

Razvoj sodobnih zlitin aluminija

Development of Modern Aluminium Alloys

A. Smolej, Oddelek za montanistiko, FNT, Univerza v Ljubljani, Aškerčeva 20

Stalne zahteve konstruktorjev po lažjih in trdnejših materialih ter vse bolj prodorni nekovinski materiali so pospešili razvoj aluminijevih zlitin. Rezultat tega razvoja so novi aluminijevi materiali, ki imajo boljše mehanske, fizikalne in kemične lastnosti v primerjavi s klasičnimi aluminijevimi zlitinami. Zlitine vrste Al-Li, superplastične aluminijeve zlitine, kompoziti na osnovi aluminija in zlitine, ki se izdelujejo po postopkih metalurgije prahov, so najpomembnejši raziskovalni dosežki s tega področja v zadnjem času.

The paper describes some important, modern aluminium materials, their properties, and processes of manufacturing. Constant demands of designers for lighter and stronger materials and the ever more advanced non-metallic materials accelerated the development of aluminium alloys. The result of this development are new aluminium materials with better mechanical, physical and chemical properties compared to the standard aluminium alloys. Alloys of Al-Li type, superplastic aluminium alloys, composite materials with aluminium matrix, and alloys prepared by powder metallurgy procedures are the most essential research and development achievements in this field in the recent time.

Industrijsko pridobivanje aluminija je poznano 105 let. Letna proizvodnja primarnega aluminija v svetu je narasla od nekaj tisoč ton na začetku stoletja do današnjih 16 milijonov ton. Aluminij je za železom najbolj uporabna kovina. Številne aluminijeve zlitine se zaradi dobrih mehanskih, fizikalnih, kemičnih in tehnoloških lastnosti uporabljajo na vseh tehničnih področjih, kot so elektrotehnika in elektronika, strojogradnja, transport, gradbeništvo in embalaža. Zaradi ustaljene proizvodnje primarnega aluminija v zadnjih letih se zastavlja vprašanje: ali je uporaba aluminija po stotih letih ekstremne rasti že dosegla svoj višek? Odgovor je negativen zaradi dinamičnega razvoja na področju aluminijevih zlitin kot tudi na področju izdelovalnih in preoblikovalnih postopkov. Rezultat tega razvoja so kvalitetnejši materiali, kar omogoča zmanjšanje mase in tudi cene številnih izdelkov. Razvoj konvencionalnih aluminijevih zlitin in tehnoloških postopkov poteka trenutno "z manjšimi koraki" kot v preteklosti. Prizadevanja in raziskave za optimizacijo zlitinskih lastnosti in tehnoloških postopkov se bodo nadaljevala tudi v prihodnosti, kajti številne obstoječe zlitine v osnovi popolnoma ustrezajo širokemu tržišču.

"Klasične" aluminijeve zlitine in postopki izdelave pa imajo vendarle omejene možnosti v primerjavi z drugimi novimi materiali, ki predstavljajo konkurenco za aluminij. Ta konkurenčnost se kaže predvsem na področju zahtevnejših izdelkov. Aluminijska industrija je reagirala na ta izziv z obsežnimi raziskavami, katerih rezultat so nove zlitine in izdelovalni postopki. Novi aluminijevi materiali imajo v primerjavi s klasičnimi znatno boljše preoblikovalne, korozijske in predvsem mehanske lastnosti, ki so obstojne tudi pri višjih temperaturah. V nadaljevanju bodo kratko opisani predvsem tisti novi materiali na osnovi aluminija, za katere se predvideva, da bodo imeli pomembno vlogo v prihodnosti. To so zlitine vrste Al - Li, superplastične zlitine, mehansko izdelane zlitine, kompoziti in zlitine iz prahov, ki so izdelani po postopku hitrega strjevanja.

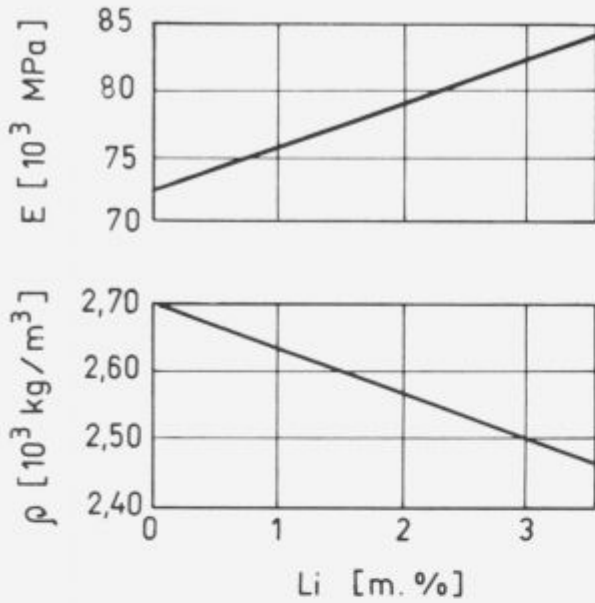
1 Zlitine aluminij-litij

Zlitine aluminij-litij so nova generacija iz skupine aluminijevih zlitin, ki se izdelujejo z ulivanjem. Te zlitine so zaradi posebnih lastnosti predvidene kot novi konstrukcijski materiali za izdelavo sestavnih delov letal. Njihov intenzivni razvoj se je začel pred dobrimi desetimi leti in je dal v relativno kratkem času nepričakovano pozitivne rezultate¹.

