

**ODKOVKI IZ GNETNIH MAGNEZIJEVIH ZLITIN (GMZ)
IN Mg/SiC KOMPOZITOV ZA NOVO GENERACIJO
OSEBNIH AVTOMOBILOV (predlog evropskega projekta)
MAGNESIUM-BASED FORGINGS FOR AUTOMOTIVE INDUSTRY
(Pre-proposal of European project)**

Varužan Kevorkijan

Lackova 139, 2341 Limbuš, Slovenija
kevorkijan.varuzan@amis.net

Prejem rokopisa - received: 2000-11-23; sprejem za objavo - accepted for publication: 2001-03-16

V okviru predloženega evropskega projekta želimo v polindustrijskem merilu raziskati tehnološke možnosti in ekonomsko upravičenost izdelave lahkih, vroče utopno kovanih avtomobilskih delov iz:

- komercialnih, gnetnih magnezijevih zlitin
- Mg-kompozitov, diskontinuirano ojačanih s keramičnimi delci ter
- Mg-Li-zlitin s kubično centrirano kristalno strukturo, od katerih se pričakuje večja preoblikovalnost.

Načrtujemo, da bomo najprej določili novo obliko in dimenzije izbrane avtomobilске ojnice, ki jo domači proizvajalci komercialno izdelujejo iz Al-zlitine 2014. S tem bo omogočeno ustrezno funkcionalno nadomeščanje aluminijeve zlitine 2014 z različnimi GMZ s heksagonalno kristalno zgradbo (AZ80A, ZK60A, WE43) in Mg-kompozitom, ojačanim z delci SiC (MELRAM) ter vsaj z eno Mg-Li-zlitino, ki ima kubično centrirano kristalno strukturo. Z vročim utopnim kovanjem bomo v (pol)industrijskem merilu iz vsake uporabljene Mg-zlitine oz. kompozita (MELRAM) izdelali 30-50 ojníc, ki jih bomo obrezali in termično obdelali.

Določili bomo mehanske lastnosti izdelanih prototipnih ojníc in na podlagi dobljenih rezultatov preverjali ekvivalentnost njihovih mehanskih lastnosti z ojnícami, izdelanimi iz Al-zlitne 2014. Na osnovi eksperimentalnih ugotovitev bomo po potrebi spreminjali in dopolnjevali prej določeno obliko in geometrijo avtomobilskih ojníc, vse dokler ne bodo njihove funkcionalne lastnosti v praksi enake lastnostim ojníc, izdelanih iz zlitine 2014. Ugotavljali bomo tudi morebitne razlike v preoblikovalnosti med Mg-zlitinami s heksagonalno in kubično centrirano kristalno zgradbo. V nadaljevanju bomo eksperimentalno določali prihranek mase, ki ga povzroča nadomeščanje aluminijeve zlitine 2014 z omenjenimi magnezijevimi zlitinami in kompozitom-Mg/SiC (MELRAM). Ugotovljen prihranek mase bomo tržno ovrednotili in hkrati raziskali, ali bi lahko s obstoječo tehnologijo vročega utopnega kovanja ponudili trgu zadosti konkurenčne odkovke iz Mg-zlitin in Mg/SiC-kompozita (MELRAM).

Sodeč po svojih mehanskih lastnostih, ki so primerljive z nekaterimi Al-zlitinami, bi ti lahko v bližnji prihodnosti omogočili nadomeščanje jeklenih in v določenih primerih aluminijastih avtomobilskih delov z lažjimi, izdelanimi iz materialov na osnovi magnezija. Pred tem bi tehnološka in ekonomska analiza morali pokazati, ali bi se in pod kakšnimi pogoji tovrstna zamenjava materialov tržno izplačala.

Cilj projekta je ponuditi avtomobilskemu trgu novo generacijo zelo lahkih odkovkov. Ti bodo prispevali k manjši porabi goriva v osebni avtomobilih in s tem v zvezi k manjšemu onesnaževanju okolja.

Ključne besede: gnetne magnezijeve zlitine, vroče utopno kovanje, odkovki, avtomobilska industrija, masa osebni avtomobilov

The aim of the proposed European project is to study possibilities for the production of light, closed-die hot-forged automotive components based on commercially available magnesium forging alloys and magnesium-based composites discontinuously reinforced with ceramic particles.

Continual demands for lighter passenger cars will keep automotive materials at the forefront of research in the foreseeable future. Although the current replacement of steel and cast iron by aluminum alloys has resulted in a significant weight reduction for vehicles (in comparison with the same functional solution made in steel), it is clear that the projected 40% overall weight reduction will demand the introduction of more, even lighter, materials.

When aluminum alloys, steel or cast iron are replaced with structurally inferior magnesium alloys, it is necessary to redesign the automotive component to give it equivalent engineering properties. Comparing the new design of the component adapted for magnesium alloys with the previous one based on aluminum alloys, steel or cast iron, we can determine the weight saving and the relevant economic benefit.

In the first phase of the project, the design of an automotive connecting rod, currently produced in aluminum alloy 2014, will be adapted to commercially available magnesium alloys (AZ80A, ZK60A, WE43) and magnesium-based composites (MELRAM). By applying conventional hot-forging technology, 30-50 connecting rods made from each magnesium alloy and the MELRAM composite will be forged, trimmed and heat treated in a semi-industrial process.

The mechanical properties of the redesigned magnesium-alloy prototype connecting rods and the standard aluminum alloy connecting rods from regular production will be examined and compared. In this way, we will see if the computed change of design, based on theoretical conditions for the equivalency of mechanical properties, actually results in practice in the same functional properties of the final product. If necessary, additional changes to the design of the magnesium-alloy prototype connecting rods will be introduced until equivalency of the mechanical properties of the magnesium-and aluminum-alloy connecting rods is achieved in practice. When both grades of automotive connecting rods have equivalent functional properties, the weight loss which derives from replacing the aluminum alloy 2014 with magnesium alloys and the composite will be measured and a detailed cost estimation based on real production will be performed. Moreover, the possible market competitiveness of magnesium-based forgings in comparison with the functionally equivalent aluminum-based ones will be estimated taking into account the similarity of the forging procedure and the engineering properties of both grades of light metals. Due to the fact that advanced magnesium alloys and composites are becoming more and more comparable in their mechanical properties with aluminum alloys, the replacement of steel, cast iron and even aluminum alloys in automotive components with magnesium-based forgings could be an interesting future direction for reducing the weight of automotive

suspensions, transmission and chassis. However, before this weight-reduction route can be marketed, it will be necessary to demonstrate that this kind of replacement of traditional and aluminum-based materials with magnesium alloys and composites has substantial economic benefits.

If the proposed project answers the above questions positively, the project participants will be in a favored position to offer the European market a new generation of ultra-light automotive forged components based on magnesium alloys and composites. The usage of these parts in future generations of vehicles will result in substantial weight saving, lower fuel consumption and consequently lower emissions.

Key words: wrought magnesium alloys, hot forging in a closed die, forgings, automotive application, reducing the weight of passenger cars

1 UVOD

1.1 GMZ za vroče utopno kovanje

Magnezijske zlitine so se zaradi svoje izvrstne livnosti zaenkrat uveljavile le v ulitkih. Uporaba odkovkov iz gnetnih magnezijevih zlitin (GMZ) je zaradi visoke cene in premalo raziskanih obdelovalnih postopkov še zmeraj omejena na letalstvo in vojaški ter vesoljski kompleks. Po podatkih mednarodnega združenja za magnezij (IMA) je sedanja proizvodnja GMZ manj kot 5000 ton/leto¹ oz. le 1% svetovne proizvodnje vseh magnezijevih zlitin. Za to obstaja več razlogov, med katerimi so najpomembnejši:

1. nezadostna preoblikovalnost GMZ pri sobni temperaturi
2. slabša korozijska obstojnost
3. slabša obstojnost proti lezenju
4. manjša sposobnost prenašanja izmeničnih obremenitev in
5. dvakrat višja cena v primerjavi z aluminijevimi gnetnimi zlitinami (AGZ).

