

PREISKAVE LITIH ZAVORNIH DISKOV IZ KOMPOZITOV Al/SiC

INVESTIGATIONS OF Al/SiC MMCs BRAKE DISCS

Borivoj Šuštaršič¹, Zmago Stadler², Bojan Breskvar¹

¹Inštitut za kov. mater. in tehnol., Lepi pot 11, 1000 Ljubljana, Slovenija

²Sinter, Cesta v mestni log 75, 1000 Ljubljana, Slovenija

Prejem rokopisa - received: 1999-11-29; sprejem za objavo - accepted for publication: 1999-12-20

Podjetje Sinter iz Ljubljane je eden največjih svetovnih proizvajalcev zavornih ploščic za vozila go-kart. V zahtevnejšem in višjem cenovnem razredu te vrste športnih in dirkalnih vozil poteka zamenjava klasičnega zavornega sistema, ki ima litoželezni disk, z bistveno lažjim in tornu ugodnejšim diskom na osnovi kompozita s kovinsko osnovo iz podedvtekske Al- zlitine Al9SiMg ojačene z delci SiC (v nadaljevanju kompozit Al/SiC). Poleg osvajanja tehnologije izdelave zavornih ploščic za novo vrsto diskov je bilo treba osvojiti tudi tehnologijo izdelave samih diskov, ker le-teh ni bilo možno dobiti na tržišču. Razvita je bila nova oblika zavornega diska na osnovi novega materiala in izbrane tehnologije litja. V prispevku so predstavljeni rezultati mikrostrukturnih in mehanskih preiskav gravitacijsko (v pesek in kokilo) ter pod tlakom ulitih diskov Al/SiC. Izdelana je bila tudi primerjava lastnosti s toplotno obdelanimi diski. Pri vseh preiskovanih diskih so bile izmerjene torne karakteristike. Diski so bili preizkušeni tudi v realnih razmerah na dirkališču. Preiskave so omogočile nadaljnje optimiranje postopka litja in tako izboljšanje mikrostrukturnih ter mehanskih lastnosti diskov Al/SiC.

Ključne besede: kompoziti Al/SiC, zavorni diski, mikrostrukturne in mehanske preiskave

Sinter, Ljubljana, Slovenia is a one of the world's largest producer of brake pads for go-karts. In high class and high price go-karts, the replacement of conventional grey cast-iron brake discs by lighter and frictionally more suitable brake discs based on Al/SiC MMCs is in progress. Besides the development of brake pads for the new disc material it was also necessary to develop a production technology of Al/SiC brake discs. The characteristics of the new disc material, as well as the selected casting technology required a new design and construction of brake discs. The results of microstructural and mechanical investigations of sand and mould cast, as well as high pressure die cast Al/SiC MMCs discs are presented, together with a comparison with heat treated Al/SiC discs. The frictional properties of discs were determined and all investigated discs were tested in real conditions of exploitation (on a racetrack). The investigations enabled us to optimise the casting process of discs and in this way to improve microstructural and mechanical properties of Al/SiC MMCs discs.

Key words: Al/SiC MMCs, brake discs, microstructural and mechanical investigations

1 UVOD

Kompoziti s kovinsko osnovo iz Al-zlitine, ki je ojačena z nekovinskimi delci (SiC) so materiali, ki imajo v primerjavi z današnjimi konvencionalnimi zlitinami na osnovi Fe in Al najboljše razmerje masa-energija-lastnosti-cena. Zato so ti materiali že pričeli zamenjavati konvencionalne v velikoserijskih proizvodnjah, kot je na primer bela tehnika, izdelava raznih delov za računalnike, avdio in video naprave, oprema za šport in razvedrilo, avtomobilska industrija in industrija drugih transportnih vozil. Ena od najbolj obetavnih aplikacij na področju vozil so zavorni diski, še posebej pri športnih vozilih in tistih za prosti čas.

Podjetje Sinter iz Ljubljane je eden največjih svetovnih proizvajalcev zavornih ploščic za vozila go-kart. V zahtevnejšem in višjem cenovnem razredu te vrste športnih in dirkalnih vozil poteka zamenjava klasičnega zavornega sistema, ki ima litoželezni disk, z bistveno lažjim in tornu ugodnejšim diskom na osnovi kompozita Al/SiC. Zato je podjetje poleg osvajanja tehnologije izdelave zavornih ploščic¹ za novo vrsto diskov moralo osvojiti tudi tehnologijo izdelave samih diskov, ker le-teh ni bilo možno dobiti na tržišču.

Litje je zaradi zahtevne oblike, velike trdote materiala in njegove slabe obdelovalnosti²⁻⁵ najprimernejša tehnologija izdelave zavornih diskov. Vendar je priprava taline in litje kompozita Al/SiC zahtevnejše, kot je litje običajnih Al-zlitin. Talina ima namreč zaradi velike vsebnosti (10-20 vol.%) trdnih delcev SiC večjo viskoznost. Poleg tega obstaja nevarnost posedanja in reakcije teh delcev s talino. Litje izbranih, komercialno dosegljivih kompozitnih materialov Al/SiC je možno na več načinov^{6,7}, glede na količino in obliko izdelka. Zato smo osvajali različne postopke litja, od klasičnega gravitacijskega litja v pesek in kokilo do visokotlačnega v kovinsko orodje.

