



Μάθημα 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Χρήστος Παπακωνσταντίνου

Συνθετα Υλικά

- Τα υλικά που παράγονται με σύνθεση δυο ή περισσότερων υλικών, κατά τέτοιο τρόπο ώστε το νέο «σύνθετο» εννιά υλικό να έχει «καλύτερες» ιδιότητες από τα επιμέρους υλικά.
- Μακροσκοπικά ή μικροσκοπικά

Σύνθετα Υλικά στη Φύση



Σύνθετα Υλικά στη Φύση



Σύνθετα Υλικά στη Φύση

- 5-6 φορές μεγαλύτερη αντοχή από αυτή του χάλυβα
- 30% μεγαλύτερη ελαστικότητα από νίλον



Ιστορικό Σύνθετων Υλικών

- Από αρχαιοτάτων χρόνων χρησιμοποιούταν σύνθετα υλικά (π.χ. ασπίδες, τόξα κλπ)
- Στις κατασκευές η χρήση σιδήρου σαν οπλισμό σε μαρμάρινους ναούς στην αρχαία Ελλάδα ήταν μια μορφή σύνθετων υλικών

Σύνθετα Υλικά στις Κατασκευές

- Το πιο συνηθισμένο υλικό είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα. – Ακαμψία λόγω σκυροδέματος – Εφελκυστική αντοχή λόγω οπλισμού.
- Ξύλο επίσης για κατασκευές
- Για ενισχύσεις και επισκευές:
Ινοπλισμένα Πολυμερή

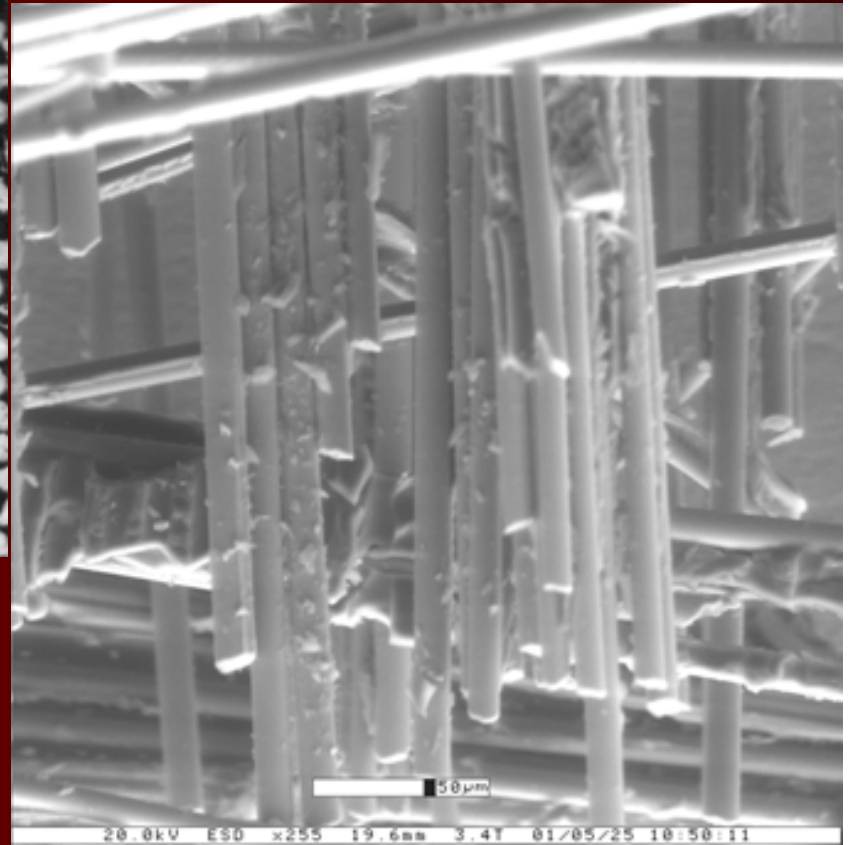
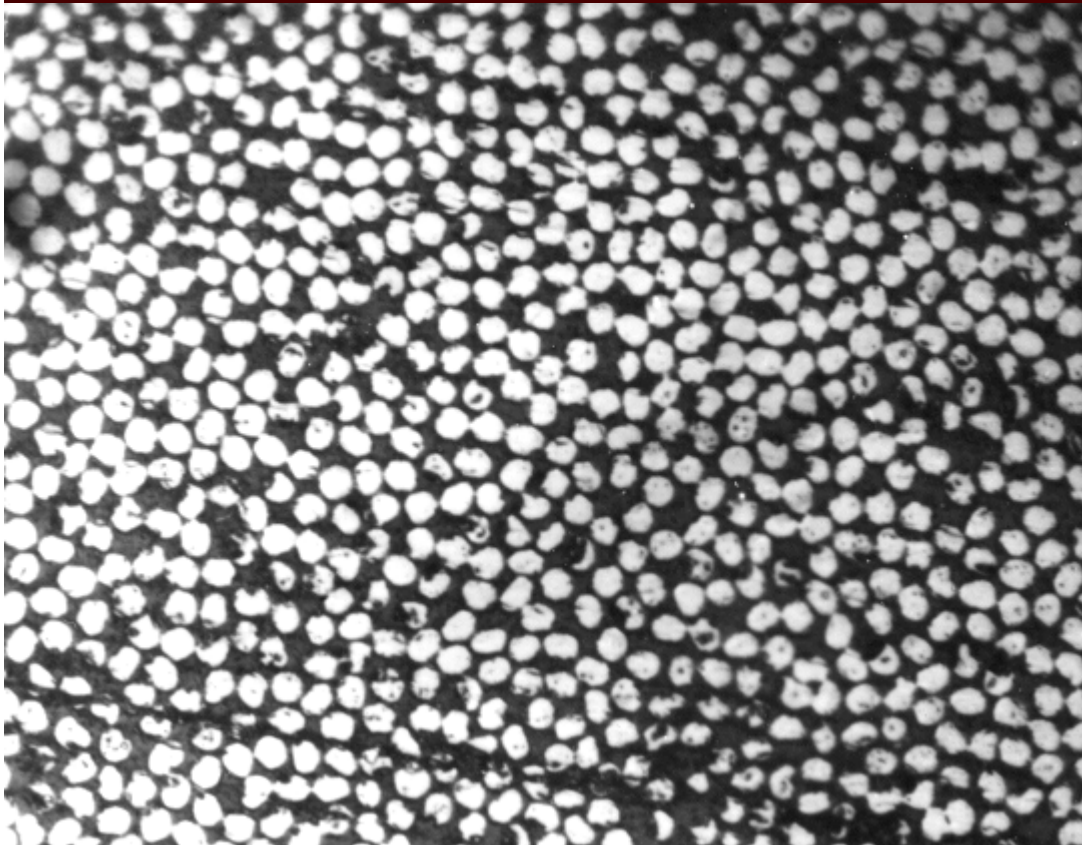
Ινοπλισμένα Πολυμερή

Ίνες + Μήτρα

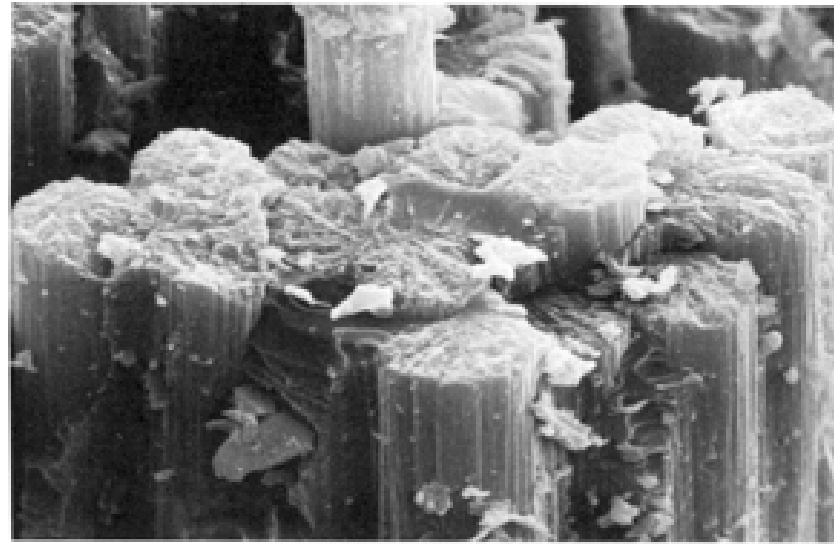
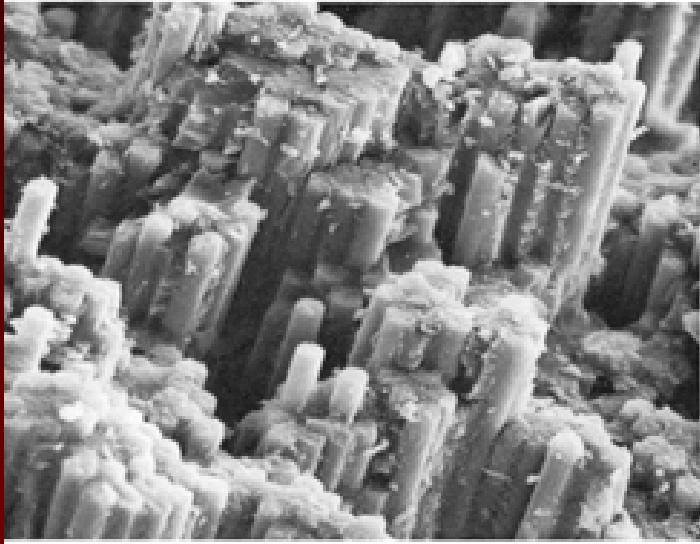
Ίνες – αντοχή

Μήτρα – προστασία, συνέχεια και
σύνδεση ινών

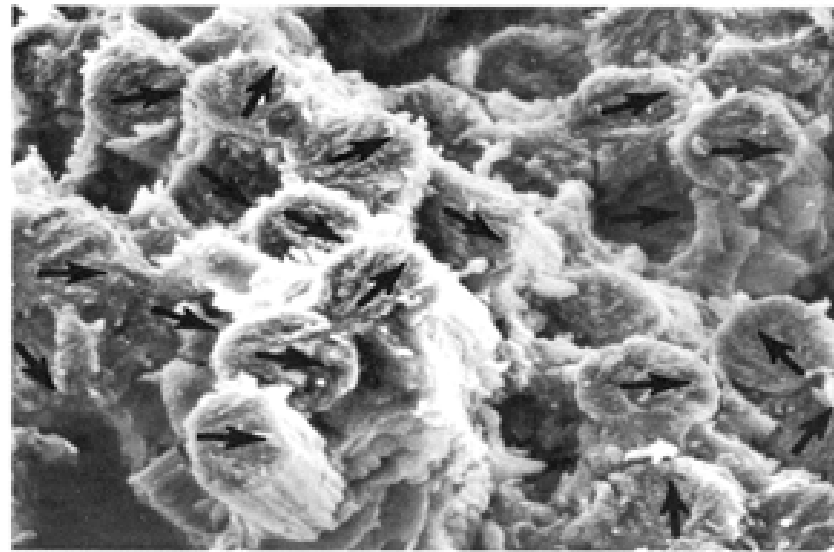
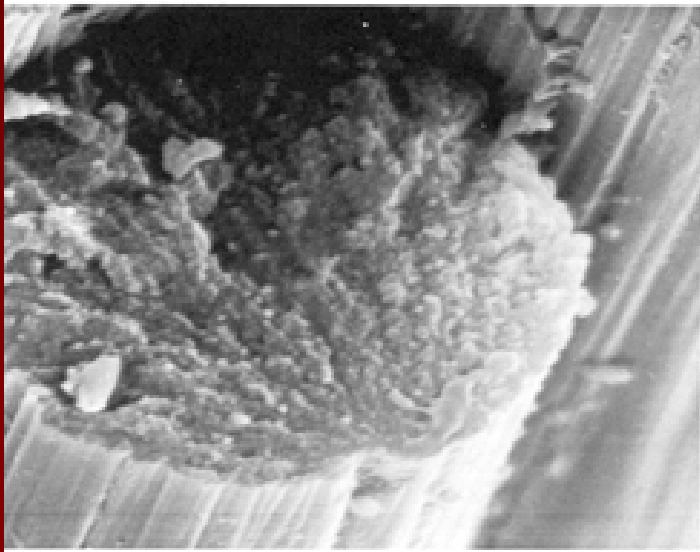
Ινοπλισμένα Πολυμερή



Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ)



(b)



Χαρακτηριστικά των ΙΟΠ

- Υψηλή αντοχή και μέτρο ελαστικότητας καθώς και αντοχή σε κόπωση
- Ανισότροπα υλικά
- Μπορούν να σχεδιαστούν κατάλληλα για να μας δώσουν την απαιτούμενη αντοχή
- Η παραγωγή τόσο του υλικού όσο και του δομικού στοιχείου ή της κατασκευής γίνονται σε μια φάση

Χαρακτηριστικά των ΙΟΠ

- Ευελιξία στην κατασκευή - μπορούν να κατασκευαστούν στοιχεία με σύνθετη γεωμετρία
- Αντοχή σε οξείδωση
- Μεγάλη αντοχή σε διάρκεια
- Σε ορισμένες περιπτώσεις έχουν εξαιρετικές ιδιότητες όπως (χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής)

Αξονική παραμόρφωση ΙΟΠ

- Αξονική παραμόρφωση

$$\delta = \frac{PL}{AE}$$

- Μάζα

$$M = \rho AL$$

$$\delta = \frac{PL^2}{4} \frac{1}{E/\rho}$$

- Το ελαφρότερο στοιχείο για συγκεκριμένη παραμόρφωση, υποβαλλόμενο σε συγκεκριμένο φορτίο είναι αυτό με το μέγιστο λόγο E/ρ

Ειδικό Μέτρο Ελαστικότητας

- Κρίσιμο φορτίο

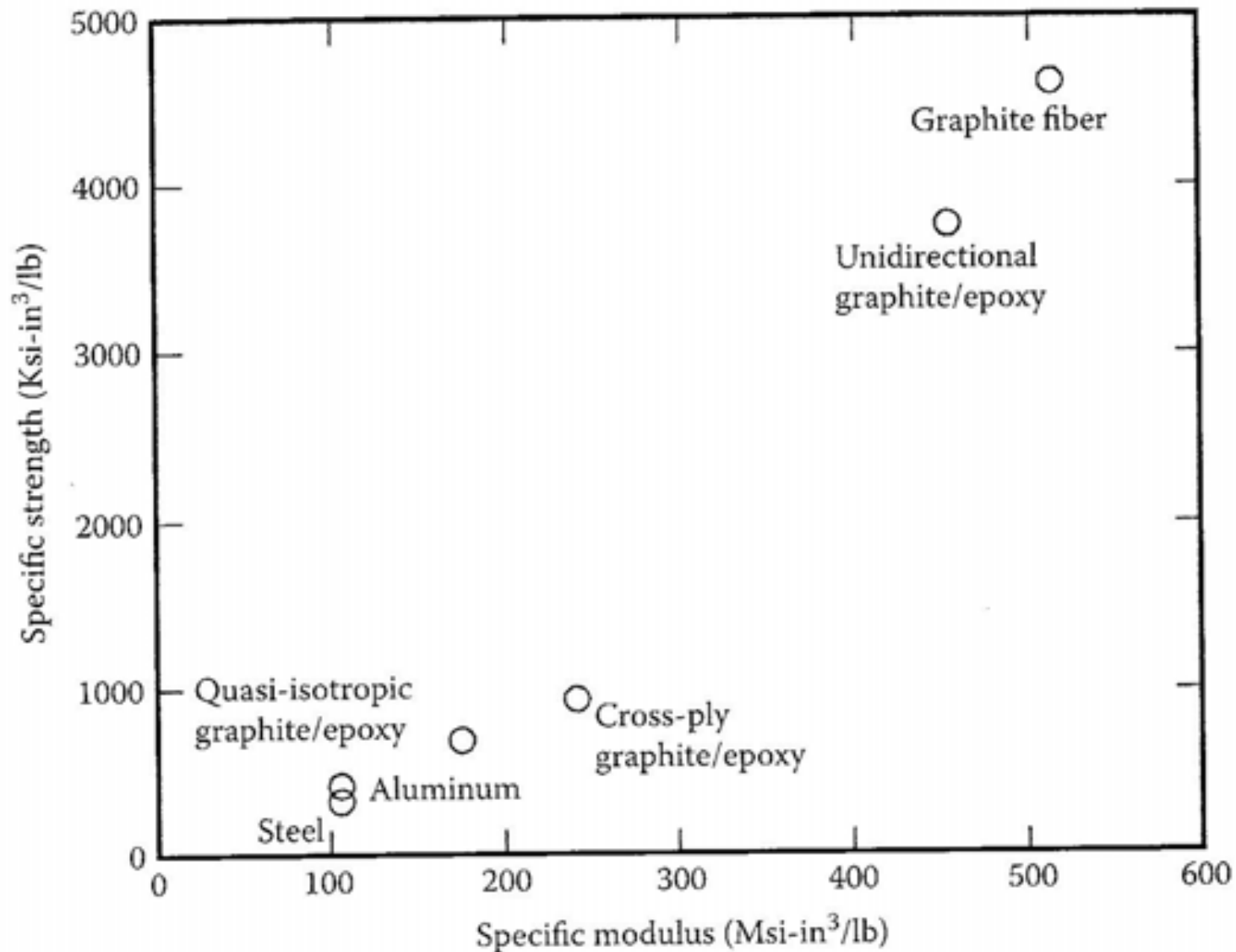
$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

- Μάζα ράβδου

$$M = \rho \frac{\pi d^2 L}{4} = \frac{2L^2 \sqrt{P_{cr}}}{\pi} \frac{1}{E^{1/2} / \rho}$$

- Το ελαφρότερο στοιχείο για συγκεκριμένη ακαμψία, είναι αυτό με το μέγιστο λόγο $E^{1/2}/\rho$

Ειδικό Μέτρο Ελαστικότητας



Ειδικό Μέτρο Ελαστικότητας

Material Units	Specific gravity	Young's modulus (GPa)	E/ρ (GPa-m ³ /kg)	$E^{1/2}/\rho$ (Pa-m ³ /kg)	$E^{1/3}/\rho$ (Pa ^{1/3} -m ³ /kg)
<i>System of Units: SI</i>					
Graphite fiber	1.8	230.00	0.1278	266.4	3.404
Kevlar fiber	1.4	124.00	0.08857	251.5	3.562
Glass fiber	2.5	85.00	0.034	116.6	1.759
Unidirectional graphite/epoxy	1.6	181.00	0.1131	265.9	3.535
Unidirectional glass/epoxy	1.8	38.60	0.02144	109.1	1.878
Cross-ply graphite/epoxy	1.6	95.98	0.060	193.6	2.862
Cross-ply glass/epoxy	1.8	23.58	0.0131	85.31	1.593
Quasi-isotropic graphite/epoxy	1.6	69.64	0.04353	164.9	2.571
Quasi-isotropic glass/epoxy	1.8	18.96	0.01053	76.50	1.481
Steel	7.8	206.84	0.02652	58.3	0.7582
Aluminum	2.6	68.95	0.02662	101.0	1.577

Πλεονεκτήματα ΙΟΠ

- Άριστες Μηχανικές Ιδιότητες
- Ανάληψη φορτίου μετά την αστοχία
- Μικρή ευαισθησία σε εγκοπές
- Μεγάλη διάρκεια ζωής
- Βέλτιστες αεροδυναμικές επιφάνειες
- Αντίσταση στη διάβρωση
- Απόσβεση ταλαντώσεων (ηχομόνωση)
- Μείωση βάρους κατασκευής
- Αντοχή σε κρούσεις υψηλής ενέργειας

Μειονεκτήματα ΙΟΠ

- Υψηλό κόστος παρασκευής
- Ο μηχανικός χαρακτηρισμός των ΙΟΠ είναι πολύ πιο δύσκολος συγκριτικά με ένα ομοιογενές ισότροπο υλικό
- Η επισκευή των ΙΟΠ είναι περίπλοκη/αδύνατη
- Τα ΙΟΠ δεν έχουν υψηλό συνδυασμό αντοχής και δυσθραυστότητας

Μειονεκτήματα ΙΟΠ

- Τα ΙΟΠ δεν αποτελούν το χρυσό δισκοπότηρο στην επιστήμη των υλικών (αντοχή, παραμορφωσιμότητα, δυσθραυστότητα, συγκολλησιμότητα, χαμηλό κόστος και αντοχή σε διάρκεια.)

Μειονεκτήματα ΙΟΠ

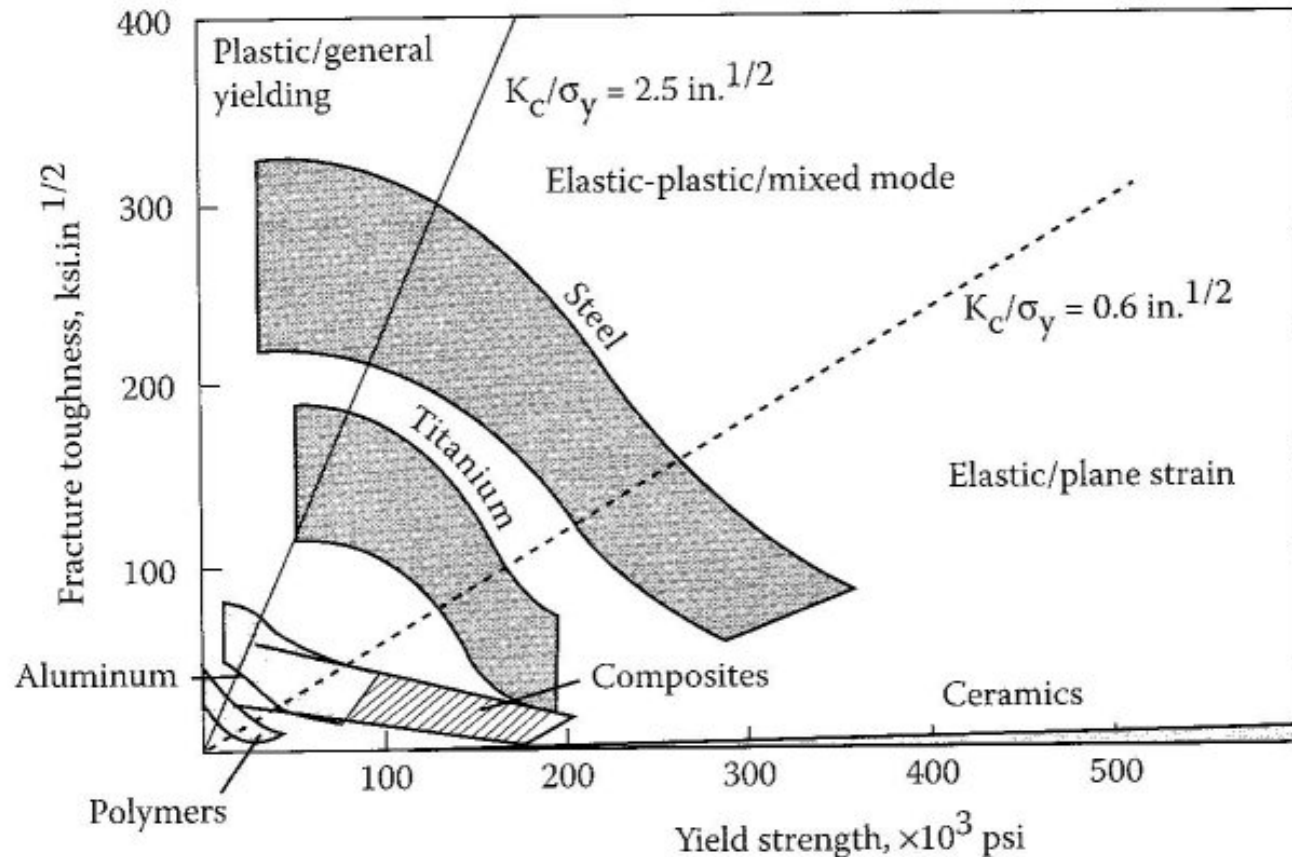


FIGURE 1.4

Fracture toughness as a function of yield strength for monolithic metals, ceramics, and metal-ceramic composites. (Source: Eager, T.W., Whither advanced materials? *Adv. Mater. Processes*, ASM International, June 1991, 25-29.)