Lastnosti in kemijska sestava komercialnih GMZ za vroče utopno kovanje so opisani v^{2,3}. Večinoma gre za zlitine z mednarodno oznako AZ (Mg-Al-Zn), ZK (Mg-Zn-Zr), WE (Mg-Y-redke zemlje-Zr), M (Mg-Mn), ZM (Mg-Mn-Zn) in QE (Mg-Di-Ag-Zr), **Tabela 1**. Isti literaturni viri poročajo tudi o vplivu legirnih elementov na lastnosti GMZ.

Aluminij vpliva na povečanje trdnosti in trdote magnezijevih zlitin. Navadno se legira do 10 mas. %. Magnezijeve zlitine, ki vsebujejo več kot 6 mas. % aluminija, je možno termično obdelati.

Kalcij se dodaja v majhni količini, navadno manj kot 0,3 mas. %. Dodatek kalcija ugodno vpliva na preoblikovalnost z valjanjem.

Baker zmanjšuje korozijsko obstojnost magnezijevih zlitin, že nad 0,05 mas. %, vendar njegov dodatek pozitivno vpliva na povečanje trdnosti.

Železo je element, ki najbolj negativno vpliva na korozijsko obstojnost, že nad 0,005 mas. %. V sedanji generaciji komercialnih zlitin je železa med 0,01 do 0,03 mas. %.

Redke zemlje izboljšujejo trdnost, zlasti pri povišanih temperaturah.

Srebro izboljšuje mehanske lastnosti, ker omogoča njihovo utrjevanje s staranjem.

Torij omogoča večjo obstojnost proti lezenju do 370 °C. Najboljši rezultati so dobljeni v kombinaciji 2 mas. % torija s cinkom, cirkonijem in/ali manganom.

Kositer je zelo pomemben, ker zmanjšuje nastanek razpok v materialu ob njegovem preoblikovanju.

Cink je skupaj z aluminijem eden najbolj razširjenih legirnih elementov. Pogosto ga uporabljajo skupaj s cirkonijem, redkimi zemljami ali torijem in na ta način dosežejo izločevalno utrditev.

Cirkonij uporabljamo največ zato, da zmanjšamo velikost zrn in s tem izboljšamo mehanske lastnosti, obstojnost proti lezenju in preoblikovalnost.

Litij je zelo lahek (0,54 g/cm³) in se poleg tega še dobro raztaplja v magneziju (njegova topnost je 5,5 mas. %). Zaradi tega je litij zelo zanimiv legirni element. Dodatek 11 mas. % litija omogoča nastanek faze beta, ki je nasprotno od heksagonalne kristalne zgradbe magnezija kubično centrirana in zato omogoča boljšo preoblikovalnost zlitin Mg-Li v trdem stanju. Mg-Li-zlitine je možno utrjevati s staranjem.

Itrij se zaradi odlične topnosti v magneziju (12,4 mas. %) uporablja v kombinaciji z drugimi redkimi zemljami za doseganje večje obstojnosti proti lezenju (do 300 °C). Dodatek 4-5 mas. % itrija v komercialnih zlitinah, kot so npr. WE54 in WE43, ohranja dobre mehanske lastnosti vse do 250 °C.

Omenimo tudi razvoj novih GMZ. Tako poteka na Tehniški univerzi v Clausthal-u, Nemčija, projekt, katerega osnovni namen je izboljšanje obstojnosti proti lezenju v magnezijevih zlitinah z dodatkom 6-12 mas. % skandija. Raziskave imajo za cilj razvoj zlitin, ki bi lahko bile uporabne do 350 °C⁵. Skandij so raziskovalci izbrali zato, ker vsebuje vrsto koristnih lastnosti. Dodatek skandija povišuje tališče trdne raztopine Mg-Sc. Njegovo visoko tališče (okrog 1540 °C) ima za posledico upočasnjeno difuzijo skandija v magneziju. Gostota skandija (3 g/cm³) je manjša od gostote večine drugih legirnih elementov. Raziskovalci pričakujejo, da bodo v prihodnje razširili svoje raziskave tudi na sistema magnezij-gadolij in magnezij-terbij.

Pred kratkim so na trgu predstavili tudi kompozitni material MELRAMTM. Gre za magnezijevo zlitino, diskontinuirano ojačano z 12 vol. % SiC-delcev, ki ima izboljšano žilavost in trdnost³.

1.2 Uporaba GMZ v avtomobilski industriji-obeti za prihodnost

Po napovedih^{1,3-18} bo razvoj novih in izboljšava lastnosti že obstoječih komercialnih GMZ pospešil njihovo uporabo v osebni avtomobilih. Po najbolj optimističnih napovedih (**tabela 2**), bo leta 2020 delež

magnezija v osebnih avtomobilih znašal okrog 10% oz. nekaj več kot 100 kg na vozilo, kar je za red velikosti več kot danes. Pri tem se ne bo povečal le delež strukturnih komponent, izdelanih z visokotlačnim ulivanjem^{13,19}, temveč tudi delež strukturnih komponent, izdelanih iz GMZ s sodobnimi postopki preoblikovanja v testastem stanju (tiksoforming)²⁰ ter s tradicionalnimi postopki preoblikovanja, kot je vroče utopno kovanje²¹⁻²⁵. Slednje zahteva razmeroma mala kapitalna vlaganja in zagotavlja v primerjavi z drugimi, zgoraj naštetimi proizvodnimi postopki, najboljše mehanske lastnosti končnega izdelka. Če bo nadaljnji razvoj lastnosti GMZ omogočil, da začnejo iz njih izdelovati nekatere dele karoserije, sistema za obešanje ter krmilnega mehanizma in zavor, kot so ojnice, roke, vzvodi ipd. - gre za tržni segment, pri katerem danes porabijo več kot 25% vseh aluminijevih zlitin, namenjenih za avtomobilsko industrijo²⁶ potem bi leta 2020 delež GMZ v avtomobilih lahko dosegel vsaj 1% ali 10 kg po vozilu (**tabela 2**).

Danes vedno več avtomobilskih delov na osnovi magnezijevih zlitin proizvajajo s postopkom visokotlačnega ulivanja, vendar funkcionalne lastnosti ulitkov zaradi napak v mikrostrukturi, kot je npr. poroznost, v večini primerov še ne omogočajo njihove uporabe v resnejše inženirske namene. Zato se proizvajalci avtomobilskih komponent čedalje bolj zanimajo za tradicionalni postopek vročega utopnega kovanja MGZ in nekatere sodobne postopke preoblikovanja v testastem (tiksoforming) in tekočem stanju (squeeze casting), ki omogočajo nastanek homogene, finostrukturne, brez strukturnih napak in poroznosti ter doseganje oblik obdelovanca, ki se ne ločijo v veliki meri od oblike končnega izdelka.

Vendar je s tem v zvezi treba omeniti, da se preoblikovalnost MGZ v veliki meri razlikuje od preoblikovalnosti AGZ. Zato obvlada tehnologijo vročega utopnega kovanja ZAG le malo število evropskih kovačev, med katerimi je najbolj uveljavljena nemška kovačnica Otto Fuchs.

Splošno je znano, da je plastičnost kovinskih materialov v osnovi odvisna od števila drsnih ravnin, ki so na razpolago za deformacijo. Glede na heksagonalno kristalno mrežo magnezija in njegovih zlitin, ki ima le eno drsno ravnino - to je (0001) bazalna ravnina - nas ne preseneča njihova slaba preoblikovalnost pri sobni temperaturi. Zaradi tega je za uspešno preoblikovanje magnezijevih zlitin nujno doseči drsenje materiala po drugih (piramidnih) drsnih ravninah, kar je izvedljivo šele pri temperaturah iznad 220 °C.

