

NAČINI PREPREČEVANJA RAZTAPLJANJA NERAVNOTEŽNIH TRDNIH FAZ V VEČFAZNIH MEŠANICAH S TALINO

PREVENTION OF DISSOLVING OF INEQUILIBRIAL SOLID PRIMARY PHASES IN SEMISOLID MIXTURES

Gorazd Lojen, Ivan Anžel, Alojz Križman

Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Smetanova ulica 17, 2000 Maribor

Prejem rokopisa - received: 1999-07-20; sprejem za objavo - accepted for publications: 1999-07-27

Razvili smo model postopka izdelave kovinskih kompozitov s sintezo delno staljenih mešanic, ki združuje dobro omočljivost utrjevalne faze z dokaj širokimi možnostmi izbire njenega deleža v kompozitu. Po tem postopku izdelana kompozitna večfazna, delno staljena mešanica je sestavljena iz dveh ali več primarnih trdnih faz in taline. Faze v takšni mešanici so v splošnem termodinamsko nekompatibilne. Trdne faze so, preden se mešanica popolnoma strdi, nagnjene k hitremu raztapljanju. Ker so primarne trdne faze bistveni del mikrostrukture kompozita, je preprečevanje njihovega raztapljanja ključnega pomena za uspešno izdelavo kompozita. Model predvideva več načinov:

- kinetično preprečevanje raztapljanja
- kemijsko zaščito nestabilnih trdnih faz in
- termodinamsko stabilizacijo kompozitne delno staljene mešanice.

Izbira načina preprečevanja raztapljanja primarnih trdnih faz pri izdelavi kompozita s sintezo delno staljenih mešanic je odvisna od zelene kemijske sestave in mikrostrukture kompozita ter od predvidenih postopkov nadaljnje predelave.

Ključne besede: kompoziti s kovinsko matico, delno staljene mešanice, večfazne mešanice, preprečevanje raztapljanja neravnotežnih trdnih faz

A processing model for production of particle reinforced metal matrix composites was developed. This process solves the problem of reinforcing phase wettability and variations of the phase fractions are also enabled. A semisolid composite mixture, produced in the proposed way, contains two or more primary solid phases, which are in general thermodynamically incompatible or at least inequilibrium with respect to their compositions and fractions. Since these solid phases are the essential part of the composite, their dissolution has to be prevented. In our processing model this is possible in more different ways:

- kinetically,
- by chemical protection of solid primary phases and
- by thermodynamical stabilisation of the semisolid composite.

The choice depends on the desired chemical composition and microstructure of the composite and on expected technologies in further processing of the composite.

Key words: metal matrix composites, semisolid mixtures, multiphase mixtures, prevention of dissolution of inequilibrium solid primary phases

1 UVOD

Kompoziti s kovinsko osnovo so dokaj nova, vendar v industrijski praksi vse pomembnejša generacija materialov. Sestavljeni so iz kovinske matice in utrjevalne faze, ki lahko ima različne oblike (kontinuirna ali nekontinuirna vlakna, lamele, delci ...). Mehanske, kemijske, toplotne, električne, tribološke in druge lastnosti kompozita so razen od kemijske sestave matice in utrjevalne faze odvisne še od oblike, velikosti, deleža in porazdelitve utrjevalne faze. Z načrtnim spreminjanjem naštetih faktorjev lahko lastnosti kompozita optimalno prilagodimo pričakovanim obremenitvam. Zato je iz kompozitnih materialov pogosto mogoče izdelati lažje, trajnejše in funkcionalnejše izdelke kakor iz tradicionalnih konstrukcijskih materialov.

Do danes je bilo razvitih veliko najrazličnejših kompozitov s kovinsko osnovo. Zaradi zniževanja proizvodnih stroškov pa se je v zadnjem desetletju razvoj kovinskih kompozitnih materialov za velikoserijsko

proizvodnjo osredotočil predvsem na kompozite, utrjene z delci.

Idealni postopek izdelave bi moral izpolnjevati vsaj naslednje zahteve:

- poljubno izbiro vrste in deleža matice oziroma utrjevalne faze, neodvisno od termodinamskih zakonitosti sistema elementov, ki tvorijo kompozit
- poljubno izbiro oblike in velikosti delcev utrjevalne faze
- popolno omočljivost utrjevalne faze
- visoko adhezivnost med matico in utrjevalno fazo in
- poljubno izbiro postopkov nadaljnje predelave kompozita.

