

ZNA^ILNOSTI KONTINUIRNO ULITIH KOMPOZITOV Al/SiC

CHARACTERISTICS OF D.C. CAST Al/SiC MMCs

BORIVOJ [U[TAR[I^1, M. TORKAR¹, B. BRESKVAR¹, V. KEVORKIJAN²,
A. SMOLEJ³, V. NARDIN³

¹Institut za kovinske materiale in tehnologijo, Lepi pot 11, 1000 Ljubljana

²V. Kevorkijan, d.d., Maribor, Slovenija

³Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, Slovenija

Prejem rokopisa - received: 1997-10-01; sprejem za objavo - accepted for publication: 1997-12-19

Kontinuirno in diskontinuirno oja-ani kompoziti Al/SiC so sodobni materiali, katerih bodo-nost je nesporna zaradi mnogih dobrih lastnosti, kot so: visoka trdota in trdnost, dobra odpornost proti obrabi, uporabnost pri povi{anih temperaturah, velik modul elasti-nosti in majhna gostota. Sedaj je njihova uporaba omejena predvsem na letalsko industrijo in voja{ke tehnologije. Vendar pa so ti materiali 'e pri-eli prodirati tudi na druga, tr'no zanimiva podro-ja. Izdelava diskontinuirno oja-anih kompozitov Al/SiC je mo'na na ve- na-inov: z ume{avanjem relativno grobih delcev oja-itvene faze (SiC) v raztaljeno talino Al-zlitine, z infiltracijo kerami-nih predoblikovancev in s postopki metalurgije prahov (PM). Eden od najobetavnej{ih postopkov izdelave kompozitov Al/SiC je ume{avanje delcev SiC med kontinuirnim vertikalnim litjem blokov iz Al-zlitin. Postopek se 'e uporablja na polindustrijskem nivoju, vendar pa je uporabnost litega kompozita v nadaljnem postopku predelave (bodisi litja ali vro-e predelave) {e precej neznana. Zato smo pri ameri{kem podjetju Duralcan nabavili livarski kompozit z oznako F3S.20S, ki v kovinski osnovi (zlitini Al z 9% Si) vsebuje 20 vol.% delcev SiC. V prvi fazi na{ega razvojnega raziskovalnega dela smo mikrostrukturno in mehansko karakterizirali kompozit, iz katerega bomo z litjem in toplim iztiskovanjem (ekstruzijo) izdelali preizku{ance primernih oblik za nadaljnje preiskave, ki nam bodo omogo-ile spoznati uporabnost in lastnosti te vrste kompozitov. V prispevku so predstavljene mikrostrukturne zna-ilnosti, mehanske lastnosti in preoblikovalne trdnosti pri povi{anih temperaturah tega kontinuirno litega kompozita.

Klju-ne besede: kontinuirno uliti kompoziti Al/SiC, mikrostruktura, mehanske lastnosti

Continuously and discontinuously reinforced Al/SiC metal matrix composites (MMCs) are promising modern, light weight materials with excellent properties, such as: high hardness and strength, good wear resistance, use at elevated temperatures and high modulus of elasticity. Currently, the use of MMCs is limited predominantly on the military and the aerospace industry. However, the penetration of these materials has already begun also in civilian applications. There are several ways of manufacturing of discontinuously reinforced (DR) Al/SiC MMCs: direct incorporation of the reinforcement (SiC particles, platelets or whiskers) into the molten Al alloy, infiltration of SiC preforms with molten Al alloy or via powder metallurgy (PM) procedures. The most promising and probably the cheapest industrial manufacturing procedure of DR Al/SiC MMCs is a direct incorporation of SiC particles into the molten Al alloy during direct vertical continuous (D.C.) casting of billets/ingots. The procedure is already developed on the industrial scale, however, the use, as well as properties of cast composite important for further forming to near net shape product (for example with pressure die casting or by hot extrusion) are still rather unknown. Therefore, Duralcan's D.C. cast composite F3S.20S (Al-9% Si alloy with 20 vol.% of SiC particles) was purchased and analysed. In this article, microstructural and mechanical characteristics of cast composite are presented and discussed.

Key words: D.C. cast Al/SiC MMCs, microstructure, mechanical properties

1 UVOD

Kompoziti z osnovo iz Al-zlitine, oja-ani s kerami-nimi (nekovinskimi) delci, so materiali, ki ponujajo v primerjavi z dana{njimi konvencionalnimi Al-zlitinami najbolj{o kombinacijo masa-lastnosti-cena. Zato pri-akujemo, da bodo ti materiali v prihodnosti zamenjali del konvencionalnih materialov v velikoserijskih proizvodnjah, kot je naprimer avtomobilska industrija in industrija drugih transportnih vozil. Danes ti materiali 'e nadome{-ajo {tevilne konvencionalne materiale v izdelkih bele tehnike, ra-unalnikih, audio in video napravah ter opremi za {port in razvedrilo¹⁻⁴.