Litij je najlažja kovina z gostoto 540 kg/m^3 . Vsak masni odstotek litija, ki je dodan aluminiju, zmanjša gostoto zlitine za 3% ob istočasnem povečanju elastičnega modula za 6% (slika 1). Zlitine Al - Li - X se lahko toplotno utrjujejo. Med umetnim staranjem raztopno žarjenih in gašenih zlitin se iz prenasičenih zmesnih kristalov aluminija izločajo metastabilni delci Al_3Li . Prisotnost teh izločkov v aluminijevi matrici poveča trdnostne lastnosti do vrednosti, ki so enake ali celo višje od standardnih, visokotrdnostnih zlitin tipa Al - Cu - Mg in Al - Zn - Mg - Cu.

Binarne zlitine Al - Li, ki so že dolgo poznane, niso uporabne zaradi slabih plastičnih in žilavostnih lastnosti². Te pomanjkljivosti so bile izboljšane z dodatki drugih zlitinskih elementov in z ustreznimi termomehanskimi obdelavami. Najboljše lastnosti povzročijo kombinacije elementov litija, magnezija, bakra in cirkonija, tako da sistem Al - Li - Mg - Cu - Zr predstavlja osnovo vsem uporabnim zlitinam. Nekatere od teh zlitin, ki vsebujejo do 3 m.% Li, 1 do 3 m.% Cu, do 2 m.% Mg in do 0.2 m.% Zr, so standardizirane in se izdelujejo v večjih količinah. Natezna trdnost teh zlitin je do 600 MPa, elastični modul do $81 \times 10^3 \text{ MPa}$, prelomna žilavost K_{IC} do $40 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ in gostota okrog 2500 kg/m^3 ³. Superplastične lastnosti so dodatna prednost teh zlitin⁴.

Pri industrijski izdelavi zlitin je problematično le taljenje in ulivanje zaradi velike reaktivnosti litija napram kisiku, vlagi in obzidavam peči. Za taljenje in ulivanje se zato uporabljajo zaprti sistemi z zaščitno atmosfero argona. Po



Slika 1. Vpliv vsebnosti litija na elastični modul E in gostoto ρ zlitin Al - Li².

Figure 1. Influence of lithium content on the modulus of elasticity, E , and density, ρ , of Al - Li alloys².

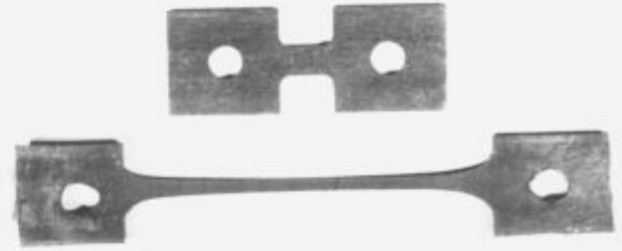
polkontinuirnem ulivnem postopku se tako izdelujejo drogovci za iztiskanje in valjarniške brame z maso do 4500 kg⁵. Predelava ulitkov z valjanjem, iztiskanjem in kovanjem je možna z običajnimi preoblikovalnimi postopki.

Ustrezno razmerje trdnost/gostota, velik elastični modul in druge lastnosti so vzrok, da se klasični aluminijevi materiali nadomeščajo z zlitinami Al - Li - X pri izdelavi letal. Z zamenjavo materialov se bo zmanjšala teža letal za približno 15%, kar pomeni pri potniškem letalu Airbus A 340 prihranek 4250 kg⁵. Te zlitine so tako tudi odgovor aluminijske industrije na vse večjo konkurenco nekovinskih kompozitnih materialov. Po predvidevanju Boeing Airplane Company bo v novih letalih vgrajeno 55% aluminijevih materialov in 25% kompozitov, če bodo zlitine Al - Li - X uspešne; v nasprotnem primeru bodo letala vsebovala 65% kompozitov in 11% aluminijevih zlitin⁶. Prednost zlitin Al - Li v primerjavi s kompoziti je, da se za njihovo izdelavo in predelavo lahko takoj koristijo obstoječe naprave.

