

LIVARSKI VESTNIK

Izdajatelj / Publisher:

Društvo livarjev Slovenije
Lepi pot 6, P.P. 424, SI-1001 Ljubljana
Tel.: + 386 1 252 24 88
Fax: + 386 1 426 99 34
E-mail: drustvo.livarjev@siol.net
Spletna stran: www.drustvo-livarjev.si

Glavni in odgovorni urednik / Chief and responsible editor:

prof. dr. Alojz Križman
E-mail: probatus@triera.net

Tehnično urejanje / Technical editing:

mag. Mirjam Jan-Blažič

Uredniški odbor / Editorial board:

prof. dr. Alojz Križman, Univerza v Mariboru
prof. dr. Primož Mrvar, Univerza v Ljubljani
prof. dr. Jožef Medved, Univerza v Ljubljani
doc. dr. Gorazd Lojen, Univerza v Mariboru
prof. dr. Andreas Bührig-Polaczek, Giesserei
Institut RWTH Aachen
prof. dr. Peter Schumacher, Montanuniversität
Leoben
prof. dr. Reinhard Döpp, TU Clausthal
prof. dr. Jozef Suchy, AGH Krakov
prof. dr. Jaromir Roučka, Institut Brno
prof. dr. Branko Bauer, Univerza v Zagrebu
dr. Milan Lampič, Fritz Winter, Stadtallendorf

Prevod v angleški jezik / Translation into English:

Marvelingua, Aljaž Seničar s.p.

Lektorji / Lectors:

Angleški jezik / English:
Yvonne Rosteck, Düsseldorf
Slovenski jezik / Slovene:
prof. Janina Šifer

Tisk / Print:

Fleks d.o.o.

Naklada / Circulation:

4 številke na leto / issues per year
800 izvodov / copies

Letna naročnina: 35 EUR z DDV

Year subscription: 35 EUR (included PP)

Dano v tisk: marec 2018



Naslov/adress:

Stem d.o.o.
Vipavska cesta 67
5000 Nova gorica

Direktor: Uroš Saksida
Vipavska cesta 67
5000 Nova Gorica

Tel.: +386 5 33 52 100
Fax: +386 5 30 01 558
e-mail: info@stem.si
spletna stran: <http://www.stem.si/>

VSEBINA / CONTENTS

Stran / Page:

E. Flender: **Kaj uspešne male in srednje velike evropske livarne delajo prav? / What are Successful Small and Mid-Size Foundries in Europe Doing Right?** 2

Christian Heiselbetz, Franz Josef Feikus, Leopold Kniewallner: **Izzivi e-pogonskih komponent – rešitve v livarskih tehnologijah / Challenges E-Drive Components – Solutions in Casting Technology** 12

Zdenka Zovko Brodarac, Davor Stanić: **Vpliv toplotne obdelave na razvoj lastnosti pri zlitini AlSi7Mg(Cu) / Influence of Heat Treatment on AlSi7Mg(Cu) Alloy Properties Development** 21

Maja Vončina, Jožef Medved, Stanislav Kores, Pan Xie, Andreas Cziegler, Peter Schumacher: **Vpliv molibdena in cirkonija na aluminijeve livarske zlitine / Effect of Molybdenum and Zirconium on Aluminium Casting Alloys** 35

AKTUALNO / CURRENT

Koledar livarskih prireditev 2018 48
Sejem EUROGUSS 2018 49
Seminar o okoljevarstveni problematiki 50
Seje organov Društva livarjev Slovenije 51
Kaj se dogaja z rastjo svetovne livarske proizvodnje 54
Portorož 2018

Izdajanje Livarskega vestnika sofinancira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije
Publishing supported by Slovenian Research Agency

Livarski vestnik je vpisan v razvid medijev Ministrstva za kulturo pod zaporedno številko 588

V številki 3/2017 in številki 4/2017 Livarskega vestnika pravilno ime lektorja za angleški jezik glasi Yvonne Rosteck, Düsseldorf.
In issue 3/2017 and 4/2017 of the Livarski Vestnik, the correct name for english lector is Yvonne Rosteck, Düsseldorf.

