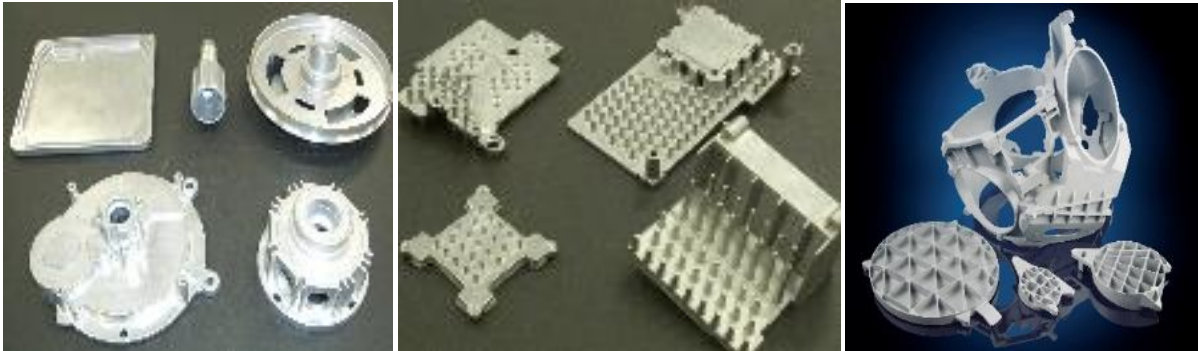


---

## METODE PRIN CARE SUNT FABRICATE COMPOZITELE CU MATRICE METALICĂ (CMM)

Așa cum s-a arătat anterior, metalele și aliajele metalice, combinate cu variate forme și naturi de elemente de armare reprezintă materiale utilizate foarte frecvent în tehnica actuală, inclusiv (sau chiar în primul rând) în domeniile sale de mare complexitate, precum construcțiile aero-spațiale sau industria de apărare.



Exemple de piese complexe realizate din aliaje de aluminiu armate cu particule de carbură de siliciu.

Fiind ele însele foarte diverse, compozitele cu matrici metalice (CMM) sunt procesate printr-o gamă foarte largă de tehnici, iar acestea pot fi clasificate, în prima instanță, în funcție de starea de agregare în care se află materialul metalic al matriciei pe parcursul procesului tehnologic; o astfel de grupare se concretizează astfel:

- ◆ tehnici bazate pe matricea în stare **lichidă** – turnare, infiltrare, pulverizare simultană, fabricare in situ;
- ◆ tehnici folosind matricea în stare **solidă** – metalurgia pulberilor (presare și sinterizare), deformare plastică (extrudare, forjare, laminare), difuzie;
- ◆ tehnici care utilizează matricea în stare **gazoasă** – depunere din stare de vapori (*Physical Vapour Deposition*).

### A. Metode de fabricare prin turnare

Turnarea în forme a materialelor aflate în stare topită reprezintă o metodă foarte veche, prin care se pot obține piese sau semifabricate din metale sau aliaje, astfel încât în prezent sunt disponibile foarte diverse procedee de turnare, cele mai multe dintre fiind aplicabile și pentru fabricarea de compozite cu matrici metalice. Selectarea metodei potrivite se face în funcție de natura și geometria fazelor constituente, de posibilitatea realizării, prin turnare, a unei legături puternice între ele, de caracteristicile impuse compozitului turnat, precum și de dotările tehnice avute la dispoziție.

Fabricarea prin *turnare* a CMM prezintă, față de alte tehnologii, câteva **avantaje** importante:

- ✓ simplitate, rapiditate și cost redus al fabricării;
- ✓ posibilitate de utilizare a instalațiilor clasice, deja existente în secțiile de turnare;

- ✓ flexibilitate a tehnicilor folosite, ușor de adaptat cerințelor unei producții de serie;
- ✓ aplicabilitate la o gamă largă de materiale (folosite ca matrice);
- ✓ posibilitate de a produce forme complexe, la dimensiunile finale sau aproape de acestea;
- ✓ ușurință relativă în fabricarea și pregătirea elementelor de armare, precum și în controlul dispunerii lor în structura noului material.

Există și **dificultăți** tehnologice pe care le implică turnarea compozitelor metalice:

- ◆ interfața matrice - ranforsant trebuie să asigure adeziunea cerută între faze, să fie omogenă, compactă și, pe cât se poate, ductilă (să i se atenueze fragilitatea);
- ◆ este necesar să se conserve integritatea, respectiv proprietățile fizice și mecanice ale elementelor de armare;
- ◆ aceste elemente trebuie să fie dispersate uniform, orientate corect (dacă orientarea este necesară) și înglobate stabil în matrice.

### Procedee de preparare a amestecurilor de turnare

Această etapă a proceselor tehnologice de turnare se referă inclusiv la înglobarea fazei secundare în materialul matricei, aflat total sau parțial în stare lichidă; realizarea corectă a amestecurilor presupune să fie învinse, prin măsuri de precauție, constrângerile prezente în orice material metalic în stare topită: **forțe de tensiune superficială, de viscozitate, respectiv arhimedice**; acestea tind simultan să acționeze în volumul topiturii, conducând la apariția fenomenului de expulzare a eventualelor incluziuni.

#### a. Amestecarea mecanică

Reprezintă un procedeu simplu și ieftin, mult utilizat și ușor de intuit; o variantă accesibilă și cu rezultate practice foarte bune este **metoda Vortex**, care constă în introducerea elementelor de armare (particule sau fibre scurte) în *zona de vârtej* creată în topitură, prin agitare mecanică, folosind un ax cu palete.

Creșterea duratei de amestecare și de menținere a particulelor în suspensie crește calitatea materialului final, pentru că favorizează umectarea incluziunilor de către aliaj și apariția unor legături chimice la interfețe.

Turația axului se adaptează la proporția de elemente complementare introduse; se ține seama că, prin amestecare, se mărește suprafața de contact cu aerul a particulelor de material aflate în topitură; pentru aliajele cu oxidabilitate ridicată (așa cum sunt cele de aluminiu sau de magneziu), operația se face într-o incintă cu atmosferă controlată, sau cu insuflarea unui gaz inert (de obicei argon) deasupra băii metalice.

Cea mai sigură variantă este reprezentată de **agitarea în vid**, deoarece orice gaz, chiar inert, tinde să fie antrenat parțial în topitură, favorizând astfel procesul de expulzare a componentelor solide. Uneori se apelează la imersarea în baia metalică a unor *pelete* sau *brichete* formate (prin procedee de aglomerare) din pulberi ale fazei discontinue; prin agitarea amestecului se obține apoi fărâmițarea acestora și particulele sunt redispersate, ușurându-se astfel înglobarea lor în matrice.

Tehnicile de amestecare mecanică, înainte de trunare, sunt simple ca principiu, dar au câteva **dezavantaje** importante:

- ◆ permit a fi introduse doar proporții reduse de elemente de armare, în compozitul astfel fabricat;
- ◆ este dificilă înglobarea elementelor disperse de natură ceramică, pe care în general aliajele metalice nu le umectează; sunt necesare măsuri speciale de ameliorare a umectării, ducând la creșterea costurilor de fabricație;
- ◆ fazele disperse tind să se aglomereze în timpul înglobării, ceea ce îngreunează dispersarea lor completă și uniformă în produsul final;
- ◆ este posibilă segregarea (separarea) gravifică (din cauza densităților diferite), din amestec, a fazei secundare;
- ◆ există pericolul fragmentării elementelor de armare (prin solicitare mecanică) în timpul agitării.

### **b. Injectarea în topitură a fazei discontinue**

Presupune introducerea în matricea topită, printr-un sistem de injecție, a materialului solid, în stare de pulbere, cu ajutorul unui gaz purtător inert; după ce particulele de adaos pătrund în masa metalică lichidă, ele trebuie să mai dispună de o cantitate de energie pentru învingerea forțelor de frecare și de flotare, care se opun înglobării lor; în acest fel, distanța parcursă de elementele disperse în interiorul băii metalice va depinde de configurația și de densitatea lor, de proprietățile fizice ale metalului topit (densitate, fluiditate etc.) și de viteza care le este imprimată la trecerea prin injector.

