

KOMPOZITI NA OSNOVI ALUMINIJA V AVTOMOBILSKI INDUSTRIJI DRUGI DEL- RAZVOJ IZDELKOV

ALUMINUM-BASED COMPOSITES FOR THE AUTOMOTIVE APPLICATION DEVELOPMENT OF AUTOMOTIVE COMPONENTS - PART TWO

Varužan M. Kevorkijan

Lackova 139, 2341 Limbuš

Prejem rokopisa - received: 1998-11-10; sprejem za objavo - accepted for publications: 1999-01-12

V delu opisujemo postopke izdelave in izboljšanje lastnosti različnih avtomobilskih komponent (pogonska gred, zavorni kolut, blok motorja, batno vodilo, ojnica in bat), izdelanih iz kompozitov na osnovi aluminija, diskontinuirano ojačanih s keramičnimi delci (DOKAl). Na osnovi razmerja med ceno in izboljšano kakovostjo avtomobilskih delov smo predvideli prihodnost DOKAl v avtomobilski industriji.

Ključne besede: kompoziti na osnovi aluminija, izdelava avtomobilskih komponent, pogonska gred, zavorni kolut, blok motorja, batno vodilo, ojnica, bat, stroškovna analiza, prihodnost kompozitov na avtomobilskem trgu

Examples of automotive components fabricated from a cast discontinuously reinforced aluminum-based composites include drive shaft, brake rotor, engine block, cylinder liner, connecting rod and piston were presented. The cost-to-quality ratio evaluation of MMCs was also discussed in order to predict the further commercialization of these promising materials in the automotive segment.

Key words: aluminum-based composites, fabrication of automotive components, drive shaft, brake rotor, engine block, cylinder liner, connecting rod, piston, cost-to-quality ratio, future commercialization of composites in the automotive segment

1 UVOD

Zmanjševanje porabe goriva in stopnje onesnaževanja okolja, izboljšanje vozniških lastnosti, zagotavljanje večje varnosti, boljše razmerje med ceno in kvaliteto, so samo nekatere izmed zahtev, ki jih trg že skorajda vsak dan narekuje avtomobilski industriji. Da bi zadovoljili te zahteve, morajo proizvajalci avtomobilov poseči po novih materialih in tehnologijah.

Med "novimi" materiali so diskontinuirano ojačani kompoziti na osnovi aluminija (DOKAl) vsekakor med pomembnejšimi kandidati za novo generacijo osebnih avtomobilov.

Najbolj tehtni razlogi, ki narekujejo njihovo čim prejšnjo uporabo v avtomobilski industriji, so manjša poraba goriva, nižja stopnja onesnaževanja okolja in večja varnost.

Znano je, da ima zmanjšanje mase osebnega avtomobila (npr. srednje velike limuzine) za 10% za posledico 5,5% manjšo porabo goriva¹. V praksi to pomeni, da z 91 kg lažjim avtom z vsakim litrom bencina lahko prevozimo še dodatnih 0,41 km poti.

Zastopnike avtomobilske industrije spodbujajo k večjem uvajanju novih materialov pri novih modelih avtomobilov predvsem želje kupcev, okoljevarstvena zakonodaja in konkurenca.

Cilj je izdelati avto, ki bo zadovoljil naraščajoče zahteve kupcev po kakovosti in varnosti ter okolje-

varstveno zakonodajo in bo ob tem cenovno dovolj konkurenčen.

Kot bomo spoznali nekoliko kasneje, da cena novih avtomobilskih komponent, ki proizvajalcem omogoča, da se učinkovito spopadajo z naštetimi zahtevami in pritiski trga, nikakor ni določena le z vrednostjo novega materiala, temveč vsebuje še proizvodne stroške, stroške naložbe in recikliranja izrabljenih avtomobilskih delov.

Kaj to pomeni v praksi, lahko ugotovimo pri razmeroma enostavni avtomobilski komponenti, kot je ojnica. Vrednost naložbe v linijo za strojno obdelavo takšne komponente lahko hitro preseže 20 milijonov USD, ko gre za serije med 250.000 in 500.000 kosov na leto¹. Prav zaradi tega je treba možnosti za uvajanje DOKAl v avtomobilsko industrijo ocenjevati skupaj s stroškovno analizo in skupaj z analizo vseh drugih proizvodnih tehnologij (strojna obdelava, recikliranje), ki so nujno potrebne za proizvodnjo končnih izdelkov.

2 IZDELAVA KOMPONENT NA OSNOVI DOKAl

DOKAl lahko preoblikujemo v avtomobilske komponente z navadnimi postopki ulivanja ali bolj splošno z vročo/hladno predelavo (kovanje, iztiskavanje)².