Kaj uspešne male in srednje velike evropske livarne delajo prav?

What are Successful Small and Mid-Size Foundries in Europe Doing Right?

Čeprav je livarska industrija v primerjavi z drugimi majhna, je kljub temu pod vplivom globalnega razvoja. V Evropi imajo livarne presežne zmogljivosti za skoraj vse lite materiale in različne postopke ulivanja, zato je vsakemu livarju jasno, da če on ne bo izdelal določenega ulitka, bo to pač storil nekdo drug. Livarji dobavljajo velikim industrijskim sektorjem. V primerjavi z avtomobilsko, energetske, strojno, elektrotehnično in gradbeno industrijo pa so za evropsko livarsko industrijo, ki se ukvarja z dobavo, značilna mala in srednje velika podjetja, ki so pogosto v zasebni lasti. Zato je jasno, da je evropska livarska industrija pogosto pod izjemnim pritiskom prilagoditvam poslovnim navadam svojih strank.

Te razmere male in srednje velike livarne silijo v razvoj jasnega vpogleda in strategije glede tega, kar je dobro za njihova podjetja – najsi to velja za razvoj poslovnih potencialov ali preživetje.

Najprej: kaj pojem »uspešno« pomeni za male in srednje velike livarne?

Včasih svetovalci ali tako imenovani poslovni svetovalci, ki si prizadevajo za to, da bi podjetja postala uspešna, vztrajajo, da se je treba osredotočiti na »to, kar deluje in prinaša dobiček«. To je seveda pravilno, a ne posega dovolj globoko. Na primer: naložbe in inovacije nikoli ne prinašajo dobička že na začetku, odločitve za ključne

Even though the foundry industry is a small industry compared to others, it is sustainably influenced by global developments. In Europe, foundries have overcapacities for almost all casting materials and for the different casting processes, i.e. it is clear to every foundryman that if he does not produce a certain cast part, someone else will do it. Foundrymen supply to the big industries: In comparison to the automotive, power, mechanical, electrical and building industry the supplying European foundry industry is characterized by small and medium enterprises, often in private ownership. So it is clear, that the European foundry industry often gets massively under pressure to accept the business habits of their customers.

This situation forces small and mid-size foundries to develop a clear vision and strategy for the benefit of their own company – whether it is targeted to develop business potentials or to survive.

First of all: what does „successful” mean for small and mid-size foundries?

Sometimes consultants or so called business advisors, engaged to make enterprises successful, preach to concentrate “on what works and is profitable”. This is for sure right, but clearly doesn’t go far enough. For example: Investments and innovations never are profitable from day one, decisions for critical or not profitable processes have

ali nedobičkonosne procese je včasih treba sprejeti zaradi strateških razlogov in dolgoročnih perspektiv. Poleg ostalih so te točke na splošno dobro sprejete osnove za uspeh podjetja.

Danes bi bilo treba uspeh malih in srednje velikih livarn meriti glede na njihovo dobičkonosnost, trajnost, prosti kapital za naložbe, potencial za inovacije in prilagodljivost – tako intelektualno kot z vidika razvoja in proizvodnih zmogljivosti.

Upravljanje stroškov in možni dobiček

Za spopadanje z zahtevnimi izzivi postopkov ulivanja in proizvodnjo celovitih ulitkov, ki izpolnjujejo zahteve glede kakovosti, so vselej potrebni usposobljeno osebje, znanje in izkušnje. Vse pogosteje pa so usposobljenost ter znanje in izkušnje obvezni v vseh fazah izračuna stroškov, od izdelave ponudbe do predhodne ocene stroškov proizvodnje. Za livarno je ključnega pomena, da je – pred sprejemom naročila – čim bolj seznanjena s proizvodnimi tveganji in potencialnim dobičkom, ki ga realno lahko pričakuje. Prav tako je bistveno, da po dostavi proizvedenih izdelkov oceni vse izdatke in doseženi dobiček. To je treba sprejeti kot osnovni predpogoj za uspeh vsake livarne.

