

RAZVOJ POSTOPKA IZTISKAVANJA KOMPOZITOV Al/SiC

DEVELOPMENT OF HOT EXTRUSION OF Al/SiC MMCs

**Borivoj Šuštaršič¹, Mirko Doberšek¹, Bojan Breskvar¹, Matjaž Torkar¹,
Varužan Kevorkijan², Sudradjat Dai³, Anton Smolej⁴, Vladimir Nardin⁴**

¹Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, 1000 Ljubljana, Slovenija

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

³Impol, Slovenska Bistrica, Slovenija

⁴Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, Slovenija

Prejem rokopisa – received: 1998-11-10; sprejem za objavo – accepted for publications: 1998-12-03

Za osvajanje postopka toplega iztiskavanja kompozitov Al/SiC smo izbrali Duralcanov kompozit z oznako F3S.20S. Material vsebuje v kovinski osnovi (Al z 9% Si in 0,45% Mg) 20 vol.% delcev SiC in je primeren predvsem za tlačno litje in litje v pesek. Kompoziti te vrste pa bi bili lahko uporabni tudi v tople predelanem stanju za različne strojne dele, izpostavljene obrabi ali trenju. Na osnovi kemijske, mehanske in mikrostrukturne karakterizacije ter krivulj tečenja pri povišanih temperaturah in različnih hitrostih deformacije smo ugotovili optimalne razmere pri iztiskavanju kompozitov. Postopek iztiskavanja izbranega kompozita smo izvedli na industrijski iztiskalni stiskalnici 20 MN. Iz iztiskanih palic smo izdelali preizkušance primernih oblik za nadaljnje mikrostrukturne in mehanske preiskave. Del preizkušancev smo tudi toplotno obdelali. V prispevku je predstavljen postopek iztiskavanja ter mikrostrukturne značilnosti in mehanske lastnosti kompozita po iztiskavanju in toplotni obdelavi. Ugotovljene lastnosti kažejo na velike možnosti uporabe te vrste materialov na mnogih področjih vendar so predstavljeni tudi nekateri problemi tople predelave z iztiskavanjem in uporaba tega materiala zaradi njegove velike abrazivnosti in slabe obdelovalnosti.

Ključne besede: kompoziti Al/SiC, iztiskavanje, toplotna obdelava, mehanske lastnosti

For the development of hot extrusion and the investigations of its influence on properties, Duralcan's DC cast composite F3S.20S (Al alloy with 9% of Si and 0.45% of Mg and with 20 vol.% of SiC particles) was selected. This material is particularly suitable for pressure die or sand casting. However, near net shaped hot formed (extruded, forged) products for structural and wear applications would also be interesting. Therefore, extrudability, as well as properties of the extruded and heat treated composite are determined and discussed. On the basis of chemical, mechanical and microstructural characterization at elevated temperatures, the optimal conditions of hot extrusion were determined. The extrusion of DC cast billets was performed on a 20 MN industrial extrusion press. Samples for microstructural and mechanical investigations were then cut off and machined from extruded bars. A part of the samples was then also heat treated. The features of extrusion process, as well as microstructural characteristics and mechanical properties of extruded and heat treated composite are presented and discussed. The established mechanical properties of the composite show a large potential of this material in the field of civilian application. Problems concerning the wear of extrusion dies, as well as poor machinability of this material are also presented.

Key words: Al/SiC MMCs, extrusion, heat treatment, microstructure, mechanical properties

1 UVOD

Kompoziti s kovinsko (Al) osnovo (MMCs; angl.: Metal Matrix Composites) oziroma Al zlitine, ojačene s keramičnimi delci, so materiali, ki dajejo v primerjavi z današnjimi konvencionalnimi Al zlitinami najboljšo kombinacijo masa-lastnosti-cena. Zato pričakujemo, da bodo ti materiali v prihodnosti zamenjali del konvencionalnih materialov v veliko serijskih proizvodnjah, kot je na primer avtomobilska industrija in industrija drugih transportnih vozil. Danes so ti materiali že pričeli nadomeščati številne konvencionalne v izdelkih bele tehnike, računalnikih, avdio in video napravah ter opremi za šport in razvedrilo¹⁻⁵.

Ključni problem širše uveljavitve te vrste kompozitov, s katerim smo se srečevali ves čas, tudi pri izvajanju našega projekta (razrez in priprava okroglic za iztiskavanje, priprava metalografskih vzorcev in vzorcev za mehanske preizkuse), je slaba obdelovalnost⁶⁻⁹. Uspešno obdelovati jih je možno samo s PCD (angl.: polycrystalline diamond) in v zadnjem času tudi najnovejšimi 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 končne oblike z minimalno dodatno mehansko obdelavo (angl.: near-net shape technology). To so predvsem livarske tehnologije (konti+tlačno litje, infiltracija poroznih keramičnih predoblik) in pa postopki tople in hladne predelave (kovanje, valjanje, iztiskavanje)¹⁰⁻¹⁶, kjer pa je treba upoštevati, da so kompoziti s kovinsko osnovo (poleg Al- lahko tudi Mg- ali Ti-zlitine), ojačeni z 10-50 vol.% trdih (do 3000 HV) in zelo abrazivnih delcev ali vlaken SiC (lahko tudi Al₂O₃, AlN, TiB₂ itd.).

Eden od najučinkovitejših postopkov izdelave izdelkov zahtevnih oblik (profilov) je iztiskavanje (ekstruzija). Iztiskavanje zlitin na osnovi Al-zlitin je zelo razširjeno in poznano. Manj znano in zaenkrat še redko uporabljano pa je iztiskavanje kompozitov. Zato smo se pri projektu, ki ga je financiralo Ministrstvo za Znanost in Tehnologijo Republike Slovenije in tovarna Impol iz Slovenske Bistrice odločili osvojiti postopek iztiskavanja

izbranega kompozita Al/SiC, ki je eden najzahtevnejših materialov za vročo predelavo.

2 EKSPERIMENTALNO DELO

Najpogostejše vrste materialov, ojačenih z Al_2O_3 ali SiC (ojačitev za povišane delovne temperature), so gnetne Al-zlitine tipa 2014 in 6061 ter livarske Al-Si-zlitine (silumini s cca 7-12 mas.% Si) z oznako 359/SiC/xxp (oznaka po Aluminium Association MMC)¹⁷⁻²². Za naše RR delo, preizkuse in preiskave smo izbrali in nabavili materialu z oznako 359/SiC/20p enakovredni Duralcanov kompozit F3S.20S. Ta material je primeren predvsem za tlačno litje in litje v pesek. V literaturi¹⁰ pa smo našli tudi opise preizkusov vroče predelave (s kovanjem) tega materiala v zavorne diske. Nabavili smo pet okroglic premera 178 mm in dolžine 1000 mm. Te dimenzije so nam omogočile laboratorijske in industrijske preizkuse na ekstruzijski stiskalnici v tovarni Impol, Slovenska Bistrica. V **Tabeli 1** je imenska kemijska sestava kovinske osnove izbranega kompozita, ki nazivno vsebuje 20 vol.% delcev SiC povprečne velikosti $d_{50} \approx 12,8 \mu m$, in dejanska kemijska sestava kovinske osnove izbranega kompozita, določena na IMT. Za primerjavo podajamo še sestavo kovinske osnove kompozita Al/SiC s povečano vsebnostjo Cu, Ni in Mg, ki jo priporočajo za delo pri povišanih temperaturah.