Livarske tehnologije so pomembne za izdelavo avtomobilskih komponent na osnovi DOKAl, ker so razmeroma enostavne in cenovno najbolj ugodne. Danes

DOKAI uspešno ulivajo v pesek ali kokile in nizko-tlačno ali z manj konvencionalnimi tehnikami, kot sta ulivanje s vtiskanjem taline (angl.: squeeze casting) ali z infiltracijo porozne keramične predoblike.

Ulivanje kompozitnih materialov je zahtevno zaradi keramičnih delcev, ki so bolj ali manj homogeno porazdeljeni v talini. Keramični delci povzročajo znatno večjo viskoznost taline, ki jo je treba nenehno mešati, da preprečimo usedanje keramičnih delcev in njihovo nehomogeno porazdelitev v odlitku.

Zaradi večje viskoznosti taline je odzračevanje livarskega modela zelo zahtevno, zato je ulivanje kompozitov z več kot 20 vol.% ojačitvene faze praktično nemogoče. Da bi omogočili uspešno odzračevanje livarskih modelov, je bilo treba spremeniti njihovo geometrijo in se prilagoditi bolj viskozni talini. Kljub temu so z livarskimi postopki izdelali na desetine različnih prototipnih avtomobilskih komponent na osnovi DOKAI.

Tlačno litje je zelo privlačna metoda oblikovanja DOKAI, ki omogoča izdelavo komponent z zapleteno geometrijo in minimalno dodatno strojno obdelavo. Kompozitni material, ki je v testastem stanju (angl.: semi-solid) in ima izrazito tiksotropne lastnosti, mnogo bolje zapolnjuje model, nasprotno od navadnih aluminijevih zlitin, ki ne vsebujejo keramičnih vključkov. Lahko bi rekli, da je tlačno litje v testastem stanju "ustvarjeno" za DOKAI, saj tiksiformni material tako pravilno zapolnjuje model, da skorajda odpadejo vsi problemi z zračnimi mehurčki, ki so, kot je bilo že omenjeno v prvem delu, ena največjih težav pri nizkotlačnem in gravitacijskem litju DOKAI².

Tlačno vtiskanje taline v porozni keramični skelet (angl.: squeeze casting) je novejša metoda, ki omogoča proizvodnjo avtomobilskih komponent z zapleteno geometrijo in z ozkimi dimenzijskimi tolerancami. Osnovna prednost te metode je v primerjavi s tlačnim litjem, da ni odvisna od visoke stopnje omočljivosti keramične faze s talino (kar je pri vseh livarskih postopkih osnovna zahteva in ji je, kot vemo, zelo težko zadostiti). Zaradi tega je možno uporabljati najrazličnejše aluminijeve zlitine in keramično ojačitveno fazo, kar je izjemnega pomena za prakso. Slaba stran te metode je, da je precej draga v primerjavi s tlačnim litjem, o čemer bomo govorili kasneje.

Tlačna infiltracija porozne keramične predoblike z raztaljenimi aluminijevimi zlitinami je naslednja tehnika, ki omogoča proizvodnjo avtomobilskih delov s kompleksno geometrijo. Postopek je, žal, prepočasen, da bi lahko bil konkurenčen, vendar omogoča izdelavo DOKAI z več kot 50 vol.% ojačitvene faze. V literaturi obstajajo podatki o infiltraciji brez pritiska (oz. spontani infiltraciji) poroznih predoblik, vendar je ekonomičnost takšnega postopka za množično proizvodnjo avtomobilskih komponent dvomljiva. Postopek je razvila družba Lanxide².

DOKAI so bolj krhki od neojačanih aluminijevih zlitin, kar povzroča težave pri njihovem iztiskavanju in kovanju. Zaradi obsežnih polindustrijskih raziskav so parametri vročega kovanja in iztiskavanja DOKAI bolj ali manj že znani in obe tehnologiji njihovega oblikovanja se že uspešno uporabljata za proizvodnjo prototipnih avtomobilskih komponent. Čeprav kovanje zagotavlja niz prednosti, je njegova uporaba za oblikovanje DOKAI precej omejena zaradi velike količine (okrog 30%) odpadnega materiala, nastalega z obrezovanjem odkovkov. Zaradi nerešenih problemov recikliranja je vrednost teh odpadnih materialov mnogo manjša od cene DOKAI, kar negativno vpliva na konkurenčnost postopka kovanja.

