

# TORNI MATERIALI ZA ZAVORNE DISKE IZ ALUMINIJEVEGA KOMPOZITNEGA MATERIALA (Al-MMCs)

## FRICION MATERIALS FOR ALUMINIUM METAL MATRIX COMPOSITE ROTORS

**Zmago Stadler**

SINTER, Cesta v mestni log 100/B, 1000 Ljubljana

*Prejem rokopisa – received: 1998-11-10; sprejem za objavo – accepted for publications: 1998-11-25*

V zadnjem času so postali aluminijevi kompozitni materiali (Al-MMCs) cenejši in tako dosegljivejši tudi za uporabo v avtomobilski industriji. Zaradi vrste odličnih lastnosti: mehanska trdnost, trdota in odpornost proti obrabi, visoka toplotna prevodnost in toplotna kapaciteta, so v primerjavi s sivo litino postali zanimivi tudi za izdelavo zavornih diskov. V prispevku navajamo rezultate razvoja tornih materialov za zavorne obloge, ki imajo primerne torne in mehanske lastnosti v povezavi z materialom Al-MMCs. Dosedanje izkušnje in znanje s področja tornih materialov za klasične zavorne diske namreč ne pomenijo dosti. Potrebna je bila popolnoma nova zasnova sestave tornega kompozita. Raziskali smo vpliv nekaterih dodatkov na torne in obrabne lastnosti zavornih oblog v kombinaciji z Al-MMCs zavornimi diski. Meritve smo izvedli na go-kartnih zavornih ploščicah in diskih. Uporabili smo tako laboratorijski kot tudi praktični način preskušanj.

Ključne besede: avtomobilске zavorne obloge, aluminijevi kompozitni materiali, torne lastnosti

Lately the Al-SiC MMCs materials became cheaper and more attainable for use in automotive industry. Because of its excellent mechanical and thermal properties in comparison with grey cast iron, Al-SiC MMCs became more interesting as brake rotors material. In this paper the development results of brake pad material for Al-SiC MMCs is presented. Completely new development approach was required, because friction materials for grey cast iron rotors are unsuitable for Al-SiC MMCs rotors. Friction and mechanical properties in connection with some particular additives of pad's lining material will be discussed. Tests were done on go-kart brake pads and rotors. Testing of brake performance was carried out in laboratory, as well as in practice on real go-karts.

Key words: automobile friction materials, aluminium based metal matrix composites, friction properties

### 1 UVOD

Uporabnost aluminijevih kompozitov (Al-MMCs) kot konstrukcijski material za celo vrsto izdelkov je že dolgo znana. V zadnjem času so proizvajalci materialov Al-MMCs začeli intenzivneje prodirati na področje avtomobilске industrije. Tako je ena od možnosti uporabe teh materialov tudi za izdelavo zavornih diskov. Prednosti aluminijevih kompozitov v primerjavi s sivo litino so očitne v prid prvemu. Na prvem mestu je to manjša masa, bistveno višja toplotna prevodnost, enaka oziroma boljša mehanska trdnost, trdota, odpornost proti obrabi in dobra korozijska obstojnost, so samo nekatere prednosti aluminijevih kompozitov z dodatkom SiC (**Tabela 1**).

**Tabela 1:** Primerjava fizikalno kemijskih lastnosti materialov za izdelavo zavornih diskov<sup>2,8</sup>

LASTNOST	Al-MMCs F3S.20S	siva litina GG26Cr
gostota (g/cm <sup>3</sup> )	2,76	7,15
toplotna prevodnost (W/mK)	180-190	36-43
specifična toplota (J/kgK)	800-1100	500-900
E-modul (N/mm <sup>2</sup> ) · 10 <sup>3</sup>	96	70
natezna trdnost (N/mm <sup>2</sup> )	350	150
toplotni raztezak (1/K) · 10 <sup>-6</sup>	16,4	10,0
maksimalna temperatura uporabe (°C)	440	720
korozijska obstojnost (21 dnevni test v solni razt.)	10 krat boljša	

V našem podjetju smo se odločili razviti zavorne ploščice (obloge) za diske iz materiala Al-MMCs. Celoten sklop (disk-ploščica) naj bi bil uporaben za zavorne sisteme v avtomobilih go-kart. Smo namreč eden največjih proizvajalcev zavornih ploščic za to vrsto vozil, zato je taka usmeritev tudi logično nadaljevanje razvoja zavornih oblog.