V prispevku predstavljamo rezultate mikrostrukturnih in mehanskih preiskav gravitacijsko (v pesek in kokilo) ter tlačno ulitih in naknadno toplotno obdelanih zavornih diskov ter zavorno-verižnih obročev. Pri nekaterih preiskovanih diskih smo izmerili torne lastnosti. Diski so bili preizkušeni tudi v realnih razmerah na dirkališču. Preiskave so nam omogočile nadaljnje optimiranje postopka litja in tako izboljšanje mikrostrukturnih ter mehanskih lastnosti diskov in obročev iz izbranih kompozitov Al/SiC.

2 EKSPERIMENTALNO DELO

Za naše preizkuse in preiskave smo kot vhodni vložek uporabili komercialno dosegljive, v gredice ulite Duralcanove kompozite z oznakami: F3S.20S in F3K.10S, ki sta primerna za gravitacijsko litje in material F3N.20S, ki je primeren za visokotlačno litje. Osnovne fizikalno-kemijske lastnosti izbranih materialov so podane v literaturi^{1-3,6}. Materiali, ki imajo v oznaki simbol 20S vsebujejo imensko 20 vol.% SiC, medtem ko material s simbolom 10S vsebuje 10 vol.% SiC. Kovinska osnova materiala F3S.20S je podedvtektška zlitina Al-Si z dodatkom 0,5 mas.% Mg. Kovinska osnova materiala F3N.20S je tudi podedvtektška zlitina Al-Si, vendar z dodatkom 0,6 mas.% Mg in Mn ter 1,0 mas.% Fe. Imenske in dejanske kemijske sestave kovinske osnove izbranih kompozitov so podane v **tabeli 1**. Material F3K smo tudi želeli uporabiti za litje zavornih diskov v pesek, ker ga proizvajalec priporoča za delo pri povišanih temperaturah. Vendar nam ni uspelo dobiti materiala z več kot 10 vol.% vsebnosti delcev SiC. Material je tudi dražji in slabše korozijsko obstojen kot F3S ter ga zato razen, za nekaj informativnih DTA in mikrostrukturnih preiskav, nismo uporabljali. Z DTA-preiskavami izhodnega materiala smo preverili ustreznost materiala oziroma od proizvajalca priporočen temperaturni interval litja.

Preizkuse litja zavornih diskov v pesek smo izvajali pri raznih slovenskih livarjih Al (Livel d.o.o., Trbovlje itd.). Ti so izdelali ustrezne pečene forme in CO₂-jedra z modeli, ki so bili konstruirani v podjetju Sinter. Litje v pečene forme je potekalo ročno skozi keramične filtre. Priprava taline je bila izvedena v skladu s priporočili proizvajalca kompozita⁶. Najpomembnejša tehnološka parametra sta premešavanje taline (grafitno mešalo; pri nas ročno) in temperatura litja (725-735°C). Pri samem zajemanju in ulivanju taline je pomembno, da ne zajemamo zraka. Priporoča se tudi uporaba Ar nad talino v talilni peči⁶⁻⁸.

Pri gravitacijskem litju zavorno-verižnih obročev HD (Harley Davidson) v kovinsko kokilo niso bili uporabljeni keramični filtri. Priprava taline je bila enaka.

Visokotlačno litje zavornih obročev HD je bilo izvedeno pri drugem kooperantu (Lival Pivka) na 4 MN (400t) napravi pri tlaku 200 barov in temperaturi 680°C v predgreto (190°C) orodje. Kooperant je tudi sam konstruiral orodje.

Nekateri vzorci so bili toplotno obdelani na IMT, Ljubljana (T6: raztopno žarjenje 8^h na 545°C, hitro ohlajanje v H₂O in umetno staranje 8^h na 150°C), nekateri pa tudi trdo anodno oksidirani pri kooperantu (A. Gabrijel s.p., Ljubljana).

Liti diski in obroči so bili mehansko obdelani (struženje in vrtnanje) na zahtevane dimenzije. Pri tlačno ulitih obročih so bile luknje izdelane že med litjem. Zahtevano kakovost delovne površine smo zagotovili z brušenjem. Za mehansko obdelavo so bila uporabljena izključno diamantna orodja.

Izdelane zavorne diske za go-kart in HD-obroče smo preiskovali na IMT, Ljubljana. Iz diskov in obročev smo v prečni in vzdolžni smeri na različnih mestih izrezali vzorce za metalografske preiskave na optičnem in SEM-mikroskopu. Pred tem smo pri diskih in obročih izmerili trdoto po Brinellu (HB 2,5/187,5). Trdoto anodno oksidirane plasti smo izmerili z Vickersovim aparatom pri obtežbi s 3N (HV 0,3).