Παράγοντες που επηρεάζουν τη Μηχανική συμπεριφορά

- Ίνες

Μήκος – Διεύθυνση – Σχήμα- Υλικά

- Μήτρα

- Διεπιφάνεια Ινών - Μήτρας

Χημικοί Δεσμοί – Φυσική τραχύτητα – Συντελεστής θερμικής διαστολής - δεσμοί χημικής αντίδρασης

Τύποι Πολυμερών

- Κοκκώδη Σύνθετα υλικά (σκυρόδεμα) (particulate composites)
- Σύνθετα Νιφάδων (Flake)
- Ινώδη σύνθετα (Fiber)
- Nanocomposites
- Πολύστρωτα (Laminates)

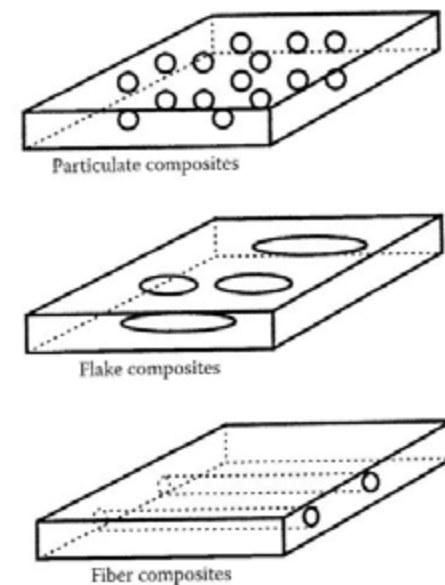


FIGURE 1.8
Types of composites based on reinforcement shape.

ΙΟΠ / Polymer Matrix Composites

Πολυμερές : epoxy, polyester, urethane

Ίνες: γραφίτη (άνθρακα), κέβλαρ, υαλού, μπόρον

Μειονεκτήματα των PMC

- χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας
- ψηλοί συντελεστές θερμικής διαστολής
- Ψηλή διόγκωση λόγω υγρασίας

Μηχανικές Ιδιότητες Ινών

Υλικό ίνας	E Tensile Modulus (GPa)	Ts Tensile Strength (GPa)	ρ Density (kN/m ³)	Ts/ ρ	E/ ρ
Τιτάνιο	115	1.90	46.1	41	2.5
Χάλυβας	207	4.1	76.6	54	2.7
E-glass	72	3.4	25	136	2.9
Άνθρακας	190	1.7	13.8	123	14
Βόριο	400	3.4	25.2	137	16
Γραφίτης	250	1.7	13.8	123	18

Μηχανικές Ιδιότητες ΙΟΠ

TABLE 1.4

Typical Mechanical Properties of Polymer Matrix Composites and Monolithic Materials

Property	Units	Graphite/ epoxy	Glass/ epoxy	Steel	Aluminum
<i>System of units: USCS</i>					
Specific gravity	—	1.6	1.8	7.8	2.6
Young's modulus	Msi	26.25	5.598	30.0	10.0
Ultimate tensile strength	ksi	217.6	154.0	94.0	40.0
Coefficient of thermal expansion	μin./in./°F	0.01111	4.778	6.5	12.8
<i>System of units: SI</i>					
Specific gravity	—	1.6	1.8	7.8	2.6
Young's modulus	GPa	181.0	38.6	206.8	68.95
Ultimate tensile strength	MPa	150.0	1062	648.1	275.8
Coefficient of thermal expansion	μm/m/°C	0.02	8.6	11.7	23

Μηχανικές Ιδιότητες Ινών

TABLE 1.5

Typical Mechanical Properties of Fibers Used in Polymer Matrix Composites

Property	Units	Graphite	Aramid	Glass	Steel	Aluminum
<i>System of units: USCS</i>						
Specific gravity	—	1.8	1.4	2.5	7.8	2.6
Young's modulus	Msi	33.35	17.98	12.33	30	10.0
Ultimate tensile strength	ksi	299.8	200.0	224.8	94	40.0
Axial coefficient of thermal expansion	μin./in./°F	-0.722	-2.778	2.778	6.5	12.8
<i>System of units: SI</i>						
Specific gravity	—	1.8	1.4	2.5	7.8	2.6
Young's modulus	GPa	230	124	85	206.8	68.95
Ultimate tensile strength	MPa	2067	1379	1550	648.1	275.8
Axial coefficient of thermal expansion	μm/m/°C	-1.3	-5	5	11.7	23

Παρασκευή Ανθρακονημάτων

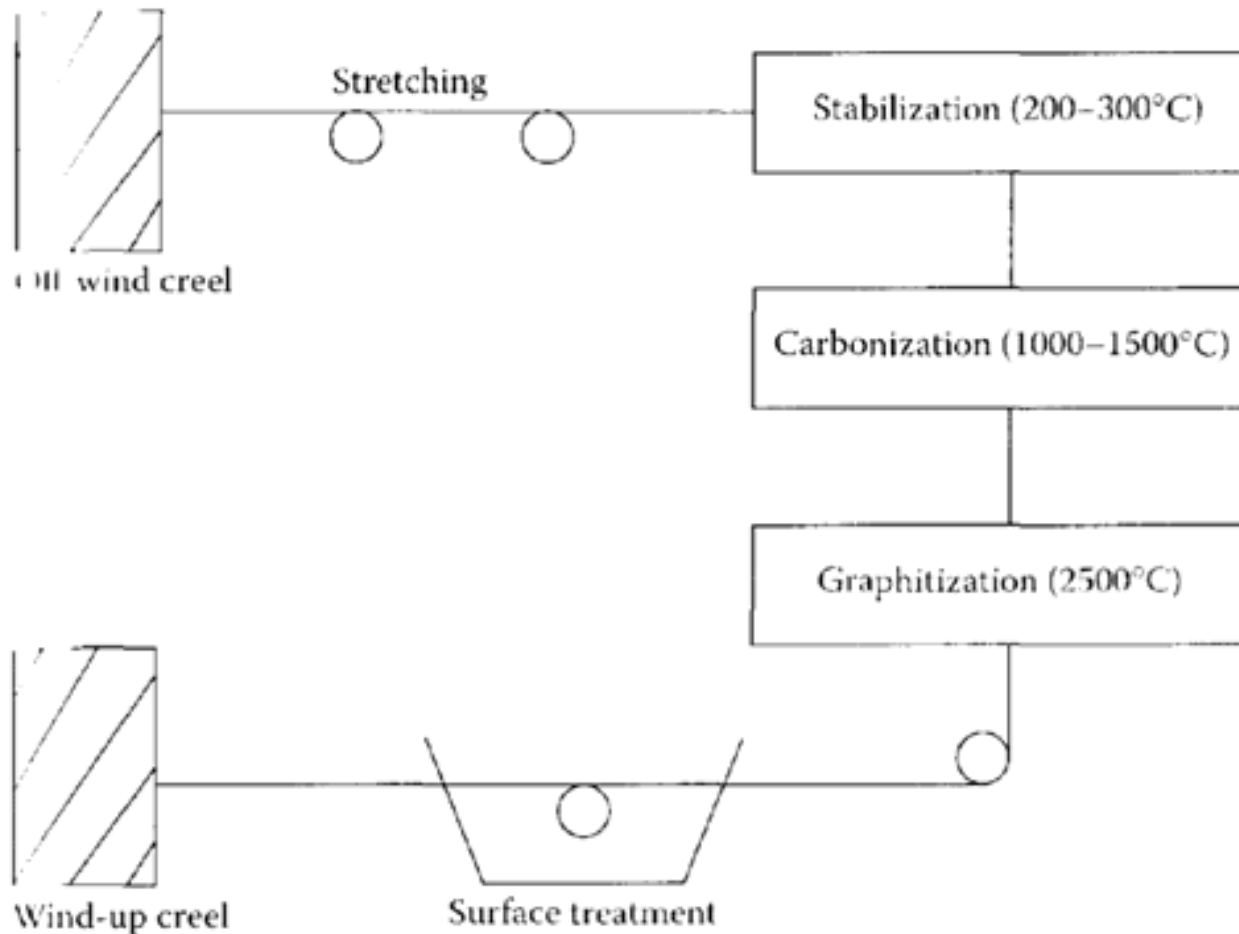
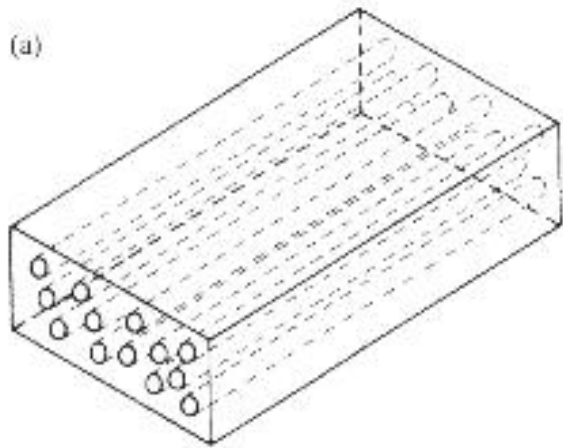


FIGURE 1.11

Steps of manufacturing a carbon fiber from PAN-based precursors.

