

KOMPOZITI NA OSNOVI ALUMINIJA V AVTOMOBILSKI INDUSTRIJI PRVI DEL - RAZVOJ MATERIALA

ALUMINUM-BASED COMPOSITES FOR THE AUTOMOTIVE APPLICATION DEVELOPMENT OF THE MATERIAL - PART ONE

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 livarske postopke izdelave avtomobilskih komponent iz kompozitov na osnovi aluminija, diskontinuirano ojačanih s keramičnimi delci (DOKAl) ter postopke njihovega iztiskanja, strojne obdelave in varjenja. Opisani so tudi nekateri načini njihove razgradnje in recikliranja.

Ključne besede: kompoziti na osnovi aluminija, livarski postopki, iztiskanje, strojna obdelava, varjenje, razgradnja, recikliranje, uporaba v avtomobilski industriji

Casting and other forming methods such as extrusion, machining and welding of discontinuously reinforced aluminum-based composites were discussed as enabling technologies and capabilities for the future large tonnage production of automotive components. A special importance of reclamation and recycling of wrought automotive product in cost-sensitive markets such as automobiles was also demonstrated.

Key words: aluminum-based composites, casting, extrusion, machining, welding, reclamation, recycling, automotive applications

1 UVOD

Uspešno trženje nekega novega materiala zahteva navadno veliko več, kot sta le njegov razvoj in zgolj prepoznavnost ciljnih področij uporabe. Pogosto je treba razviti še vrsto tehnoloških postopkov, ki omogočajo uspešen razvoj, oblikovanje, proizvodnjo in zaključno strojno obdelavo končnih izdelkov. Razvoj teh dodatnih tehnologij, nepogrešljivih za uspešno trženje novega materiala, zahteva dodatna vlaganja in raziskave. Izkušnje v razvitih državah so pokazale, da je treba ta, dodatni razvoj nujno opraviti že pri samem proizvajalcu materiala, saj je on edini, ki je zavzet za to, da bo njegov novi material tržno uspešen. Bodoči uporabniki novega materiala navadno nimajo ozko specializiranih proizvodnih zmogljivosti, ki so nujne za njegovo uspešno transformacijo v konkurenčen izdelek.

Lep dokaz za to poslovno usmeritev so diskontinuirano ojačani kompoziti na osnovi aluminijevih zlitin (DOKAl). Gre za skupino materialov, ki so znani že najmanj 25 let, vendar je bil njihov tržni delež pred letom 1987 zanemarljiv. Tega leta se je Alcan Aluminum, eden največjih proizvajalcev in predelovalcev aluminija na svetu, odločil, da v svojem oddelku Duralcan USA v San Diegu, v Kaliforniji začne komercializacijo omenjenih materialov na veliko. Od začetka so vodilni možje v Duralcan-u morda preveč optimistično predvidevali, da bo uspešna komercializacija DOKAl prišla spontano, brž ko se bo povečal obseg njihove proizvodnje in s tem nekoliko znižala cena.

Vendar se je po zagonu nove proizvodnje hitro izkazalo, da bo treba za uspešno tržno promocijo DOKAl nujno investirati v tehnologije oblikovanja strojnih komponent, razvoj postopkov recikliranja odpadnega in izrabljenega materiala ter v nove postopke kontrole kakovosti končnih izdelkov.

2 CENA MATERIALA

Ena izmed najpomembnejših, vendar navadno premalo obravnavanih in preučevanih "lastnosti" novih materialov, je njihova cena. Morda se zdi neverjetno, vendar je popolnoma res, da večina znanstvenikov, ki se ukvarja z razvojem novih materialov, pozablja na to pomembno lastnost svojih izdelkov. S to težavo se ne spopadamo le pri nas. Poznajo jo, morda še v hujši obliki, tudi v najbolj razvitih državah sveta.