Torne in obrabne lastnosti izdelanih zavornih diskov za go-kart smo preizkusili na dinamometru za preizkušanje zavor Krauss RWS 75B v kombinaciji z zavornimi oblogami tipa 11-420-00 (zavorni sistem Tonykart), ki so bile razvite v podjetju Sinter.

Funkcionalnost celotnega zavornega sistema so vozniki preizkusili na dirkalnih izvedenkah go-karta First (125 ccm) in go-karta Tonykart (100 ccm).

3 REZULTATI IN DISKUSIJA

3.1 V pesek uliti zavorni diski

Mikrostrukturne preiskave diskov za go-kart (dimenzij $\phi 208 \times 14$ mm) gravitacijsko ulitih v pesek so pokazale, da imajo diski značilno lito, relativno homogeno, za počasno ohlajanje značilno mikrostrukturo (**Sliki 1 in 2**),

Tabela 1: Imenske in dejanske kemične sestave kovinske osnove preiskovanih kompozitov⁶

Table 1: Nominal and as analysed chemical compositions of metal base of investigated Al/SiC MMCs⁶

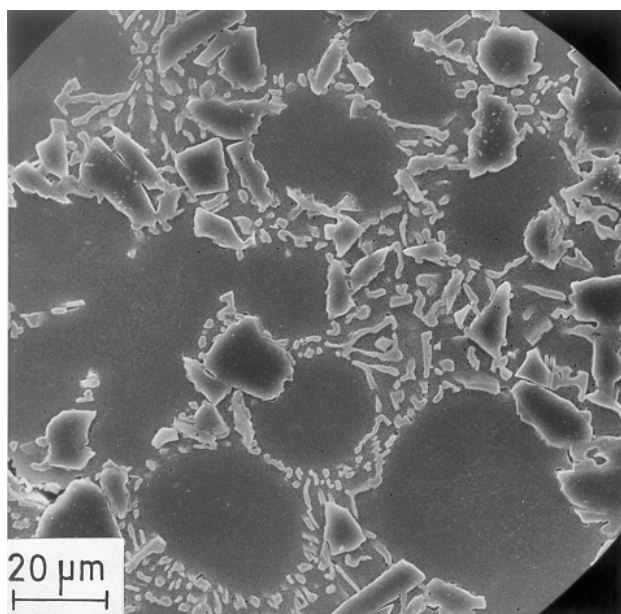
Zlitinski element		Si	Fe	Cu	Mg	Ni	Mn	Ti	Drugi ⁽¹⁾	Ostalo ⁽²⁾
Oznaka materiala		masni %								
F3S.20S	imenska	8,5-9,5	≤0,2	≤0,2	0,45-0,65	-	-	≤0,2	≤0,1	Al
	dejanska ⁽³⁾	9,1	0,1	0,01	0,57	0,07	n.a.	0,1	n.a.	n.a.
F3N.20N	imenska	9,5-10,5	0,8-1,2	≤0,2	0,50-0,70	-	0,5-0,8	≤0,2	≤0,1	Al
	dejanska ⁽³⁾	9,96	0,94	0,004	0,64	0,07	0,64	0,09	n.a.	n.a.
F3K.10K	imenska	9,5-10,5	≤0,3	2,8-3,2	0,80-1,20	1,0-1,5	-	≤0,2	≤0,1	Al
	dejanska ⁽³⁾	10,12	0,19	3,06	1,2	1,4	0,06	0,07	n.a.	n.a.

⁽¹⁾ znotraj dovoljenih 0,1 mas.% posamezen element maksimalno 0,03%

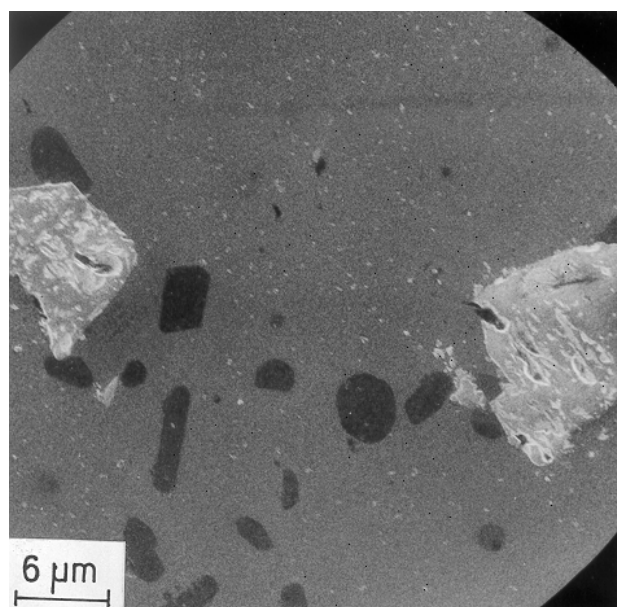
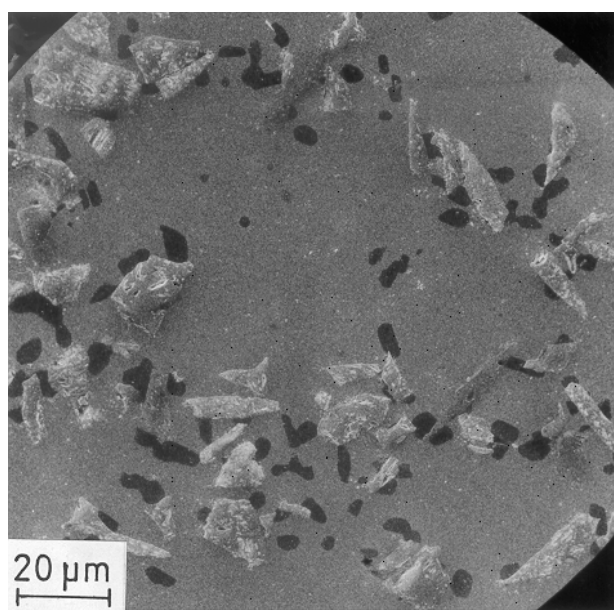
⁽²⁾ v kompozitu je še ≈ 20 vol.% delcev SiC (dejansko 21-22 vol.% delcev SiC)