V prispevku navajamo rezultate razvojnega dela na zavornih oblogah za Al-MMCs- diske. Prikazane so torne in mehanske lastnosti zavornih oblog v odvisnosti od količine in vrste dodanih sestavin v torni mešanici. Pri preskušanju smo uporabili zavorne sisteme za go-kart avtomobile. Obloge so bile preskušene tudi v realnih razmerah na dirkališču.

### 2 PRIPRAVA VZORCEV IN OPIS PRESKUSOV

Zavorni diski so bili izdelani iz Al-MMCs-materiala Duralcan tip F3S.20S. ki je dosegljiv na tržišču. Surovci so bili odliti v pesek in nato obdelani v končno obliko in dimenzije. Orodja za obdelavo morajo biti najmanj iz WC, še bolje je, če so diamantna ali iz borovega karbida. Diski za avtomobile go-kart so imeli dimenzije 207 x 11 mm.

Laboratorijske mešanice za izdelavo zavornih oblog so bile narejene v laboratorijskem mešalniku TM 20, Gostol, ki omogoča intenzivno mešanje vlaknatih in praškastih komponent v suhem stanju. Za izdelavo torne

mešanice smo uporabili surovine proizvajalcev, kot so: FERS, Španije (FF smole, frikcijski prah), Lapinus, Nizozemska (mineralna vlakna), AKZO-Nobel, Nemčija (twaronska vlakna), Pometon, Italija (baker v prahu) itd. Večino izbranih surovin že uporabljamo v redni proizvodnji zavornih oblog.

Iz tako pripravljene torne mase smo s toplim preoblikovanjem pri tlaku 100 bar, temperaturi 130-170°C in času 6-10 minut izdelali zavorne ploščice za avtomobile go-kart (Sinter ident: 11-407-). Po dodatnem utrjevanju (več ur pri temperaturi nad 200°C) in brušenju le-teh na ustrezno debelino, so bile ploščice pripravljene za preskus.

Meritve tornih in obrabnih lastnosti smo izvedli na avtomatski napravi za preskušanje zavornih oblog Krauss RWS 75B pri konstantni hitrosti 660 obr/min in konstantnem tlaku. Uporabili smo standardne in nestandardne programe simulacij zaviranja. Odčitavanje vrednosti tornega koeficienta in drugih vrednosti (temperatura, obraba) smo opravili po navodilih standarda P-VW 3212<sup>1</sup>.

### 3 EKSPERIMENTALNI REZULTATI IN DISKUSIJA

Razvoj sestave torne obloge za diske Al-MMCs smo izvedli na osnovi pregleda literature. Opogumili so nas rezultati preskusov diskov Al-MMCs nekaterih proizvajalcev zavornih ploščic in zavornih sistemov<sup>2,3</sup> ter nekaterih znanih avtomobilskih proizvajalcev<sup>4,5</sup>. Vse skupaj nam je dalo smernice za uporabo takih diskov in zavornih ploščic z novo sestavo v avtomobilih go-kart.

Formulacije sestav tornih oblog, opisanih v patentih<sup>9,10</sup>, nam dajo nekoliko prenizke vrednosti tornega koeficienta. Odločili smo se za nekaj izhodiščnih sestav, ki smo jih preskusili na diskih Al-MMCs za go-karte (**Tabela 2**).