Kakorkoli že, ko je nov material uspešno razvit in je uspešno preстал vse tehnične preizkušnje pri bodočem kupcu, je dokončna odločitev o nakupu samo še vprašanje cene. Material je, praviloma, tržno zanimiv le, ko je njegovo višjo prodajno ceno mogoče upravičiti z najmanj tolikokrat izboljšanimi lastnostmi končnega izdelka.

V splošnem je koncept dodane vrednosti zaradi izboljšanih lastnosti osnovnega materiala problematičen, saj se obseg dodane vrednosti lahko močno spreminja v odvisnosti od tržnih zahtev, časa in, navsezadnje, politike. Tako je na primer dodano vrednost, ki jo v avtomobilski industriji ustvarja neki nov material

mogoče skoraj natančno ugotoviti z ekonomskimi učinki zmanjšanja mase vozil. Znano je namreč, da zmanjšanje mase osebnih avtomobilov za 10% povzroči v povprečju za 5,5% manjšo porabo goriva. Z drugimi besedami, zmanjšanje mase osebnega avtomobila za 91 kg nam omogoča, da z vsakim litrom goriva prevozimo dodatnih 0,43 km poti¹.

Pogosto pa je izboljšava lastnosti končnega izdelka takšna, da se je ne da direktno ekonomsko ovrednotiti. Lep primer za to je izboljšana možnost recikliranja materiala. Tudi ekološko zelo ozaveščeni kupci bodo težko odšteli nekaj več denarja za avtomobil, ki ga bo lažje reciklirati. To je že prostor, v katerega mora načrtno poseči država z ustreznimi zakonodajo.

Zaradi Duralcanovega zanimanja za množično prodajo kompozitnih materialov so se v tej tovarni že na samem začetku odločili, da poskrbijo za čim nižjo ceno materiala. Tako so npr. kot ojačitveno fazo uporabili komercialne prahove Al_2O_3 in SiC, ki se množično uporabljajo v proizvodnji abrazivnih in polirnih sredstev. Za dodatno zmanjšanje proizvodnih stroškov so poskrbeli z uporabo aluminijeve zlitine, direktno iz talilne peči, s čimer so občutno zmanjšali porabo energije (za pretaljevanje ipd.).

Da bi za tržno uvajanje novega materiala zagotovili ustrezne proizvodne zmogljivosti, so v kraju Jonquiere, v Quebec-u (Kanada), zgradili livarno s kapaciteto 12.500 ton/leto¹.

To livarno so opremili z bolj ali manj prototipno opremo, ki je bila izdelana izključno za proizvodnjo DOKAl po patentno zaščiteni Duralcanovi tehnologiji. Med pomembnejše dele opreme spadajo linija za termično obdelavo prahov, oprema za uvajanje praškastih delcev v talino, posebno oblikovan reaktor z mešalom, oprema za ulivanje palic in računalniško krmiljen sistem za kontrolo kakovosti, ki vsakih šest sekund kontrolira in regulira vse najpomembnejše tehnološke parametre proizvodnega postopka. Kontrola kakovosti izdelkov je po merilih ISO 9002 ter, na zahtevo kupcev, po najstrožjih predpisih, ki jih narekuje uporaba v avtomobilski industriji.

3 TEHNOLOGIJE OBLIKOVANJA KONČNIH IZDELKOV

Ena izmed poglavitnih prednosti DOKAl je v tem, da se njihova obdelava v osnovi ne razlikuje od tiste za aluminijeve zlitine, tudi ko gre za različne postopke litja, ekstrudiranja, strojno obdelavo ali varjenje.

Pa vendar, resnici na ljubo moramo poudariti, da je treba pri obdelavi DOKAl neizogibno vpeljati nekatere pomembne spremembe v sedanji tehnologiji oblikovanja aluminijevih zlitin. Pravilna in jasna predstava o tem, kaj je treba spremeniti v obstoječem tehnološkem postopku obdelave aluminijevih zlitin in kako, pa tudi določanje natančnih tehnoloških parametrov obdelave (nekateri to imenujejo "odpiranje" procesnih oken), zahteva znatne

investicije in razvojne zmogljivosti. Čeprav so v Duralcanu na začetku razmišljali o toplem valjanju in kovanju DOKAl, so se razmeroma hitro osredotočili na razvoj livarskih postopkov ter študij parametrov ekstrudiranja, strojne obdelave in varjenja kot osnovnih postopkov obdelave DOKAl.