Izdelki in stranke

Ponudba posebnih ulitkov, ki jih livarna lahko proizvaja oziroma bi jih morala proizvajati, je odvisna od proizvodnih obratov in izkušenj z določenimi deli, materiali in postopki. Če vse pade na svoje mesto, dobimo največji možni potencial za uspešno in dobičkonosno proizvodnjo. Ali se osredotočimo samo na to? Ne, saj je to zgolj interni zorni kot določene livarne.

Gledano od zunaj – torej z zornega kota potencialne stranke – najprej

sometimes to be taken for strategic reasons and long term perspectives. Among others, all these points are well accepted cornerstones for enterprise success in general. Today SME foundry's success should be measured by their profitability, sustainability, free capital for investments, innovation potential and flexibility – both intellectual and from the viewpoint of development and production capacities.

Cost Management and Profit Potential

Qualified staff and know how is always required to handle the challenging issues of casting processes and to produce high integrity castings that meet the demands in quality. But more and more, this qualification and know how is also mandatory for all phases of cost calculation from the quote to the past production cost assessment. It is essential for the foundry to know – before an order will be accepted – as much as possible about production risks and the potential profit that realistically could be expected. And it is also essential – after the produced parts were delivered – to assess the total costs spent and achieved profits. This has to be accepted as a general prerequisite for any foundry's success.

Products and Customers

The range of particular castings, that a foundry can or should produce, depends on its production facilities, and experiences in certain parts, materials and processes. If all that fits together, the maximum potential for a successful, profitable production is given. So, just concentrate on this? No, because this is only the foundry's internal point of view. From the outside - meaning from the potential customer's point of view - this range of castings is visible first of all. For example they just see "an aluminum cylinder

opazimo ponudbo ulitkov. Na primer: stranke vidijo samo »livarno, ki izdeluje aluminijaste glave valjev« in ne livarne, ki lahko proizvaja ulitke, izdelane s pomočjo jeder, iz različnih zlitin, vključno s toplotno obdelavo za upravljanje mikrostrukture, zmožno obvladovanja različnih kompleksnih pristopov za ulivanje z malo turbulencami na različnih peščenih ali trajnih formah. Z enako stopnjo pomembnosti pa kupci livarjev ocenijo usposobljenost in reference svojih potencialnih dobaviteljev. Mimogrede, kakovost in zanesljivost dobavitelja ne predstavljata več konkurenčne prednosti določene livarne, saj to njene stranke pričakujejo.

S pogledom na tržišče morajo trženje in prodajne aktivnosti livarne to odražati z zagotavljanjem in zaščito jasne predstave zmožnosti livarne. Ta predstava mora biti jasna in prepoznavna od zunaj. Vendar pa interni zorni kot livarne zahteva širšo perspektivo: jasna in dobra predstava z notranjega zornega kota ne bi smela pomeniti ozke osredotočenosti in velike specializacije. Specializacija je bila zelo pomembna v 90. letih 20. stoletja, ko so lokalne proizvodne zmogljivosti izpolnjevale zahteve lokalnih tržišč. Danes pa se svetovno tržišče sooča s presežnimi zmogljivostmi in kupci litih izdelkov (menijo, da) lahko iščejo ponudbe vsepovsod. Zato sta v določeni meri potrebni raznolikost in prilagodljivost za kar največjo sposobnost odzivanja na spreminjajoče zahteve tržišča. Če bi se pojavili novi tipi ulitkov, bi kupec ulitkov morda lahko spregledal livarno, tako da je ne bi niti prosil za pripravo ponudbe. Znova je treba poudariti, da livarna ne bi smela biti znana kot specialist za »izdelavo glav valjev«, temveč kot »livarna, ki je kvalificirana za izdelavo ulitkov, kot so glave valjev« (intenzivnih v jedru, toplotno obdelanih itn., gl. zgoraj).

head foundry” and not a foundry capable to produce core intensive castings from different alloys, including heat treatment for microstructure management, capable to handle different complex low turbulence pouring approaches in different sand or permanent molds. But almost on the same level of importance casting buyers assess their potential supplier’s qualification and references. By the way, quality and supplier reliability are no competitive edges of a foundry any more, but a clear expectation of its customers.

