
METODE DE FABRICARE A MATERIALELOR COMPOZITE CU MATRICE NEMETALICĂ

Diversificarea tipurilor de compozite, pe piața deja foarte extinsă a acestor materiale, a făcut să fie mult lărgită și gama metodelor care se folosesc pentru fabricarea lor. Particularitatea cea mai spectaculoasă a compozitelor este că, în mod obișnuit, piesele nu se confecționează din materiale fabricate în prealabil; materialele sunt produse, practic, *simultan* cu structurile care fac obiectul respectivului proces tehnologic.

Pentru orice aplicație, alegerea celei mai potrivite metode de obținere a unui compozit este o problemă complexă, implicând luarea în considerare a unui număr mare de criterii de departajare. Prezentarea sistematică a metodelor se bazează de obicei pe gruparea compozitelor în funcție de materialul matricei; după cum s-a precizat anterior, materialele nemetalice folosite ca matrice se cuprind în trei categorii mari: polimerice, ceramice și de carbon, iar această clasificare se va regăsi în prezentarea care urmează.

A. Procedee de obținere a compozitelor cu matrice polimerică

Reprezentând cele mai răspândite compozite nemetalice, acestea sunt fabricate prin metode foarte diverse, astfel încât proiectantul unui astfel de material are posibilitatea să aleagă varianta care apropie cel mai mult proprietățile globale ale produsului final de cerințele aplicației abordate.

1. Turnarea gravitațională

Această metodă reprezintă un procedeu devenit clasic între tehnologiile prin care se produc materiale compozite. Se aplică sistemelor polimerice termoplastice (despre care s-a arătat că la încălzire se comportă asemănător cu metalele), armate cu particule sau cu fibre scurte (de obicei de sticlă). Ca principiu, este vorba despre introducerea materialului, adus în stare fluidă (prin încălzire peste temperatura lui de topire), în **forme** corespunzătoare piesei de fabricat; eventualele cavități ale piesei se realizează cu ajutorul unor modele (șabloane) speciale, incluse în formă și care se extrag la final din piesa solidificată.

Pentru materialele de bază de tip polimeric se folosesc de obicei forme *deschise* și modele de turnare de tip *calapod* (despre care se va vorbi mai jos, într-un paragraf cu acest subiect). Metoda este simplă și poate fi aplicată inclusiv pieselor de mari dimensiuni. În schimb, are și câteva *dezavantaje* importante: compactitatea redusă a materialului final, durata mare a proceselor de formare (între 6 și 24 de ore) și imposibilitatea folosirii elementelor de armare sub formă de fibre lungi.

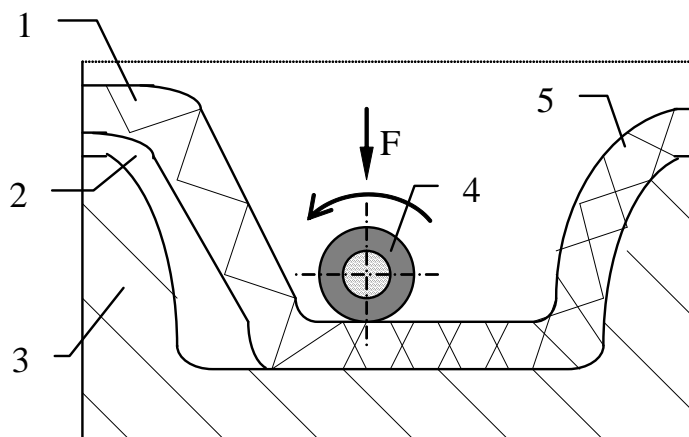
2. Turnarea sub presiune

Varianta a procedurii de mai sus, implică folosirea unor **forme metalice închise**, ca și a unor utilaje auxiliare specifice, astfel încât cheltuielile de fabricație vor fi mai mari decât la

variante de bază; în schimb, piesele astfel turnate au forme și dimensiuni foarte apropiate de cele ale produsului final. Metoda se aplică în mod preponderent pieselor cu configurații complicate (cum sunt palele de elice), pentru care se impun condiții speciale de precizie dimensională și de calitate a suprafețelor.

3. Formarea prin contact

Această tehnică reprezintă cel mai accesibil procedeu de obținere a compozitelor polimerice, putând fi aplicat inclusiv în ateliere cu dotări nepretențioase. Metoda (prezentată schematic în figura următoare) implică folosirea unor **calapoade** de tip *deschis*, pe care se aplică straturi succesive de material polimeric (care va deveni matricea compozitului) și de elemente de armare (uzual acestea sunt fibre lungi, sau țesături din astfel de fibre), până când se atinge grosimea dorită a semifabricatului.



Schema de principiu a formării prin contact.

1 – țesătură de fibre; 2 – rășină; 3 – formă; 4 – rolă de apăsare; 5 – material compozit.

Matricea este de obicei o rășină și se depune manual, cu ajutorul unor pensule, role, raclete sau chiar cu un pistol de vopsire. Suprafața calapodului se tratează în prealabil cu o substanță cu rol de agent decofrant (ceară sau alcool polivinilic), pentru înlesnirea extragerii materialului final din formă. Cele mai importante **avantaje** ale metodei sunt simplitatea tehnologică, posibilitatea executării unor piese agabaritice, precum și folosirea unor calapoade din materiale ieftine.

Există însă și multe **dezavantaje** ale acestui procedeu simplu, și care nu pot fi trecute cu vederea: productivitatea scăzută, obținerea unor piese având compactitate redusă și grosimi neuniforme, calitatea slabă a suprafețelor, performanțele fizico-mecanice moderate ale materialului compozit rezultat, inclusiv datorită controlului dificil asupra orientării corecte a elementelor de armare.