**Tabela 2:** Sestave zavornih oblog za preskuse (%)

OZNAKA	2018	2026	2029	2032	2033
GLINICA	25	35	30	25	30
BAKER V PRAHU	8	-	4	8	10
KRIOLIT/CaF <sub>2</sub>	-	-	5	8	8
KOVINSKI SULFIDI	12	10	-	-	-
DRUGO*	55	55	61	59	52

\* FF smole, polnila, mineralna vlakna in vlakna org. porekla

Sestave, ki so vsebovale dodatek kovinskih sulfidov (MoS<sub>2</sub>, Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>), so pri zaviranju tvorile oblogo na površini diska. Ta plast je popolnoma zgladila kontaktno površino diska, ki pa se je pri višji temperaturi na nakaterih mestih hitro poškodovala, ker so različni kovinski vključki v masi razili površino diska. Sulfidi (Mo,Sb,Zn), ki imajo pomemben vpliv na torne lastnosti obloge v paru z Fe diskom, so se pokazali kot neučin-

koviti v našem primeru. Nadomestili smo jih z dodatkom CaF<sub>2</sub> in kriolitov, ki veljajo za visokotemperaturna maziva<sup>11</sup>, iztočasno pa sanirajo površinske poškodbe Al matrice zaradi lokalnih pregretij. Ugotovili smo, da je najprimernejša oblika kovinskega dodatka v obliki finega prahu. Druge oblike, kot npr. vlakna, ostružki, so manj primerni. Ti na nakaterih mestih zaradi visokega tornega koeficienta povzročijo pregretje in dvig temperature nad 450°C ter s tem poškodovanje Al-matrice v materialu Al-MMCs.

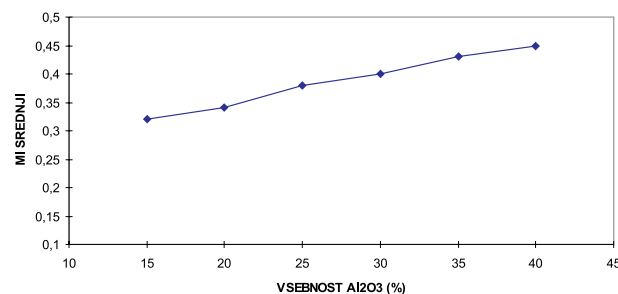
Rezultati tornih in obrabnih lastnosti so prikazani v **tabeli 3** in na **slikah 1 in 2**. Ugotovili smo, da zviševanje vsebnosti glinice vpliva na dvig povprečnega tornega koeficienta, vendar istočasno narašča tudi razenje in število poškodb na površini diska. Dodatek bakrenega prahu pozitivno vpliva na stabilnost tornega koeficienta pri višjih temperaturah. Optimizacija nam je dala sestave, ki so imele povprečni torni koeficient med 0,42 in 0,45 v temperaturnem intervalu od 100 do 300°C. Ta vrednost do neke mere zadostuje za izdelavo zavornih oblog za go-karte. V prihodnje bi jo bilo treba dvigniti vsaj na 0,50.

**Tabela 3:** Torne in obrabne lastnosti vzorcev zavornih oblog

OZNAKA	2018	2026	2029	2032	2033
μ pov.	0,39	0,35	0,35	0,33	0,43
μ 100	0,41	0,42	0,43	0,42	0,41
μ 200	0,42	0,36	0,44	0,46	0,46
obraba masna (g)	0,37	1,2	0,78	0,80	0,60
obraba dimen. (mm)	0,10	0,23	0,11	0,10	0,10
razenje diska	delno	ne	ne	ne	ne

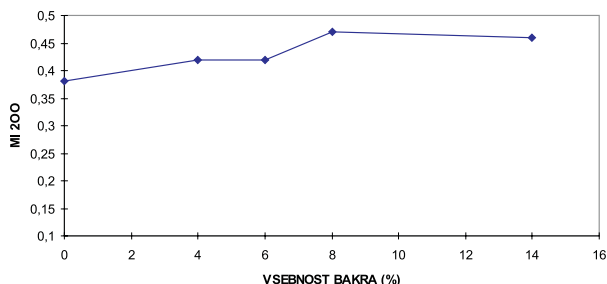
Oznake v tabeli pomenijo:  
 μ pov. - povprečni torni koeficient  
 μ 100 - torni koeficient pri 100°C  
 μ 200 - torni koeficient pri 200°C