2 Superplastične zlitine

Superplastičnost je lastnost določenih kovinskih materialov, da dosežejo pri ustreznih preoblikovalnih pogojih zelo velike raztezke brez kontrakcije do porušitve. Ti raztezki so od nekaj 100% do 1000% in več (slika 2). Tak način preoblikovanja nastane pri majhnih preoblikovalnih hitrostih ($< 1 \text{ s}^{-1}$), visokih temperaturah ($> 0.5T_f$) in ustrezni mikrostrukturi materiala. Potrebne napetosti za tečenje so znatno nižje kot pri preoblikovanju običajnih materialov. Odlične preoblikovalne lastnosti omogočajo široko uporabo superplastičnih materialov v različne namene.

Prve aluminijeve zlitine s superplastičnimi lastnostmi so imele eutektoidno ali eutektično sestavo kot na primer zlitina AlCu33. Te zlitine se kljub dobrim preoblikovalnim lastnostim niso uveljavile v praksi zaradi neustreznih



Slika 2. Preizkušane iz superplastične zlitine vrste Al - Zn - Mg - Cu pred in po nateznem preizkusu⁷.

Figure 2. Test piece of superplastic Al - Zn - Mg - Cu alloy before and after tensile test⁷.

mehanskih lastnosti. V 70-tih letih so bile odkrite superplastične zlitine s podobno sestavo in mehanskimi lastnostmi, kot jih imajo običajne aluminijeve zlitine. Od tedaj je razvoj teh materialov v stalnem porastu. Nekatere superplastične zlitine se že industrijsko izdelujejo in praktično uporabljajo. Med najbolj poznanimi in uporabnimi so zlitine vrste Al - Cu - Zr, Al - Zn - Mg - Cu in Al - Li - X (tabela 1).

Osnovne lastnosti, ki jih morajo imeti aluminijeve superplastične zlitine, so naslednje: (a) drobnostna mikrostruktura s povprečno velikostjo kristalnih zrn pod $10 \mu\text{m}$, (b) obstojnost kristalnih zrn proti rasti pri relativno visokih preoblikovalnih temperaturah, (c) obstojnost proti nastanku por med superplastičnim preoblikovanjem, (d) nizke preoblikovalne napetosti (2 do 20 MPa) in (e) visoke vrednosti indeksov občutljivosti na preoblikovalno hitrost m v enačbi $\sigma = K \dot{\epsilon}^m$ ($m > 0.3$).

Izdelava in predelava teh zlitin je podobna običajnim postopkom, ki se uporabljajo za standardne aluminijeve zlitine. Drobnostna mikrostruktura, ki je osnovni pogoj za superplastično preoblikovanje, nastane z ustrezno zlitinsko sestavo, temperaturo taline in ulivanja ter termomehanske obdelave. Obstojnost proti rasti zrn pa se doseže z izločanjem drobnih delcev po kristalnih mejah.

Superplastične zlitine se najpogosteje predelujejo z valjanjem v pločevine debeline 0.6 do 8 mm. Iz pločevine se lahko izdelujejo z eno samo delovno operacijo predmeti zelo zahtevnih oblik. Preoblikovanje pločevin je podobno termoplastični predelavi plastičnih mas. Shema poenostavljenega postopka za preoblikovanje je prikazana na sliki 3. Pločevina, ki je vpeta v ogrevani komori, se s plinom ali zrakom pod pritiskom vtiskuje v orodje. Preoblikovanje poteka pri temperaturah 450°C do 520°C , nizkih preoblikovalnih hitrostih pod 1 s^{-1} in tlakih plina okrog 10 barov.

Uporaba superplastičnih materialov zelo zniža stroške izdelave zaradi manjše porabe energije, materiala, nepotrebne spajanja posameznih delov in uporabe enega samega orodja, ki je narejeno iz nezahtevnega, cenene materiala. Prihranek pri orodjih je do 90% v primerjavi z izdelavo enako zahtevnih predmetov iz običajnih materialov¹⁴. Uporaba superplastičnih materialov je primerna za izdelavo zahtevnih predmetov v manjših in srednjih serijah od 50 do 10000 kosov. Večje serije trenutno še niso ekonomične zaradi predolgih preoblikovalnih časov. Na sliki 4 je prikazana primerjava stroškov v odvisnosti od števila izdelkov za superplastično preoblikovanje v primerjavi z

Tabela 1. Preoblikovalni pogoji (preoblikovalna temperatura T , preoblikovalna hitrost $\dot{\epsilon}$) in največji raztezki ϵ nekaterih aluminijevih superplastičnih zlitin v primerjavi s cinkovo zlitino ZnAl22.

