

Razvoj postopkov pridobivanja kompozitov na osnovi zlitin Al, diskontinuirano ojačanih s kemijsko aktiviranimi pepeli

Aluminium-Fly Ash Discontinuously Reinforced Composites: Preparation and Commercial Benefits

V. M. Kevorkijan¹, Limbuš

Prejem rokopisa - received: 1996-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1997-01-17

Delo obravnava razvoj novih livarskih postopkov pridobivanja in recikliranja kompozitov na osnovi zlitin Al, diskontinuirno ojačanih s kemijsko aktiviranimi pepeli, nastalimi iz premoga, njihovo mikrostrukturno in mehansko karakterizacijo, livnost in predelovalnost z vročim ekstrudiranjem, izdelavo kompozitov ter študij vpliva različnih parametrov procesa in lastnosti ojačitvene faze na kvaliteto pridobljenih kompozitov. Z raziskavami želimo ustvariti potrebno novo znanje za načrtovanje polidistrijske proizvodnje kompozitov v tovarni Impol.

Ključne besede: livarski postopki, pepel kot ojačitvena faza, morfološke značilnosti ojačitvene faze, kemijska aktivacija pepela, kemijska stabilizacija delcev v talini, kemijske spremembe na meji keramika-matrica, mehanske lastnosti, obdelovalnost izdelanih kompozitov z vlivanjem in vročim ekstrudiranjem, modeliranje

Foundry processing techniques have been successfully developed to produce aluminium alloy-fly ash composite casting. Fly ash particles were successfully dispersed in the Al alloy matrix by stir casting and uniform microscopic distribution of fly ash particles was observed in a variety of small castings. The addition of precipitator fly ash into aluminium increases the hardness of the casting and improves their application potential. The elastic modulus of aluminium casting increases as the volume percentage of fly ash increases. Fly ash significantly increases the abrasive wear resistance of cast aluminium alloys. This is due to the presence of hard aluminosilicate fly ash particles. Aluminium-fly ash composites represent a low cost, ultra light future foundry product with possible widespread applications in the automotive, small engine, and electromechanical machinery sector.

Key words: foundry methods, fly ash as the reinforcing phase, morphological characterisation of reinforcing phase, chemical activation of ash particles, chemical stabilisation of fly ash particles in Al melt, characterisation of the interface fly ash-Al alloy matrix, improvement of mechanical properties, formability of fly ash composites by casting and hot extrusion, modelling

1 Uvod

Proizvajalci ter predelovalci aluminija in sodobnih materialov, zasnovanih na njegovih zlitinah, se že vrsto let trudijo, da bi svoje izdelke plasirali v avtomobilsko industrijo. Diskontinuirno ojačane kompozite na bazi aluminijevih zlitin (DOKAl) so že v preteklosti predložili kot enega izmed najresnejših kandidatov za doseg tega cilja. Lastnosti, ki jih ti materiali imajo, so še posebej uporabne pri zasnovi sodobnih avtomobilskih motorjev in novih konceptov vozil. Konkurenčnost diskontinuirno ojačanih kompozitov se kaže v zelo ugodni združitvi funkcionalnih lastnosti kovin in keramike. Združitev teh dveh materialov v kompozit s kovinsko matrico, v kateri so diskontinuirano porazdeljeni keramični delci določene velikosti in morfologije, privede do novih, praktično uporabnih lastnosti, kot so večja trdota, trdnost, abrazijska obstojnost, večji modul elastičnosti, boljše visokotemperaturna obstojnost proti lezenju, itd., kakor tudi nekaterih termičnih lastnosti. Med njimi je najpomembnejše zmanjšanje (oz. možnost načrtovanja) vrednosti koeficienta toplotnega raztezanja kompozita. Poročajo, da diskontinuirana ojačitev Al matrice omogoča tudi izboljšanje korozijske obstojnosti materiala.

Osnovni motiv za uporabo teh materialov v avtomobilski industriji je dolgoročno želja proizvajalcev po čim lažjem, manj hrupnem in bolj ekonomičnem avtomobilskem motorju. Izboljšanje mehanskih lastnosti pri povišanih temperaturah omogoča precejšnje zmanjšanje mase gibljivih delov motorja (po nekaterih ocenah 12-17%) in s tem zasnovo novega motorja, ki obratuje pri večjem tlaku v valjih motorja in zato z večjim izkoristkom. Zahvaljujoč manjšemu koeficientu toplotnega raztezka diskontinuirano ojačanih kompozitov s kovinsko osnovo je razlika v premeru valja in bata lahko bistveno manjša. To seveda zagotavlja boljši toplotni tok skozi bat in manjšo maso obeh komponent.

V tem trenutku so na trgu diskontinuirno ojačani kompoziti na osnovi zlitin Al-Mg in Al-Si-Mg, ki vsebujejo delce Al_2O_3 in SiC različnih oblik in površinske sestave. Kompozite pridobivamo z livarskimi postopki (umešavanje delcev v matrico, ki je v raztaljenem ali testastem stanju) ali pa z infiltracijo pod tlakom. Druge metode pridobivanja DOKAl so vsaj zaenkrat, zaradi previsoke cene, nezanimive za avtomobilsko industrijo.

