gr/Polyimide

Gr/Bismalimide

B/Epoxy

Figure 1

Εφαρμογές των Συνθέτων Υλικών στο AIRBUS A380



A350 XWB STRUCTURAL DESIGN

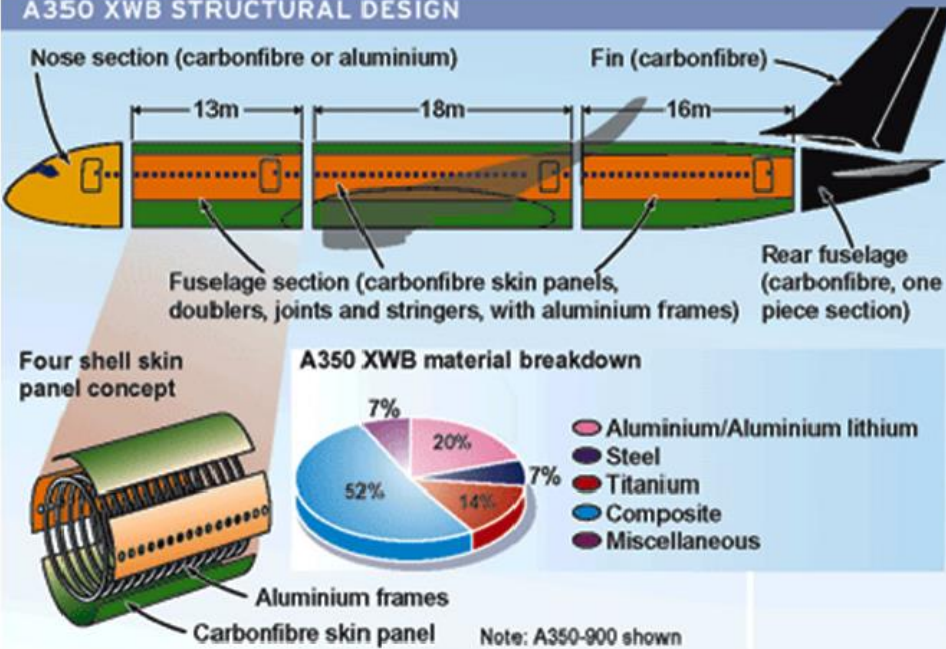


Figure 1. A350 XWB materials
Source: Flight International

Materials used in 787 body

- Fiberglass
- Aluminum
- Carbon laminate composite
- Carbon sandwich composite
- Aluminum/steel/titanium

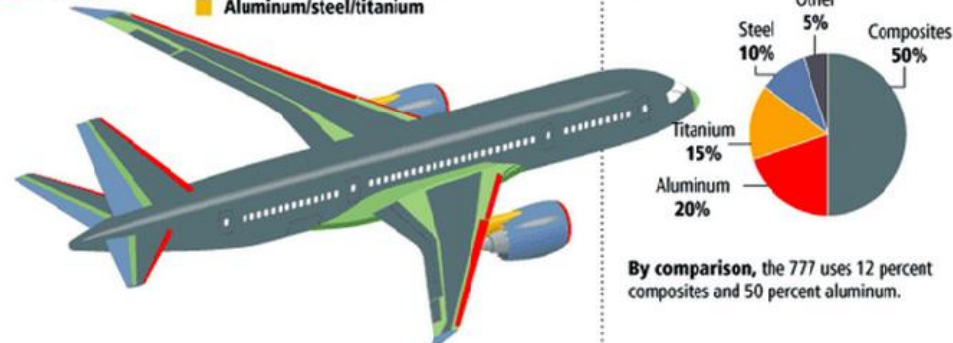
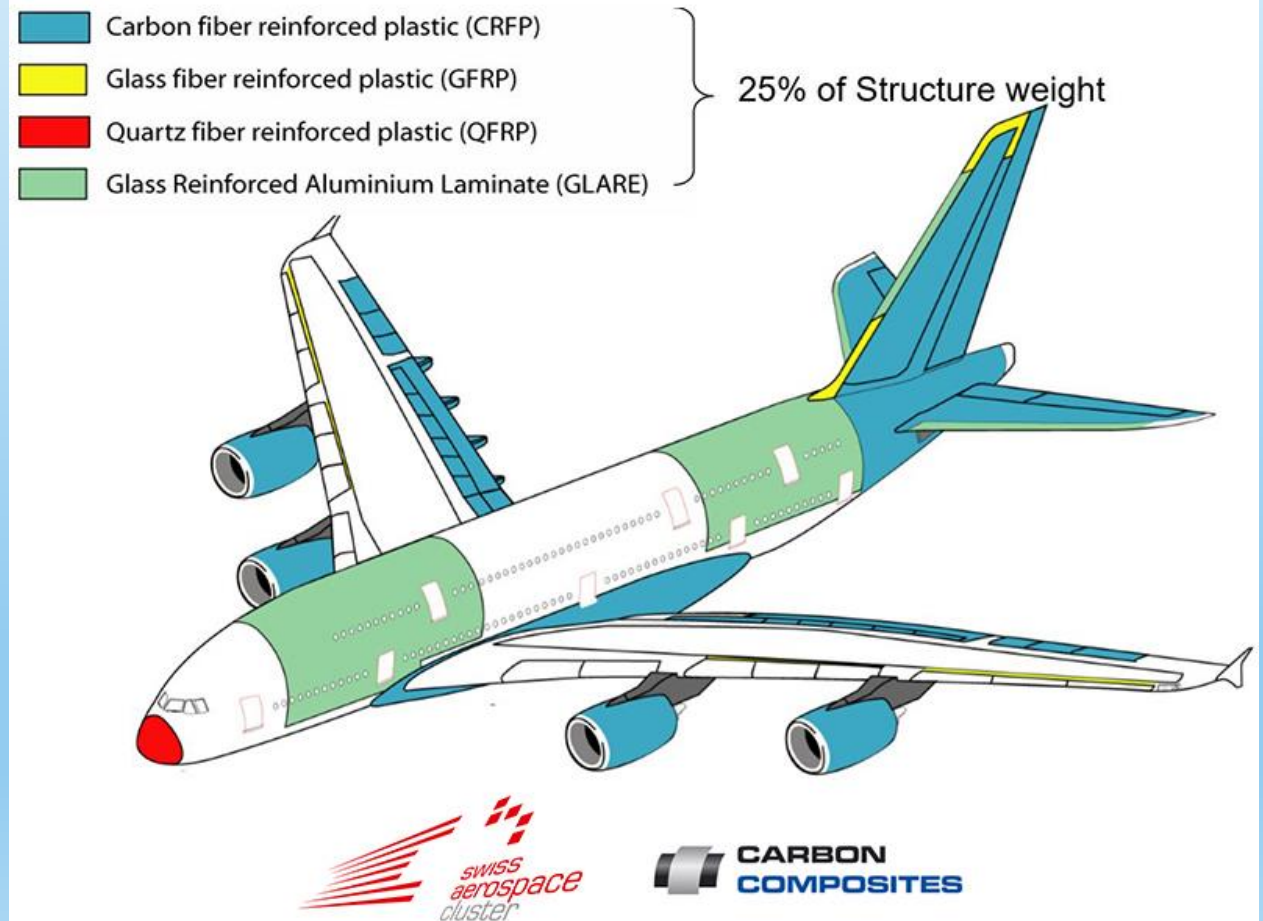


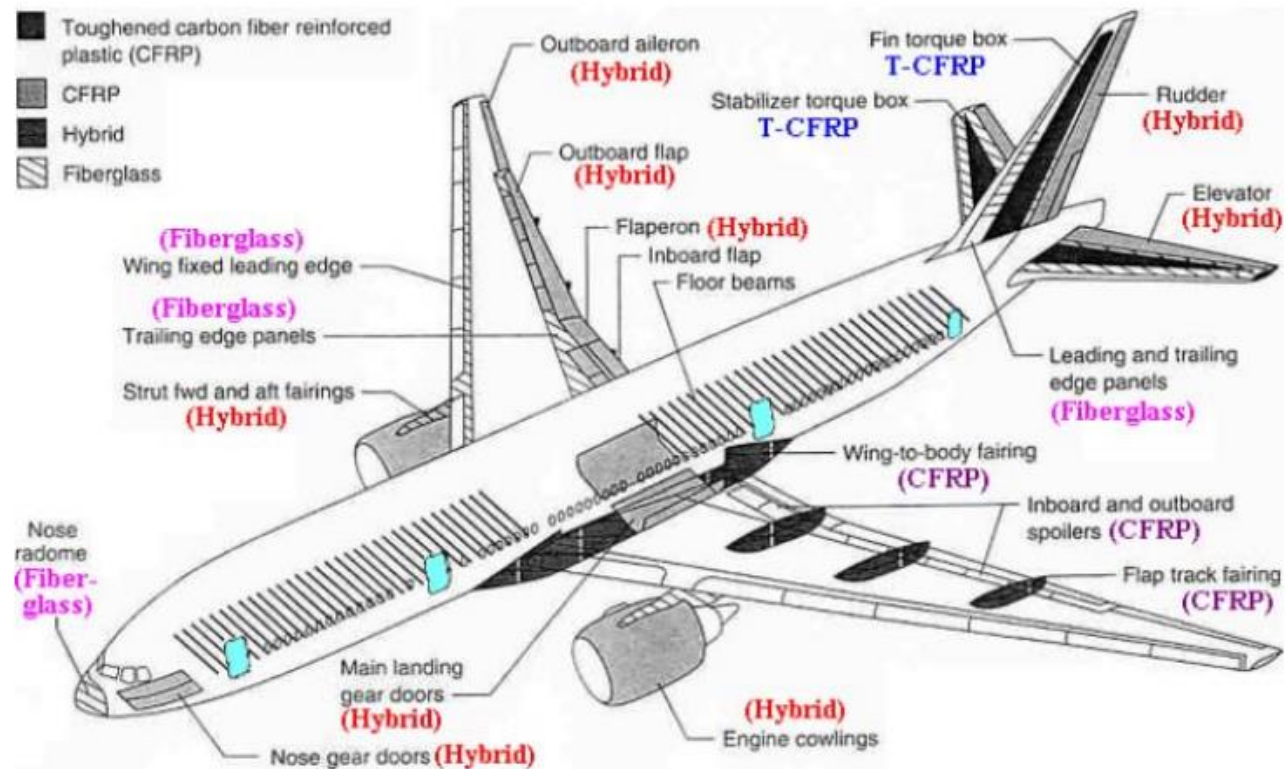
Figure 2. Comparison between B777 and B787
Source: Aviation beta (2015).

Εφαρμογές των Σ.Υ. Στην Αεροναυπηγική

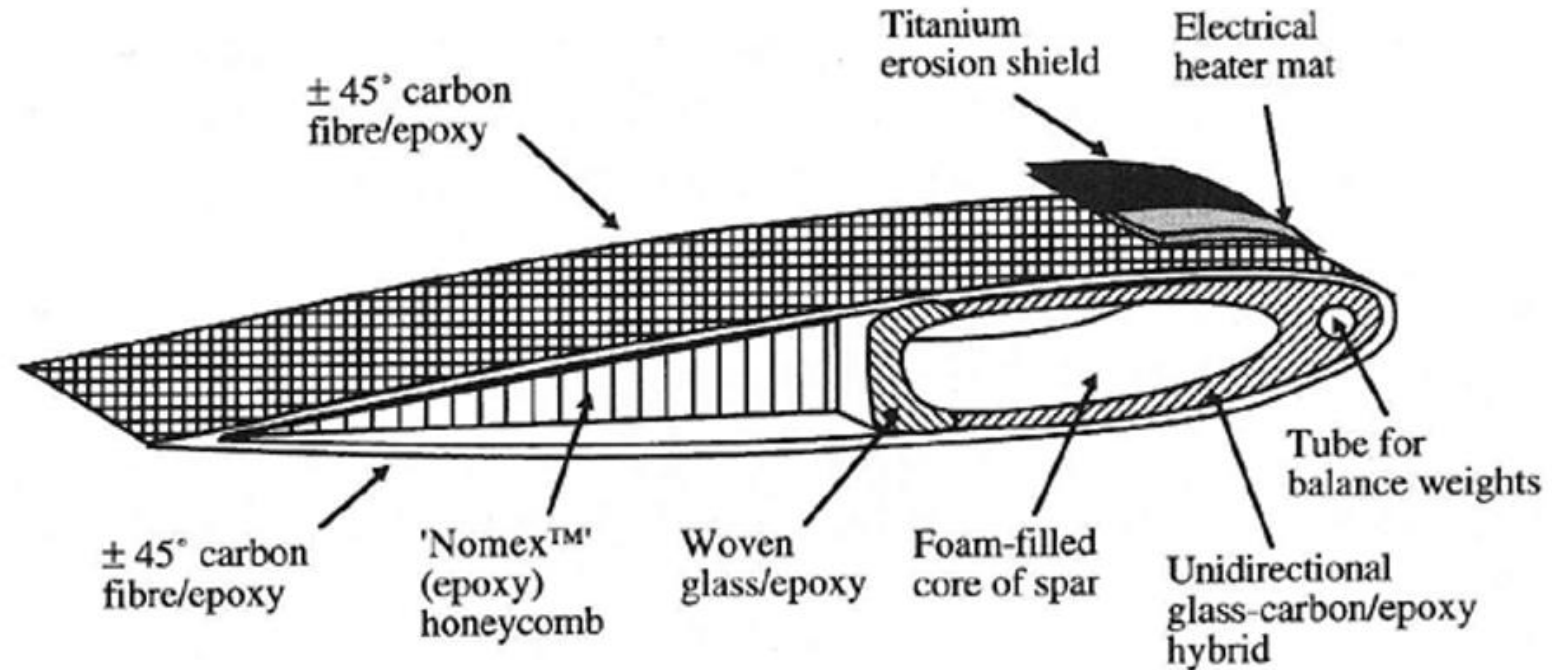


Εφαρμογές των Σ.Υ. στο Boeing 777

Composites in a Boeing 777



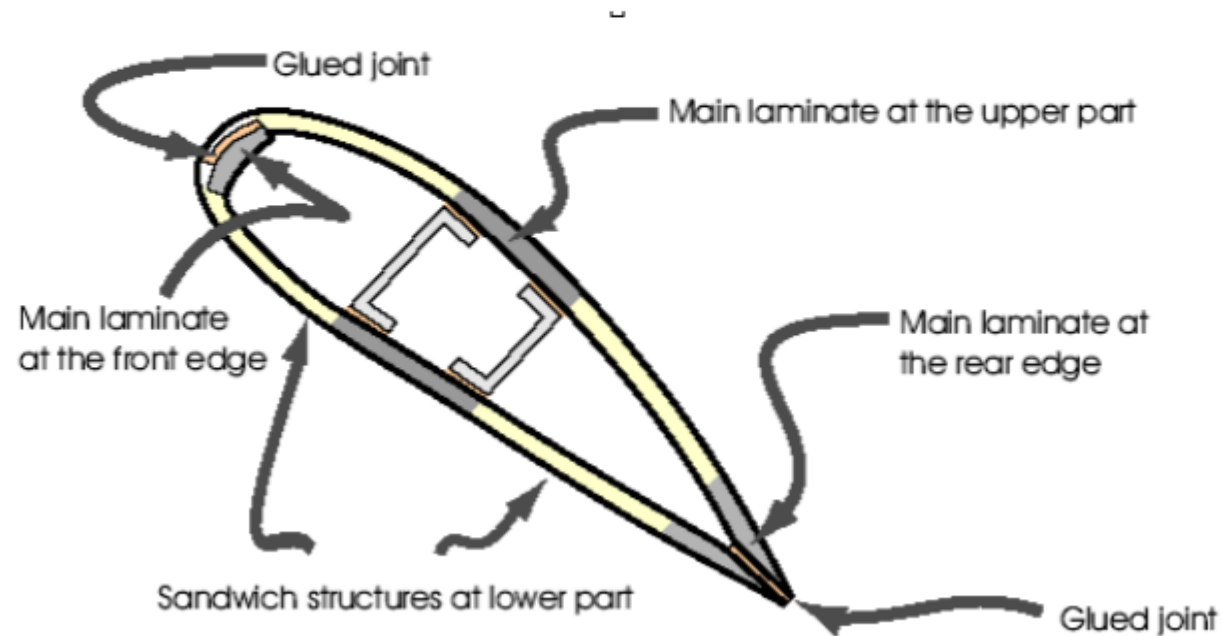
Εφαρμογές των Σ.Υ στα Πτερύγια των Ελικοπτέρων



Schematic section through a typical composite construction for a helicopter rotor blade. (Courtesy of Westland Helicopters.)