Razširjeni postopki za proizvodnjo kovinskih kompozitov, utrjenih z delci (npr. mehansko legiranje in in-situ tvorba kompozitov), izpolnjujejo te zahteve le deloma, ali pa samo nekatere od njih^{1,2,3}. Številne raziskave so zato usmerjene v razvoj novih tehnologij^{4,5}. Mednje lahko uvrstimo tudi razvoj našega modela proizvodnega postopka, imenovanega "Sinteza delno

staljenih mešanic", ki združuje nekatere prednosti različnih znanih postopkov izdelave kompozitov:

- možnost izbire deležev utrjevalnih faz
- možnost vplivanja na obliko in velikost delcev posameznih faz v kompozitu
- izbira utrjevalne faze je dokaj neodvisna od sestave matice kompozita
- model učinkovito rešuje problem omočljivosti komponent
- nadaljnja predelava je v splošnem mogoča tudi s postopki, ki zahtevajo ponovno ogrevanje v delno staljeno stanje.

2 POSTOPEK

Izdelava kompozitov s kovinsko osnovo utrjenih z delci s sintezo delno staljenih mešanic je obširneje predstavljena v^{6,7}, na kratko pa bistvo postopka lahko povzamemo v treh točkah:

a) Izdelava dvofaznih delno staljenih (tikotropnih) mešanic

Iz zlitine A - B pripravimo z mešanjem v dvofaznem področju dvofazno mešanico M_1 , sestavljeno iz globularnih trdnih delcev primarne faze α in taline L_1 .

Na enak način iz zlitine C - D pripravimo drugo dvofazno mešanico M_2 , sestavljeno iz globularnih trdnih delcev primarne faze β in taline L_2 .

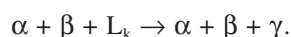
b) Sinteza kompozitne mešanice

Izbrani količini obeh dvofaznih, tikotropnih mešanic M_1 in M_2 zmešamo v kompozitno mešanico M_k :



c) Strjevanje kompozitne mešanice

Kompozitno mešanico ohladimo do sobne temperature, pri čemer se ohranita primarni trdni fazi α in β . Če zanemarimo spreminjanje njune sestave, poteka strjevanje kompozita po enačbi



Preostala talina L_k , ki je nastala s sintezo talin L_1 in L_2 , se strdi v matico γ , ki je, odvisno od sestave kompozita in konstitucije faznega diagrama A - B - C - D, lahko sestavljena iz ene, dveh ali več faz.

3 PREPREČEVANJE RAZTAPLJANJA TERMODINAMSKO NERAVNOTEŽNIH FAZ

Kompozitna večfazna, delno staljena mešanica M_k je sestavljena iz dveh ali več primarnih trdnih faz in taline. Faze v takšni mešanici so v splošnem termodinamsko nekompatibilne, ali vsaj neravnotežne (sestava in količine). Posledica tega je težnja k zelo hitremu raztapljanju vsaj ene od njih že med procesom izdelave

kompozita, še preden se kompozitna mešanica popolnoma strdi. Ker pa so primarne trdne faze bistveni elementi mikrostrukture načrtovanega kompozita, je preprečevanje njihovega raztapljanja po sintezi v termodinamsko neravnotežno kompozitno mešanico ključnega pomena za uspešno izpeljavo procesa. Problem lahko rešujemo na vsaj tri načine:

- kinetično
- s kemijsko zaščito primarnih trdnih faz in
- s termodinamsko stabilizacijo kompozitne delno staljene mešanice.

Izbira načina preprečevanja raztapljanja primarnih trdnih faz pri izdelavi kompozita s sintezo delno staljenih mešanic je odvisna od želene kemijske sestave in mikrostrukture ter od predvidenih postopkov nadaljnje predelave kompozita.

3.1 Kinetično preprečevanje raztapljanja neravnotežnih trdnih faz

Pri tem načinu preprečevanja raztapljanja nestabilnih trdnih faz v delno staljeni kompozitni mešanici izpeljemo proces mešanja in strjevanja tako hitro, da se kompozitna mešanica popolnoma strdi še preden se začne raztapljanje trdnih faz v prevelikem obsegu. Bistveni element mikrostrukture tako izdelanih kompozitov so termodinamsko nekompatibilne primarne faze.