Izdelava diskontinuirno oja-anih kompozitov Al/SiC je mo'na na ve- na-inov: z ume{avanjem relativno grobih delcev oja-itvene faze (SiC) v raztaljeno osnovo (talino Al-zlitine), z infiltracijo kerami-nih predoblikovancev in s postopki metalurgije prahov³⁻⁵. Kompoziti Al/SiC, izdelani po postopkih metalurgije prahov, imajo

navadno bolj{e mehanske lastnosti kot tisti, izdelani po livarskih (talilni{kih) postopkih, ker v kovinski osnovi vsebujejo drobnej{e in enakomerneje razporejene delce ali vlakna^{6,7}. Ti kompoziti so tudi kemijsko ter mikrostrukturno bolj homogeni, vendar so zaradi narave postopka izdelave mnogo dra'ji.

Osnovni namen dodatka oja-itvene faze (predvsem SiC) kovinski osnovi je pove-anje meje plasti-nosti. Povi{ajo se natezna in tla-na trdnost ter trdota, tako pri sobni kot tudi pri povi{anih temperaturah, kar pove-uje tudi odpornost materiala proti obrabi. Z dodatkom SiC linearno raste modul elasti-nosti in pada temperaturni koli-nik premega (linearnega) raztezka. @al pa se z nara{-ajo-o vsebnostjo oja-itvene faze zmanj{uje duktilnost ('ilavost, raztezek in kontrakcija) kompozita. Natezna in tla-na duktilnost kompozitov Al/SiC v toplem in v hladnem se med seboj zelo razlikujeta. Kompoziti prena{ajo relativno dobro tla-ne obremenitve in

slabo natezne. Zato so ti materiali primerni za toplo preoblikovanje v zaprtih orodjih (utopno kovanje, iztiskovanje itd.). V literaturi⁸ navajajo, da so potencialno uporabni tudi za oblikovanje v kon-ne oblike s hladno predelavo, ob primerni toplotni obdelavi kovinske osnove. Natan-nej(e {tudije^{9,10} so pokazale, da se s stopnjo tople/hladne predelave kompozitov poleg tla-ne duktilnosti pove-ata tudi natezna duktilnost in lomna 'ilavost, pri danem stanju kovinske osnove. Izbolj{anje pripisujejo enakomernej{i porazdelitvi lokalnih napetosti in ve-ji oddaljenosti med mesti, kjer se za-enjajo razpoke.

[tevilne raziskave¹⁰⁻¹³ so pokazale, da se s pove-ano stopnjo predelave pove-uje dele' po{kodb oja-itvene faze oziroma zmanj{uje povpre-na velikost delcev SiC ali razmerje l/d (dol' ina/premer) vlaken SiC. V literaturi je mo'no zaslediti poizkuse prilagajanja in spreminjanja kemijske sestave osnove ter toplotne obdelave z namenom, da se {e pove-ajo oziroma optimirajo preoblikovalnosti teh vrst materialov. Na tr' i{-u je tako {e mo'no dobiti razli-ne kompozite Al/SiC, izdelane z neposrednim ume{avanjem kerami-nih delcev med vertikalnim (pol)kontinuirnim (D.C; angl.: Direct Casting) litjem (slika 1)¹⁴. Seveda so tako izdelani bloki kompozita cenej{i od PM-kompozitov, a primerni predvsem za tla-no litje v zahtevane kon-ne oblike^{15,16}, saj je klju-ni problem {ir{e uveljavitve te vrste kompozitov njihova slaba obdelovalnost¹⁷⁻²⁰. Uspe{no obdelovati jih je mo'no samo s PCD (angl.: Poly-Crystalline Diamond) in v zadnjem -asu tudi najnovej{imi CVD DCC (angl.: Chemical Vapour Deposited Diamond Coated Carbide inserts) diamantnimi orodji pri primernih obdelovalnih hitrostih. Tako je edina smotrna smer razvoja postopkov izdelave te vrste kompozitov v tehnologijah, ki zagotavljajo izdelke kon-ne oblike brez ali z minimalno potrebno dodatno mehansko obdelavo. To so predvsem livarske tehnologije (konti + tla-no litje, infiltracija poroznih kerami-nih predoblik) in pa postopki tople/hladne predelave (kovanje, valjanje, iztiskovanje)²¹⁻²⁵, kjer pa je potrebno upo{tevatvi, da so kompoziti s kovinsko osnovo (poleg Al lahko tudi Mg- ali Ti-zlitine), oja-ani z 10-50 vol.% trdih (3000 HV) in zelo abrazivnih delcev ali vlaken SiC (lahko tudi Al₂O₃, AlN, TiB₂ itd.).