⁽³⁾ analiza dobavitelja,

n.a. ... ni analizirano

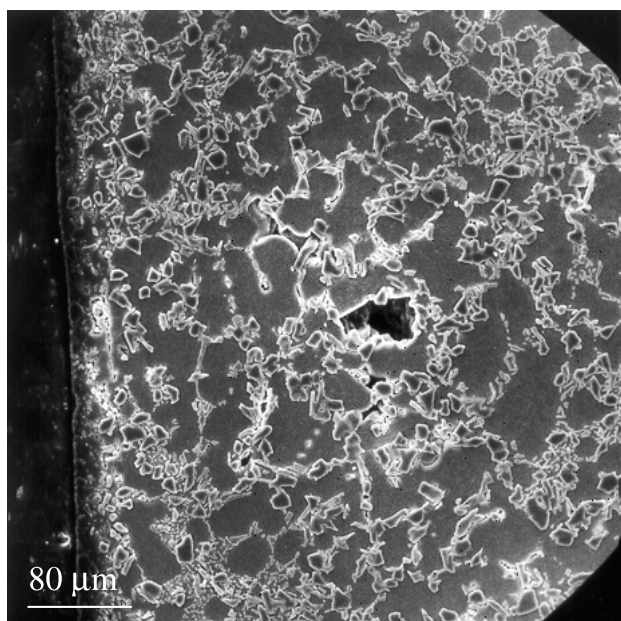


Slika 1: SEM-posnetek mikrostrukture v pesek ulitega zavornega diska; zmesni kristali α_{Al} (osnova), drobni podolgovati delci Si iz eutektika (svetlo sivo) in delci SiC (temno sivo). Povečava 600-krat
Figure 1: SEM micrograph of microstructure of sand cast brake disc; α_{Al} solid solution (base), fine elongated particles of Si from eutectic (bright grey) and SiC particles (dark grey). Magnification 600-times



Slika 3: SEM posnetka mikrostrukture toplotno obdelanega zavornega diska iz kompozita Al/SiC; zmesni kristali α_{Al} (osnova), v katerih so vidni svetli zelo drobni delci intermetalne spojine, eutektični delci Si (črno) in groba zrna SiC (belo do svetlo sivo). Povečava 600- in 2000-krat

Figure 3: SEM micrograph of microstructure of heat treated brake disc; α_{Al} solid solution (base) with very fine bright particles of intermetallic phase, larger eutectic particles of Si (black) and rough SiC particles (white to bright grey). Magnifications 600- and 2000-times



Slika 2: SEM-posnetek mikrostrukture v pesek ulitega zavornega diska iz kompozita Al/SiC z vidnimi makroporami (črno). Povečava 150-krat

Figure 2: SEM micrograph of microstructure of sand cast Al/SiC MMCs brake disc with visible macropore (black). Magnification 150-times

v kateri so delci SiC enakomerno razporejeni v kovinski osnovi. Ta je sestavljena iz zmesnih kristalov α_{Al} in eutektika ($\alpha_{Al} + Si$). Delci SiC so ostrorobi z ravnimi ploskvami in so presenetljivo enakomerne velikosti.

Največji delci so reda velikosti 25 μm , večina pa ima velikost pod 15 μm , kar tudi ustreza specifikaciji proizvajalca. Z gravimetrično kvantitativno analizo smo ugotovili, da je volumski delež delcev SiC 21-22 vol.%. Na nekaterih mestih diskov (**Slika 2**) se pojavljajo tudi makropore (na zgornjem delu diska v bližini

napajalnika), ki pa v celoti gledano ne vplivajo bistveno na funkcionalne lastnosti diskov. Na začetku našega dela je bila poroznost ulitkov največja težava. Vendar smo z optimiranjem in povečanim nadzorom postopka priprave taline (kontrola in vzdrževanje temperature taline v ozkem temperaturnem intervalu, mešanje taline itd.), izdelave form in jeder (optimalni izbor vrste peskov, optimiranje ulivnega sistema) ter litja (uporaba filtrov) makroporoznost skoraj v celoti odpravili.