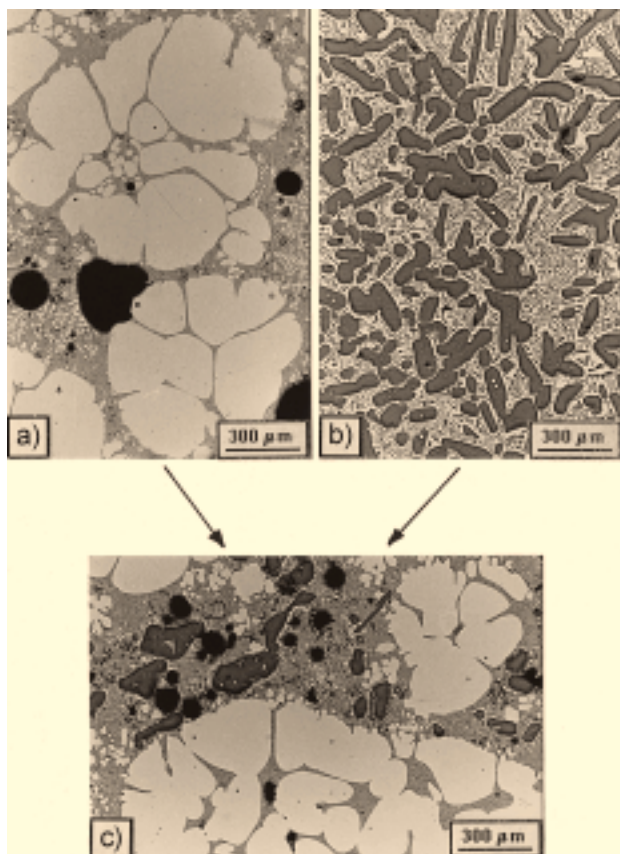
Kinetično preprečevanje raztapljanja primarnih faz postavlja najmanj omejitvev pri izbiri faznih sistemov izhodnih zlitin ter dopušča izbiro deležev termodinamsko nekompatibilnih primarnih trdnih faz v zelo širokih mejah. Je tudi edini od zgoraj navedenih načinov preprečevanja raztapljanja primarnih trdnih faz, ki omogoča izdelavo binarnih kompozitnih materialov, ki vsebujejo obe primarni fazi istega binarnega faznega sistema.

Tako izdelanih materialov ne smemo ponovno ogreti v delno staljeno stanje. Zato so neprimerni za predelavo z vedno bolj razširjenima postopkoma, tikso kovanjem in tikso litjem, za katera so sicer potrebni prav materiali z globulitno obliko primarnih faz.

Poglavitna slabost tega načina preprečevanja raztapljanja nestabilnih faz pa je kratek razpoložljiv čas za izpeljavo sinteze in strjevanja kompozita. Določimo ga na osnovi dopustnega obsega in kinetike raztapljanja primarnih trdnih faz v delno staljeni kompozitni mešanici.

Dopustni obseg raztapljanja je odvisen od deležev in velikosti delcev primarnih trdnih faz v mešanicah M_1 in M_2 ter od zahtevanih deležev in velikosti delcev teh faz v mikrostrukturi kompozita.

Za ugotavljanje kinetike raztapljanja je na voljo veliko poti, od najpreprostejših modelnih eksperimentov⁸, do preračunov z uporabo bolj ali manj zapletenih matematičnih modelov^{9,10,11,12}. Vendar tudi ti modeli zahtevajo uporabo podatkov, ki jih pogosto ni mogoče pridobiti drugače kot eksperimentalno^{11,12}.



Slika 1: Izdelava binarnega kompozita Al - Si s sintezo delno staljenih mešanic; raztapljanje primarnih trdnih faz α Al in Si je preprečeno kinetično: a) Izhodna mešanica AlSi7, b) Izhodna mešanica AlSi40, c) Kompozit AlSi20: Primarni trdni fazi α Al in Si v eutektični matici

Figure 1: Production of Al - Si binary composite by "Synthesis of semisolid mixtures"; dissolution of primary solid phases α Al and Si is prevented kinetically: a) Precursive mixture AlSi7, b) Precursive mixture AlSi40, c) Composite AlSi20: Primary solid phases α Al and Si in eutectic matrix

Eksperimentalno smo potrdili izvedljivost kinetičnega preprečevanja raztapljanja primarnih trdnih faz v izdelavo binarnega kompozita AlSi20, ki vsebuje v eutektični matici obe primarni fazi sistema, α Al in Si. Izhodna mešanica M_1 s sestavo AlSi7 je vsebovala globulite primarnega α Al, izhodna mešanica M_2 s sestavo AlSi40 pa delce primarnega silicija. Obe smo pripravili tako, da smo ju, vsako posebej, med ohlajanjem do temperature sinteze kompozita mešali. Sintezo smo izvedli pri temperaturi 590°C. Shematično je izvedba eksperimenta prikazana na **sliki 1**.