With direction to the market, the foundry’s marketing and sales activities have to mirror this by providing and defend a sharp profile of the foundry’s capabilities. This profile has to be clear and visible from the outside. But the foundry-internal point of view requires a wider perspective: a clear and sharp profile should internally not mean a narrow focus and high specialization. Specialization was a key issue in the nineties, where local production capacities met local market demands. Today there are production overcapacities in the world market and casting buyers (think that they) can source everywhere. So diversification and flexibility for a maximum ability to respond on changing market demands are required to a certain extent. If new types of castings come along, the casting buyer might overlook the foundry so that it is not even invited to bid. Again, a foundry should not be visible as specialized “cylinder head foundry”, but as “foundry being qualified for castings “like cylinder heads” (core intensive, heat treated etc., see above) Specialization is also dangerous, because often it goes hand in hand with fewer customers and a higher dependency on their success and commitment.

Generally a foundry does not necessarily has to successfully produce a wide range of completely different parts, but to develop

Specializiranost pa je tudi nevarna, kajti pogosto jo spremljata tudi manjše število strank ter večja odvisnost od njihovega uspeha in zvestobe.

Na splošno za livarno ni ključno, da uspešno proizvaja široko paleto popolnoma različnih izdelkov, pač pa da razvija in ohranja poglavitno konkurenčnost ter zmožnosti, da to hkrati poudarja na tržišču. Po drugi strani pa se v primeru, ko gre livarna prek svojih dejanskih zmožnosti in kompetenc pri naročilih, pojavi neizogibno tveganje, da so druge livarne bolj opremljene, kvalificirane in imajo zato več možnosti, da pri izdelavi teh izdelkov ustvarijo večji dobiček.

Včasih bi bilo, ko določena skupina izdelkov preprosto preneha obstajati zaradi svetovnih tehnoloških smernic, morda treba poiskati nove. V tem primeru seveda za livarno to, da se pripravi na novo paleto izdelkov, predstavlja velik strošek. Za ohranjanje uspešnosti so inovacijske zmogljivosti, potenciali in tudi kapitalski viri livarne ključni parametri za upravljanje potrebnih vlaganj in sprememb. Seveda je treba razumeti tudi tržišča, njihove smernice in prihodnje potrebe.

Pa tudi obseg strank mora biti čim večji. Za livarno, ki dobavlja avtomobilski industriji, je ključnega pomena, da dobavlja različnim proizvajalcem originalne opreme, ki delujejo neodvisno drug od drugega. Tako za pridobivanje novih strank kot informiranje obstoječih mora livarna v vsakem trenutku izkazovati zgoraj omenjeno jasno sliko skupaj s pripravljenostjo, zavezanostjo in zmožnostjo zagotavljanja podpore novim zahtevam strank.

Na nestanovitnih tržiščih je mnogo poslovnih priložnosti. Proaktivna livarna mora obstoječe in potencialne prihodnje stranke obveščati o načrtovanih vlaganjih in drugih ustreznih spremembah. Kljub funkcionalnemu in profesionalnemu

and maintain the principal competence and capabilities to do so and, at the same time, make this visible to the market. On the other hand, if a foundry goes for orders beside their real capabilities and competences, it is an inevitable risk that other foundries are better equipped, qualified and therefore more capable to be profitable in producing these parts.

Sometimes, when certain product families simply die due to worldwide technology trends, it might be necessary to seek for new ones. In such a case it is of course cost intensive to get a foundry prepared for a new product range. To stay successful, the innovation capabilities and potentials as well as the foundry's capital resources are key parameters to manage the necessary investments and changes. And of course the markets, their trends and upcoming needs have to be well understood.