Vsebnost abrazivnih sredstev (glinice) in kovin v sestavi zelo vpliva na velikost in stabilnost tornega koeficienta (μ) zavorne obloge. Z dodatkom glinice v sestavo je možno vplivati predvsem na velikost μ, medtem ko dodatek bakrenega prahu vpliva na temperaturno stabilnost μ in samo delno na velikost.



**Slika 1:** Odvisnost povprečnega tornega koeficienta od vsebnosti glinice (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) pri konstantnem deležu bakrenega prahu (8%)

**Figure 1:** Average coefficient of friction versus alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) content at constant value of copper powder (8 w.%)



**Slika 2:** Odvisnost tornega koeficienta pri 200°C od vsebnosti bakrenega prahu pri konstantnem deležu glinice (35%)

**Figure 2:** Coefficient of friction at 200°C versus copper powder at constant value of alumina (35%)

Sestave z več kot 40% glinice so bile preveč agresivne in so poškodovale površino Al-MMCs diska.

Kovinski dodatki morajo biti dodani v obliki finih prahov. Druge oblike kot npr. vlakna ali ostružki, so manj primerni, ker še hitreje poškodujejo površino diska. Dodatek bakrenega prahu se je pokazal kot najprimernejši. Ogotovili smo, da dodatek Cu praha, ki je bil višji kot 15%, tudi poškoduje površino diska. Tudi jekleni prah je uporaben, vendar je njegova vsebnost omejena na manj kot 5%.

Dodatki visokotemperaturnih maziv kot sta  $\text{CaF}_2$  in sintetični kriolit  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ , v sestavo sta dala bistveno boljše rezultate kot kovinski sulfidi ( $\text{MoS}_2$ ,  $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ), ki se uporabljajo v klasičnih tornih materialih. Stabilnost in odpornost površine Al-MMCs diska je bila na ta način zagotovljena tudi pri povišanih temperaturah od 350 do 400°C. Bolj učinkovit je bil dodatek  $\text{CaF}_2$ .

Fluoridi namreč reagirajo s površinsko plastjo Al-matrice in tvorijo plast, ki je odpornejša za obrabo kot sama Al-površina.  $\text{CaF}_2$  in drugi fluoridi ali krioliti imajo lastnost, da tudi poškodovano zaščitno plast na površini ponovno obnovijo in sanirajo. Tako dosežemo stabilnost in višjo obrabno odpornost površine diska Al-MMCs.

Podoben mehanizem tvorjenja reakcijskih plasti na spoju obloga-disk poznamo tudi pri klasičnih diskah iz sive litine, vendar z dodatki kovinskih sulfidov, npr.  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ,  $\text{ZnS}$ .

Rezultati raziskav so obetajoči in pomenijo dobro osnovo za nadaljnje delo pri razvoju tornih materialov za diske Al-MMCs. Le-ti se bodo najprej uveljavili v motosportu: go-kartih, dirkalnih motociklih in avtomobilih, kasneje pa tudi v osebnih avtomobilih.

#### 4 SKLEPI

Razvili smo torni material za zavorne obloge, ki so uporabne za diske iz materiala Al-MMCs. Torni material ima povprečni torni koeficient 0,45 v temperaturnem intervalu 100-300°C. Pri preskušanju v laboratoriju in v praksi nismo opazili nobenih poškodb površine diska, če temperatura njegove površine ni presegla 450°C.