Zato so velikost zrn preoblikovanca in temperatura ter preoblikovalna hitrost, ki zagotavljajo uspešno preoblikovalnost stisnjena, predpisani veliko strože v primerjavi s kubično centriranimi kovinami, kot so aluminij, baker in železo. Kljub temu moramo poudariti, da se vroče utopno kovanje magnezija in aluminija s tehnološkega stališča ne razlikujeta. Zaradi manjše

plastičnosti magnezijevih zlitin je pri njihovem kovanju bolj priporočljiva uporaba hidravličnih stiskalnic, še posebej, ko se kot surovec uporabljajo ulite in ne vlečene palice. Kot je znano, zagotavljajo hidravlične stiskalnice v primerjavi z mehanskimi kontrolirano preoblikovalno hitrost in s tem večjo možnost relaksacije materiala pri deformaciji, kar odločilno vpliva na njegovo preoblikovalnost. Poleg tega zagotavljajo hidravlične stiskalnice boljše kontrolo temperature in obsega deformacije kakor tudi možnost nastavitve optimalne hitrosti preoblikovanja, ki zagotavlja boljše zapolnjenost utopne gravure z materialom.

Preoblikovalnost gnetnih zlitin AZ (Mg-Al-Zn) in ZK (Mg-Zn-Zr), ki so pogosto v uporabi, je najboljša v temperaturnem območju med 250 in 400 °C. Preoblikovalnost t.i. visokotemperaturnih zlitin z oznako ZW pa je najboljša pri temperaturah med 400 in 450 °C. Zunaj omenjenih temperaturnih intervalov je preoblikovalnost MGZ nezadostna, tako da prihaja do razpok v preoblikovancih ali do nepopolne izpolnjenosti utopne gravure. MGZ je praktično nemogoče preoblikovati pri temperaturah, ki so nižje od 220 °C.

Dostikrat je pri izdelavi odkovkov zapletene oblike treba uporabiti večstopenjsko vroče utopno kovanje MGZ, pri čemer poteka vsaka stopnja preoblikovanja v lastnem kovaškem utopu.

Zadnje čase se vse več dela pri razvoju kubično centriranih magnezijevih gnetnih zlitin, katerih preoblikovalnost bi bila bolj primerljiva s preoblikovalnostjo aluminijevih gnetnih zlitin. Pri tem je posebno zanimiva gnetna zlitina Mg-13%Li-2%Be, ki jo raziskujejo na Colorado School of Mines v ZDA in na Ben Gurion University v Izraelu¹⁰. Naj kot zanimivost omenimo, da so to zlitino uporabili že leta 1965 za izdelavo ohišja računalnika v raketi nosilki Saturn-5. Danes je omenjena zlitina (žal le po svojih lastnostih in še zdaleč ne po svoji ceni) ena izmed najresnejših konkurentov aluminijevim zlitinam, iz katerih izdelujejo odkovke za avtomobilsko industrijo.

Nekatere lastnosti odkovkov iz GMZ (npr. meja tečenja in raztezek) so tudi 2- do 3-krat večje kot pri ulitkih⁴. To bi v prihodnje lahko vplivalo na povečanje deleža preoblikovancev iz GMZ v izdelkih za avtomobilsko industrijo, pridobljenih z različnimi tehnologijami preoblikovanja, kot so vroče utopno kovanje, "tiksoforming" in gnetno ulivanje ("squeeze casting").

Pred tem bo treba odgovoriti na vprašanje, ali je in pod kakšnimi pogoji je sploh možno in upravičeno iz GMZ izdelovati odkovke za avtomobilsko industrijo in katere ovire, poleg cene vhodnega materiala, še preprečujejo množično uporabo tovrstnih izdelkov. Ali lahko pričakujemo, da bodo odkovki iz GMZ sčasoma nadomestili nekatere današnje odkovke iz aluminijevih zlitin, s katerimi sedaj nadomeščajo jeklene? S tehnološkega stališča je odgovor načeloma pritrdilen. Načeloma zato, ker je vse odvisno od razvoja novih oz. izpopolnjenih GMZ, ki mora omogočiti njihovo večjo vzdržnost pri

V. KEVORKIJAN: ODKOVKI IZ GNETNIH MAGNEZIJEVIH ZLITIN

Tabela 1: Kemična sestava in lastnosti nekaterih komercialnih GMZ za vroče utopno kovanje

Table 1: Typical chemical composition and typical tensile properties of wrought magnesium alloys commonly used for hot forging

Mednarodna oznaka zlitine	Značilna kemijska sestava (%)	Značilne mehanske lastnosti $R_{p0.2}/R_m/A5$ (Mpa/Mpa/%)	Splošne lastnosti
AZ 31	Mg-3Al-1Zn	160/215/4	Ugodno razmerje med trdnostjo in duktilnostjo; visoka korozijska obstojnost
AZ 61	Mg-6Al-1Zn	190/270/9	
AZ 80	Mg-8Al-0.5Zn	215/300/8	
ZK 30	Mg-3Zn-0.6Zr	215/300/9	Izvrstni zlitini za vroče utopno kovanje
ZK 60	Mg-6Zn-0.6Zr	235/315/8	
WE 43	Mg-4Y-3R.Z.-0.5Zr	169/260/6	Visoka trdnost pri povišani temperaturi
WE 54	Mg-5.25Y-3.5R.Z.-0.5Zr	180/280/6	

$R_{p0.2}$ - meja prožnosti

R_m - natezna trdnost

A5 - nominalni raztezek ob porušitvi

R.Z. - redke zemlje

Tabela 2: Delež jekla, litega železa in lahkih kovin v osebnih avtomobilih v obdobju 1980-2000 in napovedi za prihodnost ²⁶⁻³⁰

Table 2: Major metals usage in the average motor car before year 2000 and future forecast ²⁶⁻³⁰

Material	Delež v osebnih avtomobilih (%)				
	1980	1990	2000	2005	2020
Jeklo	59	56	54	51	40
Lito železo	11	10	9	7	3-4
Aluminij	3	4	6	12-15	30
AGZ	0,6	0,8-1	2	6-7	15-18
Magnezij	/	/	1	1,5-2	10
GMZ	/	/	/	0,1	1

Tabela 3: Primerjava osnovnih lastnosti nekaterih AGZ in MGZ ter kompozitov, diskontinuirano ojačanih s keramičnimi delci

Table 3: Comparison of some typical properties for different aluminum and magnesium wrought alloys and particulate reinforced composites

Mednarodna oznaka zlitine oz. kompozita	Porušitvena natezna trdnost (MPa)	Modul elastičnosti (GPa)	Relativni raztezek (%)	Gostota (kg/m ³)
2014 (T6)	524	73	13	2800
6061 (T6)	310	69	29	2700
2014/Al ₂ O ₃ /10p (T6)*	517	84	3,3	2900
6061/ Al ₂ O ₃ /10p (T6)**	338	81	7,5	2810
AZ80A (T5)	379	45	11	1800
ZK 60A (T5)	365	45	16	1800
AZ 61 /SiC/20p ⁺	328	80	2,5	2080
MELRAM TM	400	67	1	2800
Mg-6Zn-1.2Cu-0.8Mn/SiC/12p ⁺⁺				
Jeklo-S30200 (UNS oznaka)	964	193	10	8000

* proizvajalec DURALCAN

** proizvajalec DURALCAN

+ proizvajalec DOW

++ proizvajalec ELEKTRON

izmeničnih obremenitvah in korozijsko obstojnost ter obstojnost proti lezenju. Problem je tudi cena magnezijevih zlitin, ki je sedaj približno dvakrat višja od cene aluminijevih kovaških zlitin. Vendar je visoka cena magnezija v primerjavi z aluminijevimi zlitinami v prvi vrsti posledica manjšega trga. Sedanja proizvodnja magnezijevih zlitin v svetovnem merilu je 450 000 ton/leto, kar je, za primerjavo, le nekajkrat več od letne proizvodnje aluminijevih zlitin v Sloveniji! Magnezij proizvajajo danes večinoma z elektrolizo raztaljenega magnezijevega klorida, za kar na tono proizvedene kovine porabijo približno enako količino električne energije kot pri proizvodnji aluminija z elektrolizo glinice. Zato bi lahko, ob pričakovanem povečanju proizvodnje magnezija (po letni stopnji od 10-18%), njegova cena v prihodnje postala primerljiva s ceno aluminija, kar bi povečalo zanimanje avtomobilske industrije za odkovke iz GMZ.

