

Franjo Kovačiček, Irena Žmak

METALNI KOMPOZITI¹

1. UVOD

Kompozit je oblikovan proizvod načinjen od kompozitnog materijala, npr. lijevanjem, laminiranjem ili istiskivanjem.

Kompozitni materijal je čvrsti materijal koji se sastoji od kombinacije dvaju ili više jednostavnih (monolitnih) materijala i u kojem pojedine komponente zadržavaju svoj zaseban identitet. Kompozitni materijal ima svojstva različita od svojstava njegovih komponenata, jednostavnih materijala. Uporaba pojma kompozit često pretpostavlja da su unaprijeđena fizikalna svojstva, jer je glavni tehnologijski interes dobivanje materijala sa superiornim fizikalnim (obično mehaničkim) svojstvima u odnosu na svojstva komponenata. Kompozitni materijal ima također i heterogenu strukturu sastavljenu od dviju ili više faza koje dolaze od njegovih komponenata. Sve faze mogu biti neprekinute (kontinuirane), ili jedna ili više njih mogu biti disperzirane u neprekinutoj matrici. U posljednjem slučaju potrebno je utvrditi neku donju granicu za veličinu čestica disperzirane faze ispod koje se smatra da je materijal monolitan. Obično se uzima veličina reda 10^{-8} m, jer je to približno donja granica veličine u proizvodnji čestica. Nadalje, područje od 10^{-9} - 10^{-8} m obično se uzima kao razdjelnica između pravih otopina i koloidnih disperzija. Različite vrste kompozita su ubrojene u tehnologiju polimernih materijala. Oni mogu biti sastavljeni od kombinacije polimer-polimer (polimerne mješavine) ili kombinacije polimer-plin (ekspandirani, ćelijasti ili pjenasti polimeri), ali najčešće su dvije vrste kombinacija polimer-kruto punilo, a to su kompoziti polimer-vlakno i polimer-čestice. Ovim dvjema zadnjim vrstama želi se postići poboljšanje jednog ili više mehaničkih svojstava, tj. očvršćenje, dok

¹ Dio teksta objavljen je u članku I. Žmak, F. Kovačiček: "Proizvodni postupci za izradu metalnih kompozita" Zbornik radova savjetovanja MATRIB2004, Vela Luka, lipanj 2004., s. 349-356.

jeftina punila uglavnom služe za popunjenje volumena. Za puni opis kompozitnog materijala treba poznavati ne samo sastav faza već i geometriju (oblik čestica, veličinu, raspodjelu i orijentaciju čestica) i koncentraciju svake disperzirane faze. Koncentracija se često iskazuje kao volumni udio pojedine faze. Osim toga mogu se javiti područja s međupovršinom čija priroda može značajno utjecati na svojstva materijala, posebno pri uporabi vezujućih sredstava [1].

Zbog kratkoće će se u ovom tekstu i kompozitne materijale nazivati **kompoziti**, što je u najvećem broju slučajeva i uobičajeno.

Od tri osnovne grupe kompozita s obzirom na matricu (kompoziti s polimernom, keramičkom i metalnom matricom), biti će govora samo o **kompozitima s metalnom matricom (MMC – Metal Matrix Composites)**.

Kompoziti s metalnom matricom predmet su interesa, zato što su sposobni osigurati više uporabne temperaturne granice od njihovih osnovnih metala i mogu se oblikovati tako da se dobije povećana čvrstoća, krutost, toplinska vodljivost, abrazijska otpornost, otpornost puzanju i dimenzijska stabilnost. U MMC-u kontinuirana ili matricna faza je općenito legura, rjeđe čisti metal, a ojačalo se sastoji od visokovrijednih ugljičnih, metalnih ili keramičkih dodataka. Tijekom proizvodnje kompozita miješaju se zajedno matrica i ojačalo. Nasuprot polimernim kompozitima oni su nezapaljivi, ne otplinjavaju u vakuumu i minimalno su osjetljivi na organske tekućine kao što su goriva i otapala.

Ojačala, kontinuirana ili diskontinuirana, mogu činiti 10 do 60 vol.% kompozita. Kontinuirano vlakno ili vlaknasta ojačala uključuju ugljik (C), silicijev karbid (SiC), bor, aluminijev oksid (Al_2O_3) i metale visokog tališta. Diskontinuirana ojačala sastoje se uglavnom od SiC u obliku viskera (w), čestica (p) SiC, Al_2O_3 ili titanova diborida (TiB_2) i kratkih ili nasjeckanih vlakana Al_2O_3 ili ugljika [2].

Najistaknutije karakteristike metalnih matrica vidljive su u različitim oblicima, posebice u tome što metalna matrica daje metalnu prirodu kompozitu u smislu toplinske i električne vodljivosti, proizvodnih procesa i interakcije s okolišem. Dominirajuća mehanička svojstva matrice, kao modul elastičnosti i čvrstoće u poprečnom smjeru kompozita s usmjerenim ojačalima, dovoljno su visoka u nekih MMC-a da je moguće jednosmjerno slaganje u nekim inženjerskim konstrukcijama.

2. POSTUPCI PROIZVODNJE

Procesi proizvodnje MMC-a dijele se u primarne i sekundarne grupe. Primarni proces je postupak kojim se sintetiziraju kompoziti od osnovnih materijala, matrice i ojačala. Pritom je uključena ugradnja ojačala u matricu u odgovarajućoj količini i na odgovarajuća mjesta i razvoj prikladnih veza

između konstituenata. Sekundarni proces se sastoji od svih dodatnih stupnjeva potrebnih za preradu primarnog kompozita u konačni dio. U nekim slučajevima oba stupnja odvijaju se istodobno, ovisno o željenom konačnom proizvodu i postupcima proizvodnje korištenim u procesu.

Izbor postupka za proizvodnju kompozitnog materijala ovisi o mehaničkim i kemijskim svojstvima ojačala i matrice; dužini i veličini vlakana, slaganju vlakana i željenom razmještaju vlakana; veličini, obliku i raspodjeli čestica. Nadalje, potrebno je poznavanje termodinamike i kinetike mogućih reakcija matrica-ojačalo i radne temperature kojoj će kompoziti biti podvrgnuti.

Mnoga ojačala i materijali matrice nisu kompatibilni u smislu prijanjanja i takvi se materijali ne mogu preraditi u kompozite bez prilagodbe svojstava međupovršine među njima. U nekih kompozita povezanost ojačala i metala je slaba i mora se pojačati. Kod kompozita proizvedenih od reaktivnih konstituenata treba izbjeći prekomjernu aktivnost na međugranici, koja može oslabiti svojstva materijala. Taj problem obično se rješava ili površinskom obradom ili prevlakom ojačala ili prilagodbom sastava legure matrice.

Postupci u čvrstom stanju (*Solid State Processing*) Ovi se postupci odvijaju kod niže temperature s mogućnošću bolje kontrole termodinamike i kinetike graničnih površina. Dvije glavne grupe postupaka u čvrstom stanju su difuzijsko spajanje materijala u obliku tankih slojeva i sinteriranje. Procesi nanošenja matrice, u kojima se materijal matrice nanosi na vlakno, uključuju elektrokemijsko prevlačenje, plazmatsko naštrcavanje i fizikalno nanošenje iz parne faze. Nakon procesa nanošenja, često je potreban sljedeći korak sjedinjavanja, kao npr. difuzijsko spajanje. *Difuzijsko spajanje* odvija se na povišenoj temperaturi i visokom tlaku. Međutim, stupanj difuzije mora biti ograničen ili će na međupovršini doći do porasta neželjenih krhkih faza. Jedan od načina ograničavanja vremena difuzije je istiskivanje sloja vlakana i matrice kroz alat. Toplo valjanje može se također primijeniti, ali u tom slučaju deformacija se mora ograničiti da se smanji pomak vlakana ojačala i izbjegne oštećenje. Povišene temperature se koriste da se olakša tečenje matrice, ali se mora izbjeći prekomjerno zagrijavanje koje bi moglo potaknuti kemijski napad na vlakna. Nedostatak ovih postupaka je što zahtijevaju vrlo čiste površine prije pokušaja spajanja. To obično traži prethodno čišćenje sastavnih materijala i postupak u vakuumu. Ovim postupkom se sjedinjuju B/Al i Borsic/Al kompoziti [2, 3, 4].