Po toplotni obdelavi (T6) se je mikrostruktura diskov precej spremenila (Sliki 3a in b). Kot bomo videli v nadaljevanju, se je zaradi te spremembe povišala tudi trdota diskov. Med litjem nastali podolgovati delci evtektičnega Si so po toplotni obdelavi izginili in nastal je nov koaguliran evtektik z delci Si bolj pravilnih oblik. Pri večjih povečavah (Slika 3 b) je vidna tudi utrditev kovinske osnove z drobnou dispergiranimi delci intermetalne faze (verjetno Mg₂Si ali Al₃Fe). Spremenila se je tudi površinska morfologija delcev SiC, verjetno zaradi njegove rahle površinske oksidacije ali interakcije s kovinsko osnovo med toplotno obdelavo.

V okviru naših preiskav smo izmerili trdoto na delovnih površinah zavornih diskov. Trdote so bile izmerjene na različnih mestih izdelka. Meritve trdote so pokazale, da je povprečna trdota v pesek ulitih diskov relativno nizka (HB=79,3). Manjšo trdoto od pričakovane lahko pripišemo počasnejšemu ohlajanju med litjem v pesek in poroznosti.

Povprečna trdota diskov je bila na zgornji površini nekoliko manjša (HB=77) kot na spodnji (HB=81), kar lahko pripišemo različnim razmeram pri ohlajanju ulitka med njegovim strjevanjem v formi.

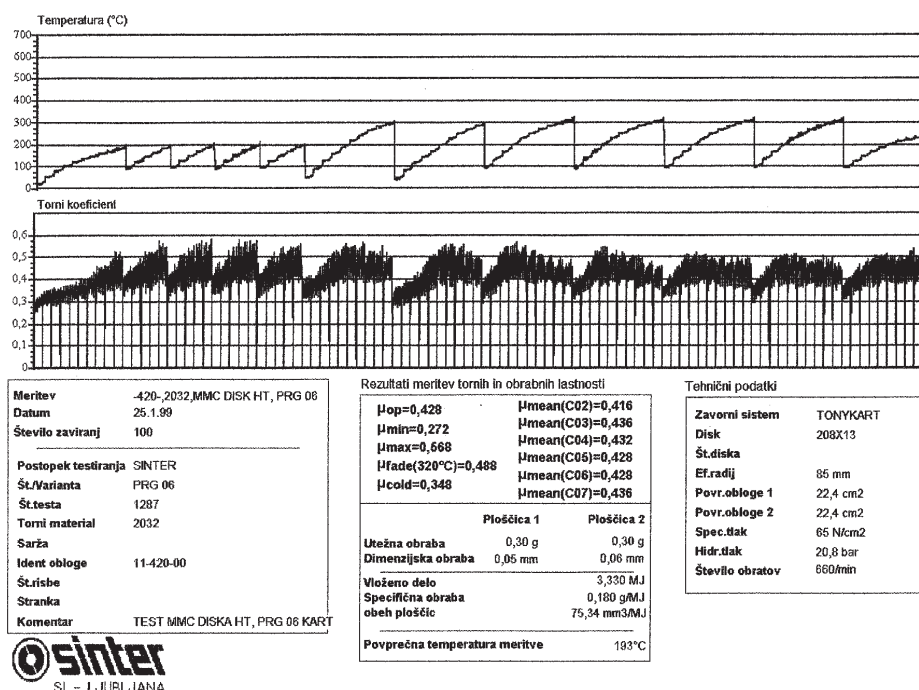
S primerno toplotno obdelavo spremenimo lito mikrostrukturo kovinske osnove kompozita Al/SiC, koaguliramo evtektik in dosežemo želeno izločanje drobnih izločkov, ki utrjujejo kovinsko osnovo. Zato smo tudi izvedli preizkuse toplotne obdelave diskov. Pri optimalnih razmerah toplotne obdelave je povprečna trdota diskov narasla na HB ≈ 127. Kljub precejšnjem povečanju trdote preizkus diskov na dinamometru Krauss RWS 75B z zavornimi oblogami tip 11-420-00 kvalitete 2032 ni pokazal bistvenih razlik pri tornih in obrabnih lastnostih med ulitimi diski in tistimi, ki so bili naknadno še toplotno obdelani (Tabela 2). Vzrok za to lahko najverjetneje pripišemo zavornim ploščicam, ki so bile razvite oziroma prilagojene za mehkejšo, toplotno neobdelane diske izdelane iz kompozita Al/SiC.

Tabela 2: Primerjava tornih in obrabnih lastnosti med ulitimi in naknadno toplotno obdelanimi diski Al/SiC v kombinaciji z zavornimi oblogami kvalitete 2032

Table 2: Comparison of frictional and wear properties of cast and cast/heat treated brake discs in the combination with brake pads type 2032

Lastnost/način izdelave diska	Ulit disk	Ulit+T6
Povprečni torni koeficient μ_{OP}	0,424	0,428
Maksimalni torni koeficient μ_{maks}	0,596	0,568
Masna specifična obraba oblog (g/MJ)	0,130	0,180
Volumska specifična obraba oblog (mm ³ /MJ)	85	75

Pri trših diskih je bilo opaziti nekoliko daljši čas prilagajanja površin med zavorno oblogo in diskom v



Slika 4: Parametri preizkušanja in rezultati preizkusa za disk, ulit v pesek in toplotno obdelan
 Figure 4: Testing parameters and results for sand cast and heat treated brake disc

fazi utekavanja. Na **sliki 4** so prikazani parametri preizkušanja in rezultati preizkusa za disk, ulit v pesek in toplotno obdelan.