Za to obstajata najmanj dva tehtna razloga.

Prvi razlog je v povprečju 50% boljša strojna obdelovalnost magnezijevih zlitin v primerjavi z aluminijevimi, ki zahteva do 50% manj energije in omogoča doseganje za 50% boljših toleranc. Res je, da se pri magnezijevih zlitinah pogosto pojavljajo težave, ko gre za strojno obdelavo pri velikih hitrostih. Kljub temu so že pri sedanji ceni magnezijevih zlitin, ki je dvakrat višja od cene aluminijevih, strojno obdelani izdelki iz magnezija zaradi svoje boljše obdelovalnosti popolnoma konkurenčni izdelkom iz aluminija.

Drugi razlog je v dejstvu, da poteka vroče utopno kovanje GMZ pri nižjih temperaturah in je zato nekoliko cenejše od vročega utopnega kovanja aluminijevih zlitin. Tehnološko pa se ta dva postopka skoraj v ničemer ne razlikujeta.

1.3 Zakaj evropski projekt na temo vročega utopnega kovanja GMZ in kompozitov?

Potreba po dodatnem zmanjšanju mase osebnih vozil bo tudi v prihodnje odločilno vplivala na izbiro materialov za nove generacije avtomobilov⁶. Čeprav je z odkovki na osnovi aluminijevih gnetnih zlitin možno že danes uspešno nadomeščati precejšen del jeklenih in litoželeznih komponent, bodo zahteve po dodatnem zmanjšanju mase avtomobilov (do 40%) marsikje zahtevale uporabo še lažjih, sodobnih materialov.

Ob nadomeščanju aluminijevih zlitin in jekla z materiali na osnovi magnezija je treba pri avtomobilskih delih spremeniti geometrijo in dimenzije tako, da ostanejo njihove funkcionalne in obratovalne zmogljivosti kljub uporabi lažjih in mehansko šibkejših materialov nespremenjene oz. v mejah predpisanih. Šele na podlagi tako spremenjene oblike, ki omogoča ohranjanje vseh funkcionalnih lastnosti avtomobilskih komponent, je možno ocenjevati prihranek pri masi, ki ga povzroča zamenjava enega materiala z drugim in ga tudi stroškovno ovrednotiti²⁷.

V okviru predloženega evropskega projekta bi želeli v polindustrijskem merilu raziskati tehnološke možnosti in ekonomsko upravičenost izdelave lahkih, vroče utopno kovanih avtomobilskih delov iz:

- komercialnih, gnetnih magnezijevih zlitin s heksagonalno kristalno zgradbo
- Mg-kompozitov, diskontinuirano ojačanih s keramičnimi delci ter
- Mg-Li-zlitin s kubično centrirano kristalno strukturo, od katerih se pričakuje večja preoblikovalnost.

Načrtujemo, da bomo najprej določili novo obliko in dimenzije izbrane avtomobilske ojnice, ki jo komercialno izdelujejo iz Al-zlitine 2014, tako da bo omogočeno ustrezno funkcionalno nadomeščanje aluminijeve zlitine 2014 z različnimi GMZ s heksagonalno kristalno zgradbo (AZ80A, ZK60A, WE43) in Mg-kompozitom, ojačanim z delci SiC (MELRAM) ter vsaj z eno Mg-Li-zlitino, ki ima kubično centrirano kristalno strukturo. Z vročim utopnim kovanjem bomo v (pol)industrijskem merilu iz vsake uporabljene Mg-zlitine oz. kompozita (MELRAM) izdelali 30-50 ojníc, ki jih bomo obrezali in termično obdelali.

Določili bomo mehanske lastnosti izdelanih prototipnih ojníc in na podlagi dobljenih rezultatov preverjali ekvivalentnost njihovih mehanskih lastnosti z ojnícami, izdelanimi iz Al zlitne 2014. Na osnovi eksperimentalnih ugotovitev bomo potem po potrebi spreminjali in dopolnjevali prej določeno obliko in geometrijo avtomobilskih ojníc, vse dokler ne bodo njihove funkcionalne lastnosti v praksi enake lastnostim ojníc, izdelanih iz zlitine 2014. Posebno pozornost bomo pri tem posvetili morebitnim večjim razlikam v preoblikovalnosti med Mg-zlitinami s heksagonalno in kubično centrirano kristalno zgradbo. V nadaljevanju bomo eksperimentalno določali prihranek mase, ki ga omogoča nadomeščanje aluminijeve zlitine 2014 z omenjenimi magnezijevimi zlitinami in Mg/SiC-kompozitom (MELRAM). Ugotovljen prihranek mase bomo tržno ovrednotili in hkrati raziskali, ali bi lahko z obstoječo tehnologijo vročega utopnega kovanja ponudili trgu zadosti konkurenčne odkovke iz Mg-zlitin in Mg/SiC-kompozita (MELRAM).

Ti bi, sodeč po svojih mehanskih lastnostih, ki so primerljive z nekaterimi Al-zlitinami, lahko v bližji prihodnosti omogočilo nadomeščanje jeklenih in v določenih primerih aluminijastih avtomobilskih delov z lažjimi, izdelanimi iz materialov na osnovi magnezija. Pred tem bi tehnološka in ekonomska analiza morala pokazati, ali bi se in pod kakšnimi pogoji tovrstna zamenjava materialov tržno izplačala.

Če bi se izkazalo, da je to možno, bi evropske kovačnice za aluminij pridobile pomemben proizvodni program in ponudile avtomobilskemu trgu novo generacijo zelo lahkih odkovkov. Ti bodo prispevali k manjši porabi goriva v osebnih avtomobilih in s tem v zvezi k manjšemu onesnaževanju okolja.

2 LAHKE KOVINE IN ZMANJŠANJE MASE OSEBNIH AVTOMOBILOV

Uporaba lahkih kovin v avtomobilski industriji vztrajno narašča (**tabela 2**). V primerjavi z l. 1981 se je delež aluminija v osebnih avtomobilih podvojil in se bo, po pričakovanjih, še enkrat podvojil do l. 2005. Po drugi strani se delež jekla v avtomobilih s poudarjeno vsebnostjo lahkih kovin (na prvem mestu aluminija) ne bo zmanjšal pod 50%²⁶⁻³⁰.

Po pričakovanjih bodo evropski osebni avtomobili l. 2005 vsebovali 100-140 kg aluminijevih in okrog 40 kg magnezijevih zlitin, kar je glede zastopanosti aluminijevih zlitin enako njihovemu sedanjemu deležu v avtomobilih, proizvedenih v ZDA. Ko bo nadomeščanje jekla z aluminijem v končni fazi (po pričakovanjih okrog l. 2010), bodo avtomobili s poudarjeno vsebnostjo aluminija vsebovali do največ 300 kg aluminijevih zlitin, kar ustreza deležu 25%.