Naj omenimo, da obstajajo tudi druga tržno zanimiva področja uporabe teh materialov, kot so: proizvodnja športne opreme (dirkalna in motorna kolesa, palice za baseball, palice za golf, deli športnih letal in navtične opreme, deli smučarske opreme, npr. sponke smučarskih čevljev, itd.), okviri očal, ohišja ročnih ur, ohišja pisal-

¹ Dr. Varujan M. KEVORKJAN
Alpha and Omega in Composites
Lackova 139, 2341 Limbuš, Slovenija

nega pribora, konstrukcijski deli pohištva, različni industrijski hranilniki, mehansko obremenjeni profili itd. Zaradi majhnega koeficienta termičnega raztezka je DOKAI zelo zanimiv material za ohišja in nosilce optičnih in antenskih priprav. Industrija malih gospodinskih aparatov, proizvajalci gostinske opreme, izdelovalci dvigal, industrija kovinoplastičnih izdelkov, izdelovalci sefov, trezorjev, bančnih oklepni vozil itd. - pomenijo potencialne odjemalce teh materialov v prihodnosti.

Osnovne omejitve pri nadaljnjem uspešnem uvajanju teh materialov na trg so: visoka cena - v glavnem kot posledica: (1) premalo razvitih in izpopolnjenih postopkov njihove proizvodnje in (2) uporabe drage ojačitvene faze (cena ojačitvene faze je za red velikosti večja od cene matrice), kvaliteta, ki ne ustreza teoretično pričakovanim lastnostim, nerešeni ali premalo rešeni problemi strojne obdelave in oblikovanja končnih izdelkov, zahtevno recikliranje in premalo inženirskih podatkov, ki bi omogočili uspešno oblikovanje strojnih komponent.

Zato je osnova za uspešno trženje teh materialov v prihodnosti tehnološko in ekonomsko reševanja naslednjih ključnih problemov:

1. Izbira cenejših ojačitvenih faz, ki spontano omakajo talino Al
2. Razvoj cenejših livarskih postopkov pridobivanja DOKAI
3. Možnost oblikovanja končnih izdelkov z ulivanjem.

2 Analiza in pregled relevantne literature in rezultatov lastnih raziskav

V dosegljivi literaturi je zelo malo prispevkov, ki se nanašajo na pripravo in karakterizacijo kovinskih kompozitov, diskontinuirno ojačanih z delci pepela¹⁻⁴. V glavnem gre za prispevke ene same raziskovalne skupine z Univerze v Wisconsin-u, ki je do sedaj tudi edina v večjem obsegu raziskovala to problematiko. Pregled patentne dokumentacije je pokazal, da na tem področju zaenkrat ni prijavljenih patentov. Razpolagamo s podatki, da je napisanih le več industrijskih poročil, ki pa so zaprtega tipa. Edino industrijsko poročilo, ki nam ga je uspelo pridobiti, je poročilo ENEL, S.p.A. Poročilo obravnava možnosti nadaljnje uporabe velikih količin pepelov, ki nastajajo v ENEL-ovem industrijskem obratu v Brindisiju.

Veliko več je dostopne literature, ki opisuje livarske postopke priprave kompozitov iz nekaterih drugih cenejših surovin. Tako avtorji⁵⁻¹¹ opisujejo livarske postopke direktnega umešavanja delcev grafita, nekaterih oksidov in karbidov (SiO_2 , Al_2O_3 in SiC) v talino Al z uporabo metode vrtinca. Čeprav gre za nekoliko starejšo literaturo, smo pri profesorju P. K. Rohatgiju dobili zagotovila, da so iste ali zelo podobne tehnološke rešitve osnova za uvajanje delcev pepela v talino Al. Podobno metodo so avtorji^{12,13} uporabljali tudi za uvajanje delcev sljude, delcev oglja, pridobljenega iz lusk kokosovega oreha^{14,15}, delcev ilita ter prahov Al_2O_3 in SiC ¹⁶. Zani-

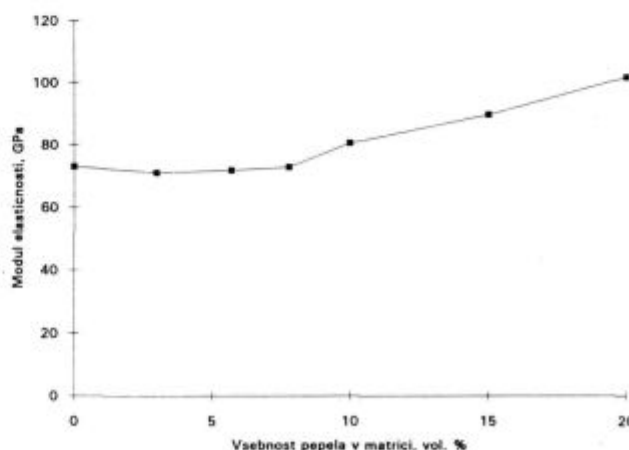
miv je tudi postopek aktiviranja keramičnih delcev s plastjo MgO, pripravljeno z impregnacijo ali prekrivanjem površine keramičnih delcev z MgO iz raztopine¹⁷. Zelo obsežen pregled raziskanih livarskih postopkov in sistemov za ojačitev kovinske matrice s teoretično razlago procesa uvajanja keramičnih delcev v talino je profesor Rohatgi s sodelovci objavil že pred desetimi leti¹⁸. Delo je še zmeraj aktualno in ga pogosto navajajo v novejši literaturi, ki se ukvarja z razvojem livarskih postopkov priprave diskontinuirno ojačanih kompozitov.