2.1 Mikrostruktura in mehanska karakterizacija DC litega kompozita

Za uspešno izvedbo laboratorijskih in industrijskih preizkusov iztiskavanja smo v 1. fazi projekta izvedli mikrostrukturalno karakterizacijo nabavljenega materiala in določili njegove mehanske lastnosti. Zato smo morali dobavljene gredice najprej prerezati in na ustreznih mestih (rob, sredina, prečno in vzdolžno) izrezati vzorce materiala. Pri tem smo naleteli na nemalo problemov, saj praktično v Sloveniji nismo našli ustreznega stroja za razrez relativno velikih okroglic. Iskali smo v smeri konvencionalnega rezanja (tračne in krožne žage), rezanja z laserjem in plazmo (premajhne moči) ter žične erozije (prepočasi). Nazadnje nam je le uspelo material razrezati z vodnim curkom pod tlakom 3000 barov ob dodatku abrazivnega sredstva (olivin). Vendar rez ni bil kvaliteten, rezanje pa je bilo relativno počasno in drago.

Kljub vsemu smo s tem postopkom naredili kose materiala, primerne za nadaljnji razrez na ustreznih laboratorijskih strojih za pripravo metalografskih in mehanskih preizkušancev. Poleg valjčkov $\Phi 10 \times 12$ mm za določitev preoblikovalne trdnosti smo izdelali tudi standardne preizkušance za določitev natezne trdnosti ter vzorce za metalografske preiskave na optičnem in elektronskem mikroskopu (SEM).

Priprava metalografskih vzorcev je zahtevna zaradi specifičnosti materiala (trdi delci v mehki osnovi) in temu ustrezno je bilo treba izbrati primerne materiale za rezanje, brušenje in poliranje ter osvojiti postopek priprave vzorcev.

O ugotovljenih mikrostrukturnih in mehanskih lastnostih preiskovanega kompozita v litem stanju smo že poročali^{23,24}. Zato naj tu poudarimo le to, da je izbrani kompozit v litem stanju izrazil krhek in obrabno odporen material. Mehanske lastnosti kompozita v litem stanju so razvidne iz **tabele 2**, značilna lita mikrostruktura kompozita pa je prikazana na **sliki 1**.

Rezultati mikrostrukturnih in mehanskih preiskav litega kompozita so pokazali, da je kljub skeptičnosti že mogoče na industrijskem nivoju s kontinuiranim litjem in z istočasnim umešavanjem delcev SiC izdelati kompozite vrste Al/SiC ustrezne kakovosti. Zato je s temi materiali v prihodnosti treba resno računati. Naša usmeritev v spoznavanje tehnologij izdelave, litja, predelave in obdelave Al/SiC kompozitov Al/SiC te vrste je bila torej pravilna.

Mikrostrukturalna in mehanska karakterizacija nabavljenega kompozita sta nam v 2. fazi projekta omogočili uspešno pripravo zahtevnih in dragih industrijskih preizkusov iztiskavanja.

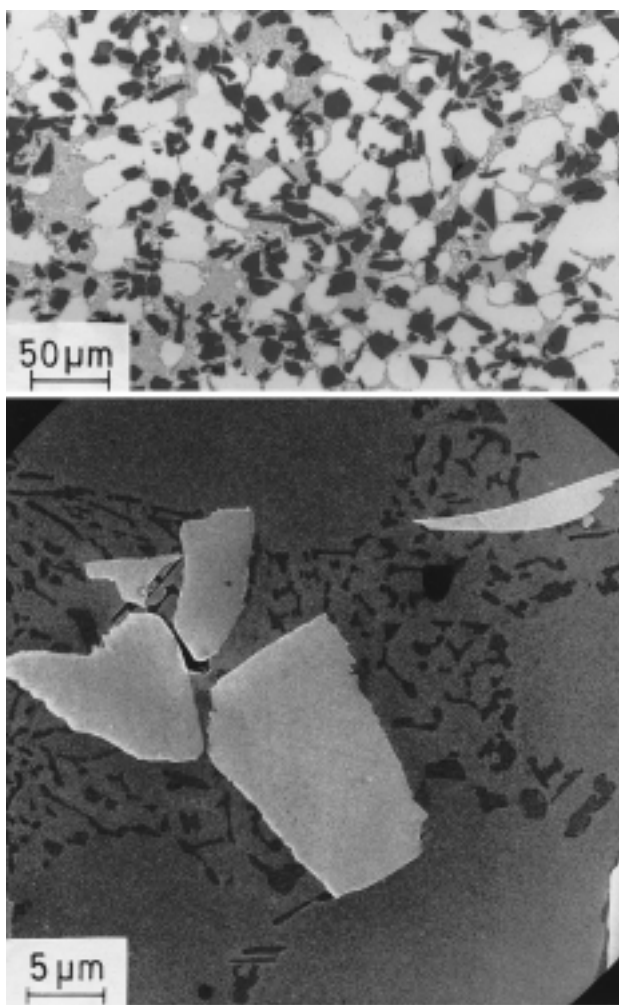
2.2 Določitev procesnih parametrov iztiskavanja

Realnih podatkov o preoblikovalni sposobnosti kompozitov Al/SiC pri povišanih temperaturah je v tuji literaturi relativno malo¹¹⁻¹³. Iz objavljenega pa sklepamo, da se kompoziti Al/SiC ali Al/ Al_2O_3 iztiskajo pri podobnih pogojih kot Al zlitine brez ojačitve. Hitrosti iztiskavanja so praktično enake, delovni tlaki so nekoliko višji, iztiskavanje pa poteka zadovoljivo pri iztiskalnih razmerjih med 16 in 45. Maksimalna sila oziroma tlak, potreben za iztiskavanje raste s hitrostjo iztiskavanja in pada z naraščajočo temperaturo. Delovni tlaki so

Tabela 1: Kemijska sestava kovinske osnove kompozitov Al/SiC vrste F3S in F3K ameriškega podjetja Duralcan
Table 1: Chemical composition of the investigated Al/SiC MMCs

Element	Si	Fe	Cu	Mg	Ni	Ti	Ostali	Al
Material	masni %							
F3S ⁽¹⁾	8,5-9,5	≤ 0,2	≤ 0,2	0,45-0,65	-	≤ 0,2	≤ 0,1	Ostanek
F3S ⁽²⁾	7,1-7,2	0,1	0,008	0,46	0,007	0,079	0,004 Mn	⁽³⁾
F3K	9,5-10,5	≤ 0,3	2,8-3,2	0,8-1,2	1,0-1,5	≤ 0,2	≤ 0,1	Ostanek

⁽¹⁾ Specifikacija proizvajalca, ⁽²⁾ analiza IMT, ⁽³⁾ Al v kovinski osnovi in 20 vol.% delcev SiC, ki služijo kot ojačitev



Slika 1: Posnetka (a) z optičnim mikroskopom (belo: α_{Al+Si} , sivo: eutektik, črno: delci SiC) in (b) SEM (svetlo siva osnova: α_{Al+Si} , temno sivo: Si v eutektiku, belo: delci SiC) mikrostrukture litega kompozita Al/SiC v jedru okroglice z lepo vidno razporeditvijo ojačitvene faze v eutektiku

Figure 1: Microstructure of the Al/SiC composite in the core of the DC as cast billet a) optical microscope and b) SEM micrograph

približno 10-20% višji pri kompozitnem materialu. Za naš material ni bilo na razpolago literaturnih podatkov, zato je bilo treba parametre določiti eksperimentalno. V ta namen smo izdelali že omenjene preizkusne valjčke, pri katerih smo ugotovili preoblikovalne tlačne trdnosti v temperaturnem območju 420-470°C in v območju pričakovanih hitrosti deformacije (0.3-3 s⁻¹)¹¹.