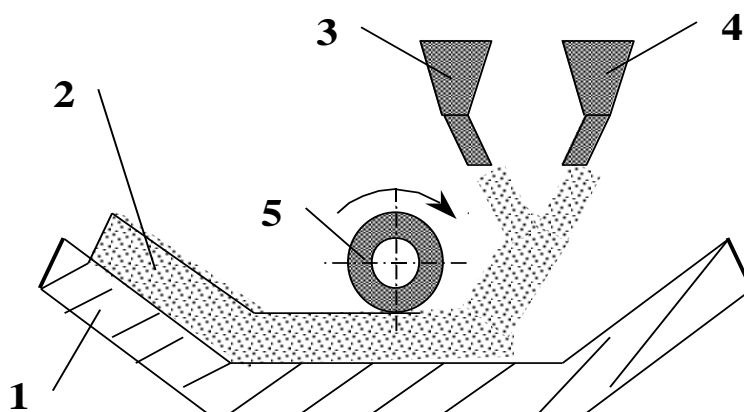
La acestea se adaugă consumul mare de manoperă, efectuată de un personal relativ calificat, precum și toxicitatea mediului de lucru (de exemplu cauzată de eliberarea în atmosferă a vaporilor de stiren, din compoziția rășinilor nesaturate care constituie materialul matricei).

FABRICAREA COMPOZITELOR CU MATRICE NEMETALICĂ

Deși este aplicată de foarte mulți producători de piese din compozite polimerice (mai ales în țara noastră), metoda se recomandă în special pentru obținerea artizanală a unor produse unicat (așa cum sunt piesele de schimb) sau în cazul producției de serie mică.

4. Formarea prin pulverizare simultană

Reprezintă o variantă semi-automatizată a formării prin contact. Se folosește un dispozitiv de genul unui pistol de pulverizare, în interiorul căruia se amestecă granulele din materialul matricei cu fibrele de armare, tocate la lungimea dorită.



Metoda de pulverizare simultană.

- 1 – matrită deschisă; 2 – material compozit; 3 – dispozitiv de dozare pentru rășină și accelerator;
4 – dispozitiv de dozare pentru fibre tocate; 5 – rolă de presare.

Amestecul este depus în **matrite deschise** (tratate cu agenți de decofrare), iar după depunere se face *presarea* materialului, de exemplu cu ajutorul unor role speciale.

Principalele **avantaje** ale procedurii sunt productivitatea mare, controlul riguros al conținutului de constituenți și posibilitatea obținerii unor piese de mici dimensiuni, sau care au configurații complicate.

Cele mai importante **dezavantaje** sunt imposibilitatea folosirii armării cu fibre lungi sau cu țesături de fibre, consumul mare de manoperă, toxicitatea mediului de lucru, realizarea unor piese cu o singură față finisată (cea dinspre matrită) și cu caracteristici fizico-mecanice fără pretenții deosebite.

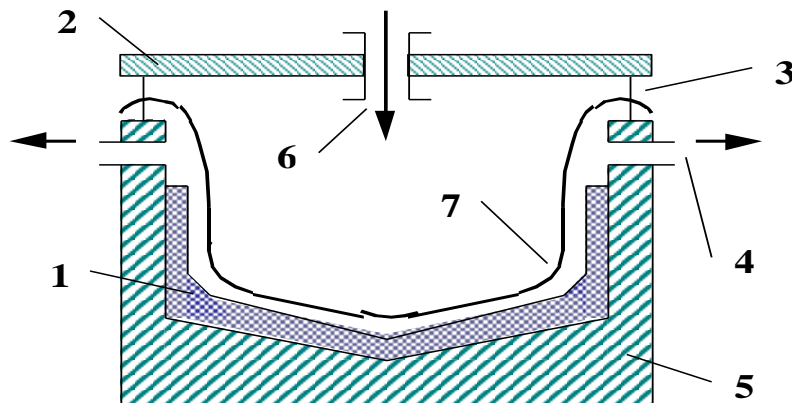
Se precizează că, în anumite situații, semifabricatele realizate folosind una dintre metodele descrise până aici sunt supuse, în continuarea procesului tehnologic, unor operații speciale de *deformare plastică la rece* (cum sunt laminarea sau extrudarea). Scopul acestora este creșterea compactității materialului final, proprietate care conduce și la îmbunătățirea proprietăților mecanice ale acestuia.

5. Formarea în sac

Este o îmbunătățire substanțială a metodei de formare prin contact și se aplică în trei variante tehnologice: în vid, sub presiune, respectiv sub acțiune combinată vid-presiune. Această din

urmă variantă le reunește pe celelalte două atât ca principiu, cât și ca părți componente ale instalației, încât s-a ales a fi prezentată schematic în figura care urmează.

În mod obișnuit se folosesc pentru armare **țesături de fibre preimpregnate**, ceea ce reprezintă un avantaj față de alte metode, datorită unor simplificări tehnologice implicate de utilizarea țesăturilor de fibre, dar și pentru că se obține un compozit cu un conținut de constituenți foarte bine controlat, la fel ca și dispunerea acestora în structură.



Formarea în sac, sub acțiune combinată vid – presiune: 1 – piesa din compozit; 2 – placă de închidere; 3 – cadru de etanșare; 4 – traseu de vid; 5 – matriță; 6 – traseu de presiune; 7 – sac.

Se începe cu așezarea pe formă a straturilor de fibre, peste care se pune o folie elastică și rezistentă (denumită “sac”), fixată etanș pe margini cu un cadru metalic. Folia este folosită ca suport pentru aplicarea presiunii, respectiv pentru realizarea vidului în spațiul dintre folie și formă, simultan cu aplicarea unui tratament termic, pentru polimerizarea matricei. Folosirea unei matrițe închise face procedeul mai performant.

Avantajele metodei (în toate variantele sale): calitatea deosebită a suprafețelor pieselor obținute (dar numai pe partea de contact cu matrița), eliminarea aproape totală a golurilor (porilor) din matrice, controlul riguros al conținutului de elemente de armare din compozit, care va avea și caracteristici fizico-mecanice bine controlate. **Dezavantaje:** productivitatea redusă și folosirea unor dotări pretențioase, care fac procedeul mai greu accesibil și mai costisitor. Totuși, există situații în care folosirea acestei metode se impune ca variantă de bază, cu precădere pentru piesele de grosime mică, dar cu întindere relativ mare.