Εφαρμογές των Σ.Υ. στα πτερύγια ανεμογεννητριών

Typical Cross section of a Wind Turbine Blade



Εφαρμογές των Σ.Υ. Στις Ανεμογεννήτριες

Composite Materials for Wind Turbine Blades

EMM25



CFRP Sonar Dome

The NEG-Micon 40 m radius AL40 carbon-wood epoxy wind turbine blade: Resin infusion manufacturing process

Εφαρμογές των CFRP στην αυτοκινητοβιομηχανία

EMM2512

CFRP Application

web.missouri.edu/~smithdoug/nsf/presentations/



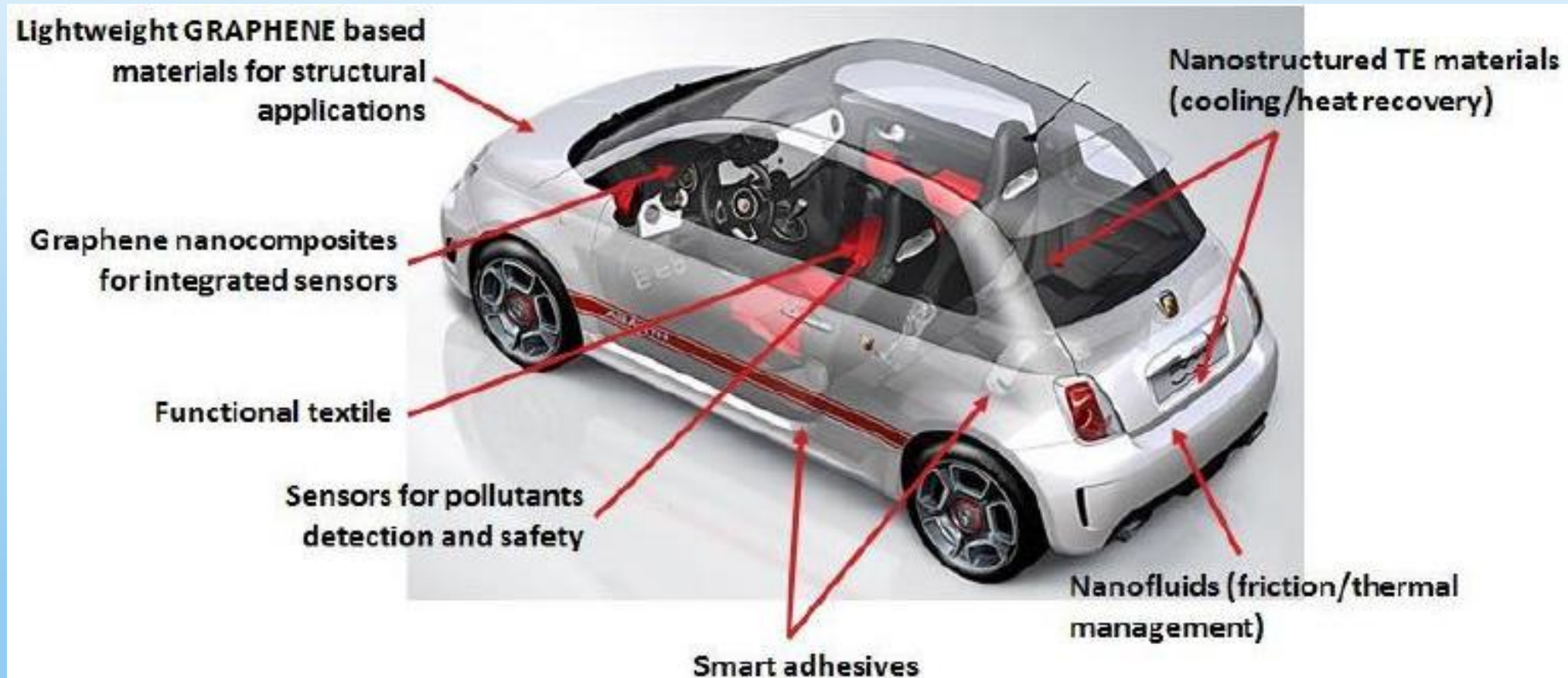
Prepreg autoclave,
monolithic design

RTM,
monolithic design

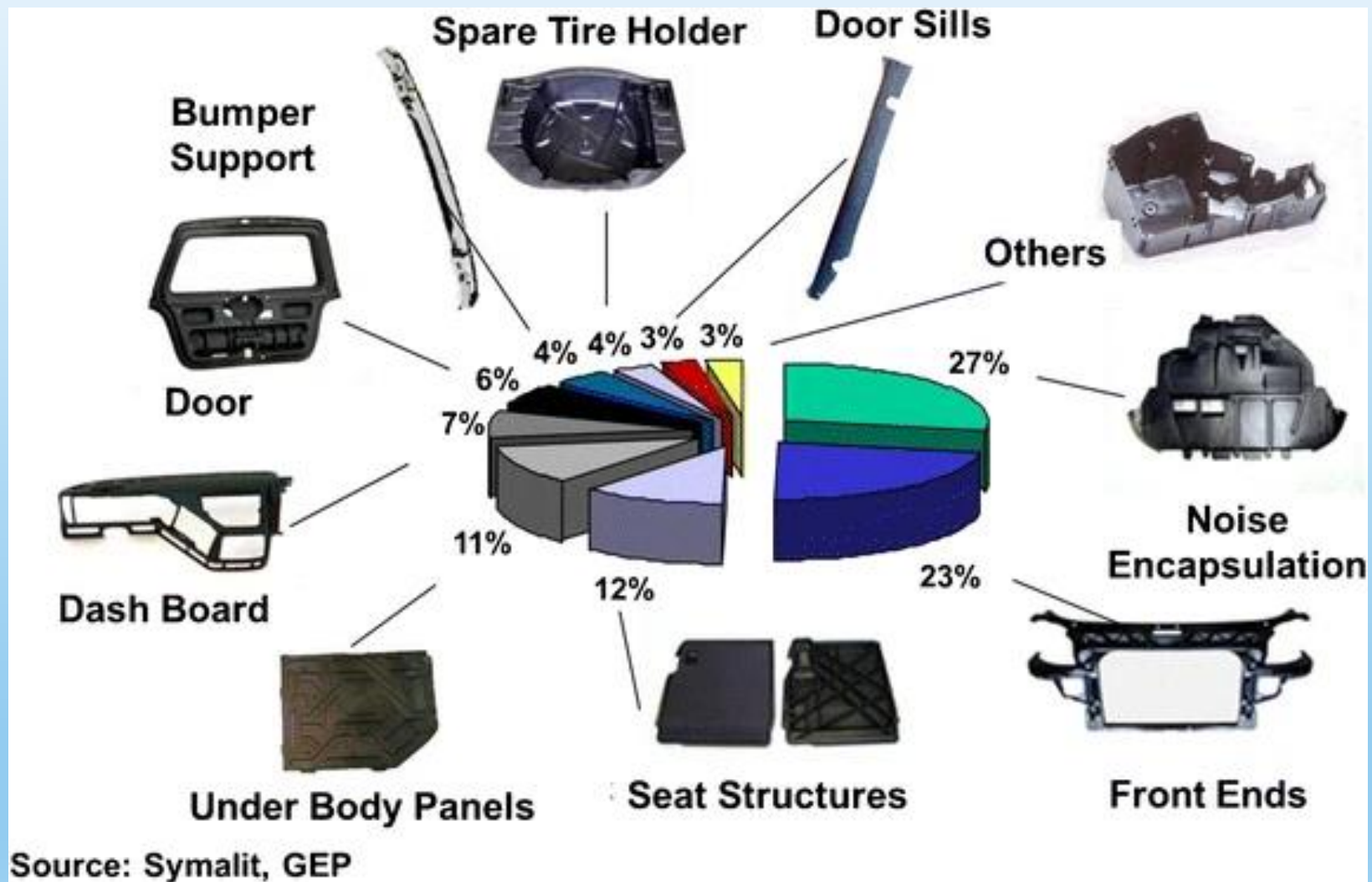
Prepreg autoclave,
sandwich design

Prepreg-treated aluminum tooling,
monolithic design

Εφαρμογές Συνθέτων Γραφενίου στην Αυτοκινητοβιομηχανία



Εφαρμογές των Σ.Υ. στην Αυτοκινητοβιομηχανία



Χρήση των Σ.Υ. στην Κατασκευή Τραίνων



Εφαρμογές των MMCs

MMCs

Metal matrix composites can yield significant weight payoffs.



AADC IHPTET compressor featuring Ti mmc blings

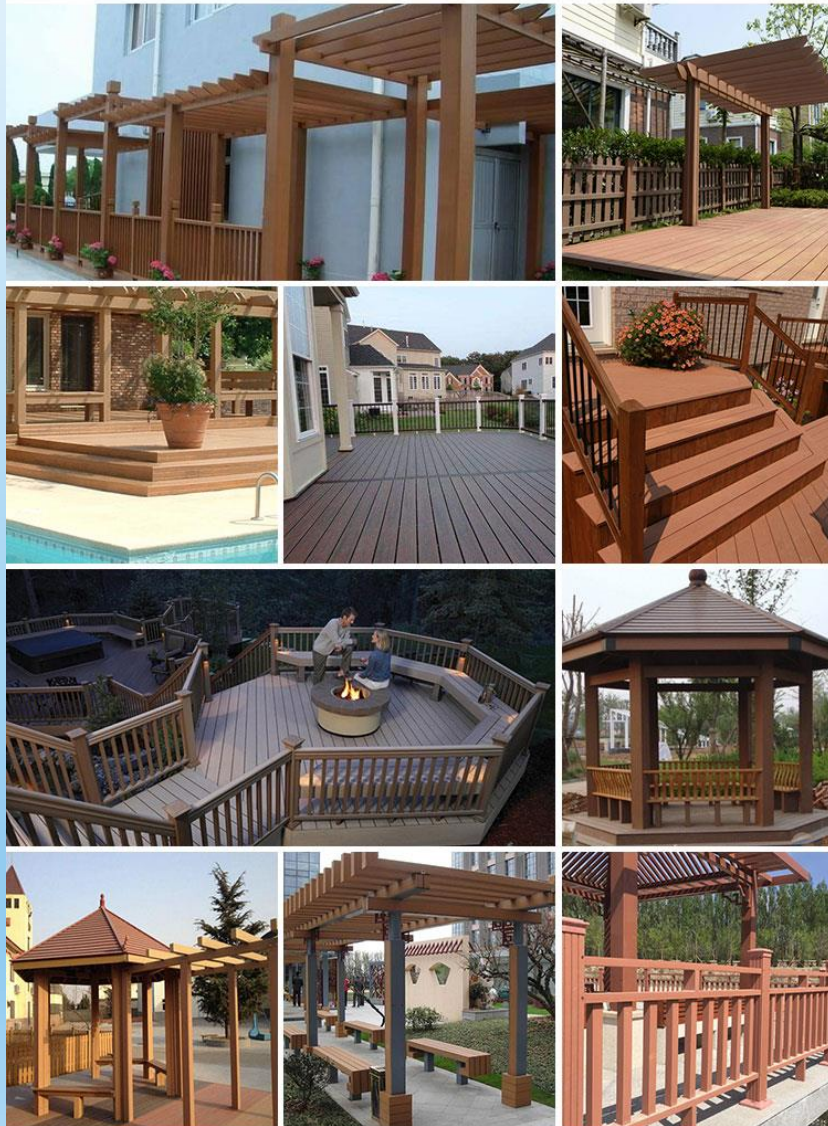


www.youtube.com/watch?v=x bPxVws5Ty4&feature=related

Χρήση των Σ.Υ. στην Ναυπηγική



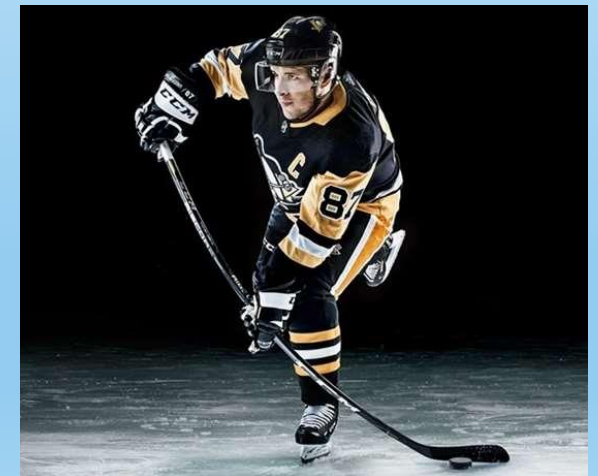
APPLICATION



Εφαρμογές των Σ.Υ. στην επιπλοποιία και τις ελαφρές κατασκευές



Εφαρμογές των Σ.Υ. στα αθλητικά είδη



Χρονική εξέλιξη των εφαρμογών των Συνθέτων Υλικών

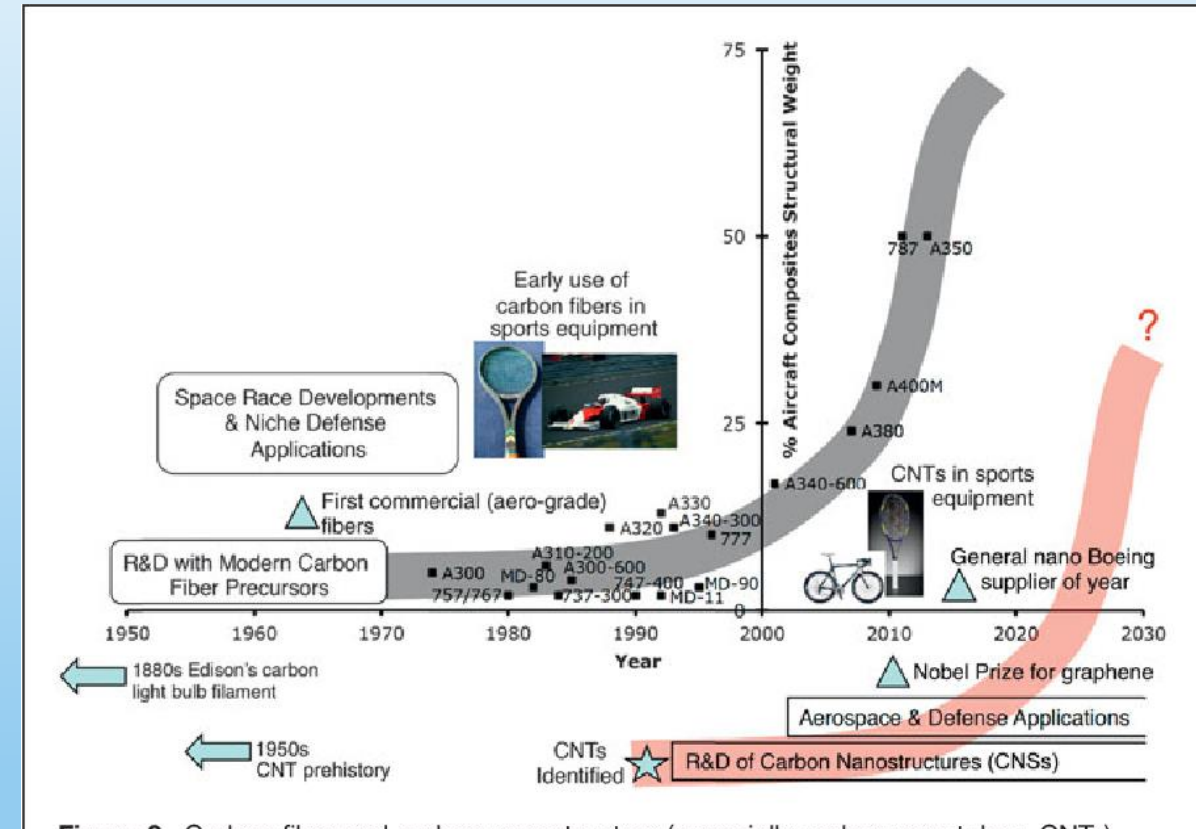
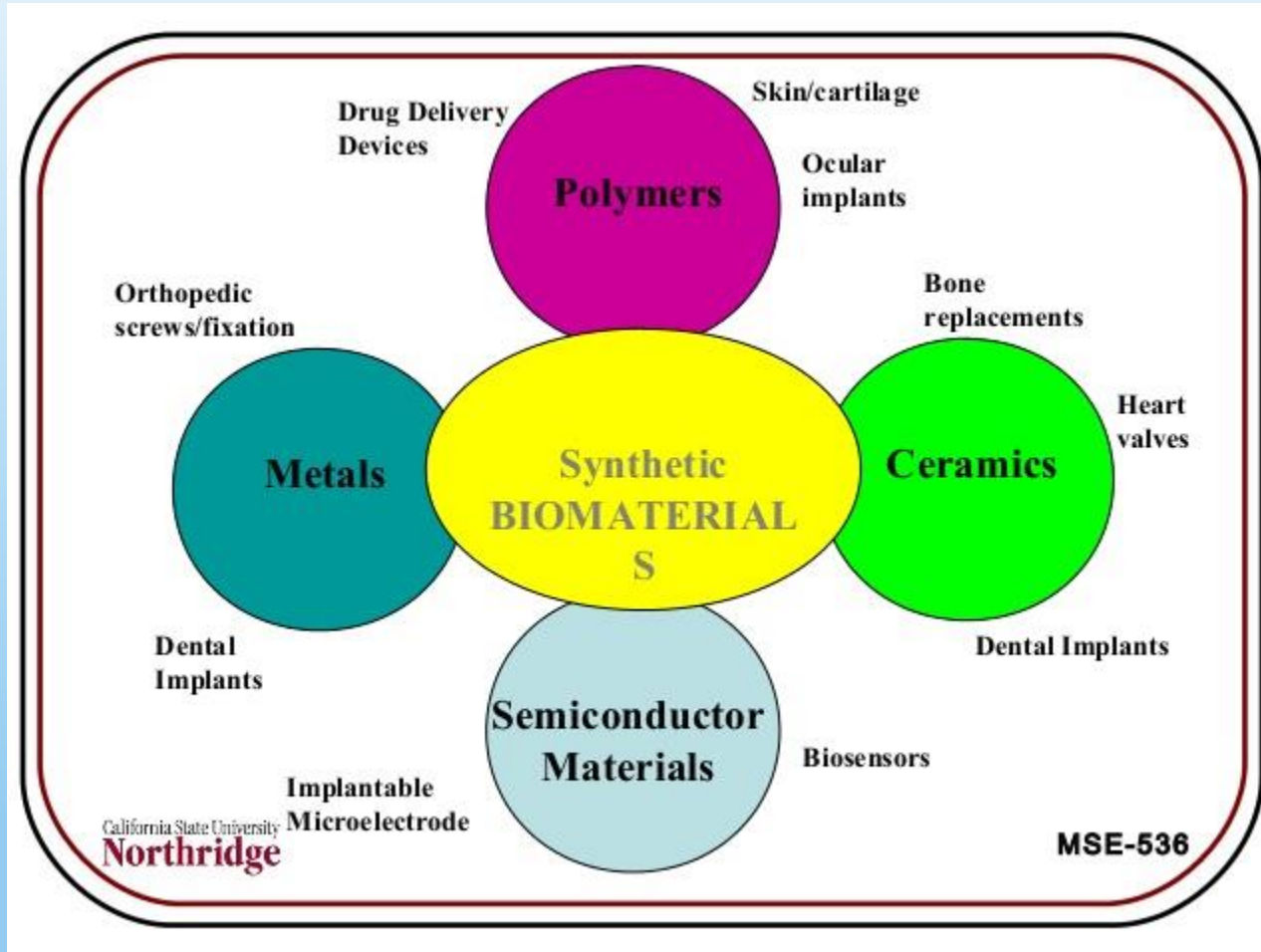


Figure 2. Carbon fiber and carbon nanostructure (especially carbon nanotubes, CNTs)