Ρόλος της μήτρας στα ΙΟΠ



- Μεταφορά τάσεων
- Προσφέρει προστασία
- Καθορίζει τη διατμητική αντοχή
- Καθορίζει την διατμητική αντοχή μεταξύ στρώσεων
- Καθορίζει την αντοχή
- Καθορίζει την επεξεργασιμότητα
- Καθορίζει την αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες

Συνήθισμένες μήτρες

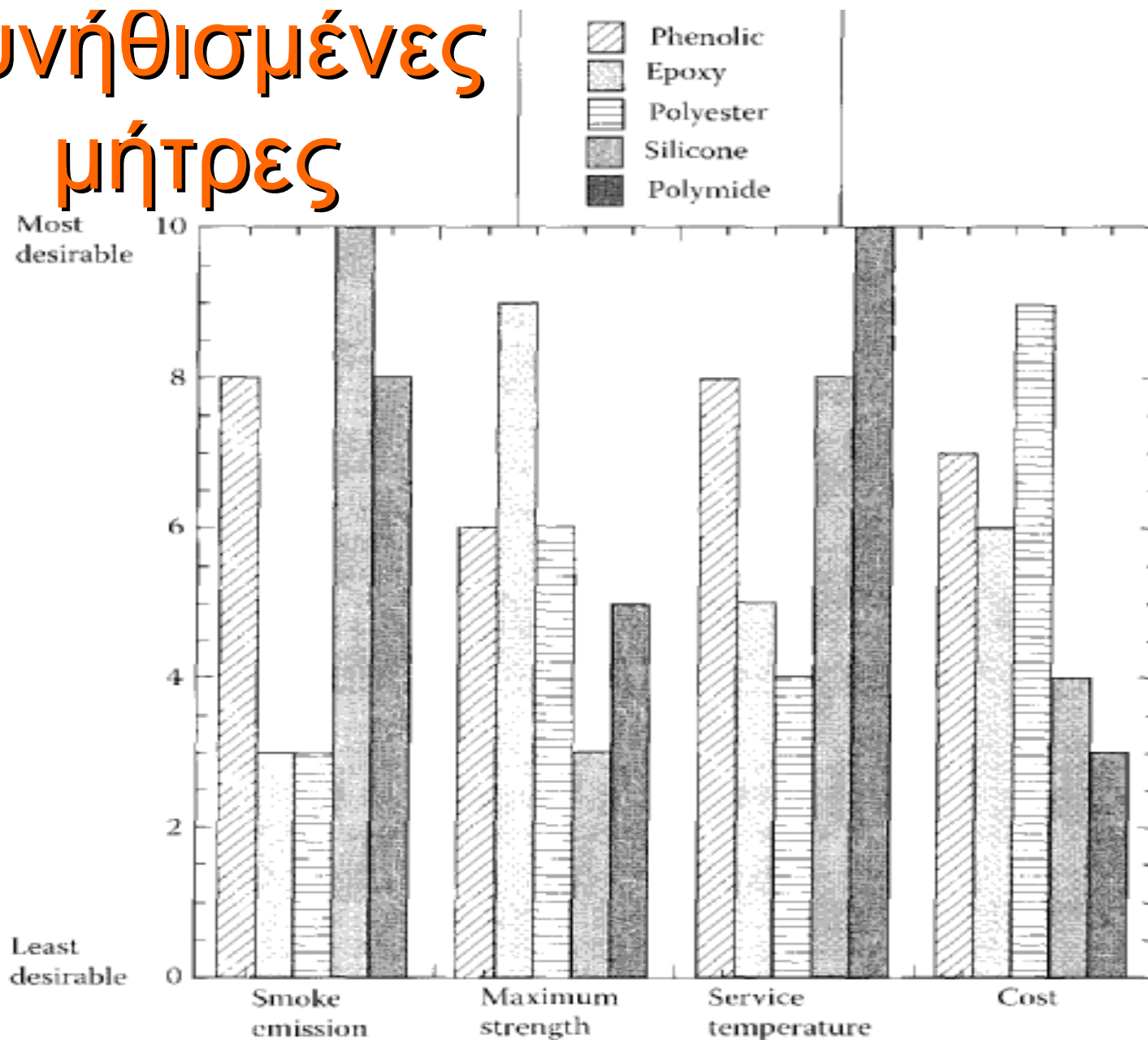


FIGURE 1.12

(Comparison of performance of several common matrices used in polymer matrix composites. Graphic courtesy of M.C. Gill Corporation, <http://www.mcgillcorp.com>.)

Διαδικασία περιτύλιξης νήματος

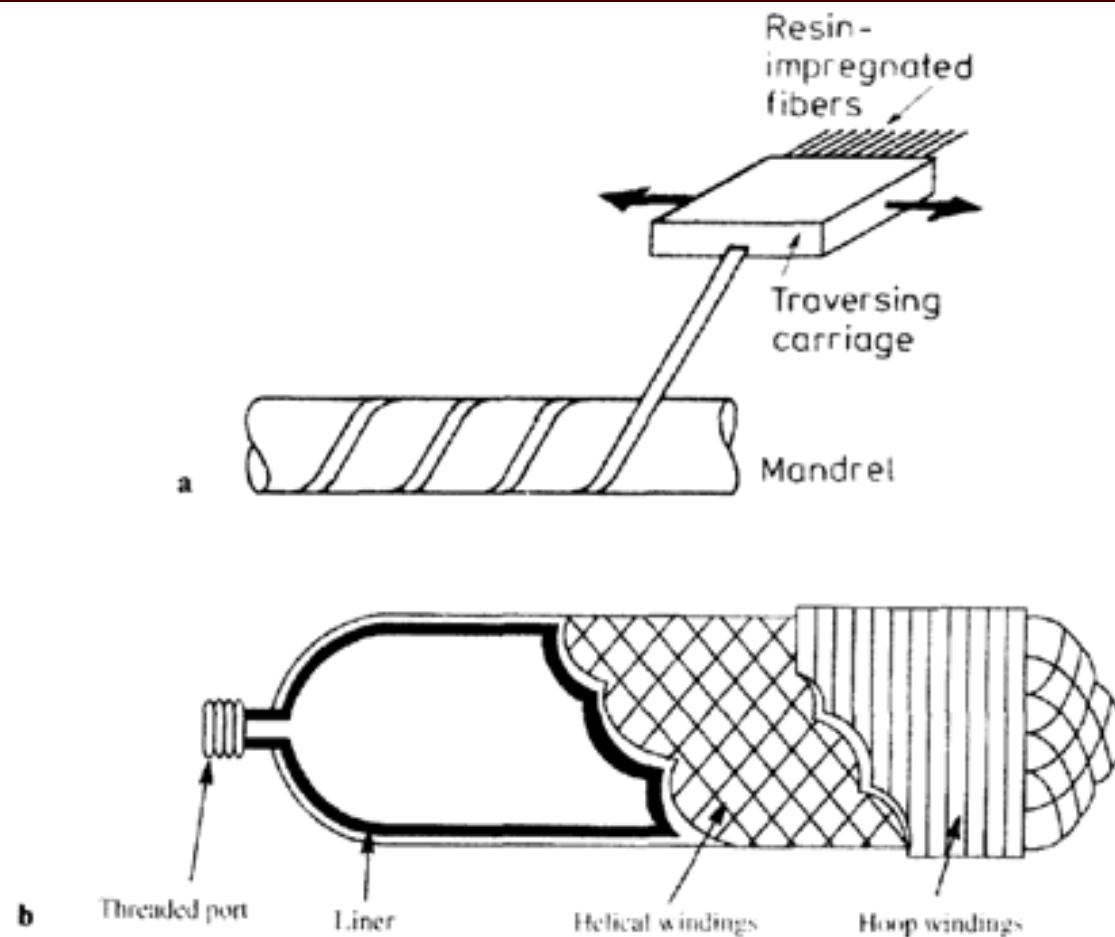


FIGURE 1.16

(a) Filament winding process; (b) filament wound pressure vessel with liner. (From Chawla, K.K., *Composite Materials — Science and Engineering*, Springer-Verlag, 1998. Reprinted by permission of Springer-Verlag.)

Θερμοπλαστικά



- Πολυμερή που μαλακώνουν και ρέουν όταν σε αυτά εφαρμόζεται συνδυασμένα φόρτιση και θερμότητα (θερμοκρασία εκτροπής)

Θερμοσκληρυνόμενα



- Πολυμερή που όταν θερμανθούν πολυμερίζονται και η διαδικασία είναι μη αντιστρεπτή.

Θερμοπλαστικά και Θερμοσκληρυνόμενα

Thermoplastics	Thermoset
Soften on heating and pressure, and thus easy to repair	Decompose on heating
High strains to failure	Low strains to failure
Indefinite shelf life	Definite shelf life
Can be reprocessed	Cannot be reprocessed
Not tacky and easy to handle	Tacky
Short cure cycles	Long cure cycles
Higher fabrication temperature and viscosities have made it difficult to process	Lower fabrication temperature
Excellent solvent resistance	Fair solvent resistance

Sheet Molding Compounds (SMC)

- Matrix: polyester resin, vinyl ester resin
- Used for compression molding process
- SMC - R: randomly oriented discontinuous fibers
- SMC – CR: containing a layer of unidirectional continuous fibers
- XMC: containing continuous fibers arranged in an X pattern

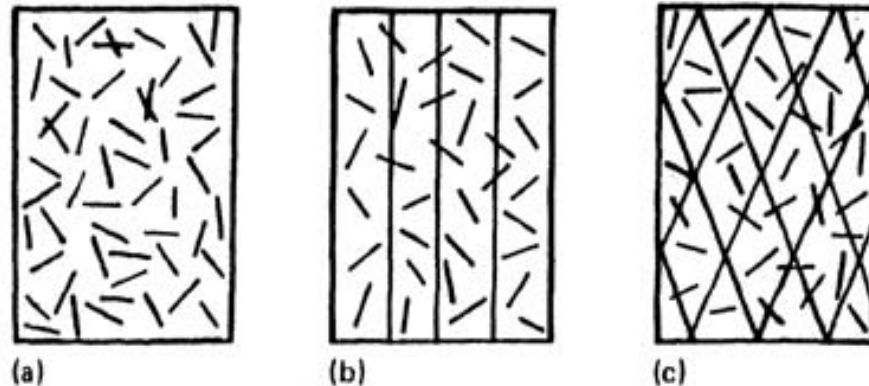


Figure 2.35 Various types of sheet molding compounds (SMC): (a) SMC-R, (b) SMC-CR, (c) XMC.