Vsebnost abraziv (glinice) in kovin v sestavi zelo vpliva na velikost in stabilnost tornega koeficienta ( $\mu$ ) zavorne obloge. Z dodatkom glinice v sestavo je možno vplivati predvsem na velikost  $\mu$ , medtem ko dodatek bakrenega prahu vpliva na temperaturno stabilnost  $\mu$  in samo delno na velikost. Sestave z več kot 40% glinice so bile preveč abrazivne in so poškodovale površino diska.

Dodatki visokotemperaturnih maziv, kot sta  $\text{CaF}_2$  in sintetični kriolit  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ , v sestavo so dali bistveno boljše rezultate kot kovinski sulfidi ( $\text{MoS}_2$ ,  $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ), ki se uporabljajo v klasičnih tornih materialih. Stabilnost in odpornost površine diska Al-MMCs je bila na ta način zagotovljena tudi pri povišanih temperaturah od 350 do 400°C. Bolj učinkovit je dodatek  $\text{CaF}_2$ .

Kovinski dodatki morajo biti dodani v obliki finih prahov. Druge oblike, kot npr. vlakna ali ostružki so manj primerni, ker še hitreje poškodujejo površino diska. Dodatek bakrenega prahu se je pokazal kot najprimernejši. Tudi jekleni prah je uporaben, vendar je njegova vsebnost omejena na manj kot 5%.

#### 5 LITERATURA

- 1 Prüfpezifikaktion: P-VW3212, Scheibenbremsbeläge, Reibwert - und Verschleissprüfung auf Reibwertprüfstand, Zentralnorm, Volkswagenwerke AG - Audi NSU Auto Union AG, 1978
- 2 K. H. Füller, G. Gross, T. Haug, K. Mörgenthaler, Thermal behaviour of MMC and CMC materials for brake application, ISATA. 29. International Symposium, Florence, Italy, 1996, Proceedings of: Dedicated conference on automotive brake systems, 279-286, Edited by: prof. Dr. Dieter Roller, 1996
- 3 A. Fuganti, L. Lorenzi, Experimental study of MMC brake discs, ISATA. 29. International Symposium, Florence, Italy, 1996, Proceedings of: Dedicated conference on automotive brake systems, 295-305, Edited by: prof. Dr. Dieter Roller, 1996
- 4 A. Fuganti, L. Lorenzi, Performance of Redisingned MMC Automotive Brake Drum, SAE technical paper series: 960994, Reprint from: Current and Future Development in ABS/TCS and Brake tehnology, SAE International Congress & Exposition, Detroit, 1996
- 5 B. Neitzel, M. Barth, M Matic, Weight Reduction of Disc Brake Systems with the Utilization of New Aluminum Material, SAE technical paper series: 940335, Reprint from: ABS/TCS and Brake tehnology Developments, SAE International Congress & Exposition, Detroit, 1994
- 6 R. Dwivedi, Development of Advanced Reinforced Aluminum Brake Rotors, SAE technical paper series: 950264, SAE International Congress & Exposition, Detroit, 1995
- 7 R. Dwivedi, Performance of MMC Rotors in Dynamometer Testing, SAE technical paper series: 940848, SAE International Congress & Exposition, Detroit, 1994
- 8 F. H. Buch, M. J. Denholm, O. Kanzaki, M. Weintraub, A Status Report: Aluminum Metal Matrix Composite Disc Brake Rotors, ISATA. 29. International Symposium, Florence, Italy, 1996, paper no. 96BS020
- 9 M. G. Jacko, P. H. Tsang, S. K. Rhee, Porous Copper Powder Modified Friction Material, U.S.Pat. 5339931, Allied-Signal Inc., 1994
- 10 A. J. Brewin, Improvements in and relating to friction materials, U.K.Pat. 2285988 A, Ferodo Ltd, 1995
- 11 I. L. Singer, Solid Lubrication Processes, I. L. Singer and H. M. Pollock (eds.), Fundamentals of Friction: Macroscopic and Microscopic Processes, 237-261, Kluwer Academic Publisher, 1992