Zlitina (Oznaka)	T (°C)	$\dot{\epsilon}$ (s ⁻¹)	ϵ (%)	Lit.
ZnAl22 (Zilon)	250	10 ⁻¹ do 10 ⁻²	2400	9
AlCu33	500		2000	8
AlCu6Zr0,4 (Supral 100)	480	3·10 ⁻³	>1000	8
AlZn5,7Mg2,3Cu1,5 (SP 7475)	530	2,8·10 ⁻⁴	1200	10
AlLi2,3Cu2Mg0,7Zr0,2 (SP 8091)	500	6·10 ⁻⁴	1137	11
AlLi2,3Cu2,5Zr0,2 (SP 2090)	500	6·10 ⁻⁴	1482	11
AlMg5Mn0,7Cu0,6	550	2,8·10 ⁻³	700	12

drugimi postopki izdelave.

Iz aluminijevih superplastičnih zlitin se izdelujejo sestavni deli letal, deli avtomobilskih karoserij (slika 5), ohišja in deli različnih aparatov, glasbila ter gradbeni elementi kot so fasadne obloge in dekorativni predmeti.

3 Metalurgija prahov

Med najnovejšimi postopki metalurgije prahov je najpomembnejši RSP postopek (rapid solidification processing), ki temelji na zelo hitrem strjevanju taline pri izdelavi prahov ali tankih trakov. Ta tehnologija omogoča izdelavo povsem novih materialov na osnovi aluminija, ki imajo znatno boljše lastnosti od klasičnih zlitin.

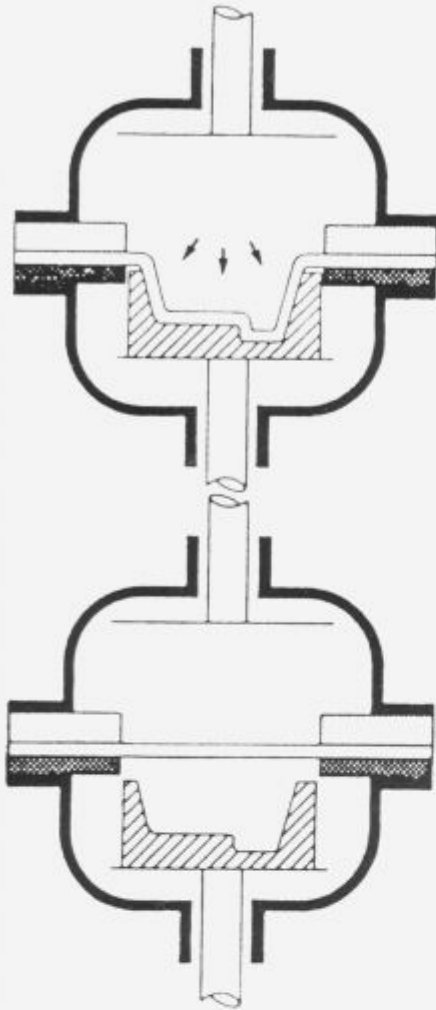
Prahovi se izdelujejo s plinsko atomizacijo. Talina predhodno pripravljena zlitine se razprši pri izhodu iz šobe v hitrem toku dušika ali argona. Med strjevanjem, ki poteka s hitrostjo 10⁵ °C/s, nastanejo sferični delci s premerom 10 do 50 μm. Tanki trakovi pa se izdelujejo po takoimenovanem melt spinning postopku. Curek staljene zlitine se brizga na vrteče se kolo iz bakra, ki je hlajeno (slika 6). Talina se strdi s hitrostjo 10⁶ in tudi več °C/s v tanke trakove z debelino pod 20 μm, ki se nato zdrobijo v drobne delce. Prahovi in zdrobljeni trakovi se nadalje zgostijo na izostatskih stiskalnicah. Zgoščeni polizdelki se toplo predelujejo z iztiskanjem ali kovanjem v končne izdelke⁶.

Delci prahov in trakovi oziroma zgoščeni materiali imajo mikrostrukturne posebnosti, ki se ne morejo doseči s klasičnimi metalurškimi postopki. Med hitrim strjevanjem se zelo poveča topnost zlitinskih elementov v zmesnih kristalih aluminija, kar je pomembno za izdelavo zlitin s težko topnimi elementi kot so železo, krom in nikelj. Ravnotežna topnost železa v aluminiju je približno 0,05 m.%, dosežena topnost po hitrem strjevanju pa je 12 m.%. Neraztopljene faze so drobno in enakomerno porazdeljene v matrici. Kristalna zrna so reda velikosti 1 μm in so stabilna pri povišanih temperaturah in nadaljnji predelavi prahov. Med hitrim strjevanjem se ustvarijo tudi pogoji za nastanek drobnih izločkov, ki vplivajo na povišanje mehanskih lastnosti izdelkov^{3,6}.

RSP postopek omogoča izdelavo zlitin z visokimi vsebnostmi zlitinskih elementov. Zlitine po lastnostih lahko razvrstimo v štiri skupine: (1) zlitine z dobrimi mehanskimi

lastnostmi pri sobni temperaturi, (2) temperaturno obstojne zlitine, (3) zlitine s povišanim elastičnim modulom, (4) zlitine z obrabno obstojnostjo in dobro obdelovalnostjo^{3,16}.