Dosedanje raziskave na področju Al-kompozitov, diskontinuirno ojačanih z delci pepela, so pokazale, da je mogoče z enostavnimi livarskimi postopki in na ekonomičen način pripraviti kompozitni material, ki vsebuje 10 do 25 vol.% ojačitvene faze. Študij mehanskih lastnosti Al kompozitov, diskontinuirno ojačanih s pepeli, pa je pokazal, da že uvajanje 10 vol.% pepela v matrico Al za pribl. 10% zmanjša gostoto kompozita (na 2,35 g/cm³) ob približno 15% povečanju modula elastičnosti, 25% povečanju mikrotvrdote matrice in najmanj 50% povečanju abrazijske odpornosti materiala (Slika 1 in 2)

Opravljen je bila tudi obsežna študija o možnostih ulivanja taline Al, ki vsebuje 10 vol.% pepela kot ojačitvene faze, in oblikovanja najrazličnejših izdelkov za potrebe avtomobilske industrije z uporabo standardnih postopkov ulivanja. Raziskave so pokazale, da je talina Al s homogeno dispergiranimi delci pepela mogoče uspešno ulivati tudi, ko gre za izdelke zapletenih oblik.

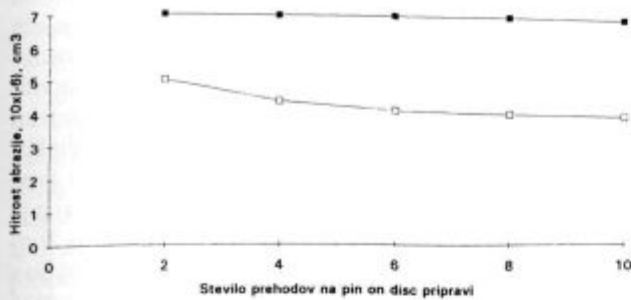
Hkrati so bile razvite kemijske metode ločevanja določenih sestavin pepelov (povečanje deleža SiO_2 in Al_2O_3) in pridobivanja frakcije delcev z ozko porazdelitvijo velikosti delcev.

Morfološka karakterizacija delcev pepela je odkrila, da gre večinoma za kroglične delce, ki so v določenih primerih tudi votli. Priprava frakcij votlih delcev je še posebej zanimiva za pridobivanje diskontinuirno ojačanih kompozitov, ki se ob izboljšanju mehanskih lastnosti odlikujejo z manjšo gostoto kot matrica, in s



Slika 1: Modul elastičnosti matrice Al ojačane z delci pepela v odvisnosti od deleža ojačitvene faze

Figure 1: The tensile elastic modulus of Al alloy matrix-fly ash composites increases as the fly ash content increases



Slika 2: Spreminjanje hitrosti abrazije kompozita Al ojačanega z delci pepela v odvisnosti od števila prehodov na pripravi pin on disc

Figure 2: Variation of abrasive wear with number of passes on pin on disc apparatus

sposobnostjo absorpcije vibracij. Izkazalo se je, da je z uporabo votlih delcev pepela mogoče pripraviti kompozite, ki se po svoji gostoti približujejo kompozitom z magnezijevo osnovo.

Naše dosedanje eksperimentalne raziskave livarskih postopkov priprave diskontinuirano ojačanih kompozitov s kovinsko matrico¹⁹⁻²³ so se nanašale le na en sistem (Al-Si-Mg-SiC). Pokazali smo, da je z ustrezno obdelavo površine keramičnih delcev in s spreminjanjem sestave taline mogoče uspešno dispergiranje in ohranjanje delcev v talini, tudi ko gre za drobnejše delce. To je osnova za razvoj zelo učinkovitih livarskih postopkov priprave DOKAl. Ob uvajanju keramičnih delcev v talino je sestava taline in površine keramičnih delcev takšna, da omogoča uspešno uvajanje delcev v talino. Sestava taline se spremeni tako, da sprememba omogoča potek kemijskih reakcij, ki prispevajo k zmanjšanju notranje energije dispergiranih delcev in s tem stabilizirajo delcev v talini. Metodo smo praktično preizkusili v primeru neposrednega uvajanja delcev SiC velikosti pod 10 µm v talino Al in dosegli do 15 vol% ojačitvene faze v matrici. Za aktivacijo površine delcev SiC smo preizkusili več različnih aktivatorjev (plasti ogljika, SiO₂), med njimi tudi pripravo plasti MgO na površini delcev SiC.