3 STROJNA OBDELAVA

Ne glede na to, s kakšno tehnologijo smo oblikovali in izdelali neko avtomobilsko komponento, zahteva končni izdelek tudi strojno obdelavo. Čeprav se je pri proizvajalcih avtomobilskih komponent ustalilo mnenje, da strojna obdelava DOKAI vnaša neke tehnološke omejitve, pa novejši rezultati kažejo, da to ni tako. Z uporabo diamantnih orodij (PCD) postaja strojna obdelava DOKAI pri zadosti velikih proizvodnih serijah pravzaprav zelo konkurenčna. To je v prvi vrsti posledica 2 do 6-krat večje produktivnosti proizvodnje v primerjavi s strojno obdelavo jekla in litega železa z orodji na osnovi jekla ali tistimi s karbidno prevleko, kakor tudi daljše trajnosti PCD-orodij. Le-ta zagotavljajo tudi ožje tolerance in boljše dimenzijsko stabilnost, posebej pri velikih serijah, kar občutno zmanjšuje obseg končne strojne obdelave površine in poliranja ter povrtavanja. Nekatere najbolj pomembne prednosti uporabe PCD orodij so dokumentirane v **Tabeli 1**².

Tabela 1: Primerjava različnih vrst materialov orodij pri strojnem vrtnanju

Material	Vrsta orodij	Hitrost vrtnanja (cm/min)	Število operacij po vrtenini	Število povrtavanj	Trajnost orodij (število vrtenin)
2080/SiC/15p	PCD	63,2	1	0	10 000
Jeklo (0,5 C, 2Cu)	jeklena	11,7	2	2	2000
Ti-6Al-4V	s karbidno prevleko	11,7	2	2	1450

4 ZGLEDI POTENCIALNE UPORABE DOKAI V AVTOMOBILSKI INDUSTRIJI

4.1 Pogonska gred

Pogonska gred pri tovornih vozilih in večjih osebnih avtomobilih je ena izmed najbolj primernih avtomobilskih komponent za DOKAI. Čeprav pogonske gredi tradicionalno izdelujejo iz jekla, pa pri nekaterih

modelih vozil že vrsto let nadomeščajo jeklo z aluminijevimi zlitinami. Osnovne prednosti, ki narekujejo uporabo aluminijevih zlitin kot materiala za pogonske gredi, so nekajkrat manjša masa in njeno lažje uravnovešanje.

Pri načrtovanju pogonskih gredi je treba upoštevati kritično število vrtljajev, N_c , pri katerem gred postaja dinamično nestabilna:

$$N_c = (15\pi/L^2)[(E/\rho)g(R_o + R_i)^2]^{1/2}$$

pri čemer je L dolžina pogonske gredi (m), R_o zunanji polmer (m), R_i notranji polmer (m), E modul elastičnosti (N/m^2), ρ gostota (kg/m^3) in g gravitacijski pospešek (m/s^2).

Kot je razvidno iz zgornje enačbe, je specifični modul ($E/(\rho g)$) (m) edina lastnost materiala, ki vpliva na kritično število vrtljajev gredi, N_c (s^{-1}). Poleg tega vplivajo nanj še notranji in zunanji polmer gredi ter njena dolžina.

Pri nekaterih novih generacijah vozil bo treba izdelati daljše pogonske gredi z nespremenljivim zunanjim premerom, kar z uporabo jekla in aluminijevih zlitin z malim specifičnim modulom (**Tabela 2**) tehnično ne bo izvedljivo zaradi neprimerno nizkega N_c .

DOKAI ponujajo izvrstno rešitev tega problema pri sprejemljivi ceni. Zaradi večjih vrednosti specifičnega modula ponujajo DOKAI možnost izdelave daljših pogonskih gredi pri njihovi nespremenljivi masi in polmeru. Tako npr. uporaba 6161/ $Al_2O_3/20p$ dopušča podaljšanje pogonske gredi za 8% pri nespremenjenem prečnem prerezu komponente. Po drugi strani, pa pri nespremenjeni dolžini pogonske gredi omogoča uporaba DOKAI ustrezno zmanjšanje njenega zunanjega premera in mase, kar je v prid pri načrtovanju novih generacij vozil¹.

Raziskave so pokazale, da je serija zlitin 6XXX najbolj primerna za pripravo DOKAI za te namene¹. Takšen izbor je bil odvisen od korozijske obstojnosti DOKAI in njihovih mehanskih lastnosti. Velikoserijska proizvodnja DOKAI-pogonskih gredi bo zahtevala večje količine iztisnjenih cevi z ozkimi tolerancami in popolnoma osvojeno tehnologijo varjenja z aluminijevimi zlitinami, kar je tehnološko že bolj ali manj rešeno. Če bo ekonomska optimizacija proizvodnje sprejemljiva za avtomobilsko industrijo, lahko po l. 2000 pričakujemo prvo večjo uporabo DOKAI v te namene.