Visokotemperaturna sinteza (*Self-Propagating Synthesis – SHS*) toplim prešanjem (Hot Pressing, HP) je proces kojim se mogu proizvoditi kompoziti s malom poroznošću i trodimenzionalne strukture između intermetalnih spojeva i metalnih matrica s konkurentnom cijenom i jednostavnošću. Na taj se način mogu proizvesti npr. metalni kompoziti Al_3Ti/Al . Kao polazna sirovina koriste se prah aluminijski i titanova oksida (TiO_2). Nazočnost

aluminija u tekućoj fazi je najbolji način za popunjavanje pora. U toj reakciji višak Al služi za kontrolu poroznosti kompozita i olakšanje procesa sinteze. Dio metala se potroši u reakciji za stvaranje intermetalnog spoja, a ostatak, koji je tekuć, popunjava pore u matrici za vrijeme sinteriranja i povećava gustoću kompozita. Istovremena uporaba tlaka i reakcije sinteze omogućuje smanjenje poroznosti proizvedenog materijala reakcijama sinteze i kontrolu geometrije pora kao i ravnomjernu raspodjelu čestica $AlTi_3$ u metalnoj matrici [5, 7].

Metalurgijom praha (Powder Metallurgy – PM) se ostvaruje povezivanje praha s česticama, pločicama ili viskerima ojačala nizom koraka. Dva ili više odijeljena praha se miješaju, katkada uz pomoć veziva. Keramičke čestice koje trebaju osigurati visoku čvrstoću kompozita su reda veličine 5 μm u promjeru, dok je veličina praha legure matrice (aluminij ili magnezij) od 20 do 40 μm u promjeru. Razlika u veličini čestica praha omogućuje stvaranje neprekinute mreže malih keramičkih čestica oko većih zrna matrice. Tako nastaju mikrostrukturno nehomogena područja. Nadalje, stvaranjem mreže nastala poroznost mora se popuniti rastaljenom legurom matrice tijekom sjedinjenja (toplo prešanje). Ako se polazni prah lako oksidira, vrlo fini submikronski oksidi mogu se koncentrirati na granicama zrna značajno smanjujući lomnu žilavost izvornog materijala.

Dijelovi postupka uključuju:

- prosijavanje brzo skrućenih čestica,
- spajanje čestica s fazom ili fazama za ojačavanje sa ili bez veziva,
- zguščivanje smjese ojačala i matrice na oko 75 % gustoće,
- otplinjavanje i završno sjedinjenje istiskivanjem, kovanjem, valjanjem ili nekom drugom toplom obradom.

MMC-i proizvedeni PM tehnologijom obilježeni su visokom cijenom i značajnim svojstvima kao što su čvrstoća i krutost [4].

Postupci u tekućem stanju (*Liquid Processing*)

Za što bolje povezivanje matrice i *vlakana* poželjno je da taljevina iz matrice teče u međuprostore nerazvrstanog vlakna da bi se osiguralo potpuno pokrivanje vlakna. Za takav postupak koriste se duboke kupke koje značajno olakšavaju proizvodnju, a koje se upotrebljavaju u industriji za pripremu predoblika. Različitost između potrebe ovlaživanja vlakana i izbjegavanja prevelike kemijske reakcije između vlakana i matrice uvjetuje predobradu istih, i to prevlačenjem kao npr. sa spojem titanovog diborida u slučaju aluminijevih MMC-a. Vlakna s prevlakom provlače se zatim kroz kupku rastaljenog aluminija u kontinuiranom postupku. Prodiranje rastaljenog aluminija između vlakana osigurava razdvajanje vlakana jednako dobro kao i veznu međupovršinu između vlakana i matrice. Prevlaka na vlaknu, kao što je titanov diborid, pomaže ovlaživanje i zaštitu vlakana od kemijske reakcije pri povišenim temperaturama.

Aluminijevi kompoziti u velikoj mjeri proizvode se s česticama kao ojačalom. Istražuju se i već primjenjuju različiti postupci.

Lijevanje u kalup najčešći je od svih ljevačkih postupaka za proizvodnju velike količine dijelova uz najnižu cijenu. Pritom se koriste različiti načini pripreve taljevine i tehnike lijevanja [19].

Lijevanje miješanjem (Stir Casting) slično je klasičnom postupku kod aluminijskih legura, ali uz blago miješanje taljevine radi osiguranja ravnomjerne raspodjele npr. SiC čestica. Stalna kontrola temperature taljevine potrebna je radi izbjegavanja pregrijanja i naknadnog stvaranja karbida.

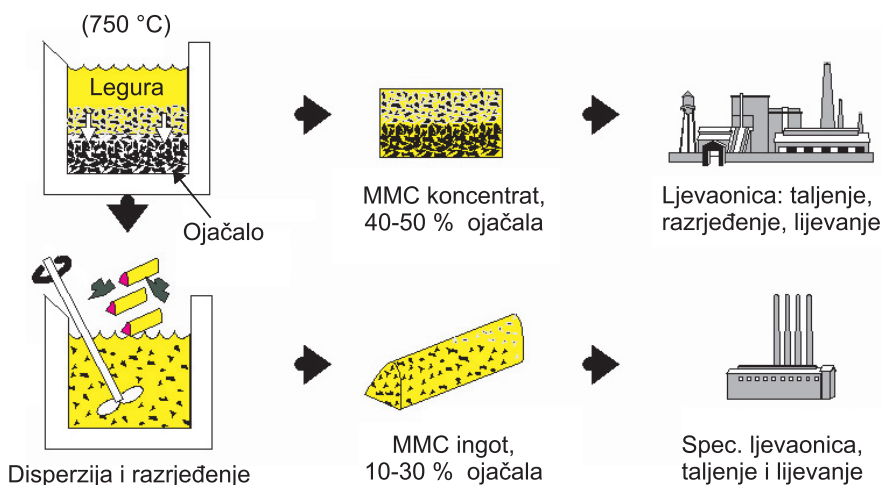
Lijevanje tiskanjem (Squeeze Casting) uključuje ulaganje poroznog keramičkog predoblika u predgrijani kalup, koji će se kasnije ispuniti tekućim metalom. Pomoću tlaka rastaljeni metal ulazi u keramički predoblik i nastaje čvrst kompozit. Postupak smanjuje utrošak materijala i energije, proizvodeći dijelove na konačnu mjeru i nudi sposobnost selektivnog ojačavanja.

Lijevanje u poluskrućenom stanju (Compocasting, Rheocasting) je postupak sličan lijevanju miješanjem, s razlikom što se čestice dodatka miješaju u metal koji je u poluskrućenom stanju. Poluskrućeni metal mora se snažno miješati, a ne blago kao kod lijevanja miješanjem [20].