3.2 Kemijska zaščita

Raztapljanje po sintezi nestabilnih primarnih faz preprečijo trdne zaščitne plasti, ki onemogočijo neposreden stik delcev s talino. Zaščitne plasti na površini delcev primarnih trdnih faz so spojine, ki nastanejo s kemijskimi reakcijami pred sintezo ali med njo. V prvem primeru potekajo kemijske reakcije v eni ali obeh izhodnih mešanicah M_1 in M_2 . V drugem pa jih sproži šele sinteza in potekajo *in-situ* v kompozitni

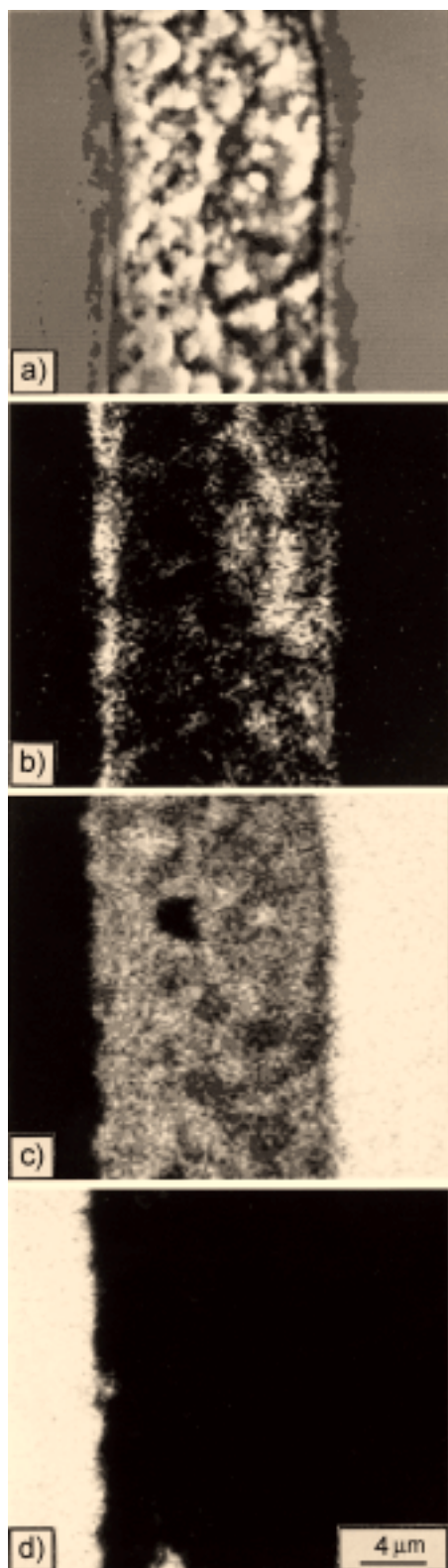
mešanici M_k . V nasprotju z drugimi postopki izdelave kompozitov, ki vključujejo kemijske reakcije zaradi izboljšanja omočljivosti delcev utrjevalne faze, npr.¹³, pri izdelavi kompozitov s sintezo delno staljenih mešanic in kemijsko zaščito načrtujemo kemijske reakcije predvsem zaradi tvorbe zaščitnih plasti.

Kemijska zaščita primarnih faz močno zožuje izbor izhodnih zlitin. Treba je namreč izbrati takšne zlitine, ki omogočajo reakcije, katerih produkti nastajajo ali pa se iz taline izločajo na površini delcev trdnih faz in tam tvorijo zaščitno plast. Ta plast na površini delca pa mora biti neprekinjena, s površino delca dobro povezana in mehansko stabilna. Poškodbe, ali samo prekinitve v zaščitni plasti, bi namreč povzročile raztapljanje delcev primarnih trdnih faz med izdelavo ali predelavo kompozita v delno staljenem stanju. Nujno je, da je zaščitna plast obstojna v talini kompozitne mešanice (zadnji pogoj ni avtomatično izpolnjen, če reakcija poteka v kateri od izhodnih mešanic). Učinkovitost zaščite je večja, če zaščitna plast in delec medsebojno ne reagirata.