### **c. Dispersarea fazei complementare cu ultrasunete**

În acest caz, pulberile din materialul de armare se introduc pur și simplu în aliajul lichid, care este apoi supus unui tratament vibratoriu, prin intermediul unor *unde ultrasonore*; presiunea astfel creată determină distrugerea peliculelor de la limita de separare solid-lichid; gradientii de presiune cauzati de fenomenul de cavitație duc la formarea unor unde de șoc, iar acestea înlesnesc amestecarea omogenă a celor două faze. Eficiența dispersării este influențată de un complex de factori: frecvența undelor folosite, amplitudinea și viteza cu care se propagă oscilațiile, intensitatea câmpului ultrasonor, timpul de acțiune, modul de introducere a energiei undelor în masa suspensiei s.a.m.d., încât procesul de lucru trebuie să fie supravegheat de operatori competenți și experimentați.

Este considerată o tehnologie relativ scumpă, dar conduce la dispersarea corectă și aproximativ uniformă a particulelor de armare în matrice; este recomandată pentru obținerea, aproape la dimensiunile finale, a unor componente structurale care au forme complexe și care fac obiectul unor loturi mari de fabricație.

### **d. Agitarea electromagnetică a suspensiei**

Dispersarea elementelor de armare se poate face și prin acțiunea unui *câmp magnetic variabil* în aliajul lichid; se produce un transfer de masă și de energie în suspensie, printr-o mișcare convectivă forțată; câmpul magnetic pune în mișcare electronii liberi din aliajul topit, într-o

direcție precizată; atomii de metal sunt antrenați, ajungându-se astfel treptat la mișcarea întregii mase topite. Un parametru important al conducerii procesului este distanța (*întrefier*) dintre inductorul electromagnetic și aliajul lichid, care trebuie să fie cât mai mică, pentru a menține la nivelul cerut forța magnetică exercitată asupra topiturii; de obicei se folosesc câmpuri magnetice rotitoare (cu un efect mai mare de agitare) realizate cu doi poli, la fel ca la statorul unui motor; rotirea acestora formează acei curenți turbionari, care omogenizează amestecul. Avantajele metodei sunt *amestecarea întregii mase* a topiturii, *fără contact direct* al sistemului de agitare cu metalul topit și *pe o durată mai mare* decât la alte procedee (deoarece agitarea poate continua până când temperatura coboară destul de mult).

### e. Metode speciale

(în această categorie sunt incluse acele tehnici care sunt aplicabile unor cazuri particulare de suspensii sau de semifabricate)

Un exemplu frecvent întâlnit în practică este **dispersia centrifugală** a particulelor de armare în topitură; aceasta se poate folosi fie pentru suspensii ce conțin constituenți de densitate apropiată, fie în situații în care, dimpotrivă, este de dorit să se producă separarea constituenților în funcție de densitatea lor; dispersia se bazează pe rotirea, cu viteză relativ mare, a vasului ce conține topitura, iar particulele de material topit se vor așeza la raze cu atât mai mari (către exteriorul vasului) cu cât sunt mai „grele”.

### Procedee de optimizare a înglobării elementelor de armare în matricea metalică

Dispersarea uniformă și completă a incluziunilor în topiturile metalice este dificilă; există obstacole date de natura matricei și de compatibilitatea ei cu ranforsantul, încât sunt folosite tehnici speciale de lucru. Pentru a se folosi ca matrice în compozite procesate în stare lichidă, un aliaj metalic trebuie să aibă vîscozitate redusă în stare topită (condiție relativ ușor de îndeplinit, inclusiv de aliajele uzuale), dar și umectare corectă a ranforsantului; în general aliajele metalice nu umectează elementele disperse nemetalice, încât în procesele de turnare se apelează la una sau mai multe dintre măsurile de mai jos.

a) **Acoperirea elementelor de armare cu pelicule metalice**, pentru că metalele lichide umectează pe cele solide, mai ales dacă sunt solubile reciproc, sau dacă pot forma compuși intermetalici; cel mai frecvent se folosesc pelicule de **nichel**, mai ales la matricile din aliaje de aluminiu sau de titan; ameliorarea umectării se obține *la temperaturile obișnuite* de elaborare a aliajelor respective, încât este protejată integritatea ranforsantului, prin prevenirea reacțiilor chimice cu metalul topit.

Pentru particule *ceramice* se recomandă acoperiri cu nichel sau cobalt, realizate prin depunere electrolitică; se mai folosesc acoperiri de argint, cupru, crom, sodiu sau titan; îmbunătățirea umectării *fibrelor de carbon* de aluminiul topit se obține prin metalizări complexe, cu sodiu, staniu și magneziu, care își îmbunătățesc reciproc capacitatea de a fi umectate de topitură. În cazuri particulare se fac și acoperiri din materiale *nemetalice*; un exemplu tipic este cel al fibrelor de carbon, care se acoperă uneori cu SiO<sub>2</sub>; acest compus este mai stabil decât titanul sau borul și bine umectat de magneziu sau de aluminiu; uneori se folosesc acoperiri *duble*, prin adăugarea unor straturi subțiri de nichel, la exterior.

- b) **Introducerea de elemente superficiale active** în matrice, de exemplu Mg, Ca, sau Li – care au afinitate față de oxigen și împiedică formarea filmului de oxizi (care defavorizează umectarea) pe suprafața elementelor de armare.
- c) **Supra-încălzirea elementelor disperse**, înainte de introducerea lor în matricea topită, cu scopul de a realiza oxidarea lor superficială, sau pentru eliminarea gazelor adsorbite în stratul lor superficial.
- d) **Supra-încălzirea sau tratarea chimică** a băii metalice (materialul matricei adus în stare topită).
- e) **Condiționarea** mediului de lucru, de exemplu prin controlul conținutului de oxigen, care poate scădea umectarea prin formarea de oxizi pe suprafața elementelor de armare.
- f) Aplicarea unei **presiuni** asupra **compozitului**, aflat încă în stare de topitură, pentru depășirea barierelor reprezentate de energia termodinamică superficială și de viscozitatea aliajului metalic.
- g) **Tratarea cu ultrasunete** a suspensiei, pentru înlesnirea și accentuarea contactului direct între cele două faze.

### **Procedee de turnare utilizate la fabricarea CMM**

#### **1. Turnarea liberă (gravitațională)**

Reprezintă varianta clasică de turnare a metalelor și se aplică în două moduri de bază:

- ⇒ cu introducerea în forme a unui amestec de turnare realizat în prealabil;
- ⇒ cu adăugarea fazei complementare în jetul de aliaj lichid (matricea), în momentul turnării.

Importantă în proces (afectând calitatea compozitului) este **viteza de răcire** a produsului (când se află în forma de turnare), având două categorii de valori:

- viteze *mari* – se obțin atunci când se folosesc forme *metalice*; acestea sunt relativ scumpe, dar reduc la minimum segregările fazei de armare pe timpul răcirii;
- viteze *mici* – atinse în cazurile în care formele sunt *nemetalice*; segregarea este greu de evitat, astfel că această variantă este preferată la obținerea materialelor cu dispunere *neuniformă* a armării.

**Segregarea** fazei disperse este pentru orice turnare principala problemă în asigurarea calității produselor; poate fi reglată prin modificarea unor factori tehnologici și de material:

- ⇒ *fluiditatea* topiturii metalice pe parcursul procesului de solidificare;
- ⇒ *densitatea și proprietățile termice* ale celor două faze ale compozitului;
- ⇒ *forma și mărimea* elementelor disperse, precum și *conținutul* lor *volumic* în produsul final;
- ⇒ morfologia de *crystalizare* a matricei;
- ⇒ modul în care materialul matricei *interacționează* cu faza complementară;
- ⇒ intensitatea proceselor de *aglomerare* a incluziunilor;

⇒ prezența unor *forțe exterioare* care acționează în perioada de răcire a amestecului.

Turnarea liberă este *neindicată* dacă materialele constitutive ale compozitului au *densități foarte diferite*, pentru că favorizează segregarea elementelor de armare; chiar dacă matricea este un aliaj ușor (de Al sau Mg), particulele de adaos cu densitate relativ mică (grafit sau alumină) se grupează către partea superioară a formei de turnare (fenomen denumit *flotare*); analog, particulele “grele” au tendința să se *decanteze* către baza formei și se vor găsi aglomerate la partea inferioară a semifabricatului turnat.

Această tehnică este cea mai necostisitoare metodă de turnare, astfel încât apare ca variantă preferată pentru producția pe scară largă a unor piese din compozite cu matrice metalică; de altfel, este considerată tehnologia de bază pentru obținerea compozitelor bazate pe aliaje de aluminiu.

