
FIBRE DE ARMARE ȘI COMPOZITE ARMATE CU FIBRE

Clasificarea compozitelor cu fibre

1. Cu **matrici polimerice** – de obicei din categoria *rășini* - termorigide (epoxidice, poliimide sau poliesterice) sau termoplastice – armate în modul cel mai frecvent cu *fibre* de sticlă, de carbon, de bor sau aramidice (Kevlar), cu *monocristale ceramice* sau, relativ recent, cu *fibre metalice* sau *ceramice*; sunt folosite mai ales în aplicații care presupun temperaturi relativ joase de lucru (ajungând, în mod excepțional, pentru termoplastice fabricate prin injecție, la nivelul maxim de 400°C).
2. Cu **matrici metalice** – cel mai frecvent acestea se bazează pe aliaje de aluminiu, magneziu, titan sau cupru, în care se introduc fibre de bor, de carbon (grafit) sau ceramice (de obicei de alumină sau carbură de siliciu); temperatura de lucru (uzual de cel mult 800°C) a acestor compozite este limitată de nivelul punctului de înmuiere sau de topire care caracterizează matricea; pentru aplicații la temperaturi mari se folosesc ca matrice aliaje pe bază de nichel sau superaliaje; acestea au dezavantajul unor greutatea specifice mari, crescând masivitatea structurii finale.
3. Cu **matrici ceramice** – au fost dezvoltate în mod special pentru aplicațiile cu temperaturi foarte ridicate de lucru (peste 1000°C); cele mai utilizate materiale de bază sunt carbura de siliciu (SiC), alumina (Al₂O₃) și sticla, iar fibrele de armare uzuale sunt tot de natură ceramică (de obicei sub formă de fibre discontinue, foarte scurte).
4. Compozite “**carbon-carbon**” – cu matrice de carbon sau de grafit și armare cu fibre sau țesături de fibre de grafit; sunt foarte scumpe, dar și incomparabile cu alte materiale prin rezistența la temperaturi înalte (de până la 3000°C), cuplată cu o densitate mică și un coeficient mic de dilatare termică.

Cele mai utilizate sunt compozitele armate cu fibre **lungi** (de obicei din carbon, bor, sticlă, alumină sau carbură de siliciu), numite **unidireționale**; aceste materiale compuse manifestă o puternică *anizotropie* a proprietăților fizico-mecanice, iar proprietățile cele mai performante se realizează pe direcția armării.

Particularități ale elementelor de armare sub formă de fibre

Diferitele variante de fibre sunt, așadar, cele mai răspândite elemente de adaos pentru fabricarea compozitelor, încât se produc și se comercializează de către firme specializate, în gamă extrem de largă de forme și de dimensiuni. În principiu sunt foarte subțiri, adică au secțiuni transversale de foarte mici dimensiuni, astfel încât proprietățile lor mecanice (atunci când sunt testate individual) au valori competitive numai la solicitarea de tracțiune; pe de altă parte este important de remarcat că diametrul lor mic duce la micșorarea numărului defectelor de structură în material, astfel încât performanțele lor de rezistență și de rigiditate (atunci când sunt solicitate la întindere) se dovedesc de obicei a fi mult mai bune, față de ale materialului respectiv sub formă de bloc.

Se admite că, pentru compozitele fabricate în mod curent, conținutul volumic de fibre este de maximum 30% – dacă se folosesc fibre discontinue, dar poate ajunge până la 60% (valoare destul de obișnuită), sau chiar 80% – la armarea cu fibre lungi; compozitele din această clasă au proprietăți mecanice care sunt considerate *omogene* – pentru armarea cu fibre discontinue dispuse aleator, respectiv *neomogene* – dacă fibrele sunt orientate selectiv.

Proprietăți tipice ale unor materiale sub formă de fibre lungi

| | Sticlă E | Sticlă S | Kevlar | Bor | SiC | Al ₂ O ₃ |
|------------------------|----------|----------|--------|---------|-----|--------------------------------|
| R [GPa] | 3,5 | 4,5 | 3,8 | 3,3÷3,6 | 4,1 | 1,7÷3,0 |
| E [GPa] | 72 | 86 | 130 | 365÷415 | 400 | 380 |
| ρ [g/cm ³] | 2,5 | 2,5 | 1,5 | 2,1÷3,0 | 3,0 | 3,7 |

Fibrele de interes tehnologic sunt caracterizate, ca regulă generală, prin *valori specifice* ridicate ale proprietăților de rigiditate (E/ρ) și de rezistență mecanică (σ/ρ); tabelul de mai sus prezintă valorile tipice ale rezistenței la tracțiune **R**, ale modulului longitudinal de elasticitate **E** și ale densității ρ , pentru fibrele lungi realizate din câteva materiale uzuale.

Categorii de metode pentru fabricarea fibrelor

Au fost dezvoltate tehnici de fabricare foarte diverse, dar care se pot încadra, după principiul pe care se bazează, în trei categorii mari:

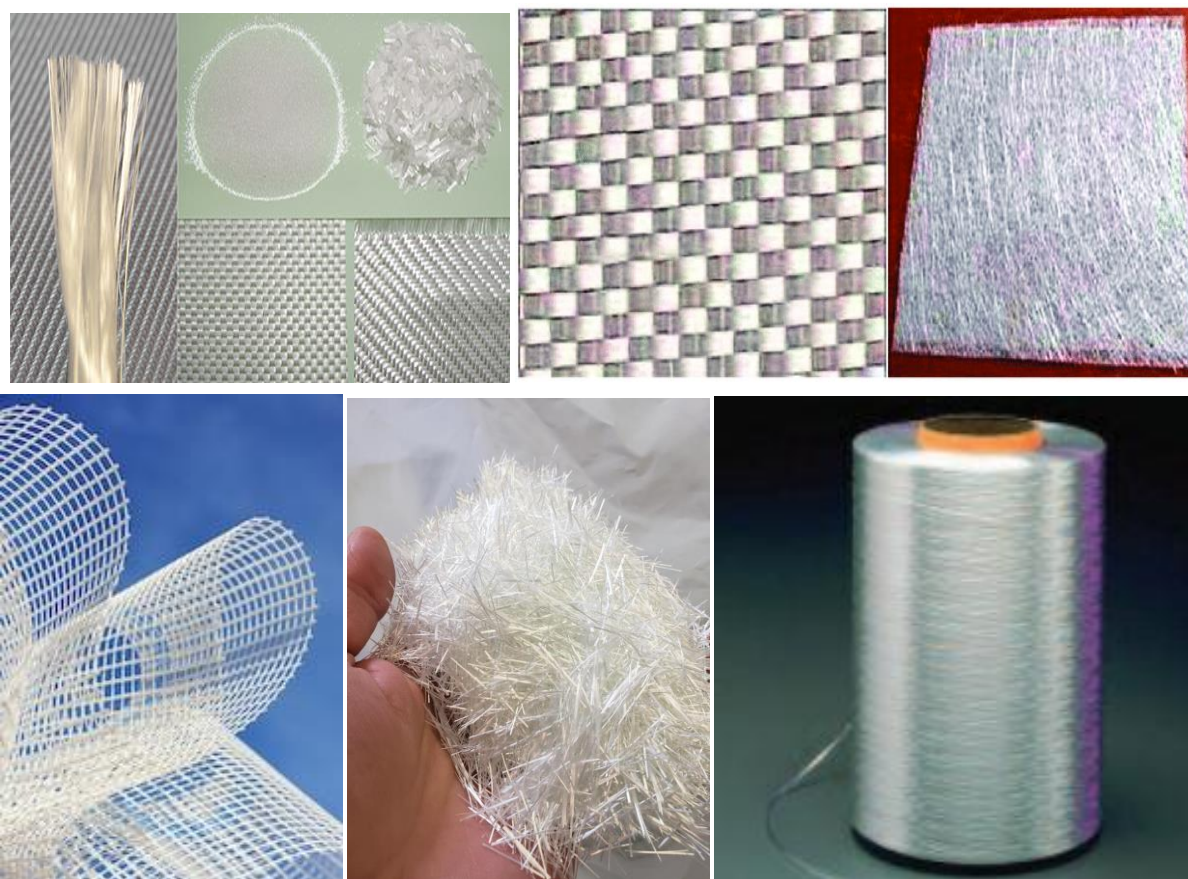
1. Metode de **tragere din topitură** – sunt folosite, ca exemplificare tipică, pentru mai mult de jumătate dintre fibrele de sticlă sau de alumină-silice; ca variantă, datorită caracterului specific al stării topite a metalelor, pentru fibrele scurte din aliaje metalice amorfe se folosește *extracția* din topitură.
2. Metode de **transformare în stare solidă** – reprezintă metodele de bază pentru obținerea unor categorii speciale de fibre, așa cum sunt cele de carbon, carbură de siliciu, alumină-silice sau oxid de zirconiu; au ca element de pornire un *material precursor* prelucrat sub formă de fibre și care este transformat, printr-un tratament termic sau termo-chimic, în materialul dorit.
3. Metode de **creștere din stare de vapori** – sunt tehnici foarte pretențioase, utilizate pentru producerea fibrelor foarte scurte (monocristaline) sau a celor continue (monofilament), acestea din urmă fiind formate prin depunerea materialului final pe niște fibre-suport inițiale.