1. V prvo skupino sodijo zlitine vrste Al–Zn–Mg–Cu z dodatki mangana in kroma. Vsebnost cinka je do 10 m.%, kar je več kot v klasičnih zlitinah. Visoka natezna trdnost zlitin, ki je do 800 MPa, je posledica drobno porazdeljenih netopnih faz in sekundarnih izločkov. Obe vrsti delcev povzročata sočasno disperzijsko in izločevalno utrjevanje. Zlitine imajo poleg statične trdnosti tudi dobro trajno nihajno trdnost, žilavost in korozijsko obstojnost^{3,6,17}.
2. Zlitine z dobrimi mehanskimi lastnostmi pri povišanih temperaturah vsebujejo železo, cer, molibden, kobalt, krom, nikelj, vanadij, mangan in cirkonij. S temi elementi se izdelujejo zlitine vrste Al–Fe–Ce, Al–Fe–Mo, Al–Fe–Co, Al–Fe–Zr, Al–Cr–Mn–Zr, Al–Fe–V–Mo–Zr in druge. Posamezne vsebnosti teh elementov so od 1 do 12 m.%. Zlitin z enakimi sestavami ni mogoče izdelati s klasičnimi postopki ulivanja, ker imajo vsi naštetih elementi nizko ravnotežno topnost v aluminiju. Relativno visoke mehanske lastnosti zlitin so obstojne do temperatur okoli 350°C (slika 7). Temperaturna obstojnost je posledica drobnih nekoherentnih in koherentnih delcev v aluminijevi matrici. Obe vrsti delcev sta stabilni pri povišanih temperaturah in povzročata disperzijsko ter izločevalno utrjevanje. Trdnostne lastnosti običajnih aluminijevih zlitin v toplotno utrjenem stanju so obstojne le do temperatur okoli 130°C. Pri višjih temperaturah nastane zmehčanje zaradi prestaranja (slika 7)^{3,6,18}.
3. Z RSP postopkom se izdelujejo tudi zlitine vrste Al–Li–X z vsebnostjo litija nad 3 m.%. Večji dodatek litija povzroči nadaljno zmanjšanje gostote in povečanje elastičnega modula v primerjavi s polkonkatinuirno ulitimi zlitinami^{3,6}.
4. Evtektiske in nadevtektiske zlitine vrste Al–Si z 11 do 25 m.% Si, ki so izdelane po RSP postopku, imajo dobro obstojnost proti obrabi. Med hitrim strjevanjem taline pri izdelavi prahov, nastane v aluminijevi osnovi zelo drobno porazdeljen evtektiski silicij (slika 8). Homogena in drobna porazdelitev silicija je vzrok



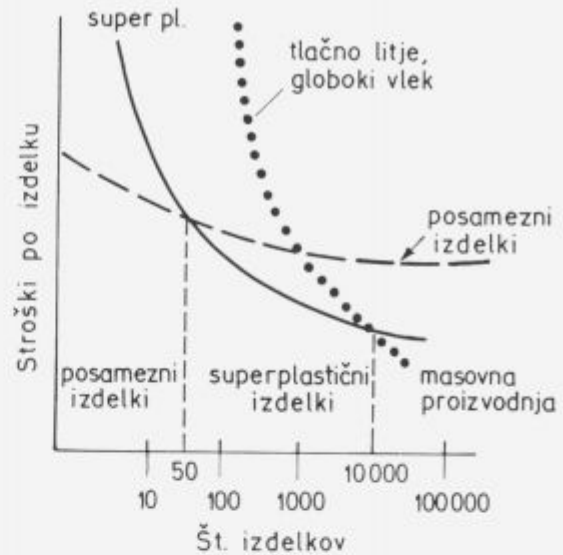
Slika 3. Shema postopka za preoblikovanje superplastične pločevine¹³.

Figure 3. Schematic presentation of shaping a superplastic sheet¹³.

za dobro obrabno obstojnost in sočasno obdelovalnost zgoščenih izdelkov, ki so narejeni iz takih prahov. Dodatki železa, mangana ali niklja poboljšajo obstojnost trdnostnih lastnosti do temperatur okoli 350°C, kar je pomembno za uporabo teh zlitin v motorni industriji^{3,16,19}.