Bestlačna infiltracija metala (Pressureless Metal Infiltration) je postupak, vlasništvo AM LANXIDE-a, poznat pod različitim zaštićenim imenima. Prvim razvijenim postupkom kompoziti se proizvode infiltracijom sloja čestica Al_2O_3 rastaljenim metalom koji je izložen oksidacijskoj atmosferi. Materijal matrice nastalog kompozita je sastavljen od smjese produkata oksidacijske reakcije i neizreagirane aluminijske legure (LANXIDE™). Ovaj postupak omogućuje dobivanje gotovih oblika i svojstava kompozita koja mogu zadovoljiti primjerene specifične namjene. Novijim postupkom PRIMEX CONCENTRATE™ proizvodi se materijal koji se kasnije može pretaljavati i koristiti u ljevaonicama za proizvodnju dijelova od aluminijeva MMC-a. Postupak uključuje bestlačnu infiltraciju aluminijske matrice u masu keramičkih čestica za ojačanje, slika 1. Ta infiltracija je praćena *in situ* stvaranjem jedinstvene površinske prevlake na česticama ojačala. Prevlaka omogućuje potpuno vlaženje čestica i povoljne značajke za tečenje taljevine, važna obilježja za daljnju ljevaoničku uporabu. Izostanak ovlaživanja može inače uzrokovati podebljanje i nestabilnost u taljevini koja sadrži čestice bez prevlake. Kod taljevina s PRIMEX CONCENTRATE™ materijalom stabilna viskoznost ostaje i tjednima kod normalne temperature lijevanja. Na stabilnost ne utječu neočekivani toplinski ispadi koji se mogu dogoditi tijekom uporabe. Recikliranje uljevnog sustava i pojila u taljevinu, ako je vješto obavljeno, nema štetan utjecaj na dinamičku izdržljivost i kvalitetu proizvoda. Tipičan udio ojačala u koncentratu je 40-50 % po volumenu, a ostatak je aluminijska legura matrice. Koncentrat je pripremljen za masovnu

ljevaoničku uporabu. Ljevaonice koje koriste ovakav koncentrat mogu ga same razrijediti jeftinijim aluminijem. Razrijeđen kompozit pripremljen za lijevanje obično sadrži 10-30 % keramičkih čestica po volumenu, ovisno o zahtijevanim svojstvima i primijenjenom postupku lijevanja. Tako dobivena taljevina je jednolika i stabilna. Objema tehnologijama ojačala, legura matrice i mikrostruktura kompozita se mogu varirati i potpuno kontrolirati, što omogućuje pripremu dijelova za određenu primjenu. Mogu se ekonomično proizvoditi dijelovi završnog ili gotovo završnog oblika, svih veličina i složenih oblika. Npr. vrlo kvalitetni kočioni diskovi za automobile proizvode se sa do 75 % recikliranog materijala dobivenog ovim postupkom [6, 7].

Ove tehnologije zajedno s tehnologijama za proizvodnju dijelova od kompozita s keramičkom matricom su zaštićene nizom patenata. U svijetu postoji više od 2 700 patenata s tog područja.



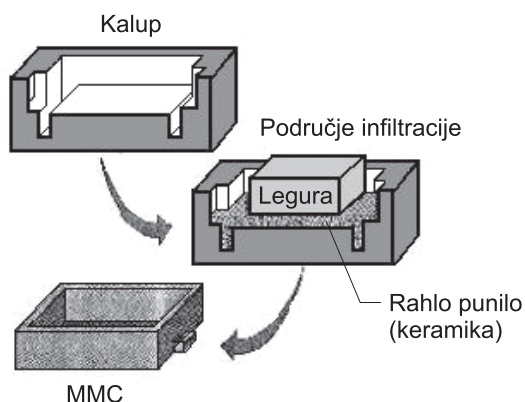
Slika 1. Shema proizvodnje MMC-a PRIMEX bestlačnom infiltracijom [6]

Značajna primjena postupka bestlačne infiltracije metala je u proizvodnji dijelova za pakiranje, podloge i pomoćne strukture za elektroničke komponente od SiC_p/Al kompozita (slika 2). Pritom su tipični zahtjevi: mali koeficijent toplinskog rastezanja (α) da bi se smanjila mehanička naprezanja usmjerena na elektronički uređaj tijekom sklapanja ili rada, visoka toplinska vodljivost radi smanjenja iskrivljenja i mala gustoća za minimalnu težinu. U usporedbi s klasičnim aluminijevim legurama, kompoziti imaju, zbog oblika i udjela čestica SiC , znatno smanjen α i veći modul elastičnosti, s malo ili bez utjecaja na toplinsku vodljivost i gustoću. Zbog mogućnosti projektiranja fizikalnih i toplinskih svojstava, postupak bestlačne infiltracije metala pruža i više drugih prednosti u smanjenju cijene i/ili povećanju pouzdanosti u odnosu na klasične metode izrade elektroničkih komponenti:

- sposobnost izrade složenih dijelova na završni ili gotovo završni oblik,
- oblikovanje rubova kućišta za zatvaranje laserskim snopom ili otpornim zavarivanjem,
- kompatibilnost sa prevlakama zlata, kositra ili nikla i
- mogućnost *in situ* povezivanja električnih kanala, čime se izbjegavaju pogreške zbog lemljenih spojeva [8].

Specifična krutost (modul elastičnosti podijeljen s gustoćom) SiC_p/Al -kompozita može biti više od 3,2 puta veća od one neočvrnutog čelika, aluminijevih legura i titanovih legura. Ta svojstva, povezana s kontroliranom toplinskom vodljivošću i malim α , čine MMC-e atraktivnim za komponente koje zahtijevaju izvanrednu krutost i dimenzijsku stabilnost, kao što su prostorne strukture, automobilske kočnice i komponente optičkih sustava.

Aluminijevi metalni kompoziti ojačani krupnijim česticama SiC pokazuju izvanrednu otpornost na eroziju suspenzijama, a oni s česticama Al_2O_3 su potencijalni materijal za primjenu u proizvodima gdje se traži veća čvrstoća i žilavost. Kompoziti $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ su krući i čvršći od neočvrstute izvorne legure i zadržavaju dobru lomnu žilavost unatoč manjoj duktilnosti.



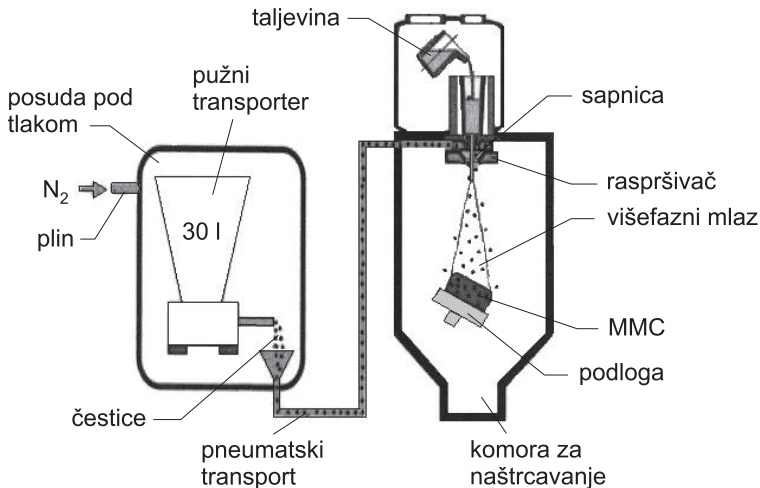
Slika 2. Shema proizvodnje elektroničkog elementa bestlačnom infiltracijom [8]

Nanošenje naštrecavanjem (Spray Deposition) uključuje atomizaciju taljevine (stvaranje zasebnih kapljica), naštrecavanje kapljica rastaljenog metala kroz sapnice i skupljanje i zgušnjavanje poluskrućenih kapljica na podlozi. U postupku naštrecavanja metalna legura se tali indukcijskim grijanjem i izlijeva u zagrijanu posudu. Taljevina teče kroz izlaz na dnu prema plinskom raspršivaču. Plinski mlaz velike brzine rastavlja metal u sitne kapljice koje se snažno ubrzavaju prema podlozi. Na podlozi kapljice se zgušnjavaju i stvaraju talog formirajući tako izravno približno konačne oblike, za razliku od postupka metalurgije praša gdje se postupak odvija u međustupnjevima. Brzina skrućivanja nije tako velika kao kod brzog skrući-

vanja i ima dvije prednosti: izravna proizvodnja prethodnih oblika i izravno uključivanje ojačala u pripadnu matricu. MMC ingoti se lijevaju uvođenjem čestica za očvršćenje (ugljik, Al_2O_3 , SiC) u metalni mlaz. Potrebna je pažljiva kontrola uvjeta doziranja da bi se osigurala ravnomjerna raspodjela čestica.

Na slici 3. shematski je prikazan uređaj za naštrcavanje [9].