6. Formarea prin injecție în vid

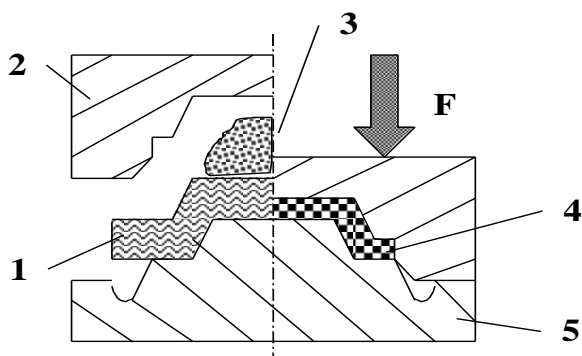
În cazul acestui procedeu se folosesc *două semi-matrițe metalice*, perfect calibrate, între care se așează materialul de ranforsare, într-un aranjament care corespunde cu piesa fabricată; spațiul interior este apoi vidat, astfel că rășina (matricea) este introdusă forțat ca să umple intervalele dintre elementele de armare. Porii din matricea polimerică sunt eliminați, ceea ce constituie principalul **avantaj** al metodei, care conduce la obținerea unor compozite cu structură compactă și conferă caracteristici fizico-mecanice foarte bune produsului, la care se adaugă rugozitatea mică a suprafețelor. **Dezavantaje:** productivitatea redusă a procesului,

FABRICAREA COMPOZITELOR CU MATRICE NEMETALICĂ

necesitatea unor matrițe precise și scumpe, posibilitatea de a se fabrica numai piese de revoluție, sau care au configurații simple.

7. Presarea la rece

Variantă îmbunătățită a metodei de pulverizare simultană, cu două *semi-matrițe metalice* (în figură în poziție *deschisă*, respectiv *închisă*, după aplicarea forței de presare F), între care se introduce amestecul de constituenți, menținut apoi sub presiune, până la întărirea completă.

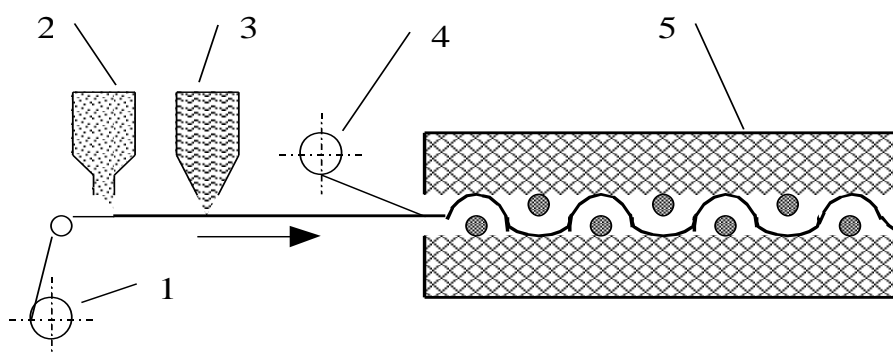


Schema de principiu a metodei de presare la rece.

1 – elemente de armare; 2 – contra-matriță; 3 – rășină; 4 – piesă din material compozit; 5 – matriță.

Se obține o creștere a preciziei de realizare a pieselor, precum și a compactității materialului compozit. Procedul este **avantajos** pentru că poate fi aplicat la serii mari de fabricare, permite minimizarea pierderilor de material, iar piesele obținute au ambele fețe finisate. Pe de altă parte, are neajunsul că necesită utilaje costisitoare (inclusiv o presă de capacitate corespunzătoare), iar dimensiunile pieselor fabricate nu pot fi foarte mari (fiind limitate de gabaritul presei și al matrițelor).

8. Formarea prin stratificare continuă



Schema unei instalații de stratificare continuă a panourilor ondulate.

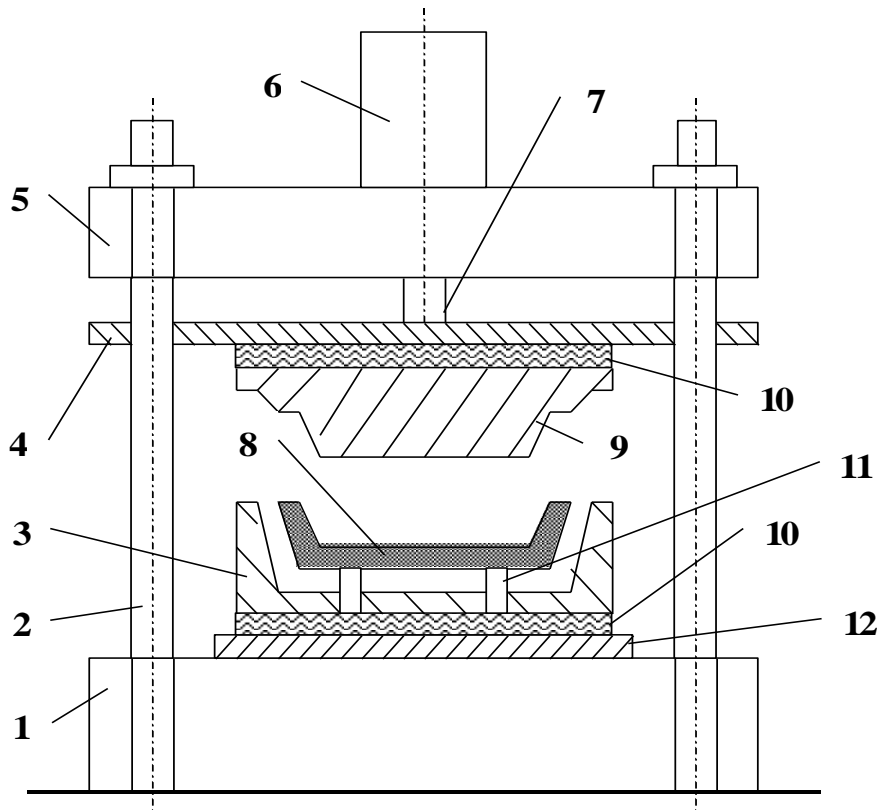
1 – rolă cu bandă de protecție inferioară; 2 – dozator pentru rășină; 3 – dozator pentru elemente de armare; 4 – rolă cu bandă de protecție superioară; 5 – cuptor de reticulare și preformare.

Este una dintre metodele de obținere în mod continuu a unor semifabricate din materiale compozite, așa cum sunt profilele plane sau panourile ondulate; se folosește un cuptor, în care se realizează reticularea matricei, dar și profilarea materialului, care apoi este debitat la dimensiunile necesare.