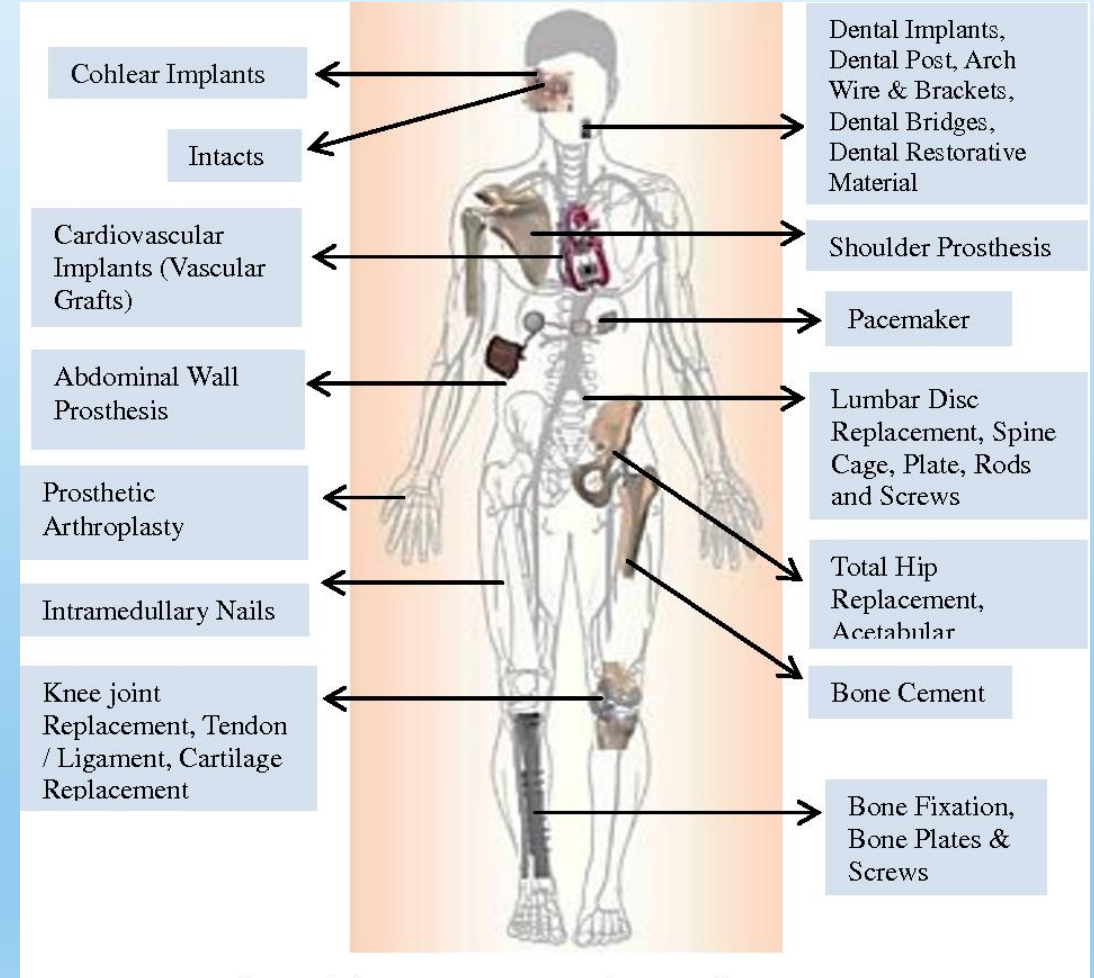
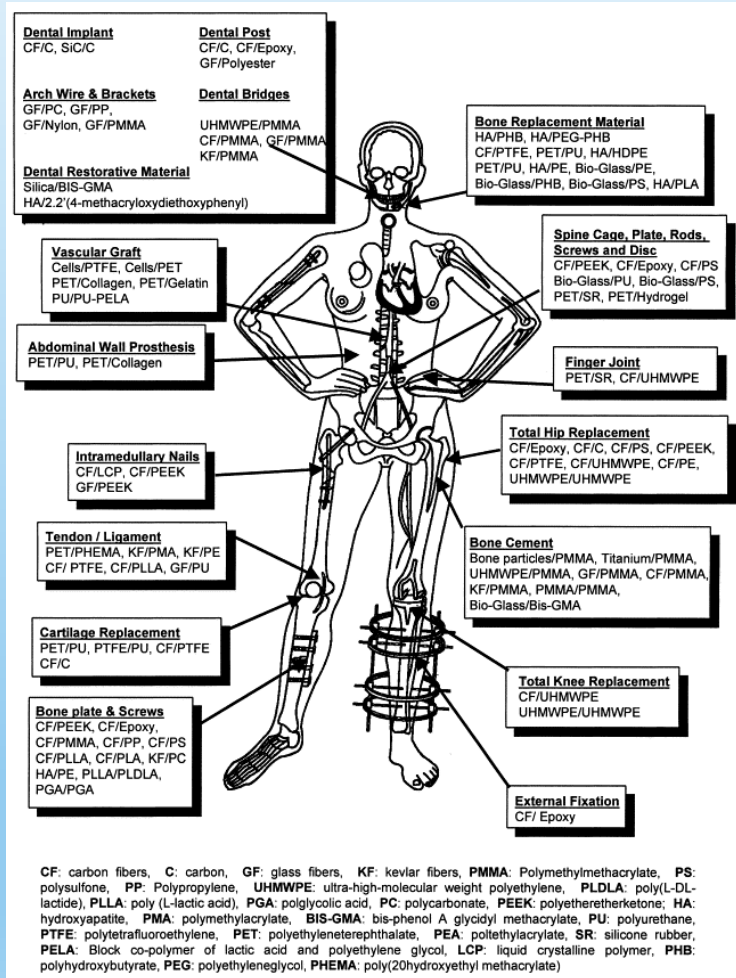
BIOΥΛΙΚΑ (Biomaterials)



Ένα **βιοϋλικό** είναι μια βιολογική ή συνθετική ουσία που μπορεί να εισαχθεί στον ιστό του σώματος ως μέρος μιας εμφυτευμένης ιατρικής συσκευής ή να χρησιμοποιηθεί για την αντικατάσταση οργάνου, σωματικής λειτουργίας κ.λπ.

Ένα βιοϋλικό είναι μια ουσία που έχει σχεδιαστεί για να αλληλεπιδρά με βιολογικά συστήματα για ιατρικούς σκοπούς—είτε για θεραπευτικούς είτε για διαγνωστικούς λόγους. Ως επιστήμη, τα βιοϋλικά είναι περίπου πενήντα ετών. Η μελέτη των βιοϋλικών ονομάζεται **επιστήμη βιοϋλικών ή μηχανική βιοϋλικών**

Εφαρμογές των Βιολικών



GREEN COMPOSITES

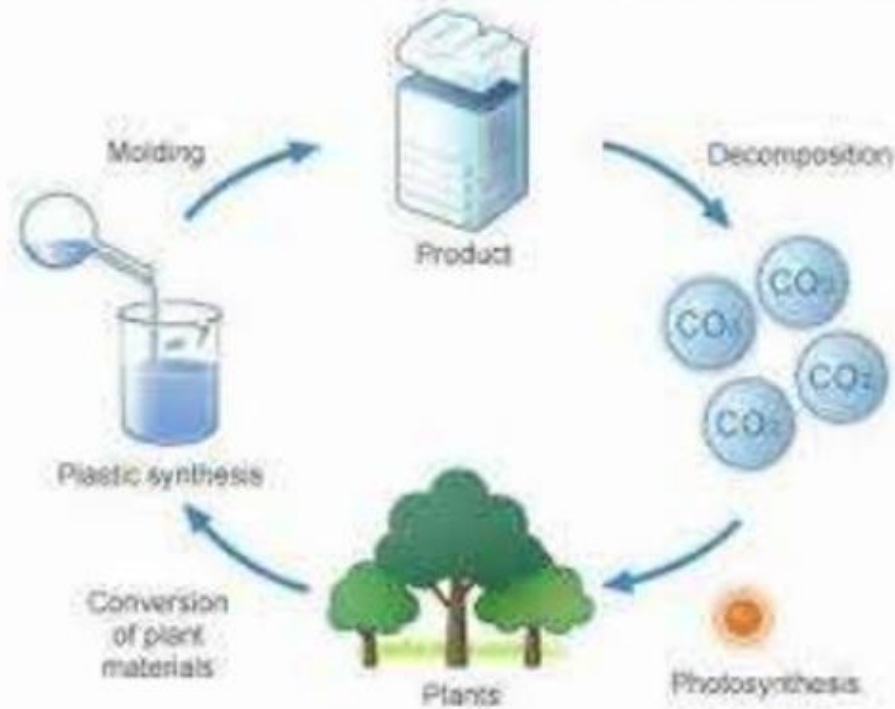
- Green composite combines plant fibres with natural resins to create natural composite materials.



FIBRES USED IN GREEN COMPOSITES :

- Natural / biofibres may be classified in two broad categories:
 - Non-wood fibres
 - Wood fibres
- Natural fibres such as kenaf, flax, jute, hemp, and sisal have attracted renewed interest, especially as a E glass fibre substitute in the automotive industry.
- The other fibres used are Coir (Coconut), Bamboo , Pineapple , Ramie

Green Composites : Opportunities and Challenges

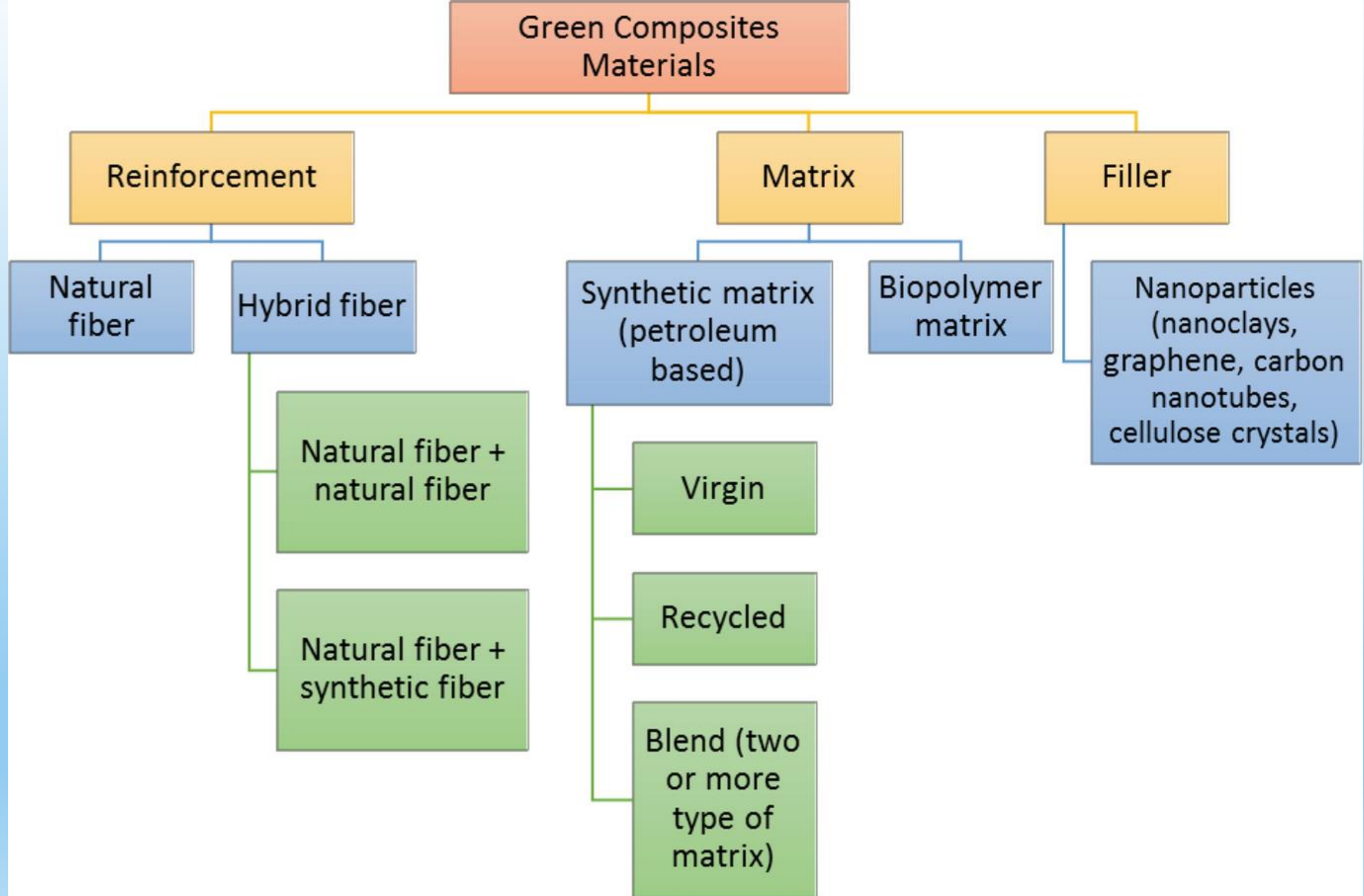


Γιατί Πράσινα Υλικά?

- ❖ Περιορισμένοι πόροι πετρελαίου
- ❖ Αυξανόμενο κόστος πετρελαίου
- ❖ Μείωση των αερίων του θερμοκηπίου
- ❖ Νέα υλικά για προηγμένες κατασκευές

Ποια είναι τα πλεονεκτήματα?

- ❖ Κατασκευάζονται από ανανεώσιμες πηγές
- ❖ Είναι ανακυκλώσιμα
- ❖ Είναι βιοαποδομούμενα
- ❖ Είναι οικονομικά βιώσιμα
- ❖ Είναι φιλικά προς το περιβάλλον



Vehicle part	Material used
Glove box	Wood/cotton fibers molded, flax/sisal
Door panels	Flax/sisal with thermoset resin
Seat covering	Leather/wool backing
Seat surface/backrest	Coconut fiber/natural fiber
Trunk panel	Cotton fiber
Floor panels	Flax mat with PP
Trunk floor	Cotton with PP/PET fibers

Green composites have found increasing application in industrial housing construction as compared to other industrial application.

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΜΗΤΡΑΣ

Ποιες είναι οι απαιτήσεις που πρέπει να πληροί μία πολυμερική μήτρα?

1. Να ρέει ελεύθερα στον χώρο μεταξύ των ινών ώστε να επικαλύπτει πλήρως την επιφάνεια των ινών.
2. Να αναπτύσσει φυσικούς, χημικούς και μηχανικούς δεσμούς με τις ίνες.
3. Να στερεοποιείται σε όσο το δυνατόν μικρότερο χρόνο, μικρότερη πίεση και μικρότερη θερμοκρασία.
4. Πέρα από την ανάπτυξη δεσμού ίνας-μήτρας, καμία άλλη χημική αντίδραση δεν πρέπει να συμβαίνει μεταξύ της ίνας και της μήτρας είτε κατά το στάδιο της κατασκευής, ή μετά από αυτήν ενώ η μήτρα θα πρέπει να παραμένει σταθερή με τον χρόνο.
5. Η μήτρα θα πρέπει να έχει τέτοια φύση ώστε να μην προκαλεί κάποια φυσική ή μηχανική φθορά στις ίνες κατά το στάδιο της κατασκευής του συνθέτου υλικού.

ΤΥΠΟΙ ΜΗΤΡΑΣ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

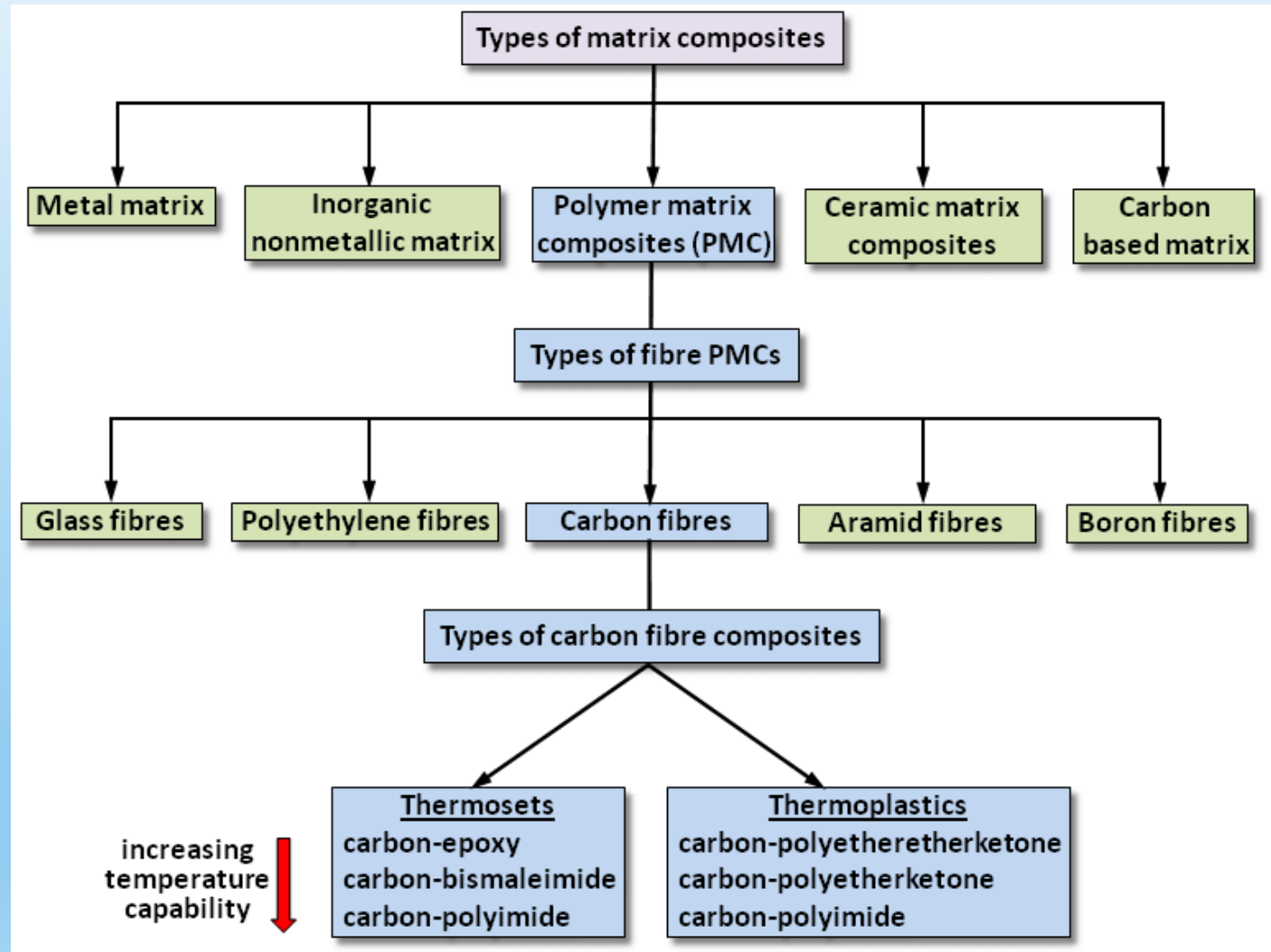
- Ποια υλικά χρησιμοποιούνται ως μήτρες στα σύνθετα υλικά?
1. Πολυμερή (*Polymers*): Θερμοσκληρυνόμενα (*Thermosets*), Θερμοπλαστικά (*Thermoplastics*), Ελαστομερή (*Elastomers*).
 2. Μέταλλα (*Metals*):
 3. Κεραμικά (*Ceramics*)
 4. Γυαλιά (*Glasses*)
 5. Άνθρακας (*Carbon*)

Τα σύνθετα πολυμερικής μήτρας, ονομάζονται **Polymer-Matrix Composite** (PMC's).

