Composite materials

Sr.alavizaree@scu.ac.ir

https://telegram.me/BSCcomposite_cham

مقدمه

تاریخچه
تعاریف اولیه
فلسفه پیدایش و گسترش کامپوزیتها
کاربرد کامپوزیت‌ها

تاریخچه

The history of man-made composite materials(1)

▪Ancient Chinese and Egyptians made bricks by mixing straw with clay.

▪The bamboo used so often by the Chinese is an excellent fibrous composite.

The history of man-made composite materials(2)

▪Reinforced concrete is another example of the application of composites started in many years ago. Concrete is a relatively inexpensive structural material which supports a compressive load well but its resistance to tension is low. By using reinforcing rods (or wires), the majority of the tensile stress is borne by the reinforcing material.

▪The history of the development of modern composites can be dated back to the early 1940s, when fiberglass was first employed to reinforce plastics and were used to replace the plywood in nose radar domes known as radoms, to protect aircraft antennas.

The history of man-made composite materials(3)

- The first fiberglass boat was moulded in 1942.

The history of man-made composite materials(4)

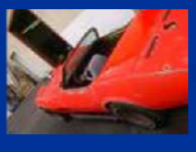
In view of their unique fatigue characteristics reinforced plastics were applied to aircraft propeller blades around 1950.

In the aerospace industries, the first re-entry nose-cone made from phenolic resin and asbestos fibers was proved successful in 1956.

The history of man-made composite materials(5)

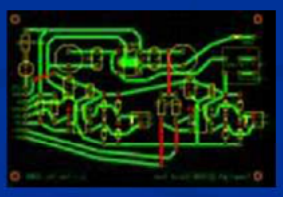
The Boeing 727 jet airliner introduced in 1960 used 2273 kg of reinforced plastics resulting in a 33% reduction in weight.

The application of composites to the automobile industry began in 1950s when PMCs were used on the Corvette body.



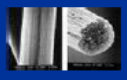
The history of man-made composite materials(6)

Because of their insulation characteristics, some composites also find their applications in electrical components. For example, Fiberglass-epoxy laminates were first used in 1956 for printed circuit boards.

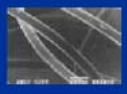


The history of man-made composite materials(7)

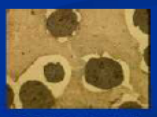
The development of Advanced metal matrix composites was initiated in the 1960s with the successful manufacture of several high strength fibers and whiskers and low cost ceramic particulates which could withstand the relatively high processing temperatures required for manufacturing of MMCs. These second phase materials include:

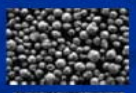
Boron Fibers 

Graphite Fibers

Alumina Fibers 

SiC particles

Graphite particles 

Alumina particles 

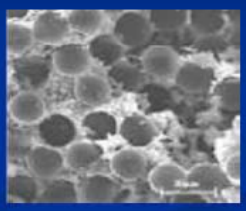
SiC whiskers

The history of man-made composite materials(8)

The development of ceramic matrix composites started in 1980s .

These composites are mostly considered for high temperature applications

Inter Turbine component



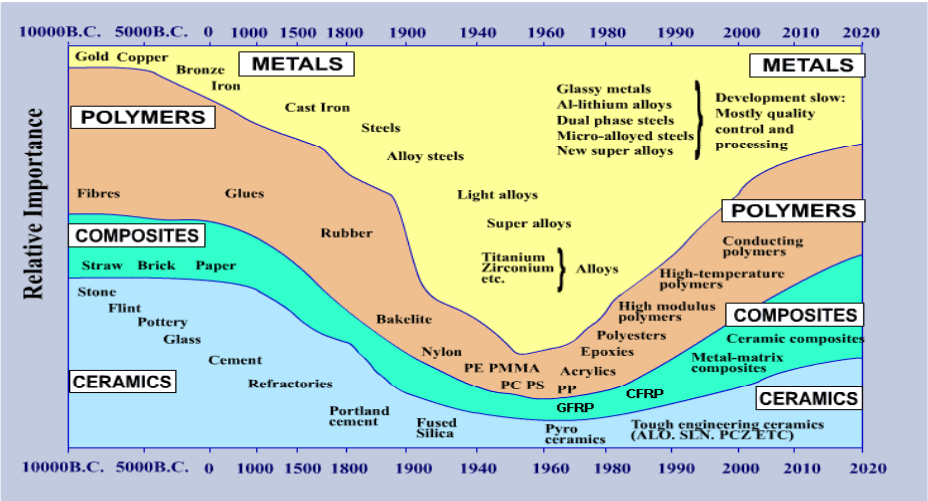
C/SiC

Hot gas filter system

The history of man-made composite materials(9)

Finally research works on nano composites started around the year 2000.