Fiecare dintre aceste categorii de metode prezintă avantaje, dar și puncte slabe, iar acestea trebuie avute în vedere la alegerea tehnologiei potrivite într-un anumit proces, dar și pentru perfecționarea metodelor existente; de exemplu, tragerea din topitură este foarte ieftină, dar conduce la obținerea unor fibre inferioare din punct de vedere calitativ; de partea cealaltă, metodele de creștere din stare de vapori permit realizarea unor fibre de calitate excepțională, dar care sunt foarte scumpe.

Materiale sub formă de fibre utilizate la fabricarea compozitelor

A. Fibrele de sticlă

Fibrele din această clasă sunt produse pe scară largă și în multe sortimente, care sunt simbolizate prin litere mari – sticlă E, A, C, D, S etc.; acestea sunt diferențiate între ele prin proporția compușilor oxidici care se află în compoziția lor, printre care majoritar (55÷73%) se află mereu bioxidul de siliciu (SiO_2).



Aspectul unor fibre și al unor țesături din fibre de sticlă

Se consideră că cele mai importante pentru fabricarea compozitelor sunt următoarele sortimente de sticlă:

Sticla C – are rezistență *chimică* remarcabilă, fiind indicată pentru compozitele care trebuie să lucreze în medii agresive.

Sticla D – are un conținut ridicat de SiO_2 , care îi conferă densitate mică, rezistență termică bună, calități *dielectrice* foarte bune (apropiate de cele ale siliceii); este mult folosită în industria de componente electronice.

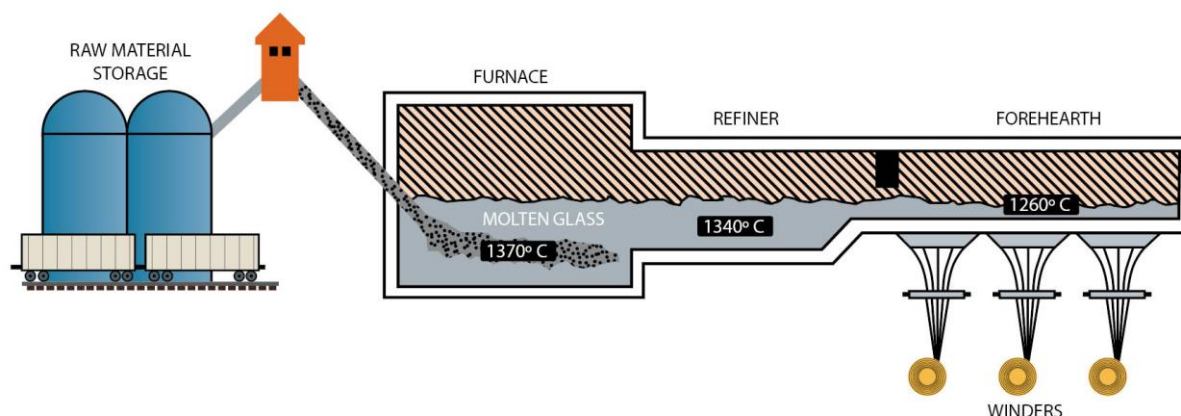
Sticla E – este caracterizată prin prelucrabilitate foarte bună, rezistență mecanică mare, proprietăți *electro-izolante* și stabilitate în condiții de umiditate; este vulnerabilă și se poate degrada în medii puternic alcaline sau acide.

Sticla denumită codificat **S** (în varianta nord-americană), respectiv **R** (în varianta vest-europeană) – are cele mai bune performanțe mecanice dintre toate sortimentele

STRUCTURI DIN MATERIALE COMPOZITE

(inclusiv la temperaturi ridicate, de până la 750°C), datorită conținutului de silicați de Al și Mg; se folosește pe scară largă, în combinație cu matrici polimerice, în aplicații industriale din domeniile aeronautic și militar.

Ca material, sticla era cunoscută încă din antichitate (se pare că etruscii au folosit-o primii, cel puțin pe teritoriul european), dar răspândirea ei ca material structural s-a produs în secolul XVII, cu o utilizare mereu mai largă, până la extinderea la scară globală din secolul trecut; se consideră că fabricarea și comercializarea fibrelor de sticlă au început în anul 1931, având legătură cu folosirea lor pentru producerea de izolații electrice pentru temperaturi ridicate; după un deceniu, în 1943, un compozit din rășină epoxidică și fibre de sticlă s-a utilizat prima oară la construcția fuselajului unui avion de luptă.



Schematizarea unei instalații pentru fabricarea fibrelor lungi de sticlă.

Fibrele din această largă categorie au reprezentat cel mai utilizat material de ranforsare, la începutul fabricării plasticilor armate; a fost o etapă de pionierat, în cursul căreia a fost dovedit că ele pot înlocui cu succes metalele în aplicații ingineresti de mare performanță; situația se menține și în prezent pentru polimerii armați cu fibre de sticlă (în pofida evoluției spectaculoase a fibrelor aramidice, sau a celor de carbon), care încă au o pondere de peste patru cincimi din piața compozitelor cu matrice polimerică; potrivit unor estimări, acceptate și citate pe scară largă, 85% din fibrele de sticlă produse în lume în fiecare an se folosesc la armarea maselor plastice.

Calitățile principale ale fibrelor de sticlă explică și contribuie pe deplin la supremația lor pe piața compozitelor: au rezistență foarte bună la tracțiune (între 3.4 și 4.6 GPa), dar și la compresiune și solicitări prin șoc, stabilitate dimensională, rezistență la coroziune; sunt maleabile și relativ ușor de prelucrat sub formă de împletituri; au rezistență specifică (σ/γ) foarte competitivă (pentru că au densitate mică, de aproximativ 2,5g/cm³), preț scăzut față de alte fibre, plus o mare varietate a formelor de prezentare; pentru multe aplicații este important și faptul că nu sunt higroscopice (nu absorb apă din mediul de lucru), nu putrezesc și nu ard, ceea ce însă le face greu de degradat (adică de eliminat din mediul înconjurător), atunci când ajung în stare de deșeuri.