Glavni problem iztiskavanja kompozitov je že nekajkrat omenjena slaba obdelovalnost kompozitov, ki pride do izraza tudi med pripravo okroglic za iztiskavanje (rezanje na dimenzije) in kot obraba orodja med iztiskavanjem. Konvencionalna orodna jekla za orodja niso primerna. V literaturi^{11,12} priporočajo (še posebej za zahtevne oblike) uporabo PM orodnih jekel, prevlečenih s TiN/TiC po CVD postopku, ali karbidnih trdin. V našem primeru so bili preizkusi na industrijski stiskalnici kratkotrajni, iztiskavali pa smo najeno-

stavnejšo možno obliko glede na razpoložljivo orodje. Zato smo predvideno oplasčenje izhodnih okroglic z zaščitnim plaščem iz mehkega Al opustili. Kot osnova za preizkuse na industrijski stiskalnici so nam rabile tudi izkušnje, pridobljene med preizkusi na pilotni (4 MN) stiskalnici na TU v Clausthalu, Nemčija, ki so bili opravljeni med realizacijo predhodnega temeljnega projekta²⁵.

2.3 Izračun potrebne sile za iztiskavanje

Preoblikovalna trdnost k_f je osnovno merilo za določitev sposobnosti materiala za iztiskavanje in s tem določitev potrebne sile iztiskavanja. Poznanje le-te pa nam omogoči izbiro ustrezne stiskalnice. Preoblikovalna trdnost materiala je odvisna od parametrov iztiskavanja: temperature, deformacije, ki jo določa stiskalniško razmerje ali razmerje iztiskavanja δ in hitrosti deformacije, ki je zopet odvisna od stiskalniškega razmerja ($\delta = (d_0/d_1)^2$) in hitrosti gibanja bata ekstruzijske stiskalnice. Med Zener-Hollomon-ovim parametrom Z , ki se pogosto uporablja za oceno sposobnosti materiala za iztiskavanje, in preoblikovalno trdnostjo k_f je¹¹ predložena naslednja odvisnost:

$$Z = A(\sinh \alpha k_f)^n \quad (1)$$

V enačbi (1) so A , α in n materialne konstante, Z pa je odvisen od hitrosti deformacije $\dot{\phi}$ in temperature T :

$$Z = \dot{\phi} \cdot \exp(\Delta H/RT) \quad (2)$$

pri čemer je ΔH aktivacijska energija za material, ki je izpostavljen specifični deformaciji (določenemu procesu deformacije), in R je splošna plinska konstanta. Ker se hitrost deformacije stalno spreminja med iztiskavanjem, lahko določimo (ocenimo) le neko povprečno hitrost deformacije:

$$\dot{\phi}_m = (4 d_0^2 v_r \tan \Phi) / ((d_0 d_1)^{3/2}) \quad (3)$$

V enačbi (3) so: d_0 izhodni premer okroglice, d_1 premer iztiskavane palice, v_r hitrost bata stiskalnice in Φ mrtvi kot iztiskavanja, ki ga določa oblika orodja. Ta je za ravno (nekonično) oblikovano orodje podan z empirično enačbo:

$$\Phi = 54,1 + 3,45 \ln \delta \quad (4)$$

V našem primeru lahko za izračun uporabimo naslednje vrednosti: $d_0 \approx 180$ mm, $d_1 \approx 38$ mm, $\delta \approx 22,5$, iz česar izhaja po enačbi (4), da je $\Phi \approx 64,84^\circ$ in po enačbi (3) za izbrano povprečno hitrost bata med našimi preizkusi $v_r \approx 5,6$ mm/s, izračunana povprečna hitrost deformacije $\dot{\phi}_m \approx 2,7$ s⁻¹. Z vrsto tlačnih preizkusov pri različnih temperaturah lahko določimo konstante, nastopajoče v enačbi (1), in preoblikovalno trdnost k_f v odvisnosti od temperature.

Iz elementarne analize¹⁶ lahko izračunamo idealno delo, potrebno za deformacijo, izvršeno med iztiskavanjem:

$$W_{id} = V k_f \varphi \quad (5)$$

in od tod idealno silo, potrebno za iztiskavanje okroglice izbranih dimenzij:

$$F_{id} = W_{id}/L = A_0 k_f \varphi \quad (6)$$

V enačbah (5) in (6) sta V prostornina oziroma A_0 presek iztiskavane okroglice in φ logaritmična deformacija:

$$\varphi = \ln(L_f/L_0) = \ln(d_0/d_f)^2 \quad (7)$$

pri izbrani začetni dolžini okroglice L_0 in končni dolžini ekstrudirane palice L_f .

Iz preizkusov je določena preoblikovalna trdnost kompozita $k_f \approx 100$ MPa pri temperaturi 450°C in hitrosti deformacije $\dot{\varphi} \approx 3$ s⁻¹. Iz enačb (6) in (7) lahko tako izračunamo logaritmično deformacijo ($\varphi \approx 3,1$) in idealno silo, potrebno za iztiskavanje kompozita $F_{id} \approx 7,9$ MN.

Poleg idealnega dela, potrebnega za homogeno deformacijo med iztiskavanjem, je treba med iztiskavanjem premagati tudi strižne deformacije, nastale v coni deformacije in zaradi trenja v orodju (angl.: redundant work), ter trenje, nastalo med okroglico in posodo (angl.: container), v kateri se nahaja okroglica. Tako lahko zapišemo, da je celotno delo W_t , potrebno za iztiskavanje sestavljeno iz idealnega dela W_{id} , dela potrebnega za premagovanje strižne deformacije W_s in dela za premagovanje trenja W_f :

$$W_t = W_{id} + W_s + W_f \quad (8)$$

W_s je težko določiti teoretično in ga zato določimo najpogosteje eksperimentalno v povezavi z izračunanim idealnim delom ter ga izrazimo s faktorjem učinkovitosti deformacije η_f oziroma odpornostjo proti deformaciji k_w :

$$\eta_f = W_{id}/(W_{id} + W_s) \quad (9)$$

$$W_{id} + W_s = W_{id}/\eta_f = V \varphi (k_f/\eta_f) = V \varphi k \quad (10)$$

Dodatno delo za premagovanje trenja okroglice, ki potuje po posodi med iztiskavanjem pa lahko izračunamo z enačbo:

$$W_f = \pi d_0 L^2 \mu_f k_f \quad (11)$$

Pri nemazanem iztiskavanju brez srajčke in lepljenju so lahko koeficienti trenja μ_f zelo visoki in se gibljejo med 0,35 in 0,45. Pri dobrem mazanju posode (grafit) so koeficienti trenja mnogo nižji (0,05-0,15). Ob upoštevanju srednjih vrednosti ($\mu_f = 0,1$ in $L=165$ mm) lahko za naš primer ocenimo delo W_f na $0,15 \cdot 10^6$ Nm oziroma silo, potrebno za premagovanje trenja, $F_f \approx 0,91$ MN.