Najpogostej{e vrste materialov, oja-anih z Al₂O₃ ali SiC (oja-itev za povi{ane delovne temperature), so gnetne Al-zlitine tipa 2014 in 6061 ter livarske Al-Si-zlitine (silumini s cca 7-12 mas.% Si)²⁶. Za na{e preiskave in preizkuse smo izbrali Duralcanov kompozit z oznako F3S.20S oziroma 359/SiC/20p po Aluminium Association MMCs. Material je primeren predvsem za tla-no litje in litje v pesek. V literaturi²⁷ pa smo zasledili tudi preizkuse tople predelave (s kovanjem) tega materiala v zavorne diske. V Tabeli 1 podajamo nazivno kemijsko sestavo kovinske osnove izbranega kompozita, ki vsebuje 20 vol.% SiC-delcev, povpre-ne velikosti d₅₀ P 13 μm. Za primerjavo podajamo {e sestavo kovinske osnove kompozita Al/SiC s pove-ano vsebnostjo Cu, Ni in Mg, ki jo priporo-ajo za delo pri povi{anih temperaturah.

Tabela 1: Kemijska sestava kovinske osnove kompozita Al/SiC vrste F3S in F3K (Duralcan)

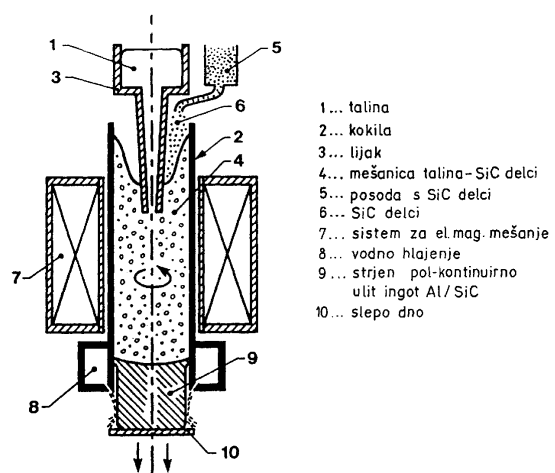
Table 1: Chemical compositions of metal matrix of Duralcan's Al/SiC composites, types F3S and F3K

Element Material	Si	Fe	Cu	Mg	Ni	Ti	Drugi	Al
	(mas.%)							
F3S	8,5-9,5	0,2 max.	0,2 max.	0,45-0,65	-	0,2 max.	0,1 max.	preostanek
F3K	9,5-10,5	0,3 max.	2,8-3,2	0,8-1,2	1-1,5	0,2 max.	0,1 max.	preostanek

V okviru projekta, podprtega od MZT Slovenije in tovarne Impol iz Slovenske Bistrice, 'elimo osvojiti tehnologijo izdelave profilov iz kompozitov Al/SiC s postopkom toplega iztiskovanja. Da bi izbrani material dodobra spoznali in ugotovili tehnolo{ke parametre iztiskovanja, smo ga v 1. fazi projekta mehansko in mikrostrukturno karakterizirali. Potek in rezultate preiskav podajamo v nadaljevanju tega prispevka.

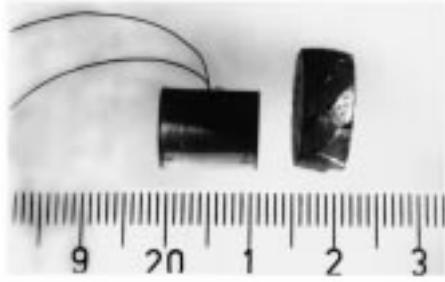
2 PRAKTI^NO DELO

Za uspe{no izvedbo laboratorijskih in industrijskih preizkusov iztiskovanja je nujna primerna mikrostrukturna karakterizacija ter poznanje mehanskih lastnosti nabavljenega kompozita. Zato smo morali dobavljene okroglice najprej prerezati in na ustreznih mestih (rob, sredina, pre-no in vzdol'no) izrezati vzorce materiala. Pri tem smo naleteli na nemalo te'av, saj prakti-no v Sloveniji nismo na{li ustreznega stroja za razrez relativno velikih (φ 178 x 1000 mm) okroglic, ki omogo-ajo tudi industrijske preizkuse iztiskovanja na stiskalnicah v tovarni Impol. Iskali smo v smeri konvencionalnega rezanja (tra-ne in kro'ne 'age), laserskega in plazemskega rezanja (premahnje mo-i) ter 'i-ne erozije (prepo-asi). Nazadnje nam je le uspelo material razrezati z vodnim curkom pri tlaku 3000 barov ob dodatku abrazivnega sredstva. Vendar rez ni bil kvaliteten, rezanje pa je bilo relativno po-asno in drago. Kljub vsemu nam je



Slika 1: Shemati-ni prikaz izdelave kompozitov Al/SiC s postopkom konti litja z ume{avanjem SiC-delcev¹⁴