### 2. Turnarea centrifugală

Această metodă implică **rotirea** formelor în timpul solidificării amestecului; se aplică pieselor simple, *de revoluție* și conduce la materiale mai compacte (cu porozitate mai mică) față de varianta gravitațională; parametrii tehnologici pot fi dirijați, pentru o **neomogenitate controlată** a compozitului final, printr-o dispunere neuniformă a elementelor disperse; acestea sunt acționate de forțe centrifuge, cu atât mai mari cu cât particulele de armare au densitatea mai mare; se pot lua măsuri pentru ca deplasarea lor în topitura în curs de solidificare să fie *încetinită*, prin creșterea viscozității topiturii, scăderea temperaturii în mediul de lucru, sau mărirea conținutului de fază de armare.

### 3. Turnarea prin infiltrare

Fabricarea CMM prin turnare convențională are avantajele caracterului uzual al acestei metode, de unde rezultă costuri de producție relativ joase și productivitate mare, dar trebuie subliniat că ea nu permite decât obținerea unor compozite cu performanțe modeste, necompetitive pentru aplicații de vârf; din aceste motive au fost dezvoltate alte tehnologii, în care înglobarea ranforsantului este controlată mai precis, așa cum se întâmplă la *infiltrarea ranforsantului de către matricea topită*.

Aliajul lichid este determinat să pătrundă în porii unei **preforme** (aranjament realizat în prealabil) din elemente de armare – preferabil folosit sub formă de fibre lungi; procedeul se realizează în patru **variante** tehnologice de bază (care sunt schematizate în figura din pagina următoare):

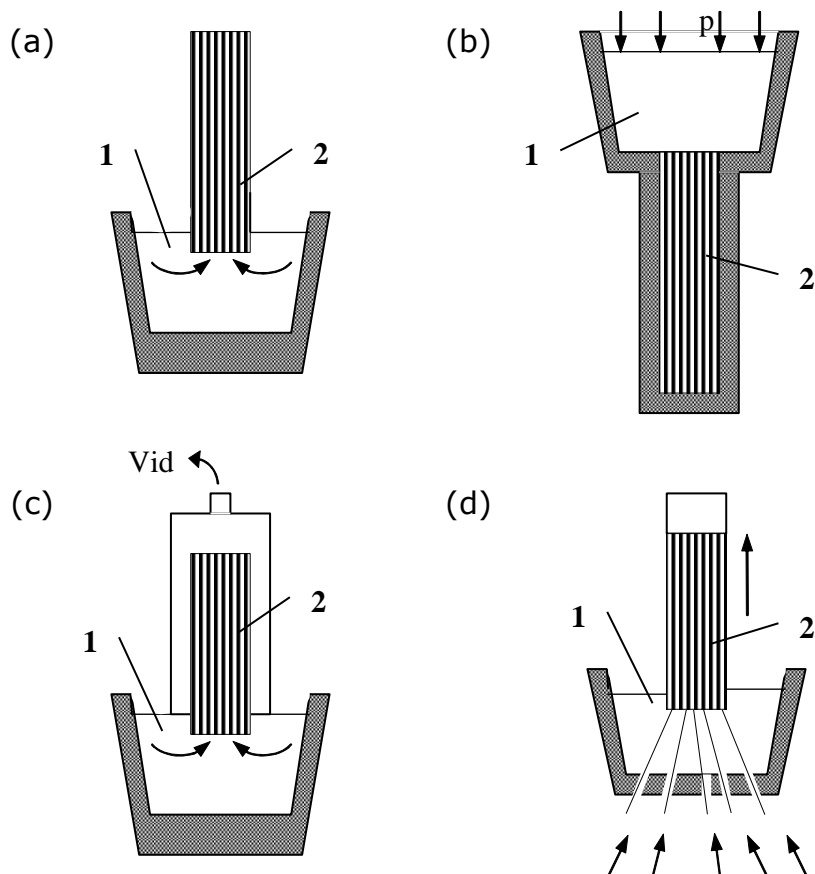
- (a) prin capilaritate;
- (b) cu aplicarea unei presiuni, de obicei prin intermediul unui gaz inert;
- (c) prin depresiune, produsă de vidarea preformei;
- (d) cu trecerea forțată a fibrelor prin matricea aflată în stare topită.

Infiltrarea *spontană* (prin capilaritate) este relativ puțin folosită, întrucât implică un minimum de compatibilitate (inclusiv de umectare) între cele două faze, ceea ce limitează gama de materiale la care metoda se poate aplica; necesită și un timp lung de realizare, ca și de contact

## FABRICAREA COMPOZITELOR CU MATRICE METALICĂ

între ranforsant și metalul topit, ceea ce este dezavantajos inclusiv prin favorizarea reacțiilor chimice de la interfață, care pot duce la degradarea fazei secundare.

Aceste impedimente pot fi evitate prin aplicarea unor tratamente speciale (de tip chimic sau termo-chimic) asupra fibrelor de armare; pentru cele de natură ceramică, de exemplu, se practică acoperirea lor cu o substanță (de obicei metalică) care le protejează și îmbunătățește înglobarea lor în matrice.

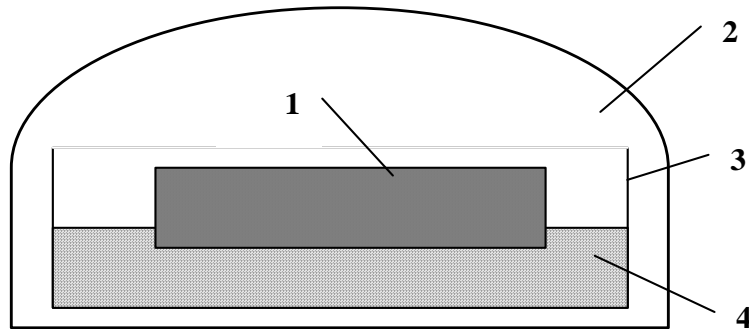


Metode de realizare practică a turnării prin infiltrare

Metodele de turnare prin infiltrare (mai ales cele care folosesc presiunea sau vidul) au ca **avantaje** principale posibilitatea ca piesele să fie realizate foarte aproape de forma și dimensiunile finale (deci compozitul este fabricat simultan cu piesa), la care se adaugă costul relativ mic și compactitatea bună a materialului final, cu diminuarea drastică a activităților chimice din zonele de interfață (și creșterea calitativă a adeziunii dintre constituenți); nu este de neglijat faptul că infiltrarea metalului topit în preforme ceramice poroase este cea mai importantă tehnică pentru obținerea unor piese cu forme complexe, din compozite cu valori mari ale fracției volumice de ranforsant (peste 50%).

A fost dezvoltată și o **variantă** a procedurii (ilustrată în figura următoare) care utilizează materialul matricei aflat **în stare solidă**, sub forma unui lingou metalic care este așezat peste preforma din fibre de armare. Ansamblul formei este încălzit, într-o incintă cu atmosferă de azot, până când se realizează topirea lingoului și supra-încălzirea aliajului, care apoi pătrunde

în porii preformei și duce la obținerea noului material; este recomandată prezența **azotului** în incinta de turnare, acest gaz având efecte pozitive asupra procesului tehnologic; se ajunge pe această cale la apariția, în structura finală, a unei cantități de *nitrură de aluminiu*, care contribuie la creșterea rigidității compozitului, concomitent cu micșorarea coeficientului său de dilatare termică.



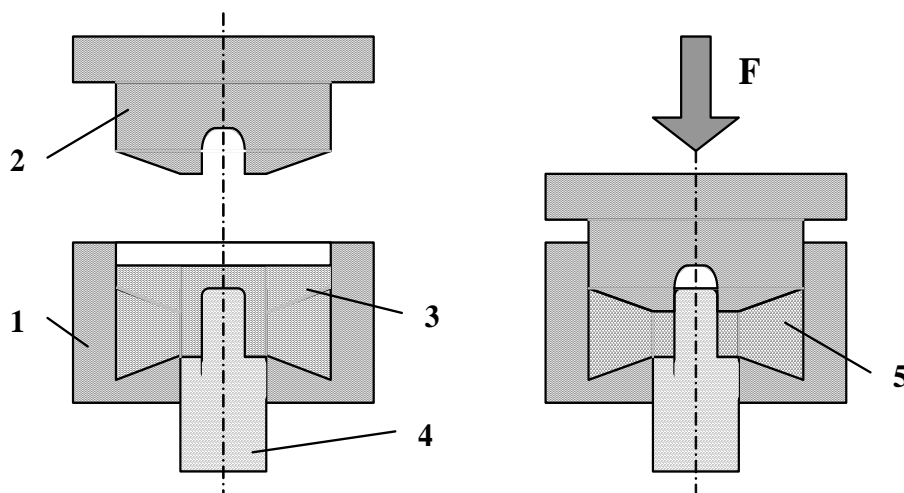
Metodă de turnare prin infiltrare, cu metalul de bază în stare inițială solidă:

- 1 – aliaj; 2 – incintă cu azot; 3 – formă de turnare;
- 4 – preformă din elemente de armare.