4 LIVARSKI POSTOPKI

Ker se največ avtomobilskih komponent, ki so jih v Duralcanu želeli nadomestiti z DOKAl, proizvajajo z livarskimi postopki, je razumljivo, da so največjo pozornost namenili ravno livarski predelavi na novo izdelanega kompozitnega materiala. Čeprav se lahko vsak livarski postopek, ki je primeren za aluminijeve zlitine, uspešno uporablja za vlivanje DOKAl, je tudi v tem primeru treba vpeljati nekatere spremembe. Vsekakor najbolj pomembna med njimi je intenzivno mešanje taline, ki omogoča, da keramični delci ostanejo stabilno dispergirani v raztaljeni aluminijevi zlitini. Nadalje je treba natančno kontrolirati temperaturo taline in jo vzdrževati pod kritično vrednostjo, pri kateri intenzivno nastaja aluminijev karbid (Al_4C_3), ki zelo negativno vpliva na viskoznost taline.

Običajna obdelava taline s solmi ne pride v poštev, ker bi povzročala takojšnje izločanje keramične faze. Zato je bilo treba vpeljati nove postopke obdelave taline brez uporabe soli. Nadalje je bilo treba nekoliko spremeniti samo tehniko ulivanja in jo prilagoditi povečani viskoznosti taline. Talina DOKAl je namreč tako viskozna, da v njej lahko ostanejo ujete večje zračne blazine in mehurčki. Zaradi tega je treba ustvariti učinkovito odzračevanje, kar dosežejo s posebnim oblikovanjem ulivnega sistema.

Sodobne izboljšave livarske tehnologije za DOKAl potekajo v smeri optimizacije postopkov izdelave avtomobilskih komponent z minimalnimi proizvodnimi stroški. Med te spada v prvi vrsti strojna obdelava ulitkov. Ozke tolerance pri ulivanju DOKAl so pomembne najmanj iz treh razlogov: zmanjšuje se potreba po dodatni strojni obdelavi, zmanjšuje se poraba kompozitnega materiala pri posameznih ulitkih in zmanjšuje se količina odpadnega materiala.

5 EKSTRUDIRANJE DOKAl

Zaradi zelo trdih keramičnih vključkov so DOKAl pri ekstrudiranju bolj abrazivni kot navadne aluminijeve zlitine. Pri večjih proizvodnih serijah je to zelo resen tehnološki problem, ki med drugim bistveno vpliva na povečanje cene iztiskanih izdelkov. Pri ekstrudiranju DOKAl se zelo hitro obrabljajo iztiskalne votlice. Po drugi strani pa je za iztiskanje DOKAl potrebno uporabiti večje tlake, kar dodatno obremenjuje orodja, še posebej, ko gre za iztiskanje votlih profilov. Hitrost iztiskanja DOKAl je manjša od navadnih iztiskovalnih hitrosti, kar tudi povečuje proizvodne stroške. V praksi

bi temu rekli, da je "procesno okno" za iztiskanje DOKAl precej ožje v primerjavi z navadnimi Al-zlitinami.

Najti poceni material za iztiskalna orodja, ki bo ob tem zagotavljal tudi optimalno kombinacijo lastnosti, kot so abrazijska obstojnost, mazivnost, žilavost in obstojnost pri termo šokih, je bila za razvojnike v Duralcanu vsekakor zelo zahtevna naloga, vendar so jo uspešno rešili. Z uporabo novih materialov je bilo treba spremeniti tudi obliko orodij. Danes se Duralcanovi kompoziti rutinsko iztiskajo v profile najrazličnejših oblik: od cevi za športna kolesa do pogonskih gredi za avtomobile ter I-profilov in palic. Naj kot primer omenimo, da so v tovarni Anodizing Inc. uspešno iztisnili več kot 100 km cevi DOKAl za gorska kolesa Stumjumper, ki jih proizvaja Specialized Bicycle Company.