Miješanje i zgušnjavanje dviju komponenata ovim načinom naziva se oblikovanje naštrcavanjem kompozita s metalnom matricom. Materijal ima metalnu matricu u kojoj su disperzirane druge komponente u obliku čestica. Kvaliteta materijala se može prilagoditi potrebama primjene, kao npr. od krhkog do žilavog, vrstom, udjelom, oblikom i raspodjelom čestica ojačala. Glavna namjena proizvodnje MMC-a je poboljšanje otpornosti na trošenje, osobito abrazijsko, otpornosti na povišene temperature i poboljšanje modula elastičnosti, posebno aluminijevih i bakrenih legura, a u posljednje vrijeme i superlegura. Jedan od takvih komercijalnih postupaka je Ospery postupak.



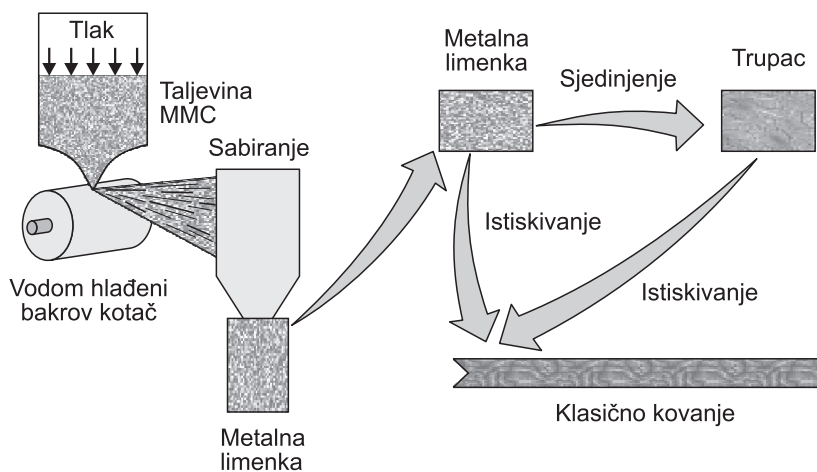
Slika 3. Shema postupka naštrcavanja [9]

Brzo skrućivanje (Rapid-Solidification Processing – RSP) Na veličinu zrna kompozita dobivenih ingot tehnologijom može utjecati udaljenost između čestica, ako je porast zrna sputavan sudaranjem čestica. Kod metala osjetljivih na porast zrna kao što je magnezij, konačna veličina zrna katkada je prevelika, što pogoršava mehanička svojstva. Zbog toga se pri razvoju niza inženjerskih legura koristio postupak brzog skrućivanja za postizanje mikrostrukture koja poboljšava visokotemperaturna svojstva kao npr. čvrstoću i otpornost na koroziju. Mikrostruktura ovih legura ističe se ujednačenijim sastavom, usitnjenim mikrokonstituentima, visokim stupnjem prezasićenosti i zadržanim metastabilnim fazama. Snažno usitnjenje lijevane dendritne strukture postignuto je povećanjem brzine hlađenja ili brzine rasta

dendrita tijekom skrućivanja. Povećana ujednačenost sastava postignuta je kraćim difuzijskim putem između područja mikrosegregacija. Nadalje, precipitati nastali u tim područjima teže smanjenju veličine i jednoličnijoj raspodjeli.

Primjena postupka brzog skrućivanja kod proizvodnje metalnih kompozita s keramičkim ojačalima dopušta uporabu visokočvrstih, visokotemperaturnih legura kao materijala matrice. To omogućuje optimiranje svojstava matrice faze i uporabu velikih čestica ojačala za povećanje lomne žilavosti bez gubitka na čvrstoći.

Tri su načina korištenja brzog skrućivanja u proizvodnji kompozita: atomizacija, dobivanje traka (melt-spun ribbon) i listića (meltspun flake).



Slika 4. Postupak brzog skrućivanja (RSP) [10]

Ovaj posljednji način je najperspektivniji jer dovoljno velika brzina skrućivanja omogućuje dobivanje listića debljine oko 40 do 60 μm . Listići dobiveni ovim načinom široki su i dugački 6 do 8 mm i imaju mali omjer površina/volumen. Listići se mogu direktno sjediniti u kompozitni proizvod bez daljnje promjene veličine. Trake, nasuprot tom, zahtijevaju daljnju obradu radi smanjenja njihove veličine, što može dovesti do onečišćenja i oksidacije. Pri atomizaciji velika brzina skrućivanja se može postići ako su atomizirane čestice vrlo male. Nažalost, velika površina malih čestica rezultira velikim udjelom površinskih oksida, koji su štetni za duktilnost i lomnu žilavost sjedinjenog materijala.

Potencijalna prednost proizvodnje listića je smanjenje cijene u odnosu na uobičajeni postupak metalurgije praha, PM. Npr. potrebno miješanje prahova kod PM postupka izostaje pri proizvodnji listića i za završno stapanje mogu se koristiti uobičajeni postupci oblikovanja metala kao što je istiskivanje.

Nadalje, izostaje za PM postupak potrebno dulje vrijeme i zahtjevna oprema kao što je oprema za toplo prešanje u vakuumu. Dobivanje visokokvalitetnog metalnog praha postupkom atomizacije zamijenjeno je predlegiranim MMC materijalom uz znatnu uštedu u cijeni polaznog materijala.

Dva su kritična parametra postupka za dobivanje listića: brzina kola za gašenje i količina rastaljenog metala koji pada na kolo. Brzina kola, određena prijanjanjem rastaljenog metala na bakreno kolo, utječe na brzinu skrućivanja. Ako se kolo okreće prebrzo, rastaljeni metal neće dovoljno dugo biti u dodiru s kolom da se dobiju listići. Ako je okretanje presporo, listići će biti neprihvatljivo debeli.

Količina materijala koja udara u kolo je određena promjerom otvora i tlakom primijenjenim na posudu unutar komore za taljenje. Optimalni tlak je onaj koji osigurava ravnomjernu struju metala na kolo. Npr. za SiC/Mg-kompozitnu taljevinu optimalan je tlak otprilike 27 kPa uz uporabu promjera otvora od 1,3 mm. Uz te parametre keramičke čestice SiC su ravnomjerno raspoređene unutar gašenih listića [10].

Fizikalno prevlačenje iz parne faze (*Physical Vapour Deposition – PVD*) obuhvaća niz postupaka uključujući isparavanje elektronskim snopom. Magnetron taloženje i elektro-prevlačenje su postupci kojima se proizvode kompoziti uzastopnim nanošenjem slojeva matrice na vlakna ojačala. PVD tehnike zahtijevaju puno manje zagrijavanja vlakna od infiltracije rastaljenim metalom. Temperature površine su obično ispod 200 °C. Ta se tehnika uvelike koristi za proizvodnju C/Al-kompozita [4].

3. PODJELA KOMPOZITA S METALNOM MATRICOM

3.1 KOMPOZITI S ALUMINIJSKOM MATRICOM

Najveći dio istraživanja i razvoja MMC-a usmjeren je na aluminij kao metal matrice. Aluminij je najatraktivniji neželjezni metal matrice, posebno za uporabu u zrakoplovnoj industriji, gdje je težina strukturnih komponenta bitan čimbenik. Značajna su toplinska svojstva aluminijevih kompozita, s vodljivošću poput metala i s koeficijentom toplinskog rastezanja koji se može sniziti gotovo do nule. Talište aluminija je dovoljno visoko da zadovolji mnoge zahtjeve u primjeni, a dovoljno nisko da proizvodnju kompozita učini prihvatljivom. Razvijeno je više vrsta MMC-a na osnovi aluminija za primjenu u zrakoplovstvu. Glavni razlog dodavanja ojačala aluminiju i aluminijevim legurama je radi povećanja čvrstoće, krutosti ili otpornosti na umor, ali obično se to postiže uz cijenu sniženja drugih svojstava kao što je istezljivost.

Aluminij može prihvatiti raznolika ojačala, kao npr. neprekinuta vlakna (npr. ugljična) i raznolike čestice, kratka vlakna i viskere. Ova posljednja tri

su obično anorganski materijali (keramika) kao što su aluminijev oksid, silicijev karbid ili silicijev nitrid.