#### 4. Turnarea cu presare în matrițe (Squeeze Casting)

Această tehnică este folosită tot mai mult (pe măsură ce costurile ei tehnologice scad), și cunoaște două **varianțe** practice:

- a) presarea unui amestec de turnare realizat în prealabil – pentru compozite cu armare dispersă;
- b) injectarea topiturii într-o preformă din elemente de armare, după care infiltrarea și solidificarea se produc într-o matriță, sub presiune.



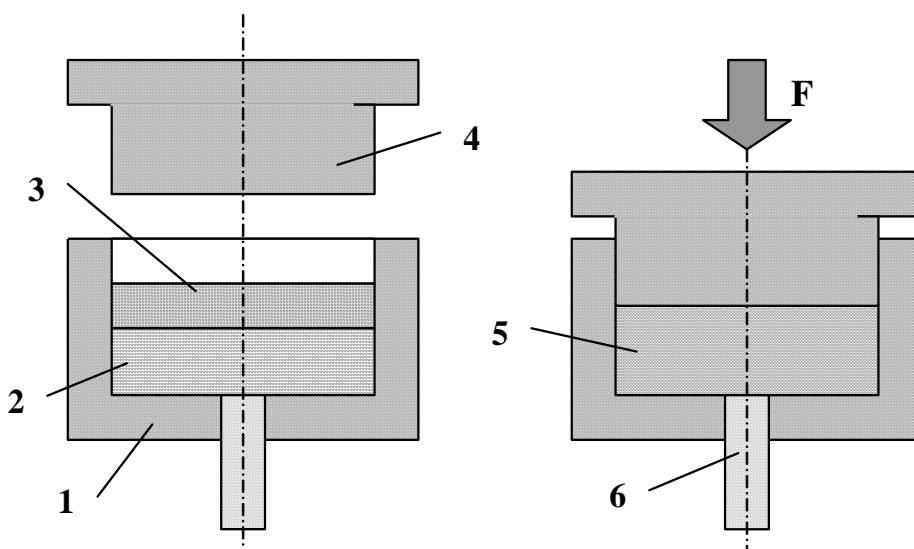
Presarea unui amestec realizat în prealabil: 1 – matriță; 2 – poanson; 3 – amestec de turnare; 4 – extractor; 5 – produsul din compozit, aflat în curs de solidificare.



## FABRICAREA COMPOZITELOR CU MATRICE METALICĂ

Aplicarea presiunii în cadrul procesului de infiltrare face să se obțină o structură finală cu granulație fină și cu proprietăți mecanice (de rezistență și ductilitate) mai bune decât la turnarea obișnuită; procedeul este **avantajos** inclusiv pentru că poate utiliza aliaje cu fluiditate mică, armate cu fibre continue, dar și cu fibre scurte sau particule; poate fi aplicat și în cazul unor loturi mari de fabricație, iar produsele finale au compactitate mare (porozitate scăzută), calitate bună a suprafețelor și configurații (care pot fi dintre cele complexe) apropiate de cele definitive. Metoda este considerată a fi de nivel *mediu*, în privința costurilor de producție, fiind folosită pe scară largă în industria auto, de exemplu pentru fabricarea unor componente de precizie ale motoarelor.

Presiunea obișnuită folosită pentru realizarea infiltrării este cuprinsă între 70 și 200 MPa, iar preforma este compactată tot prin presare; calitatea compozitului fabricat poate fi controlată prin alegerea corectă a valorilor pentru parametrii principali ai procesului: temperatura de preîncălzire a preformei; densitatea (sau porozitatea) ei aparentă; gradul de supraîncălzire a topiturii; presiunea de lucru.



Presarea aliajului lichid într-o preformă din elemente de armare: 1 – matriță; 2 – preformă; 3 – aliaj lichid; 4 – poanson; 5 – piesa din compozit; 6 – extractor.

Cele patru metode de turnare prezentate până aici procesează materialele compozite folosind turnarea propriu-zisă a matricei metalice, adusă în stare lichidă; acest aspect este avantajos, întrucât se ajunge să se producă un contact real și complet, în zonele de interfață, al materialelor constitutive, conducând prin urmare la adeziuni puternice între ele.

Există totuși și câteva **dezavantaje** importante ale folosirii amestecurilor de turnare în stare topită, așa cum ar fi următoarele particularități tehnologice:

- ◆ *reproductibilitate dificilă* a procesului tehnologic și a calității pieselor;
- ◆ *control incomplet* al proceselor care însoțesc turnarea;
- ◆ estimare dificilă a urmărilor *reacțiilor chimice* de la interfața matrice - ranforsant, ceea ce conduce tot la imposibilitatea dirijării complete a calității produsului final;

- ◆ aplicare *problematică* a acestor metode la aliaje de bază cu temperaturi ridicate de topire (cum sunt cele de titan), susceptibile să conducă la distrugerea elementelor de armare.

### 5. Turnarea cu matricea în stare semisolidă (procedul COMPOCASTING)

Acest proces particular de turnare are loc la temperaturi relativ scăzute (aflate în intervalul de solidificare a matricei), astfel încât doar o parte din amestecul de turnare se află în stare lichidă; pentru buna desfășurare a procesului se recomandă ca proporția de aliaj solidificat să fie menținută permanent la aproximativ 40% din totalul amestecului, crescând progresiv aportul de căldură pe măsură ce se introduc componentele solide *disperse* (de obicei având forma de particule).

După realizarea compoziției dorite se oprește amestecarea, iar solidificarea se poate face într-un recipient de tip *formă* (cu forme și dimensiuni impuse de aplicația respectivă), sau sub aspectul unui *lingou* care să poată fi ulterior reîncălzit, pentru o eventuală prelucrare secundară (de exemplu prin operații de deformare plastică).

Este important de subliniat a aceasta este o tehnică necostisitoare, aplicată pe scară largă în industria auto.

Metoda are și câteva **avantaje** cu totul remarcabile:

- ✓ fragmentele de matrice care se solidifică fac să fie antrenate în topitură elementele disperse, chiar dacă ele nu sunt umectate de aliajul topit, lărgind posibilitățile de combinare a materialului matricei cu diverse naturi de elemente de armare;
- ✓ agitarea intensă a amestecului este un factor în plus care favorizează înglobarea particulelor, datorită curățării abrazive a suprafețelor lor;
- ✓ sunt evitate reacțiile chimice între constituenți (mergând chiar până la consumarea de către matrice a fazei secundare) pe care le favorizează temperaturile ridicate la care se realizează amestecurile cu matricea în stare lichidă;
- ✓ materialul complementar poate fi introdus în proporții mari și cu distribuire aproximativ uniformă pe secțiunea produsului final, tendința de segregare fiind mult diminuată de fluiditatea mică a aliajului.

Există și un **dezavantaj** important, reprezentat de *porozitatea mare* a compozitului obținut prin aplicarea acestei variante tehnologice; acest aspect particular poate fi ameliorat, de exemplu, prin pre-încălzirea elementelor de adaos, sau prin introducerea lor în matrice într-o incintă cu atmosferă controlată (vid sau gaz inert), sau prin agitarea în vid a compoziției, sau (în fine) prin presarea ei într-o matriță.

## B. Fabricarea CMM prin depunerea matricei lichide în stare pulverizată

Această tehnologie (ilustrată de schema alăturată) se bazează pe dezintegrarea matricei (aflată în stare lichidă) în picături fine (**Spray Deposition Process**), sub acțiunea unui gaz inert, în care se injectează simultan materialul de armare, aflat și el în stare pulverizată; amestecul astfel obținut se depune pe o suprafață răcită cu apă, având o configurație conformă piesei fabricate; semifabricatele rezultate au o structură cu porozitate mare, încât necesită de obicei să fie consolidate, printr-un proces de deformare plastică, care conduce la obținerea unor structuri fine, fără macro-segregații.