Tabela 2: Primerjava lastnosti nekaterih materialov, ki se uporabljajo za izdelavo avtomobilskih komponent¹

Material	Specifični modul ($E/(\rho g) \times 10^7$) (mm)	Specifična trdnost ($\sigma/(\rho g) \times 10^6$) (mm)
2080/SiC/15p	3,5	7,6
6061/ $Al_2O_3/20p$	3,5	3,8
6061	2,6	4,0
1040 jeklo	2,6	3,0
Ti-6Al-4V	2,5	7,0
Lito železo	2,2	3,0

4.2 Zavorni kolut

Zavorni kolut je drugo veliko področje načrtovane uporabe DOKAI v avtomobilski industriji. Obsežne raziskave, ki so jih v zadnjem desetletju opravili v ZDA in nekaj tudi v Evropi, kažejo, da na tem področju obstaja precejšnje zanimanje avtomobilске industrije³⁻⁵. Osnovna prednost uporabe DOKAI se tudi v tem primeru kaže v zmanjšanju mase (za 50-60%). Masa lito-železnega zavornega koluta je okrog 5,4 kg, masa koluta, izdelanega iz DOKAI, pa le 2,5 kg. Ker gre za zmanjšanje mase rotacijskega sistema in s tem občutno zmanjšanje vztrajnostnih sil, je vpliv na zmanjšanje porabe goriva za 50% večji, kot če bi za enako maso zmanjšali maso ohišja.

Ugotovljeno je, da zmanjšanje mase zavornega rotorja občutno vpliva na boljše pospeševanje vozil kakor tudi na doseganje krajših zavornih poti. Dolgotrajne raziskave pri preskusnih vozilih (s prevoženimi 50 000 km) so pokazale, da so zavore, izdelane iz DOKAI, manj hrupne in da je njihova obraba manjša v primerjavi z litoželeznimi.

Rotor kolutne zavore mora biti abrazijsko obstojen in odporen proti termo šokom. DOKAI lahko učinkovito zadovoljijo obema zahtevama, saj so zaradi trdnih keramičnih delcev abrazijsko zelo obstojni, uvajanje v te namene posebno izbrane ojačitvene faze (fini delci grafita, prevlečeni s plastjo niklja-GrA-NiTM) v matrico iz aluminijeve zlitine pa tudi izboljša njeno toplotno prevodnost za 2-do 4-krat v primerjavi z litim železom. Plast niklja, ki jo izdelajo s termičnim razkrojem nikelj karbonila, poskrbi za boljšo omočljivost delcev grafita s talino. Najboljše rezultate so dosegli s kombinacijo obeh ojačitvenih faz: 10 vol.% delcev SiC ali Al_2O_3 v matrici iz A 359 zagotavlja abrazijsko obstojnost, 5 vol% vključkov GrA-NiTM ustvari 2-4-krat boljšo toplotno prevodnost kompozita v primerjavi z litim železom. Material je bil pred kratkim patentno zaščiten (INCO GrA-NiTM), lastnik patenta je kanadska firma INCO Limited³.

Kronološko lahko torej razlikujemo dve generaciji rotorjev kolutnih zavor, izdelanih na osnovi diskontinuirano ojačanih aluminijevih zlitin: rotorje, izdelane na osnovi zlitine A 359, ojačane z delci SiC ali z Al_2O_3 , in tiste, izdelane s hibridno ojačitveno fazo. Ta je sestavljena iz ojačitve, ki poskrbi za abrazijsko obstojnost, in tiste, ki poskrbi za toplotno stabilnost kompozita.

V obeh primerih se rotorji izdelujejo z gravitacijskim ali tlačnim litjem ter s tlačno infiltracijo. Strojna obdelava je z diamantnimi oz. PCD (angl.: polycrystalline diamond)-orodji.

Primerjava lastnosti med INCOGrA-NiTM in litim železom (**Tabela 3**) odkriva, da ima kompozitni material za nekaj redov velikosti večjo odpornost proti abraziji, skoraj trikrat je lažji, trikrat bolje prevaja toploto in ima za 50% večjo specifično toploto. Res je, da uporaba litega železa omogoča višjo delovno temperaturo v zavornem sistemu, vendar je ugotovljeno, da ob uporabi

kompozitnega materiala, ki nekajkrat bolje prevaja toploto, do tako visokih temperatur v sistemu sploh ne prihaja.