Eksperimentalnih podatkov za faktor učinkovitosti deformacije η_f oziroma odpornost proti deformaciji k_w kompozitnih materialov Al/SiC pri iztiskavanju ni. Upoštevač^{11,12}, da je sila za iztiskavanje kompozitov cca 20-45% večja (odvisno od vsebnosti ojačitvene faze) od sile, potrebne za iztiskavanje neojačenega materiala, smo η_f ocenili na 0,4. Iz enačbe (10) smo lahko potem

izračunali W_s oziroma ocenili maksimalno silo F_t , potrebno za iztiskavanje kompozita:

$$F_t = A_0 k_w \varphi + F_f \approx 20,7 \text{ MN} \quad (12)$$

V izračunu smo upoštevali maksimalno s preizkusi ugotovljeno vrednost tlačne preoblikovalne trdnosti. Tudi v računu upoštevana hitrost deformacije in faktor učinkovitosti sta relativno velika. Zato smo na osnovi tega izračuna, upoštevajoč dane možnosti, za preizkuse izbrali industrijsko stiskalnico 20MN. Kot bomo videli v nadaljevanju, so bile sile, potrebne za iztiskavanje, nižje od izračunane. O nižjih vrednostih sile, potrebne za iztiskavanje kompozitov (Al/Al₂O₃), poročajo tudi drugi raziskovalci^{11,12}. To pripisujejo razliki med privzetimi konstantnimi vrednostmi za hitrost deformacije, preoblikovalno trdnost in trenje, ki pa se v realnem procesu iztiskavanja stalno spreminjajo.

2.4 Preizkusi vročega iztiskavanja kompozita Al/SiC

Na osnovi izračunov in preiskav smo izvedli industrijske preizkuse vročega iztiskavanja izbranega kompozita v tovarni Impol na starejši ekstruzijski stiskalnici Schloeman 20 MN. Izhodne neposredno (DC; angl.: Direct Continuous) lite okroglice smo razrezali na krožni žagi z rezilom iz karbidne trdine na dolžino, primerno za iztiskavanje (cca 330 mm). Preizkuse iztiskavanja kompozita Al/SiC smo izvajali v temperaturnem območju med 420 in 480°C in pri hitrostih 2,8 do 7 mm/s. Izbrano razmerje iztiskavanja je bilo ≈ 22 . Predgrevanje okroglic na temperaturo iztiskavanja smo izvedli z induktivnim ogrevanjem. Orodje in recipient sta bila med preizkusi predgreta na približno 380°C. Orodje (matrica) za iztiskanje je bilo izdelano iz orodnega jekla Utop Mo1. Z ozirom na opaženo obrabo orodja proti koncu preizkusov bi bila v prihodnje priporočljiva uporaba trdih prevlek ali karbidnih trdin. Orodje je bilo ravno in torej ni bilo izvedeno v obliki konusa, kar bi bilo glede na ugotovljeno obrabo orodja in sile iztiskavanja priporočljivo. Orodje med iztiskavanjem nismo mazali, kar bi bilo v primeru redne proizvodnje nujno. Sila oziroma tlak sta se med iztiskavanjem kontinuirano spreminjala, kar je značilnost uporabljenega postopka (direktno iztiskavanje). Po izrazitem začetnem maksimumu se je tlak ustalil na določeni vrednosti iztiskavanja. Delovni (maksimalni - angl.: peak pressure) tlaki iztiskavanja so bili med 450 in 575 MPa (odgovarjajoče sile iztiskavanja so bile 13,8 do 16,2 MN), stabilni tlaki (angl.: running pressure) pa so bili cca 30-40 % nižji. Največji tlaki so bili doseženi pri najnižji temperaturi iztiskavanja. Te vrednosti so nekoliko višje, kot so tlaki, potrebni za iztiskavanje konvencionalnih gnetnih Al-zlitin.

Preizkusi iztiskavanja so potekali brez zapletov in v okviru pričakovanj glede na laboratorijske preiskave in preizkuse. Premer recipienta (Φ 190 mm) je bil nekoliko večji, kot je bil premer okroglic ($\Phi \approx 180$ mm), kar pa ni

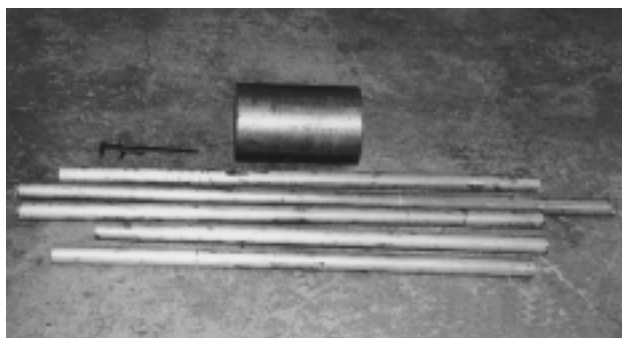
bistveno vplivalo na potek preizkusov. Površina iztiskancev je bila relativno gladka in brez večjih napak. Najslabšo kakovost površine je imel zadnji iztiskanec. To lahko pripišemo obrabi orodja in tudi najnižji delovni temperaturi.

Število preizkusov je bilo premajhno za natančno določitev optimalne hitrosti iztiskavanja in odvisnosti temperatura-tlak-hitrost. Žal visoka cena kompozita in velikost vložka (masa ene okroglice je bila cca 70 kg) ni omogočala večjega števila preizkusov v okviru zastavljenega programa. Kljub vsemu smo z industrijskimi preizkusi dokazali, da je možna uspešna vroča predelava kompozitov Al/SiC z iztiskavanjem. Na **sliki 2** je prikazan posnetek lite okroglice kompozita Al/SiC in iz nje izdelane palice z vročim iztiskavanjem.

Preizkusi iztiskavanja izbranega kompozita Al/SiC so pokazali, da je v tovarni Impol možno uvesti (ob ekonomsko upravičenemu tržnemu interesu) nov program - iztiskavanje kompozitov tipa Al/SiC ali Al/Al₂O₃ v okviru obstoječe proizvodnje. Zato je na razpolago obstoječa oprema in znanje. Potrebna je le večja tehnološka disciplina in strog nadzor procesa zaradi narave te vrste materialov (zahtevno recikliranje oziroma ločeno sortiranje, velika obraba konvencionalnih orodij, težaven razrez in mehanska obdelava). Vse to pa seveda vodi v popolnoma drug cenovni razred iztiskancev na osnovi Al-zlitin, ojačenih s keramičnimi delci.

2.5 Mikrostruktura in mehanska karakterizacija kompozita v iztiskovanem in toplotno obdelanem stanju

Iz iztiskanih palic premera $\Phi 38$ mm, ki smo jih izdelali na industrijski stikalnici, smo izrezali vzorce za izdelavo mehanskih preizkušancev (samo vzdolžno zaradi majhnega premera palic). Pri razrezu in pripravi preizkušancev smo se srečali s podobnimi problemi slabe obdelovalnosti materiala kot pri razrezu litih okroglic. Poleg valjčkov $\Phi 10 \times 12$ mm za določitev preoblikovalne tlačne in natezne trdnosti smo izdelali tudi standardne preizkušance za določitev natezne