TEM of Alumina/SiC nanocomposite



The relative importance of metals, polymers, composites and ceramics as a function of time. The scale is not linear. (After Ashby, 1987)

چرا مواد کامپوزیتی

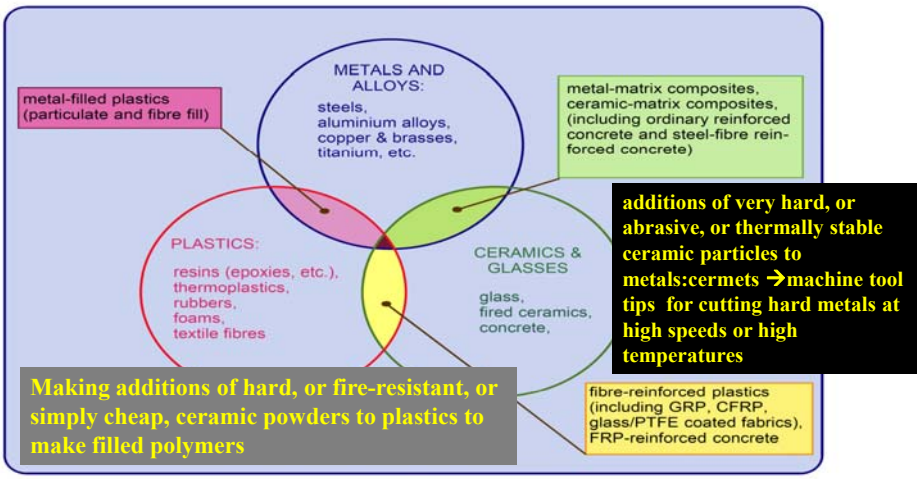


Figure 1.1. Relationships between classes of engineering materials, showing the evolution of composites

مروری بر مواد معمول مهندسی

پلاستیکها
سبک بودن(دانسیته کم)
مقاومت تا حد مناسب در برابر مواد شیمیایی
ضعف پایداری حرارتی
مقاومت متوسط در برابر تخریبهای محیطی مانند ماورابنفش نور خورشید (هوازدگی)
خواص مکانیکی ضعیف
امکان اتصال و تولید آسان

مروری بر مواد معمول مهندسی

سرامیکها

شامل دسته ای ازمواد سبک تا سنگین

مقاومت در برابر بیشتر حملات محیطی (سایش، فرسایش، مواد خورنده)

استحکام بسیار بالا

تردی و عدم انعطاف پذیری

امکان اتصال و شکل دهی سخت

مروری بر مواد معمول مهندسی

فلزها

دانسیته متوسط تا زیاد (منیزیم و آلومینیوم بسیار سبک)

مقاومت حرارتی مناسب (خزش)

امکان ایجاد مقاومت به خوردگی با آلیاژی کردن آنها

خواص مکانیکی خوب و انعطاف پذیری مناسب

امکان شکل دهی خوب

امکان اتصال و جوشکاری

استحکام بسیار بالا

تعاریف

کامپوزیت: تشکیل شده از دو یا چند ماده قابل تشخیص از همدیگر بعد از ساخت کامپوزیت و با خواص بهتر از ماده های اولیه (عدم واکنش شیمیایی گسترده)

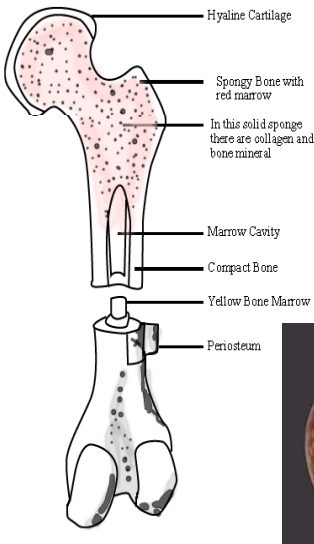
زمینه : نگهدارنده مواد درکنار هم (فاز مادر)

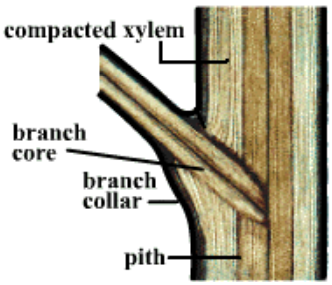
تقویت کننده : استحکام بخشی و ...

فصل مشترک بین تقویت کننده و زمینه

مثالهای از کامپوزیتها

- کامپوزیت های طبیعی
- چوب شامل توزیع رشته های سلولزی با سفتی و استحکام مناسب در زمینه از یک ماده پلیمری به نام لیگنین
- استخوان، دندان و ماهیچه
- صدف ذرات سرامیکی در زمینه پلیمری
- مخلوط خاک رس و الیاف گیاهی (کاهگل)





مثالهای از کامپوزیتها

- کامپوزیت های مصنوعی
- بتن مسلح
- سرمت ها به عنوان ابزار ساینده و ابزار برشی
- سنباده ها و ورقهای ساینده
- سیلندر برخی خودروها
- تایر خودرو
- فایبرگلس ها (سایبانها، صندلی ها)
- بدنه قایقهای تندرو

مزایای کامپوزیتها

- وزن به استحکام
- پایداری ابعادی عالی در مقایسه با مواد معمول
- پایداری زیاد در دمای بالا مانند خزش
- خواص خستگی بهبود یافته
- مقاومت به خوردگی خوب
- دارا بودن ترکیبی از خواص منحصربفرد نسبت به مواد معمول مهندسی
- خاصیت DAMPING (مثلا در راکت تنیس)

- امکان تولید مواد با خواص الکتریکی یا حرارتی افزایش و یا کاهش یافته

This is an example of the unique property of a composite, (The bending of bimetallics).