Figure 1: Schematic presentation of Al/SiC composites manufacture by the vertical casting procedure¹⁴



Slika 2: Makroskopski posnetek preizkusnega valj-ka za dolo-itev preoblikovalne trdnosti kompozita Al/SiC, pred preizkusom in po njem
Figure 2: Testing sample for the determination of flow stress of Al/SiC composite at elevated temperatures, before and after testing

uspelo s tem postopkom narediti kose materiala, primerne za nadaljnji razrez na ustreznih laboratorijskih strojih za pripravo metalografskih in mehanskih preizku{ancev. Poleg valj-kov ϕ 10 x 12 mm (**slika 2**) za dolo-itev preoblikovalne trdnosti pri povi{anih temperaturah smo izdelali tudi standardne preizku{ance za dolo-itev natezne trdnosti ter vzorce za metalografske preiskave na opti-nem in elektronskem mikroskopu. Priprava metalografskih vzorcev je zahtevna zaradi specifi-nosti materiala (trdi delci v mehki osnovi) in ustrezno temu je bilo potrebno izbrati primerne materiale za rezanje, bru{enje in poliranje ter osvojiti postopek priprave vzorcev.

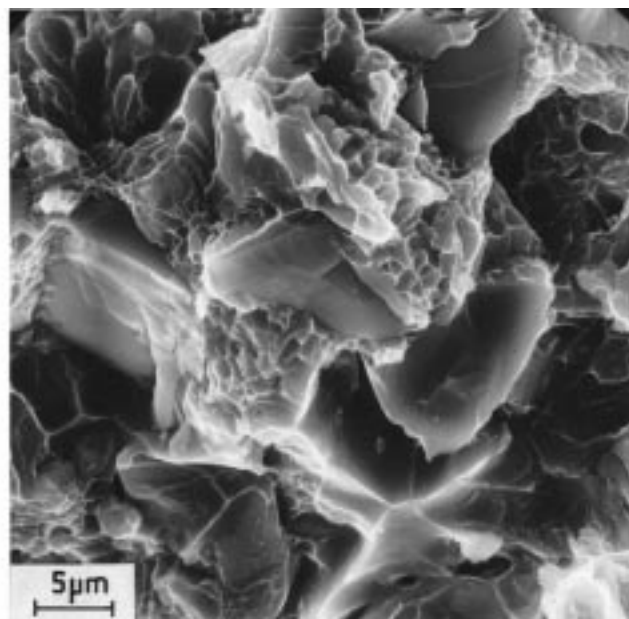
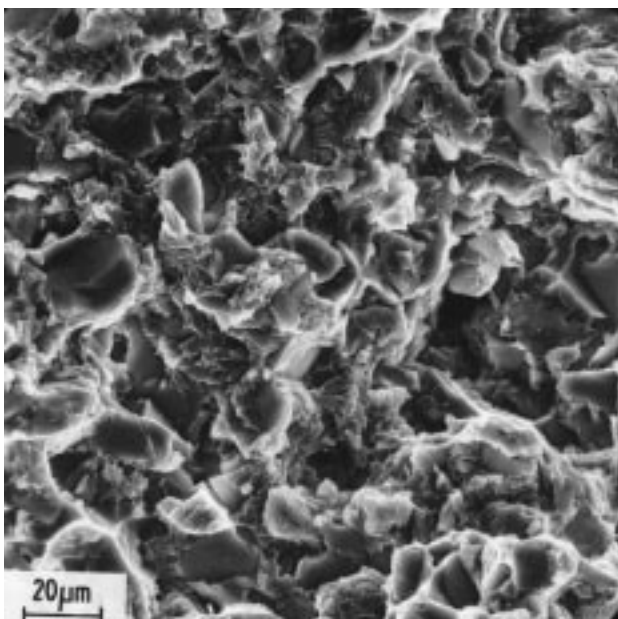
3 REZULTATI IN DISKUSIJA

Mehanske lastnosti preiskovanega kompozita v ulitem stanju so v okviru pri-akovanih. Trdota kompozi-

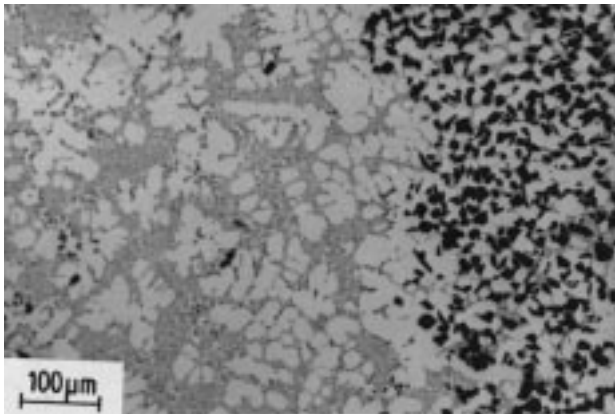
ta po $HB_{2,5/187,5}$ je 105-110. Natezni trdnosti v pre-ni (R_m P 260 MP) in vzdol'ni smeri (R_m P 275 MP) lite okroglice se bistveno ne razlikujeta med seboj. Raztezek in zo'enje (kontrakcija) sta minimalana. Opravka imamo torej z izrazito krhkim in obrabno odpornim materialom. SEM-posnetki prelomnih povr{in ka'ejo (**sliki 3a in b**) kvaziduktilni prelom s posameznimi 'ilavimi grebeni. Med njimi pa se nahajajo manj{a podro-ja transkristalne krhkosti (SiC-delci).