Vse večja uporaba lahkih materialov v avtomobilski industriji je nedvomno odgovor avtomobilske industrije na zahteve trga po manjši porabi goriva in vse strožjih zakonskih omejitvah glede onesnaževanja okolja. Da bi zadostili tem zahtevam, ki predvidevajo zmanjšanje mase osebnih vozil za 40% in porabo goriva do največ 3 l na prevoženih 100 km, so se v avtomobilski industriji začeli načrtno ukvarjati z zmanjšanjem mase osebnih avtomobilov. Danes je to že inženirska disciplina, o kateri poučujejo na ameriških in nekaterih evropskih univerzah, in glavna tema nekaterih vodilnih razvojnih projektov. V ZDA sta na to temo najbolj znana dva projekta- PNV (Partnership for New Generation of Vehicles), ki zmanjšanje mase osebnih avtomobilov gradi na uporabi lahkih kovin in polimernih ter drugih sodobnih materialov, in ULSAB (Ultra Light Steel Auto Body), ki je svojevrsten odgovor jeklarjev na napovedano prevlado lahkih kovin. Projekt ima za cilj izdelavo 900 kg težke jeklene limuzine, ki je zasnovana na 30 odstotkov lažji in tudi cenejši jekleni konstrukciji, za katero jeklarji upajo, da bo upočasnila nadomeščanje jekla z lahkimi kovinami. V Evropi je pred kratkim na to temo zaključen Eurekin projekt "E-AUTO" (EU 742), katerega idejni oče je bil dr. Steven Cousins z Univerze Cranfield v Veliki Britaniji. "E-AUTO" je projekt, ki je nastal na podlagi konceptijske študije, ki je vključevala strokovnjake korporacij Volvo, Lotus Engineering, Alcan International ter strokovnjake za aerodinamiko, letalstvo in varnost pred trki in med njimi. Skupaj so izdelali prototipno vozilo, ki tehta 600 kg, katerega največja hitrost je 180 km/h, poraba pa samo 2 l/100 km pri hitrosti 80 km/h - torej približno trikrat manjša kot pri najbolj racionalnih vozilih v današnji prodaji. Sedaj poteka na temo zmanjšanja mase osebnih vozil evropski projekt "FLOAT" (BRRT-CT97-5017)-Action for Low Weight Automotive Technologies, v katerega je vključenih sedem vodilnih evropskih držav na področju avtomobilizma.

Po pričakovanjih strokovnjakov iz Ford Motor Co. bo v 21. stoletju prišlo do korenitih sprememb pri zasnovi avtomobilov, ki bodo narekovale vse večjo uporabo novih materialov. Uvajanje novih materialov v avtomobile so v zadnjih štirih desetletjih narekovale zahteve po večji varnosti, strožji predpisi glede dovoljene stopnje onesnaževanja okolja in uporaba elektronike.

V 21. stoletju bodo, kot kaže, vse te in druge zahteve strnjene v potrebo po zmanjšanju mase osebnih vozil. Da bi izboljšali ekonomičnost porabe goriva in s tem dosegli občutno zmanjšanje emisije škodljivih snovi v okolje, bo v prvi vrsti treba zmanjšati maso avtomobilov. Lahek avtomobil ne potrebuje močnega motorja, to po eni strani pomeni manjšo porabo goriva (zmanjšanje mase za 100 kg omogoča 5% manjšo porabo goriva) in s tem manjšo emisijo škodljivih snovi v okolje (vsak prihranjen liter goriva pomeni za 2,5 litra manjšo emisijo CO₂).

Čeprav je maso avtomobilov do neke mere možno zmanjšati z optimizacijo obstoječe oblike avtomobilskih komponent, je občutno zmanjšanje mase (do 40%), pri kateri vztrajajo, mogoče doseči le z uporabo lahkih materialov.

Odkovki in ulitki iz aluminijevih zlitin so se že dobro uveljavili v delih krmilnega mehanizma, prednje in zadnje preme ter karoserije, kjer vse bolj uspešno nadomeščajo jeklo in lito železo. Kovanje je že tradicionalna tehnologija, ki v primerjavi z livarskimi postopki zagotavlja najboljše mehanske lastnosti in visoko kakovost izdelkov, zaradi česar je nenadomestljivo, ko gre za izdelavo pomembnih avtomobilskih delov (safety parts). Vendar je ob tem treba poudariti, da je kovanje tudi ena izmed najdražjih tehnologij preoblikovanja kovin in jo je primerno uporabiti le, ko to opravičujejo zahteve po kakovosti oz. zanesljivosti.

Nadomeščanje jekla in litega železa z aluminijevimi zlitinami omogoča 40-60% prihranek pri masi avtomobilskih komponent ob 30-100% višji ceni. Po drugi strani pomeni nadomeščanje jekla ali litega železa z magnezijevimi zlitinami še večje zmanjšanje mase avtomobilskih komponent, za 60-75%, vendar ob še večji podražitvi končnega izdelka, za 50 do 150%. Iz navedenih podatkov je razvidno, da bi nadomeščanje aluminijevih zlitin z magnezijevimi privedlo do zmanjšanja mase avtomobilskih komponent za 20 do 35% ob njihovi podražitvi za največ 50%. Pri stroškovni analizi smo izhajali iz sedanjih cen aluminijevih in magnezijevih zlitin, ki stav povprečju: 1500 USD/t za aluminijeve zlitine in 2850 USD/t za magnezijeve zlitine.

Bolj natančna ekonomska analiza³¹, s katero smo pred kratkim opredelili prihranek pri porabi goriva, ki ga kupcu osebnega avtomobila s poudarjeno vsebnostjo aluminija omogoča nadomeščanje težjih (jeklenih oz. lito železnih) avtomobilskih delov z lažjimi deli iz aluminijevih zlitin, razkrije, da se takšno nadomeščanje ekonomsko izplača le ob zagotovljeni visoki stopnji

recikliranja, ki skoraj v celoti ohranja tržno vrednost aluminija ³¹. Drugi pogoj so seveda čim nižji stroški zmanjšanja mase osebnega vozila, kar je v veliki meri odvisno od cene lahkih kovin in od razmerja med ceno ter funkcionalnimi lastnostmi, ki jih uporabljena lahka kovina ponuja.

Zato je ob njihovi sedanji ceni, ki je dvakrat višja od cene AGZ, uporaba GMZ v avtomobilski industriji s stroškovnega stališča nezanimiva, čeprav zagotavlja občutno zmanjšanje mase. Ob tem je treba poudariti, da bi zmanjšanje cene GMZ s sedanje, ki je približno dvakrat višja od cene AGZ, na ciljno ceno, ki je le 30% višja od cene AGZ, v trenutku privedlo do povečanja deleža GMZ v osebnih avtomobilih za najmanj red velikosti. Če bi nam ob zmanjšanju cen, ki bi jih lahko dosegli le s povečanjem proizvodnje GMZ, istočasno uspelo nekoliko povečati njihovo kakovost (predvsem mehanske lastnosti in korozijsko obstojnost), bi bil ta učinek še večji.

3 OBLIKOVANJE AVTOMOBILSKIH KOMPONENT, IZDELANIH IZ LAHKIH KOVIN

Ob nadomeščanju jekla in litega železa z lahkimi kovinami je treba spremeniti geometrijo in dimenzije avtomobilskih delov tako, da se, kljub uporabi mehansko šibkejših materialov, ohranijo njihove mehanske in druge funkcionalne lastnosti.

Gre za razvoj nove inženirske discipline ³², ki raziskuje, kako iz lahkih kovin izdelovati avtomobilске dele tako, da ti ohranijo ob čim večjem zmanjšanju mase vse svoje funkcionalne lastnosti.

Obstaja več meril ekvivalentnosti mehanskih lastnosti, ki so teoretična podlaga za ustrezno spremembo geometrije in dimenzij avtomobilskih delov, izdelanih iz lažjih materialov ²⁷. Prvi med njimi je merilo nespremenjene natezne trdnosti:

$$\sigma_{\text{jekla}} S_{\text{jekla}} = \sigma_{\text{Al ali Mg}} S_{\text{Al ali Mg}} \quad (1)$$

kjer je σ porušitvena natezna trdnost in S prečni presek avtomobilске komponente.

Zelo pomembna sta tudi merili nespremenjene upogibne trdnosti:

$$\sigma_{\text{jekla}} (I/v)_{\text{jekla}} = \sigma_{\text{Al ali Mg}} (I/v)_{\text{Al ali Mg}} \quad (2)$$

I/v je upogibni modul.

in merilo ekvivalentne togosti:

$$E_{\text{jekla}} S_{\text{jekla}} = E_{\text{Al ali Mg}} S_{\text{Al ali Mg}} \quad (3)$$

E -modul elastičnosti, S -prečni presek avtomobilске komponente.