Solidificarea se face cu viteze mari și reacțiile de interfață sunt reduse, pentru că

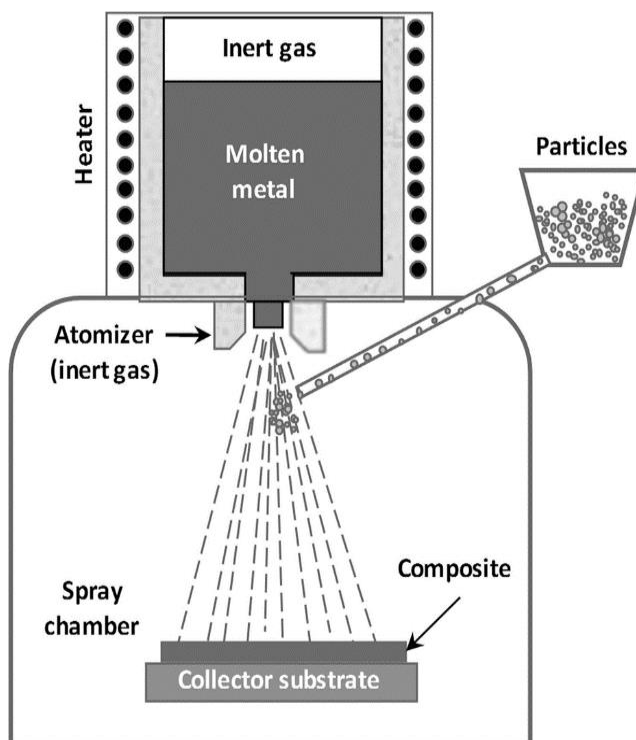
nu au timp destul ca să se producă; dispersarea elementelor de armare este uniformă, deși sunt foarte fine, pentru că nu se poate produce fenomenul de *segregare dendritică*; pentru a evita oxidările excesive, procesele au loc în **atmosferă** controlată (de obicei în incinte vidate); trebuie controlat strict inclusiv **timpul** de contact între componente, la temperaturi înalte, pentru a limita interacțiunile chimice dintre ele.

Picăturile de material de matrice se produc dintr-o baie de metal topit, sau prin consumarea, prin topire rapidă, a capătului unei bare din metalul respectiv (metodă denumită *cu alimentare continuă*).

O variantă a metodei (**Plasma Spray Deposition**) presupune să se introducă un amestec de pulberi metalice și ceramice (constituenții viitorului compozit) într-un **jet de plasmă** de presiune joasă (creată prin încălzirea unui gaz inert, într-un arc electric, la temperaturi de ordinul a 10.000 K); materialul compus se topește astfel rapid și este proiectat cu viteză mare pe o suprafață de răcire (de forma semifabricatului obținut), rata de scădere a temperaturii fiind foarte ridicată, de ordinul a  $10^5$  K/s.

Ca o dificultate suplimentară a acestui procedeu, care deja este pretențios (necesitând dotări tehnice performante), este necesară protejarea mediului de lucru de interacțiunea cu aerul atmosferic, prin injectarea unui gaz inert în jurul jetului de plasmă și asupra substratului de răcire. În schimb, compozitele astfel fabricate au structuri fine și omogene, deci proprietăți fizice și mecanice foarte bune.

Deși reprezintă o tehnologie relativ costisitoare și dificil de pus în practică, producerea compozitelor prin depunerea constituenților din stare pulverizată are **avantajul** că duce la obținerea unor materiale compacte și că se poate aplica practic oricărui metal sau aliaj, chiar



dintre cele cu temperaturi înalte de topire (pentru care metodele de turnare sunt greu de folosit), precum și în combinație cu orice tip de material complementar, sub formă de pulbere; este folosită pentru fabricarea de contacte și “perii” electrice, scule tăietoare și așchietoare, sau de materiale de fricțiune.

Metoda cu jet de plasmă are ca avantaj suplimentar menținerea în limitele stabilite a parametrilor procesului, care sunt influențați în mod direct de arcul electric folosit, iar acesta la rândul lui poate fi controlat cu relativă ușurință; prin măsuri de precauție suplimentare (de exemplu pentru a se evita deteriorarea elementelor de ranforsare sub acțiunea directă a metalului topit), metoda se folosește și pentru **compozite armate cu fibre** (acestea fiind așezate în *preforme*).

O metodă înrudită și mult mai pretențioasă folosește depunerea materialului matricei, după ce a fost adus în stare de vapori (**Vapor Deposition**); trecerea continuă a fibrelor de armare prin zona de vaporizare a metalului se obține de exemplu prin direcționarea unui fascicul de electroni de putere mare (aproximativ 10kW) pe capătul unei bare care se consumă treptat; are loc condensarea metalului pe fibre, în straturi relativ subțiri.

Metoda are câteva **avantaje** importante: se pot folosi ca matrice numeroase aliaje metalice, iar cuplarea constituenților este complet lipsită de perturbări mecanice; acest aspect este util pentru a putea fi menținută o anumită compoziție chimică în stratul superficial al fibrelor, sau pentru a împiedica să le fie distruse straturile de acoperire, care au roluri de bariere de difuzie. Fabricarea compozitului se completează prin asamblarea fibrelor de armare în mănunchiuri (sau în forme potrivite cu produsul final), care sunt apoi consolidate sub presiune înaltă.

### **C. Obținerea CMM prin cuplarea materialelor constituate aflate în stare solidă**

#### **1. Metode din domeniul metalurgiei pulberilor**

Se folosesc constituenții metalici și/sau ceramici (oxizi de aluminiu, carburi, nitruri, sau boruri) sub formă de *pulberi* (cu dimensiuni medii de 15μm), *particule* sau *cristale filamentare*; în cadrul acestor procese sunt parcurse, în mod generic (unele etape pot lipsi), mai multe **faze** tehnologice:

- a) sortare, dozare, amestecare și degazare; amestecul poate fi făcut și în suspensie lichidă, eventual agitată, de exemplu prin tratare cu ultrasunete;
- b) compactarea amestecului astfel format;
- c) presare la cald (sub temperaturile de topire ale constituenților) sau la rece, urmată de sinterizare;
- d) o operație suplimentară de deformare plastică – forjare, laminare sau extrudare – a semifabricatului rezultat mai sus (având, de obicei, porozitate mare, aprox. 25%);
- e) prelucrarea finală a produsului ce trebuie obținut.

Aplicabilitatea metodei depinde de îndeplinirea, de către materialele care sunt combinate, a unor **condiții** speciale:

## FABRICAREA COMPOZITELOR CU MATRICE METALICĂ

- ✓ asemănarea curbelor de contracție sau de dilatare termică, pentru a evita fisurarea pieselor la sinterizare;
- ✓ compatibilitatea chimică – asigurând o minimă reactivitate între componente și posibilitatea de difuzie în sistemul metal-ceramică.

Pentru a fi crescută compactitatea compozitului final, în mod obișnuit se folosesc amestecuri de particule care au dimensiuni diferite, iar faza de armare și pulberile din materialul matricei este bine să aibă și ele forme geometrice diferite; în plus, modulul de elasticitate al fazei complementare (care are, de cele mai multe ori, natură ceramică) este în principiu mult mai mare decât al matricei, făcând ca particulele din mixtură să se deformeze în moduri diferite în procesele de presare, reducând și pe această cale porozitatea produsului final.

Metoda se poate folosi inclusiv pentru compozite armate cu **fibre**, cu materialul matricei sub formă de pulbere, acesta fiind plasat, în cantitățile care sunt necesare, împrejurul aranjamentului de fibre; se face apoi compactarea acestui amestec, urmată de sinterizare la temperaturi înalte, sau la temperaturi din *intervalul de solidificare* a matricei, caz în care doar o parte din materialul de bază ajunge în stare lichidă.