3 Sedanje stanje znanja na področju kompozitov, diskontinuirano ojačanih z delci pepelov

Trenutno najboljše raziskovalni program na temo kompozitov Al, diskontinuirano ojačanih z delci pepelov, izvajajo na Univerzi v Wisconsin-u, ZDA. Program podpira nekaj znanih avtomobilskih proizvajalcev (General Motors, Ford), inštitutov (EPRI-Electrical Power Research Institute) in državnih ustanov (Naval Research Office, US Department of Energy). Podobne industrijske raziskave izvajajo pri Briggs & Stratton-u, pri Sundstrand-u, Alcan-u, v Norsk Hydro, Comalw-u, itd. Cilj teh raziskav je razvoj kompozitov Al, diskontinuirano ojačanih z delci pepelov, ki nastajajo ob izgorevanju premogov v industriji. Večina tega pepela nastaja v termoelektrarnah, čeprav so tudi drugi industrijski viri teh materialov ekonomsko zelo zanimivi.

Osnovni motiv za uporabo pepelov kot ojačitvene faze v diskontinuirano ojačanih kompozitih na osnovi Al (DOKAl) je, poleg bistveno nižje cene ojačitvene faze (0,1 USD/kg) v primerjavi s keramičnimi prahovi (SiC, Al₂O₃; 5-20 USD/kg), in veliko nižje cene ojačitve v primerjavi z matrico (2 USD/kg), določeno izboljšanje mehanskih lastnosti matrice ob istovrstnem zmanjšanju gostote materiala. To z drugimi besedami pomeni, da so kompoziti Al, diskontinuirano ojačani z delci pepelov, prvi kompozit, ki je cenejši od same matrice. To so tudi kompozitni materiali z največjim razmerjem med absolutno spremembo (izboljšavo) lastnosti materiala in s tem povezanimi materialnimi stroški.

Pridobivanje teh materialov pomeni, ob večjem deležu dodane vrednosti, racionalnejšo proizvodnjo materialov Al, racionalnejšo porabo energije in zmanjšanje onesnaženosti okolja s sekundarnimi surovinami.

Učinkovito ojačitev matrice s pepeli ali žlindro je mogoče povezati z njihovo kemijsko sestavo (**Tabela 1**), iz katere je razvidno, da pepeli lahko vsebujejo do 70% oksidov, kot so Al₂O₃, SiO₂ in TiO₂, ki se tudi sicer v obliki keramičnih prahov uporabljajo kot ojačitvena faza.

Tabela 1: Kemijska sestava pepelov

Sestava:	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
mas %	33-36	11-33	3-31	0,6-13	0-4	0-5	0,7-5,6	0-3,1	0,7-5,6

Sedanja stopnja razvoja cenjenih livarskih postopkov priprave DOKAl, ojačanih s pepeli, omogoča pripravo materiala, ki vsebuje do 25 vol.% ojačitvene faze, homogeno dispergirane v Al-Mg in Al-Mg-Si matrici (npr.: 2012 ali A-356). Čeprav so ti rezultati zelo obetajoči, se je ob tem potrebno zavedati, da je polindustrijska tehnologija priprave teh materialov v zelo zgodnji fazi. V literaturi je mogoče zaslediti laboratorijsko pridobljene rezultate ene same raziskovalne skupine v ZDA, ki na tem programu sodeluje z večjim številom industrijskih partnerjev in državnih razvojnih institucij. Zaradi tega je učinek diskontinuirne ojačitve matrice Al z delci pepelov ali žlindre potrebno še dodatno utemeljiti in potrditi z novimi preizkusi. Proces bi bilo potrebno optimizirati s tehnološkega in tudi z ekonomskega vidika. Ne nazadnje bi bilo potrebno uporabnost teh kompozitov raziskati v praksi, na ulitih komponentah, in potrditi, da se izboljšane mehanske lastnosti (ki so npr. posledica homogene porazdelitve delcev pepela v matrici) ohranjajo tudi po ulivanju in obdelavi materiala (npr. po vročem ekstrudiranju).

Navadno se za pripravo kompozitov uporablja frakcija delcev velikosti 40 do 110 µm z volumskim deležem v matrici, ki je do 10 vol.%. Uvajanje večjega deleža delcev v matrico, ki bi privedlo do boljših mehanskih lastnosti, je oteženo zaradi vse slabše omočljivosti delcev s talino, ko ta že vsebuje nekaj dispergirane ojačitvene faze. Podaljšanje oz. intenziviranje procesa umešavanja delcev v talino bi privedlo do še večje reaktivnosti ojačitvene faze s talino in spreminjanja njene kemijske

sestave. Povečana reaktivnost delcev s talino je tudi razlog, zakaj je oteženo uvajanje drobnejših in s tem bolj reaktivnih delcev ojačitvene faze v matrico, čeprav bi drobnejši delci tudi pripomogli k izboljšanju mehanskih lastnosti. Naj pri tem omenimo še, da bi večji volumski delež ojačitvene faze povzročal tudi dodatne težave pri ulivanju kompozita, saj vpliva na povečanje viskoznosti taline in povečanje koncentracije napak v ulitkih.