V praksi je pogosto pomembna tudi ekvivalentna togost komponent pri njihovem upogibu, kar opisuje naslednja enačba:

$$E_{\text{jekla}} I_{\text{jekla}} = E_{\text{Al, Mg}} I_{\text{Al, Mg}} \quad (4)$$

E -modul elastičnosti, I -vztrajnostni moment.

Zapisani pogoj lahko še bolj natančno povežemo z geometrijo bodoče komponente, če predpostavimo, da je vztrajnostni moment komponente enak:

$$I = kmS \quad (5)$$

pri čemer je k -konstanta, odvisna od geometrije izdelka, m -njena masa in S -prečni presek komponente. Potem ko maso komponente izrazimo z gostoto in prostornino ter v prvem približku predpostavimo, da je ob nespremenjeni obliki vrednost konstante k neodvisna od vrste materiala in dimenzij komponente, dobimo:

$$E_{\text{jekla}} S_{\text{jekla}}^2 d_{\text{jekla}} = E_{\text{Al, Mg}} S_{\text{Al, Mg}}^2 d_{\text{Al, Mg}} \quad (6)$$

Obstajajo tudi druga merila, kot je npr. merilo enake sposobnosti absorbiranja deformacijske energije ipd. V **tabeli 3** so podane mehanske lastnosti nekaterih aluminijevih in magnezijevih zlitin in Al-ter Mg-kompozitov, diskontinuirano ojačanih s keramičnimi delci. Za primerjavo so v **tabeli 2** navede še lastnosti enega izmed nerjavečih konstrukcijskih jekel (S30200; UNS-oznaka).

Izračun, zasnovan po enačbi (1), razkrije, da je za zagotavljanje ekvivalentne natezne trdnosti ob enosni natezni deformaciji potrebno, da povečamo prečni presek avtomobilskih komponent, ki jih nameravamo izdelati iz Al zlitin, za 100% v primerjavi s prečnim presekom obstoječe komponente, izdelane iz jekla. Ko gre za nadomeščanje jekla z magnezijevimi zlitinami, je prečni presek komponente treba povečati 1,6-krat. Ob enakem nadomeščanju aluminijevih zlitin z magnezijevimi bi bilo povečanje prečnega preseka komponent 30%.

Sprememba vrste deformacije bo vsakič privedla do novega razmerja med prečnim presekom komponente, izdelane iz jekla, in nadomestnih komponent, izdelanih iz lahkih kovin. Zahteva po enaki togosti (enačba 3) napove, da mora biti prečni presek komponent, ki jih nameravamo izdelati iz aluminijevih zlitin, vsaj 1,3-krat večji od prečnega preseka komponent, izdelanih iz jekla. Pri nadomeščanju jekla z magnezijevimi zlitinami moramo prečni presek komponente povečati vsaj 3,3-krat.

Ob upoštevanju pogoja ekvivalentne togosti pri upogibu (enačba 6) lahko izračunamo, da je uspešno nadomeščanje jekla z aluminijevimi zlitinami možno le ob povečanju prečnega preseka komponente za vsaj 160% oz., ko gre za nadomeščanje jekla z magnezijevimi zlitinami, za najmanj 300%. Slednje istočasno pomeni, da mora biti prostornina komponente, izdelane iz magnezijeve zlitine, približno trikrat večja od prostornine enake komponente, izdelane iz jekla. Ker je magnezijeva zlitina 4,44-krat lažja od jekla, bi to v končni fazi privedlo le do 33% prihranka pri masi.

Zgoraj navedeni rezultati so približki, ki temeljijo na poenostavljenih teoretičnih izračunih-upoštevali smo le en tip obremenitve avtomobilске komponente. V praksi se praviloma srečujemo s kompleksnimi dinamičnimi obremenitvami, ki jih je treba obravnavati z veliko bolj zapletenim teoretičnim načinom. Mnogokrat se ob tem

izkaže, da uporaba lahkih materialov, ki ima za posledico lažje avtomobilske dele in s tem v zvezi manjše obremenitve, v resnici omogoča obratovanje v varnem območju pri manjšem prečnem preseku komponent, kot ga sicer napovedujejo zgoraj naštetna merila ekvivalentnosti.

Na temo računalniškega modeliranja izkolkov poteka poleg industrijskih raziskav zaprtega tipa še vrsta evropskih raziskovalnih projektov, med katerimi je eden najnovejših Modelling tools for the forging industry-FOGE-NET (BRRT-CT97-5022). Omenjeni projekt združuje 18 partnerjev iz Velike Britanije, Španije, Nemčije in Italije, med katerimi jih je kar 12 iz industrije. Projekt ima za cilj izboljšanje razmerja med trdnostjo in maso odkovka in zmanjšanje transformacijskega faktorja oz. proizvodnjo odkovkov, ki se po svoji obliki najbolj približujejo obliki končnega izdelka.

4 KOMPOZITI NA OSNOVI MAGNEZIJA, DISKONTINUIRANO OJAČANI S KERAMIČNIMI DELCI

Literaturni viri, ki opisujejo pridobivanje magnezijevih kompozitov, diskontinuirano ojačanih s keramičnimi delci, in njihovo uporabo v avtomobilski industriji, poudarjajo pomen diskontinuirane ojačitve za izboljšanje obstojnosti proti lezenju, ki je pri večini magnezijevih zlitin kritična. Magnezijeve kompozite v glavnem pridobivajo z že omenjeno tehniko "kovanja" v tekočem stanju-squeeze casting³³⁻³⁸, ki hkrati z izdelavo kompozita omogoča oblikovanje končnega izdelka. V literaturi so opisani tudi postopki uspešnega pridobivanja Mg/SiC- kompozitov s 15 do 42 vol. % keramične faze z uvajanjem keramičnih delcev v talino, ki je v testastem stanju (compocasting)³⁹.

Raziskave kompozitov na osnovi magnezijevih zlitin, diskontinuirano ojačanih s keramičnimi delci, kot so SiC, Al₂O₃ in grafit, imajo med drugim za cilj pridobivanje lahkih materialov, ki bi s svojimi posebnimi lastnostmi omogočili nadomeščanje nekaterih tradicionalnih konstrukcijskih materialov z lažjimi. Kompozite na osnovi magnezija pridobivajo z vmešavanjem keramičnih delcev v talino ali s postopkom ulivanja z gnetenjem ("squeeze casting"). Omočljivost keramičnih delcev z magnezijevimi zlitinami je praviloma boljše kot v primeru aluminijevih zlitin, kar je posledica večje kemijske reaktivnosti magnezija.

S postopkom "squeeze casting" je možno dobiti izjemno kakovostne kompozitne materiale na osnovi magnezija in jih istočasno oblikovati v končni izdelek. V literaturi so že pred 35 leti poročali o ojačitvi Mg zlitine AZ91 s keramičnimi delci, kot so SiC, kratka steklena vlakna ali vlakna Al₂O₃, bolj znana pod komercialnim nazivom Saffil⁴⁰. Ugotovljeno je, da je zlitina AZ91, ki vsebuje 16 vol. % saffil-vlaknen, pri temperaturi 160 °C dvakrat bolj obstojna proti lezenju ter ima dvakrat večjo prelomno trdnost in žilavost. Tudi pri Mg-kompozitih,

diskontinuirano ojačanih s keramičnimi delci, modul elastičnosti linearno narašča s povečanjem volumskega deleža ojačitvene faze. Dodatek 30 vol. % vlaken saffil v matrico iz zlitine AZ91 podvoji vrednost njenega modula elastičnosti. Tudi gnetne magnezijeve zlitine je možno ojačati s keramičnimi delci. Tako je npr. modul elastičnosti zlitine AZ31, ojačane z 20 vol. % SiC-whisker-jev, dvakrat večji od modula elastičnosti neojačane zlitine, vendar se ob tem raztezek zmanjša s 15% na samo 1%. Ojačitev zlitine AZ31 z SiC-whiskerji ima za posledico tudi občutno povečanje trdnosti kompozita. Tako je trdnost neojačane zlitine AZ31 pri sobni temperaturi okrog 290 MPa, trdnost zlitine, ojačane z 10 vol. % SiC-whisker-jev, je za 27% večja in je 368 MPa, ojačitev z 20 vol. % SiC-whiskerjev omogoča povečanje trdnosti za 54% oz. do 447 MPa⁴⁰. Tako dosežena trdnost je že po podatkih iz l. 1965 povsem primerljiva s trdnostjo aluminijevih zlitin.