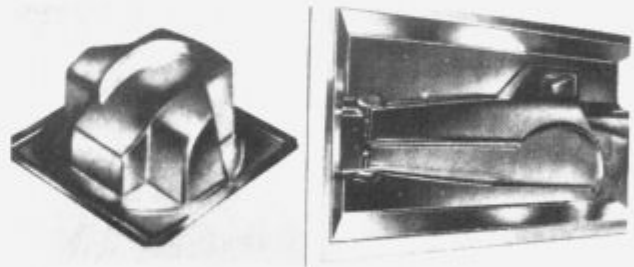
4 Mehansko legiranje

Mehansko legiranje je postopek metalurgije prahov, ki omogoča izdelavo zlitin v trdnem stanju. Na ta način se izdelujejo zlitine s karbidi in oksidi ter bakrom, magnezijem, litijem, železom, cerom in drugimi elementi. Postopek temelji na mehanskem vgrajevanju zlitinskih gradnikov v aluminijevo osnovo. Aluminijev prah se melje skupaj z ogljikom, oksidi in prahom zlitinskih elementov v hitrih, krogličnih mlinih. Med mletjem poteka ponavljajoče drobljenje in zvarjenje prašnih komponent, kar povzroči uvajanje karbidov, oksidov in zlitinskih elementov v aluminijevo matriko. Ogljik reagira med mletjem z aluminijem v Al_4C_3 ; delci Al_2O_3 pa nastanejo z drobljenjem oksidnih plasti, ki obdajajo površine prašnih delcev. Rezultat mletja



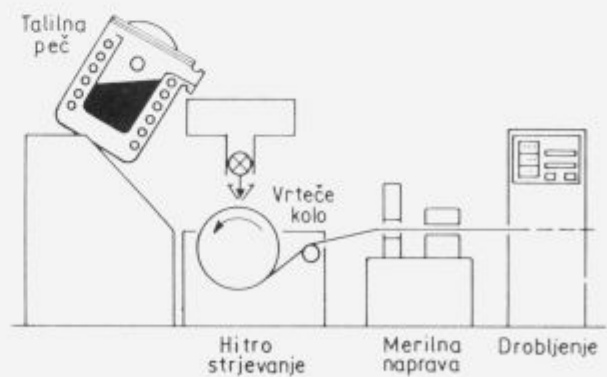
Slika 4. Stroški v odvisnosti od števila predmetov pri različnih izdelovalnih postopkih¹⁵.

Figure 4. Costs depending on number of articles for various manufacturing process¹⁵.



Slika 5. Del pilotskega sedišča (levo) in avtomobilske karoserije (desno) iz superplastične zlitine Al - Cu - Zr¹⁵.

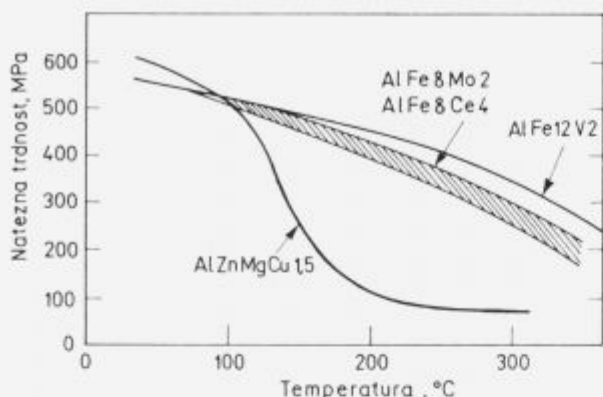
Figure 5. Part of pilot seat (left), and the auto body (right), made of Al - Cu - Zr superplastic alloy¹⁵.



Slika 6. Izdelava tankih trakov po postopku hitrega strjevanja taline⁶.

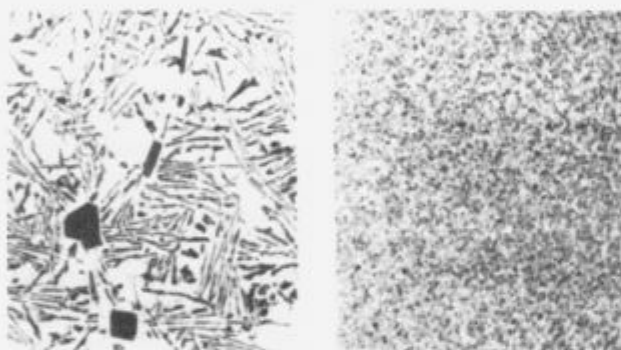
Figure 6. Manufacturing thin strips by a rapid solidification process⁶.

je nov kompozitni prah na osnovi aluminija. Delci prahu imajo drobnozrnato mikrostrukturo s povprečno velikostjo



Slika 7. Natezna trdnost v odvisnosti od temperature za zlitine AlFe8Mo₂, AlFe8Ce₄, AlFe12V₂ (RSP postopek) in AlZnMgCu_{1,5} (polkontinuirno ulivanje)¹⁸.

Figure 7. Tensile strength depending on temperature for AlFe8Mo₂, AlFe8Ce₄, AlFe12V₂ (RSP process), and AlZnMgCu_{1,5} (semicontinuous casting) alloys¹⁸.