Utilizarea lor atât de răspândită se explică și prin accesibilitatea evidentă a materiilor prime pentru fabricarea sticlei – în principiu este vorba despre nisip (una dintre cele mai abundente

FIBRE DE ARMARE

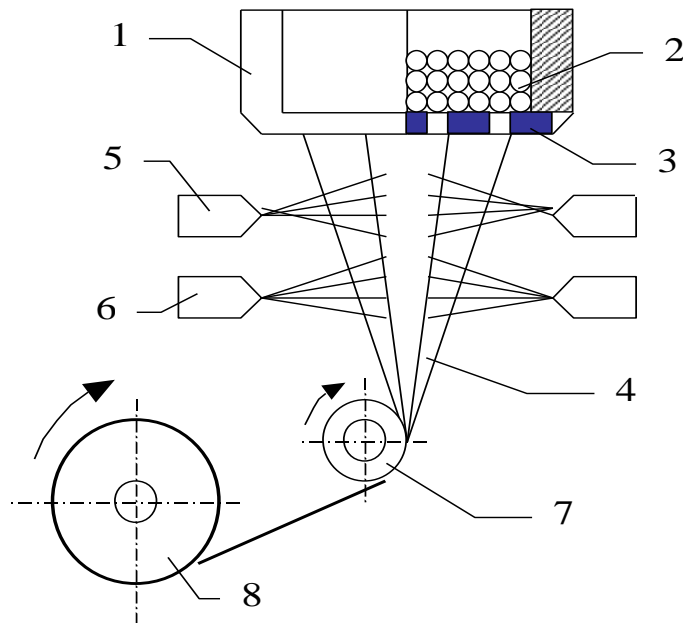
resurse naturale), calcar, acid boric și fondanți (astfel că producerea lor nu depinde de petrol și nici de chimia petrolului!); prin diverse variante și proporții de combinare a acestor ingrediente se ajunge la obținerea diverselor sortimente de sticlă, având o gamă extinsă de proprietăți fizice și mecanice.

Fabricarea industrială a fibrelor de sticlă

Cea mai importantă metodă de obținere a fibrelor de sticlă este *tragerea din topitură*; are la bază faptul că, la temperaturi peste cea de tranziție, sticla devine fluidă și poate fi trasă, printr-o filieră specială (fabricată de obicei din aliaj de platină și rodiu), în



fire de lungimi și de grosimi diferite; în general, diametrul fibrelor astfel obținute este cuprins între 0,8 și 19 μm și poate fi controlat prin temperatura la care se află topitura de sticlă, precum și prin viscozitatea acesteia.



Instalație de tragere din topitură a sticlei: 1 – cuptor; 2 – bile de sticlă; 3 – filieră; 4 – filamente; 5 – sistem de răcire; 6 – sistem de tratare chimică; 7 – dispozitiv de asamblare a filamentelor; 8 – dispozitiv de bobinare a fibrelor.

De pe schema de mai sus trebuie observat inclusiv faptul că, așa cum se întâmplă pentru multe alte tipuri de fibre, indiferent de forma lor de prezentare, după fabricarea propriu-zisă fibrele de

STRUCTURI DIN MATERIALE COMPOZITE

sticlă sunt supuse unor **tratamente de finisare**: pe suprafața lor se aplică anumite substanțe, foarte diferite ca natură și efecte (tocmai datorită mulțimii de aplicații comerciale), având în general următoarele denumiri și funcțiuni:

- *polimeri peliculogeni* – pentru asigurarea protecției anticorozive a fibrelor;
- *lubrifianți* – pentru micșorarea frecărilor și a uzurii în procesele mecanice în care vor fi implicate pe parcursul utilizării;
- *agenți de cuplare* – pentru creșterea compatibilității fibrelor cu matricea;
- *aditivi antistatici* – pentru micșorarea încărcărilor electrostatice.

Desigur că utilizarea ca elemente de armare a fibrelor de sticlă are și anumite **limitări**: ele au rigiditate relativ mică (modulul lor de elasticitate este la nivelul aluminiului), punct de topire relativ scăzut, rezistență mică la oboseală, conductivitate (electrică și termică) de nivel redus, degradare rapidă a proprietăților mecanice, atunci când trebuie să lucreze în condiții severe de umiditate și temperatură.

Se apreciază că fibrele de sticlă sunt recomandabile pentru compozite de *performanțe joase*, până la *medii*, folosite de obicei în aplicații considerate *necritice*, precum la instalații de filtrare, diverse tipuri de conducte, izolatori electrici și termici, componente pentru vehicule (inclusiv în aplicații din domeniul militar sau aero-spațial, în care primează rezistența specifică mare).

Pe de altă parte, dacă sunt introduse în structura unor compozite (cu matrice polimerică) de la care se așteaptă *rigiditate* mare, atunci sunt combinate (adică se realizează o armare **hibridă**) cu fibre mai rigide, așa cum sunt cele de carbon, bor sau Kevlar; există și o altă variantă practică pentru atingerea acestui scop – folosirea compozitului în structuri de tip *sandwich*, în care compozitul pe bază de fibre de sticlă alternează cu straturi din metal, lemn sau chiar din hârtie impregnată.

De aceeași natură cu fibrele de sticlă sunt **fibrele de silice**, particularizate printr-un conținut mult mai mare (între 96% și 98%) de SiO_2 , precum și **fibrele de cuarț**, care se produc din cristale de silice cu grad înalt de puritate (ajungând la 99,95% SiO_2); ambele tipuri se evidențiază prin valori ale densității mai mici decât cea a sticlei (2,2 față de 2,5 g/cm^3), prin insensibilitate la umezeală, precum și prin rezistențe remarcabile la agenți chimici.

Rezistența *meccanică* a fibrelor de **silice** depinde de procedeul tehnologic prin care sunt obținute și de dimensiunea lor transversală, dar are în general valori *mediocre*, care descresc și mai mult atunci când crește temperatura de lucru.

Fibrele de **cuarț** au rezistență *foarte bună* la tracțiune, comparabilă cu a fibrelor de sticlă, iar modulul lor de elasticitate (situat între 70 și 120 GPa, în funcție de diametru) este chiar ceva mai ridicat decât al acelorora; trebuie remarcat că au rezistența mecanică specifică (σ/γ) de valoarea cea mai mare dintre toate tipurile de fibre care rezistă la temperaturi înalte, inclusiv cele de alumină sau de carbură de siliciu!

Fibrele de **cuarț** sunt apreciate și pentru că au rezistivitate înaltă și *cele mai bune proprietăți dielectrice* dintre fibrele uzuale de armare, încât și-au găsit numeroase aplicații în domenii de

vârf ale tehnicii, precum industria aeronautică (un exemplu spectaculos este folosirea lor în structura învelișului exterior al avioanelor care sunt „invizibile” pentru radare – cunoscute sub denumirea de Stealth).

Datorită purității lor (care le determină și prețul relativ mare, în comparație cu fibrele de sticlă de tip E și S), au rezistență foarte bună la radiații (în schimb sunt *transparente* la undele radio, precum și la radiații ultraviolete și ionizante) și la temperaturi înalte (ajungând până la 1050°C); aceste fibre au și stabilitate dimensională remarcabilă, datorită coeficientului mic de dilatare termică, care are *aceleași valori* în direcție radială și axială, încât au și rezistență mare la șocuri termice.