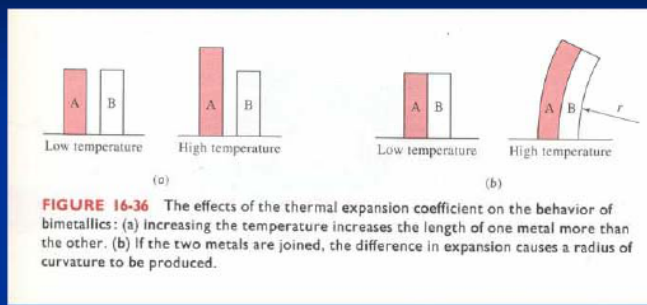


FIGURE 16-36 The effects of the thermal expansion coefficient on the behavior of bimetallics: (a) increasing the temperature increases the length of one metal more than the other. (b) If the two metals are joined, the difference in expansion causes a radius of curvature to be produced.

محدودیتهای مواد کامپوزیتی

- هزینه مواد اولیه و تولید
- ناهمسانگردی خواص (ممکن است در برخی موارد مزیت باشد)
- ضعف در برابر برخی مواد و اثرات محیطی (زمینه پلیمری)
- اتصال سخت به هم دیگر
- مشکلات بازیافتی
- بسیاری از این محدودیتها را با انتخاب مناسب مواد و طراحی خوب می‌توان برطرف کرد

دسته بندی مواد کامپوزیتی

- بر اساس طبیعت کامپوزیتها(طبیعی، مصنوعی)
- بر اساس زمینه (فلزی، پلیمری، سرامیکی، بین فلزی، کربنی)
- بر اساس شکل تقویت کننده) رشته ای، ورقه ای، ذره ای)
- بر اساس اندازه تقویت کننده(ماکرو، میکرو، نانو)

دسته بندی مواد کامپوزیتی

- بر اساس زمینه (فلزی، پلیمری، سرامیکی، بین فلزی، کربنی)
- PMC یا FRP
- کاربرد گسترده از هوا و فضا تا مصارف معمول تجاری
- قابلیت ساخت قطعات با اشکال پیچیده و اندازه بزرگ
- ساخته شده از رشته های کربنی، بور و یا شیشه در زمینه پلیمری
- رشته های استحکام و مدول بالا و زمینه وظیفه پخش کردن نیروهای اعمالی و مقاومت در برابر عوامل محیطی و خوردگی را دارد.

دسته بندی مواد کامپوزیتی

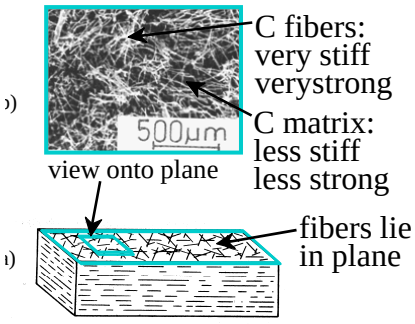
- بر اساس زمینه (فلزی، پلیمری، سرامیکی، بین فلزی، کربنی)
- MMC یا FRM
- زمینه فلزی تقویت شده با رشته، ویسکرز (رشته های کوتاه تک بلوری) یا ذرات
- سنگین تر از PMC ولی با توجه به زمینه فلزی مقاومت حرارتی و حفظ خواص در دماهای بهتر از PMC
- کاربرد کمتر از زمینه پلیمری ها در کاربرد های عمومی ولی بیشتر در کاربردهای صنعتی دمای بالا
- استفاده از گرافیت(با توجه به دانسیته کم آن) در زمینه فلزی در صورت حل مشکل عدم اتصال مناسب با زمینه فلزی کامپوزیت با خواص عالی

دسته بندی مواد کامپوزیتی

- بر اساس زمینه (فلزی، پلیمری، سرامیکی، بین فلزی، کربنی)
- CMC یا FRC
- زمینه سرامیکی تقویت شده با افزودنی سرامیکی جهت افزایش انعطاف پذیری و غلبه بر تردی با با ممانعت از اشاعه ترک در فصل مشترک
- حفظ خواص دمای بالا تا دمای ۱۷۰۰ درجه سلسیوس
- مثالهایی از وارد نمودن رشته های کاربید سیلیسیوم در زمینهAL2O3 ، SI3N4 یا SIC
- تقویت کننده به شکل رشته طویل، رشته کوتاه ، ذرات و یا رشته خلال شده باشد .
- جایگزین مناسب سوپرآلیاژها با ۷۰٪ دانسیته کمترو ۵۰۰ درجه دمای کاری بالاتر

دسته بندی مواد کامپوزیتی

- CCC کامپوزیت زمینه کربنی
- زمینه کربنی تقویت شده با رشته های کربنی
- بسیار شبیه به PMC با این تفاوت که زمینه کربنی از حرارت دهی پلیمر ارگانیک و تبدیل به کربن حاصل شده است.
- مقاوم به شوک حرارتی و بسیار مناسب برای کاربرد در دمای بالا
- کابرد در نازل راکتها، قطعات موتورها، قطعات موشکی، ماهواره ها



دسته بندی مواد کامپوزیتی

- IMC کامپوزیت زمینه ترکیب بین فلزی
- ترکیبات فلزی بادانسته کم تقویت شده با رشته های استحکام بالا و با دانسیته کم نامزد مناسبی برای استفاده در ساخت موتورهای توربین های گازی شدند.
- مثال از SiC در زمینه آلومیناید که خواص بسیار بهتری حتی نسبت به سوپرآلیاژ از خود نشان داد.
- بزرگترین محدودیت عدم تطابق شیمیایی بین اجزا و CTE متفاوت آنهاست
- معروفترین IMC: استفاده از زمینه TiAl یا Ti3Al بوده است.