Prepreg Manufacturing

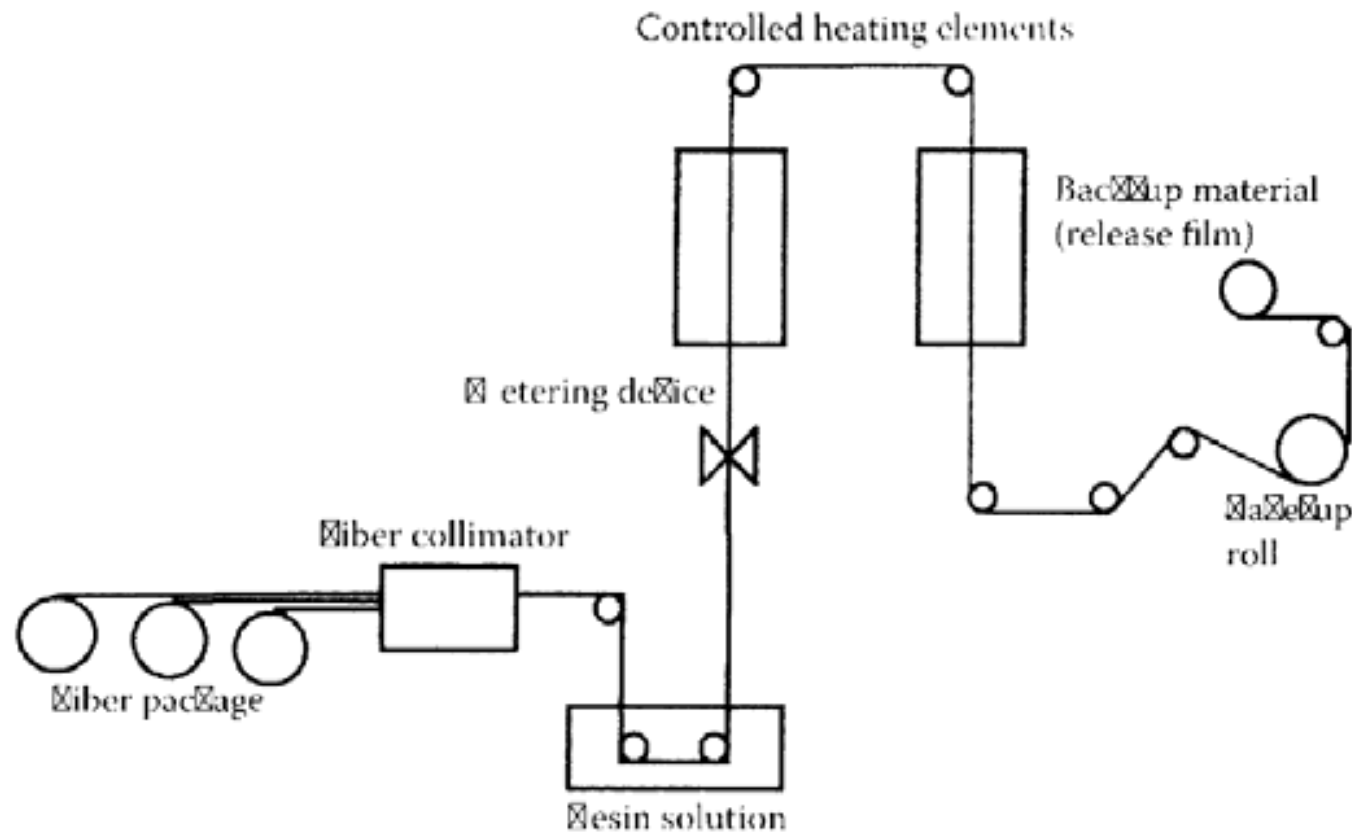
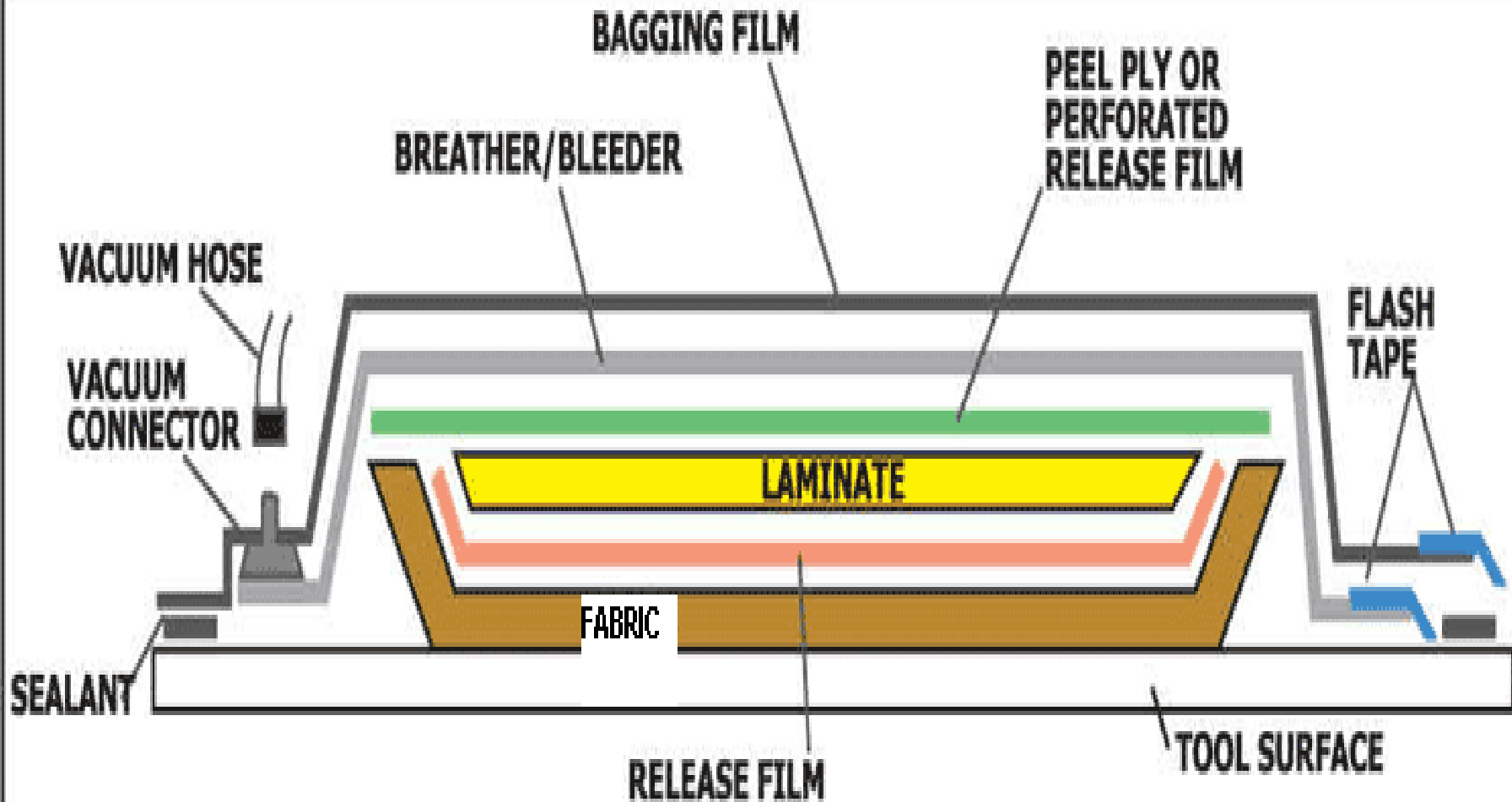


FIGURE 1.14

Schematic of prepreg manufacturing. (Reprinted from Mallick, P.K., *Fiber-Reinforced Composites. Materials, Manufacturing, and Design*, Marcel Dekker, Inc., New York, Chap. 2, 1988, p. 62. Courtesy of CRC Press, Boca Raton, FL.)