V praksi je odločitev za matrico na osnovi aluminija ali magnezija odvisna od zahtev po masi in korozijski obstojnosti. Magnezij je za tretjino lažji od aluminija, vendar je korozijsko manj obstojen. Poleg tega magnezijeve zlitine tudi slabše prevajajo toploto od aluminijevih, kar je v nekaterih primerih odločilno za končno izbiro primerne materiala. Najbolj raziskovani Mg-kompoziti so: Al₂O₃/Mg, SiC/Mg in B₄C/Mg. Ena glavnih ovir za večjo uporabo Mg-kompozitov v avtomobilski industriji je njihova izjemno visoka cena, ki je skoraj trikrat višja od cene Al-kompozitov. Pri tem je znano, da so že Al-kompoziti zaradi *svoje* previsoke cene premalo konkurenčni v primerjavi s standardnimi, izločevalno ojačanimi zlitinami.

O komercialnih magnezijevih kompozitih je največ podatkov mogoče dobiti direktno od proizvajalcev (npr. Dow Magnesium, Magnesium Elektron). Slednji ponuja na trgu Mg-kompozit (zlitina 6Zn, 1,2Cu, 0,8Mn, ojačana z 12 vol. % SiC-delcev) pod komercialnim nazivom MELRAM.

5 OPIS DELOVNE HIPOTEZE PREDLOŽENEGA EVROPSKEGA PROJEKTA

Delovna hipoteza je zgrajena na domnevi, da se bo tudi v naslednjih letih nadaljeval pospešen razvoj novih in optimizacija lastnosti že obstoječih Mg-zlitin tako, da bodo te pridobile boljše mehanske lastnosti, večjo korozijsko obstojnost in obstojnost proti lezenju, boljše preoblikovalnost v trdnem in plastičnem stanju in nižjo ceno. Pričakujemo, da bodo do l. 2010 magnezijeve zlitine kakovostno in cenovno že tako izpopolnjene, da bo z njimi možno v večjem obsegu nadomeščati jeklo in Al-zlitine v strukturnih avtomobilskih komponentah.

Vzporedno s tem se bo nadaljeval razvoj novih tehnologij preoblikovanja magnezijevih zlitin (in drugih lahkih kovin), ki bo, po naših pričakovanjih, spremenil današnje razmere, ko se izdelke na osnovi magnezija, namenjene avtomobilski industriji, skoraj v celoti

izdeluje z visokotlačnim ulivanjem. Ker tehnologije, kot so "kovanje" v testastem stanju (thixoforming), "kovanje" oz. "gnetenje" v tekočem stanju (squeeze casting) in tudi tradicionalno vroče utopno kovanje, zagotavljajo tudi do 30% boljše trdnost in nekatere druge mehanske lastnosti preoblikovancev oz. izkolkov v primerjavi z ulitki, bodo, po pričakovanjih, pri izdelavi lahkih avtomobilskih komponent tudi te tehnologije dobile svojo tržno priložnost. Čeprav so te tehnologije na sedanji stopnji svojega razvoja in uporabe dosti dražje od ulivanja pod visokim pritiskom, pričakujemo, da se bo to razmerje v prihodnje spremenilo, še posebej pri preoblikovanju dragih in lahkih ter mehansko šibkejših strukturnih materialov na osnovi magnezija, iz katerih bo treba "izvleči" maksimum mehanskih lastnosti.

Poleg sodobnih tehnologij preoblikovanja, kot sta "thixoforming" in "squeeze casting", bo po naših pričakovanjih svojo tržno priložnost dobilo tudi vroče utopno kovanje, ki, kljub pospešenemu razvoju drugih tehnologij preoblikovanja, še zmeraj edino zagotavlja najboljše mehanske lastnosti preoblikovancev in največjo zanesljivost glede strukturnih napak. Osnovni oviri za večjo uporabo vročega utopnega kovanja sta nizka produktivnost in, z izjemo preciznega kovanja, majhen izkoristek materiala, zaradi česar je vroče utopno kovanje najdražja tehnika preoblikovanja kovin. Prednost vročega utopnega kovanja v primerjavi s sodobnimi tehnologijami preoblikovanja ("squeeze casting", "thixoforming" in "hydroforming") je občutno manjša začetna investicija. Tako bi v primeru vročega utopnega kovanja magnezijevih zlitin v že obstoječi kovačnici vrednost celotne investicije pomenila le strošek zagona novega proizvodnega programa na že obstoječi proizvodni opremi.

Že v tem trenutku, ko svetovna proizvodnja magnezija dosega le 1-2% svetovne proizvodnje aluminija in je v razvoj magnezijevih zlitin vloženo sorazmerno manj časa in sredstev kot v razvoj materialov na osnovi aluminija, dosega magnezijeve zlitine po svojih strukturnih lastnostih (z izjemo korozijske obstojnosti in obstojnosti proti lezenju pri povišanih temperaturah) 60-90% primerljivost lastnosti z aluminijevimi zlitinami. Po drugi strani se magnezijeve zlitine, diskontinuirano ojačane s keramičnimi delci, po svojih mehanskih lastnostih lahko brez težav primerjajo z večino neojačanih Al-zlitin. Čeprav je heksagonalna kristalna zgradba magnezija precejšnja ovira za preoblikovanje magnezijevih zlitin v trdnem stanju, so že danes na razpolago magnezijeve zlitine, ki jih je mogoče uspešno preoblikovati z vročim utopnim kovanjem.

Če bo letna proizvodnja magnezija naraščala v svetovnem merilu s sedanjo (oz. pričakovano) stopnjo rasti 18-20% na leto, bi naj okrog l. 2010 svetovna proizvodnja magnezija presegla milijon ton/leto. Ob dejstvu, da ponuja izvedba z magnezijem "najlažje kovinske strukturne dele" in je to skoraj največ, kar se bo s kovinami sploh dalo doseči pri zmanjšanju mase

osebnih avtomobilov, je pričakovati, da se bodo metalurgi še posebej potrudili pri razvoju novih in izboljšanju lastnosti že obstoječih magnezijevih zlitin in kompozitov.

Pričakujemo, da bo v obdobju med l. 2010 in 2020 magnezij kot material že udomačen tudi v kopenskih transportnih sredstvih. V idealnem primeru bo v tem času pretežno vse, kar je v avtomobilih danes (še) iz jekla, nadomeščeno z aluminijevimi zlitinami, to kar je danes iz Al-zlitin pa bo iz materialov na osnovi magnezija.

Kljub napovedanemu hitremu razvoju sodobnih tehnologij menimo, da bo še tako tradicionalna tehnologija, kot je vroče utopno kovanje, odigrala pomembno vlogo pri proizvodnji lahkih avtomobilskih delov iz materialov na osnovi magnezija. Njena prednost, da ob kovanju prihaja do deformacijskega utrjevanja vhodnega materiala, bi pri dragih, lahkih in strukturno šibkejših materialih morda odločilno vplivala na njihovo konkurenčnost.

Zato bodo tisti evropski proizvajalci avtomobilskih delov, ki danes večinoma uporabljajo tehnologijo vročega utopnega kovanja in tiksoforminga AGZ, v prihodnje vse bolj resno razmišljali tudi o vročem utopnem kovanju in tiksoformingu GMZ.

6 SKLEP

Razvoj novih in izboljšanje lastnosti že obstoječih gnetnih magnezijevih zlitin (GMZ) je področje, ki se bo v prihodnje hitro razvijalo.