Podobno kot kinetično preprečevanje raztapljanja nestabilnih faz tudi kemijska zaščita omogoča izdelavo kompozitov, ki vsebujejo več primarnih faz istega faznega sistema, in tudi omogoča variiranje deležev termodinamsko nekompatibilnih primarnih trdnih faz v kompozitu v zelo širokih mejah. Pomembna prednost kemijske zaščite je možnost ponovnega ogrevanja in zadrževanja kompozitov v delno staljenem stanju (so primerni za tikso litje in tikso kovanje, iztiskavanje v delno staljenem stanju), saj zaščitne plasti ščitijo delce primarnih trdnih faz pred raztapljanjem v talini kompozitne mešanice.

Če sprožimo nastanek zaščitnih plasti že v izhodnih mešanicah M_1 in M_2 , lahko tudi te vsebujejo neravnotežne primarne trdne faze. Zaščitna plast namreč ščiti delce tudi pred raztapljanjem v talini, v kateri je kristaliziral. To pa nam omogoča, da po nastanku zaščitne plasti spremenimo sestavo taline izhodne mešanice v smeri, ki bi sicer povzročila raztapljanje trdne faze. S tem se močno razširijo možnosti variiranja končne sestave kompozita in deležev posameznih faz v njem. Prav tako lahko po nastanku zaščitnih plasti nekoliko dvignemo temperaturo izhodne mešanice, ne da bi s tem povzročili raztapljanje delcev primarne trdne faze v talini. Tako dobimo možnost variiranja temperature sinteze, posledično pa se poveča tudi število primernih izhodnih zlitin. Kompozitno mešanico M_k lahko izdelamo tudi iz izhodnih mešanic M_1 in M_2 , pri katerih se temperaturni območji delno staljenega stanja ne prekrivata, in brez kemijske zaščite pri temperaturi sinteze ne bi mogli biti obe v delno staljenem stanju.

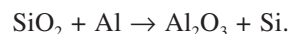
Izvedljivosti kemijske zaščite primarnih trdnih faz še nismo eksperimentalno potrdili v realnih razmerah izdelave kompozita, vendar rezultati modelnega eksperimenta, prikazani na **sliki 2**, dokazujejo, da je mogoče z zaščitno plastjo, ki nastane s kemijskimi reakcijami na površini trdnega delca, preprečiti njegovo raztapljanje v



Slika 2: Kemijska zaščita trdnega Si v tekočem Al z oksidno zaščitno plastjo: a) Prečni prerez zaščitne oksidne plasti Si-paličice, potopljene v tekoči Al (SEM), b) Ploskovna porazdelitev kisika (EDS), c) Ploskovna porazdelitev Al (EDS), d) Ploskovna porazdelitev Si (EDS)

Figure 2: Chemical protection of solid Si in molten Al by oxide protective layer: a) Protective oxide layer of the Si stick in molten Al, crosssection (SEM), b) Distribution of oxygen (EDS), c) Distribution of Al (EDS), d) Distribution of Si (EDS)

talini, v kateri sicer ni obstojen; silicijevo paličico z oksidirano površino smo potopili v tekoč aluminij. Na površini silicijeve paličice je stekla kemijska reakcija po shemi:



Pri reakciji nastali silicij je difundiral proti meji $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Al}$ in od tod v talino, plast aluminijevega oksida pa je ostala stabilna in je preprečevala raztapljanje Si-paličice.

3.3 Termodinamska stabilizacija

Večini slabosti, naštetih pri kinetičnem preprečevanju raztapljanja in kemijski zaščiti, se lahko uspešno izognemo s termodinamsko stabilizacijo.

Pri tem načinu preprečevanja raztapljanja trdnih delcev primarnih faz med sintezo dodamo kompozitni mešanici ustrezno snov X (element, zlitina ali spojina), ki modificira sestavo taline