Bag Molding Process / Autoclave Process

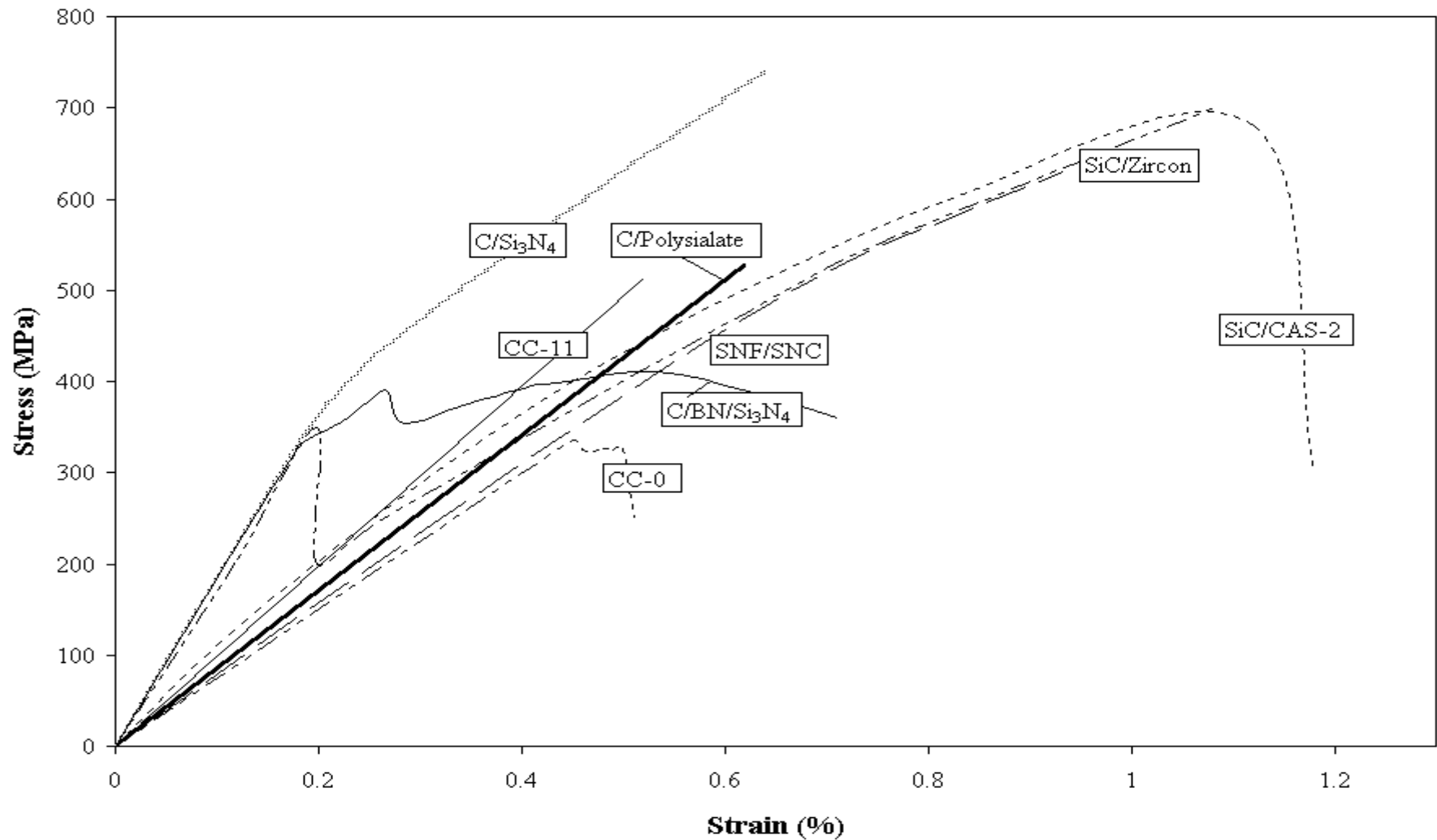
Typical Vacuum Bagging Layup



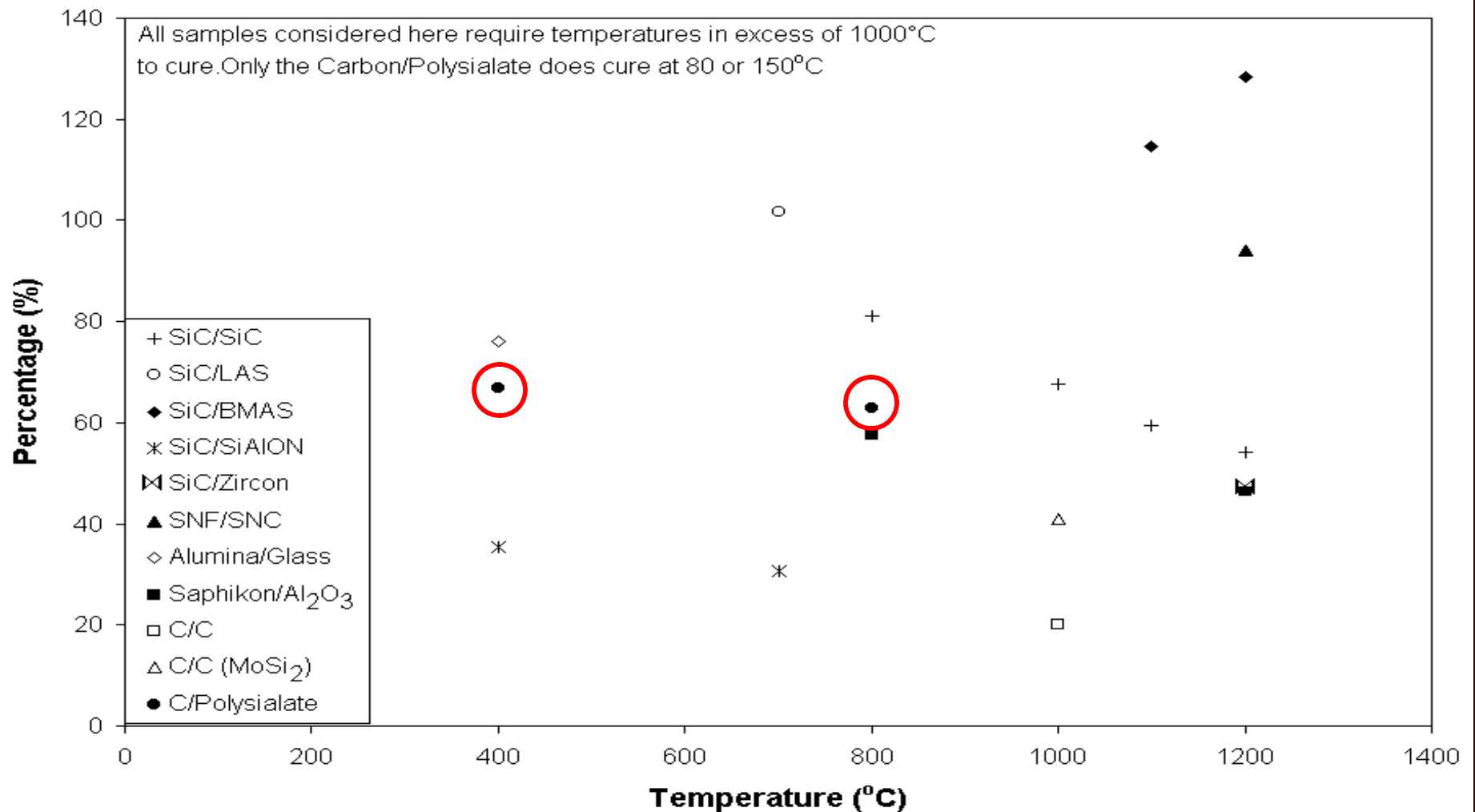
Vacuum Bagging Setup



Stress strain relationships of unidirectional composites tested in flexure



Percentage of strength retention at high temperatures



High Modulus Carbon Fiber Properties

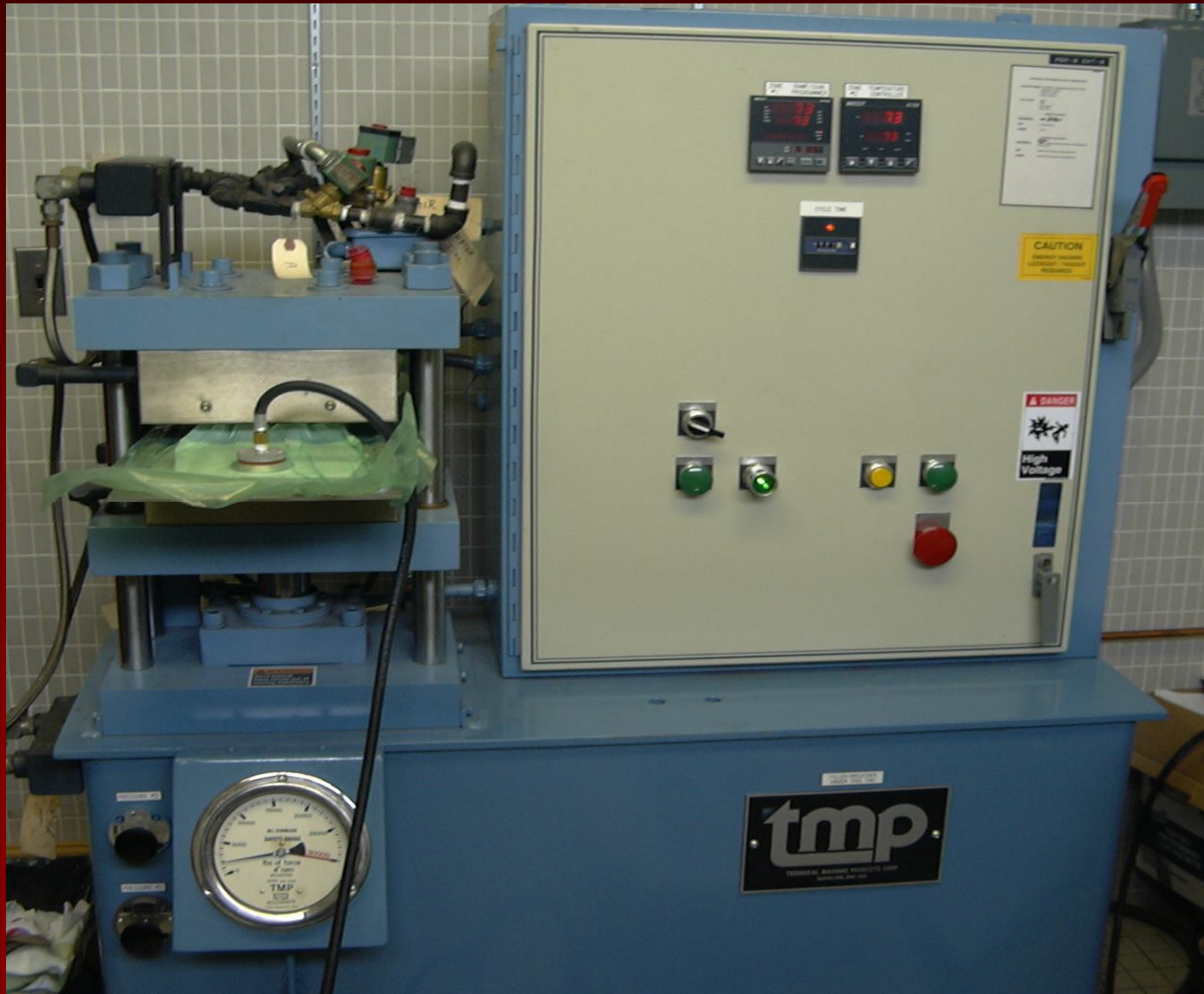
Fiber Name	Tensile Modulus (msi)	Tensile Strength (ksi)	Elongation (%)	Density (g/cc)	Filament Count	Filament Diameter (μm)	ILSS (ksi)
K63712	93	390	0.4	2.12	12,000	11	11

Core materials



- Foams
 - Blown Foams
 - made by mixing or injecting a gas into a liquid
 - Syntactic Foams
 - made by mixing a matrix (“binder”) and a gas-filled aggregate (“filler”)
- Honeycomb
- Balsa Wood

Curing Setup



Experimental Program

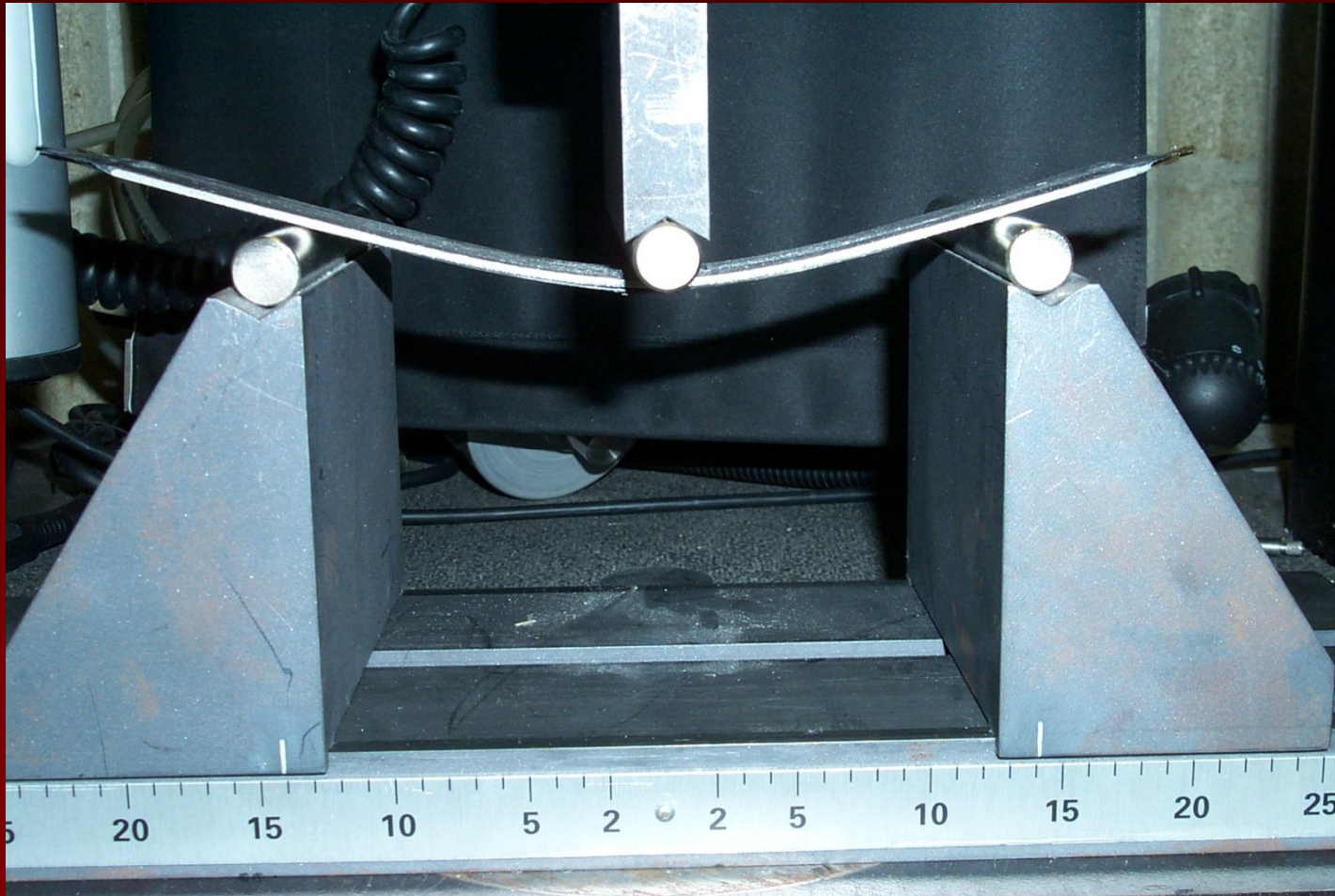


- research focus is on developing high temperature lightweight structural sandwich panels
- Core is a syntactic foam, made by the embedding of randomly dispersed lightweight spheres in a Geopolymer matrix
- Carbon, Glass, AR-Glass and Silicon Carbide fibers were used as skin reinforcement