9. Presarea la cald

Aceasta este un procedeu dintre cele mai performante pentru fabricarea pieselor din compozite. Este folosit frecvent, inclusiv pentru obținerea de semifabricate prin compactarea unor țesături pre-impregnate din elemente de armare, numite *prepreg-uri*.

Materialul polimeric al matricei, impregnat în aranjamentul de fibre cerut de aplicația concretă, este reticulat la cald, în matrițe închise (a se vedea figura de mai jos), iar grosimea finală a semifabricatului (apropiat foarte mult ca dimensiuni de piesa propriu-zisă) se reglează prin intermediul numărului de straturi de prepreg introduse. După efectuarea tratamentului termic, materialul este lăsat să se răcească tot în matriță, sub presiune.



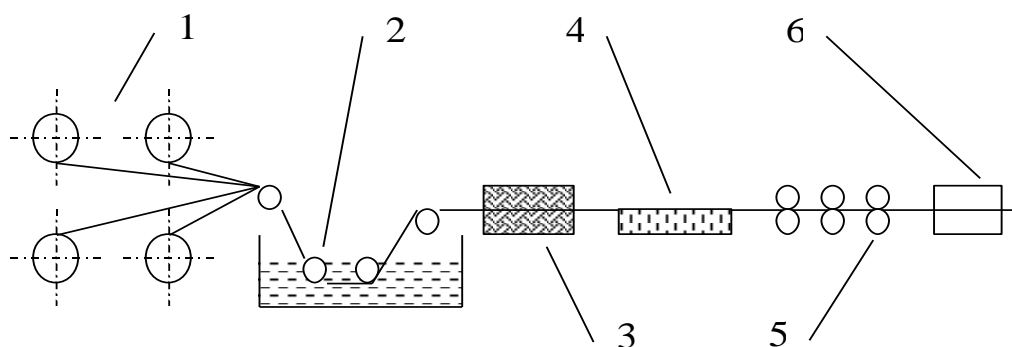
Schema de principiu a formării prin presare la cald: 1 – batiu; 2 – coloană; 3 – matriță inferioară; 4 – platou mobil; 5 – placă superioară; 6 – cilindru hidraulic; 7 – piston; 8 – piesa din compozit; 9 – matriță superioară; 10 – placă de încălzire; 11 – extractor; 12 – platou.

Avantajele principale ale acestei metode sunt productivitatea mare, obținerea unui material cu caracteristici fizico-mecanice deosebite, precum și posibilitatea realizării precise a unor piese complicate, sau a unor structuri prefabricate (numite și materiale *structurate*) care sunt necesare, de exemplu, în tehnica aeronautică și militară.

10. Formarea prin pultruziune

Și acesta este un procedeu de formare continuă, folosit la fabricarea unor semifabricate din materiale compozite care trebuie să aibă forme de profile de tip U, T, Y, sau forme de tuburi (țevi). Țesăturile, respectiv aranjamentele de fibre de armare potrivite aplicației avute în vedere, sunt trecute mai întâi printr-o baie (așa cum se poate observa în figura care urmează) în care se impregnează cu un sistem reactiv. Acesta reprezintă substanța polimerică (de obicei de tip **termorigid**) din care se va constitui matricea materialului compozit.

Aranjamentele respective sunt apoi introduse într-o filieră *încălzită*, folosită pentru **reticularea** și **profilarea** semifabricatului care trebuie produs. În final, acesta este tăiat (debitat) la dimensiunile necesare pentru utilizările sale ulterioare. Calitățile materialului final sunt influențate de temperatura filierei și de viteza de deplasare a fibrelor. Trebuie subliniat că se pot folosi numai fibre lungi, iar proporția lor în compozit este mare, față de alte metode, adică poate ajunge chiar și la valori de 75%.



Schema instalației de formare prin pultruziune: 1 – role cu fibre de armare; 2 – baie de impregnare; 3 – filieră încălzită; 4 – sistem de răcire; 5 – role de antrenare; 6 – dispozitiv de debitare.

Principalele **avantaje** ale procedurii se referă la productivitatea ridicată, la posibilitatea realizării unor piese cu forme complicate și caracteristici fizico-mecanice de valori înalte, respectiv la rigiditatea deosebită a profilelor obținute (datorită conținutului mare de fibre de armare din compozit).

11. Formarea premixurilor

Numite și “compound-uri”, premixurile sunt sisteme eterogene, bazate pe o matrice polimerică și elemente de umplură sub formă de pulberi, fibre scurte sau bile. Formarea lor, în funcție de viscozitatea produsului care trebuie obținut, se poate face prin turnare, injecție sau presare. Se obțin piese din compozite *nestructurate*, cum sunt în general cele folosite în industria electronică.

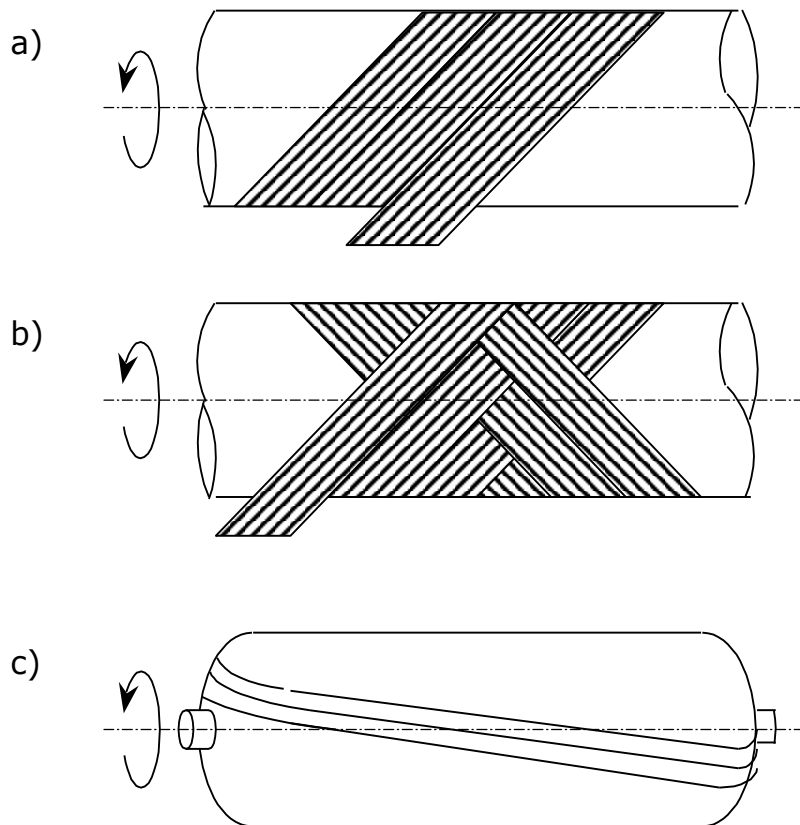
Avantajele metodei sunt productivitatea ridicată; posibilitatea realizării unor piese complicate (cu condiția ca acestea să nu conțină secțiuni de mici dimensiuni), în condițiile minimizării pierderilor de materii prime. Principalul **dezavantaj** este necesitatea folosirii unor