دسته بندی مواد کامپوزیتی

کامپوزیت هیبریدی که می توانند ترکیب یک کامپوزیت با یک ماده جدید و یا استفاده از بیش از یک تقویت کننده باشد.

الف) مواد کامپوزیتی هیبریدی HCM

ب) تقویت کننده انتخابی

ج) مدیریت حرارتی

د) سازه و پوست هوشمند

مواد کامپوزیتی هیبریدی HCM

تلفیق و مخلوط کردن چند ماده که حداقل یکی از آنها کامپوزیت باشد.

مثلا کامپوزیت پلیمری تقویت شده ترکیب شده با یک فلز تقویت نشده همگن ARALL آرامید تقویت شده با ورقه های آلومینیوم که شامل ورقه های از جنس آلومینیوم استحکام بالا که چسب تقویت شده با رشته های آرامید آنها را بهم متصل کرده است.

مورد استفاده در بالهای هواپیمای با سرعت مافوق صوت

کامپوزیت CCC که یک طرف آن با فلز دیرگداز رنیوم تقویت شده است که سیستمهای تشعشعی و لوله های حرارتی فضاپیما استفاده شده است.

تقویت کننده انتخابی SELECTIVE REINFORCEMENT

افزودن انتخابی و موضعی تقویت کننده

در این دسته از مواد، جهت کاهش هزینه ها، تقویت کننده ها در بخشهای خاصی از کامپوزیت افزوده می شوند. مثلا اضافه کردن کامپوزیت زمینه تیتانیومی به بخشهایی از سازه تیتانیومی و ساختن ماده هیبریدی به روش شکل دهی ابر مومسانی/اتصال نفوذیSPF/DB

با این کار درحین فرآیند فقط بخشی از فلز TI با کامپوزیت تقویت شده است.

در روش مزبور با قرار دادن بخش کامپوزیتی در سازه و انجام تغییر شکل بسیار زیاد و سپس اجازه دادن جهت نفوذ و ایجاد اتصال، بخش مورد نظر نیز تقویت می شود.

از مزیتها مثلا عدم کامپوزیت سازی بخشهایی است که نیاز به اتصال مکانیکی(ضغف کامپوزیتها) است، می باشد.

مدیریت حرارتی THERMAL MANAGEMENT

هدف طراحی مواد با سرعت زیاد انتقال حرارت و کاهش دما درمناطق حساس از منبع داغ به مناطق سردتر

استفاده از رشته کربنی که در جهت الیاف هدایت حرارتی بالاتری حتی ازمس دارد و به عنوان مسیر تخلیه حرارت در طول خودش عمل می کند.

با قرار دادن این الیاف در یک زمینه عایق میتوان محصولی ساخت که در یک جهت عایق حرارتی و در جهت دیگر هادی حرارتی باشد.

با وارد کردن الیاف گرافیتی و شیشه ای در زمینه رزین فنولیک امکان ساخت کامپوزیتی سبک، مقاوم در برابر اتش و شعله و با حفظ مزیت راحت بودن ساخت (راحتی شکل دهی) وجود دارد.(مبلمان و فضای داخلی هواپیما ها).

سازه های هوشمند و پوسته هوشمند

دارای عناصر نانوساختاری

شامل سنسورهایی مثلا از جنس رشته های نوری بوده که وظیفه پایش سلامت سازه را بر عهده داشته و هر گونه ترک یا تغییر شکل و یا تغییر دما را گزارش کند.

یک پوسته هوشمند هم نقش ساده پوسته خارجی را ایفا نموده و هم با دارا بودن مدارها و عناصر الکترونیکی بطور جداگانه به عنوان مسیر انتقال سیگنالها در یک هواپیما یا موشک عمل می کند.

نقش زمینه و تقویت کننده

زمینه (فاز مادر) به عنوان چسب(BINDER) وظیفه در کنار هم نگهداشتن اجزا و ساخت شکل کلی قطعه

حفظ توزیع و چیدمان تقویت کننده ها بعد از ساخت و د رحین کارکرد

در هنگام اعمال نیرو، زمینه بار را به تقویت کننده منتقل نموده و در برخی موارد با تحمل بار و تغییر شکل کمی وظیفه تحمل تنش را به تقویت کننده میدهد.

به

نقش زمینه و تقویت کننده

تقویت کننده (فاز ثانویه) وظیفه تقویت کردن فاز زمینه را بر عهده دارد.