Silicijev karbid kao ojačalo u aluminijevim kompozitima prvenstveno se bira zbog izvrsne kombinacije njegovih fizikalnih svojstava, raspoloživosti i cijene.

Bor/aluminij je tehnološki razvijen kompozit s neprekinutim vlaknima. Ova vrsta kompozita sjedinjuje izvanrednu čvrstoću, krutost i nisku gustoću bornih vlakana s proizvodnom i inženjerskom pouzdanošću aluminijevih legura.

Ukupni porast specifične krutosti (omjer modula elastičnosti i gustoće) bornih vlakana je gotovo šest puta veći u odnosu prema bilo kojem standardnom inženjerskom materijalu, uključujući čelik, aluminij, molibden i magnezij. To je prednost u sprječavanju mikrosavijanja vlakana u matrici pod tlačnim opterećenjem. Druga važna fizikalna i mehanička svojstva B/Al-kompozita su visoka električna i toplinska vodljivost, duktilnost i žilavost, negorljivost, kao i mogućnost prevlačenja, oblikovanja, spajanja i toplinske obrade.

Primjena ovih kompozita uključuje cijevne vezne dijelove strukture srednjeg trupa svemirskog broda i hladne ploče u višeslojnim nosačima elektroničkih mikročipova. Proizvodni postupci B/Al-kompozita temelje se na metodama difuzijskog spajanja vrućim prešanjem ili plazmatskim naštrcavanjem [11, 12].

Silicijev karbid/aluminij (SiC_f/Al)-kompoziti imaju povećanu čvrstoću i krutost, veću otpornost na trošenje i bolju temperaturnu stabilnost u usporedbi s neočvrstnutim aluminijem, a bez posljedica na težinu. Nadalje, imaju manji koeficijent toplinskog rastezanja čija se vrijednost može kontrolirati promjenom udjela SiC. U usporedbi s osnovnim metalom, kompozit zadržava vlačnu čvrstoću, koju ima na sobnoj temperaturi, na temperaturama do 260 °C.

Ugljik/aluminij: razvoj ovih kompozita bio je potaknut šezdesetih godina prošlog stoljeća iz komercijalnih pobuda zbog čvrstih i krutih ugljičnih vlakana. Ugljična vlakna posjeduju niz svojstava uključujući modul elastičnosti do 966 GPa i negativni koeficijent toplinskog rastezanja od $-1,62 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Međutim, ugljik i aluminij su nepodobni metali za proizvodnju kompozita. Štetne reakcije između ugljika i aluminija, loše kvašenje ugljika rastaljenim aluminijem i oksidacija ugljika, su značajne tehničke zapreke za proizvodnju ovih kompozita.

Komercijalni ugljik/aluminij MMC-i se općenito proizvode trima glavnim postupcima: infiltracijom tekućim metalom kućine vlakana, nanošenjem matrice u parnom stanju u vakuumu na razastrta vlakna i vrućim spajanjem pod tlakom sendviča razastrtih vlakana između aluminijevih limova. S tako pripremljenim i metalom prekrivenim vlaknima potrebni su sekundarni postupci, kao difuzijsko spajanje ili pultruzija, za

dobivanje konstrukcijskih elemenata. Ove kompozite moguće je proizvoditi i lijevanjem tlačenjem.

Precizni dijelovi za zrakoplovstvo s točno određenim dozvoljenim odstupanjem dimenzija zahtijevaju krute, lagane materijale s malim toplinskim iskrivljenjem. Jednosmjerna P100 C/6061 Al pultrudirana cijev ima modul elastičnosti u smjeru vlakana značajno veći od čelika, i ima gustoću otprilike trećine gustoće čelika. Teorijski C/Al-laminati, složeni pod određenim kutovima, mogu se zasnovati, s ciljem da se postigne koeficijent toplinskog rastezanja (KTR) upravo nula, prikladnim redoslijedom slaganja i udjelom vlakana. U praksi, može se postići vrijednost KTR blizu nuli, ali deformacijsko ponašanje je složeno zbog histereze koja se pripisuje plastičnoj deformaciji u matrici tijekom toplinskog djelovanja [2, 4].

Aluminijev oksid/aluminij-kompoziti mogu se proizvoditi različitim postupcima, ali tipični su postupci u tekućem ili u poluskrućenom stanju. Neka od keramičkih oksidnih vlakana nisu skupa i omogućuju svojstva bolja od svojstava neojačanih aluminijskih legura. Npr. kompozit ima povećanu otpornost na trošenje i na deformacije zbog toplinskog umora, kao i smanjeni koeficijent toplinskog rastezanja. Dugačko vlakno Al_2O_3/Al proizvodi se slaganjem Al_2O_3 -traka s usmjerenom orijentacijom stvarajući tako predoblik koji se stavlja u kalup i natapa rastaljenim aluminijem uz pomoć vakuuma. Veza ojačalo-matrica postiže se malim dodatkom litija u rastaljeni metal [2, 13].

Diskontinuirani silicijev karbid/aluminij (SiC_d/Al)-kompoziti uključuju materijale s SiC-česticama, viskerima, nodulama, listićima, pločicama ili kratkim vlaknima u aluminijskoj matrici. Dostupni su u velikim količinama na tržištu po povoljnim cijenama za razliku od većine ostalih kompozita s metalnom matricom. Više poduzeća razvija tehnologiju dobivanja SiC_d/Al -kompozita metalurgijom praha s česticama ili viskerima kao ojačalima. Tehnologija lijevanja razvijena je za ovu vrstu MMC-a i lijevanjem proizvedeni ingoti mogu se pripremiti u bilo kojem potrebnom obliku – istisnute šipke, ingoti ili valjani pripremljeni – za daljnju preradu.

Neka od važnijih svojstava čestičnih SiC_d/Al -kompozita su:

- koeficijent toplinske rastezljivosti povezanih komponenata može se predvidjeti prilagodbom udjela ojačala;
- kompozit ima visoku dimenzijsku stabilnost ili otpornost na deformaciju pod opterećenjem poznatim kao puzanje. Što su sitnije čestice ojačala, to je veća čvrstoća i otpornost na puzanje.

Čvrstoća i granica razvlačenja SiC_d/Al -kompozita su do 60 % veće od onih neočvrstnute aluminijske matrice. Istraživanja mehaničkih svojstava SiC_d/Al s 20 % viskera ili 25 % čestičnog ojačala pri povišenim temperaturama pokazuju da kompozit može biti učinkovit u komponentama projektiranim za dugotrajno izlaganje temperaturama do 200 °C i kratkotrajno izdržava i temperaturu od 260 °C.

Odljevci se mogu uspješno proizvoditi posebno preciznim lijevanjem koristeći neznatno prilagođene uobičajene postupke zbog prisutnosti diskontinuiranog keramičkog ojačala. Te prednosti i relativno niska cijena uz malu težinu čini dijelove od ovih kompozita konkurentnim određenim otkovcima i odljercima od aluminijsa i raznim dijelovima koji se danas izrađuju od željeznih lijevova, čelika, magnezija ili titana.

Primjeri primjene odljevaka preciznog lijeva osim u zrakoplovstvu su npr. u tlačnim posudama, za medicinske proteze i glave palica za golf.

Porast čvrstoće porastom udjela SiC

Svojstva lijevanih MMC-a ovise o leguri matrice, udjelu SiC-ojačala, toplinskoj obradi i postupku lijevanja. Kao i kod bilo koje lijevane aluminijsve legure, mikrostruktura odljevka od MMC-a ovisi o brzini hlađenja pri skrućivanju. Kad je hlađenje sporo, kao kod odljevaka preciznog lijeva, čestice SiC su potiskivane napredujućom međupovršinom tekuće/kruto u međudendritične prostore.