In še po vrhu, pri INCO Limited zatrjujejo, da je njihov novi zavorni kolut za 8% cenejši od litoželeznega.

V **Tabeli 4** je navedena tehnološka primerjava nekaterih livarskih postopkov pridobivanja zavornih kolutov v INCO Limited, ki razkriva, da je tlačno litje najbolj optimalen postopek pri proizvodnji zavornih kolutov³.

Tabela 3: Primerjava lastnosti litoželeznih in INCO GrA-Ni™ zavornih kolutov³

Lastnost	Lito železo	INCO GrA-Ni™
Sestava	Fe/2,9-4,0%C/1,5-2,6%Si/0,7%Mn	Al/8%Si/10vol%SiC p/5 vol%Ni-Gr _p
Abrazijska obraba na suhem (pin-on-disc) (mm ³ /km) obremenitev: 200N 300 N	1000 10 000	1-2 10-20
Gostota (g/cm ³)	6,9-7,35	2,77
Toplotna prevodnost(W/mK)	40-72	138
Specifična toplota (J/gK)	0,56	0,86
Najvišja delovna temperatura (C)	550-600	455

Tabela 4: Tehnološka primerjava nekaterih livarskih postopkov pridobivanja zavornih kolutov¹

Vrsta livarske tehnologije	Globina dodatne strojne obdelave (mm)	Količina ostružkov (zaradi dodatne strojne obdelave)	Poraba taline po odlitku
litje v pesek	1,5	40-55%	250%
litje v kokilo	1,0	20-40%	200%
tlačno litje	0-0,25	0-16%	150%

4.3 Blok motorja in batno vodilo

Večina proizvajalcev je že v zgodnjih devetdesetih letih nadomestila litoželezna ohišja motorja (**Slika 1**) z lažjimi aluminijevimi zlitinami. Prihranki pri masi so 15-35 kg. Največ uporabljajo aluminijeve zlitine A 319 in A 359, ki vsebujejo nekaj silicija¹. Vendar so te zlitine premalo abrazijsko obstojne, da bi bile kos obremenitvam, ki nastajajo na stenah valjev. Proizvajalci so ta problem rešili z uporabo batnega vodila, ki je še vedno narejeno iz litega železa.

V zadnjih letih je več proizvajalcev začelo izdelovati batna vodila iz različnih vrst DOKAL. Uvajanje DOKAL-batnih vodil omogoča dodatni prihranek pri masi, ki je 3-4,5 kg. Poleg tega pa uporaba DOKAL omogoča večji izkoristek motorja zaradi boljše toplotne prevodnosti DOKAL, večje žilavosti in manjših toplotnih raztezkov batnega vodila, ki omogoča boljšo kompresijo.



Slika 1: Ojnice iz aluminijevih zlitin, izdelane s kovanjem

Figure 1: Different connecting rods produced by forging of conventional aluminum alloys

Ideja, ki je bila priljubljena med proizvajalci na začetku, da blok motorja izdelajo v celoti iz DOKAL, je danes zaradi previsokih proizvodnih stroškov skoraj v celoti opuščena. Novejši razvoj poteka v dveh smereh: v proizvodnjo batnih vodil kot posameznih komponent, ki se vstavljajo v valje³ ali v oblaganje valjev s plastjo DOKAL, ki jo izdelajo z različnimi tehnologijami⁶. Prvi postopek je bolj priljubljen v ZDA (pri veliki trojki iz Detroit-a: Chrysler, Ford, General Motors), drugi na Japonskem (Honda). Vsaj zaenkrat je uporaba batnih vodil cenejša in na trgu bolj priljubljena, morda tudi zato, ker omogoča njihovo enostavno menjavo.

Firma INCO Limited je pred kratkim predstavila novo generacijo batnih vodil, izdelanih iz cenejšega kompozita INCO GrA-Ni™, o katerem smo že govorili³. Batna vodila izdelujejo z livarskimi postopki, kot so litje v pesek, v kokilo in tlačno litje. Odlitke strojno obdelajo z uporabo diamantnih orodij. Pri tem so ugotovili, da uvajanje mehkejše ojačitvene faze (delci grafita, prevlečeni s plastjo niklja) dopušča pri stružnih hitrostih pod 122 m/min in globini obdelave pod 1,27 mm uporabo orodij s karbidno prevleko³. Poleg tega se za strojno obdelavo porabi tudi do 40% manj energije kot pri obdelavi DOKAL, ojačanih z delci SiC. Pri večjih hitrostih strojne obdelave (med 450-600 m/min) je neizogibna uporaba diamantnih orodij. Največja dopustna globina strojne obdelave je v tem primeru 1,5 mm.