În fine, fibrele de cuarț mai prezintă avantajul că se pot folosi, pentru fabricarea de compozite, în combinație cu orice tip de rășină, precum și cu o serie de materiale ceramice, iar compatibilitatea lor cu acestea poate fi încă îmbunătățită, dacă fibrele sunt tratate cu un agent de cuplare de tip silanic.

Aspecte privind proprietățile ablativă ale unor materiale

În contextul calităților cu totul particulare ale fibrelor de cuarț, este potrivit să se discute și despre noțiunea de *ablațiune* – fenomenul de autoreglare a unor procese de transfer de căldură și de masă, în care căldura ce apare într-un anumit volum de material este evacuată prin topirea, vaporizarea sau descompunerea stratului superficial al materialului respectiv; pe acest fenomen se bazează, de exemplu, *protecția termică* a navetelor spațiale la reintrarea în atmosfera terestră, sau fabricarea ajutărilor de la motoarele de rachetă; principiul este folosirea căldurii latente de modificare a stării fizice a materialului ablativ, în condițiile menținerii geometriei inițiale a suprafețelor făcute din acel material.

Sticla de cuarț, precum și o parte dintre rășinile folosite pentru a o îngloba, în calitate de matrice au comportări excelente la ablațiune, pentru că absorb o cantitate mare de căldură la trecerea în faza de fluid vâscos, în procesul de vaporizare, respectiv în reacțiile de degradare chimică; de exemplu fibrele denumite comercial Astroquartz încep să se înmoaie la 1300°C și să se volatilizeze la 2000°C; cele mai utilizate materiale ablativă sunt compozite cu matrice polimerică (rășini fenolice, epoxidice, poliamidice) armate cu fibre de cuarț sau de carbon, sau materiale ceramice *poroase*, impregnate cu substanțe organice din categoria rășinilor.

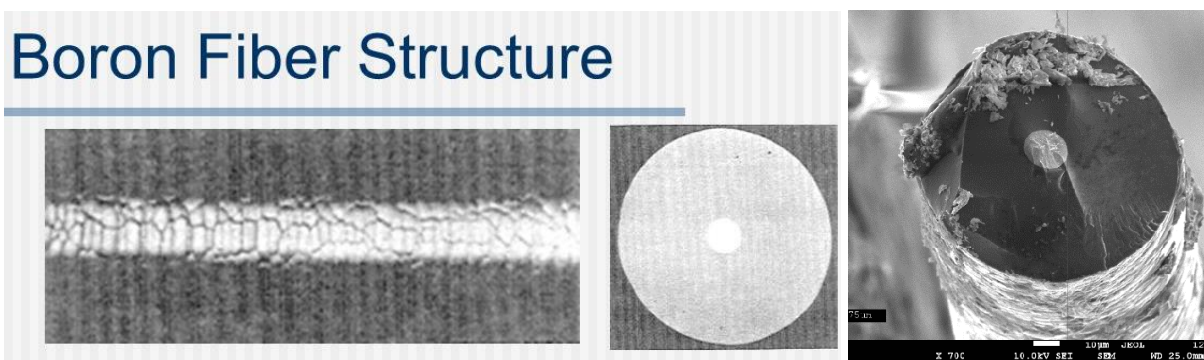
B. Fibrele de bor

Borul este elementul chimic cu numărul atomic 5, primul din grupa a 3-a principală în sistemul periodic al elementelor, vecin cu aluminiul și trivalent, ca și el. Este un nemetal (de fapt *metaloïd*, la fel cu carbonul sau fosforul) solid, dur și închis la culoare, înrudit ca proprietăți cu carbonul și siliciul. Are conductivitate electrică de tip semiconductor și se găsește în natură sub formă de combinații, inclusiv în structura unor plante tehnice, de felul bumbacului. În stare pură se prezintă sub formă de cristale negre-cenușii, foarte dure (9,5 pe scara Mohs), cu punctul de topire 2300°C și punctul de fierbere 2550°C.

În stare naturală există în 2 stări alotropice: cristalizat (densitate 2,54 g/cm³) și amorf (2.45 g/cm³). Este nereactiv față de apă și aer, iar la încălzire manifestă o activitate chimică înaltă – reacționează cu clorul (la 400°C), cu bromul (la 700°C) și cu azotul (la peste 900°C);

formează compuși importanți în tehnică, precum carbura de bor, material ceramic dintre cele mai dure (depășește carburile de wolfram sau siliciu), fiind din acest motiv folosită la fabricarea sculelor abrazive.

Deși în prezent nu sunt folosite industrial pe scară largă (întrucât au un preț ridicat), **fibrele de bor** sunt considerate foarte potrivite pentru aplicații care presupun rigidizări *locale*, pentru că au proprietăți excelente de rezistență (inclusiv la comprimare – situație foarte rară pentru fibrele de armare) și de rigiditate (sunt clasificate printre fibrele de armare de modul înalt); se mai caracterizează prin duritate mare (depășind pe a corindonului), rezistență mare la factorii de mediu, precum și prin punct înalt de topire (care le permite să fie înglobate, fără a pierde din calitate, în matrici metalice aduse în stare lichidă).



Imaginile de mai sus reprezintă aspectul foto-microscopic al unei fibre de bor, privită din lateral, respectiv într-o tăietură transversală; se observă nodulii de pe suprafața fibrei, orientați în lungul axei sale, ca efect al particularităților procesului de fabricare.

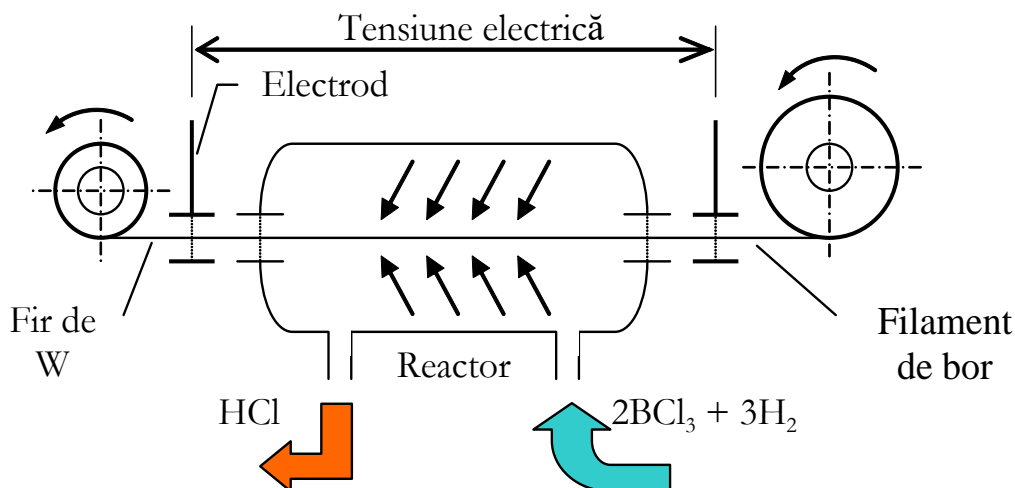
Obținute pentru prima oară la firma nord-americană Texaco, în 1959, fibrele lungi de bor au reprezentat cel dintâi material de armare pentru compozite de mare performanță; fabricarea lor a avut o evoluție spectaculoasă după anul 1970, iar aceasta a fost impusă de necesitățile industriei aeronautice (care le folosește mai ales în combinație cu matrici din rășini epoxidice) și ale celei de tehnică militară, pentru care costul lor ridicat nu reprezintă un impediment.