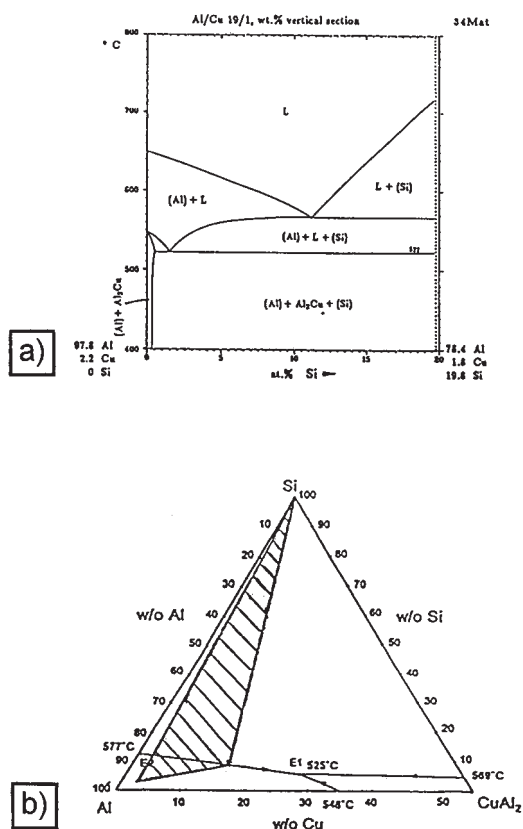
tako, da postanejo primarne trdne faze v njej obstojne. Seveda pa je mogoče že izhodne zlitine izbrati tako, da so primarne trdne faze po sintezi (v kompozitni mešanici) obstojne tudi brez dodajanja snovi X.

V termodinamsko stabiliziranih kompozitnih mešanicah, izdelanih s sintezo delno staljenih mešanic, so vse trdne faze obstojne, zato kompozita ni treba hitro ohladiti neposredno po sintezi. Pri nadaljnji predelavi kompozita je mogoče ponovno ogrevanje ter daljše zadrževanje v delno staljenem stanju (tikso litje, tikso kovanje, iztiskavanje...). Mehanske poškodbe delcev primarnih trdnih faz med izdelavo ali predelavo kompozita v delno staljenem stanju ne vplivajo na njihovo obstojnost v talini. Čeprav ni mogoča popolnoma poljubna izbira, je na voljo več kombinacij elementov za izhodne mešanice.

Termodinamska stabilizacija je mogoča v primerih, ko kompozitna mešanica (z dodajanjem snovi X ali brez) pripada faznemu diagramu z večfaznim prostorom (L + dve ali več trdnih faz). Kemijska sestava kompozita je zato omejena z mejami večfaznega prostora L + trdne faze pri temperaturi sinteze.

Primer faznega diagrama z večfaznim prostorom, L + dve trdni fazi, prikazuje **slika 3**.

Čeprav pri termodinamski stabilizaciji povprečna kemijska sestava in temperatura sinteze kompozitne mešanice ležita znotraj večfaznega prostora L + dve ali več trdnih faz, kompozitna mešanica neposredno po sintezi praviloma še ni termodinamsko stabilna. Kemijske sestave primarnih faz, ki so kristalizirale v izhodnih mešanicah, v kompozitni mešanici v splošnem niso popolnoma ravnotežne. Zato se po termodinamski stabilizaciji sistema lahko njihove sestave (in zato tudi količine) nekoliko spremenijo. Ravnotežne sestave trdnih faz in taline v kompozitni mešanici so namreč določene s temperaturo kompozitne mešanice.



Slika 3: Trifazni prostor z dvema trdnima fazama in talino v faznem diagramu Al-Si-Cu: a) Vertikalni prerez pri masnem razmerju Al/Cu = 19^(1,2), b) Izotermni prerez pri 550°C⁽³⁾

Figure 3: Three-phase area with two solid and one liquid phase in the Al-Si-Cu phase system: a) Vertical cut at Al/Cu = 19^(1,2), b) Isothermal cut at 550°C⁽³⁾

Nekateri avtorji predlagajo postopke izdelave kompozitov s pretaljevanjem ene same zlitine, ki pripada faznemu diagramu z večfaznim prostorom (L + dve ali več trdnih faz)^{14,15}. Ob tem se seveda postavlja vprašanje o smislu izdelave kompozitov iz dveh ali več ločeno pripravljenih, delno staljenih mešanic, če vendar zadostuje že ena sama večkomponentna zlitina ustrezne sestave. Kljub temu je izdelava termodinamsko stabiliziranih kompozitov s sintezo delno staljenih mešanic pogosto smiselna. Mehanske, električne, toplotne, tribološke in druge lastnosti materialov namreč niso odvisne samo od njihove kemijske sestave in deležev posameznih faz, temveč tudi od velikosti, oblike in porazdelitve delcev teh faz v matici, torej od realne mikrostrukture.