Naturally the range of customers should be as wide as possible. For a foundry supplying the automotive industry it is essential to deliver to different OEMs which are independent from each other. For the acquisition of new customers but also for the information of existing customers, the foundry always has to show the above mentioned sharp profile together with willingness, commitment and capabilities to support the customer's new demands.

In volatile markets are many business opportunities. For a proactive foundry it is necessary to keep existing and possible future customers informed about planned investments and other relevant changings. Despite of a functional and professional business relation, it is an essential part of the business to establish and maintain trust.

poslovnemu odnosu je ključni del poslovanja vzpostavitev in ohranjanje zaupanja.

Struktura, delovne metode in upravljanje

V zadnjih dvesto letih se je izdelava industrijskih ulitkov iz ročne izdelave razvila v to, kar je danes. Struktura livarne, ki je sestavljena iz tipičnih delovnih obratov, kot je talilni obrat, obrat za ulivanje ulitkov, obrat za izdelovanje jeder, čistilnica, obrat za preverjanje kakovosti itd., navadno sledi pretoku materiala in ulitkov. To pogosto ne velja za livarne, ki so se razvijale z notranjo rastjo, vendar pa bi morale veljati za nove livarne, ki so na novo zgrajene.

To je primer načela, ki se je razvilo dolgoročno in je dandanes tako dobro sprejeto, da nihče ne podvomi vanj. Eden od razlogov za to je seveda, da je načelo »zgradba sledi pretoku materiala« na splošno dobro sprejeto skorajda v vseh proizvodnih panogah. S tega vidika lahko upravičeno trdimo, da livarne to načelo uporabljajo kot standardno prakso.

Če pa podjetnik, ki se ukvarja z livarstvom, želi napredovati, najti in uresničevati inovacije ter pridobiti novo konkurenčnost, prav gotovo skoraj nikoli ne sme početi tega, kar načeloma počnejo drugi. Ena od izjem je tudi, da mora biti livarski inženir vedno odprt za nove zamisli, ne glede na to, od kod izvirajo. Inovativna podjetja so dokazala, da ustvarjanje novih zamisli, sledenje in ocenjevanje zamisli ter razvoj nekaterih izmed njih do mere, da postanejo inovacije, prinaša rezultate, ki se kažejo v novih dobičkonosnih poslovnih priložnostih in trajnostnem upravljanju podjetij. Prav tako pa je dokazano, da pride več zamisli, ki privedejo do dejanskih inovacij, iz vrst delavcev v obratih in ne s strani visoko plačanih svetovalcev.

Structure, Working Methods and Management

Over the last two hundred years the industrial casting production was developed from handcrafting to what it is today. A foundry's structure, made up by the typical functional departments like melting shop, molding, core shop, fettling, quality department etc. usually follows the flow of material and castings. This is in organically grown foundries often not the case but should be in the new ones, planned and built on the green field. This is an example for a principle that has developed over a long time and is so well accepted these days that eventually nobody is questioning it. One of the reasons for this is of course, that the "structure follows material flow" is generally well accepted in almost all production facilities. From that point of view it is fair to state that foundries follow this principle as a standard practice.

But, if a foundry entrepreneur seeks for improvement, if he wants to find and realize innovations and to gain new competitiveness, he should definitely almost never do things on principal. One of the few exemptions is that a foundry engineer should always open his mind for new ideas from wherever they come. Innovative companies have proved, that generating new ideas, tracking and evaluating them and develop some to become innovations, finally result in new profitable business opportunities and a sustainable enterprise management. And it is also proved that more ideas leading to real innovations come from the shop floor level than from highly paid consultants. The backbone of a foundry's innovation capability is the qualification of all technical employees from shop floor over engineering to management.