Kot je že zapisano uvodoma, študij mehanskih lastnosti kompozitov Al, diskontinuirno ojačanih s pepeli, ki so ga pred kratkim izvedli na Univerzi v Wisconsin-u v ZDA, je pokazal, da uvajanje 10 vol.% pepela v Al matrico povzroča ~10% zmanjšanje gostote kompozita (na 2,35 g/cm³) ob približno 15% povečanju modula elastičnosti, 25% povečanju mikrotvrdo matrice in najmanj 50% povečanje abrazijske odpornosti materiala.

Hkrati je bila opravljena obsežna študija o možnostih ulivanja taline Al, ki vsebuje 10 vol.% pepela kot ojačitvene faze, in oblikovanja najrazličnejših izdelkov za potrebe avtomobilske industrije z vsemi standardnimi postopki ulivanja. Raziskave so pokazale, da je talino mogoče uspešno ulivati celo v modele z zelo zapleteno geometrijo.

Povečanje modula elastičnosti ima za posledico večjo trdnost izdelkov ob zmanjšani masi ulitkov. To hkrati pomeni, da bo pri oblikovanju ulitka, kjer je trdnost osnovno merilo, ki določa njegovo geometrijo, komponenta z enako trdnostjo imela manjši presek. To je osnova za nadaljnjo miniaturizacijo komponent za avtomobilsko industrijo, kar tem materialom zagotavlja veliko konkurenčnost.

Čeprav kemijska afiniteta med delci žlindre in talino Al zagotavlja njihovo boljšo omočljivost v primerjavi z delci SiC in Al₂O₃, je ekonomično uvajanje večjega deleža ojačitvene faze v talino še vedno velik tehnološki problem. Cenejše tehnike uvajanja pomenijo delo na zraku in v zaščitni atmosferi, zato je ojačitveno fazo potrebno dodatno aktivirati. Pogosto zadostuje že njena toplotna obdelava, neposredno pred uvajanjem v talino. Učinkovitejše uvajanje delcev v talino je mogoče doseči tudi z optimiranjem režima mešanja taline, z razvojem posebnih priprav za uvajanje delcev v talino (injekcijska puška), s spreminjanjem geometrije vrtinca in z ultrazvočnimi ter elektromagnetnimi metodami mešanja taline. Kljub intenzivnemu razvoju v zadnjih desetih letih sedanja stopnja razvoja teh metod ne omogoča uspešnega uvajanja večjega deleža drobnejših keramičnih delcev (npr. nad 10 do 15 vol.% delcev pod 50 µm), z izjemo postopkov, ki obratujejo v vakuumu in za svoje izvajanje zahtevajo posebej izpopolnjene aparature. Zato je nadaljnje preučevanje postopkov mehanske in kemijske aktivacije delcev žlindre in pepelov, ki bi omogočilo njihovo lažje in učinkovitejše uvajanje v talino Al, prvi pogoj za nadaljnjo komercializacijo DOKAl, ojačanih s keramično fazo, pridobljeno iz sekundarnih surovin.

Stabilizacija delcev, dispergiranih v talini, ki bi bila dosežena tako kot pri SiC in Al₂O₃, s spreminjanjem kemijske sestave taline, bi lahko razrešila problem recikliranja teh materialov, vendar bi jo bilo treba še razviti. Način, predložen za sistem Al-SiC, zasnovan na poteku endotermnih kemijskih reakcij v talini, bi lahko učinkovito uporabili tudi v tem sistemu. Seveda bi bilo pred tem potrebno preučiti možnosti za uspešno izvajanje določenih endotermnih reakcij v sistemu Al-talina-žlindra/pepel. Sedanja stabilizacija disperzije, ki jo izvajajo s površinsko aktivnimi dodatki (npr. Mg in Li), zadostuje le za delež ojačitvene faze od 10 do 15 vol.%.

4 Identifikacija in opis raziskovalnega problema

Izbira in priprava cenejših ojačitvenih faz tako, da uspešno omakajo talino z Al talino, je zelo zahteven tehnološki problem.

Osnovni vir cenejših ojačitvenih faz so industrijski pepeli ali žlindre, ki nastajajo ob sežigu premoga. Pogosto imajo te surovine nedefinirano in spremenljivo sestavo in morfologijo, zato jih je kot ojačitveno fazo mogoče uporabiti, če so vsaj delno kemijsko obdelane, zdrobljene in/ali zmlete ter presejane v določene frakcije.

Lahko je to žlindra, ki nastaja pri rednem obratovanju livarne in je njeno odvažanje iz tovarne (oz. skladiščenje) navadno dodatni strošek in ekološki problem. S takšnim problemom se srečujejo v Impolu, v obratu lastne livarne. Letno jim v tem obratu zaostajajo velike količine žlindre, ki jo morajo skladiščiti znotraj tovarniškega kroga.