Stroškovna analiza (**Tabela 5**) kaže, da so, ob dovolj veliki proizvodni seriji (800.000 kosov), batna vodila, izdelana iz INCO GrA-Ni™, nekoliko cenejša v primerjavi z litoželeznimi³.

4.4 Ojnica in bat

Med proizvajalci avtomobilskih komponent prevladuje menje, da so DOKAL najresnejši kandidati za izdelavo lažjih ojnec in batov (**Slika 2**). Zmanjšanje mase teh komponent bi bilo koristno iz več razlogov.

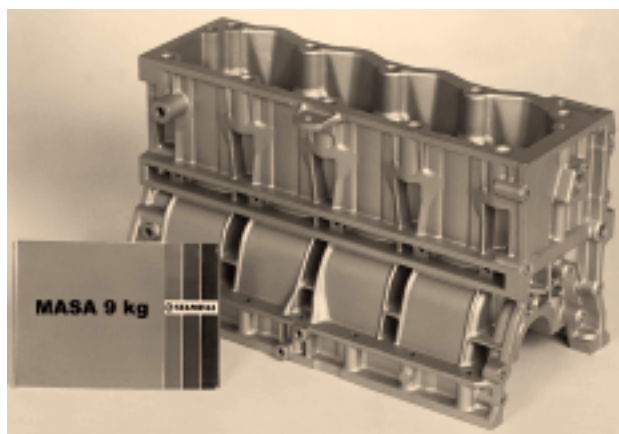
Tabela 5: Stroškovna analiza za litoželezna in batna vodila, izdelana iz kompozitnega materiala INCO GrA-Ni™ (velikost proizvodne serije: 800 000 kosov)³

	Lito železo	INCO GrA-Ni™
Cena materiala	20%*	55%
Proizvodni stroški	80%	37%
Cena končnega izdelka	100%	92%
Masa materiala (g)	2450	535 (tlačno litje)
Masa končnega izdelka (g)	1225	477

*normirano na ceno litoželeznega batnega vodila

Štirivaljni motor je med snovalci nove generacije avtomobilov najbolj priljubljen zaradi ekonomične porabe goriva. Vendar je tudi znano, da pri štirivaljnih motorjih z delovno prostornino nad 2000 cm³ nastajajo nezaželene vibracije, ki bi jih lahko zmanjšali z uporabo lažjega bata in ojnice. Uporaba DOKAl bi med drugim omogočila hitrejšo gibanje bata v valju, zmanjšanje notranjih sil v motorju in s tem v zvezi manjše izgube zaradi trenja, kar bi povečalo izkoristek in občutno zmanjšalo porabo goriva¹.

Skoraj vsi pomembnejši proizvajalci avtomobilskih komponent se že vrsto let ukvarjajo z razvojem ojnice in bata iz novih materialov, kot so aluminijeve zlitine, sintran ali vroče kovan titan in DOKAl. Kot enega izmed najresnejših kandidatov za te namene literatura navaja kompozit 2080/SiC/15p. Le-tega so najprej pripravljali s prašno metalurgijo, kar je za avtomobilsko industrijo nesprejemljivo zaradi cene. Trajna nihajna trdnost 2080/SiC/15p, izdelanega s prašno metalurgijo, je nekoliko manjša od trajne nihajne trdnosti jekla in je 170 MPa (pri delovnih temperaturah, ki se gibljejo v intervalu med 150°C in 180°C), vendar se material odlikuje z izboljšanimi abrazijskimi in termičnimi lastnostmi v primerjavi z jeklom. Ojnice so izdelovali z vročim kovanjem, bate pa s tlačnim litjem osnovnega materiala¹.



Slika 2: Blok motorja, izdelan s tlačnim litjem aluminijevih zlitin
Figure 2: Automotive engine block prepared by die casting of aluminum alloy

Material s podobno sestavo je možno pripraviti tudi s tlačno infiltracijo, ki je cenejša od prašne metalurgije in omogoča pripravo izdelka v eni sami proizvodni operaciji. Kljub temu je stroškovna analiza pokazala, da je postopek konkurenčen šele pri proizvodnih serijah nad 3 milijone kosov.

Toyota je pred petnajstimi leti prva začela redno proizvodnjo batov za osebne avtomobile na osnovi aluminijevih zlitin v svojih dieselskih motorjih. Toyotini bati so ojačani s keramičnimi delci le v površinski plasti, neojačano jedro pa je izdelano iz standardne aluminijeve zlitine. Postopek so poimenovali lokalna ojačitev.