Treba bo razviti GMZ, ki lahko prenesejo večje izmenične obremenitve, so korozijsko bolj obstojne ter manj lezejo pri povišani temperaturi. Cilj je izdelati GMZ, ki bi bile največ za tretjino dražje od današnjih AGZ in bi, ob 40% manjši gostoti, dosegle 80% nivo večine njihovih lastnosti.

To bo imelo za posledico večje nadomeščanje nekaterih odkovkov za avtomobilsko industrijo, ki jih danes izdelujejo iz AGZ, z odkovki iz GMZ.

Ob tovrstnem nadomeščanju AGZ z MGZ bo treba pri avtomobilskih delih spremeniti geometrijo in dimenzije tako, da bodo kljub uporabi lažjih in mehansko šibkejših materialov ostale njihove funkcionalne in obratovalne zmogljivosti nespremenjene.

Zato bo v predloženem evropskem projektu treba raziskati tehnološke možnosti in ekonomsko upravičenost proizvodnje odkovkov iz MGZ za potrebe avtomobilске industrije s stališča prihranka mase, ki ga bo povzročalo nadomeščanje AGZ z MGZ. Eksperimentalno ugotovljen prihranek mase bo treba tržno ovrednotiti z manjšo porabo goriva in s tem v zvezi manjšim onesnaževanjem okolja ter ugotoviti, pod kakšnimi pogoji bi lahko s tradicionalno tehnologijo vročega utopnega kovanja ponudili izdelovalcem avtomobilskih delov zadosti konkurenčne izdelke iz MGZ.

7 LITERATURA

- ¹ F. H. Froes, D. Eliezer, E. Aghion: The Science, Technology and Applications of Magnesium, *JOM*, 50(1998)9, 30-34
- ² I. J. Polmear: Grades and Alloys. In: *ASM Specialty Handbook: Magnesium and Magnesium Alloys*. Ed. M. M. Avedisian, ASM, 1999. 12-25
- ³ R. F. Decker: The renaissance in magnesium, *Advanced Materials & Processes*, 154(1998), 3, 31-33
- ⁴ J. Becker, G. Fischer, K. Schemme: Light weight construction using extruded and forged semi-finished products made of magnesium alloys. In: *Magnesium alloys and their applications*, Ed. B. L. Mordike, K. U. Kainer, *MatInfo*, 1998. 15-28
- ⁵ *Advanced Materials & Properties*, 157(2000)2, 11
- ⁶ W. F. Powers: Automotive Materials in the 21st century, *Advances Materials & Processes*, 157(2000)5, 38-41
- ⁷ L. B. Duffy: The light choice for aerospace and speciality applications, *Aluminium Times*, 1(2000)3, 28-29
- ⁸ C. Nicolas: Magnesium ready for the 21. century, *Aluminium Times*, 1(2000)3, 26
- ⁹ Magnesium in trend, *Aluminium*, 76(2000)1-2, 98-104
- ¹⁰ R. E. Brown: Magnesium 2000, *Light Metal Age*, 58(2000)7-8, 100-103
- ¹¹ Magnesium alloys and their Applications, Conference Program, DGM, 2000.
- ¹² R. E. Brown: 57th annual world magnesium conference, *Light Metal Age*, 58(2000)9-10, 54-57.
- ¹³ C. D. Winandy: Automotive, The magnesium challenge, *Magnesium*, 1(2000)1, 18-25
- ¹⁴ A. Perrone: Magnesium alloys: advantages and drawbacks, *Alluminio Magazine*, 15(1999)4, 48-52
- ¹⁵ A. Schoenstein: Automotive materials, *Alluminio Magazine*, 15(1999)6, 28-37
- ¹⁶ Automobile development, *Aluminium*, 76(2000)4, 224-238
- ¹⁷ R. B. Aronson: Materials for the next generation vehicles, *Manufacturing Engineering*, 123(1999)2, 94-102
- ¹⁸ G. L. McVay, E. L. Courright, R. H. Jones, M. T. Smith: Reducing manufacturing costs: Key to increasing light metal usage in automotive applications, *Light Metal Age*, 56(1998)9-10, 6-11
- ¹⁹ J. C. Benedyk: Light metals in automotive applications, *Light Metal Age*, 58(2000)9-10, 34-35
- ²⁰ R. Potzinger, H. Kaufmann, P. J. Uggowitzer: Magnesium new rheocasting - A novel approach to high quality magnesium- castings, In: *Semi-solid processing of alloys and composites*, Eds. G. L. Chiarmetta, M. Rosso, Edimet, 2000, 85-90
- ²¹ R. Leiber: Forgings parts for automobile, *Alluminio E Leghe*, 12(2000)121, 167-180
- ²² *ASM Handbook: Forming and forging*, Eds. J. R. Davis et al., ASM, 1998
- ²³ R. Leiber: Use of forged aluminium components in vehicles, *Aluminium*, 75(1999)10, 893-902
- ²⁴ F. Gologranc: Preoblikovanje, 2. Del, Masivno preoblikovanje, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, 1999
- ²⁵ *Handbook of metal forming*, Ed. K. Lange, McGraw-Hill Book Company, 1985
- ²⁶ G. Marshall: Aluminium in transportation, *Alluminio E Leghe*, 11(1999)108, 69-76
- ²⁷ *Aluminium in cars*, Pechine Automotive, 1998
- ²⁸ J. Marie Pache: Use of aluminium in cars before 2000, *Alluminio E Leghe*, 10(1998)105, 93-98
- ²⁹ F. Ciselli, S. Di Carlo: Aluminum in the motor industry, *Alluminio E Leghe*, 10(1998)98, 81-86
- ³⁰ *Magnesium technology 2000*. Eds.: H. I. Kaplan, J. Hryn, B. Clow, TMS, 2000
- ³¹ V. Kevorkijan: Automotive aluminum II, *JOM*, 51(1999)11, 4-10
- ³² *Advanced Materials & Properties*, 155(1999)3, 18
- ³³ K. U. Kainer: Aluminium and magnesium based metal matrix composites, *Kovine, Zlitine, Tehnologije*, 30(1996)30, 509-516
- ³⁴ S. W. Lim, T. Imai, Y. Nishida, D. Jiang: Superplasticity of ceramic particulate reinforced magnesium alloy composites fabricated by a melt stirring method, *Proceedings of ICCM-11, Gold Coast, Australia, 14th-18th July 1997*, Ed. M. L. Scott, 486-494
- ³⁵ F. Moll, K. U. Kainer: Properties of particle reinforced magnesium alloys in correlation with different particle shapes, *Proceedings of ICCM-11, Gold Coast, Australia, 14th-18th July 1997*, Ed. M. L. Scott, 511-519
- ³⁶ M. Zheng, K. Wu, W. Zhang, M. Zhao: An in-situ study of the fracture mechanisms of SiCw/AZ91 magnesium matrix composites, *Proceedings of ICCM-11, Gold Coast, Australia, 14th-18th July 1997*, Ed. M. L. Scott, 539-545
- ³⁷ J. Kiehn, K. U. Kainer, Z. Trojanov, F. Chmelik, P. Lukac: Detection of dislocations in short fibre reinforced magnesium alloys by non-destructive methods, *Proceedings of ICCM-11, Gold Coast, Australia, 14th-18th July 1997*, Ed. M. L. Scott, 585-596
- ³⁸ J. S. H. Lo, J. C. Carpenter: Fabrication of SiC-reinforced AZ91D magnesium-based composites, *Proceedings of ICCM-11, Gold Coast, Australia, 14th-18th July 1997*, Ed. M. L. Scott, 688-697
- ³⁹ V. Laurent, P. Jarry, G. Regazzoni, D. Apelian: Processing-microstructure relationships in compocast magnesium/SiC, *J. Mater. Sci.*, 27(1992), 4447-59
- ⁴⁰ G. A. Chadwick, *Acta Metall.*, 13(1965), 75