Τα σύνθετα μεταλλικής μήτρας, ονομάζονται **Metal-Matrix Composites** (MMC's)

Τα σύνθετα κεραμικής μήτρας, ονομάζονται **Ceramic-Matrix Composites** (CMC's)

Τύποι Μήτρας στα Σύνθετα Υλικά



Πολυμερή και Πλαστικά

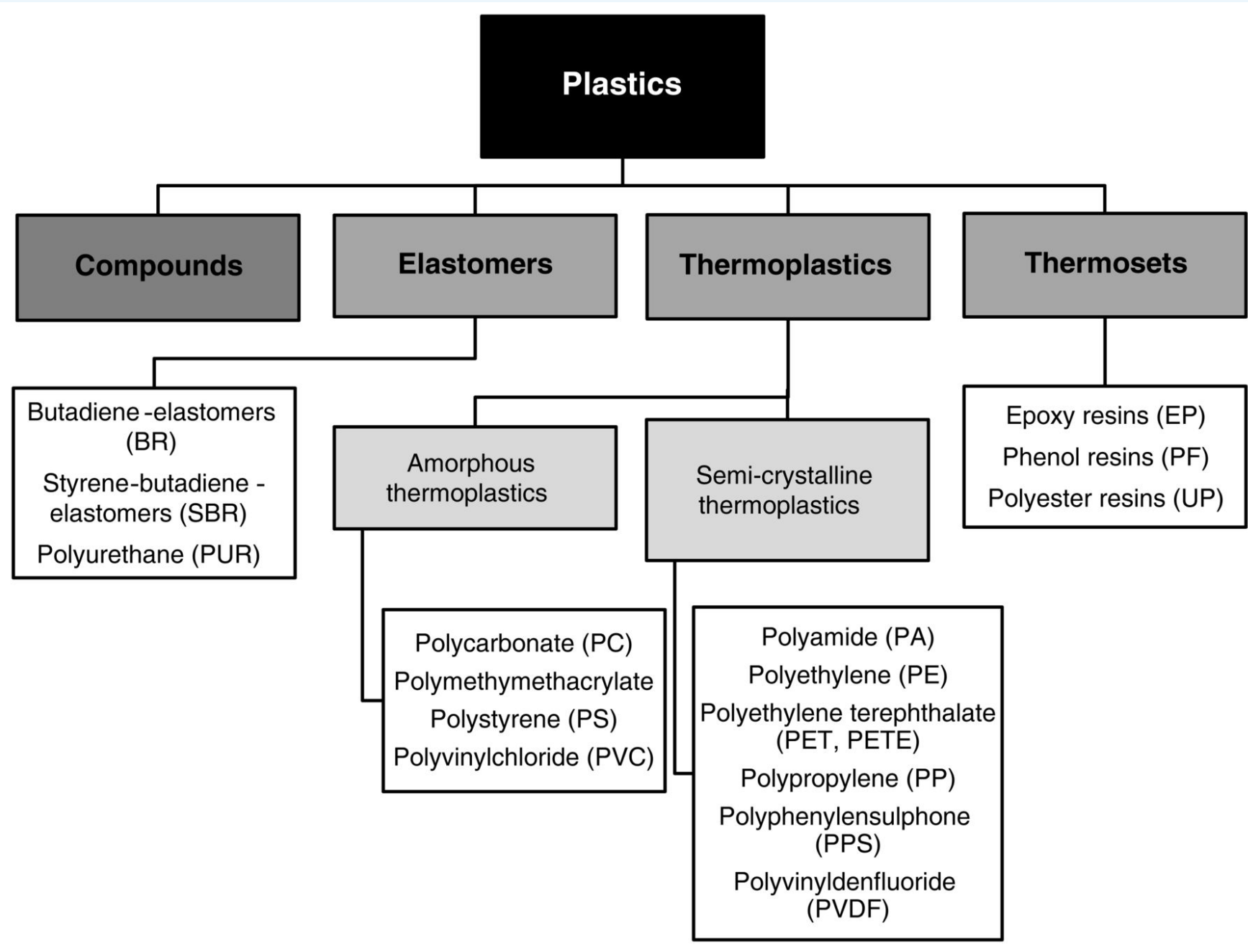
Ποια είναι η διαφορά μεταξύ των πολυμερών (*polymers*) και των πλαστικών (*plastics*)?

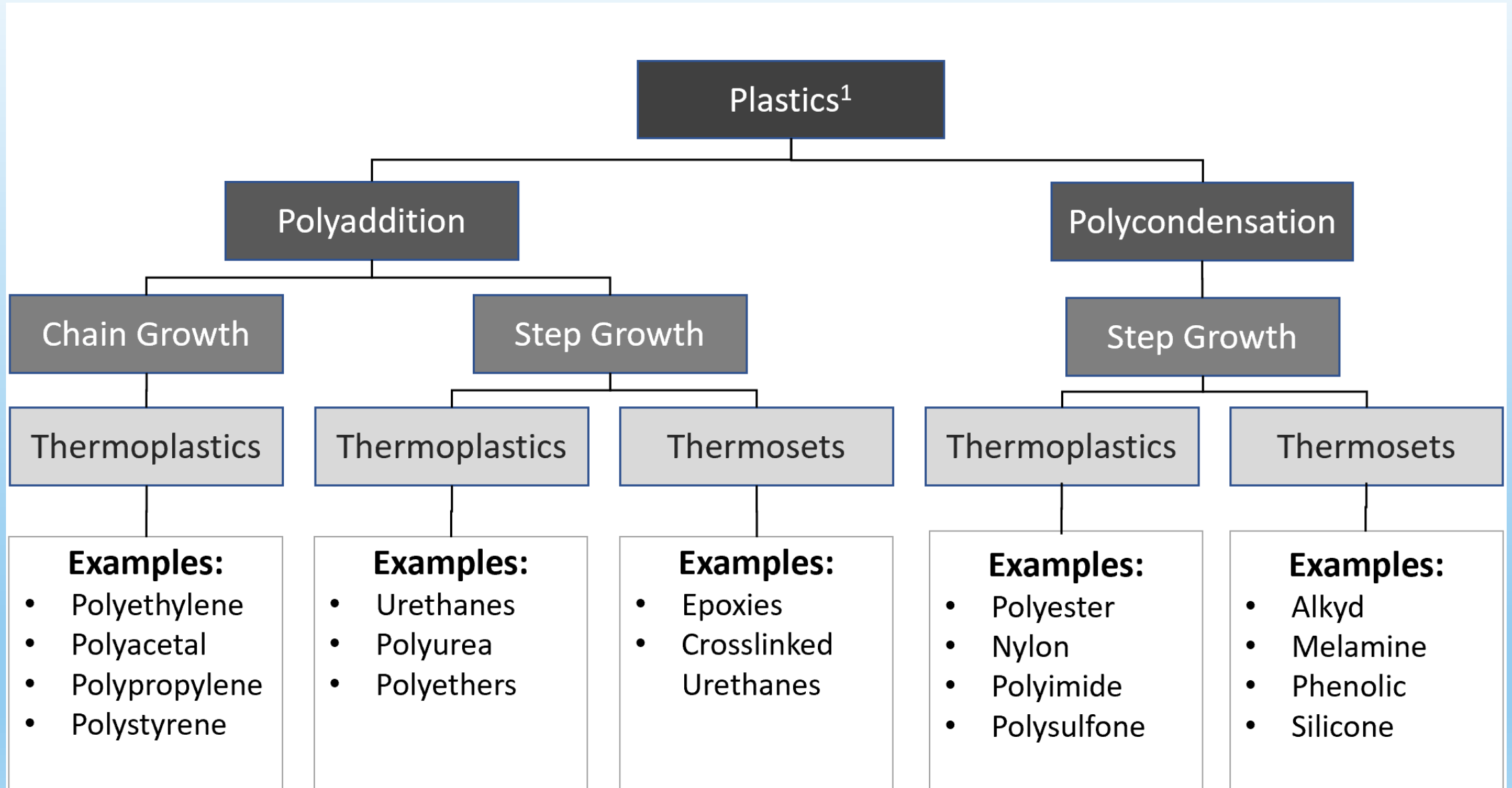
Με τον όρο “**πολυμερές**” εννοούμε την καθαρή μακρομοριακή ουσία που παράγεται με την τεχνική του πολυμερισμού σε συνθήκες εργαστηρίου.

Polymerization, any process in which relatively small molecules, called monomers, combine chemically to produce a very large chainlike or network molecule, called a **polymer**. The monomer molecules may be all alike, or they may represent two, three, or more different compounds.

Αν σε ένα πολυμερές προσθέσουμε ένα πρόσθετο (*additive*), τότε το πολυμερές ονομάζεται “**πλαστικό**”.

Τέτοια πρόσθετα (*additives*), είναι : τα αντιοξειδωτικά, οι χρωστικές, τα αντιπυρικά, οι διάφορες σκόνες, τα μονωτικά, κ.α.





ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

Classification of Polymers

- ❑ **Linear polymer** - Any polymer in which molecules are in the form of spaghetti-like chains.
- ❑ **Thermoplastics** - Linear or branched polymers in which chains of molecules are not interconnected to one another.
- ❑ **Thermosetting polymers** - Polymers that are heavily cross-linked to produce a strong three dimensional network structure.
- ❑ **Elastomers** - These are polymers (thermoplastics or lightly cross-linked thermosets) that have an elastic deformation $> 200\%$.

ΘΕΡΜΟΣΚΛΗΡΥΝΟΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ

- Τα **θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή** (*Thermosetting polymers or Thermosets*) δομούνται από μακροαλυσίδες (*long chains*) μακρομορίων (*macromolecules*) που συνδέονται μεταξύ τους με **σταυροδεσμούς** (*cross-links*) δημιουργώντας έτσι ένα τρισδιάστατο πλέγμα (*3-D network*). Οι σταυροδεσμοί αναπτύσσονται κατά την διάρκεια του πολυμερισμού, είναι μόνιμοι και περιορίζουν την κινητικότητα των μακρομορίων. Η δημιουργία τους, προκύπτει από μία έντονα εξώθερμη αντίδραση (*crosslinking reaction*) μεταξύ της ρητίνης (*resin*) και του σκληρυντή (*hardener*) τον οποίο προσθέτουμε στην ρητίνη για την επιτάχυνση του πολυμερισμού.
- Επομένως, αν εφαρμόσουμε ένα μηχανικό φορτία στο πολυμερές, αυτό θα παραμορφωθεί ελάχιστα.
- Σαν αποτέλεσμα των περιορισμών που επιβάλλουν οι σταυροδεσμοί στην κινητικότητα των μακρομορίων, αυτά τα πολυμερή έχουν μεγαλύτερο μέτρο και αντοχή, αλλά μικρότερη παραμόρφωση θραύσης (είναι πιο ψαθυρά) από τα θερμοπλαστικά.
- Τα θερμοσκληρυνόμενα δεν χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένη θερμοκρασία τήξης και λόγω της ύπαρξης των σταυροδεσμών, δεν επαναμορφοποιούνται.
- Τα θερμοσκληρυνόμενα δεν τήκονται, αλλά αποσυντίθενται και, λόγω των μόνιμων σταυροδεσμών, δεν επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση με ψύξη.

Θερμοσκληρυνόμενες Ρητίνες

Βακελίτης

Καλές μηχανικές ιδιότητες, προφυλακτήρες αυτοκινήτων, δάπεδα.

Εποξειδική ρητίνη

Ακριβό υλικό, κόλλες, ανθρακονήματα, σκάφη θαλάσσης. Χρησιμοποιείται εκτεταμένα σε σύνθετα, ενισχυμένα με ίνες, κόκκους και άλλα ενισχυτικά.

Πολυεστερικές ρητίνες (τα πολυεστερικά πλαστικά γενικά μπορεί να είναι είτε θερμοπλαστικά είτε θερμοσκληρυνόμενα, ανάλογα με τη χημική σύσταση, ενώ οι ακόρεστοι πολυεστέρες ή αλλιώς πολυεστερικές ρητίνες είναι θερμοσκληρυνόμενα). Παρόμοιες εφαρμογές με εποξειδική ρητίνη, φτηνότερο.

Βινυλεστέρας

Μηχανικές ιδιότητες και κόστος κάπου ανάμεσα στους πολυεστέρες και τις εποξειδικές ρητίνες. Χρησιμοποιείται εκτεταμένα σε σύνθετα, ενισχυμένα με ίνες, πλαστικά.

Σκλήρυνση Πολυμερών (Curing of Polymers)

- Είναι μία διαδικασία κατά την οποία αντιδρώντα υγρά πολυμερή χαμηλού μοριακού βάρους (**ολιγομερή**) μετατρέπονται **μη αντιστρεπτά** σε στερεά, αδιάλυτα και εγχύσιμα τρισδιάστατα πολυμερή.
- Ο όρος «**σκλήρυνση**» χρησιμοποιείται γενικά στην επεξεργασία πλαστικών, βερνικιών, συγκολλητικών και στεγανοποιητικών ενώσεων.
- Η σκλήρυνση των πολυμερών πραγματοποιείται υπό τη επίδραση ειδικών αντιδραστηρίων (**παράγοντες σκλήρυνσης**/*curing agents*) ή μέσω της αλληλεπίδρασης αντιδραστικών ολιγομερών ομάδων κατά την έκθεση τους σε θερμότητα, υπεριώδες φως ή ακτινοβολία υψηλής ενέργειας.

Μηχανισμός Σκλήρυνσης των Πολυμερών

- Ο μηχανισμός σκλήρυνσης καθορίζεται από τη φύση των αντιδραστικών ομάδων στο ολιγομερές, τον παράγοντα σκλήρυνσης και τις ειδικές συνθήκες της διαδικασίας.
- Η σκλήρυνση των πολυμερών μπορεί να περιλαμβάνει πολυσυμπύκνωση (για παράδειγμα, τη σκλήρυνση των ρητινών φαινόλης-φορμαλδεΰδης) ή πολυμερισμό (σκλήρυνση των πολυεστερικών ρητινών).
- Και οι δύο μηχανισμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα σε ορισμένες περιπτώσεις, για παράδειγμα, στην σκλήρυνση εποξειδικών ρητινών με ανυδρίτες οξέος παρουσία τριτοταγών αμινών (TETA), οι οποίες χρησιμοποιούνται ως καταλύτες.

Η Διαδικασία της σκλήρυνσης των Εποξειδικών Ρητινών

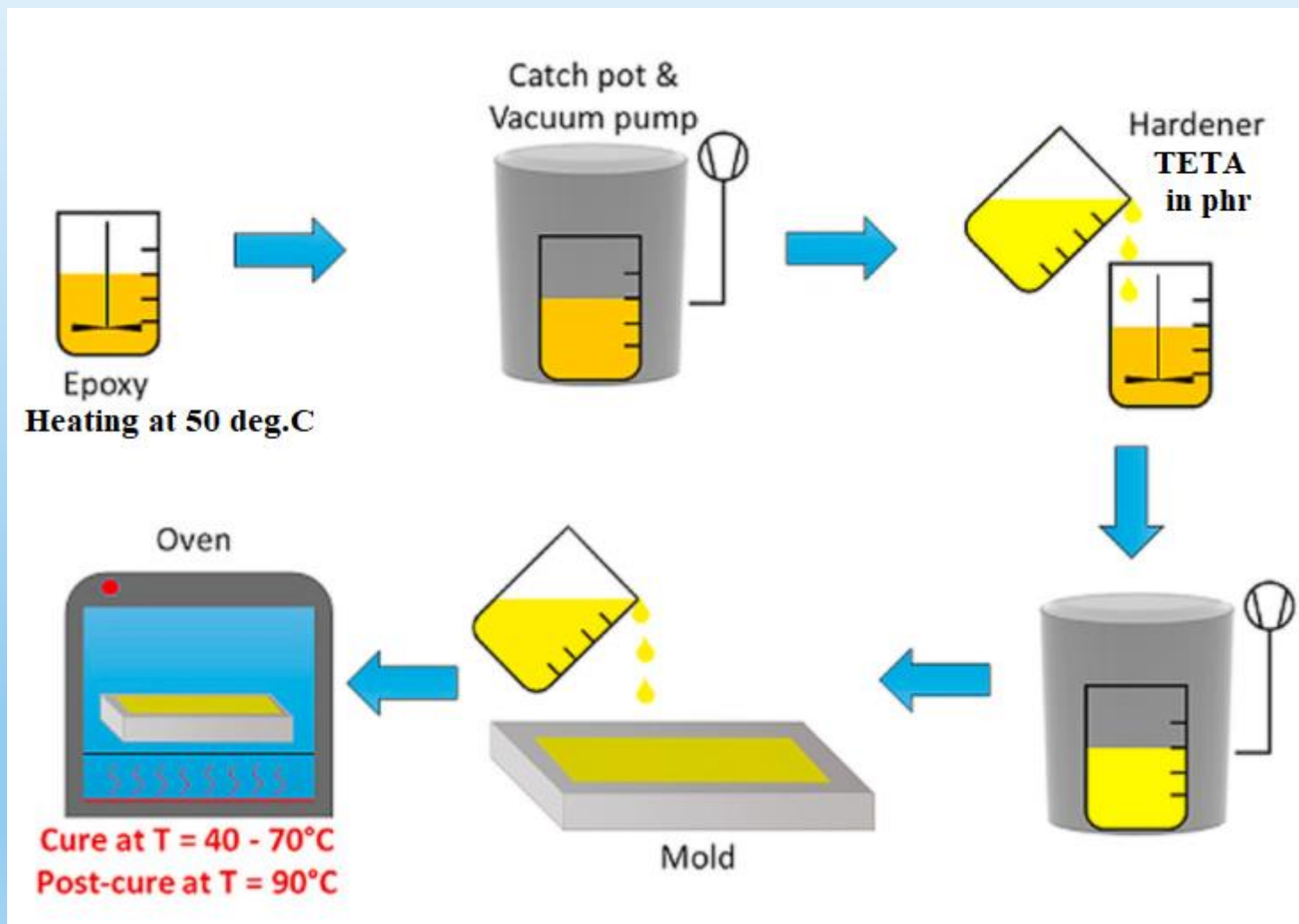
phr = **p**arts **p**er **h**undred of **r**esin

Στις εποξειδικές ρητίνες συνήθως προσθέτουμε **8-12phr TETA**.