Problema cea mai mare a fibrelor de bor este că sunt *foarte fragile*, astfel încât nu pot fi fabricate prin tragere din topitură; varianta de obținere cea mai eficientă ca preț și ca realizare tehnică este **depunerea borului din fază de vapori** (ca în figura de mai jos), folosindu-se un suport dintr-un alt material; pe măsură ce firul *precursor* traversează reactorul, diametrul fibrei fabricate crește, ajungând în final să măsoare între 100 și 200 μ m, în funcție de viteza de deplasare stabilită pentru fir; la ieșirea din incintă, fibra de bor este înfășurată pe un dispozitiv de bobinare. Trebuie precizat că randamentul reacției de depunere a borului este foarte mic, făcând necesare măsuri speciale pentru recuperarea clorurii de bor care rămâne neutilizată.

Alegerea *materialului-suport* pentru depunerea borului este o chestiune sensibilă și restrictivă, pentru că acel material trebuie să aibă câteva proprietăți bine precizate – să fie refractar, să-și mențină caracteristicile mecanice la temperaturi mari de lucru, să fie compatibil din punct de vedere fizic și chimic cu borul, să nu fie atacat de amestecul de gaze din reactor și (dacă se poate) să fie relativ accesibil (inclusiv ca preț).

FIBRE DE ARMARE

Varianta clasică folosește ca suport un fir incandescent din *wolfram* (caz în care fibrele obținute sunt simbolizate B/W), cu diametrul tipizat de $12,5\mu\text{m}$, adus la temperatura de 1200°C ; acest metal are temperatură mare de topire și rezistență mecanică suficientă la temperatura de depunere, dar prezintă și câteva dezavantaje importante – densitate relativ mare ($19,3\text{ g/cm}^3$), expansiune volumică semnificativă în timpul procesului de depunere, reacție intensă cu borul și cost ridicat. Din aceste motive se preferă folosirea pentru depunerea borului a unor filamente (cu diametrul de $33\mu\text{m}$) de *carbon* (adică fibre B/C), cu dezavantajul unor fibre de bor ceva mai groase decât cele depuse pe wolfram.



Instalație de obținere a fibrelor de bor.

Fibrele de bor au **compatibilitate foarte bună** cu matricile *polimerice*, dar sunt puțin compatibile cu cele metalice (de obicei aliaje de titan sau de aluminiu), pentru că la interfața cu acestea se produc, mai ales la temperaturi ridicate, fenomene de difuzie și interacțiuni chimice; se formează astfel în zonele de interfață straturi fragile de săruri (boruri), care vor avea grosimi crescătoare în timp, micșorând adeziunea interfacială; ca urmare, fibrele trebuie să fie acoperite, înainte de introducerea în matrice, cu un strat protector de nitrură ori carbură de bor, sau de carbură de siliciu. Aceste straturi au rol de bariere de difuzie, precum și de îmbunătățire a caracteristicilor mecanice și a rezistenței la temperatură; dintre variantele practice foarte cunoscute sunt fibrele de bor acoperite cu carbură de siliciu (denumite comercial Borsic) produse de firma nord-americană United Aircraft.

În starea de livrare de după fabricare fibrele continue de bor au în mod tipic diametre de 100, 140 sau $200\mu\text{m}$ și densitate mică - de $2,6\text{ g/cm}^3$ (pentru B/W), respectiv $2,3\text{ g/cm}^3$ (pentru B/C); comportarea tipică la solicitări este **fragilă** (ruperea lor are loc în domeniul deformațiilor elastice), dar au proprietăți mecanice foarte bune: rezistență la tracțiune între 4 și 7 GPa și modul de elasticitate între 400 și 420 GPa; au rezistență mare la comprimare și la oboseală, valori joase de conductivitate și dilatare termică, iar calitățile mecanice li se mențin până la temperaturi de 500°C (și chiar 700°C , pentru sortimentul Borsic).

Trebuie amintite și câteva **dezavantaje** importante ale lor: cost mare (cam cu un ordin de mărime peste al fibrelor de carbon), fragilitate și duritate de valori ridicate (de unde o rezistență

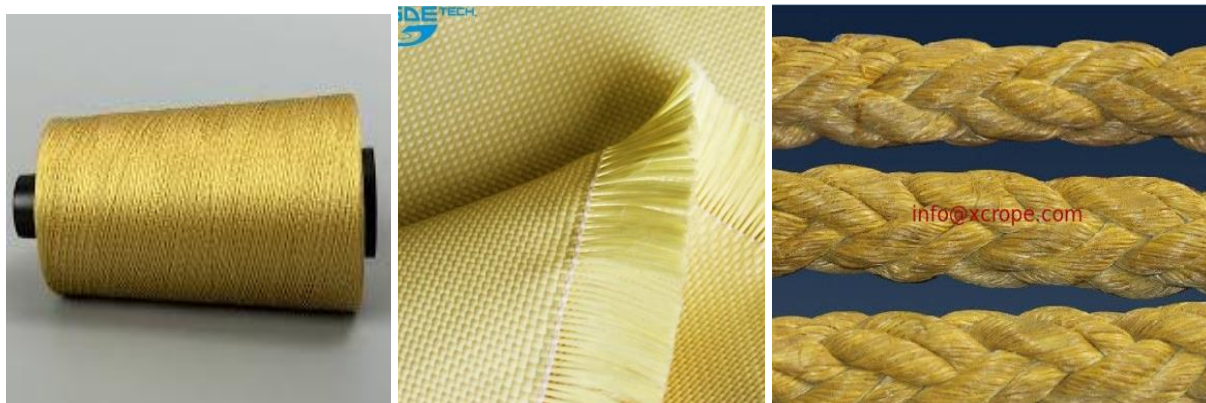
mică la lovire, dar și necesitatea de a fi prelucrate cu instrumente speciale), flexibilitate mică (datorită modulului mare de elasticitate) – combinată cu diametrul relativ mare al fibrelor, aceasta face dificilă realizarea unor eventuale armături din fibre împletite.

Unele dintre aceste dezavantaje sunt de obicei contracarate prin combinarea fibrelor de bor cu fibre mai flexibile și mai puțin costisitoare - de carbon sau de sticlă, obținându-se astfel compozite (denumite *hibride*) care au un raport mai avantajos între performanțe și costuri. Se mai practică înlocuirea într-un compozit a fibrelor de sticlă, într-o proporție mică, cu fibre de bor (ranforsare *selectivă*); se îmbunătățesc astfel semnificativ caracteristicile mecanice ale materialului global, fără o creștere exagerată a prețului.

Compozitele cu fibre de bor sunt folosite intens în construcția aeronavelor civile sau militare (o aplicație tipică a lor este la fabricarea palelor de elice pentru elicoptere), dar este importantă și utilizarea lor în structura unor echipamente din domeniul sportului, precum rachetele de tenis sau undițele de pescuit.

C. Fibrele aramidice

Această noțiune reprezintă un termen generic pentru *fibrele poliamidice aromatice*, iar cele mai cunoscute (produse începând din anii '70, ca marcă a firmei nord-americane Du Pont) au denumirea comercială de **Kevlar**, fiind considerate cele dintâi fibre *organice* pentru ranforsarea compozitelor de mare performanță; aceste fibre prezintă valori înalte de rezistență (limita de rupere la tracțiune este 3,5GPa) și rigiditate *specifică*, explicabile prin densitatea foarte mică ($1,44 \text{ g/cm}^3$) – reprezentând 60%, respectiv 80% din cea a fibrelor de sticlă și de carbon; mai au alungire la rupere scăzută (față de alte fibre organice), tenacitate excepțională, coeficient redus de dilatare termică, rezistență mare la flacără și la temperaturi ridicate, precum și la solvenți organici, carburanți și lubrifianți.