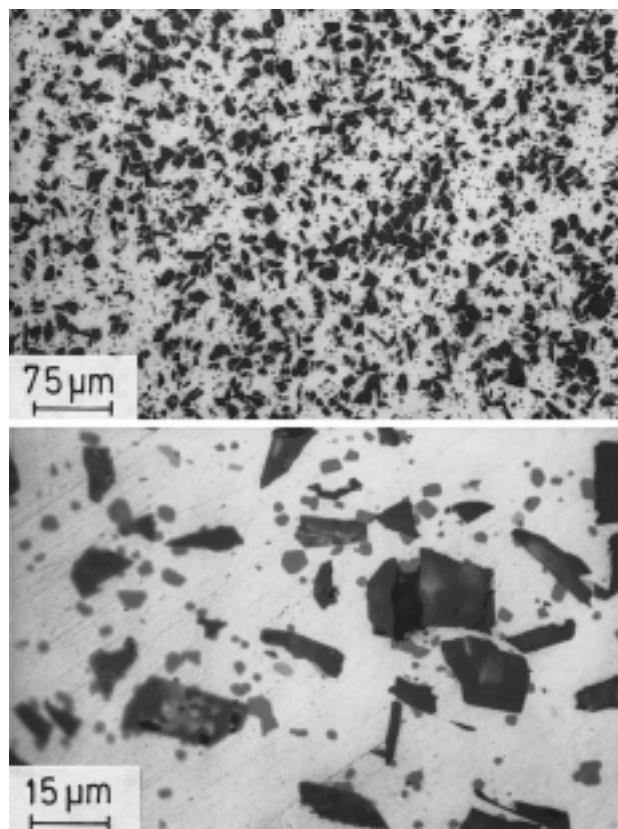
Slika 2: Posnetek neposredno ulite okroglice kompozita Al/SiC dimenzij $\approx \Phi 180 \times 330$ mm in z vročim iztiskavanjem izdelanih palic premera $\Phi 38$ mm

Figure 2: A DC as cast billet and the resulting extruded bars of diameter of $\approx \Phi 38$ mm

trdnosti pri sobni in povišanih temperaturah ter vzorce za korozijske ter metalografske preiskave na optičnem in elektronskem mikroskopu. Priprava metalografskih vzorcev je bila podobno zahtevna kot priprava vzorcev iz litega kompozita. Del iztiskanih vzorcev smo tudi toplotno obdelali. Uporabljena je bila standardna toplotna obdelava (T6, 545°C/zrak/8ur/H₂O in umetno staranje pri 150°C/zrak/8ur) v laboratorijski mufelni peči.

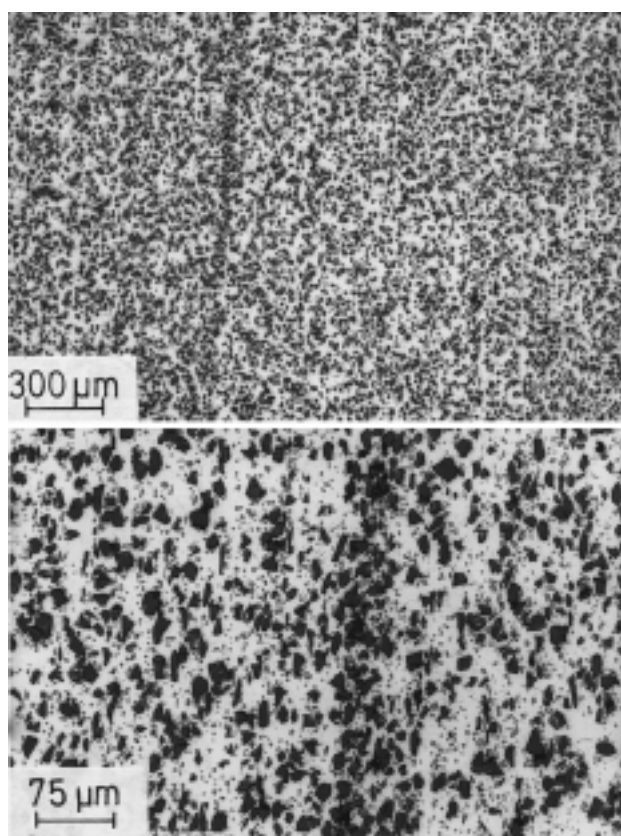
3 REZULTATI IN DISKUSIJA

Mehanske lastnosti preiskovanega kompozita so se po iztiskavanju bistveno spremenile (**Tabela 2**). Natezna trdnost in meja plastičnosti kompozita sta se zmanjšali, skladno s tem pa je precej narasla duktilnost (raztezek in kontrakcija) kompozita. Tudi trdota kompozita po iztiskavanju je bila ustrezno nižja. Izrazito krhek lit kompozit je postal po iztiskavanju duktilen. To prikažejo tudi SEM-posnetki prelomnih površin nateznih preizkušancev (**slika 5a**), iz katerih je razviden značilen jamičasti prelom kovinske osnove s posameznimi ravnimi ploskvami (delci SiC), kjer se je pričel prelom.



Slika 3: Mikrostruktura kompozita Al/SiC po vročem iztiskavanju **a)** pravokotno na smer iztiskavanja in **b)** v smeri iztiskavanja z dobro vidnim prelomom delca SiC; zmesni kristali α_{Al} (belo), drobni globularni delci Si (svetlo sivo) in delci SiC (temno sivo)

Figure 3: Optical micrograph, Al/SiC composite after hot extrusion, **a)** transverse to the direction of hot extrusion and **b)** in the direction of hot extrusion with well visible fracture of SiC particles



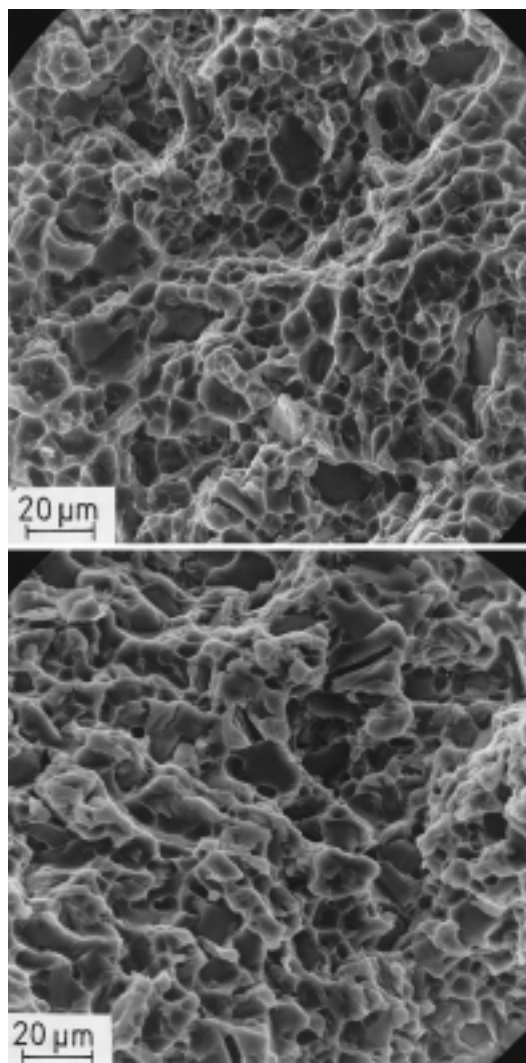
Slika 4: Mikrostruktura kompozita Al/SiC po vročem iztiskavanju a) pri 35× povečavi in b) pri večji (120×) povečavi v smeri iztiskavanja z rahlo trakavostjo delcev SiC.

Figure 4: Al/SiC composite after hot extrusion, in the axial direction with slightly banded structure of the reinforcement (SiC particles). Optical micrographs at magnifications: a) 35 × and b) 120×

Izboljšanje duktilnosti kompozita po iztiskavanju lahko pripišemo povečanju kohezijske vezi med delci SiC in kovinsko matrico zaradi deformacije, spremenjeni mikrostrukturi kovinske matrice, zmanjšanju povprečne velikosti delcev SiC ter zmanjšanju poroznosti kompozita.