Mikrostrukturne preiskave so pokazale, da povr{ina (do globine cca 1,25 mm) okroglic ne vsebuje oja-itvene faze oziroma SiC-delcev (**slika 4**). Ta pojav je posledica narave postopka (vertikalnega konti litja okroglic), kjer prihaja zaradi hitrega strjevanja in kristalizacije taline na steni kokile do izrivanja SiC-delcev proti sredini. V tem delu je mikrostruktura sestavljena iz trdne raztopine α_{Al} (belo) in evtektika ($\alpha_{Al} + Si$; svetlo sivi heterogeni zlog) v razmerju pribli'no 60:40.

Zunanjemu povr{inskemu pasu sledi prehodni pas, kjer lahko opazimo posamezna nehomogena podro-ja (pasove), ki so bogata z SiC-delci in podro-ja, ki delcev ne vsebujejo. To podro-je {irine 0,5 mm sega v globino okroglice do pribli'no 1,75 mm. Nato se do jedra okroglice (pribli'no 87 mm) nadaljuje relativno homogena mikrostruktura (**slika 5**), v kateri so delci SiC (temno sivo) enakomerno razporejeni v kovinski osnovi, ki jo sestavljajo trdna raztopina α_{Al} in evtektik ($\alpha_{Al} + Si$) v razmerju P 70:30. Volumski dele' SiC-delcev v kovinski osnovi smo ocenili na 20-25 vol.%, kar ustreza specifikaciji proizvajalca in kar smo kasneje tudi potrdili z avtomatsko kvantitativno analizo slike (Kontron Elektronik KS 200; TF Univerza v Mariboru). SiC-delci so ostrorobi z ravnimi ploskvami in so presenetljivo enako-

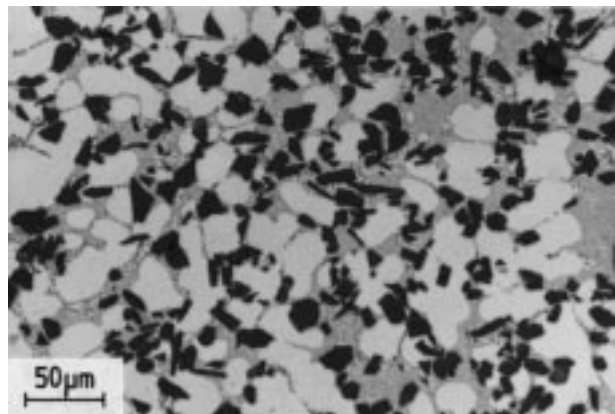


Slika 3: SEM-posnetka prelomne povr{ine nateznega preizku{anca iz kompozita Al/SiC
Figure 3: SEM micrographs of fracture surface of an Al/SiC composite tensile specimen



Slika 4: Mikrostruktura kompozita Al/SiC na robu okroglice z lepo vidnim prehodom v podro-je, oja-ano z SiC-delci

Figure 4: Microstructure of Al/SiC composite at the surface of D.C cast billet



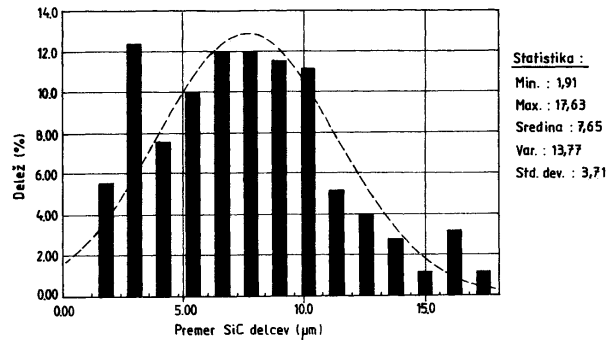
Slika 5: Mikrostruktura kompozita Al/SiC v jedru okroglice z lepo vidno razporeditvijo oja-itvene faze v evtektiku

Figure 5: Microstructure of Al/SiC composite in the core of D.C. cast billet

merne velikosti. Najve-ji delci so reda velikosti 25 μm, ve-ina pa jih je velikosti pod 15 μm, kar tudi ustreza specifikaciji proizvajalca in presene-a glede na postopek izdelave kompozita.