matrițe metalice, cu suprafețele active cromate dur, care conduc la creșteri importante ale cheltuielilor de producție.

12. Formarea corpurilor de revoluție prin răsucire filamentară

Formarea prin răsucire (bobinare) a structurilor de ranforsare este un procedeu de tip semi-continuu care, la fel ca alte metode descrise, presupune folosirea exclusivă ca elemente de armare a fibrelor lungi. Caracterul particular al metodei implică cerința suplimentară ca fibrele să fie foarte flexibile, deoarece după impregnarea cu sistemul polimeric reactiv acestea sunt **înfășurate** (de obicei în mod automatizat) pe un suport construit în mod special, care materializează forma structurii de obținut – o formă goală la interior, de cele mai multe ori *cilindrică*.

Răsucirea pe suporturi a fibrelor de armare poate fi făcută în trei moduri distincte, denumite după direcția înfășurării: *circumferențial*, *elicoidal* sau *polar*. După ce se atinge numărul necesar de straturi înfășurate, reticularea matricei se poate produce la temperatura camerei, sau prin introducerea întregului ansamblu într-o etuvă; la final, piesa este extrasă de pe suport, printr-un procedeu specific variantei de metodă care s-a aplicat.



Variante de înfășurare a fibrelor pe suport: a) circumferențială; b) elicoidală; c) polară.

Metoda are **avantaje** importante: posibilitatea de obținere a unor piese de volum mare, în condițiile unui conținut de fibre care poate ajunge până la 85%, asigurând materialului valori ridicate ale rezistenței și rigidității mecanice. **Dezavantaje** principale: productivitatea destul

de scăzută, costurile mari ale pregătirii fabricației, aplicabilitatea numai pentru corpurile de revoluție (cisterne, rezervoare etc.).

13. Formarea prin centrifugare a corpurilor de revoluție

În acest caz, materialul de armare este *mulat*, în aranjamentul dorit, pe pereții unei matrițe speciale, de forma unei suprafețe de revoluție. Matrița este pusă în rotație, în jurul axei sale longitudinale, cu o turație foarte mare (cuprinsă între 3000 și 4000 de ture pe minut); introducerea în incintă a sistemului reactiv face ca acesta să impregneze ranforsantul, sub acțiunea forței centrifuge, după care polimerizarea matriței se obține prin încălzirea uniformă a întregului ansamblu.

Metoda este relativ simplă și permite obținerea unui compozit foarte omogen, cu un conținut de ranforsant de până la 65%. În plus, permite fixarea unor inserții suplimentare, metalice, în structura realizată, pentru a-i mări rigiditatea. Dificultatea principală este obținerea unei așezări corecte și omogene a materialului polimeric în matriță, la care se adaugă limitarea aplicării metodei la piese de revoluție și care trebuie să aibă pereții de grosimi uniforme.

14. Formarea materialelor termoplastice

Polimerul termoplastic reprezentând matrița viitorului compozit trebuie să fie mai întâi amestecat cu elementele de armare, care sunt particule sau fibre scurte (sub 1mm); amestecul este granulat, apoi trece prin fazele de punere în operă a unui material termoplastic nearmat; de exemplu, poate fi prelucrat prin procedeele caracteristice materialelor plastice, de cele mai multe ori prin injecție.

Metoda are productivitate mare, asigură reproductibilitatea caracteristicilor fizice și mecanice ale compozitului și creează posibilitatea obținerii unor piese cu forme complexe. În schimb, specificul tehnologiei și al materialelor folosite face necesare matrițe rezistente și scumpe, deoarece se produce o uzură intensă, prin eroziune, a utilajelor de injecție. Există și dezavantajul unor consumuri energetice ridicate, pentru că în capul de injecție se produc presiuni mari (de aproximativ 140 MPa).

15. Formarea panourilor cu miez de tip fagure

Panourile de acest fel, mult utilizate în prezent, sunt formate din mai multe straturi suprapuse și solidarizate între ele, alcătuite din materiale diferite. Stratul pincipal este constituit din plăci (dintr-un metal ușor), așezate perpendicular pe planul median al stratului respectiv și îmbinate sub formă de faguri.

Placate de obicei cu fețe metalice, sunt denumite *panouri hibride de tip sandwich* și reprezintă materiale indispensabile pentru multe structuri din tehnica aerospațială și militară. Cum prețul lor poate deveni accesibil, dacă sunt făcute din materiale componente care nu sunt foarte scumpe, ele sunt întâlnite pe scară largă și în construcțiile civile și industriale.

Datorită alcătuirii lor speciale, aceste structuri compozite se remarcă prin densități foarte mici (între 80 și 500kg/m³) în raport cu piatra sau betonul, rezistență excelentă la compresiune stabilizată, precum și capacitate deosebită de izolare termică. Datorită distanțării reciproce (prin intermediul umpluturii) a plăcilor portante, momentul lor de inerție este mult mai mare decât în cazul simplei lor suprapuneri, deci panourile au rigiditate mare la încovoiere.

Dezavantajele principale ale panourilor de acest fel (mai ales dacă sunt comparate cu structurile masive) sunt capacitatea redusă de amortizare a vibrațiilor (inclusiv izolarea acustică nesatisfăcătoare) și riscul relativ mare de flambaj.