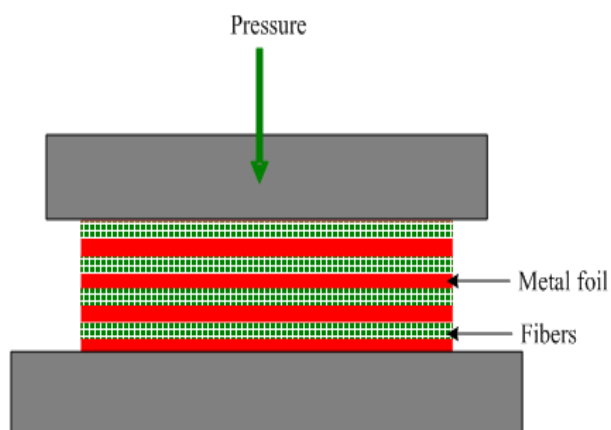
Câteva exemple de combinații de materiale constitutive cărora li se aplică în mod frecvent această tehnologie de fabricare (cu precizarea că în locul aliajelor se folosesc uneori compuși intermetalici ai aceluși metal):

- aliaje de cobalt cu carbură de wolfram (rezultă compozite foarte dure, folosite la fabricarea unor scule așchietoare sau sape de foraj);
- aliaje de crom cu particule de alumina (compozite cu rezistență mare la oxidare la temperaturi înalte);
- aliaje de nichel cu carbură de titan (compozite cu rezistență deosebită la uzură) sau cu oxid de magneziu (cu aplicații în industria nucleară).

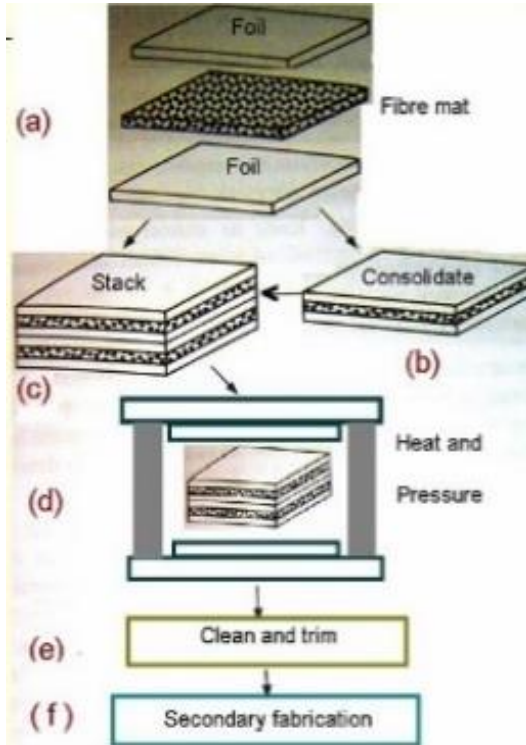
Metoda este considerată a avea un nivel **mediu** al cheltuielilor de producție și conduce la compozite cu proprietăți mecanice foarte bune, întrucât nu este implicată (decât în mod excepțional și cu afectare parțială) topirea constituenților și deci nu se produc reacții chimice majore la interfețele dintre matrice și ranforsanți. Este recomandată pentru realizarea obiectelor de dimensiuni mici (mai ales de formă rotundă) – pistoane, valve, buloane etc.

### 2. Metode bazate pe difuzia componentelor în stare solidă (*Diffusion Bonding*)

În cadrul acestor metode se realizează punerea în contact a două suprafețe din materiale distincte, la *temperatură înaltă* (limitată de condiția ca materialele să rămână în stare solidă, inclusiv pentru îngrădirea reacțiilor chimice de la interfață) și cu aplicarea unei *presiuni* mecanice (având intensitate adecvată), pentru a se produce **difuzia** (adică interdifuzia atomilor din straturile



superficiale) între cele două materiale. Presiunea de lucru poate fi *joasă* (caz în care procesul trebuie să se desfășoare în vid, sau în atmosferă controlată), respectiv *înaltă* – mai ales atunci când se urmărește și o anumită deformare, intenționată a semifabricatului din material compozit; procesele de difuzie se *intensifică* prin creșterea presiunii și a temperaturii de lucru (între 0,5 și 0,95 din temperatura de topire a matricei).



Metodele de difuzie se aplică mai ales pentru producerea de semifabricate formate din straturi suprapuse, armate cu fibre; legăturile dintre materiale sunt în final consolidate, printr-o prelucrare secundară, de tip deformare plastică; dacă produsul trebuie să fie sub formă de benzi sau foi, atunci semifabricatele se laminează; pentru piese de forme complexe se face presarea finală în matrițe metalice.

Principalul **avantaj** al tehnicilor din această categorie este posibilitatea cuplării, fără substanțe de legătură, a unor suprafețe relativ mari și a unor materiale greu de îmbinat prin alte metode (deci o mare varietate de matrici metalice pot fi folosite); este posibil controlul conținutului de constituenți, dar și al orientării fibrelor de armare. **Puncte slabe** sunt durata mare a procesului (mai multe ore),

costurile ridicate (fiind necesare temperaturi și presiuni relativ ridicate, menținute un timp lung), ca și limitarea dimensiunilor pieselor ce pot fi realizate (care trebuie să aibă și configurații geometrice simple); aplicarea procedurii implică și **dificultăți** tehnologice de neocolit: pentru realizarea difuziei trebuie ca, sub presiunea de lucru, materialele să se apropie între ele la distanțe foarte mici (de ordinul distanțelor la care se plasează atomii); suprafețele de contact trebuie să fie perfect curate, fără impurități sau pelicule aderente, iar procesul de difuzie trebuie să aibă loc într-o incintă cu atmosferă controlată.

Se consideră că foliile de matrice folosite cel mai frecvent sunt din titan, cupru, nichel, sau aluminiu (de exemplu combinate cu fibre lungi de bor), iar fibrele de armare plasate între aceste folii sunt de obicei acoperite cu straturi polimerice, pentru a crește adeziunea la interfață a constituenților.

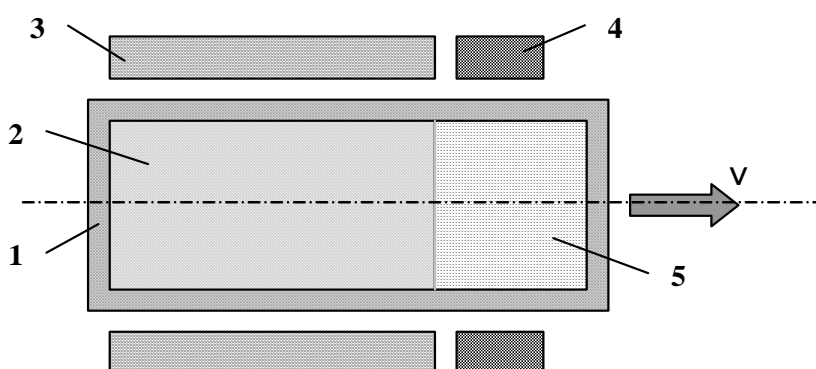
Materialele constituențe trebuie să aibă și *solubilități reciproce scăzute*, ca să nu formeze compuși care să slăbească legăturile dintre componente; un exemplu negativ în acest sens îl reprezintă matricea de titan, care are tendința de a penetra și chiar de a „consuma” fibrele de carbură de siliciu, inclusiv pe parcursul funcționării piesei din compozit, mai ales la temperaturi de peste 500°C; o astfel de solubilitate mare între constituenți face necesară acoperirea fibrelor cu materiale de protecție.

O variantă a metodei (**Consolidation Diffusion Bonding**) este folosită pentru compozite metalice stratificate (de obicei cu fibre continue, de bor sau ceramice); matricea este introdusă ca un constituent separat (sub formă de folii, fire ori chiar pulberi) sau se depune pe fibre (din

stare de vapori sau cu plasmă); se suprapun mai multe straturi, având compoziția și orientarea cerută, iar acestea sunt consolidate la presiune înaltă (perpendiculară pe straturi), la o temperatură suficientă pentru a favoriza difuzia materialelor constitutive. Procesul tehnologic este performant, dar destul de scump (condițiile tehnice sunt complicate suplimentar de folosirea unor incinte de lucru vidate), fiind eficient doar pentru producția de serie, sau (eventual) pentru cercetare științifică.