V ZDA je več proizvajalcev v zadnjih letih uspešno izdelalo prototipne bate za osebne avtomobile po lastni tehnologiji. Zaenkrat so se v ZDA tržno uveljavili le bati, v celoti izdelani iz DOKAl, za tovorna vozila z dieselskimi motorji.

4.4.1 Primerjalna stroškovna analiza za bat in vodilo bata, proizvedena iz DOKAl z livarskimi postopki in tlačno infiltracijo

Pri primerjalni stroškovni analizi smo upoštevali dva načina izdelave batov iz DOKAl, in sicer: (1) tlačno infiltracijo (angl.: squeeze casting) porozne predoblike in (2) tlačno litje (angl.: die casting).

Pri izračunu smo izhajali iz naslednjih cen za osnovne surovine: 13,32 USD/kg za prah SiC, 8,82 USD/kg za vezivo, 1,65 USD/kg za aluminijevo zlitino, in ciljne cene za bat (7,50 USD), ki je po oceni nekaterih proizvajalcev avtomobilskih komponent sprejemljiva glede na izboljšave, ki jih prinaša uporaba DOKAl⁷.

Izračuni so pokazali, da je načrtovano ciljno ceno mogoče doseči s tlačnim litjem pri serijah nad 1,5 milijonov kosov in s tlačno infiltracijo pri serijah nad 3 milijone kosov.

Struktura stroškov za obe tehnologiji pridobivanja batov kaže, da je cena končnega izdelka v obeh primerih odvisna od cene osnovnih surovin (še posebej od cene keramične ojačitvene faze). Tako zmanjšanje cene vhodnih surovin za 1 USD ima pri tlačnem litju za posledico zmanjšanje cene bata za 0,9 USD.

Pri stroškovni analizi za batno vodilo smo primerjali dve proizvodni tehnologiji: (1) polkontinuirno iztiskanje cevi iz DOKAl in (2) tlačno infiltracijo (angl.: squeeze casting) keramične predoblike.

Izhajali smo iz enakih cen osnovnih surovin in ciljne cene za batna vodila, ki je med 9,50 in 10,50 USD.

Iztiskana batna vodila lahko dosežejo ciljno ceno že pri serijah nad 2 milijona kosov, s tlačno infiltracijo pa ciljne cene ne bi bilo mogoče doseči celo pri serijah nad 16 milijonov kosov. Tudi v primeru batnega vodila se je izkazalo, da od 65% do 85% cene končnega izdelka pride na ceno vhodnih surovin. Analiza strukture stroškov za iztiskana batna vodila je pokazala, da zmanjšanje cene vhodnih surovin za 1 USD privede do zmanjšanja cene končnega izdelka za 1,2 USD.

5 PRIHODNOST DOKAI NA AVTOMOBILSKEM TRGU

Avtomobilski trg je prav gotovo eden izmed najbolj zapletenih tržnih sistemov sodobnega sveta. Enako zapleteno in nevhvaležno je napovedovati dolgoročne razvojne smeri v avtomobilski industriji, čeprav so splošne, strateške razvojne usmeritve že vsem dobro znane. Sedanji srednjeročni razvoj, ki je zasnovan na uporabi nafte oz. bencina kot pogonskega goriva, je vsekakor usmerjen k 40% zmanjšanju mase osebnih avtomobilov in večji učinkovitosti motorja, kar naj bi porabo goriva zmanjšalo na tretjino sedanje.

Na takojšnje zmanjšanje porabe goriva vpliva v prvi vrsti izredno velik pritisk že veljavne okoljevarstvene zakonodaje, čeprav v zvezi s tem ne smemo pozabiti na dolgoletno željo industrijsko najbolj razvitih držav sveta, da postanejo manj odvisne od svojih dobaviteljev nafte.

Zahtevano zmanjšanje porabe goriva lahko dosežemo tako, da nekajkrat izboljšamo izkoristek energije pri novi generaciji avtomobilskih motorjev. Pri sedanji stopnji razvoja znanosti in inženirstva je naloga morda že tehnološko rešena, vsekakor pa ta rešitev ni cenovno sprejemljiva. Zato je, vsaj za zdaj, edina rešitev v občutnem zmanjšanju mase osebnih avtomobilov.

To lahko dosežemo samo tako, da jeklo in lito železo nadomestimo z aluminijevimi in magnezijevimi zlitinami (žal so titanove zlitine cenovno nesprejemljive). Vendar se je izkazalo, da tudi to ne zadostuje. Drugače povedano, z aluminijevimi zlitinami, ki imajo v primerjavi z jeklom in litim železom manjše mehanske lastnosti, ni možno nadomestiti zadosti avtomobilskih komponent, da bi lahko uresničili 40% zmanjšanje mase. Za tako občutno zmanjšanje mase vozila nujno potrebujemo nove materiale - diskontinuirano ojačane kompozite na osnovi aluminija in magnezija ali pa kompozite s polimerno matrico.