V skladu s spremembo mehanskih lastnosti se je po iztiskavanju v celoti spremenila tudi mikrostruktura kompozita Al/SiC. Po iztiskavanju je v celoti izginil liti evtektik. Kovinska osnova kompozita je bila sestavljena iz zmesnih kristalov α_{Al} in majhnih (1-4 μm) krogličastih delcev Si, ki so nastali iz evtektika (**Slika 3 a in b**). Zaradi deformacije med iztiskavanjem je prišlo do drobljenja posameznih delcev SiC (**Slike 3 b ter 6 a in b**) in zato tudi zmanjšanja njihove povprečne velikosti. V smeri iztiskavanja je bilo na posameznih mestih opaziti tudi izrazito trakavost oziroma teksturiranost delcev SiC (**Sliki 4 a in b**). Z iztiskavanjem smo tako dobili anizotropen material, katerega lastnosti se logično med seboj razlikujejo glede na smer iztiskavanja.

Po toplotni obdelavi so se trdota, natezna trdnost in meja tečenja kompozita Al/SiC povečale, njegova duktilnost pa ustrezno zmanjšala, kar je bilo razvidno

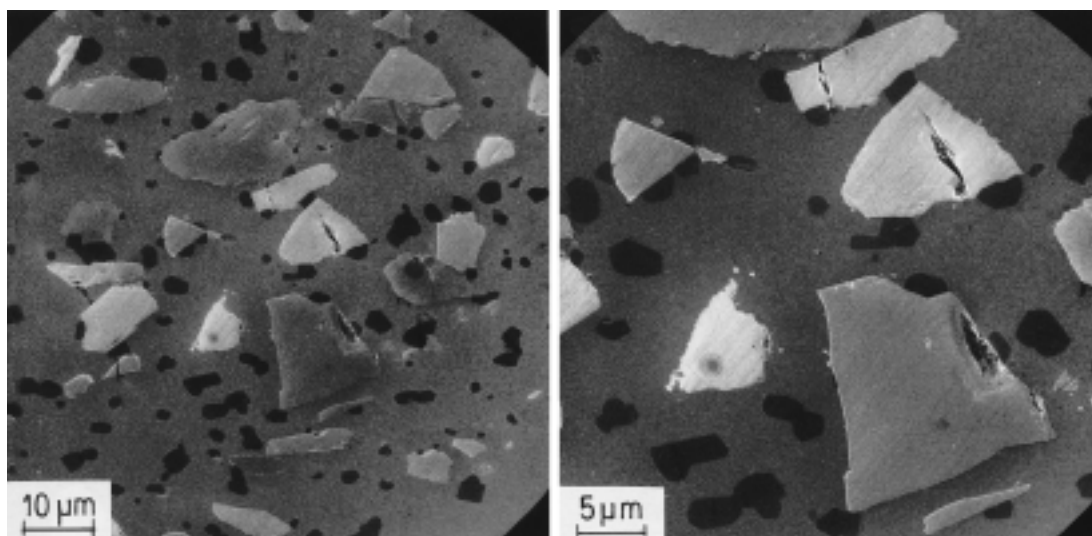


Slika 5: SEM posnetka prelomne površine kompozita Al/SiC a) v iztiskanem in b) v toplotno obdelanem stanju

Figure 5: SEM microphotographs. Fracture surface of tensile specimens a) as extruded and b) as extruded and then heat treated Al/SiC composite

tudi s SEM-posnetkov (**Slika 5 b**) prelomnih površin nateznih preizkušancev. Presenetljivo pa je, da se mikrostruktura toplotno obdelanega kompozita Al/SiC, vidna pri izbranih povečavah optičnega in elektronskega mikroskopa, ni bistveno spremenila (**Sliki 6 a in b**). Tako kot v iztiskanem stanju je bila tudi v toplotno obdelanem stanju kovinska osnova kompozita sestavljena iz zmesnih kristalov α_{Al} in nekoliko manjših (v povprečju 1-3 μm) krogličnih delcev Si. Avtomatska analiza slike metalografskih posnetkov z optičnega mikroskopa je pokazala, da je srednji enakovredni kroglični polmer Si delcev 1,8 μm in njihova vsebnost v kovinski matrici 11,6 vol.%.

Bistvena sprememba mehanskih lastnosti kompozita Al/SiC po toplotni obdelavi, ki je nismo pričakovali na osnovi spremembe mikrostrukture, vodi do sklepa, da so spremembe mikrostrukture kovinske osnove zaradi



Slika 6: SEM-posnetka mikrostrukture kompozita Al/SiC v iztiskanem in toplotno obdelanem stanju; zmesni kristali α_{Al} (siva osnova), drobni globularni delci Si (črno) in delci SiC (belo do svetlo/temno sivo) z vidnimi poškodbami

Figure 6: SEM micrographs, Al/SiC composite after hot extrusion and heat treatment, transverse direction; α_{Al} solid solution (base), small globular Si particles (black) and SiC particles (light to dark grey)

toplotne obdelave submikrometerske narave. Splošno znano je namreč, da se med toplotno obdelavo (izločevalno utrjanje) tvorijo drobni submikrometerski izločki (v našem primeru najverjetneje Mg_2Si), ki močno vplivajo na utrditev kovinske matrice. Zato, da bi dokazali prisotnost takšnih izločkov bi bilo treba izvesti še dodatne preiskave s presevnim elektronskim mikroskopom in AES-analizatorjem pri večjih povečavah ter rentgenska strukturna analiza. V **tabeli 2** je podan primerjalni pregled doseženih povprečnih mehanskih lastnosti kompozita Al/SiC v vseh treh stanjih pri sobni temperaturi.

Te vrste kompozitov se uporabljajo predvsem pri povišanih temperaturah, zato smo določili tudi mehanske lastnosti kompozita v temperaturnem območju med 20 in 300°C. V **tabeli 3** so prikazane ugotovljene povprečne mehanske lastnosti kompozita Al/SiC pri povišanih temperaturah za iztiskano in toplotno obdelano stanje. Na **sliki 7** pa so prikazane natezne preoblikovalne trdnosti pri 100, 200 in 300°C, določene na napravi Gleeble 1500 pri hitrosti deformacije 0,3 s⁻¹, iz katerih je

razvidno, kako se z naraščajočo temperaturo povečuje preoblikovalna sposobnost iztiskanega kompozita in pada njegova uporabnost pri povišanih temperaturah.

4 PRIMERJAVA MEHANSKIH LASTNOSTI KOMPOZITA Al/SiC S KONVENCIONALNIMI Al ZLITINAMI

Pri sobni temperaturi sta povprečna natezna trdnost in meja plastičnosti iztiskanega kompozita Al/SiC nižji, raztezek pa podoben kot pri kokilno uliti zlitini AlSi7Mg ($R_m=250-340$ MPa, $R_{p0,2}=200-280$ MPa, $A=5-9\%$). Iztiskavanje kompozita pri nižjih temperaturah poveča mehanske lastnosti. Po viru²⁶ so mehanske lastnosti iztiskanih palic iz zlitine AlSi7Mg0,3 ($R_m=270$ MPa, $R_{p0,2}=192$ MPa in $A=15\%$) tudi nekoliko višje od doseženih. Pri podobnih razmerah pa bi morali doseči boljše lastnosti raziskovanega kompozita, ker je material disperzijsko utrjen z delci SiC in ima več Mg. Vzrok zato je verjetno neoptimalen proces iztiskavanja, prepočasno ohlajanje kompozita po iztiskavanju ali pa bistveno višja temperatura iztiskavanja.