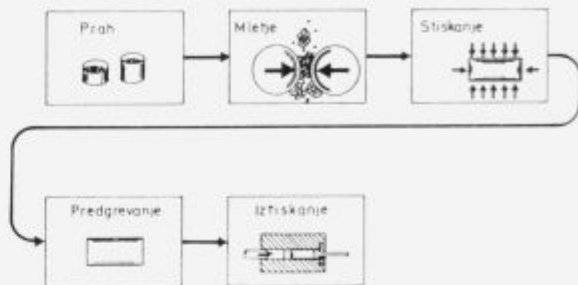


Slika 8. Mikrostruktura zlitine AlSi₁₂, ki je izdelana s klasičnim ulivanjem (levo) in po RSP postopku (desno)¹⁹. Pov. 75×.

Figure 8. Microstructure of AlSi₁₂ alloy being manufactured by standard casting (left), and by RSP process (right)¹⁹. Magn. 75×.

zrn pod 0.5 nm. Karbidi Al₄C₃ in oksidi Al₂O₃ so v obliki kroglic s premerom do 100 nm enakomerno porazdeljeni v aluminijevi matrici. Ti nekoherentni delci povzročijo disperzijsko utrjevanje, ki je vzrok za visoke in temperaturno obstojne mehanske lastnosti zlitin. Po mletju se kompozitni prah zgosti v izostatskih stiskalnicah, sintra in iztiska v končne izdelke (slika 9).

Po postopku mehanskega legiranja se izdelujejo različni aluminijevi materiali, kot na primer Al – Al₄C₃²¹, Al – Al₂O₃²² in Al – Al₂O₃ – Al₄C₃²⁰. Ti materiali z natezno trdnostjo do 600 MPa, ki je obstojna do temperature 500 °C, lahko nadomestijo titanove zlitine in keramiko²⁰. Po tem postopku se izdelujejo tudi zlitine s podobno sestavo kot jih imajo klasične zlitine: AlMg₄ in AlCu₄Mg_{1,5} z 0.8 m.% O in 1.1 m.% C. Kisik in ogljik v obliki oksidov in karbidov povišata mehanske lastnosti zaradi disperzijskega utrjevanja^{6,23}. Zlitina AlCu₄Mg_{1,5}O_{0,8}C_{1,1} ima v primerjavi s klasično toplotno utrjevalno zlitino AlZnMgCu_{1,5} za 70% višjo mejo plastičnosti, za 40% višjo natezno trdnost, za 120% višji raztezek in za 70% boljše korozijsko obstojnost. Zlitine vrste Al–Li–X, Al–Fe–Co in Al – Ti z disperznimi delci so nadaljnji perspektivni ma-



Slika 9. Shema postopka za mehansko izdelavo aluminijevih zlitin²⁰.

Figure 9. Schematic flowsheet of mechanical making of aluminium alloys²⁰.

teriali, ki se izdelujejo po postopku mehanskega legiranja²⁴.

5 Kompoziti

Razvoj kompozitnih materialov na osnovi aluminija pospešuje stalna želja po čim lažjih in trdnjših konstrukcijskih materialih. Obstajata dve smeri razvoja: kompoziti z vložnimi vlakni ali delci v aluminijevi osnovi in plastni kompoziti^{3,6,25}.

Prva oblika kompozitov sestoji iz kovinske osnove, v kateri so vložena dolga vlakna, kratka vlakna, whiskerji ali delci. Vlakna in delci so iz različnih trdih materialov, kot so Al₂O₃, Al₂O₃ + SiO₂, SiC, ogljik in bor. Volumski delež ojačitvenih komponent je 20 do 50%. Prednosti teh kompozitov v primerjavi s kovinskimi materiali so večji elastični modul in druge trdnostne lastnosti ($R_m \approx 1000$ MPa), ki so obstojne tudi pri višjih temperaturah.

Plastni kompoziti ali laminati so sestavljeni iz aluminijevih trakov in trakov umetnih snovi. Uspešno so se uveljavili laminati z imenom ARALL, kjer so trakovi iz aluminijevih zlitin (Al – Cu – Mg ali Al – Zn – Mg – Cu) zlepljeni s trakovi iz umetnih snovi. Le-te so dodatno ojačane z aramidnimi vlakni. Ti kompoziti imajo 20% nižjo gostoto, 30% večje trdnostne lastnosti in 100% večjo trajno nihajno trdnost v primerjavi z neojačanimi aluminijevimi zlitinami.

Široka uporaba kompozitnih materialov na osnovi aluminija je trenutno omejena zaradi anizotropnosti mehanskih lastnosti in dragih izdelovalnih postopkov.