The foundry business is characterized by more influencing parameters as most

Poglaviten dejavnik inovacijske zmogljivosti livarne je usposobljenost vseh tehničnih zaposlenih, od delavcev v obratih prek inženirjev do vodstvenega kadra.

Na livarsko industrijo deluje več dejavnikov kot na katero koli drugo proizvodno industrijo. Tehnično in poslovno upravljanje podjetij se sooča z vse zahtevnejšimi strankami, ki pridobivajo ponudnike povsod po svetu, konkurenco na vsakem koraku, globalnimi cenami za materiale in energetiko, metalurgijo, taljenjem ulivanjem, proizvodnjo jeder, na stotine procesnimi parametri, kakovostjo ter sledenjem časa in stroškov. To, da imamo vse to pod nadzorom – tako kot žongler spremlja vse žogice hkrati – je še eno jamstvo za uspešnost livarne.

V srednje veliki livarni je nadzor nad zgornjimi parametri na ramenih nekaj ljudi z različnimi izobrazbami, izkušnjami, odgovornostmi in osredotočenostmi. Osnove za učinkovit nadzor tehničnih in poslovnih procesov so znane in dobro zasidrane: te osebe morajo sodelovati na podlagi dokumentacije, preglednosti, poštenosti in podpori mentaliteti sodelovanja med oddelki, jasnih odločitev in jasne komunikacije glede strategij, operativnih vprašanj ter razvoja človeških virov. Sodelovalna naravnost je ključni dejavnik za uspeh livarne.

Raziskave in razvoj ter zaposleni

Danes ima lastne oddelke raziskav in razvoja samo še peščica velikih livarskih skupin. Obstaja nekaj skupnih projektov, ki so podprti z javnimi sredstvi, zlasti na evropski ravni. Poleg tega raziskave izvajajo še univerze in raziskovalni inštituti, ki se večinoma ukvarjajo s projekti, ki so znova podprti z javnimi sredstvi ali s strani večjih podjetij. Za uspešno malo ali srednje veliko livarno je ključnega pomena, da natančno upošteva scenarij raziskav in razvoja. To ni

of the other production technologies. Technical and business management are faced with globally sourcing customers with permanently increasing demands, competition from everywhere, global material and energy prices, metallurgy, melting, molding, core manufacturing, hundreds of process parameters, quality, time and cost tracking. Keeping all this under control - like a jongleur keeping all balls in view - is another guarantor for a successful foundry. In a medium size foundry the control of the above mentioned parameters are on the shoulders of a couple of people with different education, experience, responsibilities and focusses. The cornerstones for an efficient technical and business process control are known and well accepted: these people have to cooperate on the basis of documentation, transparency, fairness and support mentality between departments, clear decisions and clear communication on strategies, operative issues, and human resources development. Cooperation mentality is a key factor for a successful foundry.

Research & Development, Employees

Today, only a few large foundry groups still have their own R&D activities. There are some public funded collaborative projects, particularly on the European level. Apart from that, there is research in universities and research institutes, where most of the activities are again projects funded by public or bigger companies. So for a successful small or medium sized foundry it is mandatory to closely follow the R&D scenario. This is not really difficult, since there is a lot of information available from magazines or foundry associations. An important role, even and particularly for SME's, play an involvement in effective networks and seminars, workshops or

zelo težka naloga, saj je veliko informacij na voljo v revijah ali pri livarskih združenjih. Pomembno vlogo, še zlasti za mala in srednje velika podjetja, ima prisostvovanje v učinkovitih omrežjih in na seminarjih, delavnicah ali konferencah, ki se odvijajo po vsej Evropi. Mimogrede, tudi to služi prepoznavnosti livarne, o čemer je že tekla beseda.

Na splošno mora livarska industrija novo znanje v vsakodnevne operacije vključevati hitro, kakovostneje ter na bolj dosleden način. Da bi razumeli, ocenili in uresničili nove smernice ter tehnologije, ki bi zvečali vrednost in uspeh livarne, mora znova združiti odprte glave ter ustrezno usposobljenost.