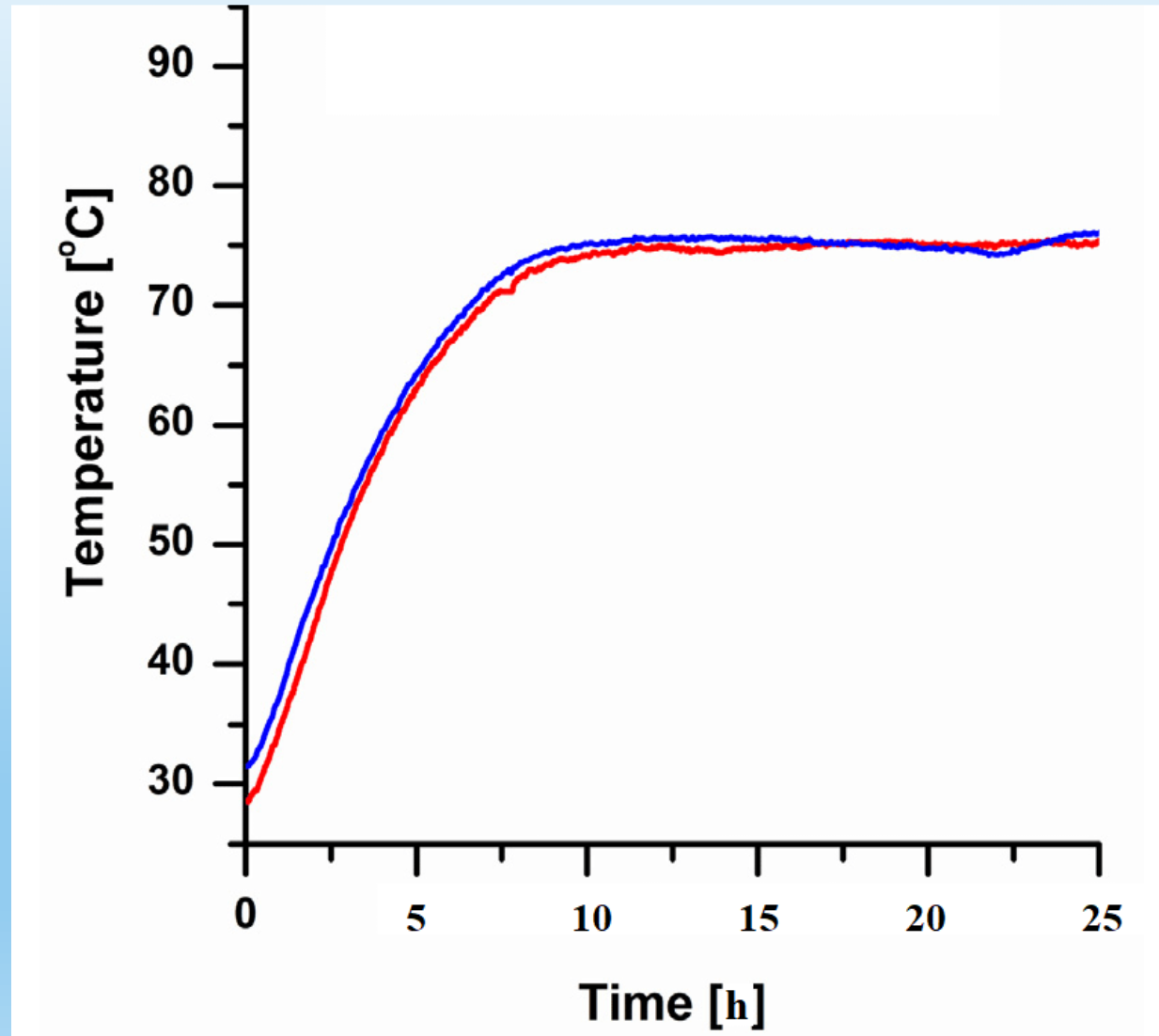
Προθερμαίνουμε την ρητίνη με σκοπό την τήξη των κρυστάλλων που ενδεχόμενα υπάρχουν στην επιφάνεια.

Τοποθετούμε στο κενό την ρητίνη με σκοπό την απαέρωση του μίγματος.

Αν παραμείνουν φυσαλίδες αέρα μέσα στην ρητίνη, αυτές θα αποτελέσουν σημεία εκκίνησης μικρορωγμών.



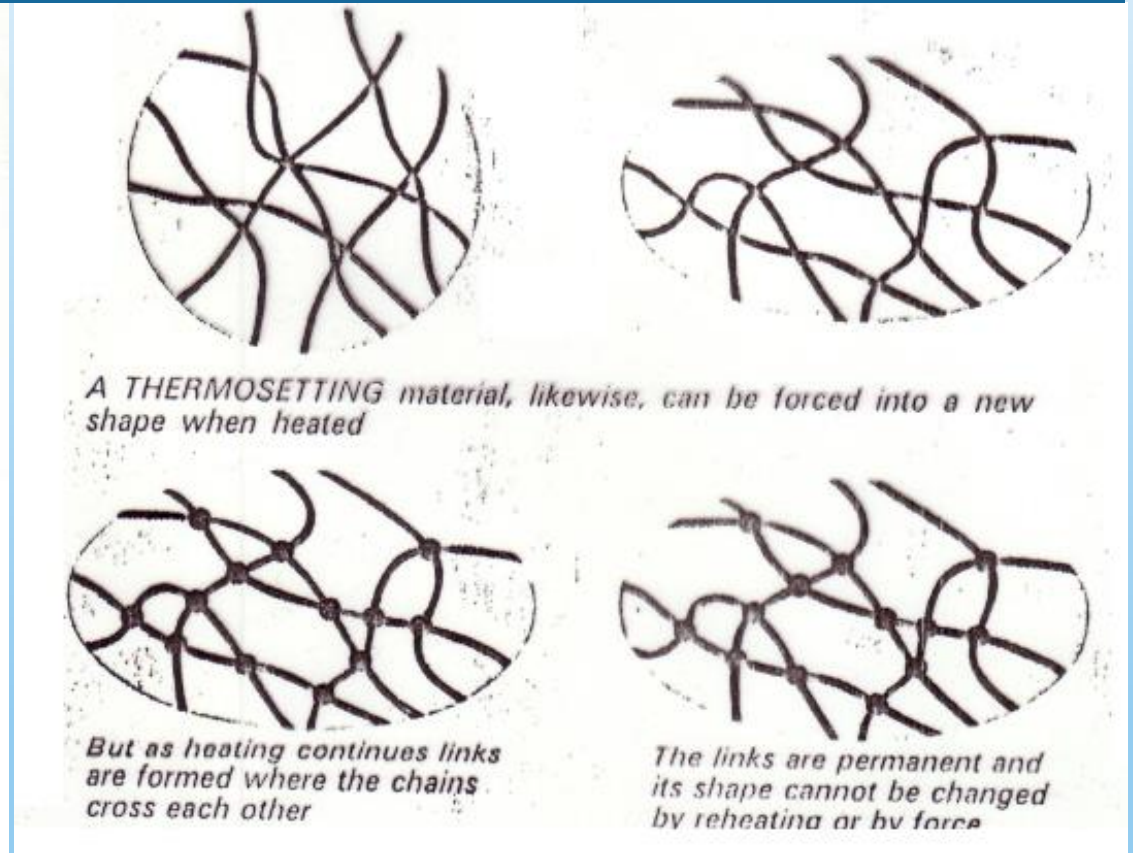
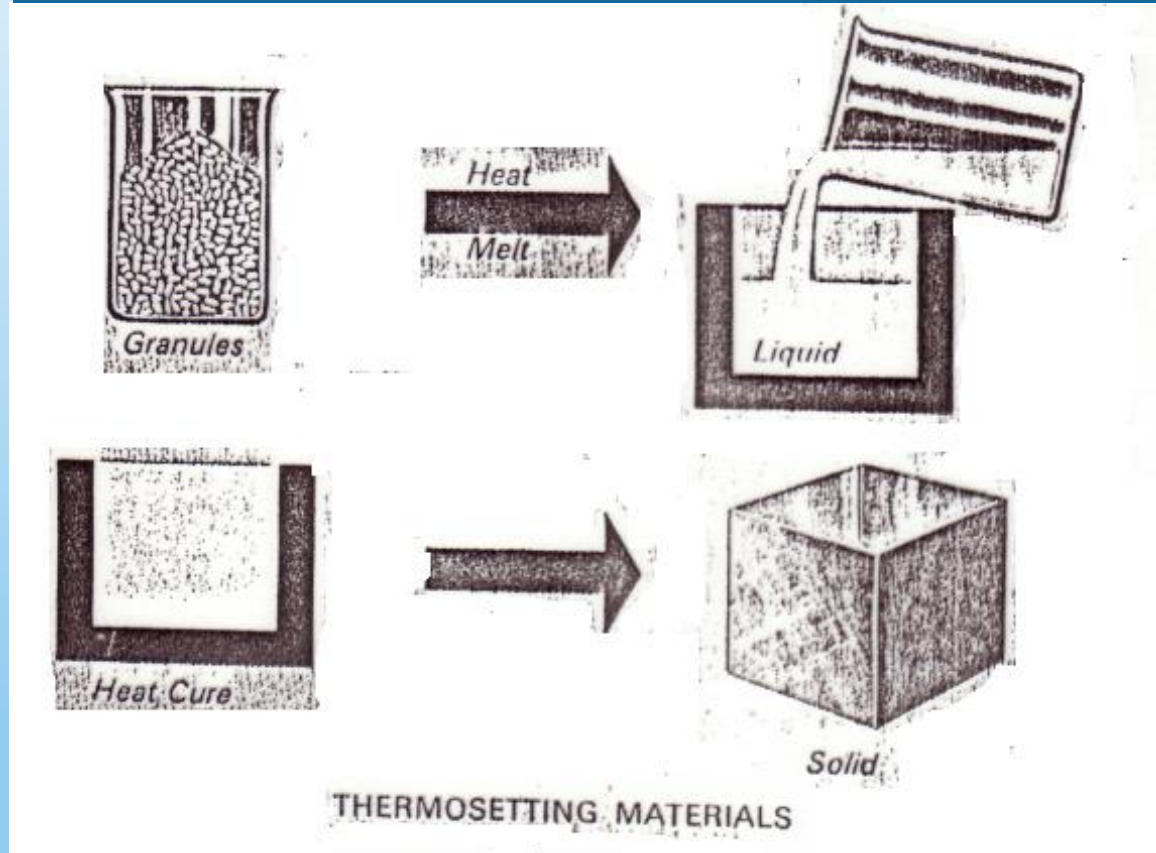
Heating Profile



- Το heating profile που θα επιλέξουμε καθώς και η ποσότητα (τα phr) της αμίνης που θα προσθέσουμε, αλλά και εν γένει η όλη διαδικασία κατασκευής που θα ακολουθήσουμε, επηρεάζουν σημαντικά τις τελικές ιδιότητες της ρητίνης που θα παρασκευάσουμε.
- Όσο περισσότερη αμίνη (ΤΕΤΑ) προσθέτουμε, τόσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα των σταυροδεσμών και τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος πολυμερισμού.

ΘΕΡΜΟΣΚΛΗΡΥΝΟΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ

Thermosetting Polymers



Θερμοπλαστικά

Ένα θερμοπλαστικό είναι ένα πλαστικό υλικό, συνήθως ένα πολυμερές, που γίνεται ευλύγιστο ή εύπλαστο πάνω από μια συγκεκριμένη θερμοκρασία ενώ στερεοποιείται με ψύξη.

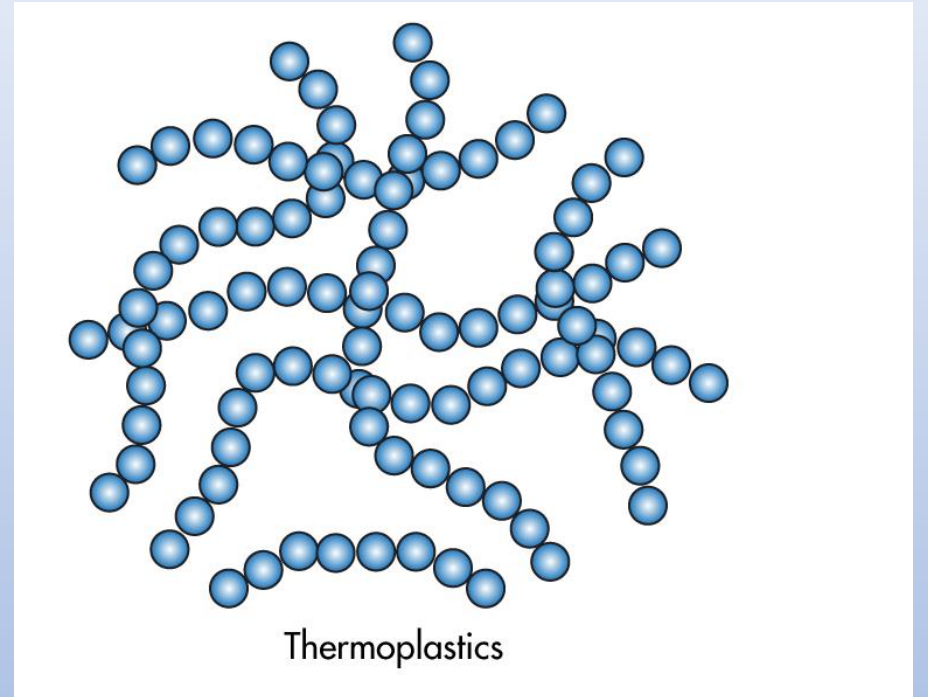
Τα περισσότερα θερμοπλαστικά έχουν μια υψηλή σχετική μοριακή μάζα. Οι αλυσίδες του πολυμερούς συνδέονται με διαμοριακές δυνάμεις, που εξασθενούν γρήγορα με αύξηση της θερμοκρασίας, παράγοντας ένα ιξώδες υγρό. Συνεπώς, τα θερμοπλαστικά μπορούν να μορφοποιηθούν με θέρμανση και χρησιμοποιούνται συνήθως για να παραγάγουν κομμάτια για χύτευση με έγχυση.

Τα θερμοπλαστικά διαφέρουν από τα θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά, δεδομένου ότι δεν σχηματίζουν σταυροδεσμούς.

Τα θερμοπλαστικά κατά το στάδιο της παρασκευής τους μπορεί να αναπτύξουν κρυσταλλίτες. Ο σχηματισμός των κρυσταλλιτών συμβαίνει κατά την φάση της ψύξης. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα ψύξης, τόσο μικρότεροι είναι οι κρυσταλλίτες. Αντίθετα, όσο μικρότερη είναι η ταχύτητα ψύξης, τόσο μεγαλύτεροι είναι οι κρύσταλλοι που θα αναπτυχθούν.

Θερμοπλαστικά (*Thermoplastics*)

1. Τα θερμοπλαστικά αποτελούνται από μακρομόρια που προέρχονται από τον πολυμερισμό μονομερών.
2. Είναι όλκιμα υλικά. Εμφανίζουν δηλαδή μεγάλη παραμόρφωση θραύσης.
3. Κατά την αποφόρτιση παρουσιάζουν παραμένουσες παραμορφώσεις (πλαστικές παραμορφώσεις).
4. Με τη θέρμανση ρέουν και επομένως μπορούν να επαναμορφοποιηθούν.
5. Δεν σχηματίζουν σταυροδεσμούς και επομένως ακόμη και σε μικρά φορτία παρουσιάζουν μεγάλες παραμορφώσεις.
6. Ακόμη και σε θερμοκρασία δωματίου, η συμπεριφορά τους είναι ιξωδοελαστική.

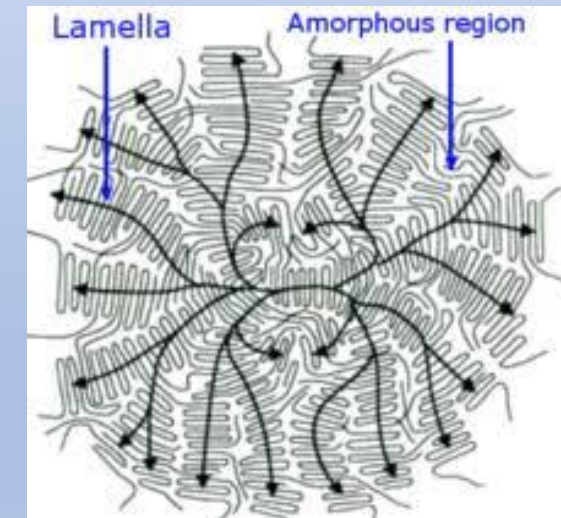
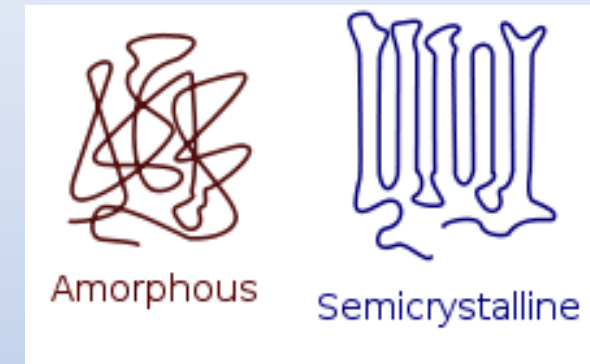


Ημικρυσταλλικά και Άμορφα Θερμοπλαστικά

The International Association of Plastics Distributors

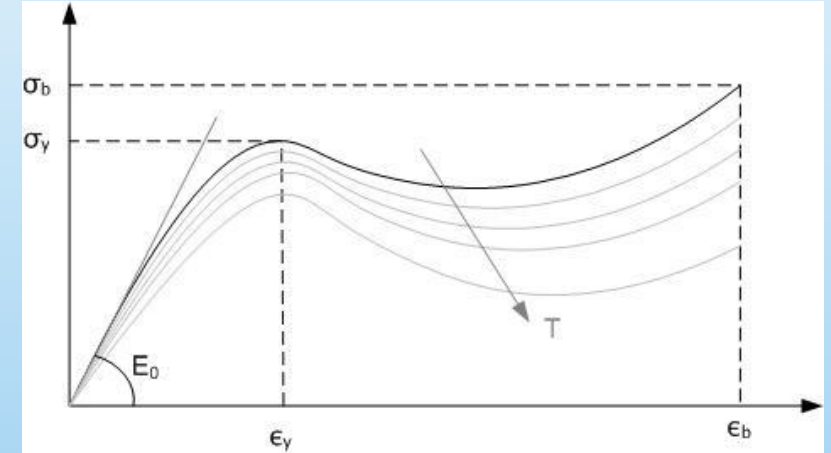
Amorphous vs. Crystalline Thermoplastics

- **Amorphous** (a-morphous = without shape) - The polymer chains are in random arrangement. Molecular structure is incapable of forming regular order (crystallizing) with molecules or portions of molecules regularly stacked in crystal-like fashion. Molecular arrangement is randomly twisted, kinked and coiled.
- **Crystalline** - The polymer chains form a regular pattern. Molecular structure forms regular order (crystals) with molecules or portions of molecules regularly stacked in crystal-like fashion. Molecular arrangement is arranged in an ordered fashion.