6 Sklepi

V članku so opisani nekateri pomembnejši, sodobni aluminijevi materiali, njihove lastnosti in izdelovalni postopki. Zaradi preobsežnosti ni zajeto vse razvojno delo s tega področja. Namen sestavka je predvsem informacija o razvojnih smernicah, ki trenutno potekajo v svetu na področju aluminijevih materialov. Nekateri od teh materialov, kot so zlitine vrste Al – Li in superplastične zlitine se že industrijsko izdelujejo in uporabljajo za zahtevne izdelke. Postopki metalurgije prahov in kombinacije aluminija z nekovinskimi snovmi pa nudijo trenutno največ možnosti za nadaljnji razvoj materialov na osnovi aluminija.

7 Literatura

- ¹ 4th International Aluminium Lithium Conference, Journal de Physique, 48, Coloque C3, Pariz, 1987
- ² H.F. de Jong: A survey of the development, properties and applications of aluminium-lithium alloys, Aluminium, 60, št. 9, 1984, 673/679

- ³ G. Scharf, G. Winkhaus: Technical perspectives of aluminium materials, *Aluminium*, 63, št. 7/8, 1987, 788/808
- ⁴ J. Wadsworth, C.A. Henshall, T.G. Neeh: Superplastic aluminium-lithium alloys, *Aluminium-Lithium Alloys III: proceedings of the third International Aluminium Conference*, The Institute of Metals, London, 1986, 199/212
- ⁵ K.H. Rendigs: Aluminium-Lithium-Werkstoffe vor dem Einsatz im Airbus (I), *Aluminium*, 67, št. 4, 1991, 357/359
- ⁶ I.J. Polmar: *Light Alloys, Metallurgy of the Light Metals*, 2, Edward Arnold, London, 1989
- ⁷ A. Smolej, M. Gnamuš: Neobjavljeno delo
- ⁸ R. Grimes, M.J. Stowell, B.M. Watts: Superplastic aluminium-based alloys, *Metals Technology*, marec 1976, 154/160
- ⁹ I.I. Novikov, V.K. Portnoj: Superplastizität von Legierungen, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1984
- ¹⁰ D.H. Shin, S.C. Meang: Superplastic behaviour of 7475 aluminium alloy, *Journal of the Materials Science Letters*, št. 8, 1989, 1380/1382
- ¹¹ T.J. Watson, J.I. Bennetsh: The effect of microstructure in the SPF behavior of Al-Li-X alloys, *Superplasticity in Aerospace*, (izd. H.C. Heikenen, T.R. McNelley), The Metallurgical Society, Warrendale, 1988, 261/297
- ¹² O.D. Sherby: Advances in superplasticity and in superplastic materials, *ISIJ International*, 29, št. 8, 1989, 698/716
- ¹³ N.N.: Superplastic forming-aluminium, *Welding and metal fabrication*, oktober 1989, 395/397
- ¹⁴ J. Richards: Die Vorteile von superplastischem Aluminium, *Aluminium*, 64, št. 11, 1988, 1132/1133
- ¹⁵ N.N.: Umformen mit superplastischem Aluminium, *Superform Limited, Alcan Deutschland GmbH*
- ¹⁶ K. Kitora: Recent technical development in the Japanese aluminium industry, *Aluminium*, 60, št. 7/8, 1990, 755/769
- ¹⁷ J. Marthy, G. Scharf, J. Becker, G. Fischer, W. Keinath, A. Gysler, G. Lütjering: Entwicklung von hochfesten pulvermetallurgischen Aluminium-Legierungen, *Metall*, 44, št. 6, 532/539
- ¹⁸ C.M. Adam, R.E. Lewis: *Rapidly Solidified Crystalline Alloys*, (izd. S.K. Das), AIME, Warrendale, 1985
- ¹⁹ G.J. Brockmann: Massgeschneiderte Aluminiumwerkstoffe für neue Anwendungen, *Aluminium*, 65, št. 3, 1989, 279/280
- ²⁰ G.J. Brockmann, J. Baumgarten: Pulvermetallurgische Herstellung von hochtemperaturfesten Aluminiumwerkstoffen, *Aluminium*, 65, št. 4, 1989, 393/399
- ²¹ J. Schalunov, M. Slesar, M. Besterci, H. Oppenheim, G. Jangg: Einfluss der Herstellungsbedingungen auf die Eigenschaften von dispersionsverfestigten Al-Al₄C₃-Werkstoffen, *Metall*, 40, št. 6, 1986, 601/606
- ²² J. Kaneho, M. Sugamatu, R. Horiuchi: Mechanisches Legieren von Aluminium mit Keramikpartikeln, *Aluminium*, 65, št. 5, 1989, 505/507
- ²³ J.S. Benjamin, R.D. Schelling: Dispersion strengthened aluminium—4 Pct magnesium alloy made by mechanical alloying, *Metallurgical Transactions A*, 12 A, oktober, 1981, 1827/1832
- ²⁴ R.R. Brindenbaugh: The future of aluminium in the materials market place, *Aluminium*, 65, št. 7/8, 1989, 771/782
- ²⁵ S. Dermarker: Metal matrix composites, *Metals and Materials*, 2, 144, 1986