Običajna kemijska sestava teh materialov je podana v tabeli 1.

Tabela 2: Kemijska sestava Al taline za DOKAl

Al	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Ti	drugi elementi
razlika 6,5-7,5	0,20	0,20	0,25-0,45	0,10	0,20	0,15	

Iz **tabele 1** je razvidno, da lahko industrijski pepeli vsebujejo tudi do 70% komponent, ki se sicer že uporabljajo za diskontinuirano ojačitev (SiO₂, Al₂O₃) matrice Al, vendar v obliki keramičnih prahov definirane sestave in morfologije.

S tem v zvezi se zastavljata dve ključni vprašanji:

1. V kolikšni meri vplivata kemijska sestava in morfologija delcev pepelov na mehanske lastnosti diskontinuirano ojačane matrice Al? Odgovor na to vprašanje bi pokazal, ali je opravičljiva kemijska predelava pepelov, ki ima za cilj povečanje deleža SiO₂ in Al₂O₃ v ojačitveni fazi, kakor tudi njihova intenzivnejša mehanska obdelava, ki bi omogočila pridobivanje drobnejših ojačitvenih frakcij.
2. V kolikšni meri vpliva delež delcev pepela v matrici na izboljšanje njenih mehanskih lastnosti in ulivnost taline? Odgovor na to vprašanje bi omogočil izbiro optimalne sestave kompozita. Naj omenimo, da je

uvajanje večjega deleža ojačitvene faze (npr. nad 10 vol%), posebej, ko gre za drobnejše delce (npr. velikosti pod 50 μm), na meji sedanjih tehnoloških zmogljivosti livarskih postopkov.

Vpliv kemijske sestave, morfologije in deleža diskontinuirane ojačitve je zelo kompleksen in premalo raziskan pojav, tudi ko gre za dobro definirane keramične prahove (npr. komercialne prahove SiC ali Al_2O_3). Ugotavljanje tega vpliva pri ojačitvi matrice s pepeli s kompleksno kemijsko sestavo in morfologijo je toliko bolj zapleteno in zahteva obsežno eksperimentalno delo. Kljub temu da je nadaljnja uporaba pepelov kot surovine svetovni problem, so tovrstne raziskave šele v začetni fazi.

5 Utemeljitev raziskovanja problema

Med delci pepela in talino z Al talino (značilna sestava taline Al je podana v **tabeli 2**) obstaja izrazita kemijska afiniteta. To je po eni strani ugodno, saj omogoča dobro omočljivost delcev s talino. Po drugi strani vpliva kemijska reaktivnost pepela s talino na spreminjanje sestave matrice (glej **tabelo 3**), zato vpliv ojačitve matrice zaostaja za ojačitvijo v sistemih Al-SiC in Al- Al_2O_3 .

Razloge za slabše mehanske lastnosti matrice Al, ojačane s pepeli, v primerjavi s kompoziti, ojačanimi s komercialnimi keramičnimi prahovi (SiC, Al_2O_3), je treba iskati tudi v bistveno slabših mikromehanskih lastnostih delcev pepela. Vendar so dosedanje raziskave mehanizma diskontinuirane ojačitve pokazale, da je izboljšanje večine mehanskih lastnosti kompozitov v prvi vrsti odvisno od deleža ojačitvene faze v matrici in samo v manjši meri od njihovih mikromehanskih lastnosti, morfologije in kemijske sestave. To še posebej velja za kompozite, pridobljene z livarskimi postopki, pri katerih v materialu zaostaja veliko število napak. Pri teh kompozitih velja skoraj kot pravilo, da je izboljšanje mehanskih lastnosti posledica večjega deleža keramične faze v matrici. Seveda so to zelo splošne ugotovitve, katerih veljavnost je potrebno preveriti v preučevanem sistemu.

Da bi dobili odgovore na zastavljeni vprašanji, načrtujemo pripravo kompozitov s pepeli, ki vsebujejo različen delež Al_2O_3 in SiO_2 in različno velikost osnovnih delcev. Po drugi strani je naš cilj razvoj učinkovitejših livarskih postopkov za direktno uvajanje pepelov

v talino. Želimo razviti postopke, ki omogočajo rutinsko uvajanje vsaj 20 vol.% ojačitvene faze v talino v zaščitni atmosferi. To bo hkrati izhodišče za študij vpliva različnega deleža ojačitvene faze v matrici na spreminjanje mehanskih lastnosti kompozita in njegovo obdelovalnost (s standardnimi postopki vlivanja, delno tudi z vročim ekstrudiranjem). Raziskali bomo tudi možnost večkratnega recikliranja pridobljenih odlitkov. Sposobnost recikliranja materiala bomo skušali izboljšati s kemijsko stabilizacijo delcev pepela, dispergiranih v talino.

V zaključnem delu raziskav bi želeli pridobljene rezultate predstaviti v obliki modela, ki povezuje stopnjo ojačitve kompozita (izboljšanje ključnih mehanskih lastnosti) z deležem, morfologijo in kemijsko sestavo pepela.