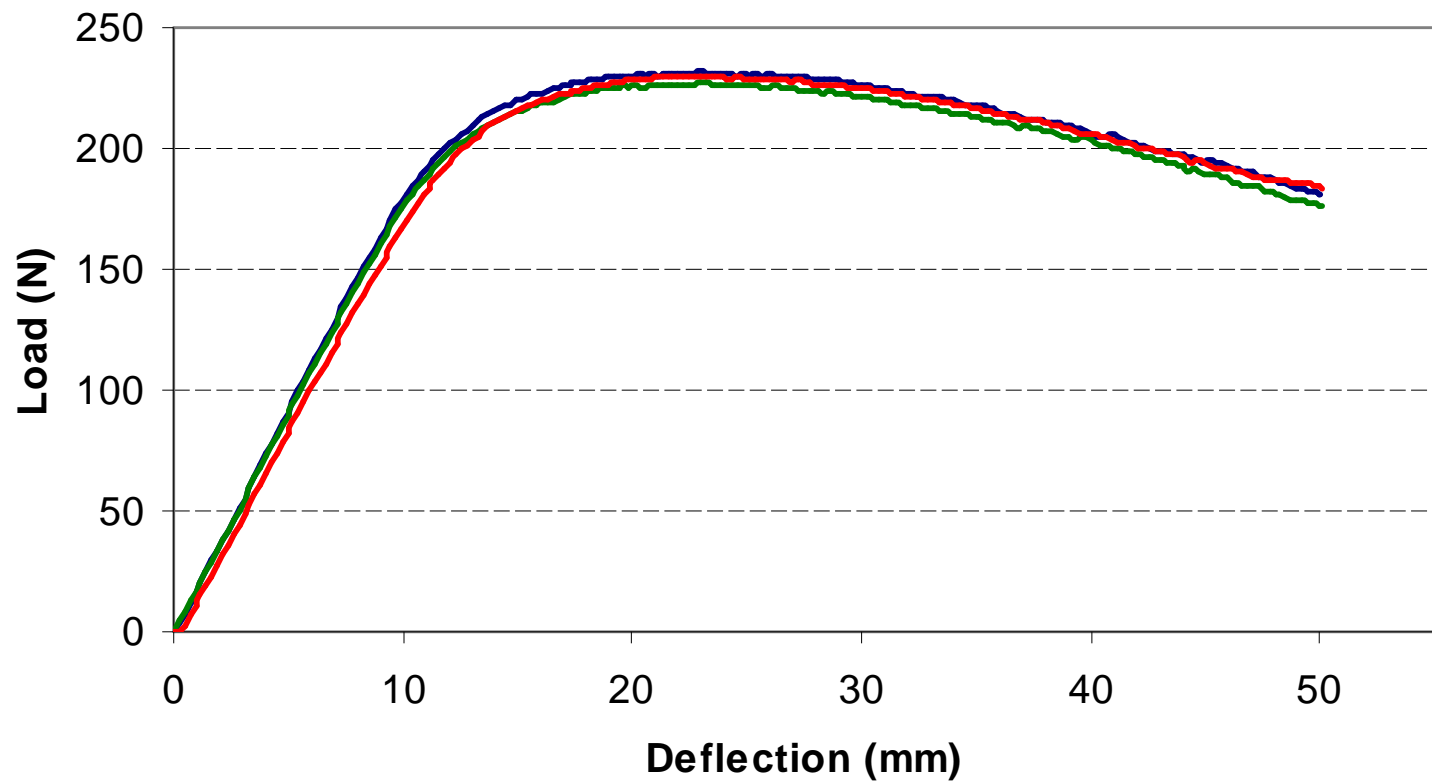
Test Matrix

Type of Test	Grade 2 Titanium	Room Temperature	After Exposure at 200°C	After Exposure at 400°C
Three point Bending	3 specimens 25.4x1.6x200mm m (WxDxL)	5 specimens 25.4x2.1x200mm (WxDxL)	5 specimens 25.4x2.1x200mm (WxDxL)	5 specimens 25.4x2.1x200mm (WxDxL)

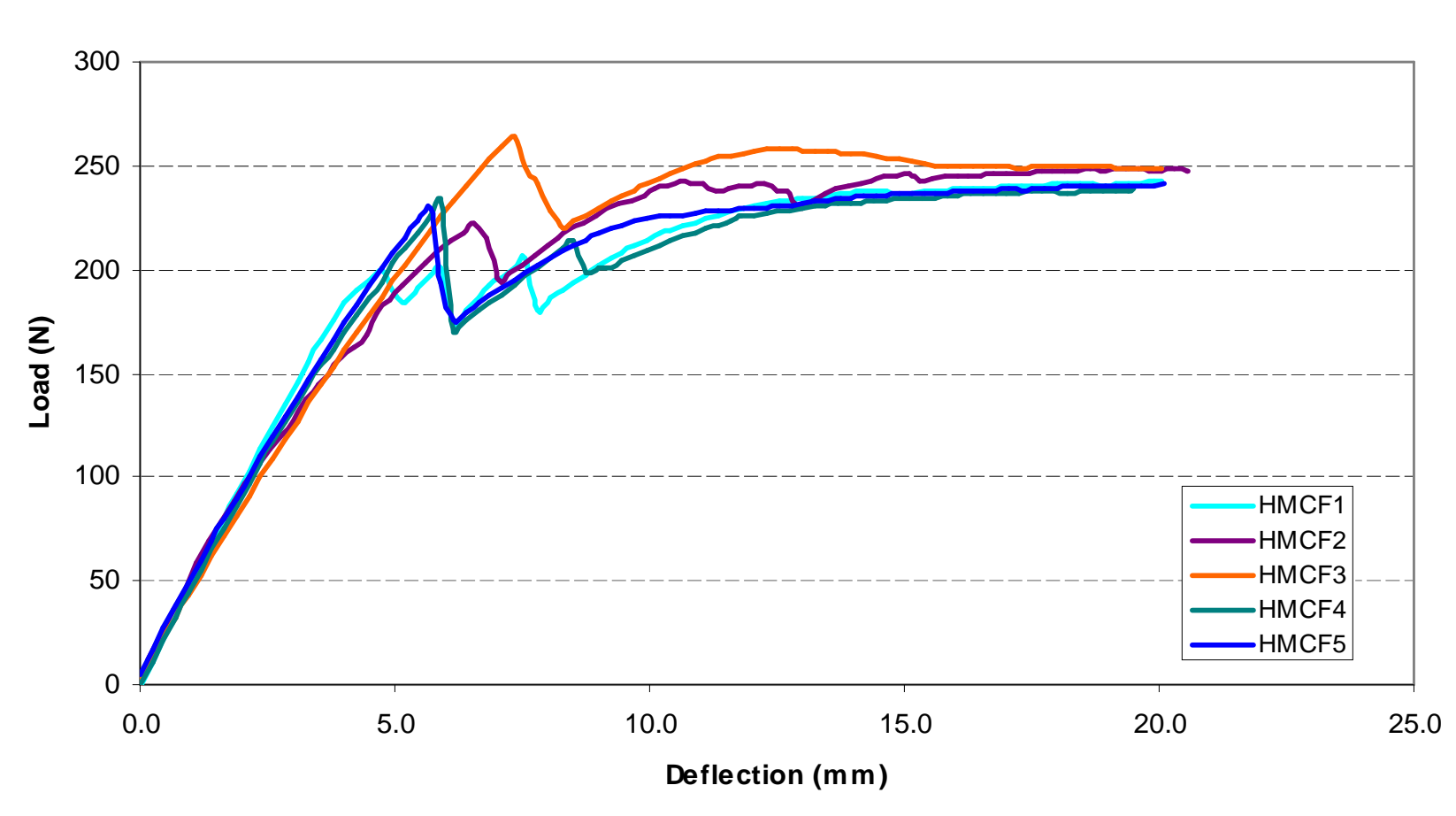
Testing Setup



Load vs Deflection curves of Grade 2 Titanium Specimens



Load vs Deflection Curves of HMCf Specimens at Room Temperature

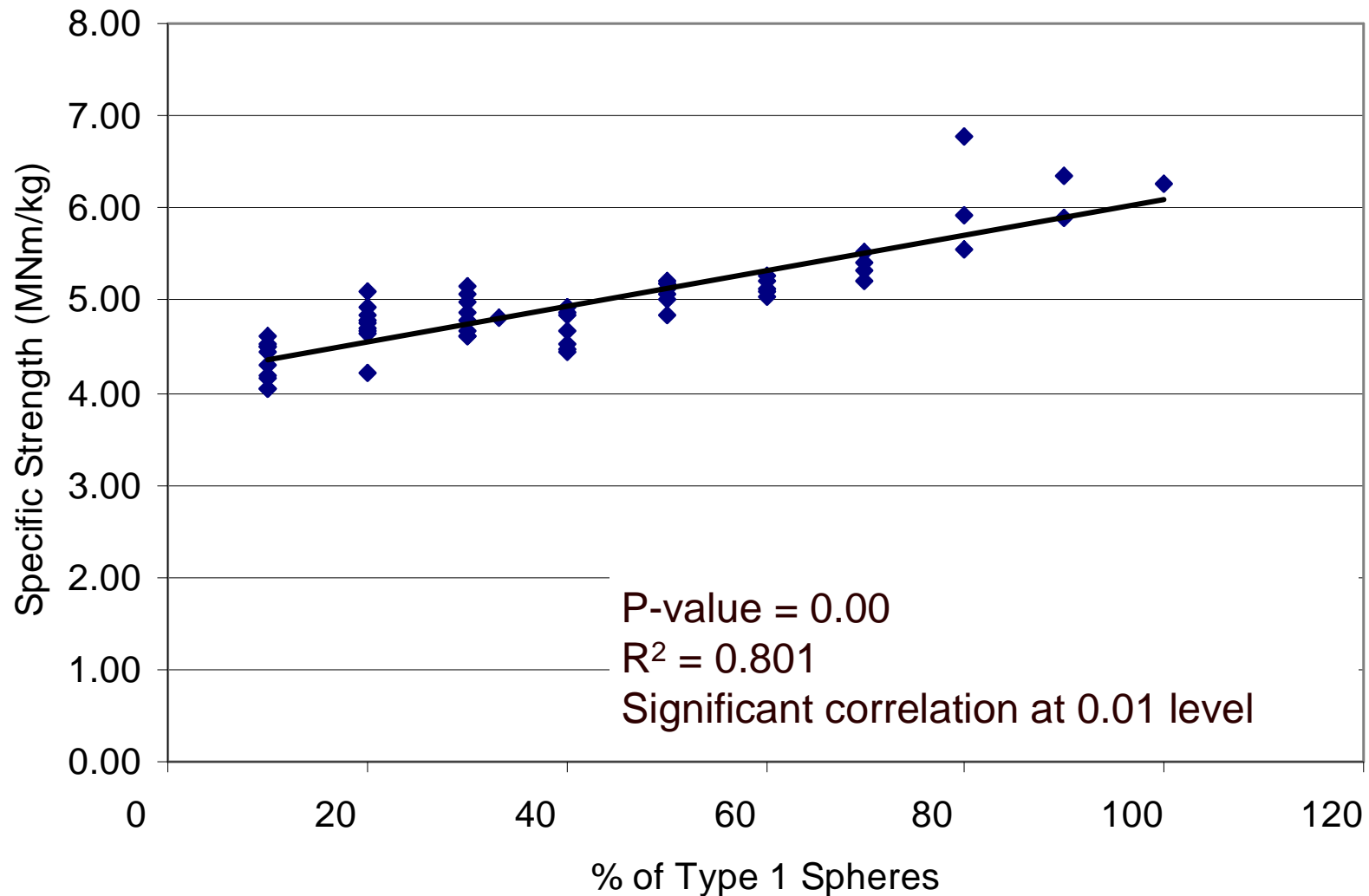


Ceramic Core Combinations

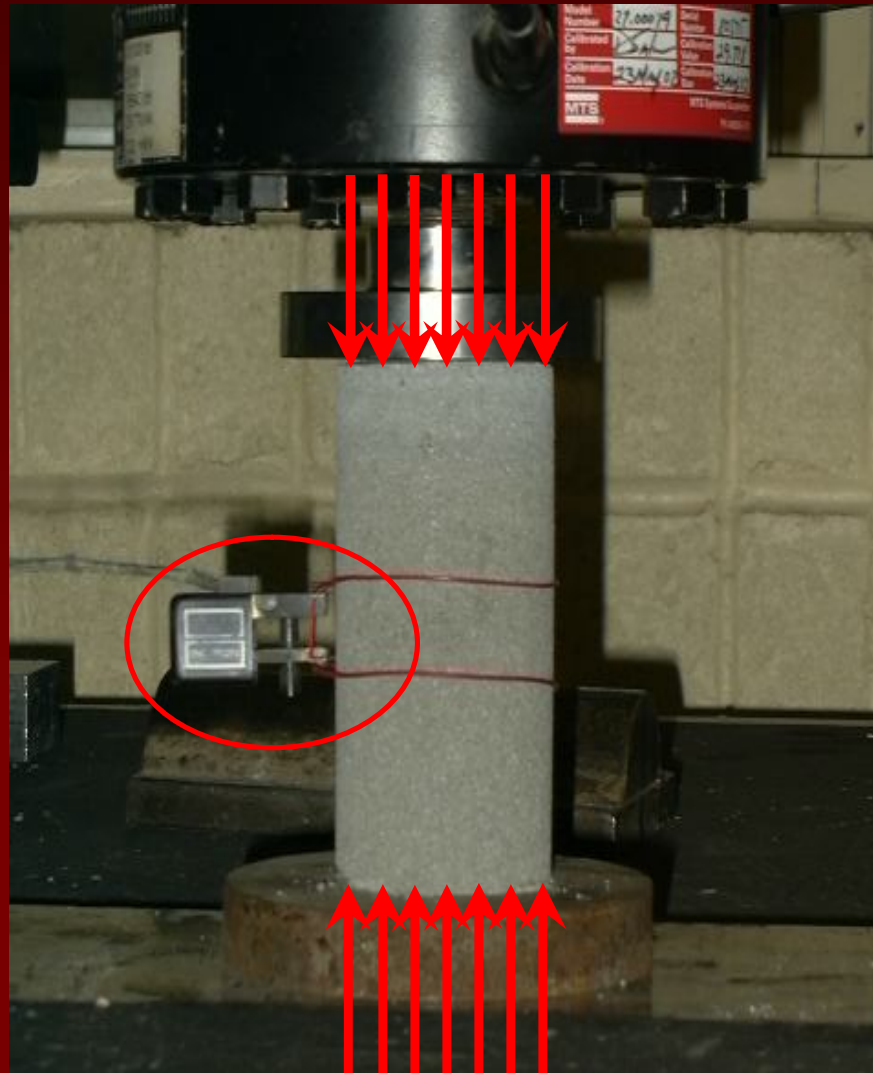


- Different M/S ratios ($1/5$, $1/4$, $1/3$, $1/2$)
- Different sphere combinations
- Use of chopped fibers in the matrix