### D. Procedee de obținere a elementelor de armare direct în interiorul matricii (in situ)

Compozitele fabricate **in situ** sunt materiale multifazice ale căror faze de ranforsare sunt sintetizate chiar în matrice, prin reacții chimice care se produc pe parcursul fabricării; se numesc astfel prin contrast față de compozitele *ex-situ* – cu ranforsanți fabricați separat, înainte de a fi introduși în matrice. Sunt cercetate pe scară largă datorită potențialelor avantaje față de cele convenționale: ranforsanți stabili termodinamic (implicând o degradare mai mică în funcționarea la temperaturi ridicate), interfețe netede, costuri de fabricare mai mici, elemente de armare fine și distribuite uniform (proprietăți mecanice bune).



Solidificarea dirijată a aliajelor. 1 – formă; 2 – aliaj lichid;  
3 – sisteme de încălzire; 4 – sisteme de răcire; 5 – material compozit.

#### 1. Solidificarea dirijată (unidirecțională) a unor aliaje eutectice

Se referă la solidificarea, în condiții particulare, a unui **aliaj bifazic** de tip **eutectic** – având adică aceeași compoziție a topiturii și respectiv a soluției solide ce se obține când topitura este supusă unei scăderi a temperaturii; aliajul este turnat sub formă de bare, apoi se face retopirea lui și introducerea metalului lichid în cuva de solidificare (materializând piesa din compozit ce trebuie obținută).

Construcția elementelor de răcire printre care este trecută cuva, precum și deplasarea ei longitudinală conduc la apariția în masa aliajului a unui **front de cristalizare** plan și perpendicular pe direcția de deplasare, încât o parte din masa aliajului se transformă prin răcire în cristale filamentare (whiskere) sau chiar în fibre scurte (dacă aliajul are microstructură regulată), paralele între ele și orientate pe direcția solidificării. Aceste elemente de armare, foarte speciale prin natura apariției lor, sunt de obicei de tip **ceramic**

(oxizi sau alți compuși chimici ai fazelor din aliajul de bază), puternic înglobate în restul materialului, care devine astfel matricea compozitului.

Metoda a fost inițiată la firma franceză ONERA, în anul 1960 (pentru un compozit cu matrice dintr-un aliaj de nichel și fibre de NbC – substanță chimică denumită *columbiu*), fiind ulterior dezvoltată de firmele nord-americane General Electric și Pratt Whitney.

Principalele **avantaje** ale CMM obținute prin solidificare dirijată sunt următoarele:

- ✓ repartizare uniformă a elementelor de armare în structura finală, care de obicei are aspect fibros sau lamelar, cu așezare spațială regulată a lamelilor;
- ✓ înglobare foarte compactă a acestora în matrice (ducând la proprietăți mecanice mult crescute în raport cu aliajul de bază solidificat în condiții normale);
- ✓ structură perfectă a matricei, greu de obținut în condițiile unei cristalizări nesupravegheate;
- ✓ control total asupra conținutului de elemente de armare, care este cunoscut înainte de desfășurarea experimentului;
- ✓ caracter total cunoscut al legăturilor de la interfață;
- ✓ compatibilitate perfectă între constituenți – chimică, termodinamică și cristalografică (ducând la o înaltă stabilitate termică a proprietăților compozitului, până la temperaturi foarte ridicate).

Trebuie adăugat faptul, rezultat din chiar principiul metodei, că nu mai sunt necesare etapele de producere a ranforsantului și de introducere a lui în structura finală.

Principalul **dezavantaj** al metodei, pe lângă aplicabilitatea ei la o gamă restrânsă de materiale, este că fracția volumică de elemente de armare are valoare **unică**, impusă de compoziția foarte precisă a aliajelor eutectice; apoi, faza minoritară a compozitului nu se obține întotdeauna cu proprietăți mecanice satisfăcătoare, sau poate să crească sub forme nedorite, de exemplu ca lamele cu ramuri multiple și defecte de structură.

În mod tipic se consideră că solidificarea dirijată se aplică unor aliaje pe bază de nichel sau de cobalt, îmbunătățite prin aliere cu wolfram, molibden, vanadiu, aluminiu, zirconiu sau bor; elementele de armare ce apar în structura aliajului de bază sunt de obicei **carburi** de nichel, titan, niobiu sau tantal; ca ilustrare iată două exemple concrete de asemenea compozite:

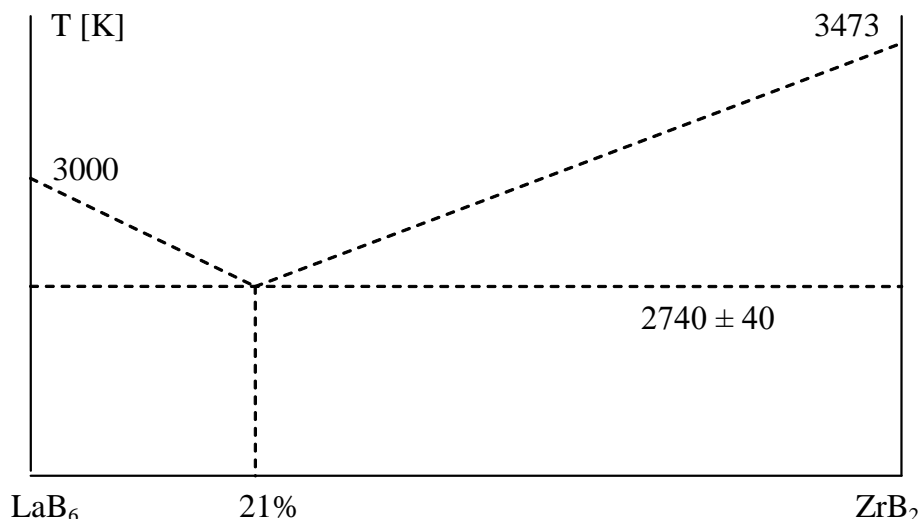
- cristale de carbură de niobiu înglobate în matrice de niobiu, materialul final având proprietăți mecanice stabile până la temperaturi de 1650°C;
- cristale de TiO<sub>2</sub> în aliaj Ti-Al – compozit cu prelucrabilitate și caracteristici mecanice foarte bune, în condițiile unui cost relativ redus; el este utilizat la fabricarea unor piese complexe pentru motoare de avioane, precum și în industria de armament.

Pentru a lărgi domeniul de aplicabilitate a metodei, se pot folosi și aliaje eutectice, sau de tip pseudo-eutectic, din sisteme *ternare* și complexe (cum ar fi combinațiile de tip Ni-Cr/TaC, Co-Cr-Ni/TaC s.a.m.d.); începând din anii '90 metoda este folosită și pentru producerea unor compozite care au ambii constituenți **ceramici**; ca material de bază se folosesc amestecuri (de tip eutectic) de **compuși refractari**, din pământuri rare și alcaline, combinate cu săruri (boruri) ale metalelor grele (tranzitive); aceste amestecuri au duritate mare, stabilitate chimică ridicată (față



## FABRICAREA COMPOZITELOR CU MATRICE METALICĂ

de alți compuși refractari) și temperaturi de topire înalte (între 2300 și 3200°C). În multe cazuri acești compuși au diagrame *pseudo-binare* de solubilitate de tip eutectic, așa cum este cazul borurilor de lantan ( $\text{LaB}_6$ ) și de zirconiu ( $\text{ZrB}_2$ ) (caz ilustrat în figura următoare), făcând astfel posibilă obținerea unor structuri întărite prin cristalizare dirijată.



Diagramă de solubilitate de tip eutectic a unor compuși refractari

### 2. Structuri obținute prin deformare plastică

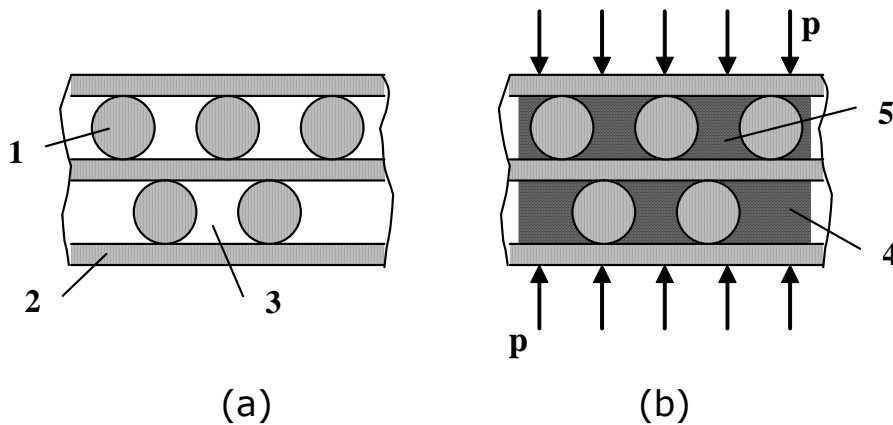
Prin operații succesive de deformare unidirecțională (executate de obicei la rece) aplicate unui lingou metalic (dintr-un aliaj bifazic), se provoacă alungirea grăunților metalici cristalini în direcția deformării; pe această cale se obțin în structura aliajului incluziuni (având ordinul de mărime al grăunților cristalini ai celor două faze) care au aproximativ forma unor fibre și prezintă valori diferite ale coeficienților de formă (*aspect ratio*, raportul între lungimea și diametrul lor), în funcție de gradul de deformare realizat (adică de numărul operațiilor de deformare aplicate semifabricatului respectiv).