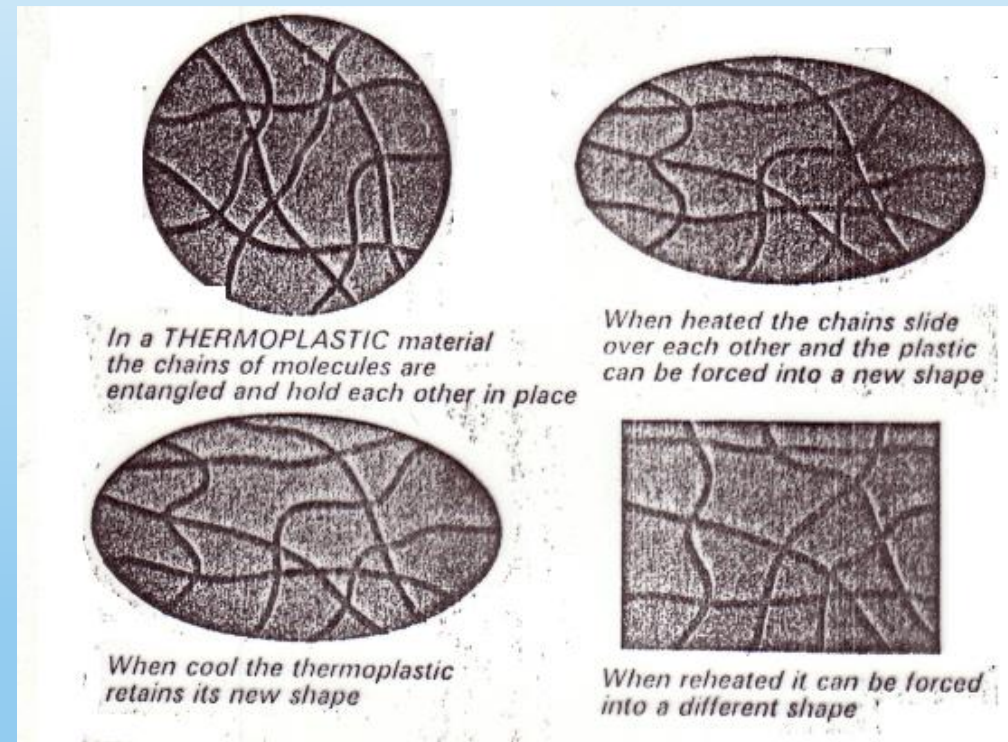
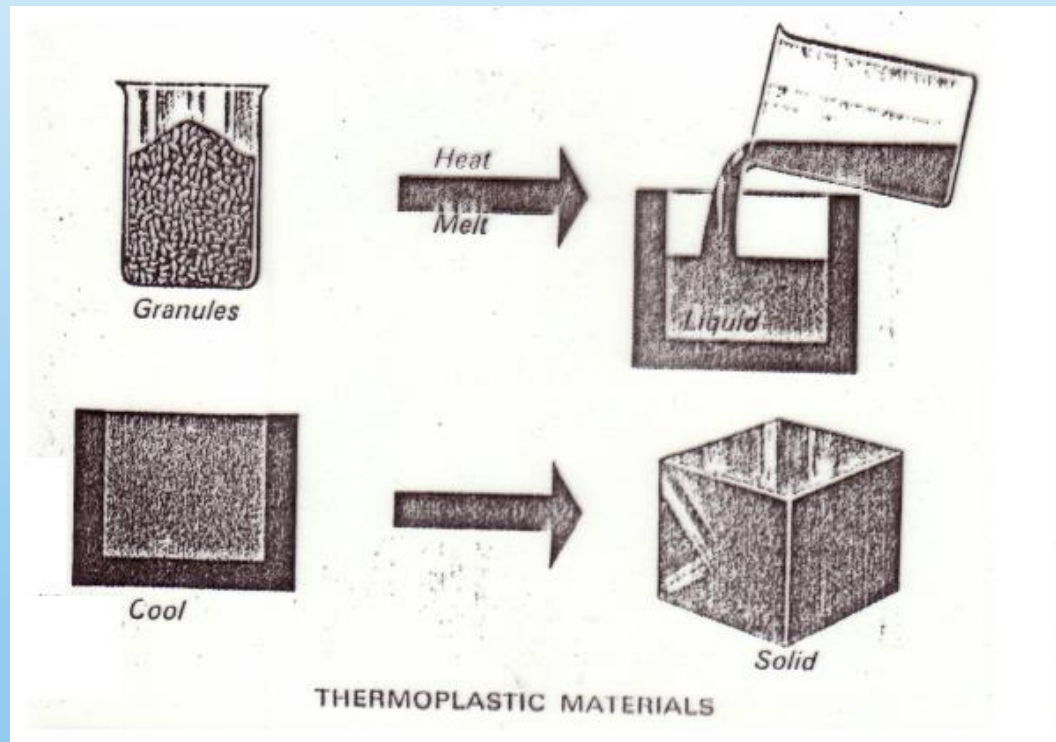
ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΑ

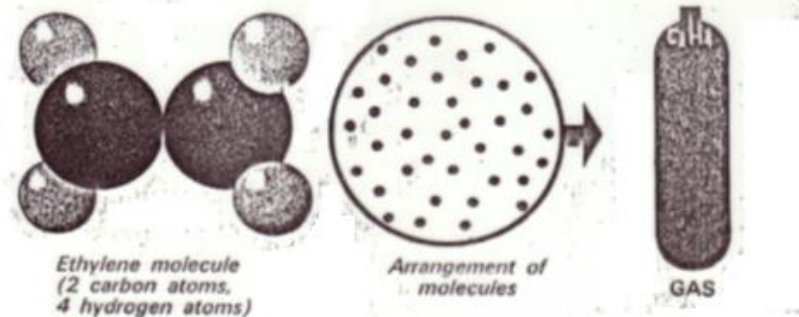
Κάποια θερμοπλαστικά που δεν είναι πλήρως κρυσταλλωμένα, κάτω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, T_g , διατηρούν κάποια ή όλα τα άμορφα χαρακτηριστικά τους. Τα άμορφα και ημιάμορφα πλαστικά χρησιμοποιούνται όταν είναι απαραίτητη υψηλή οπτική διαύγεια, επειδή το φως σκεδάζεται έντονα από κρυσταλλίτες μεγαλύτερους από το μήκος κύματος τους. Τα άμορφα και ημιάμορφα πλαστικά αντιστέκονται λιγότερο σε χημικές επιθέσεις και σε περιβαλλοντική ρηγμάτωση από τάση, επειδή τους λείπει η κρυσταλλική δομή.



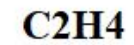
Η ψαθυρότητα μπορεί να μειωθεί με την προσθήκη **πλαστικοποιητών** (*plasticizers*), που αυξάνουν την κινητικότητα των άμορφων τμημάτων της αλυσίδας και μειώνουν την T_g . Η τροποποίηση του πολυμερούς μέσω συμπολυμερισμού ή με την προσθήκη μη δραστικής πλευρικής αλυσίδας στα μονομερή πριν τον πολυμερισμό μπορεί επίσης να μειώσει την T_g . Πριν την εφαρμογή αυτών των τεχνικών, τα πλαστικά τμήματα των οχημάτων εθραύοντο συχνά όταν εκτίθεντο σε χαμηλές θερμοκρασίες. Πρόσφατα, έχουν γίνει διαθέσιμα θερμοπλαστικά ελαστομερή.

Thermoplastics

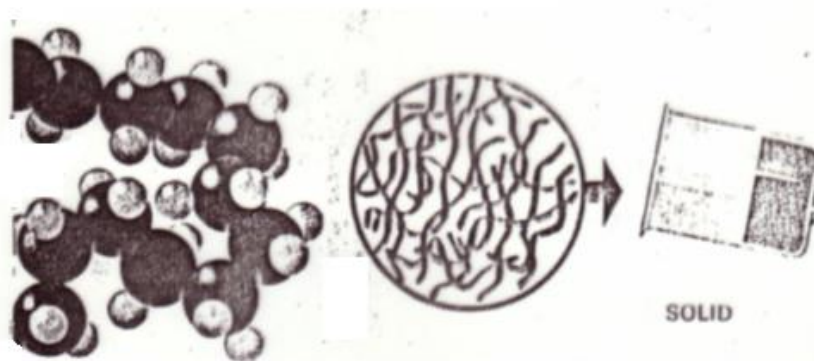




Ethylene molecule (2 carbon atoms, 4 hydrogen atoms)



With the addition of a catalyst the molecules join together and begin to form chains



When polymerization is complete, the long chains are tangled together forming polythene.

Θερμοπλαστικά

Πολυπροπυλένιο - PP

Συσκευασία τροφίμων, οικιακές συσκευές.

Πολυαιθυλένιο - PE

Πλαστικές σακούλες, πλαστικές φιάλες, σωλήνες.

Χλωριούχο πολυβινύλιο ή πολυβινυλοχλωρίδιο - PVC

Μόνωση ηλεκτρικών καλωδίων, δίσκοι γραμμοφώνων, κουφώματα.

Νάιλον ή πολυαμίδιο - PA

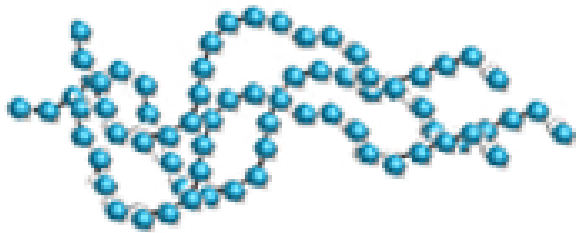
Διακόπτες, πρίζες, τάπητες, μελανοταινίες, συνθετικά υφάσματα, πετονιά.

Types of Thermoplastics

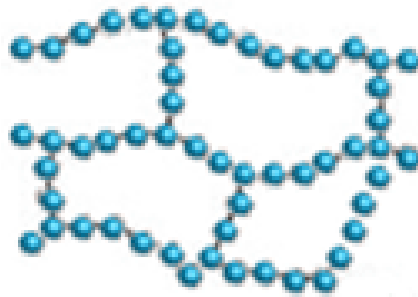
Thermoplastic	Composition	Uses
Polyethylene, PE	$\left(\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ -\text{C}- \\ \\ \text{H} \end{array} \right)_n$	Tubing, film, bottles, cups, electrical insulation, packaging.
Polypropylene, PP	Partly crystalline. $\left(\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{CH}_3 \end{array} \right)_n$ Partly crystalline.	Same uses as PE, but lighter, stiffer, more resistant to sunlight.
Polytetrafluoroethylene, PTFE	$\left(\begin{array}{c} \text{F} \\ \\ -\text{C}- \\ \\ \text{F} \end{array} \right)_n$ Partly crystalline.	Teflon. Good, high-temperature polymer with very low friction and adhesion characteristics. Non-stick saucepans, bearings, seals.
Polystyrene, PS	$\left(\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} \right)_n$ Amorphous.	Cheap moulded objects. Toughened with butadiene to make high-impact polystyrene (HIPS). Foamed with CO ₂ to make common packaging.
Polyvinylchloride, PVC	$\left(\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{Cl} \end{array} \right)_n$ Amorphous.	Architectural uses (window frames, etc.). Plasticised to make artificial leather, hoses, clothing.
Polymethylmethacrylate, PMMA	$\left(\begin{array}{cc} \text{H} & \text{CH}_3 \\ & \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{COOCH}_3 \end{array} \right)_n$ Amorphous.	Perspex, lucite. Transparent sheet and mouldings. Aircraft windows, laminated windcreens.
Nylon 66	$(-\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NO}-)_n$ Partly crystalline when drawn.	Textiles, rope, mouldings.

Ελαστομερή (*Elastomers*)

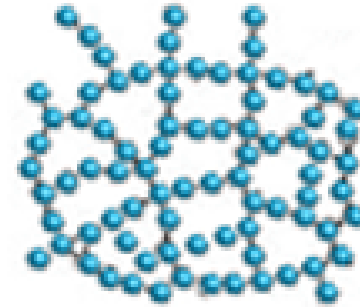
1. Τα ελαστομερή είναι μια ενδιάμεση κατάσταση άμορφων πολυμερών
2. Έχουν ελάχιστο αριθμό σταυροδεσμών.
3. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι οι τεράστιες παραμορφώσεις που μπορούν να λάβουν.
4. Η συμπεριφορά τους είναι μη γραμμικά ελαστική με μέτρο ελαστικότητας $E < 1\text{GPa}$
5. Μπορούμε να αναπτύξουμε σε αυτά επιπλέον σταυροδεσμούς μέσω βουλκανισμού.



Thermoplastic



Elastomer



Thermoset

Physical Behavior & Architecture

- Thermoplastics

Polystyrene
Polyvinylchloride

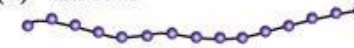
- Elastomers

Synthetic rubbers
Poly-cis-isoprene

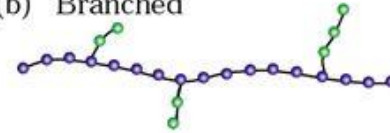
- Thermosets

Phenolic Resins
Melamines
epoxies

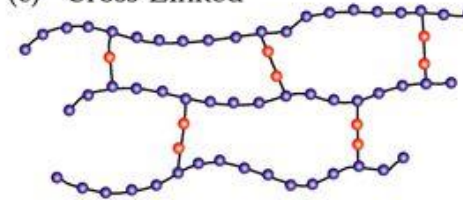
(a) Linear



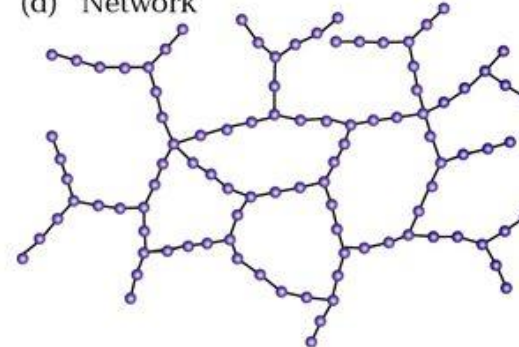
(b) Branched



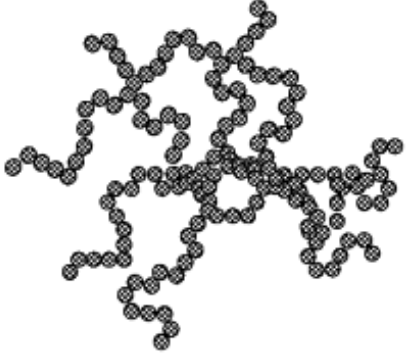
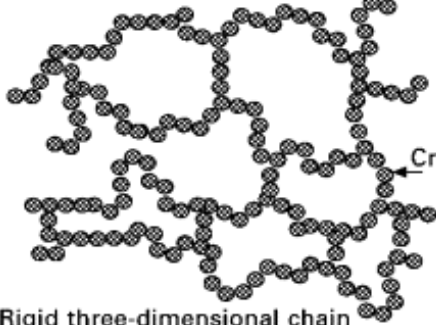
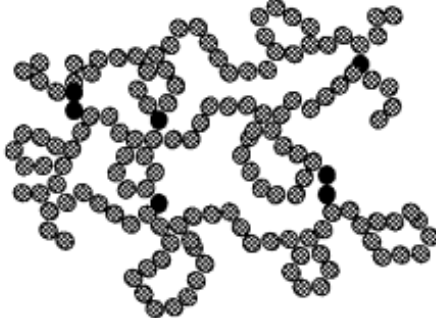
(c) Cross-Linked



(d) Network



Σχέση Δομής – Ιδιοτήτων των Πολυμερών

Thermoplastic • moderate stiffness • moderate strength • high ductility • high impact resistance • poor creep resistance • recyclable	 Flexible linear chains with no crosslinking
Thermoset polymer • high stiffness • high strength • high creep resistance • low/moderate ductility • poor impact resistance • cannot be recycled	 Rigid three-dimensional chain structure with crosslinking
Elastomer • very low stiffness • low strength • very high elasticity • excellent impact resistance • not easily recycled	 Linear coiled chains with some crosslinking

Σύγκριση τιμών Μηχανικών Ιδιοτήτων Θερμοσκληρυνόμενων και Θερμοπλαστικών Πολυμερών

	THERMOSETS	THERMOPLASTICS
Young's Modulus (GPa)	1.3-6.0	1.0-4.8
Tensile Strength (MPa)	20-180	40-90
Fracture Toughness		
K_{IC} (MPa m ^{1/2})	0.3-1.0	1.5-6.0
G_{IC} (kJ/m ³)	0.02-0.2	0.7-6.5
Maximum Service Temperature (°C)	50-450	25-230

Thermosetting Plastics

Name	Common name	Properties and working characteristics	Uses
Epoxy resin (ER)	Araldite	Excellent adhesive qualities, low shrinkage, strong when reinforced	Bonding, encapsulation, laminating, surface coating
Melamine formaldehyde (MF)	Formica Melaware	Waterproof, tasteless, odourless, mark and scratch resistant	Worktops, tableware, buttons, electrical insulation
Urea formaldehyde	Aerolyte Cascamite	Good adhesive qualities, stiff, hard, brittle, good electrical insulator	Electrical fittings, paper and textile coating, wood adhesive
Polyester resin (PR)	Orel Beetle	Stiff, hard, brittle, resilient as laminated GRP, formed without heat or pressure	Panels for car bodies and hulls, casting, embedding

Τυπικές Ιδιότητες κάποιων Θερμοπλαστικών

	Acrylic (PMMA)	Nylon 6.6	Polycarbonate (PC)	Polypropylene (PP)
Density (Mg/m ³)	1.2	1.1	1.1 – 1.2	0.9
Young's Modulus (GPa)	3.0	1.4 – 2.8	2.2 – 2.4	1.9 – 2.4
Tensile Strength (MPa)		60 - 70	45 - 70	25 - 38
Ductility (%)		30 - 100	90 - 110	100 - 600
Fracture Toughness				
K _{IC} (MPa m ^{1/2})	1.5			
Thermal Expansion Coefficient (CTE) (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	50 - 90	90		
Glass Transition Temperature (°C)	90 - 105		150	
Melting Point (°C)		261		175

Examples of thermoplastics

Type of plastic	Plastic group	Uses
Cellulosics	thermoplastic	Toys , lamp shades , partition ,shelf covers, storage boxes, ice crushers, juicer bowls ,vacuum parts, tool handles pipes ,spectacle frames
Nylon	thermoplastic	Slide fasteners, combs , brushes and bristles, baby dishes , funnels , salad spoon and fork ,washer ,gaskets
Polyethylene	thermoplastic	Squeeze bottles, ice trays, toys, storage boxes, flashlights , wiring, pipe, kitchen- ware (Can be film, semi rigid, rigid, or coating)
Polystyrene	thermoplastic	Canisters, storage boxes, wall tile, picnicware, toys, refrigerator door, liners and bins radio, phonograph, and air conditioner, housings light fixtures
Vinyl	thermoplastic	Raincoats, upholstery, tile, inflatable, curtains, toys, luggage, baby pants and pads, records (Can be film, sheeting, semi rigid, rigid, coating)
Acrylic	thermoplastic	Bowls, trays, partition, roofing, handbags, eye glasses, light fixtures, table appointments, bookends, dresser sets , window glazing ,picture frames

Μειονεκτήματα των Θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών

What are the disadvantages of thermosets ?