Aspectul unor fibre, țesături și împletituri din fibre aramidice.

Aceste fibre nu se topesc, dar se *descompun* la aproximativ 500°C ; au calități dielectrice și de amortizare a vibrațiilor, flexibilitate mulțumitoare, rezistență excepțională la oboseală și la uzură, nu sunt conductive și nu intră în reacții de tip galvanic cu metalele; folosirea lor ca elemente de armare este limitată doar de rezistența mică la compresiune și de valorile mari ale absorbției de umezeală.

FIBRE DE ARMARE

Pot fi întâlnite sub forme diverse și în combinație cu tipuri diferite de materiale polimerice, încât gama compozitelor armate cu fibre aramidice este largă, inclusiv unele cu armare *hibridă*, de exemplu în combinație cu fibre de carbon.

Tenacitatea deosebită a fibrelor face necesară utilizarea unor scule speciale (de obicei cu părțile așchietoare diamantate) pentru tăierea țesăturilor și pentru prelucrarea compozitelor aramidice, ceea ce crește costurile lor de punere în operă.



Exemple de utilizări ale fibrelor și ale compozitelor armate cu fibre aramidice.

La început aceste compozite s-au folosit pentru scăderea greutății unor structuri (avioane, elicoptere, rachete); în prezent este vorba mai ales despre compozite de mare performanță, folosite în tehnica aerospațială sau militară (fabricarea de căști, veste antiglonț sau blindaje pentru nave și avioane); pe măsură ce prețul lor nu mai este prohibitiv, compozitele cu fibre aramidice sunt întâlnite în părți constructive din echipamente sportive și de agrement și în industria automobilelor (cordaje pentru anvelope, curele de transmisie, furtunuri etc.); datorită stabilității și proprietăților bune de fricțiune la temperaturi înalte, se folosesc și la fabricarea unor elemente din dispozitivele de frânare sau de fixare.

D. Fibrele de carbon

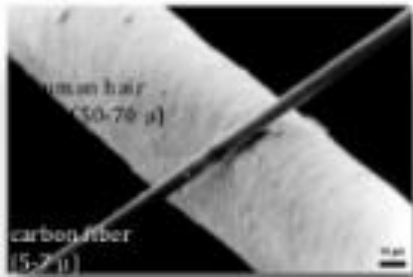
Au fost prima dată produse industrial în anul 1959, la firma nord-americană Union Carbide Corporation; ca materiale de armare sunt produse și comercializate în multe variante, având o gamă largă de valori ale rezistenței și rigidității mecanice, valori care depind în bună măsură de temperatura la care se procesează fibrele:



STRUCTURI DIN MATERIALE COMPOZITE

- ⇒ **Fibrele de carbon** (cu un conținut de peste 80% C) se obțin la temperaturi între 1200 și 1500°C, au rezistențe la tracțiune de 2.7÷3.7 GPa și un modul de elasticitate de aprox. 230GPa (oțelurile de duritate medie au acest modul situat cam la 210GPa).
- ⇒ La temperaturi de fabricare mult mai înalte, cuprinse între 2000 și 3000°C, se obțin **fibrele de grafit** (conținând 99% C), care au modul de elasticitate și mai ridicat - denumit *ultraînalt* (depășește 500 GPa), dar rezistență la tracțiune ceva mai mică (valoarea tipică este de aproximativ 1.7 GPa).

Pe lângă proprietățile mecanice foarte bune, fibrele de carbon (denumire generică, pentru toate categoriile) au și alte **avantaje** importante: densitate mică (1.7÷1.9 g/cm³), stabilitate și rezistență foarte bună la temperaturi ridicate (în absența atmosferei oxidante) și la agenți chimici, dilatare termică redusă, flexibilitate deosebită (sunt ușor de împletit ca țesături), conductivitate termică, precum și o bună compatibilitate chimică cu matrici de natură organică.



Fibrele sunt extrem de fine (diametrele lor tipice se cuprind între 5 și 7 microni, cam a zecea parte din grosimea unui fir de păr, așa cum arată imaginea alăturată), astfel încât sunt produse sub formă de mănunchiuri (denumite tows sau yarns) de câte 1000 de filamente (simbolizate **1k**), care însă pot fi și mult mai cuprinzătoare, fiind adică simbolizate **3k**, **6k**, **12k**, **24k**, **50k** și chiar cu numere mai mari.



La avantajele menționate mai sus se adaugă posibilitatea folosirii - pentru obținerea acestor fibre - a unei game largi de materii prime (denumite **precursori**), care pot fi materiale *în stare solidă* – precum cărbunii sau fibrele organice, *lichidă* – adică petrol sau uleiuri aromatice, sau chiar *gazoasă* – din clasa hidrocarburilor; desigur că toate aceste materiale inițiale – inclusiv cele care nu sunt în mod natural în stare solidă – trebuie mai întâi să fie aduse, prin aplicarea unor

tehnici speciale, la forma de filamente continue, fiind apoi transformate în carbon prin aplicarea unor procese de fabricare corespunzătoare scopului final.



Exemple de aplicații ale compozitelor armate cu fibre lungi de carbon.

Pentru a fi desemnat ca *precursor*, un material trebuie să asigure fibrelor “inițiale” rezistență suficientă și caracteristici corecte de prelucrare, încât să poată să fie menținute împreună pe

FIBRE DE ARMARE

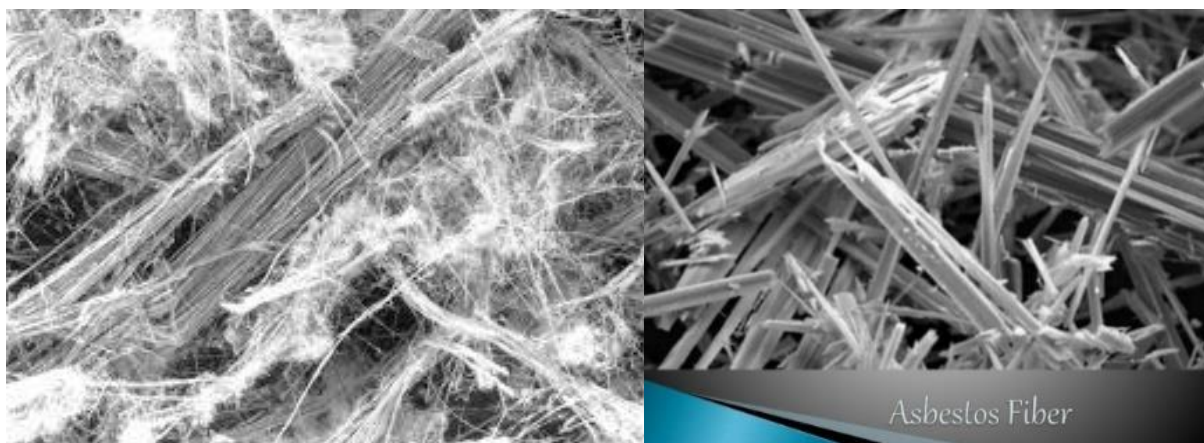
durata etapelor de sinteză a carbonului; trebuie să aibă și punct de topire destul de ridicat, ca să nu se topească sau să se volatilizeze în aceste etape, iar procentul de carbon din fibrele rezultate după piroliză să fie destul de mare pentru a justifica economic folosirea lor în procesul respectiv de fabricare; mai trebuie să fie un material cât se poate de accesibil și de ieftin, pentru a nu crește și mai mult costurile de obținere (care sunt oricum relativ mari, datorită dificultăților tehnologice, implicate de temperaturile ridicate de procesare). În prezent se folosesc cel mai mult ca precursori fibre din trei categorii de materiale polimerice (în ordinea descrescătoare a frecvenței de utilizare): poliacrilonitril (P.A.N.), smoală și celuloză.