Pentru aplicarea acestei tehnologii este necesar ca aliajul cu care se lucrează să nu fie unul oarecare, deoarece metoda duce la rezultate bune numai dacă materialul de bază al viitorului compozit (respectiv *faza majoritară* din aliaj) este de tip **ductil** și are rezistență mare la oxidare; de cealaltă parte, faza complementară (*minoritară*) trebuie să fie relativ **rigidă** (având deci un modul mare de elasticitate) și să aibă proprietăți bune de rezistență mecanică, inclusiv la temperaturi ridicate.

### 3. Cristalizarea fibrelor într-o matrice în stare solidă

Metodele din această categorie au fost dezvoltate pentru a face mai puțin costisitoare fibrele de armare rezistente la fluaj, în condițiile funcționării la temperaturi înalte; cele mai utilizate (cu stabilitate perfectă în matrici care au punct înalt de topire – inclusiv dintre acelea bazate pe compuși de aluminiu cu titan și nichel) sunt fibrele nano-cristaline de carbură de siliciu și cele poli-cristaline de oxizi. Macro-structura și stabilitatea lor depind de viteza de cristalizare (max. 0,5 mm/sec); vitezele mici determină costuri mari, iar fibrele rezultate nu sunt eficiente pentru folosirea la temperaturi înalte.

S-a ajuns să se obțină fibrele prin cristalizare din topitură, direct în matrice (**Internal Crystallization Method**), de exemplu în interiorul unor canale cilindrice continue, realizate în prealabil; o variantă folosește ca matrice un material metalic cu porozitate mare, sub formă de folii și sârme, așezate și solidarizate (prin difuzie, la temperaturi ridicate și sub acțiunea unor forțe de presare) într-un aranjament ce cuprinde spații goale alungite; acestea sunt infiltrate cu material al viitoarelor fibre, în stare topită, iar cristalizarea se produce treptat, în interiorul acelor canale, prin deplasarea ansamblului în zona rece a unui cuptor. Cu cât diametrul canalelor este mai mic, crește probabilitatea de obținere a unor mono-cristale care să ocupe întreaga secțiune transversală a canalelor.



Cristalizarea fibrelor în interiorul matricei: a) aranjament din material al matricei, în stare solidă; b) introducerea materialului fibrelor, în stare topită; 1 – sârme; 2 – folii; 3 – goluri; 4 – material al fibrelor; 5 – forma finală a fibrelor obținute.

După solidificarea materialului de adaos se obțin în structura globală fibre de armare, care au forma golurilor din aranjamentul inițial.

Aplicabilitatea acestui procedeu cunoaște câteva **limitări**:

- ✓ temperatura de topire a materialului fibrelor trebuie să fie mai mică decât aceea a matricei;
- ✓ interacțiunea chimică dintre cele două faze să fie neglijabilă;
- ✓ materialul fibrelor să umecteze, în stare topită, suprafețele matricei, iar viscozitatea topiturii să fie relativ joasă.

Aplicarea acestei metode conduce la rezultate bune dacă se realizează, de exemplu, fibre de alumină (de obicei sub formă de safir), care se topesc la 2070°C, obținute într-o matrice de molibden, care are temperatura de topire de 2610°C; topitura de alumină se infiltrează la temperaturi de 2200°C, iar difuzia se face la aproximativ 1200°C; se obțin fibre monocristaline, cu aceeași rezistență ca fibrele clasice.

Principalele **avantaje** ale acestei metode sunt următoarele:

- ✓ eliminarea etapei speciale de producere a fibrelor de armare;
- ✓ amplasarea perfect controlată a elementelor de adaos în matrice;

## FABRICAREA COMPOZITELOR CU MATRICE METALICĂ

- ✓ evitarea degradării fibrelor sub acțiunea mecanică sau chimică a materialului matricei (care nu trece prin starea lichidă);
- ✓ obținerea cu relativă ușurință a unor fibre de tip monocristal.

### **4. Sinterizarea reactivă a amestecurilor de pulberi**

Această metodă reprezintă o tehnică de sinterizare a unor amestecuri granulare de materiale care au un anumit grad de reactivitate chimică între ele; în acest fel, în timpul sinterizării au loc reacții, din care apar *faze noi*, concretizând constituenții materialului compus ce trebuie produs; se începe cu particulele de matrice aduse în stare topită, pentru a permite inițierea reacțiilor și pentru a reuni între ele particulele de material ranforsant.

Folosind această variantă tehnologică se fabrică, de exemplu, compozite de aluminiu armate cu particule ceramice (de tip  $TiB_2$ ,  $TiC$  etc.); materialul obținut în condiții obișnuite de lucru, adică fără aplicarea unei presiuni suplimentare este de obicei poros (pentru că reacții inițiale și producții de reacție au densități diferite), încât semifabricatul compozit trebuie ulterior să fie compactat, prin presare la cald.

## **CRITERII DE ALEGERE A METODELOR PRIN CARE SE FABRICĂ MATERIALELE COMPOZITE**

Paragrafele anterioare au trecut în revistă principiile de bază și particularitățile de aplicare ale metodelor și tehnicilor de bază prin care se fabrică materialele compozite și structurile bazate pe acestea. Varietatea foarte mare a procedeelor descrise impune stabilirea unor criterii cât mai concrete și mai precise de alegere a variantei potrivite de fabricare, pentru o anumită situație practică concretă. Această alegere se bazează pe experiența anterioară acumulată de proiectantul și de utilizatorul compozitului vizat, dar și pe analiza următoarelor particularități ale temei de proiectare abordate:

- ✓ **forma și dimensiunile** piesei care trebuie fabricată (deoarece unele metode se pretează numai la forme simple de piese, altele pot realiza numai suprafețe de revoluție s.a.m.d.);
- ✓ **mărimea seriei de fabricare**, care poate să fie *unicat, mică* (incluzând un număr de produse situat sub 500 de bucăți), *mijlocie*, respectiv *mare* (peste 5000 de piese); acest considerent este hotărâtor și pentru alegerea tipurilor de scule și de dispozitive cu care se va lucra, deoarece amortizarea costurilor unor accesorii scumpe se poate face numai în condițiile fabricării unui număr suficient de mare de piese;
- ✓ **natura materialului** folosit ca *matrice*, respectiv **natura, tipul, proporția** (fracția volumică/masică) și **forma de prezentare** ale *elementelor de armare*;
- ✓ **calitatea** cerută pentru piesele rezultate; în acest sens, este important să fie urmărite *reproductibilitatea* conținutului și proporției de constituenți (în materialul final), *omogenitatea* compozitului, *starea suprafețelor*, *precizia dimensională*, precum și *proprietățile fizice și mecanice* ale produselor; se poate spune că parametrii calitativi care se vor obține se află la un nivel proporțional cu costurile de fabricație care sunt alocate; este ușor de imaginat că respectarea unor parametri înalți de calitate va conduce la creșterea cheltuielilor implicate de producerea pieselor;
- ✓ **productivitatea** avută în vedere pentru fabricarea pieselor; după cum a rezultat din prezentarea de mai sus, există mari diferențe între *cadențele de formare* pe care le permit diversele metode citate, încât se va alege procedeul de fabricare capabil să răspundă cerințelor privind ritmul în care se vor livra produsele;
- ✓ **costul** estimat al produselor – în funcție de care tehnologiile de fabricare se împart în *nepretențioase*, care dau piese ieftine, dar de calitate modestă, *pretențioase* – cărora le corespund piese de calitate bună și relativ scumpe, respectiv *sofisticate* – ducând la obținerea unor piese foarte scumpe, dar de calitate ireproșabilă.