Po mehanski obdelavi v pesek ulitih diskov smo jih nekaj tudi površinsko obdelali s trdo anodno oksidacijo. Po njej so imeli zavorni diski nekoliko večjo ($\approx 5\%$) povprečno trdoto kot uliti. Tudi razlike med trdoto zgornje in spodnje površine koluta so bile manjše, kar lahko pripišemo povečani trdoti površinske plasti zaradi anodne oksidacije. Dejanski pozitivni učinek trde anodne oksidacije se je pokazal tudi med praktičnimi testi na dirkališču (manj površinskih poškodb diska).

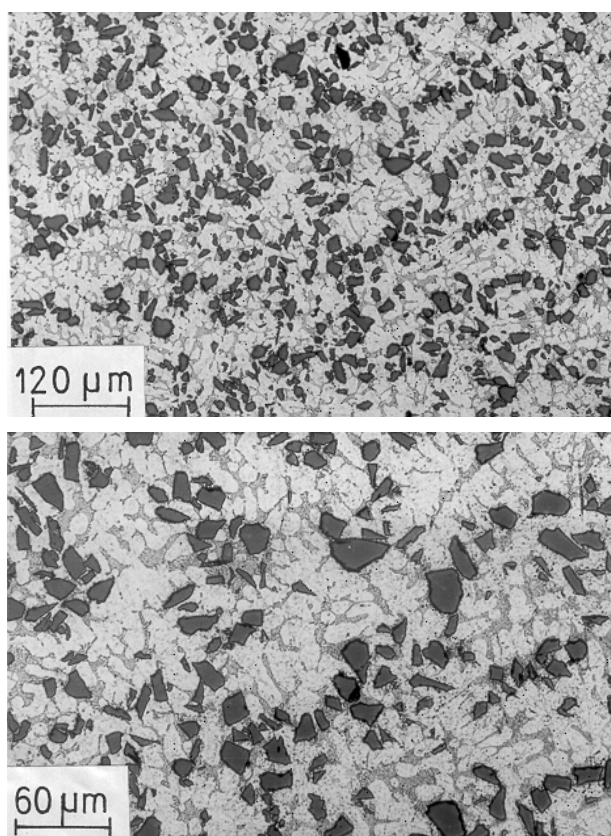
Rezultati preizkusov v realni razmerah (na dirkališču) novega zavornega sistema za go-kart z vgrajenimi diski Al/SiC, ki so bili gravitacijsko uliti v pesek, in za ta material prirejenimi zavornimi ploščicami¹ so pokazali, da so časi vožnje enega kroga ($\approx 1,5$ minute) za približno 0,2 do 0,3 sekunde krajši, kot so z istim dirkalnikom, ki je imel vgrajen klasični zavorni sistem. To je posledica dobrih tornih lastnosti novega sistema, ki omogoča kasnejše zaviranje pred prihodom v ovinek. Tudi obraba diskov je bila praktično zanemarljiva, segrevanje med zaviranjem pa ni preseglo mejne temperature uporabe tega materiala. Diski so bili po dolgotrajni uporabi (cela dirkalna sezona) povsem gladki in brez ris, kar potrjuje ugotovitev, da ni prišlo do prekomernega segrevanja. Istočasno to kaže, da je mehanizem zaviranja popolnoma drugačen kot pri klasičnem zavornem sistemu.

3.2 Kokilno uliti zavorni obroči

Mikrostrukturne preiskave zavornih diskov so pokazale, da se pri litju v pesek ne moremo v celoti izogniti livarskim napakam (lunkerjem, makro- in mikroporoznosti, vključkom livarskega peska itd.). Še posebej nevarne in nezaželene so pore na površini ali tik pod njo. Zato smo se odločili, da bomo poizkušali osvojiti za večje serije manj zahtevnih oblik litje v kovinske kokile. Eden od tržno zelo zanimivih izdelkov je obroč HD (veržno/zavorni sistem za motor Harley Davidson) dimenzij $\phi 310/\phi 226 \times 6$ mm. V ta namen je bila izdelana najprej enostavna kovinska kokila za ročno gravitacijsko litje skozi napajalnik.

Iz kokilno ulitega obroča smo na različnih mestih izrezali vzorce za mikrostrukturne preiskave. Značilna mikrostruktura, vidna pod optičnim mikroskopom, je podana na **slikah 5a** in **5b**.