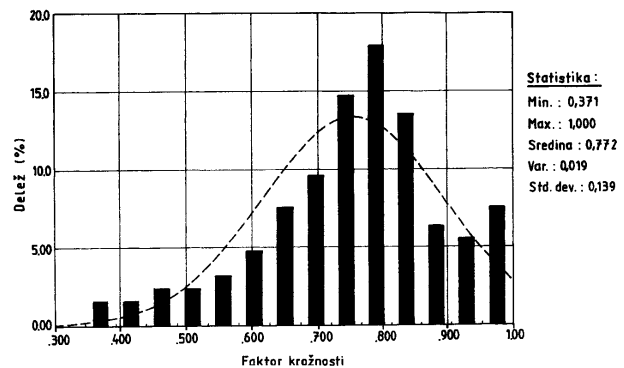
Natan-nejša kvantitativna mikrostrukturalna analiza slike je pokazala, da je ekvivalentni sferi-ni premer SiC-delcev 7,6 μm, faktor kro-nosti delcev je 0,77 in njihov volumski dele' 23 vol.%. Na slikah 6 in 7 je prikazana z avtomatsko analizo slike (metalografskega posnetka, podanega na sliki 8), ugotovljena velikostna porazdelitev in distribucija faktorja kro-nosti SiC-delcev.

SiC-delci le' ijo v evtekti-nih poljih (sliki 5 in 8) in so odrinjeni od zrn α_{Al} trdne raztopine, kar ustreza dejstvu, da se evtektik zadnji strdi (pri P 577°C). Skladno z majhnimi razlikami v natezni trdnosti med vzdol' no in pre-no smerjo okroglice tudi nismo opazili bistvenih mikrostrukturnih razlik. Pregled mikrostrukture nejedkanega vzorca pri manjši pove-avi je pokazal, da v okroglicah razen na nekaj mestih ni ve-je poroznosti. Na os-



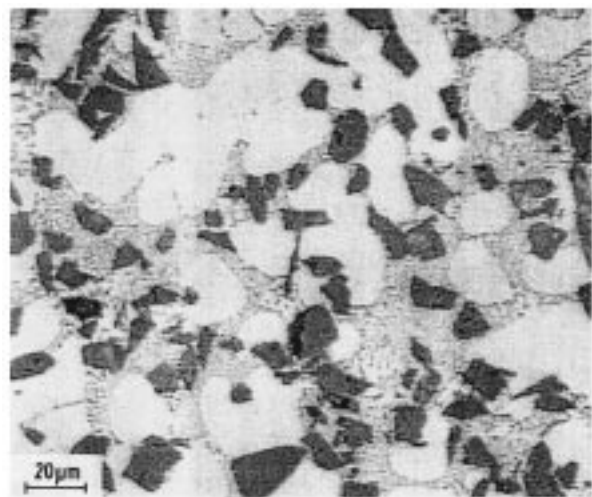
Slika 6: Velikostna porazdelitev SiC-delcev, dobljena s kvantitativno avtomatsko analizo slike metalografskega vzorca kompozita Al/SiC

Figure 6: Particle size distribution of SiC, obtained by automatic quantitative image analysis of metallographic sample of Al/SiC composite



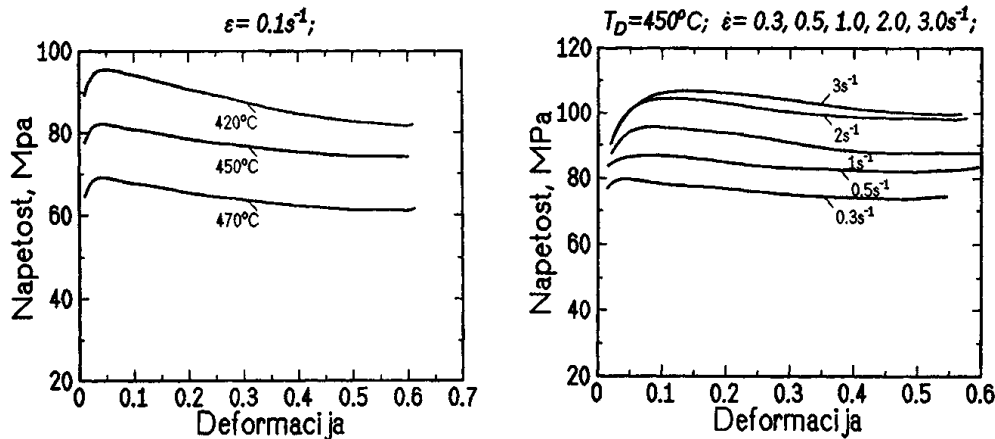
Slika 7: Velikostna porazdelitev faktorja kro-nosti SiC delcev, dobljena s kvantitativno analizo slike metalografskega vzorca kompozita Al/SiC

Figure 7: Distribution of equivalent spherical diameter of SiC particles, obtained by automatic quantitative image analysis of metallographic sample of Al/SiC



