

# 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 poti<sup>1</sup>.

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/leto<sup>1</sup>.

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 varjenja.

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 DOKAl<sup>2</sup>. 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 cm<sup>2</sup>, 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/cm<sup>2</sup>.

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 vrtnalno hitrosti kmalu uničijo celo PCD-sveder. Priporočljive vrtnalno 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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> delci, se zaradi kemijske inertnosti Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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 zlitine<sup>2</sup>. 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 kakovost<sup>2</sup>.

Recikliranje DOKAl, ojačanih z delci Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 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 kvaliteto<sup>2</sup>.

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

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

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