Na prvi pogled se mikrostruktura v kokilo ulitega HD-obroča ne razlikuje bistveno od mikrostrukture v pesek ulitih zavornih diskov. V obeh primerih imamo značilno lito strukturo z dendritno morfologijo strjevanja. Mikrostrukturo kokilno litega HD-obroča sestavljajo relativno enakomerno porazdeljeni delci SiC v kovinski osnovi (α_{Al} + eutektik). Trdna raztopina α_{Al} ima obliko dendritov, vendar so dendritne celice manjše in bolj globularne. Tudi razdalja med sekundarnimi dendritnimi vejami, ki je merilo za hitrost ohlajanja, je



Slika 5: Posnetek mikrostrukture v kokilo ulitega obroča iz kompozita Al/SiC F3S.20S; optični mikroskop, **a)** povečava 100-krat in **b)** povečava 200-krat, jedkano (Keller)

Figure 5: Optical microscope micrograph of microstructure of mould cast HD-ring (for Harley Davidson motorbike); **a)** magnification 100-times in **b)** magnification 200-times, etched (Keller)

manjša. Je med 10 in 15 μm , medtem ko je bila pri diskih, ulitih v pesek, ocenjena na 20-30 μm . Pri večji povečavi smo opazili v trdni raztopini α_{Al} na nekaterih mestih intermetalne faze. Njihov nastanek je posledica prisotnih zlitinskih elementov in nečistoč (Fe in Mn), ki so jih pokazale tudi naše kemijske analize. Pri večji povečavi so v trdni raztopini α_{Al} dobro vidne tudi drobne, svetlo sive pikice (verjetno intermetalna faza Mg_2Si). Tako izrazito drobnih mikrostrukturnih elementov pri litju v pesek nismo opazili.

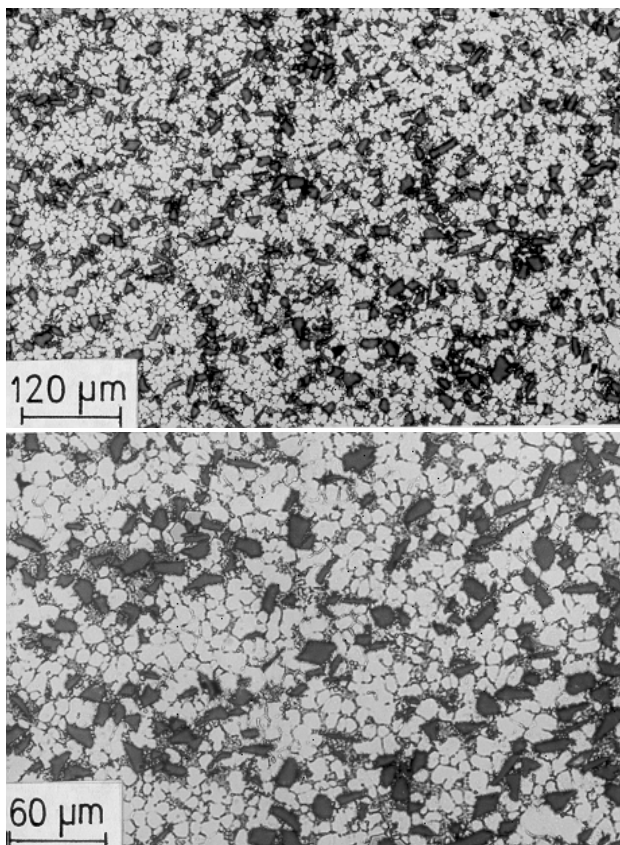
Tudi pri kokilno litih obročih smo opazili poroznost. Zelo velik krčilni lunker smo opazili v predelu tik pod napajalnikom. Po korekciji velikosti napajalnika se je poroznost obročev nekoliko zmanjšala.

V okviru naših preiskav smo izmerili trdoto neobdelanih površin na različnih mestih obroča. Meritve so pokazale, da je povprečna trdota kokilno ulitega HD-obroča $\text{HB}=98$, kar je precej več kot pri v pesek ulitih toplotno neobdelanih zavornih diskih. Večjo trdoto lahko pripišemo predvsem hitrejšemu ohlajanju med litjem v kokilo in zato nastanku drobnejših mikrostrukturnih elementov. Trdota obročev je bila na eni strani v povprečju nekoliko večja kot na drugi strani, kar

je verjetno posledica neenakomernega odvajanja toplote skozi stene kokile. Večjo hitrost ohlajanja ne moremo pripisati samo večjemu odvodu toplote zaradi litja v kovinsko kokilo, temveč tudi dejstvu, da je HD-obroč precej tanjši. Čeprav je prišlo do izboljšanja trdote pri litju v kokilo, pa izboljšanje drugih mehanskih lastnosti (žilavost, odpornost proti obrabi) najbrž ni bistveno zaradi še vedno prevelike poroznosti ulitka.