تحمل بار و تنشهای منتقل شده از زمینه تا استحکام کامپوزیت

مواد مورد استفاده در ساخت کامپوزیت ها

انواع مواد زمینه

دسته بندی انواع تقویت کننده ها براساس:

شکل

جنس تقویت کننده

انواع تقویت کننده

Reinforcements & Matrices

Reinforcements

دسته بندی بر اساس شکل:

پیوسته

الیاف بلند FIBERS

لایه ها LAMINATES

ناپیوسته

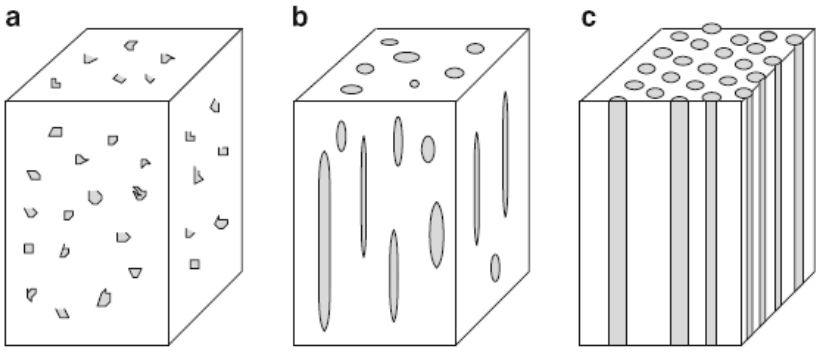
الیاف کوتاه

ذرات PARTICLES

ویسکرز WISKERS

- **CONTINUOUS FIBERS**
- **با طول بسیار زیاد که همه بار را تحمل می کند.**

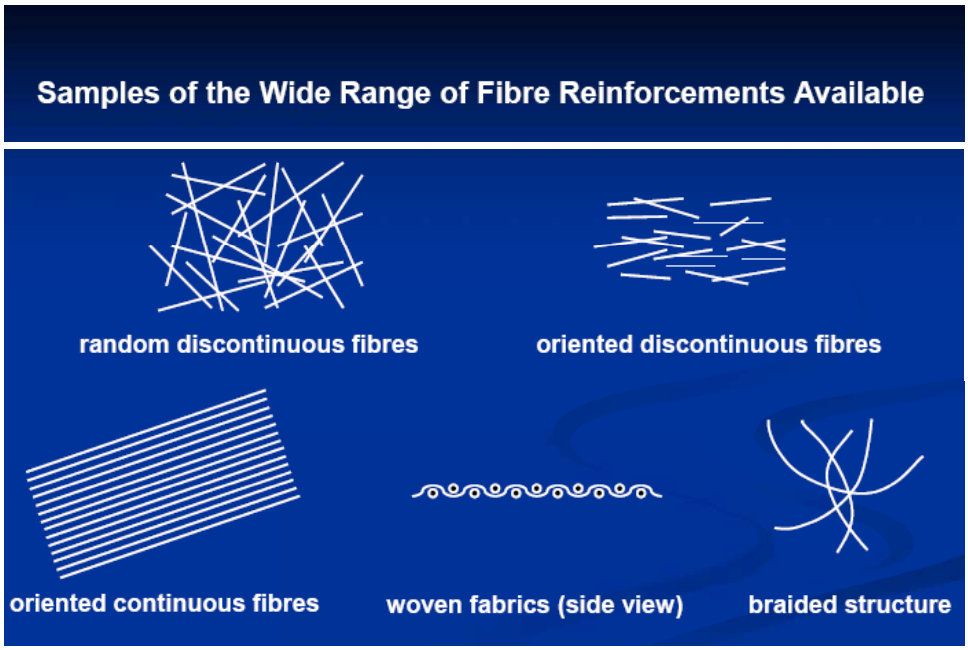
- **DISCONTINUOUS FIBERS**
- **الیاف و یا رشته های منقطع و تکه شده که با نسبت ابعادی از رشته طولانی تشخیص داده می شوند (L/D = ROUGHLY 100)**
- **WHISKERS - رشته های شبیه مو با قطر حدود MM۰/۰۰۱ و استحکام بسیار زیاد**



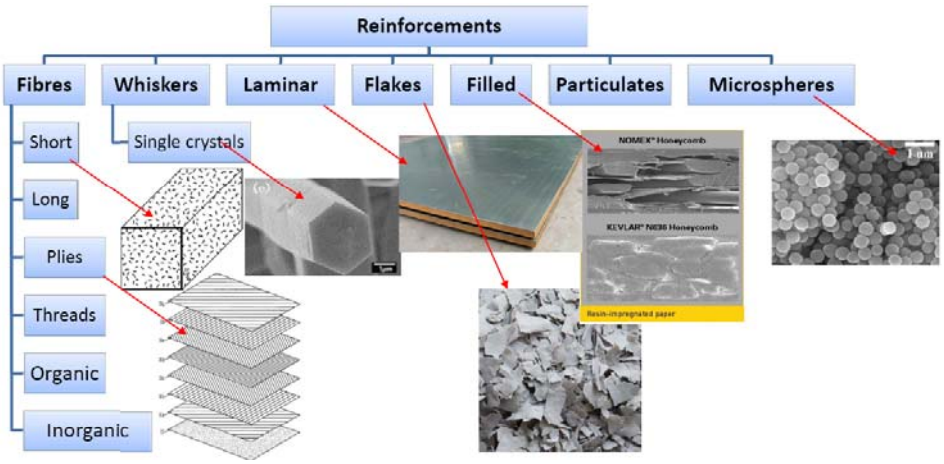
(a) Particulate reinforced composite

(b) Discontinuous fiber reinforced composite

(c) Continuous fiber reinforced composite



REINFORCEMENTS



The arrangement of the reinforcement (distribution, size, shape and orientation matters) → **properties of the composites material and its anisotropy**