6 STROJNA OBDELAVA

Ena izmed najbolj problematičnih in najmanj raziskanih tehnologij obdelave DOKAl je strojna obdelava. Skoraj vsako avtomobilsko komponento je treba strojno obdelati, če ne drugače, pa vsaj z vrtnjem, vrezovanjem navojev ipd. Cena končnega izdelka je v veliki meri odvisna od strojne obdelave (pogosto pomeni strojna obdelava skoraj 50% končne vrednosti izdelka!). Zato so v Duralcanu v obdobju med 1990 in 1994 posvetili posebno pozornost razvoju strojne obdelave DOKAl, ki bi bila učinkovita in zadosti konkurenčna ("zadosti" pomeni, da je lahko nekoliko dražja od strojne obdelave aluminijevih zlitin in litega železa, predvsem zaradi boljših lastnosti DOKAl-izdelkov). Po besedah T. F. Klimowicz-a, vodje kontrole kakovosti v Duralcanu, je bilo izjemno težko ugotoviti, kako na tržno sprejemljiv način strojno obdelovati DOKAl². Na srečo ga je mogoče strojno obdelovati na strožnicah, vrtnih strojih ali CNC-strojih, ki se že uporabljajo pri obdelavi aluminijevih zlitin in litega železa. Lahko se jih tudi žaga na napravah za aluminijeve zlitine, vendar le z žagami s karbidno prevleko. Žagamo jih s srednje velikim tlakom žage na material ter s hitrostmi, ki so pod 70 m/min. Namesto tistih s karbidno prevleko lahko uporabljamo sodobnejše diamantne žage, ki omogočajo večje hitrosti žaganja (nad 500 m/min) in le nezatni tlak le-teh na material. Diamantne žage je priporočljivo uporabljati za žaganje kompaktnih profilov s prečnim presekom nad 15 cm², tiste s karbidno prevleko pa lahko uporabljamo pri votlih profilih z manjšim prečnim presekom; v obeh primerih je cena žaganja DOKAl precej pod 0,01 USD/cm².

Pravilna izbira orodij in tehnoloških parametrov strojne obdelave je vsekakor odločujoča pri strojnem oblikovanju komponent na osnovi DOKAl. Obsežne raziskave v Duralcanu so pokazale, da je uporaba orodij, prevlečenih s polikristaliničnimi diamantnimi zrni (PCD-orodja) velikosti 15-40 μm, najboljši kompromis med kvaliteto in ceno. Čeprav so tehnološki parametri

strojne obdelave odvisni od vrste izdelka in niza drugih dejavnikov, omenjajo Duralcanova priporočila (za PCD-orodja) hitrosti med 300-700 m/min, podajalne hitrosti med 0,1 in 0,5 m/obrat in globino rezanja do največ 2,5 mm. Pravilna izbira vrtnih hitrosti je še posebej kritična. Prenizke vrtnalne hitrosti kmalu uničijo celo PCD-sveder. Priporočljive vrtnalne hitrosti (za PCD-orodja) določa naslednja formula:

$$f = d^{1.5}/50$$

pri čemer je d - premer svedra (mm) in f - vrtnalna hitrost (mm/obrat).

Čeprav je uporaba svedrov s karbidno prevleko sprejemljiva za manjše prototipne serije, pa pride za večje proizvodne serije v poštev le uporaba PCD-orodij z diamantnimi zrni, zasintranimi v karbidno podlago (Svedri z diamantnimi zrni, zalotanimi na podlago, ne dajejo zadovoljivih rezultatov!). Uporaba sintranih diamantnih svedrov zagotavlja dolgo obstojnost orodij pri ceni strojne obdelave DOKAl, ki je 0,04 USD/cm.