3.3 Tlačno uliti zavorni obroči

Ker nas kvaliteta kokilno ulitih obročev ni zadovoljila ob istočasnih zahtevah tržišča po nižjih cenah, kar je povezano s povečanjem proizvodnih serij, zmanjšanjem odpada in znižanjem stroškov mehanske obdelave (vrtanje lukenj), smo se odločili za osvojitve proizvodnje te vrste obročev z visokotlačnim litjem. Tako je bilo izdelano orodje za tlačno litje tega obroča z že vgrajenimi odmičnimi trni. Na ulitem obroču se tako nahajajo že vse za montažo potrebne izvrtine z zahtevanimi posnetji. Po odstranitvi ulivnega sistema je edina mehanska obdelava brušenje delovne površine. Z nekaj korekcijami same konstrukcije (napajanje) in dimenzij



Slika 6: Posnetek mikrostrukture tlačno ulitega obroča iz kompozita Al/SiC F3N.20S; optični mikroskop, **a**) povečava 100-krat in **b**) povečava 200-krat, jedkano (Keller)

Figure 6: Optical microscope micrograph of microstructure of high pressure die cast HD-ring made from Duralcan's Al/SiC MMCs type F3N.20S; **a**) magnification 100-times and **b**) magnification 200-times, etched (Keller)

orodja (skrčki) je uspelo izbranemu kooperantu izdelati ulitke zahtevanih dimenzij in toleranc. Za tlačno litje je material F3S neprimeren (lepljenje ulitka na stene orodja), zato smo uporabili material F3N. Visokotlačno uliti HD-obroči so bili že vizualno bistveno lepši in brez vidnih površinskih napak.

Značilna mikrostruktura visokotlačno ulitih HD-obročev je prikazana na **slikah 6 a** in **6 b**. Mikrostruktura se razlikuje od mikrostrukture kokilno ulitih HD-obročev. Razlika je predvsem pri deležu eutektika in velikosti ter obliki faze α_{Al} . Pri kokilno ulitih obročih imamo še opazno dendritno morfologijo strjevanja, medtem ko je pri tlačno ulitih obročih le-ta že izrazito drobna in globularna. Delci SiC in eutektik sta izredno enakomerno porazdeljena po kovinski osnovi. Tudi pri tlačno litih obročih smo na nekaj mestih v sredini opazili rahlo poroznost. Mislimo, da je vzrok za to poroznost predvsem v pripravi in vzdrževanju konstantne temperature taline.

Na različnih mestih enostransko mehansko obdelanih tlačno ulitih obročih smo izmerili trdoto. Meritve trdote so pokazale, da je povprečna trdota tlačno ulitega HD-obroča HB=123, kar je precej več kot pri obročih, ulitih v kokilo. Na ta način je bila dosežena trdota, ki smo jo dosegli pri toplotno obdelanih v pesek ulitih zavornih diskih. Večjo trdoto lahko pripišemo predvsem drugačni kemijski sestavi materiala, manjši poroznosti, hitrejšemu ohlajanju med litjem in zato nastanku drobnejše mikrostrukture.

4 SKLEPI

Razvita je bila nova oblika zavornega diska na osnovi novega kompozitnega materiala in izbranih tehnologij litja. Tako novi zavorni sistem kot celota (skupaj z že prej za ta material razvitimi zavornimi oblogami) v celoti pomeni povsem nov lasten izdelek, s katerim namerava podjetje Sinter učinkovito zapolniti zanimivo tržno nišo. Mikrostrukturne preiskave in meritve trdote kažejo, da je kakovost diskov Al/SiC, ulitih po vseh treh postopkih primerljiva z rezultati drugih avtorjev. Zavorni diski se kljub nekaj slabši mikrostrukturi in trdoti zaenkrat zaradi zahtevne oblike in manjših serij lijejo še v pesek. Mikrostrukturne in mehanske preiskave oblikovno enostavnejšega HD-obroča pa so pokazale, da je kompozite Al/SiC možno uspešno in v velikih serijah ulivati tudi pod tlakom. Kakovost tako ulitega kompozita je boljša, kot je kakovost podobnega materiala, ki je gravitacijsko ulit v pesek ali v kokilo, ob upoštevanju vseh zakonitosti pri pripravi taline, konstrukciji in izdelavi orodja, parametrov litja ter naknadne toplotne in mehanske obdelave.

5 LITERATURA

¹ Z. Stadler: *Kovine zlit. tehnol.*, 33 (1999) 1-2, 137-139

² B. Šuštaršič et al.: *Kovine zlit. tehnol.*, 32 (1998) 1-2, 29-34

³ B. Šuštaršič et al.: *Kovine zlit. tehnol.*, 33 (1999) 1-2, 107-115

⁴ D. Biermann: Mechanische Bearbeitung von Leichtmetall-Verbundwerkstoffen, Institut für Spanende Fertigung, Internberichte, University of Dortmund, Germany, 1996, 1-26

⁵ A. R. Chambers: The machinability of light alloy MMCs, *Composites*, Part A, 27A (1996) 2, 143-147

⁶ DURALCAN - Composite Casting Guidelines, Commercial catalogue, 1993

⁷ P. G. Enright, W. J. Savage: Developments in cast composites, *BCIRA International Conference*, 1994, 14/1-14/24

⁸ W. R. Hoover: Die Casting of Duralcan Composites, *Duralcan's reports*, 1991, 387-392