1. A relatively low resistance at elevated temperatures
2. A short lifetime when mixed and ready to use
3. The inability when fully cured to undergo large scale plastic deformation and so facilitate the forming of composites.
4. Low mechanical properties and electrical and thermal conductivity
5. A high coefficient of thermal expansion and poor resistance to creep and impact.

Ποιες Θερμοσκληρυνόμενες Ρητίνες χρησιμοποιούνται σαν μήτρες σε Σύνθετα Υλικά?

Which are the main thermosets used as matrices?

1. Polyesters
2. Epoxides
3. Phenolics
4. Polyimides
5. Rubber/Polyurethane modified Epoxides
6. Xyloks
7. Bismaleimides (BMI)
8. Polystyryl Pyridine (PSP)
9. Polyphenylene Quinoxialine (PPQ)

Ποια είναι τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των θερμοσκληρυνόμενων που προαναφέραμε?

1. **Polyesters:** Polyesters were the first type of thermosets used with glass fibers, to produce radomes for aircraft in the 1940's and these resins still account for the majority of reinforced plastic fabrication throughout the world.

POLYESTERS	
ADVANTAGES	DISADVANTAGES
1. Polyesters are one of the cheapest resins available	Polyesters being non-polar, do not bond well to fibers
2. They have low viscosity so that they are easy to work	They have relatively high shrinkage (4-8%)
3. They can be cured at ambient or elevated temperatures with no need of post-cure	
4. They are suitable for fabrication of very large structures	

Εποξειδικές Ρητίνες (Epoxides)

- 2. Epoxides:** Epoxides, although are more expensive and more viscous than polyesters, have been and are the more extensively used type of matrix for composites based on continuous carbon, glass and aramid fibers.
- The resin is mixed with a hardener and heated for 1 to 8 hours or more at a temperature of up to 160°C – 180°C to produce a hard, insoluble, cross-linked structure.
 - Common hardeners are aromatic amines and acid anhydrides. An accelerator is often used with the latter. The liquid resin mix is workable at a viscosity of up to approximately 3Pas and may have a lifetime in this state, depending on the ingredients and temperature, of up to 20 hours or more.
 - Epoxides can be modified by the addition of rubber particles or urethane which concure with the resin to improve impact and fracture toughness.

Εποξειδικές Ρητίνες (Epoxydes)

EPOXIDES	
ADVANTAGES	DISADVANTAGES
1. They are usually cured in two or more stages. This allows preforms to be pre-impregnated with the epoxy in a partially cured state (pre-pregs)	They are more expensive than polyesters
2. The shrinkage on curing is smaller than for polyesters (1-5%)	They are more viscous than polyesters
3. They are stiffer and stronger than polyesters	They are more brittle than polyesters
4. They maintain their properties to higher temperatures than polyesters	

Φαινόλες (Phenolics)

3. Phenolics: They are the oldest thermosets, and they are divided into two major types: Resoles (one stage resins), and Novolacs (two stage resins, which require the addition of an agent prior to fabrication).

PHENOLICS	
ADVANTAGES	DISADVANTAGES
1. Low cost	Volatile by products are evolved during curing, hence high pressures are often necessary in composite production
2. Good balance of properties	More brittle than epoxides
3. Good fire resistance	Shrink more than epoxides

Πολυιμίδια (Polyimides)

4. *Polyimides (PI)*: PI and BMI resins are two which are used as replacements for epoxides in high performance aircraft and aerospace structures. PI's can be thermosets or thermoplastics.

POLYIMIDES	
ADVANTAGES	DISADVANTAGES
1. They are capable of continuous use in the temperature range 288-316oC and some have been safely exposed to temperature of 760oC for short period of time	Expensive
2. They can be used to impregnate usually, carbon fibers to make a prepreg	Require long, complex, high temperature cure cycles
3. High stiffness	Very variable
4. Low thermal expansion coefficient	They are brittle

Xylocs and BMI

5. Xylocs: They are a specialized development

6. BMI: They are used as replacements for epoxides in high performance aircraft and aerospace structures.

BMI	
ADVANTAGES	DISADVANTAGES
1. High Tg (290°C)	They are brittle
2. The temperature for continuous use is 200°C	Low strain-to-failure (max 2%)
3. They can be used to impregnate, usually, carbon fibers to make prepreg	

PSP and PPQ

6. *PSP*: This type of resin originally developed for ablative applications also looks promising. It can be used to impregnate, usually, carbon fibers to make prepreg.

7. *PPQ*: This type of resin is only at the laboratory stage.

Some typical properties of thermosets

	Epoxy	Polyester	Phenolics	Polyimides
Density (Mg/m³)	1.1 - 1.4	1.1 – 1.5	1.3	1.2 – 1.9
Young's Modulus (GPa)	2.1 - 6.0	1.3 – 4.5	4.4	3 – 3.1
Tensile Strength (MPa)	35 - 90	45 - 85	50 - 60	80 - 190
Fracture Toughness				
K_{IC} (MPa m^{1/2})	0.6 – 1.0	0.5		
G_{IC} (kJ/m³)	0.02			0.3 – 0.9
Thermal Expansion Coefficient (CET) (10⁻⁶ K⁻¹)	35 - 110	100 - 200	45 - 110	14 - 90
Glass Transition Temperature (°C)	120 - 190			

- THERMOPLASTIC MATRICES**

Among the many thermoplastics employed as matrices are:

NAME	Abr/tion	Max.Service Temp °C
Nylon 66,		
Polyethylene terephthalate	(PET)	
Polybutylene terephthalate	(PBT)	
Polysulphone	(PS)	150-170
Polyethersulphone	(PES)	180
Polyphenylene sulphide	(PPS)	200
Polyamide imide	(PAI)	
Polyether ether ketone	(PEEK)	250

Thermoplastic matrices have the following advantages and disadvantages over Thermosets:

ADVANTAGES	DISADVANTAGES
1. Improved toughness	1. High viscosity of the molten polymer which makes fiber impregnation difficult
2. Indefinite shelf life	2. High fabrication temperatures
3. Short fabrication cycles	3. More difficult processing
4. Improved high temperature and solvent resistance	4. More expensive

PROPERTIES OF SELECTED THERMOSETS

Mechanical Properties Data for the Thermosetting Polymers

Category	Polymer	E^* [MPa (ksi)]	E_{D5}^b [MPa (ksi)]	T.S. [MPa (ksi)]	Percent Elongation at Failure	Rockwell Hardness R scale ^c	Impact Energy ^d [J (ft · lb)]	K_{IC} (MPa $\sqrt{m}$)
Thermosets	Phenolics (phenolformaldehyde)	6900 (1000)	—	52 (7.5)	0	125	0.4 (0.3)	—
	Urethanes	—	—	34 (5)	—	—	—	—
	Urea-melamine	10,000 (1500)	—	48 (7)	0	115	0.4 (0.3)	—
	Polyesters	6900 (1000)	—	28 (4)	0	100	0.5 (0.4)	—
	Epoxies	6900 (1000)	—	69 (10)	0	90	1.1 (0.8)	0.3–0.5
Elastomers	Polybutadiene/polystyrene copolymer	—	—	—	—	—	—	—
	Vulcanized	1.6 (0.23)	0.8 (0.12)	1.4–3.0 (0.20–0.44)	440–600	—	—	—
	Vulcanized with 33% carbon black	3–6 (0.4–0.9)	8.7 (1.3)	17–28 (2.5–4.1)	400–600	—	—	—
	Polyisoprene	—	—	—	—	—	—	—
	Vulcanized	1.3 (0.19)	0.4 (0.06)	17–25 (2.5–3.6)	750–850	—	—	—
	Vulcanized with 33% carbon black	3.0–8.0 (0.44–1.2)	6.2 (0.90)	25–35 (3.6–5.1)	550–650	—	—	—
	Polychloroprene	—	—	—	—	—	—	—
	Vulcanized	1.6 (0.23)	0.7 (0.10)	25–38 (3.6–5.5)	800–1000	—	—	—
	Vulcanized with 33% carbon black	3–5 (0.4–0.7)	2.8 (0.41)	21–30 (3.0–4.4)	500–600	—	—	—
	Polyisobutene/polyisoprene copolymer	—	—	—	—	—	—	—
	Vulcanized	1.0 (0.15)	0.4 (0.06)	18–21 (2.6–3.0)	750–950	—	—	—
	Vulcanized with 33% carbon black	3–4 (0.4–0.6)	3.6 (0.52)	18–21 (2.6–3.0)	650–850	—	—	—
	Silicones	—	—	7 (1)	4000	—	—	—
	Vinylidene fluoride/ hexafluoropropylene	—	—	12.4 (1.8)	—	—	—	—

PROPERTIES OF SELECTED THERMOPLASTICS

Mechanical Properties Data for the Thermoplastic Polymers

Category	Polymer	E^* [MPa (ksi)]	E_{Res}^b [MPa (ksi)]	T.S. [MPa (ksi)]	Percent Elongation at Failure	Rockwell Hardness R scale ^c	Impact Energy ^d [J (ft · lb)]	K_{IC} (MPa $\sqrt{\text{m}}$)	Poisson's Ratio ν	Fatigue ^e Limit [MPa (ksi)]	DTUL (°C)
General-use polymers	Polyethylene										
	High-density	830 (120)		28 (4)	15–100	40	1.4–16 (1–12)	2			
	Low-density	170 (25)		14 (2)	90–800	10	22 (16)	1			
	Polyvinylchloride	2800 (400)		41 (6)	2–30	110	1.4 (1)	—			
	Polypropylene	1400 (200)		34 (5)	10–700	90	1.4–15 (1–11)	3			
	Polystyrene	3100 (450)		48 (7)	1–2	75	0.4 (0.3)	2			
	ABS	2100 (300)		28–48 (4–7)	20–80	95	1.4–14 (1–10)	4			
	Acrylics (Lucite)	2900 (420)		55 (8)	5	130	0.7 (0.5)	—			
	Cellulosics	3400–28,000 (500–4000)		14–55 (2–8)	5–40	50 to 115	3–11 (2–8)	—			
Engineering polymers	Polyesters	— (—)	8960 (1230)	158 (22.9)	2.7	120	1.4 (1)	0.5		40.7 (5.9)	224
	Polyamides (nylon 66)	2800 (410)	2830 (410)	82.7 (12.0)	60	121	1.4 (1)	3	0.41		
	Polycarbonates	2400 (350)		62 (9)	110	118	19 (14)	1.0–2.6			
	Acetals	3100 (450)	2830 (410)	69 (10)	50	120	3 (2)	—	0.35	31 (4.5)	136
	Polytetrafluoroethylene (Teflon)	410 (60)		17 (2.5)	100–350	70	5 (4)	—			
Thermoplastic elastomers	Polyester-type		585 (85)	46 (6.7)	400						50

Thermoplastics vs. Thermosetting plastics

Thermoplastics

1. Soften on heating
2. Long chain linear
3. By addition polymerisation
4. Can be reshaped and reused
5. Soft weak and less brittle
6. Soluble in org. solvents
7. Reclaimed for wastes

Thermosetting polymers

1. Do not soften on heating
2. 3-D structure
3. By condensation polymerisation
4. Can not be reshaped
5. Hard and strong
6. Insoluble in org. solvents.
7. Can not be reclaimed

THERMOPLASTIC VERSUS THERMOSETTING PLASTIC

Thermoplastic has covalent bonds between monomers and weak van der Waal interactions between monomer chains.

Thermosetting Plastic has strong cross-links and a 3D network of covalently bonded atoms. The stiffness of plastic increases with the number of cross-links in the structure.

It is synthesised by addition polymerization.

It is synthesised by condensation polymerization.

It is processed by injection moulding, extrusion process, blow moulding, thermoforming process, and rotational moulding.

It is processed by compression moulding, reaction injection moulding.

This is lower in molecular weight, compared to thermosetting plastic.

This is high in molecular weight.

This has a low melting point, low tensile strength, stiffness, brittleness, rigidity and durability.

This has high melting point, high tensile strength, stiffness, brittleness, rigidity and durability.

Visit www.Pediaa.com

POLYMER VERSUS ELASTOMER

A polymer is a macromolecule that is composed of a large number of repeating units

An elastomer is a type of polymer having the specific characteristic feature of elasticity

Have different physical properties depending on their structures

Have the unique physical property of elasticity

Morphology varies from crystalline to amorphous structures

Amorphous polymers

Can rupture when a pressure is applied

Can withstand high pressures due to elasticity

Most except elastomers are stiff and rigid

Flexible

Visit www.Pediaa.com

AMORPHOUS SOLIDS VERSUS CRYSTALLINE SOLIDS

Amorphous solids do not have an ordered structure

Crystalline solids have an ordered structure

Do not have a sharp melting point

Have a sharp melting point

Have no characteristic heat of fusion

Have a definite heat of fusion

Isotropic since they have the same physical properties in all directions

Anisotropic since their physical properties are different in different directions

Have covalently bonded networks

Have covalent bonds, ionic bonds, van der Waal's bonds and metallic bonds

Visit www.Pediaa.com

Properties of Thermoplastics

Properties of thermoplastics

	Acrylic (PMMA)	Nylon (6.6)	Polycarbonate	Polypropylene
Density (Mg/m^3)	1.2	1.1	1.1-1.2	0.9
Young's modulus (GPa)	3.0	1.4-2.8	2.2-2.4	1.9-1.4
Tensile strength (MPa)		60-70	45-70	25-38
Ductility (%)		30-100	90-110	100-600
Fracture toughness K_{Ic} ($\text{MPa m}^{1/2}$)	1.5			
Thermal expansion (10^{-6} K^{-1})	50-90	90		
Glass trans. temp. ($^{\circ}\text{C}$)	90-105		150	
Melting point ($^{\circ}\text{C}$)		261		175

Table 1.1

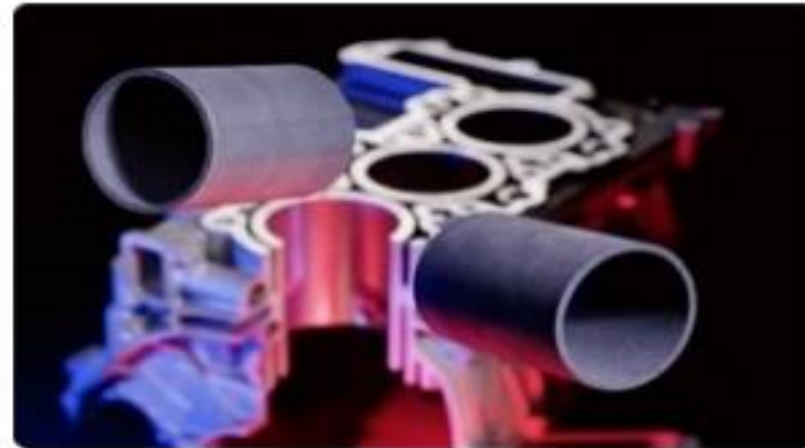
Resin		T_g $^{\circ}\text{C}$	M. pt. $^{\circ}\text{C}$
Polyetheretherketone	PEEK	143	334
Polyarylenesulphide	PAS	215	
Polyphenylenesulphide	PPS	90	280
Polyethersulphone	PES	230	250
Polyetherimide	PEI	210	250
Polyetherketone	PEK	165	350
Polyimide	PI	320	360

Unreinforced thermoplastics - physical and mechanical properties

Property	PA6/6	PP	PEI	PES	PPS	PEEK
Density (gcm^{-3})	1.14	0.9	1.27	1.37	1.34	1.32
Tensile strength (MPa)	81	25	104	84	74	100
Flex. strength (MPa)	103	33	145	129	96	110
Flex. modulus (GPa)	2.8	1.1	3.3	2.5	4.1	3.8
HDT ($^{\circ}\text{C}$ at 1.82 MPa)	95	54	180	180	125	165
CTE α (10^{-5} K^{-1}) ^a	8.1	8	6.1	5.5	5.4	4.7
Cost (1986)/p/cc	0.25	0.1	1.24	1.03	1.04	5.28

Metal matrix composites (MMC)

- Metal matrix composites (MMCs) are a subgroup of composite materials.
- **Composition:**
- MMC are made by dispersing a reinforcing material into a metal matrix. The reinforcement surface can be coated to prevent a chemical reaction with the matrix.
- **Reinforcement:** Carbon fibres are commonly used as reinforcement in aluminum matrix.
- **Matrix:**
- In structural applications, the matrix is usually a lighter metal such as aluminum, magnesium, or titanium, and provides a compliant support for the reinforcement.