Granica razvlačenja i vlačna čvrstoća kao i modul elastičnosti ispitnih uzoraka preciznog lijeva su viši od vrijednosti za neočvrstnute aluminijsve uzorke i rastu porastom udjela SiC. Unatoč padu istežljivosti povezane s porastom čvrstoće, otpornost kompozita na naglo širenje napuklina (lomna žilavost u stanju ravninskog naprezanja) se ne smanjuje i kritična veličina napukline ne raste. Kad se uzme u obzir i gustoća, vlačna svojstva lijevanih MMC-a (posebno specifična čvrstoća i krutost) su bolja od svojstava sivog lijeva i čelika kao i neočvrstnutog aluminijsa. Prisutnost tvrdih čestica SiC također pridonosi značajnom porastu otpornosti na trošenje i abrazijom i umorom.

Lijevani kompoziti zahtijevaju toplinsku obradu radi povećanja mehaničkih svojstava. Općenito, preporučljiv je ciklus sličan onom koji se koristi za neočvrstljive legure: rastvorno žarenje i gašenje u vodi, iza kojeg slijedi prirodno i umjetno dozrijevanje.

Ojačalo od SiC utječe i na fizikalna svojstva odljevaka. Gustoća se malo povećava (npr. oko 3 % uz 20 vol %SiC), a opadaju električna vodljivost i koeficijent toplinskog rastezanja. Toplinska vodljivost, međutim, raste. To se objašnjava time da se sitne čestice SiC veličinom približavaju monokristalu, a toplinska vodljivost monokristala SiC nadilazi onu čistog aluminijsa.

Osnovni ključ livljivosti je ovlaživanje keramike. Do 1986. godine praktički su se aluminijsvi MMC-i proizvodili energijski ili laboratorijski intenzivnim postupcima kao što su metalurgija praha, toplinsko naštrcavanje, difuzijsko spajanje i lijevanje tlačenjem (tzv. squeeze casting). Nijedan od tih materijala se nije mogao pretaljavati i lijevati uobičajenim postupcima i svi su bili preskupi za većinu primjena, uključujući zrakoplovstvo. Unatoč tehnolojskom napretku i poboljšanoj ekonomičnosti, šanse su male da će ti proizvodi ikada moći postići konkurentnu cijenu u komercijalnoj primjeni. Da bi se mogli

lijevati ekonomično i u praktičnom smislu, a ne samo laboratorijski, aluminijevi MMC-i moraju zadovoljiti tri osnovna uvjeta: ingot se mora moći pretaljivati bez pogoršanja njegovih svojstava; taljevina mora biti prilagođena standardnim postupcima u ljevaonicama aluminijske legure; odljevci moraju stvarno biti bez pogrešaka s pogodnim i izvrsnim mehaničkim svojstvima. Te uvjete zadovoljavaju kompoziti razvijeni u tvrtki Duralcan.

Na raspolaganju su ingoti namijenjeni za lijevanje ili istiskivanje proizvedeni patentnim postupkom koji osigurava potpuno vlaženje keramičkih čestica rastaljenim aluminijem. Niska cijena je najvažnija prednost ingot-metalurškog procesa. Davne 1988. godine kg kompozita se prodavao po cijeni višoj od 25 \$/kg. Sredinom 1990. godine, kada je započela poluindustrijska proizvodnja, cijena je pala na 8-9 \$/kg. Daljni pad cijene očekuje se otkad je Alcan Aluminium Ltd. pustio u rad 11 000 t/god. Duralcan postrojenje u Quebecu [14].

Razlike u ljevaoničkoj praksi u lijevanju SiC_z/Al u odnosu na Al-legure

Uvjeti pri lijevanju MMC-a općenito su slični kao i pri lijevanju standardnih aluminijevih legura. Ipak postoji nekoliko bitnih razlika:

- taljenje pod inertnim pokrivnim plinom provodi se prema nahodjenju ljevača. Uobičajena tehnika otplinjavanja, kao što je uranjanje tableta ili ubrizgavanje plina, može uzrokovati stvaranje mjehurića plina na česticama SiC i potom rošenje keramike. Zaštitne soli uklanjaju SiC. Na drugoj strani, okretni sustav za ubrizgavanje je koristan jer može uspješno očistiti i otpliniti taljevinu. On koristi plinovitu smjesu argona i SF₆;
- potrebno je održavati temperaturu taljenja u uskim granicama da se izbjegne pregrijavanje i potom stvaranje aluminijeva karbida;
- taljevina se mora lagano miješati da se postigne ravnomjerna raspodjela SiC čestica. Keramičke čestice se ne tale i ne otapaju u leguri matrice i kako su teže od nje, i teže će se slegnuti na dno peći ili lonca;
- turbulencija za vrijeme lijevanja mora se minimirati da se izbjegnu uključci plina.

Ako se uzimu u obzir ove razlike, MMC ingoti se mogu uspješno pretaljivati i lijevati uobičajenim postupcima, uključujući pješćani, kokilni, precizni i tlačni lijev, lijevanje tlačenjem (squeeze) i postupak s pjenom (lost-foam casting)

Taljenje: MMC-i se tale vrlo slično postupcima za taljenje neočvršćenih aluminijevih legura. Prikładne su indukcijske, elektrootporne i plinom ili naftom grijane lončane peći. Ako se koristi inertni plin, lonac se mora napuniti plinom prije unošenja suhих vrućih ingota. Ingoti se suše iznad 200 °C,

radi uklanjanja nepoželjne vlage koja može onečistiti taljevinu. Svi potrebni alati kojima se ulazi u taljevinu trebaju također biti suhi i predgrijani prije uporabe.

Kontrola temperature taljevine je standardna, slična onoj kod neočvrstnutih legura. Međutim, mora se izbjeći pregrijavanje koje može pogodovati stvaranju aluminijeva karbida reakcijom $4Al + 3SiC \rightarrow Al_4C_3 + 3Si$. Ta se reakcija odvija sporo pri temperaturi do oko 750 °C da bi se ubrzala s povećanjem temperature na 780-800 °C za matrice koje sadrže nominalno 7 %Si. Al_4C_3 precipitira u obliku kristala i nepovoljno utječe na žitkost taljevine, oslabljuje lijevani materijal i smanjuje otpornost odljevaka na koroziju.

Taljevina se ne može analizirati uobičajenom spektroskopijom. Čestice SiC uzrokuju nepravilna očitavanja uz uporabu normalnih aluminijevih etalona. Srećom su razvijene posebne metode za spektrografsku analizu aluminijevih legura matrice, kao i za određivanje udjela SiC u taljevini. Vakuumska spektrometrijska metoda, npr, koristi ugljikovu liniju za mjerenje volumnog udjela SiC i određivanje osnovnih konstituenata matrice. Tehnika koja se bazira na mjerenju električnog otpora može se upotrijebiti za određivanje udjela SiC u kompozitu u oba stanja, tekućem i krutom. Te metode niti su složene niti traže puno vremena.

Miješanje: Budući da su čestice SiC potpuno ovlažene tekućim aluminijem, one se neće stopiti u čvrstu masu, ali će se umjesto toga skupljati na dnu peći. Uporabom mješača sličnog velikoj žlici-cjedilu vrlo brzo se postiže ravnomjerna raspodjela čestica u taljevini (bilo koji čelični pribor koji se uranja u taljevinu mora biti obložen kako bi se spriječilo onečišćenje taljevine željezom, mora biti suh i predgrijan da se izbjegne stvaranje vodika).

Miješanje treba biti polagano da se izbjegne stvaranje vrtloga na površini taljevine i ne smije prečesto dolaziti do kidanja površine, zbog čega može doći do onečišćenja kupke troskom. Grabljenje lopaticom, čime se manji dio tekućine lagano ali stalno uzdiže, je najbolji postupak ručnog miješanja. Laganom okretanju uz pomoć vijaka kao mehaničkog mješača, neke od ljevaonica daju prednost. U stvari, rezultati laboratorijskih istraživanja pokazuju da su mehanička svojstva odljevaka maksimalna pri kontinuiranom miješanju nego pri isprekidanom ručnom miješanju. Pokretanje taljevine prirodnim vrtložnim strujama u peći kod indukcijskog taljenja obično je dovoljno da se rasprše čestice. Međutim, ipak se preporučuje dodatno ručno miješanje kad je pogon isključen, da se izbjegne okupljanje čestica u tzv. "mrtvim" zonama.