Principalele **dezavantaje** ale fibrelor de carbon sunt rezistența lor scăzută la șocuri și la abraziune, sensibilitatea la atmosfera bogată în oxigen și la agenții oxidanți, apariția unei coroziuni de tip galvanic la contactul cu metalele, dar și costul relativ mare (chiar foarte mare, pentru fibrele ultrarigide); în consecință, se recomandă folosirea lor la realizarea unor compozite cu armare *hibridă*, de exemplu în combinație cu fibre de Kevlar.

Materialele compozite armate cu fibre de carbon (de obicei în combinație cu o matrice polimerică) sunt utilizate pe scară largă în construcțiile aeronautice, aerospațiale, navale și de autovehicule, în tehnica militară, dar și la fabricarea unor articole sportive (croșe, schiuri, rachete de tenis, cadre de bicicletă), a instrumentelor medicale și radiologice, precum și a unor instrumente muzicale.

E. Fibrele de azbest

Azbestul este denumirea generică a unor varietăți de minereuri naturale, sub formă fibroasă, având compoziții silicatiche variabile și complexe; fibrele au diametre de ordinul micronilor, iar această mare finețe face dificilă încorporarea lor, în mod controlat, în structura altui material; au suprafață specifică mare (aprox. $0.6 \text{ m}^2/\text{g}$), ceea ce conduce la o foarte bună adeziune de interfață cu materialul matricei în care se introduc, fără să fie necesară tratarea superficială a fibrelor.



Aspectul fibrelor de azbest, primate la microscop.

Filamentele sunt atât de fine (unele dintre ele pot fi și de 700 de ori mai subțiri decât un fir de păr!), încât se pot identifica doar cu ajutorul unui microscop; toate tipurile de azbest au tendința de a se desface în fibre extrem de subțiri, de unde provine și dificultatea de a fi utilizate, ca și pericolele potențiale pentru sănătatea celor care le manevrează.

Fibrele de azbest (cele mai răspândite sunt denumite comercial *crisotil*) au proprietăți de rezistență și de rigiditate favorabile pentru folosirea lor la armarea materialelor polimerice sau a betoanelor; este interesant că proprietățile lor de rezistență se mențin la un nivel ridicat până la aproximativ 500°C; în mod paradoxal, aceste proprietăți au chiar o creștere de 10÷15 %, față de valorile de la temperatura ambiantă, în intervalul dintre 300 și 500°C, după care însă pierderea de rezistență este catastrofală.

În altă ordine de idei, fibrele de azbest sunt *avantajoase* la fabricarea de compozite pentru că au conductivitate termică mică, sunt ignifuge și au coeficienți mari de frecare; *dezavantajul* lor principal rezultă, așa cum s-a mai amintit, tot din dimensiunile foarte mici și din faptul că pătrunderea lor în organismul uman (de exemplu pe cale respiratorie) poate produce boli grave; sunt deci necesare măsuri foarte severe de protecție pentru cei care le utilizează, sau pentru cei care pot fi expuși prezenței lor în atmosferă.

Compozitele polimerice armate cu fibre de azbest au caracteristici mecanice bune, rezistență chimică mare la o gamă largă de agenți corozivi, precum și rezistență la intemperii și la incendii (astfel încât sunt folosite inclusiv la confecționarea unor echipamente de protecție pentru rezistență la astfel de medii). Este de semnalat utilizarea lor ca materiale de fricțiune, la fabricarea sistemelor de frânare (pentru ascensoare, excavatoare, automobile, dar și pentru condițiile de solicitare foarte severe din construcția avioanelor).

Pe scară largă se folosesc compozite pe bază de rășini, în care pe lângă fibre de azbest (sub forme diferite – de la țesături până la fibre tocate) se introduc de obicei și anumite materiale de adaos - cantități mici de pulbere de zinc sau de cupru – pentru îmbunătățirea conductivității termice a materialului final, precum și particule de grafit, sau ceramice (după necesități) – pentru echilibrarea caracteristicilor globale de fricțiune.

Valorile apropiate ale calităților mecanice ale fibrelor de azbest și de sticlă (în condițiile unor prețuri mult mai mici pentru primele) fac ca ele să fie folosite împreună, de exemplu la armarea rășinilor termorigide, în care se completează reciproc pentru obținerea unor compozite cu calități speciale și prețuri relativ scăzute.

F. Fibrele ceramice

Fibrele (foarte diverse) cuprinse în această categorie se caracterizează prin durități și rigidități mari, rezistențe mecanice moderate (față de alte categorii de fibre de armare), dar și costuri relativ mari; avantajul lor principal este punctul foarte înalt de topire, făcând să poată fi folosite, în combinații cu matrici metalice sau ceramice, la realizarea unor compozite care sunt procesate și utilizate la temperaturi înalte.

Cel mai frecvent sunt întâlnite fibre din două categorii de materiale ceramice:

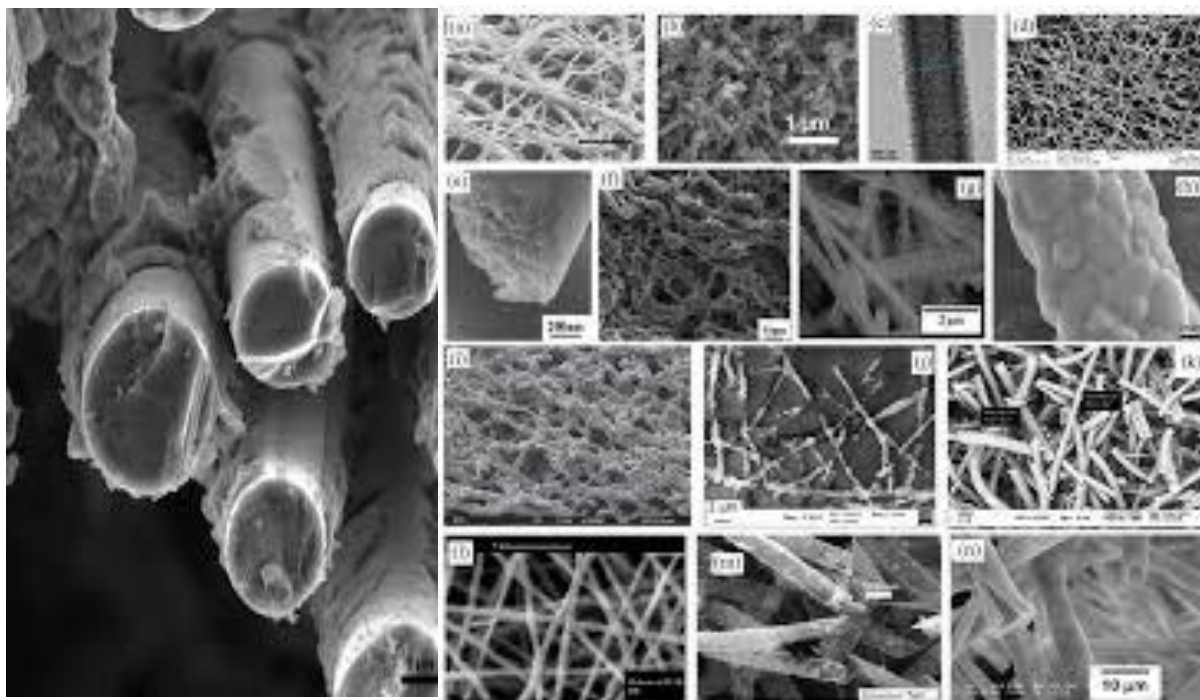
- ⇒ **alumină** (Al_2O_3) – (densitate 3.9g/cm^3) își menține caracteristicile mecanice până la temperaturi de 900°C (se topește la 2045°C), are rezistență foarte mare la eroziune și la medii chimice agresive, inclusiv la expunere în aer la temperaturi înalte;
- ⇒ **carbură de siliciu** (SiC) – (densitate 3.2g/cm^3) are rezistență excepțională la agenți chimici, plus calități super-refractare – menține proprietățile mecanice până la