رشته ها (الیاف)

عنصر تقویت کننده در کامپوزیتهای FRC لایه ای و پلیمری

انتخاب جنس مناسب، مقدار مطلوب(کسر حجمی) و جهت گیری مطلوب رشته ها در کامپوزیت لایه ای بر خواص زیر تاثیر گذار است:

دانسیته

مدول یانگ و استحکام کششی

استحکام فشاری

استحکام خستگی و مکانیسم های تخریب به علت خستگی

هدایت حرارتی و الکتریکی

قیمت

جنس رشته ها (الیاف)

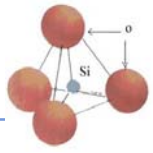
- **شیشه به شکل فیلامنت**
- **کربن با مدول الاستیک بالا**
- **بور مدول الاستیک بسیار بالا**
- **پلیمر با نام تجاری کولار KEVLAR**
- **سرامیک SiC و AL2O3**
- **فلزی به صورت رشته سیمهای فلزی فولادی**

Fiber	Typical Diameter (μm)[a]	Specific Gravity	Tensile Modulus (GPa)	Tensile Strength (GPa)	Strain to Failure (%)	Coefficient of Thermal Expansion (10^{-6}/°C)[b]	Poisson's Ratio
Glass							
E-glass	10	2.54	72.4	3.45	4.8	5	0.2
S-glass	10	2.49	86.9	4.30	5.0	2.9	0.22
PAN carbon							
T-300[c]	7	1.76	231	3.65	1.4	−0.6, 7–12	0.2
AS-1[d]	8	1.80	228	3.10	1.32		
AS-4[d]	7	1.80	248	4.07	1.65		
T-40[c]	5.1	1.81	290	5.65	1.8	−0.75	
IM-7[d]	5	1.78	301	5.31	1.81		
HMS-4[d]	8	1.80	345	2.48	0.7		
GY-70[c]	8.4	1.96	483	1.52	0.38		
Pitch carbon							
P-55[c]	10	2.0	380	1.90	0.5	−1.3	
P-100[c]	10	2.15	758	2.41	0.32	−1.45	
Aramid							
Kevlar 49[f]	11.9	1.45	131	3.62	2.8	−2, 59	0.35
Kevlar 149[f]		1.47	179	3.45	1.9		
Technora[g]		1.39	70	3.0	4.4	−6	
Extended-chain polyethylene							
Spectra 900	38	0.97	117	2.59	3.5		
Spectra 1000	27	0.97	172	3.0	2.7		
Boron	140	2.7	393	3.1	0.79	5	0.2
SiC							
Monofilament	140	3.08	400	3.44	0.86	1.5	
Nicalon (multi-filament)[i]	14.5	2.55	196	2.75	1.4		
Al_2O_3							
FiberFP[f]	20	3.95	379	1.90	0.4	8.3	
Al_2O_3-SiO_2[j]							
Fiberfrax (discontinuous)	2–12	2.73	103	1.03–1.72			

GLASSES

- E-glass: good strength, stiffness, electrical and weathering properties.
- C-glass: good corrosion properties but lower strength
- S-glass: more expensive than E- glass because of higher strength, E-modulus and T resistance.

- Tetrahedra of Si and O with covalent bonding
- Rigid 3D network
- Presence of Ca, Na, K with low valency tends to break up the network
- Lower stiffness and strength but improve formability



E-GLASS

- determining the strength by damage during processing operations.
- **Solution:** treat glass fibers with a size at an early stage in manufacture.
- **What is Size?** A thin coating (contain a film forming polymer polyvinyl acetate, a lubricant and a coupling agent such as organisilne to bond matrix and fibers.پلی وینیل استات
- The size serves several purposes:
- (a) to protect the surface of the fibres from damage,
- (b) bind the fibres together for ease of processing,
- (c) to lubricate the fibres that they can withstand abrasion during subsequent processing operations ,
- (d) to impart anti-static properties
- (e) to provide a chemical link between the glass surface and the matrix to increase the interface bond strength.