Formarea panourilor hibride presupune parcurgerea a două etape:

- așezarea componentelor, debitate la dimensiunile cerute, în ordinea stabilită a structurii de straturi suprapuse;
- termo-formarea propriu-zisă a panoului, pe o presă cu platane calde, la temperaturi de 170÷190°C și la presiuni cuprinse între 2 și 4 MPa.

În cazurile în care placarea panourilor hibride se face cu fețe *nemetalice* (de exemplu cu țesături tot hibride, combinații din fibre de carbon și de sticlă, preimpregnate cu material polimeric), atunci se pot obține structuri de tip sandwich cu densități chiar și mai mici decât cele citate. În această situație nu mai este necesară folosirea unui adeziv pentru solidarizarea straturilor din panouri, întrucât ea este realizată prin intermediul polimerului încorporat în țesăturile pre-impregnate.

B. Procedee de fabricare a compozitelor ceramice

Datorită caracteristicilor deosebite ale acestor materiale (inclusiv a temperaturilor mari la care sunt procesate), la fabricarea lor trebuie avute în vedere măsuri speciale de precauție, pentru îndeplinirea următoarelor obiective:

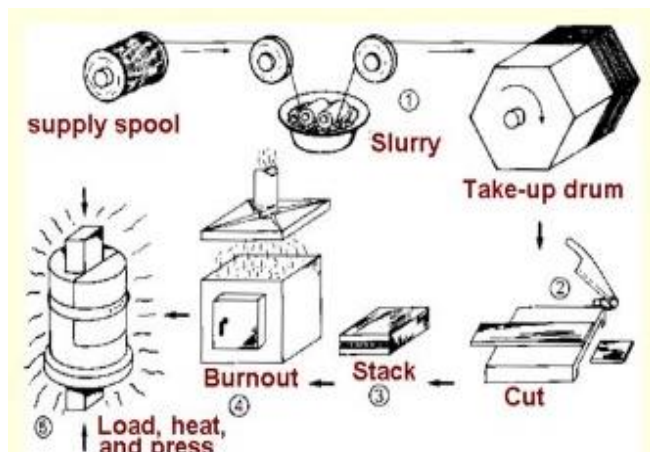
- înglobarea completă și dispersarea uniformă a elementelor complementare în materialul ceramic al matricei;
- evitarea fragmentării, în procesul tehnologic, a elementelor de armare de tip fibre;
- menținerea caracteristicilor mecanice inițiale ale ranforsantului, prin evitarea posibilelor degradări produse de reacțiile de la interfața celor două faze;
- realizarea pieselor cu o configurație cât mai apropiată de cea finală, pentru ca prelucrările ulterioare să fie cât mai puține, având în vedere că materialele ceramice sunt de obicei fragile și au durități mari, astfel încât se prelucrează foarte greu cu mijloacele tehnice obișnuite.

Principalele **metode** prin care se produc compozitele ceramice sunt următoarele:

- ⇒ amestecarea componentelor (ambii constituenți aflându-se sub formă de pulberi), urmată de turnarea în forme și de sinterizare; este dificilă obținerea, pe această cale, a dispunerii uniforme în matrice a elementelor de armare, iar dacă acestea sunt whiskere, integritatea lor este periclitată pe durata amestecării și presării;
- ⇒ producerea unei paste ceramice, în care se înglobează ranforsantul, după care se aplică metode de turnare sub presiune;

FABRICAREA COMPOZITELOR CU MATRICE NEMETALICĂ

⇒ infiltrarea unei barbotine (*slurry*) – așa cum se ilustrează pe schema următoare, conținând materialul matricei, sau depunerea materialului ceramic al matricei din stare de vapori în aranjamentul prealabil (preformă) din elemente de armare (dacă acestea sunt fibre lungi), urmate de compactarea piesei sau semifabricatului, la temperaturi și presiuni ridicate.



Atunci când infiltrarea se aplică pentru producerea unor compozite armate cu fibre lungi, acestea (de obicei fibre de sticlă) trec prin baia de barbotină (pulberi de sticlă – cu granulație de până la 50 de microni, introduse în apă, care uneori conține dizolvată și o rășină, pentru a crește aderența între constituenți); apoi sunt înfășurate pe un suport, ajungând în forma unor benzi, care sunt decupate și

suprapuse în forma semifabricatului dorit. La produsul final se ajunge în urma unor operații de presare, la temperaturi mari, sau chiar de ardere a acelor stratificate.

În principiu, în cazul matricilor ceramice este preferată folosirea materialelor complementare de tip *dispers*, de genul filamentelor mono-cristaline (de pildă de SiC) sau al particulelor (foarte frecvent de grafit sau de TiN). Dacă este necesar să se lucreze cu fibre lungi, acestea sunt dificil de încorporat în matricile de această natură, astfel că de cele mai multe ori au dispunere unidirecțională.

C. Metode de fabricare a compozitelor de tip carbon-carbon

S-a arătat anterior că aceste materiale sunt cu totul speciale, întrucât au atât matricea, cât și elementele de armare constituite din varietăți ale carbonului, iar proprietățile lor sunt excepționale, de exemplu în privința rezistenței la șoc și la uzură abrazivă, mai ales la temperaturi foarte înalte.

Principala metodă pentru fabricarea lor constă în impregnarea succesivă a fibrelor de carbon cu materiale precursoare, precum rășinile sintetice, smoala sau asfaltul; fibrele sunt apoi compactate, după care trec prin operațiile de realizare efectivă a matricei, cu două variante distincte:

- ⇒ **carbonizare** – încălzire preliminară a amestecului compactat, la temperaturi între 700 și 900°C, în atmosferă inertă (pentru eliminarea hidrogenului și substanțelor volatile), plus o încălzire finală la aproximativ 1500°C;
- ⇒ **grafitizare** – cuprinde aceleași etape preliminare, dar cu încălzirea finală a materialului compactat la temperaturi de 2800÷3000°C.

În cursul acestor etape tehnologice se produce *vaporizarea* unei părți din materialul matricei, făcând ca straturile superficiale ale compozitului să apară ca relativ poroase. Apare astfel

STRUCTURI DIN MATERIALE COMPOZITE

necesitatea ca aceste goluri să fie umplute, printr-o nouă impregnare cu material precursor, după care se reia etapa de carbonizare sau de grafitizare, iar repetarea acestor procese duce la obținerea unui compozit tot mai compact.