Največji del tehnološkega razvoja DOKAI je danes že končan. Žal so DOKAI, ki ustrezajo tehnološkim zahtevam avtomobilске industrije, še vedno predragi. Zato bo treba material poceniti, ne da bi ogrozili njegove lastnosti.

Kako lahko to dosežemo? V **Tabeli 6** je prikazana struktura proizvodnih stroškov za značilno avtomobilsko komponento, izdelano iz jekla in iz DOKAI.

Primerjava pokaže, da bo na konkurenčnost avtomobilskih komponent, izdelanih iz DOKAI, v največji meri vplivala pocenitev samega materiala, kar smo omenili že prej. Bolj natančna analiza cen osnovnega materiala razkrije, da je cena SiC-ojačitvene faze (13,32 USD/kg) najmanj za red velikosti višja od cene aluminijeve zlitine (1,65 USD/kg), uporabljene za matrico. V nekaterih primerih (tlačna infiltracija) je k ceni SiC-prahu treba prišteti še ceno veziva (8,82 USD/kg).

Uporaba cenejših ojačitvenih faz (pepeli, žindre ipd.), o katerih je v literaturi veliko napisano, v resnici ne zagotavlja zahtevanih mehanskih in termičnih

lastnosti. Izjema so abrazijske lastnosti, ki so dosti boljše v primerjavi z neojačano matrico, pa vendar ne tako dobre kot pri DOKAI, ojačanih z delci SiC in Al₂O₃.

Zdi se, da je prihodnost DOKAI v rokah izdelovalcev keramičnih prahov. Če ne bo mogoče poceniti proizvodnje prahov SiC in Al₂O₃, bo verjetno treba poiskati nove vrste keramičnih ojačitev. Na to temo potekajo v ZDA že zelo obsežne raziskave, ki imajo za cilj pocenitev kvalitetne keramične ojačitve za red velikosti.

Tako se nam na pragu tretjega tisočletja obeta, da bo znanost o materialih prerastla v znanost o konkurenčnih materialih in tehnologijah.

Tabela 6: Struktura proizvodnih stroškov za avtomobilsko komponento, izdelano iz jekla in iz DOKAI¹

	Jeklo	DOKAI
Cena osnovnega materiala	14%	63%
Cena izdelave komponente	51%	11%
Variabilni stroški strojne obdelave	21%	15%
Fiksni stroški strojne obdelave	14%	11%

Zahvala

Rokopis je strokovno pregledal **mgr. Borivoj Šuštaršič** z IMT v Ljubljani. Avtor se mu zahvaljuje za vrsto strokovnih pripomb, zaradi katerih je članek postal bližji domačemu bralcu, tehnično bolj natančen in bolj čitljiv.

Avtor se tudi iskreno zahvaljuje svojemu kolegu in izvrstnemu prijatelju **g. Giani Luigi Chiarmetta-i**, direktorju podjetja Stampal S.p.A. iz Torina, ki je omogočil fotografiranje avtomobilskih komponent iz njihovega rednega proizvodnega programa.

Nastanek tega članka sta finančno podprla Ministrstvo za znanost in tehnologijo Republike Slovenije ter tovarna IMPOL, d.d., iz Slovenske Bistrice.

6 Literatura

- E. J. Allison, S. G. Cole, Metal-Matrix Composites in the Automotive Industry: Opportunities and Challenges, *JOM*, 45 (1993) 1, 19-24
- Cast Metal Matrix Composites, American Foundrymen's Society, Inc., Des Plaines, Illinois 1994
- Processing, Properties, and Applications of Cast Metal Matrix Composites, TMS, Warrendale, Pennsylvania 1996
- M. L. Rinek, US Passenger Car Brake History, *Automotive Engineering*, 103 (1995) 7, 37
- X. S. Huang, K. Paxton, A Macrocomposite Al Brake Rotor for Reduced Weight and Improved Performance, *JOM*, 50 (1998) 8, 26-28
- K. Takahashi, M. Noguchi, Status and Prospects for Metal Matrix Composites in Japan, *Key Engineering Materials*, 127-131 (1997) 153-164
- G. E. C. Mangin, A. J. Isaacs, P. J. Clark, MMCs for Automotive Engine Applications, *JOM*, 48 (1996) 2, 49-51