Tabela 2: Mehanske lastnosti preiskovanega kompozita Al/SiC pri sobni temperaturi

Table 2: Room temperature mechanical properties of the investigated Al/SiC composite

Materialne lastnosti	Trdota po Brinellu	Meja tečenja $R_{p0,2}$ (MPa)	Natezna trdnost R_m (MPa)	Raztezek A (%)	Kontrakcija Z (%)
Stanje materiala					
DC lit	105-110	$R_{p0,2} \approx R_m$	255-275	< 0.5	< 0.5
DC lit+T6 ^{S22C}	n.p.	200	276	6	n.p.
Iztiskano	67-70	141-161	193-204	10-13	15-21
Toplotno obdelano	121-156	281-315	361-379	3-6	8

n.p. ... ni podatka

Tabela 3: Mehanske lastnosti pri povišanih temperaturah, iztiskanega in toplotno obdelanega kompozita Al/SiC**Table 3:** Average tensile properties of the extruded, as well as extruded and heat treated composite at elevated temperatures

Temperatura preizkušanja (°C)	Iztiskano (420°C)			Iztiskano + toplotno obdelano (T6)		
	R _{p0,2} (MPa)	R _m (MPa)	A (%)	R _{p0,2} (MPa)	R _m (MPa)	A (%)
20	161	200	12.5	301.5	365	5.5
100	160	195	10	300	352	5
200	135	167	8.5	285	316	5
300	90	100	19	168	173	8

S toplotno obdelavo smo občutno izboljšali mehanske lastnosti, ki presegajo lastnosti vseh tehničnih livarskih zlitin (GK-: AlSi10Mg, AlSi10MgCu, AlSi9Mg, AlCu4Ti, AlCu4TiMg), prav tako pa tudi nizko legiranih gnetnih zlitin, skupaj z zlitino AlZn4,5Mg-T6 (R_m=345 MPa, R_{p0,2}=305 MPa in A=10%). To pomeni, da je po mehanskih lastnostih raziskani material primeren za napetostno in obrabno obremenjene dele konstrukcij.

Primerjava doseženih mehanskih lastnosti preiskovanega kompozita pri povišanih temperaturah z zlitino AlSi7Mg0,5 (A 357.0, M.H.8E) v toplotno obdelanem stanju (T62) kaže pri našem materialu pri vseh temperaturah boljše lastnosti, kar lahko pripišemo dodatnemu disperzijskemu utrjanju z delci SiC. Primerjave s temperaturno obstojnimi zlitinami AlFe1,7 ali pa AlFe8,5V1,2Si1,7 kažejo v večini primerov, da smo se z našim materialom približali tem lastnostim²⁷.

Po viru²² so dosežene trdnostne lastnosti za lit Duralcanov kompozit F3K.20S-T6 (AlSi10CuMgNi+20 vol.%SiC) boljše (R_m=372 MPa, R_{p0,2}=372 MPa), kot smo jih dosegli z našim materialom, vendar pa je duktilnost materiala bistveno slabša (A=0%). Z uporabo Al- osnove, ki je enaka značilnim konvencionalnim

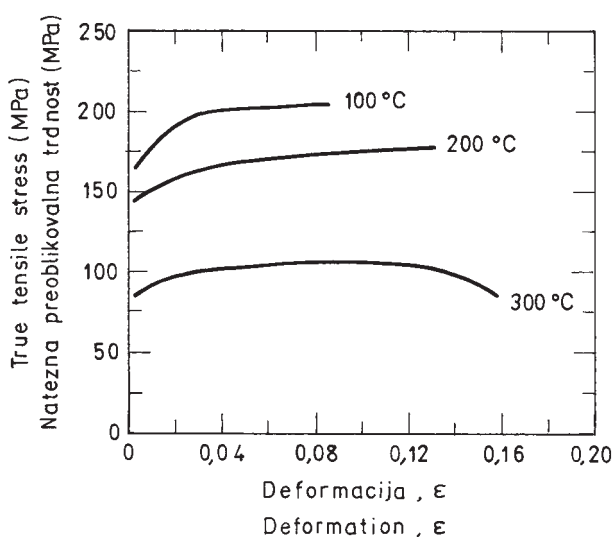
gnetnim zlitinam (6061, 7090 ali 8090), pa je možno z dodatkom Al₂O₃ ali delcev SiC ter dodatno toplotno obdelavo doseči še mnogo boljše mehanske lastnosti (na primer R_m=405 MPa, R_{p0,2}=365 MPa in A=3 % pri iztiskanem kompozitu 6061+20 vol.%Al₂O₃+T6). Od tod sledi, da bi bilo smotrno program iztiskavanja kompozitov razširiti tudi na področje gnetnih zlitin.

Te vrste kompozitov, izdelane po postopkih metalurgije prahov (PM), so še boljše²², ker ni take omejitve pri velikosti in vsebnosti ojačitvene faze (na primer R_m=448 MPa, R_{p0,2}=397 MPa in A=4% pri iztiskanem kompozitu PM 6061+20 vol.%SiC+T6 ali celo R_m=627 MPa, R_{p0,2}=586 MPa in A=10 % pri iztiskanem kompozitu PM 7090+30 vol.%SiC+T6), a je njihova izdelava seveda mnogo dražja.

5 SKLEPI

V okviru projekta smo razvili tehnologijo iztiskavanja izbranega kompozita Al/SiC. Na osnovi mikrostrukturnih in mehanskih preiskav kompozita Al/SiC v litem stanju smo določili pogoje iztiskavanja, ki se ne razlikujejo bistveno od tistih za iztiskavanje konvencionalnih gnetnih Al- zlitin. Glavna težava pri pripravi okroglic za iztiskavanje in pripravi vzorcev za preiskave je zelo slaba obdelovalnost in abrazivnost kompozita. Ta se izraža tudi v slabši vzdržljivosti orodij za iztiskavanje. Orodja morajo biti zato primerne oblike, izdelana iz posebnih materialov in primerno mazana med iztiskavanja.

Po preizkusih iztiskavanja smo mikrostrukturno in mehansko karakterizirali izdelani kompozit Al/SiC v iztiskanem in toplotno obdelanem stanju. Preiskave so pokazale bistveno izboljšanje lastnosti kompozita po toplotni obdelavi. Dosežene lastnosti preiskovanega kompozita so po iztiskavanju in toplotni obdelavi boljše, kot so lastnosti znanih livarskih Al-zlitin ter večine konvencionalnih nizko legiranih gnetnih Al-zlitin. Izdelani kompozit je torej primeren konstrukcijski material za napetostno in obrabno obremenjene dele. Zato lahko sklenemo, da smo uspešno osvojili izdelavo enostavnih profilov kompozita Al/SiC s postopkom vročega iztiskavanja. Pri prenosu razvite tehnologije v redno proizvodnjo pa bo seveda treba upoštevati ugotovitve glede slabe obdelovalnosti kompozita, njegovo skladiščenje, sortiranje in reciklažo.

**Slika 7:** Natezne preoblikovalne trdnosti iztiskanega kompozita Al/SiC pri 100, 200 in 300°C in hitrosti deformacije 0,3 s⁻¹**Figure 7:** Tensile true stress-strain curves of the investigated DC cast Al/SiC at deformation rate of 0,3 s⁻¹ and at different temperature

V okviru projekta je bilo raziskovanje usmerjeno predvsem na razvoj tehnologije iztiskavanja izbranega kompozita Al/SiC, ki je sicer prvenstveno namenjen litju. V prihodnosti bi bilo zato smotno na osnovi pridobljenega znanja in izkušenj s tega projekta uvesti tudi proizvodnjo kompozitov Al/SiC s kovinsko matrico značilnih gnetnih Al-zlitin.