Este important de subliniat că, în atmosferă *inertă*, compozitele de tip carbon-carbon își mențin proprietățile la valori performante până la temperaturi foarte ridicate (aproximativ 3000°C). În atmosferă obișnuită însă, aceste materiale prezintă marele inconvenient că reacționează foarte ușor cu oxigenul (chiar și la temperaturi de 500°C), cu urmări negative asupra integrității respectivelor elemente constructive.

Pentru asemenea condiții de lucru este necesară acoperirea pieselor cu straturi subțiri din substanțe protectoare, rezistente la oxidare. Materialele de protecție trebuie să aibă aderență bună la compozit, compatibilitate cu acesta din punct de vedere mecanic și chimic (chiar și termic, dacă este posibil), dar și rezistență la temperaturi înalte și tendință scăzută de volatilizare.

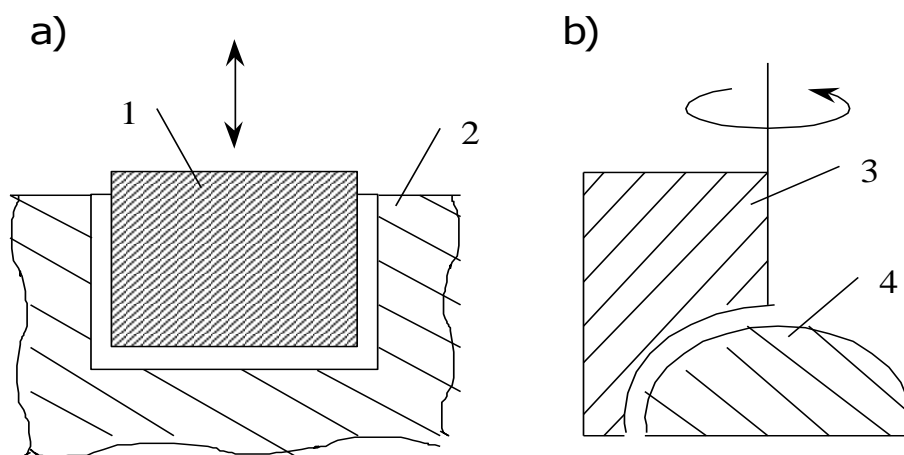
Una dintre soluțiile frecvent întâlnite este folosirea straturilor protectoare dintr-un material ceramic, cum este carbura de siliciu, care îndeplinește toate condițiile de mai sus, fiind în plus și stabilă, în aer, până la aproximativ 1700°C. De cele mai multe ori, acoperirile se realizează prin metoda depunerii din stare de vapori.

ASPECTE PRIVIND DISPOZITIVELE ȘI UTILAJELE AUXILIARE FOLOSITE LA FABRICAREA COMPOZITELOR NEMETALICE

Multe dintre metodele de obținere a compozitelor nemetalice implică folosirea unor elemente constructive și piese auxiliare potrivite, de genul calapoadelor, formelor și matrițelor. Având în vedere frecvența cu care sunt întâlnite în practică, se consideră necesar a fi prezentate câteva particularități ale acestora.

1. Calapoade

Sunt piese auxiliare folosite atunci când este suficient ca doar una dintre suprafețele exterioare sau interioare ale piesei din compozit (cea care vine în contact cu forma) să aibă o calitate controlată.



Fabricarea prin copiere a calapoadelor negative (a), respectiv pozitive (b), din ghips ranforsat.
1 – model etalon; 2 – calapod negativ; 3 – șablon rotativ; 4 – calapod pozitiv.

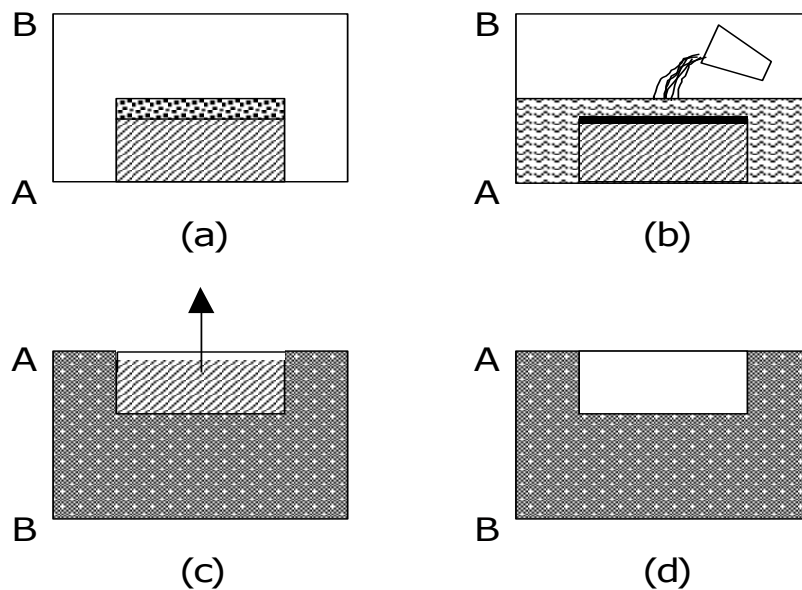
Acestea reprezintă niște forme deschise, care sunt denumite **negative**, dacă materializează suprafața exterioară a piesei, respectiv **pozitive** – pentru suprafețe interioare. Calapoadele pozitive sunt mai pretențioase decât cele negative, necesitând folosirea unor schelete de rezistență din lemn, plasă și/sau pânză, precum și a unor șabloane pentru realizarea contururilor fine care caracterizează suprafețele lor active.

Piese de tip calapod sunt diverse constructiv, putând fi confecționate din următoarele categorii de materiale:

⇒ **Ghips** –recomandabil pentru producția de tip unicat, deoarece materialul este ușor accesibil și ieftin, iar prelucrarea lui necesită un volum redus de manoperă. Principalul defect al calapoadelor din ghips este *porozitatea* mare a materialului, făcând necesar ca suprafețele lor active să se trateze cu 2 sau 3 straturi de lac. Un calapod de acest fel poate fi refolosit, în procese de fabricație ulterioare, dacă nu este distrus la extragerea piesei din formă.