Sphere Percentage vs. Specific Strength



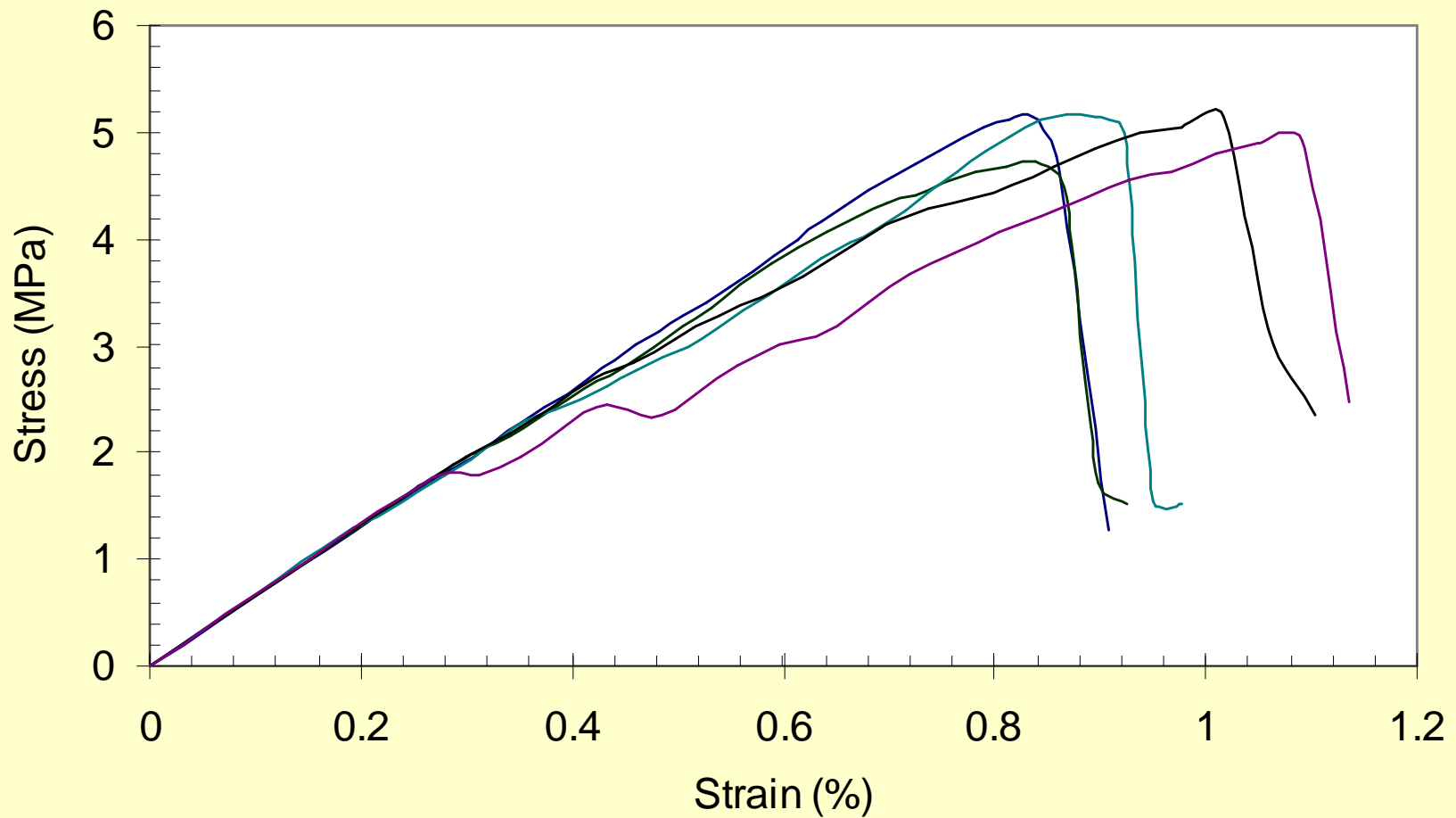
Uniaxial Compressive Test



Properties of cylinders made with increased M/S weight ratio

M/S	Spheres ML3050 (%)	Spheres ML1430 (%)	Spheres ML714 (%)	Density (kg/m ³)	Load (N)	Stress (KN/m ²)	Specific Strength (KNm/kg)
1/1.5	100	0	0	835.41	10976	5416	6.48
1/1.5	80	20	0	801.41	12661	6248	7.79
1/2	100	0	0	723.69	9545	4710	6.51
1/2	80	20	0	694.55	10153	5010	7.21
1/2.5 CF1*	100	0	0	635.29	4274	2109	3.32
1/2.5 GF2* *	100	0	0	608.10	3201.7	1580	2.60

Stress vs Strain curves from compressive tests of cylinders with mix designation M/S: 1/2 made with 80% type 1 and 20% type 2 spheres



High Temperature Exposure



- Cylinders exposed at 800⁰C for 5 minutes
- No degradation of compressive strength and modulus

Ceramic cylinders

Highest specific strength

Compressive Tests

	Peak Load (N)	Peak Strain (%)	Peak Stress (MPa)	Elastic Modulus (MPa)
<i>Average</i>	10,173	0.930	5.02	647.2

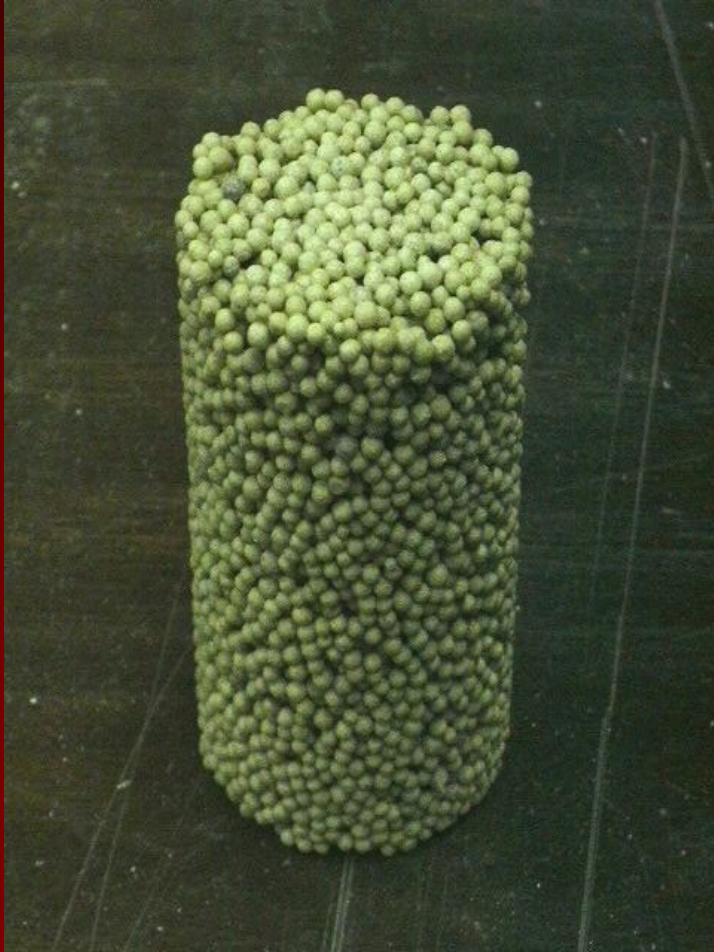
Tension Tests

	Peak Load (N)	Peak Displacement (mm)	Peak Stress (MPa)
<i>Average</i>	10,379	0.71	1.32

Properties of different types of core materials

Material	Density (kg/m ³)	Compressive strength (Mpa)
Corecell Foam	50-200	0.42-13
Linear PVC Foam	50-80	0.4-0.9
Cross-linked PVC Foam low density	40-80	0.5-1.4
Cross-linked PVC Foam high density	100-200	2.0-4.6
Copolymer foam high density	200-400	4.0-13.0
PU rigid foam closed-cell	60	0.42
PEI/PES foam	80	0.75
Aluminum Honeycomb	-	4.2
Geopolymer-Ceramic Spheres Core	500-700	1.50-5

Polystyrene Core



Properties of cylinders made with polystyrene spheres

M/S	Peak Displacement (mm)	Peak Load (N)	Peak Strain %	Peak Stress (MPa)	Elastic Modulus E (MPa)	Density (kg/m ³)	Specific Strength (KNm/kg)
1/4	4.52	207.00	4.03	0.10	7.27	88.40	1.16
1/4.5	5.08	129.02	5.00	0.06	6.63	70.91	0.90
1/5	5.08	115.66	3.62	0.06	4.35	54.40	1.05
1/2 CS	2.73	398.00	2.44	0.20	7.31	333.19	0.59
1/3 CS	4.38	389.40	4.31	0.19	4.64	263.74	0.73
1/3.5 CS	4.47	337.39	4.00	0.17	6.87	176.31	0.94

Conclusions



- The density of the mix greatly affects the mechanical properties of the foam.
- There is strong correlation between the type of spheres used in the mix and the strength of the foam
- The highest specific density was obtained by a mix containing 80% type 1 and 20% type 2 spheres having a matrix to spheres weight ratio of 2/1.

Conclusions

- The selected ceramic syntactic foam had a density of 695 kg/m^3
- The compressive and tensile strengths of the ceramic foam are 39 MPa and 3.7 MPa respectively.
- The elastic modulus of the foam is 650 MPa.
- The stress-strain response of the core material is linear elastic in tension and compression. In all cases the failure was brittle with no post peak resistance.

Conclusions

- The core retains its compressive strength even after exposure at 800°C.
- Polystyrene spheres can be used with polysialate matrices in order to fabricate lightweight foam with 88 kg/m³ density and 0.10 MPa compressive strength.

Conclusions



- It is feasible to fabricate laminates using a titanium core and inorganic matrix-carbon composite.
- High modulus carbon tows can be attached to the titanium core using Geopolymers.
- In all cases, the failure occurs by fracture of carbon in the tension face.

Conclusions



- No delamination of the composite skins was observed.
- The strength degradation is negligible up to 400C.
- The stiffness of specimens subjected at elevated temperatures was slightly reduced.



Thank You