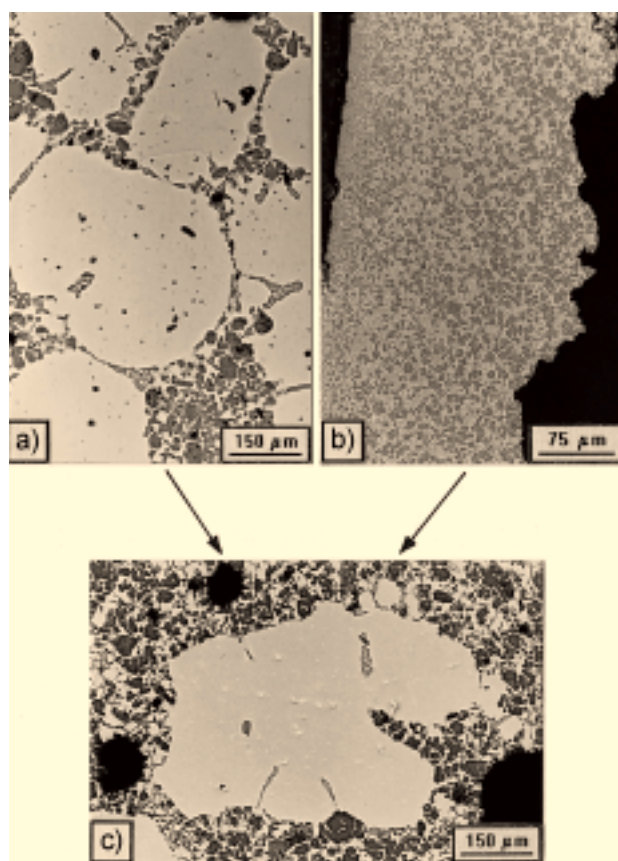
Če pretalimo eno samo zlitino sestave M_k , v kateri se med ohlajanjem iz taline že nad solidusom izloča več trdnih faz, delci vseh teh trdnih faz nukleirajo in rastejo v podobnih razmerah (hitrostih ohlajanja, podhladitvah, hitrostih in časih mešanja). Posledica so podobne velikosti in oblike delcev vseh faz, ki se iz taline izločajo v večfaznem prostoru faznega diagrama zlitine.

S sintezo delno staljenih mešanic pa lahko izdelamo material sestave M_k kot kompozit tako, da mehansko

pomešamo dve ali več delno staljenih izhodnih mešanic ($M_k = \sum M_i$; $i = 1, 2, 3, \dots$). V izhodnih mešanicah M_i se kot primarne faze pojavljajo tiste faze, ki so v trdnem stanju obstojne tudi pri večfaznem ravnotežju v sistemu kompozita M_k . Ker izhodne mešanice pripravimo ločeno eno od druge, lahko za vsako primarno trdno fazo izberemo drugačne razmere (hitrost ohlajanja, čas in hitrost mešanja) nukleacije in rasti. Tako imamo torej možnost, da delcem različnih trdnih primarnih faz "predpišemo" različne velikosti in oblike.

Izdelava kompozitov s sintezo delno staljenih mešanic in termodinamsko stabilizacijo kompozitne mešanice ima prednost pred izdelavo materiala enake kemijske sestave iz ene same zlitine zaradi širših možnosti kontrole mikrostrukture.

Termodinamsko stabilizacijo smo eksperimentalno potrdili. Zlitino AlSi7Cu5 smo med mešanjem počasi ohladili do temperature sinteze. Tako smo pripravili izhodno delno staljeno mešanico M_1 , ki je vsebovala velike primarne globulite α Al. Izhodno mešanico M_2



Slika 4: Izdelava termodinamsko stabiliziranega kompozita s sintezo delno staljenih mešanic: a) Izhodna zlitina AlSi7Cu5; hitrost ohlajanja in mešanja je bila majhna, b) Hitro strjena zlitina AlSi40Cu5 (melt spinning); pred sintezo kompozita segreta v delno staljeno stanje, c) Kompozit AlSi17Cu5

Figure 4: Production of thermodynamically stabilised composite produced by "synthesis of semisolid mixtures": a) Precursive alloy AlSi7Cu5; cooling and mixing speed by preparation were law, b) Basic alloy AlSi40Cu5; rapidly solidified by melt spinning and then reheated to the semisolid state, c) Composite AlSi17Cu5

smo pripravili iz zlitine AlSi40Cu5 s hitrim ohlajanjem, tako da je vsebovala veliko število drobnih delcev primarnega silicija. Nato smo jo ponovno ogreli do temperature sinteze kompozita, 555 do 560°C. Povprečna kemijska sestava kompozita AlSi17Cu5 in temperatura sinteze ležita v trifaznem prostoru L + Si + α Al faznega diagrama Al - Si - Cu. Tako izdelani kompozit ima velike globulite α Al in bistveno manjše delce primarnega Si. Mikrostrukture obeh izhodnih mešanic in kompozita so prikazane na **sliki 4**.