- ⇒ **Lemn** – se folosește pentru serii de producție cuprinse între 50 și 250 de bucăți; este materialul cel mai utilizat, ca esență fiind preferat lemnul de tei, caracterizat prin prelucrabilitate mecanică bună și stabilitate dimensională. Sunt realizate de obicei din scânduri suprapuse, prelucrate mecanic în bloc; după prelucrarea la dimensiunile finale, suprafețele active se lăcuiesc.
- ⇒ **Materiale compozite** –recomandate pentru loturi de producție de până la 500 de bucăți; în cele mai multe cazuri au matrici din *rășini* de tip *epoxidic* sau *poliesteric*, care au capacitate foarte bună de înglobare a ranforsantului și reactivitate chimică mare. Ca elemente de armare se folosesc cel mai mult *pulberi anorganice*, care pot fi din cretă sau din alumina micronizată, dar și microbule de sticlă. Acestea micșorează contracția la întărire a matricii, dar totodată cresc duritatea și rezistența la șoc pentru materialul global.

Este de precizat că, pentru a crește eficiența economică a fabricării calapoadelor din compozit, în mod obișnuit se combină două tipuri de amestecuri de formare. Astfel, se alege o anumită rețetă pentru amestecul din care se va realiza partea de la *suprafață* (cu un conținut de pulberi cuprins între 40 și 45%), care trebuie să permită o capacitate mare de copiere și să determine ca fețele calapodului să aibă duritate mare și rezistență la abraziune. Pentru interiorul calapodului se folosește un alt amestec, *de umplură* (conținând doar 30÷40% pulberi), care conduce la valori foarte mici ale contracției la întărire în “miezul” lui.



Obținerea unui calapod de tip negativ dintr-o rășină epoxidică armată cu pulberi anorganice

Ca regulă generală, calapoadele trebuie să aibă grosimi ale pereților cel puțin duble față de piesele care sunt de executat; din acest motiv, dacă sunt necesare grosimi mai mari de 10mm, atunci se recomandă rigidizarea pereților cu armături din lemn.

Desenele din figura de mai sus prezintă etapele confecționării unui calapod dintr-un material compozit:

FABRICAREA COMPOZITELOR CU MATRICE NEMETALICĂ

- (a) așezarea în formă a modelului etalon, care se tratează cu un agent de decofrare;
- (b) turnarea amestecului format din rășină și particulele de armare;
- (c) solidificarea materialului în formă, urmată de extragerea modelului etalon;
- (d) finisarea (eventuală) a calapodului astfel fabricat.

Pentru piesele de configurații complicate (cum sunt, de exemplu, rotorii de turbină), este recomandabilă folosirea unor **calapoade de tip elastic**; acestea se fac, de pildă, dintr-un cauciuc siliconic (care poate fi vulcanizat la rece), prin metoda copierii după modele etalon; calapoadele de acest fel sunt mai scumpe decât cele clasice, dar au *avantaje* cu totul specifice, precum posibilitatea extragerii piesei prin deformarea elastică a formei; durabilitatea mare (se pretează la sute de utilizări), plus calitatea deosebită a suprafețelor active (și implicit ale piesei care trebuie fabricată).

2. Matrițe metalice

Aceste dispozitive reprezintă o variantă foarte costisitoare de piese auxiliare, dar care este singura recomandabilă pentru seriile mari de fabricație, mai ales pentru cazurile în care se folosesc tehnologii de formare la cald. Avantajele lor principale, mai ales în raport cu formele nemetalice, sunt implicate de proprietățile generale ale materialelor metalice, precum conductivitatea termică, stabilitatea dimensională, la care se adaugă posibilitatea obținerii unor suprafețe active de calitate excepțională.

Matrițele se fabrică din materiale tratabile termic, alese de obicei dintre oțelurile aliate, iar suprafețele lor active sunt protejate prin tratamente chimice sau termo-chimice, așa cum este cromarea dură. În anumite situații este nevoie ca aceste matrițe să fie prevăzute cu niște canale interioare, de forme adaptate fiecărui caz concret, care să ducă la grăbirea proceselor de încălzire sau de răcire implicate de tehnologia de formare.

Instalații auxiliare - Autoclave

Una dintre cele mai importante etape, în cadrul proceselor tehnologice prin care sunt fabricate compozitele cu matrici polimerice, este reprezentată de faza de polimerizare (reticulare) a materialului matriței, adică faza în care materialul compozit care este procesat ajunge la structura solidă și aproape la dimensiunile finale, care au fost avute în vedere la proiectarea structurii respective.

Se poate cu ușurință imagina că această fază implică, în cele mai multe cazuri, anumite dificultăți, întrucât reticularea se produce la valori relativ mari de temperatură și (în principiu) de presiune, condiții de mediu la care trebuie să fie expus obiectul care este fabricat, în întregul lui; se înțelege că piesele de gabarite mari, așa cum sunt în mod frecvent



STRUCTURI DIN MATERIALE COMPOZITE

cele fabricate prin înfășurare filamentară, sau componentele din construcția diverselor aparate de zbor pun probleme dificile de plasare a produsului într-o anumită incintă, după depunerea materialelor constitutive, pentru realizarea polimerizării matricei.



În astfel de situații se folosesc niște incinte speciale, denumite (folosind un cuvânt preluat ca atare din limba engleză) **autoclave**, care pot fi de dimensiuni relativ mici (potrivite pentru laboratoarele de cercetare, unde este nevoie mai ales de realizarea unor modele și prototipuri), ca în imaginile alăturate, sau pot avea proporții uriașe, așa cum se arată în fotografia aflată la începutul acestui paragraf.

Desigur că folosirea acestor utilaje poate fi relativ costisitoare, mai ales din punct de vedere al consumurilor energetice, dar există multe situații practice în care utilizarea lor este fundamentală, așa cum este mai ales cazul pieselor (de dimensiuni mari) care trebuie să atingă în funcționare performanțe înalte, de exemplu valori *specifice* (adică raportate la densitatea compozitului fabricat) ridicate ale rezistenței mecanice, sau ale rigidității. Astfel de piese și structuri sunt foarte frecvent proiectate și realizate în industria aeronautică, dar și în cea constructoare de autovehicule.