Za izrezovanje pločevine iz DOKAl lahko uporabljamo jeklena orodja, s katerimi v eni sami proizvodni operaciji izrežemo na desetine odprtin po ceni, ki je pod 0,02 USD po operaciji.

Elektroobločno odrezavanje DOKAl in rezanje z vodnim curkom sta z nekaj izjemami, ki zajemajo ozko specializirane izdelke, zaradi prepočasnega rezanja in visoke cene nesprejemljivi za velike proizvodne serije.

Na temelju naštetih dejstev lahko sklepamo, da je velikoserijska strojna obdelava DOKAl, še posebej s sodobnimi CNC-stroji, zelo učinkovita in konkurenčna. Tako lahko npr. z obdelavo na CNC strojih izdelamo kolutno zavoro (brake rotor) z dimenzijskimi tolerancami pod 0,01 mm in z obrabo diamantnih orodij, ki stane 1 USD na rotor.

Lahko torej sklepamo, da postaja z uvedbo diamantnih (PCD) orodij strojna obdelava DOKAl bolj ali manj rutinska tehnična operacija in bo, z množičnim prehodom na PCD-orodja, kakor tudi z njihovim nadaljnjim razvojem in pričakovano pocenitvijo, vse bolj konkurenčna.

7 VARJENJE

Razvoj tehnologije varjenja DOKAl je zelo pomemben, posebej pri proizvodnji ohišij športnih in motornih koles in pri izdelavi pogonskih gredi. Na srečo je mogoče Duralcanove DOKAl enostavno variti z obstoječimi tehnikami varjenja aluminijevih zlitin.

Osnovni problem pri varjenju DOKAl je, da je material bolj viskozen kot aluminijeve zlitine in teže teče. Na to se je treba navaditi in temu ustrezno prilagoditi velikost zvarnega kota in geometrijo zvarnega spoja, tako da bolj viskozna zvarna tekočina DOKAl lahko steče do korena zvara. Pri DOKAl, ojačanih z Al₂O₃ delci, se zaradi kemijske inertnosti Al₂O₃ pri varjenju ni treba bati dodatnih kemijskih reakcij med ojačitveno fazo in aluminijevo zlitino. Nasprotno je treba pri

varjenju DOKAl, ojačanih z delci SiC, paziti, da temperatura taline zvarne kopeli ne preseže kritične meje za nastanek aluminijevega karbida (saj ne za daljše časovno obdobje). Kot eno izmed možnih rešitev so pri Duralcanu uspešno preizkusili uporabo varilne elektrode, izdelane iz DOKAl, s povečano koncentracijo silicija, ki preprečuje nastanek aluminijevega karbida.

8 RAZGRADNJA IN RECIKLIRANJE DOKAl

Kakršnokoli načrtovanje večje industrijske porabe DOKAl zahteva, da se pred tem uspešno reši problem njihove razgradnje in recikliranja. Če bi se namreč izkazalo, da je DOKAl nemogoče uspešno in poceni reciklirati ali vsaj razgrejevati, bi aluminijeve zlitine, diskontinuirano ojačane z keramičnimi delci, takoj izgubile konkurenčni boj z drugimi sodobnimi materiali, katerih množično uporabo tudi preizkušajo v avtomobilski industriji.

Razgradnja DOKAl na sestavno aluminijevo zlitino in ojačitveno fazo ni problematična in se izvaja s pretaljevanjem DOKAl v rotacijski peči z dodatkom soli. Ugotovljeno je, da dodatek soli, ki se uporablja za pretaljevanje aluminijeve žlindre v rotacijski peči, omogoča regeneracijo 80% aluminijeve zlitine². Za njeno regeneracijo iz DOKAl so preizkusili tudi sodobnejše postopke pretaljevanja (npr. s plazmo), ki omogočajo enako učinkovito izločanje aluminijeve zlitine z dosti manj dodane soli. Poleg tega so ti novejši postopki zanimivi tudi zato, ker z nekaj dodatne obdelave omogočajo regeneracijo keramičnega prahu.