Slika 8: Primer mikrostrukture kompozita Al/SiC v jedru okroglice, ki je bila kvantitativno obdelana s programom za avtomatsko analizo slike (vezano na sliki 6 in 7)

Figure 8: Core microstructure of Al/SiC composite billet, investigated by the automatic quantitative image analysis (in connection with figs. 6 and 7)



Slika 9: Preoblikovalna trdnost kompozita Al/SiC a) v temperaturnem območju iztiskovanja in b) v območju pri-akovanih hitrosti deformacije
Figure 9: Flow stresses of Al/SiC composite, a) in the temperature region of extrusion and b) at the expected deformation rates

novi mikrostrukturalne analize in primerjave zunanje cone ter jedra okroglice lahko trdimo, da so med strjevanjem delci SiC ovirali rast zrn α_{Al} trdne raztopine. Na področju povečane koncentracije SiC-delcev so primarni dendriti α_{Al} manjši in bolj globularni. Izrazite dendritne morfologije strjevanja, ki je opazna v prehodni coni, tu ni opaziti.

Realnih podatkov o preoblikovalni sposobnosti kompozitov Al/SiC pri povišanih temperaturah je v tuji literaturi relativno malo²¹⁻²³. V glavnem lahko povzamemo, da se kompoziti Al/SiC ali Al/Al₂O₃ iztiskujejo pri podobnih pogojih, kot se iztiskujejo Al-zlitine brez ojačitve. Hitrosti iztiskovanja so praktično enake, delovni tlaki so nekoliko višji, iztiskovanje poteka zadovoljivo pri iztiskovalnih razmerjih med 16:1 do 45:1. Maksimalna sila oziroma tlak, potreben za iztiskovanje, raste s hitrostjo iztiskovanja in jasno pada z njeno temperaturo. Delovni tlaki so približno 10-20% višji pri kompozitnem materialu. Za naš material literaturnih podatkov ni bilo na voljo, zato je bilo potrebno parametre ugotoviti eksperimentalno. V ta namen smo izdelali še omenjene preizkusne valjke s pomočjo katerih smo ugotovili preoblikovalne trdnosti v temperaturnem območju 420-470°C (Gleeble 1500, Duffers Scientific Inc.) in v območju pri-akovanih hitrosti iztiskovanja (sliki 9 a in b). Pri pripravi vzorcev za preizkuse pri povišanih temperaturah je bilo nekaj več s pripravo izvrtin za namestitve termoelementa (diamantni svedri premera 0,6-0,8 mm).

Z določenimi preoblikovalnimi trdnostmi kompozita smo s teoretičnimi in pol-empiričnimi enačbami²⁸ izračunali potrebno silo in hitrost iztiskovanja ter s tem ugotovili potrebno velikost stiskalnice za iztiskovanje izbranih okroglic. Ugotovili smo, da bo za praktično iztiskovanje okroglic v tovarni Impol, najprimernejša 20 MN industrijska stiskalnica (Schloemann).

Glavna težava pri iztiskovanju kompozitov je še nekajkrat omenjena njihova slaba obdelovalnost, ki pride do izraza med pripravo okroglic za iztiskovanje (rezanje

na dimenzije) in kot obraba orodja med iztiskovanjem. Konvencionalna orodna jekla zato kot orodja niso primerna. V literaturi²² priporočajo (še posebej za zahtevne oblike) uporabo PM-orodnih jekel, prevlečenih s TiN/TiC po postopku CVD ali karbidnih trdin. Toplotna prevodnost kompozitov Al/SiC je manjša, specifična toplota pa večja v primerjavi z neorganiziranimi materiali. Zato je pri-akovati nekaj daljše obdobje ogrevanja okroglic na temperaturo iztiskovanja in tudi nekaj višje temperature iztiskovancev med samim iztiskovanjem.

4 SKLEPI

Rezultati mikrostrukturnih in mehanskih preiskav materiala kažejo, da je še mogoče na industrijskem nivoju s postopkom kontinuirnega litja z umeščanjem SiC delcev izdelati kompozite vrste Al/SiC ustrezne kakovosti. Zato je s temi materiali v prihodnosti potrebno resno razmisliti in je usmeritev v spoznavanje tehnologij izdelave, litja, predelave in obdelave kompozitov Al/SiC te vrste pravilna.

Izvedena mikrostrukturalna in mehanska karakterizacija kompozita nam v nadaljevanju omogoča uspešno pripravo zahtevnih in dragih industrijskih preizkusov iztiskovanja.