METAL MATRICES

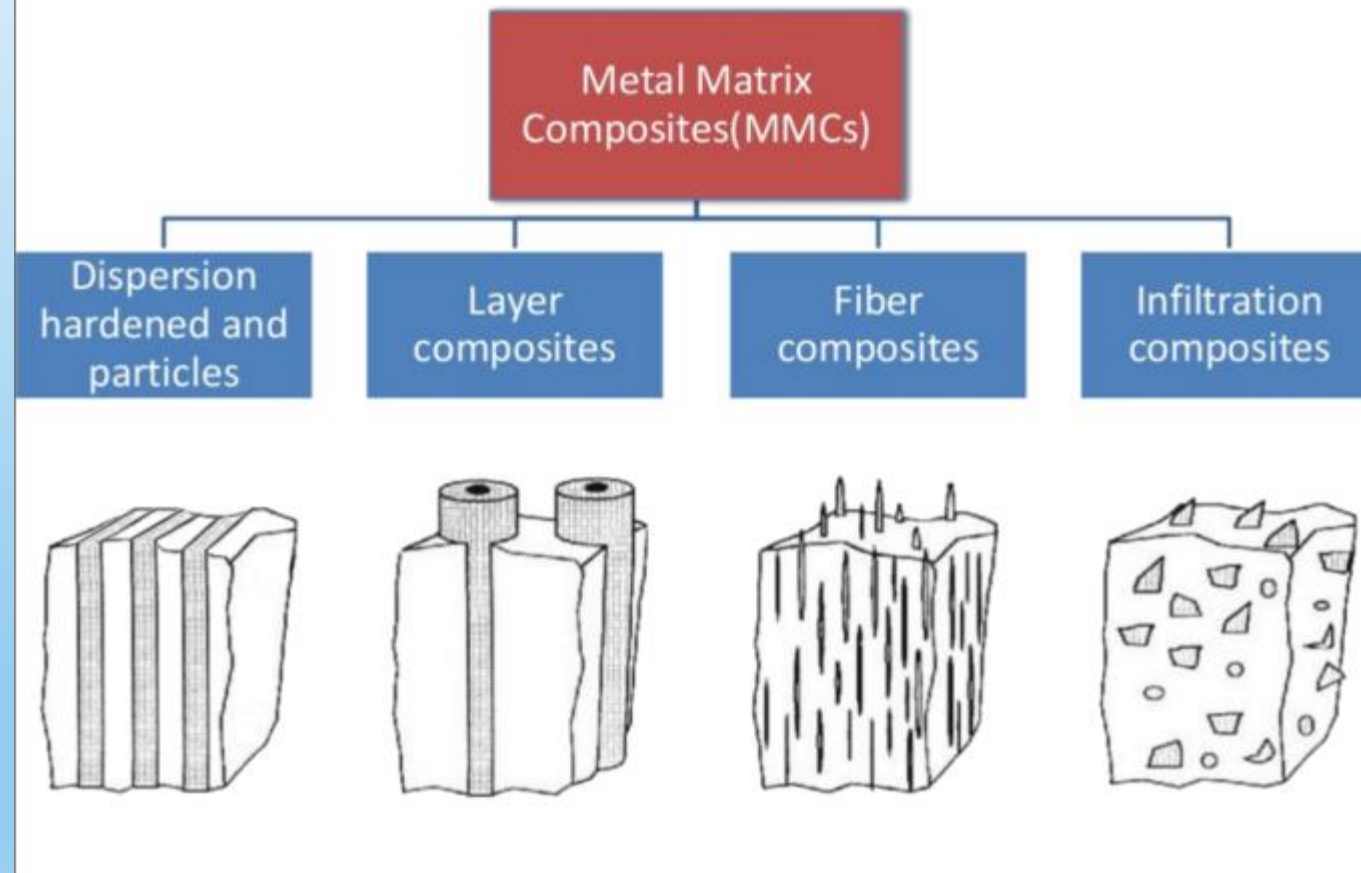
The principal metals employed to date are: Aluminium, Aluminium alloys, Titanium and Titanium alloys, and Magnesium.

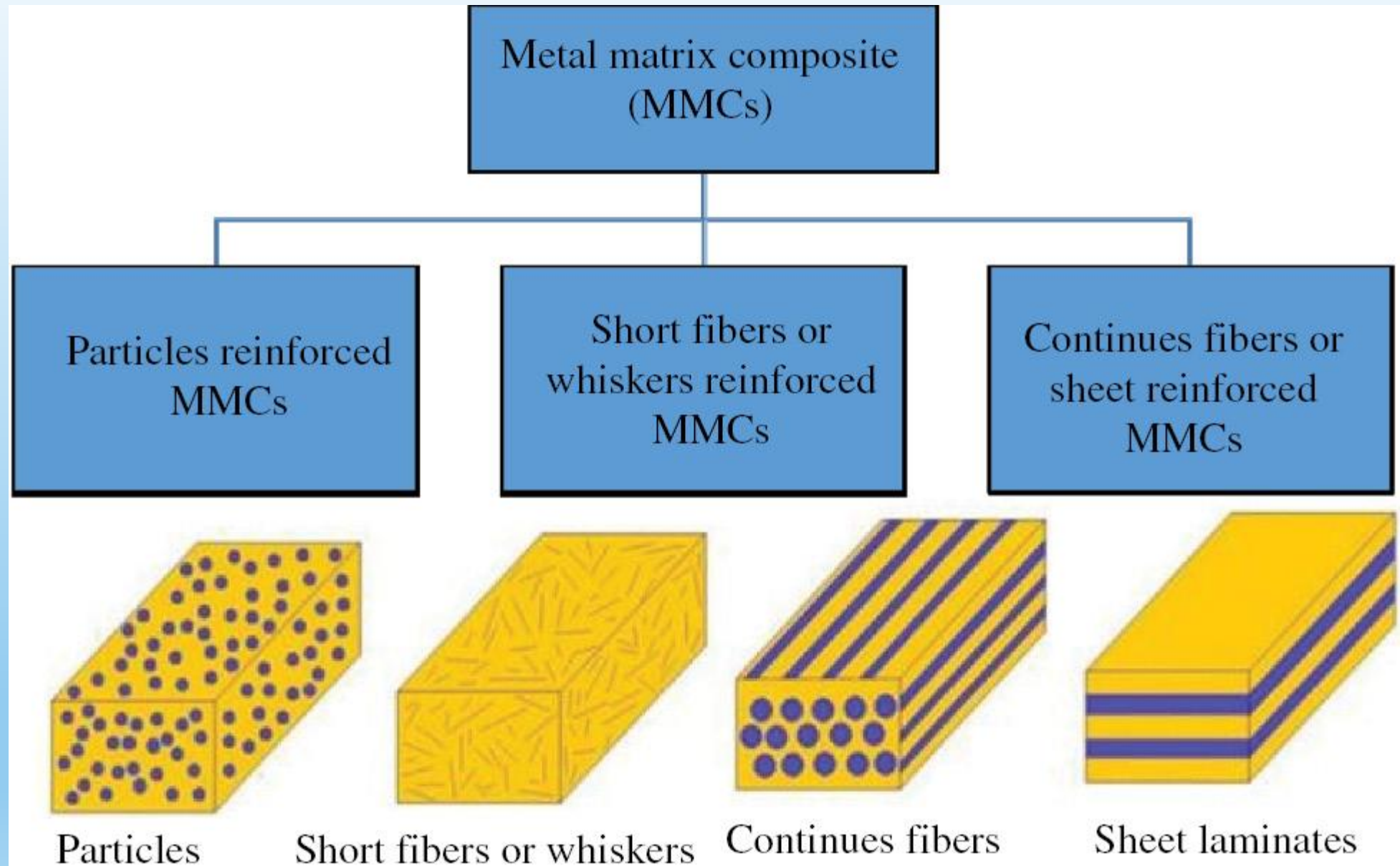
The reinforcements used are mainly: Carbon, Boron and coated Boron, Silicon carbide, and Alumina fibers.

METAL-MATRIX COMPOSITES

ADVANTAGES	DISADVANTAGES
1. Higher operating temperatures	1. Higher specific gravity (1.7-4.5)
2. Improved transverse and shear properties	2. Difficulty of fabrication
3. Improved transverse and longitudinal electrical and thermal conductivity	3. Expense of fabrication
4. Good impact resistance	4. Damage of fibers during fabrication
5. Laser survivability	5. Intermetallic diffusion and chemical reactions between fibers and matrix may occur
6. Zero moisture pick-up	6. Poor fiber wetting
7. Outstanding better fire resistance	7. Poor longitudinal strengths
8. High thermal stability	
9. They can be joined by conventional metallurgical techniques	

Classification of Metal Matrix Composites





Application of MMC's

- Aerospace applications
- Non-aerospace applications

Automotive applications

Military tanks

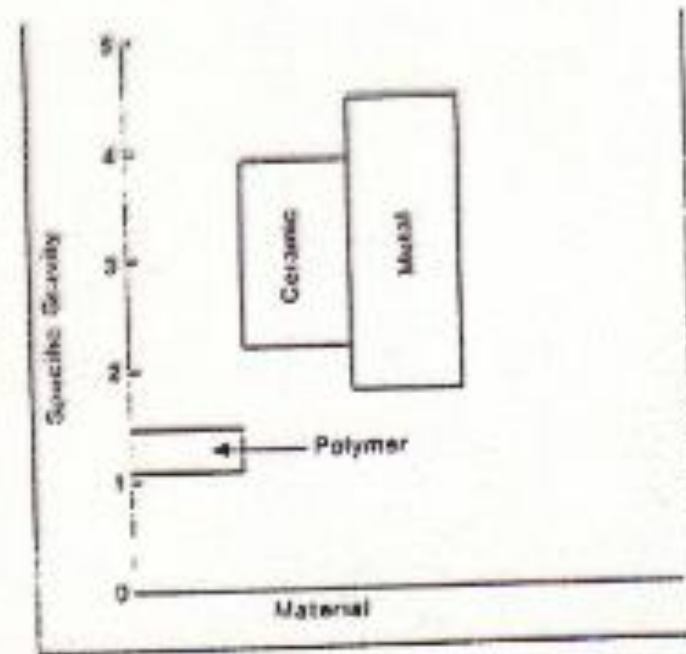
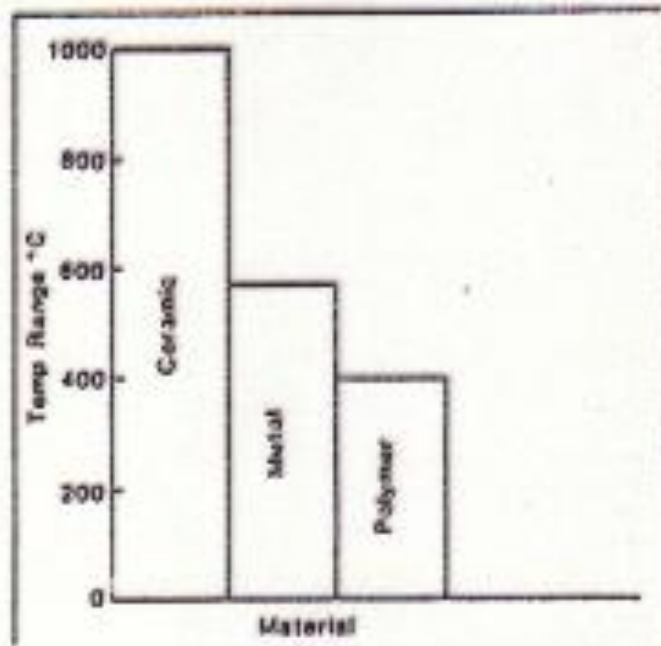
Electrical applications

Applications of MMC's

- **Space:** The space shuttle uses boron/aluminum tubes to support its fuselage frame. In addition to decreasing the mass of the space shuttle by more than 145 kg, boron/aluminum also reduced the thermal insulation requirements because of its low thermal conductivity. The mast of the Hubble Telescope uses carbon-reinforced aluminum.

GLASS AND CERAMIC MATRIX COMPOSITES

ADVANTAGES	DISADVANTAGES
1. Strength retention at elevated temp.	1. Low toughness
2. Inertness to the chemical environment	2. High fabrication temperatures
3. High matrix modulus (max 60GPa)	3. Matrices fail at a strain less than that of the reinforcing fibers
4. Medium specific gravity (2.2-3.95)	



Summary of matrix temperature and specific gravity properties.

COMPARISON OF PROPERTIES OF CERAMICS, METALS AND POLYMERS

Comparison of room temperature properties of ceramics, metals and polymers

	Density (Mg/m ³)	Young's modulus (GPa)	Strength ^a (MPa)	Ductility (%)	Toughness K _{IC} (MPa m ^{1/2})	Specific modulus [(GPa)/ (Mg/m ³)]	Specific strength [(MPa)/ (Mg/m ³)]
CERAMICS							
Alumina Al ₂ O ₃	3.87	382	332	0	4.9	99	86
Magnesia MgO	3.60	207	230	0	1.2	58	64
Silicon Nitride Si ₃ N ₄		166	210	0	4.0		
Zirconia ZrO ₂	5.92	170	900	0	8.6	29	152
β-Sialon	3.25	300	945	0	7.7	92	291
Glass-ceramic Silceram	2.90	121	174	0	2.1	42	60
METALS							
Aluminium	2.70	69	77	47		26	29
Aluminium-3%Zn-0.7%Zr	2.83	72	325	18		25	115
Brass Cu-30%Zn	8.50	100	550	70		12	65
Nickel-20%Cr-15%Co	8.18	204	1200	26		25	147
Steel mild	7.86	210	460	35		27	59
Titanium-2.5% Sn	4.56	112	792	20		24	174
POLYMERS							
Epoxy	1.12	4	50	4	1.5	4	36
Melamine formaldehyde	1.50	9	70			6	47
Nylon 6.6	1.14	2	70	60		18	61
Polyetheretherketone	1.30	4	70			3	54
Polymethylmethacrylate	1.19	3	50	3	1.5	3	42
Polystyrene	1.05	3	50	2	1.0	3	48
Polyvinylchloride rigid	1.70	3	60	15	4.0	2	35

^aStrength values are obtained from the test appropriate for the material, e.g., flexural and tensile for ceramics and metals respectively.

Some Applications of CMC's and MMC's

Some applications of ceramic and metal matrix composites		
Industrial sector	Application	
	Ceramic matrix	Metal matrix
Aerospace	afterburners, brakes, heat shields, rocket nozzles	struts, antennae
Automobile	brakes	piston crowns
Manufacturing	thermal insulation, cutting tools, wire drawing dies	
Electrical		superconductors, contacts, filaments, electrodes
Medical	prostheses, fixation plates	

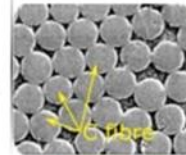
ΣΥΝΘΕΤΑ ΚΕΡΑΜΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ (Ceramic Matrix Composites) CMC's

Silicon Carbide matrix composites

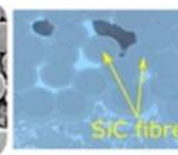
Key points

Used in high thermo-structural applications with long time exposures.

Reinforcements:

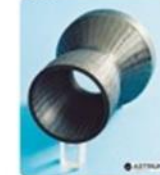


Heidenreich, 2015



Gavaldà et al., 2018

Applications:



Rocket nozzle
Di Carlo, 2015



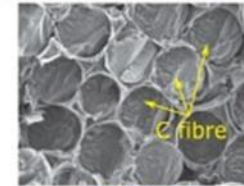
Aeroengine vane
Spriet, 2015

Carbon matrix composites

Key points

Used in frictional applications and short high temperature applications.

Reinforcements:



Hatta et al., 2015

Applications:



Break discs
Krenkel et Thebault, 2015



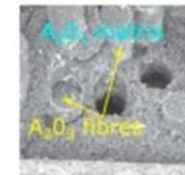
Ventilators gas
Hatta et al., 2015

Oxide matrix composites

Key points

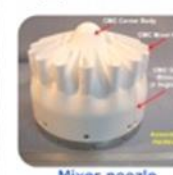
Used in applications where superior thermal stability is needed.

Reinforcements:



Keller et al., 2015

Applications:



Mixer nozzle
Keller et al., 2015



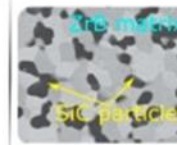
Acoustic nozzle
Keller et al., 2015

ZrB₂ or HfB₂ matrix composites

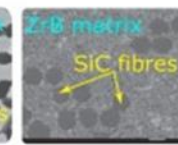
Key points

Used in applications where ultrahigh temperature is needed (>2000°C)

Reinforcements:



Kagawa et al., 2015

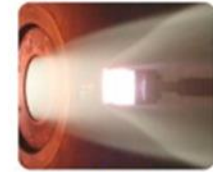


Kagawa et al., 2015

Applications:



Reentry nose
Johnson, 2015



Nozzle
Savino et al., 2015

Mechanical Properties Data for Some Common Matrix Materials

Class	Example	E [MPa (ksi)]	T.S. [MPa (ksi)]	Flexural Strength [MPa (ksi)]	Compressive Strength (after 28 days) [MPa (ksi)]	Percent Elongation at Failure	K_{IC} (MPa $\sqrt{m}$)
Polymer ^a	Epoxy	6900 (1000)	69 (10)	—	—	0	0.3–0.5
	Polyester	6900 (1000)	28 (4)	—	—	0	—
Metal ^b	Al	69×10^3 (10×10^3)	76 (11)	—	—	—	—
	Cu	115×10^3 (17×10^3)	170 (25)	—	—	—	—
Ceramic ^c	Al ₂ O ₃	—	—	550 (80)	—	—	4–5
	SiC	—	—	500 (73)	—	—	4.0
	Si ₃ N ₄ (reaction bonded)	—	—	260 (38)	—	—	2–3
Portland cements ^d	Type I	—	2.4 (0.35)	—	24 (3.5)	—	—
	Type II	—	2.3 (0.33)	—	24 (3.5)	—	—
	Type III	—	2.6 (0.38)	—	21 (3.0)	—	—
	Type IV	—	2.1 (0.30)	—	14 (2.0)	—	—
	Type V	—	2.3 (0.33)	—	21 (3.0)	—	—