FIBRE DE ARMARE

1300÷1400°C; în combinații cu matrici *ceramice* se ajunge chiar la peste 1450°C, pentru că au conductivitate și dilatare termică de valori reduse, dar și rezistențe înalte la fluaj și la șocuri termice.

Începând din anii '90 folosirea fibrelor ceramice în combinație cu matrici metalice sau ceramice nu mai este exclusivă; au început să fie utilizate în materiale polimerice rezistente la temperaturi mari (*termorezistente*); fibrele de alumina sunt avantajoase pentru fabricarea oricărui tip de compozit, inclusiv pentru că pot fi stocate înfășurate (bobinate), fiind și relativ ușor de mânuit și de aliniat în direcția dorită; trebuie subliniat faptul că au rezistență mecanică bună (mai ales la comprimare), rigiditate comparabilă cu a fibrelor de carbon (în condițiile unor costuri mai mici) și proprietăți de izolatori electrici.

Aceste calități le recomandă, de exemplu, pentru ranforsarea rășinilor epoxidice; din astfel de compozite (cu armare *hibridă*, conținând și fibre aramidice) se fabrică structuri transparente la radar (având multiple aplicații în domeniul militar), dar și antene de satelit sau plăci de bază pentru circuite electronice de mare putere; din compozite cu matrice epoxidică și armare cu *țesături mixte* din fibre de carbon și de SiC se produc componente pentru automobile și avioane, dar sunt folosite și în aplicații de agrement și sportive, de pildă în structura cadrului de la rachetele de tenis.



Fibre ceramice, privite la microscop. Suprafețele rugoase ale acestor fibre fragile favorizează ruperea lor la valori foarte mici ale deformațiilor specifice și le fac foarte greu de manevrat, în practică.

Trebuie menționate, în acest context, inclusiv **cristalele filamentare** (whiskere) din materiale de tip ceramic, care au (așa cum s-a arătat anterior) proprietăți mecanice și termice excepționale, plus calități speciale de tip magnetic, feromagnetic, optic sau supraconductiv; după cum s-a mai arătat, aceste micro-fibre nu sunt competitive cu fibrele convenționale, cel puțin deocamdată, din cauza prețului lor ridicat, dar și a unor dificultăți legate de procesul de obținere și cel de control al calității lor; s-a ajuns la producerea comercială, la prețuri relativ avantajoase pentru folosirea

industrială, a whiskerelor SiC, folosite ca ranforsant în metale (aliaje de aluminiu, titan sau molibden), dar și în polimeri sau ceramice.

Forma de prezentare a materialelor fabricate ca fibre

Este interesant de precizat că numai fibrele de bor și cele de carbură de siliciu se obțin ca filamente *singulare*, cu diametre relativ mari; celelalte fibre se fabrică de obicei ca *mănunchiuri de filamente*, continue și fine, care se folosesc ca atare, sau sunt prelucrate, prin operații de tip textil, în materiale *neșesute* sau în *șesături și împletituri*; acestea din urmă pot fi bi- sau tri-dimensionale și sunt sau nu *pre-impregnate* (cu o substanță de tipul rășinilor) – pentru a înlesni utilizările lor ulterioare.

Comparație între câteva modele de șesături de fibre

| Tip de șesătură | Flexibilitate | Avantaje | Dezavantaje |
|---------------------------------------|---------------|---|---|
| Șesături biaxiale | Mică | Cost mic de realizare. Reproductibilitate. Distrugere limitată a fibrelor la șesere. | Numai unghiuri de 0° și de 90°. Ineficiente pt. șesături în straturi multiple |
| Șesături triaxiale | Înaltă | Rezistență mare la forfecare. Rezistență la uzură, scămoșare, sfâșiere. | Cost mare de producție. |
| Împletituri | Moderată | Cost mic de realizare. Capacitate de mulare după forme complicate. Rezistență mare la forfecare și la torsiune. | Susceptibile de încrețiri, care pot reduce rezistența compozitului final. |
| Șesături 3-D ortogonale | Înaltă | Posibilitatea țeserii în forme complicate. Conservă exact poziția fibrelor. Proprietăți mecanice foarte bune. Rezistență la dezlipire. | Proces lent de fabricare Impregnare dificilă. Cost mare al echipamentelor și al procesului de obținere. |
| Șesături volumice pe 4 direcții (4-D) | Înaltă | Posibilitatea țeserii în forme complicate. Rezistență mare la forfecare interlaminară. | Proces de fabricare lent și scump. Impregnarea este dificilă. |

Șesăturile din fibre sunt diferențiate între ele și particularizate prin numărul de noduri pe unitatea de suprafață (de obicei cm²), precum și prin dimensiuni, porozitate și model; dacă materialul final trebuie să aibă caracteristici mecanice similare în toate direcțiile, atunci este de preferat modelul de șesătură de tip pânză.

Mănunchiurile de filamente continue sunt desemnate codificat după denumirile englezești ale unor detalii din procesul tehnologic prin care sunt fabricate:

- ⇒ prin noțiunea de TOW se denumesc filamente *separate, netorsionate*;
- ⇒ ROVING înseamnă filamente *lungi, paralele, unite, netorsionate*;
- ⇒ prin YARN sunt denumite filamentele *reunite prin răsucire*, sub formă simplă sau buclată.

FIBRE DE ARMARE

Materialele de armare **nețesute** se prezintă de obicei sub formă de “împâsliri” (mai sunt denumite și **mat-uri**), compuse din fibre tăiate sau continue, orientate aleator și reunite, fie prin aglomerare mecanică, fie prin intermediul unui liant, de natură polimerică; acesta trebuie să fie compatibil cu agentul de cuplare a fibrelor și să nu influențeze negativ reticularea matricei (dacă aceasta este polimerică).

Există tipuri diverse de împâsliri, caracterizate prin greutate și specificitate diferite; ele trebuie să fie adaptate variantei tehnologice de formare (care poate fi prin contact, prin presare la cald sau în vid, prin pulverizare, stratificare continuă s.a.m.d.) care se preconizează a fi utilizată, pentru realizarea compozitului propriu-zis.

Datorită diversității mari a formelor de prezentare (fiecare având anumite avantaje și dezavantaje specifice), este necesar ca pentru fiecare aplicație concretă să se analizeze, în faza de proiectare a unei structuri compozite, dacă fibrele de armare trebuie sau nu să fie reunite între ele, dacă trebuie să fie țesute și respectiv care este modelul de împletire cel mai avantajos, din punct de vedere tehnic și economic.