Model bo izhodišče za načrtovanje poludustrijske proizvodnje kompozitov v tovarni Impol.

6 Predstavitev raziskovalne hipoteze

Naša raziskovalna hipoteza izhaja iz tega, da eksperimentalne ugotovitve, ki povezujejo izboljšanje mehanskih lastnosti kompozita, pridobljenih z livarskimi postopki, z deležem ojačitvene faze v matrici, veljajo tudi v primeru matrice Al, ojačane z delci pepela. Na ta način je mogoče pripraviti diskontinuirano ojačane kompozita Al s cenejšo ojačitveno fazo, ki po svojih mehanskih lastnostih še vedno sodijo v krog materialov, zanimivih za avtomobilsko industrijo.

Pri ojačitvi matrice z livarskimi postopki uvajanja delcev v talino oblika delcev ne prispeva bistveno k izboljšanju mehanskih lastnosti kompozita. Vendar domnevamo, da kroglični delci vnašajo v matrico manj napetosti, zato se kompoziti s krogličnimi delci ojačitvene faze obnesejo boljše pri cikličnih obremenitvah in veliko boljše absorbirajo vibracije. Nekatere preliminarne raziskave kažejo, da kompoziti, ojačani s pepeli, ki vsebujejo kroglične in votle kroglične delce, izvrstno absorbirajo vibracije. To bi odprlo nove praktične možnosti uporabe teh materialov pod pogojem, da je delce te morfologije mogoče poceni pridobivati iz izhodiščnih surovin. Zato načrtujemo karakterizacijo več vrst domačih industrijskih pepelov.

Na izboljšanje mehanskih lastnosti kompozita verjetno veliko bolj vpliva velikost delcev ojačitvene faze,

Tabela 3: Nekatere fizikalne lastnosti faz, ki nastajajo ob uvajanju žlindre v Al talino

Naziv faze	Sestava	Gostota (g/cm^3)	Specifična toplota (J/kg K)	Koeficient toplotne prevodnosti (W/cm K)
Mulit	$3\text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{SiO}_2$	3,16		<0,059
Kremen	SiO_2	2,65	1,17	0,11
Magnetit, ferit	$\text{Fe}_3\text{O}_4, (\text{Mg,Fe})_3\text{O}_4$	4,9-5,2	0,93	
Hematit	Fe_2O_3	4,9-5,3	1,08	
Anhidrid	CaSO_4	2,6-3,0		
Aluminijev oksid	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	3,6-4,0	1,22	<0,13
Aluminij	Al	2,7	1000	2,22

seveda pod pogojem, da je z livarskimi postopki sploh mogoče v matrico vgraditi zadostno število drobnejših delcev (npr. < 20 µm). Z zmanjšanjem velikosti delcev ojačitvene faze je potrebno biti previden, kajti finejši delci postajajo tudi kemijsko vse bolj reaktivni. Zato jih je vse težje ohranjati v talini. Kemijska reaktivnost finejših delcev s talino pomeni tudi spreminjanje njene kemijske sestave, kar navadno privede do poslabšanja mehanskih lastnosti. Predvidevamo, da nam bo uspelo določiti optimalno spodnjo mejo velikosti delcev ojačitvene faze, ki bo upoštevala tehnološke možnosti uvajanja takšnih delcev v talino, stopnjo njihove reaktivnosti z njo, vpliv finejših delcev na obdelovalnost pridobljenih kompozitov in seveda, v prvi vrsti, dejansko izboljšanje mehanskih lastnosti kompozita.

7 Sklepi

Rezultati, pridobljeni v projektu, katerega izvajanje predlagamo, bodo ustvarili potrebno novo znanje za: (1) razvoj postopka priprave kompozita z visoko vsebnostjo ojačitvene faze Al_2O_3 in SiO_2 in ustrezno morfologijo na osnovi industrijskih pepelov iz domačih virov, (2) razvoj livarskih postopkov priprave Al kompozitov, diskontinuirano ojačanih z delci pepela, ki obratujejo v zaščitni atmosferi ali na zraku, (4) pripravo kompozitov Al, ki vsebujejo od 15 do 25 vol.% ojačitvene faze v matrici, (5) razvoj postopkov vlijanja taline Al s homogeno dispergiranimi delci pepela, (6) razvoj postopka vročega ekstrudiranja teh kompozitov, (7) razvoj postopka recikliranja pridobljenih kompozitov, (8) razvoj modela, ki povezuje lastnosti kompozita z lastnostmi ojačitvene faze in njenim deležem v matrici, in (9) pripravo projektne dokumentacije za oblikovanje polindustrijskega postopka pridobivanja kompozitov na osnovi Al, diskontinuirano ojačanih s pepeli v tovarni Impol.