Nakon miješanja brzina taloženja SiC-čestica je prilično spora djelomično zbog toplinskih strujanja u taljevini i prirodne pojave "ometanog slijeganja". Poslije 10 do 15 min otprilike 30 mm vrha nemiješane kupke ostaje bez SiC-čestica, premda raspodjela ostaje ujednačena u ostatku taljevine. Zbog toga je važno promiješati taljevinu neposredno prije ulijevanja, unatoč tome je li miješana za vrijeme taljenja i stajanja.

Pročišćivanje i otplinjavanje Razvijen je patentirani postupak za pročišćivanje i otplinjavanje kompozitne taljevine koji koristi uređaj sličan mješalici s lopaticama za oboje, miješanje kupke i ubrizgavanje smjese plinova argona i SF₆. Taj se uređaj koristi i za održavanje čestica SiC u suspenziji. Mješalica ima šest ugljičnih lopatica vezanih za ugljičnu pogonsku osovinu. Lonac promjera 610 mm zahtijeva mješalicu promjera 205 mm. Deset minuta rada pri brzini vrtnje od 200 o/min obično je dovoljno da se mjehurići smjese argon-SF₆ svedu na djelotvornu veličinu. Pri tome nastaje debela pjenasta troska koja se uklanja nakon što je ciklus završen.

Pretakanje Pri transportu tekućeg metala od peći do mjesta ulijevanja nije potrebno niti miješanje niti zaštita inertnim plinom. Preporučeni niz postupaka je temeljito miješanje kupke, uklanjanje troske dok je metal u peći i potom transport taljevine u lonac za ulijevanje. Ukoliko prijenos metala uključuje pretakanje iz nagibne peći u lonac, važno je smanjiti turbulencije na minimum kako ne bi došlo do zarobljivanja plina. Nagibne peći, međutim, općenito se ne preporučuju za kompozitne taljevine.

Postupak lijevanja je isti kao i kod neočvršćenih aluminijskih legura. Kalupi za točan lijev trebaju biti dobro predgrijani, ispust iz lonca treba držati nisko i što je moguće bliže uljevnoj čaški ili uljevnom kanalu, ulijevanje treba biti brzo, držeći cijelo vrijeme uljevni kanal punim.

Uljevni sustav Osnovna pravila pri ulijevanju i dolijevanju primjenjiva su i na livljive MMC-e, uključujući uporabu filtera koji propuštaju čestice SiC, a zadržavaju okside. Viskozna se taljevina ponaša kao djelomično skrućena te keramičke čestice otežavaju slobodan protok plinova. Kompozitni materijali su puno manje osjetljivi na turbulenciju od aluminijskih. Tako loše izvedeni uljevni sustavi mogu uzrokovati stvaranje i zadržavanje mjehurića plina u taljevini koji ne mogu istjecati. Razvijeni su optimalni sustavi za ulijevanje i dolijevanje, iako se mnogi pješčani odljevci proizvode na poznati način.

Dosljedan pristup ulijevanju i pojenju također je potreban radi povećanja vjerojatnosti besturbulentnog punjenja kalupa. Ljevaonice trebaju nastojati da punjenje uljevnih kanala bude mirno, koristeći prigušivanje i hvatanje mjehura (otvoreno pojilo) filterom iza zaustavljivača, omogućujući ulaz metala u šupljine i na najnižoj točki.

Mada je viskoznost kompozitnih taljevina oko 50 puta veća od viskoznosti neočvršnutih aluminijskih legura, njegova žitkost je samo malo manja u usporedbi s uobičajenim legurama. Zbog toga mnoge ljevaonice neće primijetiti razliku u sposobnosti popunjavanja kalupa.

Završna obrada Standardni rezni alati izrađeni od brzoreznog čelika se troše vrlo brzo pri obradi lijevanih MMC-a zbog tvrdih abrazivnih čestica SiC. Alati od tvrdih metala zadovoljavaju za male količine obrađenog materijala, dok su za normalne proizvodne količine cijenom najpovoljniji dijamantni alati. Standardne abrazivne rezne ploče mogu se uspješno koristiti za uklanjanje uljevaka i pojila [14].

Kompoziti ojačani viskerima (SiC_w/Al) su mnogo skuplji od čestica, zbog sljedećih prednosti.:

- monokristalni viskeri imaju veću čvrstoću od ostalih diskontinuiranih ojačala kao što su čestice, polikristalni listići i nasjeckana vlakna;
- uobičajeni postupci prerade metala mogu usmjeriti viskere u metalnoj matrici;
- valjanjem, istiskivanjem, kovanjem i superplastičnim oblikovanjem može se ostvariti usmjerenost čvrstoće.

Čvrstoća u uzdužnom smjeru se povećava kod istiskivanih aluminijevih kompozita, jer se viskeri nastoje poredati uzduž osi alata pri prolazu materijala kroz alat.

Jednosmjerno valjanje može prouzročiti usmjeravanje čvrstoće, a križno valjanje daje jednolika svojstva [4].

3.2 KOMPOZITI S MAGNEZIJEVOM MATRICOM

Magnezijevi kompoziti razvijeni su u biti da se iskoriste ista svojstva kao ona značajna za aluminij: visoka krutost, mala težina i nizak koeficijent toplinskog rastezanja. U stvari, izbor između aluminija i magnezija kao matrice je obično temeljen na težini odnosno korozivskoj otpornosti. Gustoća magnezija iznosi otprilike dvije trećine gustoće aluminija, ali je aktivniji u korozivskoj sredini. Magnezij ima manju toplinsku vodljivost koja je često presudna u njegovu izboru. Sada su u razvoju tri vrste magnezijevih kompozita: kontinuirana vlakna C/Mg za svemirske konstrukcije, kratka vlakna Al₂O₃/Mg za dijelove automobilskih motora i diskontinuirana vlakna SiC ili B₄C/Mg za dijelove motora i materijale u niskonaponskoj elektronici. Proizvodne metode za sve tri vrste jednake su onima za istovrsne aluminijske kompozite.

Proizvodnja Mg-kompozita s kontinuiranim vlaknima uključuje nanošenje prevlake titan-bor za dobivanje kompozitnih žica, nanošenje matrice na vlakna PVD postupkom ili difuzijskim spajanjem vlakno/sendvič tankih listova za dobivanje ploča. Tehnologija lijevanja razvijena za C/Mg-kompozite uključuje nanošenje prevlake na zraku stabilnog silicijeva dioksida na vlakna iz prethodne organsko-metalne otopine. Magnezij ovlažuje prevlaku osiguravajući spajanje matrice na gotovo konačni oblik ljevačkim postupkom [2, 16].

3.3 KOMPOZITI S TITANOVOM MATRICOM

Titan je izabran kao metal matrice zbog njegove dobre specifične čvrstoće kod sobne i srednjih temperatura i izvanredne otpornosti na koroziju. U usporedbi s aluminijem titan zadržava čvrstoću na višim temperaturama. Povećana uporaba titana, kao zamjena za aluminij u gradnji

zrakoplova i raketa, nastupila je kada se prešlo s podzvučnih u nadzvučne brzine. Nastojanja u razvoju titanovih kompozita otežavali su procesni problemi uzrokovani velikom reaktivnošću titana s mnogim materijalima za ojačanje.

Premda je procjenjivano nekoliko proizvodnih tehnika, samo visokotemperaturno/kratkotrajno spajanje valjanjem, vruće izostatičko prešanje i vakuumsko vruće prešanje su prihvaćeni sa znatnijom važnošću. Druga je metoda plazmatsko naštrcavanje titanove matrice na SiC-vlakna. Čvrstoća pri povišenim temperaturama SiC/Ti-kompozita značajno je veća od one neojačanog titana. Potencijalna primjena za kontinuirano vlakno/titan-kompozite leži ponajprije u zrakoplovnoj industriji. To uključuje veći broj strukturnih komponenata zrakoplova i ventilatorske i kompresorske lopatice za moderne turbinske motore [2].