SIC

- Diamond structure
- Low density, high stiffness and strength
- Good thermal stability and thermal conductivity
- Forms:
- A) CVD monofilaments (100-150 Micron)

B) Wiskers (0.1-1 micron) single crystals

C) Particulate; low cost, ease handling and processing. (Al-SiC particulate)

Alumina and Aluminasilicates

- **Short fibers: produced by spinning of viscous and concentrated solution of Al compounds**
- **Application:** high-temperature insulation purposes
- **Most common is Saffil™(safe filament) that contains about 5% silica to stabilize delta structure of alumina**
- **Reinforcement for Al-based composites**

Fibers for PMCs

Filaments of reinforcing material, usually circular in cross-section

- Diameters range from less than 0.0025 mm to about 0.13 mm, depending on material
- Filaments provide greatest opportunity for strength enhancement of composites
  - The filament form of most materials is significantly stronger than the bulk form
  - As diameter is reduced, the material becomes oriented in the fiber axis direction and probability of defects in the structure decreases significantly

GLASS FIBERS

- Based on SiO_2 with addition of oxides of Ca,B,Na,Al
- Amorphous but with prolonged heating some crystallization occur leading to a reduction in

Table 2.3 *Glass fibre compositions and properties*

	E-glass	C-glass	S-glass
Composition (%)			
SiO_2	52.4	64.4	64.4
$Al_2O_3 + Fe_2O_3$	14.4	4.1	25.0
CaO	17.2	13.4	—
MgO	4.6	3.3	10.3
$Na_2O + K_2O$	0.8	9.6	0.3
B_2O_3	10.6	4.7	—
BaO	—	0.9	—
Properties			
ρ (Mg m^{-3})	2.60	2.49	2.48
K (W m^{-1} K^{-1})	13	13	13
α (10^{-6} K^{-1})	4.9	7.2	5.6
σ_t (GPa)	3.45	3.30	4.60
E (GPa)	76.0	69.0	85.5
T_{max}(°C)	550	600	650

Strength

Corrosion

Electrical

REINFORCEMENTS

Table 2.1 *Some common types of reinforcement*

Form	Size (μm)		Fabrication route	Examples
	d	*L*		
Monofilaments (large-diameter single fibres)	100–150	∞	CVD onto core fibres (e.g. of C or W)	SiC (SCS-6™) Boron
Multifilaments (tows or woven rovings with up to 14 000 fibres per strand)	7–30	∞	Precursor stretching; pyrolysing; melt spinning	Carbon (HS & HM) Glass Nicalon™ Kevlar™ 49 FP™ alumina
Short fibres (staple fibres aggregated into blankets, tapes, wool, etc.)	1–10	50–5000	Spinning of slurries or solutions, heat treatment	Saffil™ Kaowool Fiberfrax™
Whiskers (fine single crystals in loose aggregates)	0.1–1	5–100	Vapour phase growth/reaction	SiC Al_2O_3
Particulate (loose powder)	5–20	5–20	Steelmaking byproduct; refined ore; sol-gel processing, etc.	SiC Al_2O_3 B_4C TiB_2

Table 2.2 *Fibre properties*

Fibre	Density ρ (Mg m^{-3})	Young's modulus E (GPa)	Poisson's ratio ν	Tensile strength σ_s (GPa)	Failure strain ϵ_s (%)	Thermal expansivity α (10^{-6} K^{-1})	Thermal conductivity K (W m^{-1} K^{-1})
SiC monofilament	3.0	400	0.20	2.4	0.6	4.0	10
Boron monofilament	2.6	400	0.20	4.0	1.0	5.0	38
HM[a] carbon	1.95	axial 380 radial 12	0.20	2.4	0.6	axial −0.7 radial 10	axial 105
HS[b] carbon	1.75	axial 230 radial 20	0.20	3.4	1.1	axial −0.4 radial 10	axial 24
E-glass	2.56	76	0.22	2.0	2.6	4.9	13
Nicalon™	2.6	190	0.20	2.0	1.0	6.5	10
Kevlar™ 49	1.45	axial 130 radial 10	0.35	3.0	2.3	axial −6 radial 54	axial 0.04
FP™ fibre	3.9	380	0.26	2.0	0.5	8.5	8
Saffil™	3.4	300	0.26	2.0	0.7	7.0	5
SiC whisker	3.2	450	0.17	5.5	1.2	4.0	100
Cellulose (flax)	1.0	80	0.3	2.0	3.0	—	—

[a] High modulus
[b] High strength

High stiffness
Low density

Carbon arranged in hexagonal array:
in basal plane (normal to C-axis) covalent bond (E=1000GPA)
Parallel to C-Axis : van der Waals (E=35GPA)

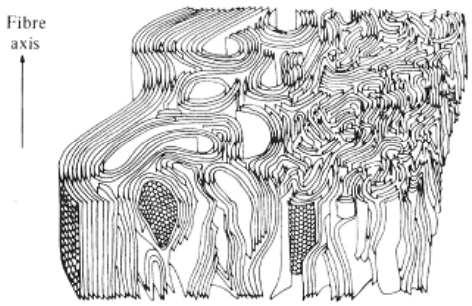


Fig. 2.1 Schematic representation of the structure of carbon fibres. (From Bennett and Johnson, 1978).