Konec koncev to drži za uspešne livarne, ki svoje aktivnosti raziskav in razvoja ter inovacij podpirajo s pametnimi finančnimi politikami in trajnostnim podjetništvom.

V številnih evropskih državah že kar nekaj časa obstaja jasen trend, da družbe postajajo vse bolj in bolj odklonilne do tehnologije. To vodi do dejstva, da se mladi vse bolj odločajo za poslovno poklicno pot kot pa tehnično izobrazbo. To je osnovni razlog, zakaj se livarne v razvoju ali rastoče tovarne soočajo z manj usposobljenimi tehničnimi delavci, tehničnimi strokovnjaki in inženirji, ki se izobražujejo tako v industriji kot na univerzah. Hkrati pa vse več in več livarn upravljajo poslovni vodje, vloga sprejemalca odločitev pa se vse bolj odmika tudi visoko izobraženim inženirjem. Za tehnološko usmerjena tržišča in operacije, ki se odvijajo v livarski industriji, bi lahko to predstavljal vprašljiv trend, kajti tukaj vrednote ustvarjajo zgolj tehnologija, kakovost in operativna učinkovitost, ne pa upravne aktivnosti.

Za uspešno livarno je tesno sodelovanje med inženiringom in poslovanjem ključnega pomena.

conferences that are available throughout whole Europe. This, by the way, would also serve the above mentioned visibility of the foundry.

In general the foundry industry has to implement new knowledge faster, better and more consequent into the daily operations. In order to understand, evaluate and realize new trends and technologies to add value and to increase the success of the foundry, again an open mind together with a reasonable qualification are required. All in all it is true for successful foundries that they back up their R&D and innovation activities by intelligent financial politics and a sustainable entrepreneurship.

For quite some time there is a clear trend within many Europe countries that societies get more and more hostile to technology. This leads to the fact, that young people prefer to join a business career rather than a technical education. This is the basic reason, why evolving or growing foundries are faced with less skilled technical workers, technicians and engineers being educated within the industry and at universities. At the same time, more and more foundries are managed by business managers, and the role of a decision maker moves more and more away from even well-educated engineers. In technology oriented markets and operations like in the foundry industry this might be a very questionable trend, because here values are created only by technology, quality and operational efficiency and not by administrative activities. For a successful foundry the cooperation at the same eye level between engineering and business administration is a key factor.

Potentials and Challenges

The greatest potential of the casting processes is the potential to design intelligent, load-matched and highly

Potenciali in izzivi

Največji potencial livarskih procesov je potencial, ki omogoča zasnovo pametnih delov, kjer je mogoče prilagoditi čisto vse: obliko, funkcije, tudi trdnost zaradi različnih obremenitev. Pri izzivih, kot so nizka teža ali lahek material ter energijska učinkovitost, so livarske rešitve zelo konkurenčne drugim postopkom, tj. varjenju, lepljenju ali strojni obdelavi. Edini proces za proizvodnjo kovinskih delov, ki snovalcem omogoča več svobode, so procesi aditivne proizvodnje kovin (AP), ki pa so še v povojih. Tukaj lahko livarne še vedno znova in znova podajajo prepričljive rešitve. Za uspešno livarno to predstavlja izziv, s katerim se je treba spopadati na vsakodnevni ravni.

Takšna livarna mora do svojih potencialnih strank pristopati proaktivno, prav tako pa jih mora razumeti in jim zagotavljati dobro podporo njihovih potreb že od začetka. Za vse industrije po vsem svetu velja, da je večina delov še vedno preprostih, zato kovinski ulitki niso nujno potrebni. Snovalcem je mnogo bližja proizvodnja strojev za obdelavo kot pa litje. Priložnost za uspešne livarne je, da morajo tudi snovalci zagotoviti konkurenčne zasnove. Te zasnove so pametne, drugačne, predvsem pa jih je mogoče izvesti samo z izdelavo kovinskih ulitkov. Na tem področju pa lahko uspe samo livarna, ki zadostno opozarja na takšne možnosti.