Za razgradnjo DOKAl je torej mogoče uspešno uporabljati komercialno opremo za pretaljevanje aluminijeve žlindre. Žal je razgradnja DOKAl s poslovnega stališča najmanj zaželena, saj iz dragega kompozitnega materiala ustvarja najmanj trikrat cenejšo aluminijevo zlitino in keramično fazo, ki je skoraj za red velikosti cenejša od komercialno dosegljivih keramičnih prahov.

Zato je osnovno zanimanje proizvajalcev DOKAl usmerjeno v načrtovanje novih postopkov učinkovitega recikliranja.

Duralcanovih kompozitov ni težko reciklirati s Duralcanovo proizvodno opremo (v vakuumski talilni peči z mešalom), vendar je ta oprema preveč draga, da bi

na podobni, kupljeni opremi predelovalci DOKAl reciklirali svoj odpadni material. Pretaljevanje odpadnih DOKAl v indukcijskih pečeh je sprejemljivo, ko gre za DOKAl, ojačane z delci SiC. Tako je mogoče reciklirati več kot 50% odpadnega materiala brez večjega vpliva na njegovo kakovost².

Recikliranje DOKAl, ojačanih z delci Al₂O₃, pa je žal bolj zahtevno in ga je zdaj mogoče učinkovito izvajati le z Duralcanovo proizvodno opremo (vakuumška talilna peč z mešalom). Duralcanova poslovna politika omogoča kupcem, da lahko odpadne DOKAl, ojačane z delci Al₂O₃, pošljejo v Quebec na pretaljevanje. Zelo obsežne raziskave so pokazale, da dodatek 50% odpadnega DOKAl talini, iz katere proizvajajo nov kompozit, ne vpliva na njegovo kvaliteto².

Tehnološko in ekonomsko uspešno recikliranje DOKAl je vsekakor eden izmed ključnih dejavnikov za njihovo množično uporabo v avtomobilski industriji. Zato je to področje, na katerem se pričakujejo novi razvojni dosežki.

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 navsezadnje bolj čitljiv.

Avtor se tudi iskreno zahvaljuje svojemu kolegu in izvrstnemu prijatelju **g. Giani Lugi 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.

9 LITERATURA

¹ E. J. Allison, S. G. Cole, Metal-Matrix Composites in the Automotive Industry: Opportunities and Challenges, *JOM*, 45 (1993)1, 19-24

² F. T. Klimowicz, The Large Scale Commercialization of Aluminum-Matrix Composites, *JOM*, 46 (1994) 11, 49-53

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 avtomobilске 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 avtomobilске 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 ojnica in batov (**Slika 2**). Zmanjšanje mase teh komponent bi bilo koristno iz več razlogov.

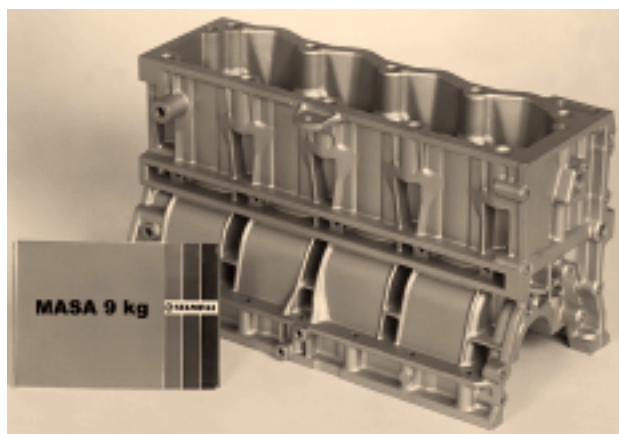
Tabela 5: Stroškovna analiza za litoželezna in batna vodila, izdelana iz kompozitnega materiala INCO GrA-Ni™ (velikost proizvodne serije: 800 000 kosov)³

	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