Table 3.1 Some important ceramic reinforcements

Particle	*SiC, TiC, Al_2O_3*
Discontinuous Fibers	
(a) Whiskers	SiC, TiB_2, Al_2O_3
(b) Short fibers	Glass, Al_2O_3, SiC, ($Al_2O_3 + SiO_2$), vapor-grown carbon fibers
Continuous fibers	
Oxide	Al_2O_3, ($Al_2O_3 + SiO_2$), ZrO_2, silica-based glasses
Nonoxide	B, C, SiC, Si_3N_4, BN

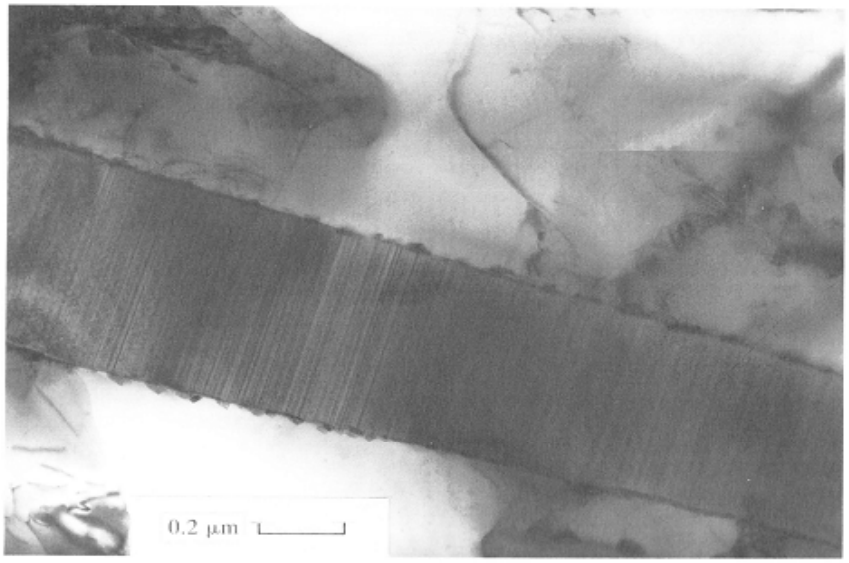
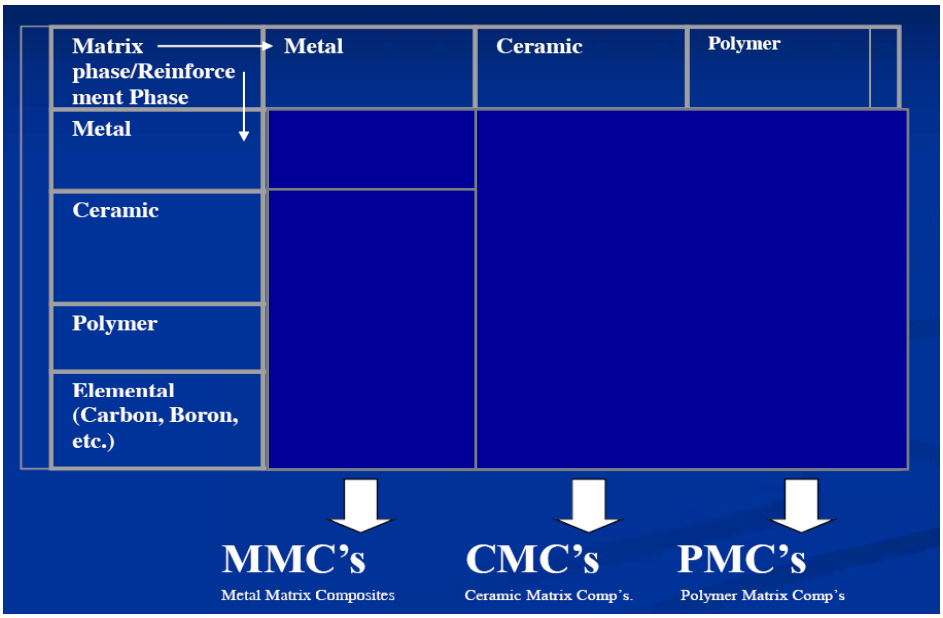


Fig. 2.5 Transmission electron (TEM) micrograph of a SiC whisker, showing the fine internal twin structure.

Types of Composites



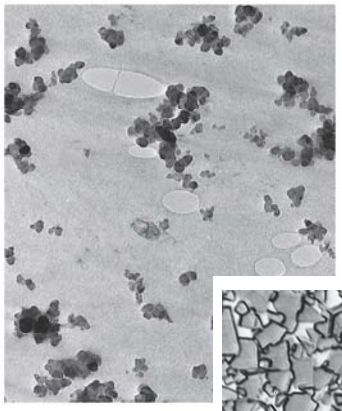


Figure 16.5 Electron micrograph showing the spherical reinforcing carbon black particles in a synthetic rubber tire tread compound. The areas resembling water marks are tiny air pockets in the rubber. 80,000×. (Courtesy of Goodyear Tire & Rubber Company.)

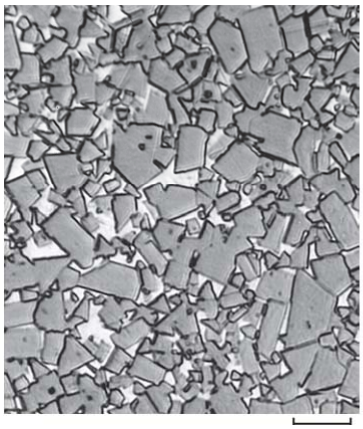


Figure 16.4 Photomicrograph of a WC–Co cemented carbide. Light areas are the cobalt matrix; dark regions, the particles of tungsten carbide. 100×. (Courtesy of Carboloy Systems Department, General Electric Company.)