5 LITERATURA

- METALBA S.p.A.: The use of composites in sports articles, commercial catalogue Metalba S.p.A., Bassano del Grappa, Italija
- S. Pickering: Bicycle industry takes MMC for a ride, *Metal Powder Report*, 50 (junij 1995) 6, 30-33
- B. Terry, G. Jones: Metal Matrix Composites, Elsevier Advanced Technology, Elsevier Science Publishers Ltd., Oxford, Anglija, 1990
- K. U. Kainer: Metalische Verbundwerkstoffe, DGM Informationsgesellschaft Verlag, Oberursel, Nemčija, 1994
- F. L. Matthews, R. D. Rawlings: Composite Materials: Engineering and Science, Chapman & Hall, London, Anglija, 1994
- R. J. Arsenault, S. B. Wu: A comparison of PM vs. melted SiC/Al composites, *Scripta Metallurgica*, 22 (1988) 767-772

- ⁷ B. L. Mordike, K. U. Kainer, J. Schroeder: Powder metallurgical preparation of composite materials, *Transaction of the PMAI*, 17 (1990) 7-17
- ⁸ J. Jiang et al.: Room temperature formability of particle-reinforced metal matrix composites: forging, extrusion and deep drawing, *Composites*, 26 (1995) 11, 785-789
- ⁹ F. Siman-ik, G. Jangg: Influence of processing parameters on fibre damage and mechanical properties of extruded composite with aluminium matrix and short carbon fibres, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 20 (1994) 11-20
- ¹⁰ F. J. Humphreys: The thermomechanical processing of Al-SiC particulate composites, *Material Science and Engineering*, A135 (1991) 267-273
- ¹¹ W. Wang, Z. Zhang, Y. Chen, X. Li: SiC particle reinforced aluminium composites, Institute of Composite Materials Reports, Shanghai Jiao Tong University, Kitajska, 203-207
- ¹² J. D. Embury, S. Tao, J. Newall, F. Zok: Damage accumulation in metal-matrix composites and its role in hydrostatic extrusion, Mc Master University Hamilton, Ontario, Kanada, 187-193
- ¹³ W. R. Hoover: Die casting of Duralcan composites, *Duralcan's reports*, (1991) 387-392
- ¹⁴ F. Adam, C. Vives: Die-casting under low pressure of electromagnetically elaborated semisolid metal matrix composites, *Proceedings of the 5th European Conference on Advanced Materials and Processes and Applications*, Euromat 97, Maastricht, Nizozemska, 1, 337-340
- ¹⁵ P. M. N. Ocansey et al.: Solidification, thermal analysis and properties of α -SiC particle reinforced Al 11.7 alloy composites, *Giessereiforschung*, 48 (1996) 3, 82-83
- ¹⁶ P. Zenisek et al.: Structure and mechanical properties of Al-SiC metal matrix composite with additions of SiC particles, *Metallurgical Science and Technology*, 14 (1996) 1, 37-44
- ¹⁷ H. S. Oberoi: Machining of metal matrix composites with diamond tools, *Cutting Tool News*, (junij 1996) 8-10
- ¹⁸ C. T. Lane: Machining characteristics of particle-reinforced aluminium, *Duralcan's reports*, (1996) 195-201
- ¹⁹ D. Biermann: Mechanische Bearbeitung von Leichtmetall-Verbundwerkstoffen, Institut für Spanende Fertigung Berichte, Univerza v Dortmundu, Nem-ija, 1-26
- ²⁰ A. R. Chambers: The machinability of light alloy MMCs, *Composites*, Part A, 27A (1996) 2, 143-147
- ²¹ V. B. Dickson: Further developments in the extrusion of aluminium based metal matrix composites, Extrusion Technology '96, Chicago, ZDA, maj 1996, 1-31
- ²² P. W. Jeffrey, S. Holcomb: Extrusion of particulate-reinforced aluminium matrix composites, *Duralcan reports*, 181-186
- ²³ S. Brusethaug, O. Reiso, W. Ruch: Extrusion of particulate-reinforced aluminium billets made by d.c. casting, *Hydro Aluminium reports*, 173-179
- ²⁴ H. P. Degischer, H. Kaufmann, H. Leitner: Strangpressprofile, Schmiede- und Gussteile aus keramikeilchenverstärktem Aluminium, *VDI Berichte*, No.: 965.1, (1992) 179-188
- ²⁵ D. J. Jensen, Y. L. Liu, N. Hansen: Hot extrusion of Al/SiC texture and microstructure, *Proceedings of the 12th Riso International Symposium on Material Science Roskilde*, Danska, (1991) 417-422
- ²⁶ E. A. Brandes, G. B. Brook: Smithells Metals Reference Book, 7. izdaja, Butterworth Heinemann, Oxford, Anglija, 1992
- ²⁷ A. M. De Sanctis, E. Evangelista, A. Forcellese, A. Fuganti: Forging of MMC for an automotive component, *Metallurgical Science and Technology*, 14 (1996) 1, 13-19
- ²⁸ K. Laue, H. Stenger: Extrusion: Processes, Machinery, Tooling, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, ZDA, 1981