Titanovi kompoziti s diskontinuiranim ojačalima imaju prednost u umjerenoj krutosti i čvrstoći pri povišenoj temperaturi u odnosu na neojačane titanove legure. Oni također pružaju mogućnost NNS proizvodnje tehnikom metalurgije praha i mogu biti ekonomičniji za proizvodnju od titanovih MMC-a s kontinuiranim vlaknima [2, 7, 15, 17].

3.4 KOMPOZITI S BAKROVOM MATRICOM

Bakar ima potencijalne mogućnosti kao materijal matrice za kompozite od kojih se zahtijeva toplinska vodljivost i čvrstoća na visokoj temperaturi, svojstva koja nadmašuju ona aluminijevih kompozita. Procjenjuju se bakrovi MMC-i s kontinuiranim i diskontinuiranim ojačalima.

W/Cu-kompoziti ojačani kontinuiranim volframovim vlaknima prvi put su proizvedeni u kasnim 1950. godinama kao istraživački model za proučavanje ponašanja pri deformaciji, pojavi loma, žilavosti i vodljivosti u MMC-ima. Kompozit je načinjen infiltracijom tekuće faze. Na osnovi svoje visoke čvrstoće na temperaturama nižim od 950 °C, *W/Cu*-kompoziti smatraju se danas temeljnim materijalima za stijene komora za izgaranje modernih raketnih motora.

C/Cu-kompoziti s kontinuiranim vlaknima dobili su poticaj razvojem ugljičnih vlakana. Bakar dobro provodi toplinu, ali ima veliku gustoću i loša mehanička svojstva pri povišenim temperaturama. Razvijena su ugljična vlakna s aksijalnom toplinskom vodljivošću, pri sobnoj temperaturi, boljom od bakra. Dodatak tih vlakana bakru snizuje gustoću, povećava krutost, povisuje radnu temperaturu i osigurava mehanizam za oblikovanje koeficijenta toplinskog rastezanja. Napredak u proizvodnji *C/Cu*-kompozita uključuje galvanski proces pokrivanja svakog ugljičnog vlakna prevlakom čistog bakra, postizujući tako gipkost dovoljnu za izradu tkanine. Bakrom prevučena vlakna mogu se vruće prešati radi proizvodnje čvrstih komponenata [2].

3.5 KOMPOZITI S MATRICOM SUPERLEGURA

Superlegure se većinom koriste u turbinskim motorima, međutim, kompoziti s matricom od superlegura su među prvim materijalima uzetim u obzir za poboljšanu izvedbu turbina u cilju povećanja radne temperature dijelova. Kompoziti na bazi superlegura razvijani su do današnjeg stanja tijekom niza godina počevši u ranim 60-ima prošlog stoljeća.

Čvrstoća pri visokim temperaturama MMC superlegura postignuta je samo ojačavanjem teškotaljivim metalima. Pod tim se podrazumijevaju vlakna volframa, molibdena, tantala i niobija sa sastavom posebno prilagođenim toj namjeni. Najjača razvijena vlakna, volframove legure, imaju čvrstoću veću od 2070 MPa pri 1095 °C ili više nego šest puta veću od čvrstoće sada upotrebljivanih superlegura u glavnom motoru Space Shuttle-a.

Većina ranijih radova na MMC superlegurama usmjerena je na proučavanje kompatibilnosti matrica – vlakna, koji su konačno doveli do legura matrice koje pokazuju ograničenu reakciju s vlaknima. Npr. volframova vlakna su najmanje reaktivna u matricama na osnovi željeza i mogu izdržati kratkotrajno izlaganje temperaturama i višim od 1195 °C bez primijećene reakcije.

Kompoziti superlegura proizvode se procesima s čvrstom fazom, tekućom fazom ili naštrcavanjem. Metoda uključuje precizno lijevanje, spajanje metala matrice u obliku tankih ploča, metala matrice u obliku ploča dobivenih valjanjem praha s organskim vezivom, ostale tehnike metalurgije praha, "slip casting" praha metalnih legura i naštrcavanje električnim lukom. Proizvedeni su MMC-i na osnovi željeza, nikla i kobalta i postignuta je široka lepeza svojstava, uključujući vlačnu čvrstoću pri povišenim temperaturama, lomnu čvrstoću, otpornost na puzanje, otpornost na niskociklični i visokociklični umor, žilavost, oksidacijsku otpornost i toplinsku vodljivost. Provedivost izrade dijelova složena oblika dokazana je turbinskom lopaticom prvog stupnja konvekcijskog hlađenja. Ta komponenta postala je model prema kojem je konstruirana i izrađena šuplja lopatica od W/FeCrAlY-kompozita.

Kao što primjeri pokazuju, kompoziti s metalnom matricom su materijali čiji razvoj traje nekoliko desetljeća, a još preostaje da istraživanja prenijeta u proizvodnju, kao i dobivena svojstva provjerena u primjeni, potpunije ispune očekivanja.

LITERATURA

- [1] M.S.M. Alger: "Polymer Science Dictionary", Elsevier Applied Science, Metal Matrix Composites, *Advanced Materials&Processes* 12/98, p. 19-23.
- [2] D.A. McCoy, D.J. Lloyd: "Fabrication of graphite fibre reinforced aluminium", *Canadian Aeronautics and Space J.* v. 33, 3/1987, p. 11-17.

- [3] V. Sundararajan: "Aluminum Composites In Aerospace Applications", <http://home.att.net/~s.prasad/almmc.htm>
- [4] M. Lima, D. Santos: "Metal Matrix Composites from Self-Propagating Synthesis and Hot Pressing", *European Microscopy and Analysis* 9/2001, p. 29-31.
- [5] ..."Reinforced Aluminum via the PRIMEX CASTTM Foundry Process", www.msematerials.com/mmc.html, 2003, p. 1-3.
- [6] D. Lewis, M. Singh, S.G. Fishman: "In situ COMPOSITES", *Advanced Materials&Processes* 7/95. p. 29-31.
- [7] A.W. Urquhart: "Molten Metals Sire MMCs, CMCs", *Advanced Materials&Processes* 7/91, p. 25-29.
- [8] ..."Sprayforming of particle reinforced cooper and aluminum composites", <http://sfb372.iwt.uni-bremen.de/project-d2-eng.html>, 2002, p. 1-2.
- [9] "Rapid-solidification processing improves MMC properties", *Advanced Materials&Processes* 11/90, p. 71-73.
- [10] M.E. Buck: "Advanced fibres for advanced composites", *Advanced Materials&Processes* 9/87, p. 61-67.
- [11] A.L. Geiger., M. Jackson: "Low-expansion MMCs boost avionics", *Advanced Materials& Processes* 7/89, p. 23-30.
- [12] T. Takami, M. Fujine, Sh. Kato, H. Nagai, A. Tsujino, Y. Masuda, M. Yamamoto: "MMC All Aluminum Cylinder Block for High Power SI Engines", *SAE TECHNICAL PAPER SERIES* 1/2-1231, p. 1-11.
- [13] D.O. Kennedy: "SiC Particles Beef Up Investment-Cast ALUMINUM", *Advanced Materials&Processes* 6/91, p. 42-46.
- [14] ..."Intermetallic Ti composite has good fracture toughness", *Advanced Materials&Processes* 4/02, p. 9.
- [15] T.E. Wilks: "Cost-effective magnesium MMCs", *Advanced Materials&Processes* 8/92, p. 27-29.
- [16] E. M.: *Werkstoffe für den Überschallsprung, INGENIEUR-WERKSTOFFE* v.4, 11/92, p. 12-14.
- [17] A.K. Lee, L.E. Sanchez-Caldera, S. Turker Oktay: "Liquid-metal mixing process tailors MMC microstructures", *Advanced Materials&Processes* 8/92, p. 31-34.
- [18] D.J. Weiss: "Casting metal matrix composites", *Advanced Materials & Processes* 3/98, p. 29-30.
- [19] Ch.S. Rice, P.F. Mendez: "Slurry –Based Semi-Solid DIE CASTING", *Advanced Materials& Processes* 10/02, p. 49-52.