8 Literatura

- ¹ D. M. Golden: EPRI Research to Develop Coal Ash Uses in the USA; *Proc. Shanghai 1991 Ash Utilization Conference, Vol. I*; EPRI Report GS-7388, Palo Alto, Ca., USA, september 1991
- ² P. K. Rohatgi, B. N. Keshavaram, R. Asthana, D. M. Golden: Ashaloy Composite Materials: an Abrasion Resistance Material; *Proc. Shanghai 1991 Ash Utilization Conference, Vol.3*; EPRI Report GS-7388, Palo Alto, Ca., USA, september 1991
- ³ P. K. Rohatgi: Aluminium-Fly Ash Composites, *Foundry Management & Technology*, 10, 1995, 32-7
- ⁴ ENEL S.p.A. Utilizzo delle Ceneri di Carbone; *Report Centro Ricerca, Valricizzazione & Trattamento Residui - Brindisi - Italy*, 1991
- ⁵ B. P. Krishnan, M. K. Surappa in P. K. Rohatgi: The UPAL Process: A Direct Method of Preparing Cast Aluminium Alloy-Graphite Particle Composites, *J. Mat. Sci.*, 16, 1981, 1209-16
- ⁶ B. C. Pai in P. K. Rohatgi: Production of Cast Aluminium - Graphite Particle Composites Using a Pellet Method, *J. Mat. Sci.*, 13, 1978, 329-335
- ⁷ M. K. Surappa in P. K. Rohatgi: Production of Aluminium - Graphite Particle Composites Using Copper - Coated Graphite Particles, *Metals Technology*, 1978, 358-361
- ⁸ B. C. Pai in P. K. Rohatgi: Copper Coating on Graphite Particles, *Mat. Sci. Eng.*, 21, 1978, 2, 161-167
- ⁹ F. A. Badia in P. D. Mercia: Dispersion of Oxides and Carbides in Al and Zn Alloy Castings, *Transactions AFS*, 1971, 347-350
- ¹⁰ F. A. Badia in P. K. Rohatgi: Dispersion of Graphite Particles in Aluminium Castings Through Injection of the Melt, *Transactions AFS*, 1969, 403-406
- ¹¹ L. V. Ramanathan in P. C. R. Nunes: Effect of Liquid Metal Processing Parameters on Microstructure and Properties of Alumina Reinforced Al Base MMC, *Proc. of an Int. Conference, Roskilde, Denmark*, 2-6. september 1991, 611-616
- ¹² Deonath in P. K. Rohatgi: Cast Aluminium Alloy Composites Containing Copper-Coated Ground Mica Particles, *J. Mat. Sci.*, 16, 1981, 1599-1606
- ¹³ Deonath, R. T. Bhat in P. K. Rohatgi: Preparation of Cast Aluminium Alloy-Mica Particle Composites, *J. Mat. Sci.*, 15, 1980, 1241-1251
- ¹⁴ K. Gopakumar, T. P. Murali in P. K. Rohatgi: Metal-Shell Char Particulate Composites Using Copper-Coated Particles, *J. Mat. Sci.*, 17, 1982, 1041-1048
- ¹⁵ T. P. Murali, M. K. Surappa in P. K. Rohatgi: Preparation and Properties of Al-Alloy Coconut Shell Char Particulate Composites, *Metall. Trans.*, 13B, 1982, 485-494
- ¹⁶ M. K. Surappa in P. K. Rohatgi: Preparation and Properties of Cast Aluminium-Ceramic Particle Composites, *J. Mat. Sci.*, 16, 1981, 983-993
- ¹⁷ N. I. A. Lattef, A. R. I. Khedar in S. K. Goel, *J. Mater. Sci. Lett.*, 4, 1985, 385-388
- ¹⁸ P. K. Rohatgi, R. Asthana in S. Das: Solidification, Structures, and Properties of Cast Metal-Ceramic Particle Composites, *Int. Met. Rev.*, 31, 1986, 3, 115-139
- ¹⁹ V. M. Kevorkijan in B. Šuštaršič: The Introduction of Fine SiC Particles into a Molten Al Alloy Matrix: Application to MMCs Preparation via a Foundry Route, *Composite Materials, Mechanics and Processing, Zbornik z mednarodne konference, Santa Monica, USA*, 18-20. oktober 1995, 569-578
- ²⁰ V. M. Kevorkijan in B. Šuštaršič: The Introduction of Fine SiC Particles into a Molten Al Alloy Matrix: Application to Composite Material Casting, *Metals, Alloys, Technologies*, 1995, 5-6, 447-54
- ²¹ V. M. Kevorkijan and B. Šuštaršič: Stabilisation of Fine SiC Particles Dispersed in a Molten Al Alloy: Application to Composite Casting, sprejeto za objavo v *Ceramic Transactions*, 1996
- ²² V. M. Kevorkijan and B. Šuštaršič: The New Production Technology for Discontinuously Reinforced Al-SiC Composites, sprejeto za objavo v zborniku z mednarodne konference *CMMC 96*, San Sebastian, September 9-12, Španija, 1996
- ²³ V. M. Kevorkijan in B. Šuštaršič: The New Production Technology for Discontinuously Reinforced Al-SiC Composites: Future Prospects for Commercial Development, sprejeto za objavo v zborniku z mednarodne konference, *11th Technical Conference on Composite Materials v Atlanti*, ZDA, 7-9. oktober, 1996