4 SKLEP

Po postopku sinteze delno staljenih mešanic izdelane delno staljene kompozitne mešanice praviloma vsebujejo nestabilne primarne trdne faze, ki se, dokler se kompozitna mešanica ne strdi, v talini hitro raztapljajo.

Za uspešno izpeljavo postopka je ohranitev delcev primarnih trdnih faz ključnega pomena, saj so le-ti bistveni element mikrostrukture kompozita.

V okviru razvoja postopka sinteze delno staljenih mešanic raziskujemo različne načine preprečevanja raztapljanja delcev nestabilnih primarnih trdnih faz v delno staljenih kompozitnih mešanicah. Izvedljivost dveh, kinetičnega preprečevanja in termodinamske stabilizacije kompozitne mešanice, smo v laboratorijskih razmerah tudi eksperimentalno potrdili. Tretji način, kemijska zaščita, pa je še v fazi modelnih eksperimentov.

Predstavljeni načini preprečevanja raztapljanja nestabilnih primarnih trdnih faz se razlikujejo po možnostih variiranja sestave kompozita, deležev, velikosti in oblike delcev posameznih primarnih trdnih faz, po razpoložljivem času za sintezo in ohlajanje

kompozita ter po dopustnih temperaturah pri nadaljnji predelavi. Zato je izbira ustreznega načina odvisna od želene sestave in mikrostrukture kompozita ter od predvidenih postopkov nadaljnje predelave kompozita.

5 LITERATURA

- ¹ B. Ralph, H. C. Yuen, W. B. Lee: *Journal of materials processing technology*, 63 (1997) 339-354
- ² F. Delannay, L. Froyen, A. Deruyttere: *Journal of materials science*, 22 (1987) 1-16
- ³ J. Liu, A. Wang, Z. Shi, G. An: *Journal of materials processing technology*, 63 (1997) 354-357
- ⁴ P. J. Ward, H. V. Atkinson, D. H. Kirkwood, C. M. Sellars: *Journal de physique*, 3 (1993)
- ⁵ A. Varin: *Zeitschrift für Metallkunde*, 81 (1990)
- ⁶ G. Lojen, I. Anžel, A. Križman: *Metall*, 7-8 (1998) 52, 458-463
- ⁷ I. Anžel, G. Lojen, A. Križman: *Kovine Zlitine Tehnologije*, 5 (1998) 32, 309-312
- ⁸ G. Lojen, I. Anžel, A. Križman: *Kovine Zlitine Tehnologije*, 1-2 (1998) 32, 41-44
- ⁹ V. T. Borisov, A. N. Cherepanov, M. F. Zhukov: *Russian Metallurgy*, 3 (1996) 30-36
- ¹⁰ D. E. Langberg, C. Fan, M. Nilmani: *Second Australian Asian Pacific Course and Conference on Aluminium Melt Treatment and casting*, Melbourne, Australia, 1991
- ¹¹ D. E. Langberg, M. Nilmani: *Metallurgical and Materials Transactions B*, 27B (1996) 781-787
- ¹² I. V. Melikhov, A. Ya. Gorbachevskii: *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 5 (1997) 31, 451-457
- ¹³ L. Salvo, G. L. Esperance, M. Suery, J. G. Legoux: *Materials Science and Engineering*, A177 (1994)
- ¹⁴ P. J. Ward, H. V. Atkinson, P. R. G. Anderson, L. G. Elias, B. Garcia, L. Kahlen, J-M. Rodriguez-Ibabe: *Acta Materialia*, 44 (1996) 5, 1717-1727
- ¹⁵ J. Valer, J. M. Rodriguez, J. J. Urcola: *Rev. Metal. Madrid*, 32 (1996) 4
- ¹⁶ P. Villars, A. Prince, H. Okamoto: *Handbook of Ternary Alloy Phase Diagrams*, Plenum Press, New York 3 (1996) 3350