V prihodnosti je treba poleg osvajanja tehnologije iztiskavanja za razširitev proizvodnega programa tovarne osvojiti tudi tehnologijo kovanja te vrste materialov, ki zagotavlja izdelavo izdelkov zahtevnih oblik brez drage poznejše mehanske obdelave.

Žal izdelava kompozitov Al/SiC z neposrednim umešavanjem delcev SiC v talino iz Al-zlitine med kontinuiranim litjem v bloke za zdaj omogoča pripravo kompozitov z največ do 25 vol.% relativno velikih (10-60 μm) delcev SiC. Glavni dejavnik, ki omejuje umešavanje večje količine drobnejših delcev, je slaba omočljivost SiC s tekočim Al. Ker so za izboljšanje mehanskih lastnosti materiala odločilni predvsem submikrometerski izločki, izboljšanje mehanskih lastnosti z disperzijskim utrjanjem nima, v celoti gledano, zaželenega učinka. Naše preiskave so pokazale, da je bistveno izboljšanje lastnosti možno samo s primerno toplotno obdelavo (izločevalnim utrjanjem) kovinske matrice, ki povzroči tvorbo izločkov primerne velikosti. Ti so sposobni blokirati gibanje in plezanje dislokacij ter med segrevanjem materiala preprečiti gibanje kristalnih mej in rast zrn.

Disperzijsko utrjanje z relativno velikimi delci SiC pa je le dodatna utrditev, ki poveča trdoto in trdnost, izboljša obrabno odpornost in toplotno stabilnost, a žal močno zmanjša duktilnost materiala. Poleg dragih PM-postopkov je "in-situ" sinteza kompozitov (Al-TiN, Al-TiC itd.) ena od rešitev, ki se danes v svetu razvija in močno uveljavlja, saj omogoča disperzijsko utrjevanje z zelo drobnimi izločki nastalimi neposredno med sintezo kompozita.

6 LITERATURA

- ¹ B. Terry, G. Jones: Metal Matrix Composites, Elsevier Advanced Technology, Elsevier Science Publishers Ltd., Oxford, Anglija, **1990**
- ² K. U. Kainer: Metalische Verbundwerkstoffe, DGM-Informationsgesellschaft Verlag, Oberursel, Nemčija, **1994**
- ³ S. Pickering: Bicycle industry takes MMC for a ride, *Metal Powder Report*, 50 (1995) 6, 30-33
- ⁴ METALBA S.p.A.: The use of composites in sports articles, komercialni katalog Metalba S.p.A., Bassano del Grappa, Italija, **1996**
- ⁵ F. L. Matthews, R. D. Rawlings: Composite Materials: Engineering and Science, Chapman & Hall, London, Anglija, **1994**
- ⁶ H. S. Oberoi: Machining of metal matrix composites with diamond tools, *Cutting Tool News*, junij (1996) 8-10
- ⁷ C. T. Lane: Machining characteristics of particle-reinforced aluminium, *Duralcan's reports*, (1996) 195-201
- ⁸ D. Biermann: Mechanische Bearbeitung von Leichtmetall-Verbundwerkstoffen, Institut für Spanende Fertigung Berichte, University of Dortmund, Nemčija, **1996**, 1-26
- ⁹ A. R. Chambers: The machinability of light alloy MMCs, *Composites, Part A*, 27A (1996) 2, 143-147
- ¹⁰ 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
- ¹¹ V. B. Dickson: Further developments in the extrusion of aluminium based metal matrix composites, *Extrusion Technology '96*, Chicago, ZDA, maj (1996) 1-31
- ¹² P. W. Jeffrey, S. Holcomb: Extrusion of particulate-reinforced aluminium matrix composites, 1990, *Duralcan reports*, 1990, 181-186
- ¹³ S. Brusethaug, O. Reiso, W. Ruch: Extrusion of particulate-reinforced aluminium billets made by d.c. casting, *Hydro Aluminium reports*, 1990, 173-179
- ¹⁴ H. P. Degischer, H. Kaufmann, H. Leitner: Strangpreßprofile, Schmiede- und Gußteile aus keramik-teilchenverstärktem Aluminium, *VDI Berichte, No.: 965.1* (1992) 179-188
- ¹⁵ D. J. Jensen, Y. L. Liu, N. Hansen: Hot extrusion of Al/SiC texture and microstructure, *Proceedings of the 12-th Riso International Symposium on Material Science Roskilde*, Danska, **1991**, 417-422
- ¹⁶ K. Laue, H. Stenger: Extrusion; Processes, Machinery, Tooling, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, ZDA, **1981**
- ¹⁷ D. O. Kennedy: SiC Particles Beef Up Investment-Cast Aluminium, *Advanced Materials & Processes*, (1991) 6, 42-46
- ¹⁸ W. R. Hoover: Die casting of Duralcan composites, *Duralcan's reports*, **1991**, 387-392
- ¹⁹ 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
- ²⁰ M. D. Skibo et al.: Process for production of metal-matrix composites by casting and composite therefrom, Dural Aluminium Composites Corp., California, ZDA, *US Patent 4,759,995*, julij **1988**
- ²¹ M. D. Skibo et al.: Process for production of metal-matrix composites by casting and composite therefrom, Dural Aluminium Composites Corp., California, ZDA, *US Patent 4,786,467*, november **1988**
- ²² K. U. Kainer: Aluminium and Magnesium Based Metal Matrix Composites, *Kovine Zlitine Tehnologije*, 30 (1996) 6, 509-516
- ²³ B. Šuštaršič, M. Torkar, M. Doberšek, B. Breskvar: Microstructural Features of D.C. Cast Al/SiC MMCs, Predavanje in *Proceedings of the 10-th International Symposium on Metallography*, Stará Lesná, Slovaška, 22.-24. april, **1998**, 431-435
- ²⁴ B. Šuštaršič, M. Torkar, B. Breskvar, V. Kevorkijan, A. Smolej, V. Nardin: Značilnosti kontinuirno ulitih Al/SiC kompozitov, *Kovine zlitine tehnologije*, 32 (1998) 1-2, 29-34
- ²⁵ V. Kevorkijan, B. Šuštaršič, M. Torkar, B. Breskvar in ostali sodelavci: Priprava in študij lastnosti diskontinuirno ojačanih Al/SiC kompozitov s kovinsko osnovo, *zaključno in fazna poročila, MZT Slovenije - temeljni raziskovalni projekt J2-6184-0795-94/96 in J2-6184-0206-94/96*, januar **1997**, 1-36 in priloge
- ²⁶ S. Murali, S. Muthukaruppan, K. S. Raman, K. S. S. Murthy: Stir cast and extruded Al-7Si-0.3 Mg alloy containing iron and beryllium, *Metal Science and Technology*, 13 (1997) 337-342
- ²⁷ S. Hariprasad, S. M. L. Sastry, K. L. Jerina, R. J. Leiderich: Microstructures and Mechanical Properties of Dispersion-Strengthened High-Temperature Al-8.5Fe-1.2V-1.7Si Alloys Produced by Atomized Melt Deposition Process, *Metal Transactions A*, 24A (1993) 865-873