Seveda imajo uspešne livarne vselej možnost dodatnega povečanja storilnosti in dodatne avtomatizacije proizvodnje. Digitalizacija tehničnih in upravnih procesov v livarni bo privedla do učinkovitejših rešitev. Poleg tega bo vdor digitalizacije prinesel tudi boljše razumevanje procesov.

V Evropi med izzivi, ki pestijo proizvodno industrijo, prvo mesto pogosto zaseda globalizacija. V tem smislu se morajo livarne zanašati na večanje količine, ki jo zahtevajo

function-integrated free form parts. In front of challenges like light weight or material and energy efficiency, casting solutions are very competitive to other processes, e.g. welding, gluing, or machining. The only metal part production processes, that allow a higher degree of freedom for the designers, are metal Additive Manufacturing (AM) processes that are still in their infancy. Here, the foundries still can achieve convincing answers again and again. For a successful foundry this is a challenge that has to be achieved every day.

Such a foundry has to approach its potential customers pro-active and has to understand and support their needs early and well. Worldwide and true for all industries, the design of a majority of parts is still low sophisticated and therefore metal castings are not necessarily required. A designer is much closer to machining manufacturing than to casting. The opportunity for successful foundries is that also designers need to deliver competitive designs. Such designs are intelligent, distinctive and mostly they can only to be realized as metal casting. Successful in this discipline can only be a foundry which signalizes its possibilities well enough!

Of course successful foundries always have potentials to further increase their productivity, to further automatize their manufacturing. The digitalization of the foundry's technical and administrative processes will lead to more efficient solutions. Additionally, the digital penetration will also improve the understanding of the processes.

As a challenge for the producing industry, globalization often is referred to in the first place in Europe. Here the foundries have to rely on the growth of quantity demanded by the so called emerging markets. Additionally, the production of mass articles even for low and mid standard vehicles and machines

tako imenovani nastajajoči trgi. Poleg tega se masovna proizvodnja izdelkov tudi za vozila nizkega in srednjega cenovnega razreda pomika iz Evrope v svet držav, kjer so stroški izdelave najnižji. Livarne se morajo s tem izzivom spoprijeti z zagotavljanjem boljših in tehnično konkurenčnih rešitev. Nekatere zelo uspešne manjše livarne so prepoznavne in prisotne na potencialnih tržiščih po vsem svetu, prav tako pa se odzivajo na vse pogostejšo zahtevo glede lokalnih odtisov.

Razviti industrijski narodi v Evropi, zlasti evropska livarska industrija, si mora prizadevati za pridobitev in ubranitev vodilnegapoložajanatehnološkempodročju. Kot smo že dejali, obstajajo številni svetovni trendi, ki jih lahko izkoristijo uspešne livarne: zmanjšanje teže litih delov bo ostal glavni cilj na osnovi pametnih zasnov za lahke dele z integriranimi funkcijami. Mešanice materialov, tj. različnih materialov v enem litem izdelku (kompozitno litje), pa tudi hibridne konstrukcije, bodo vse pogostejši. Vse to zahteva močnejši in ciljno usmerjen razvoj zlitin.

Potrebe po vlaganjih, še posebej pa uveljavitev vlaganja v okoljsko dopustne in energetske učinkovite rešitve, so v tem trenutku velik izziv za livarne, zlasti v Evropi. Hkrati pa ne gre pozabiti tudi trajne potrebe po vlaganjih v proizvodnjo, logistiko, obdelavo površin, prilagajanje zlitin, elektromobilnost itn. V tem smislu dobro finančno stanje, s tem pa zmožnost uvajanja sprememb in inovacijska zmogljivost, označujejo uspešno livarno.

Pri tem bi lahko koristilo tudi sodelovanje z drugimi podjetji. Naložbe je mogoče porazdeliti z jasno in pravično razdelitvijo dela ne samo na področju snovanja ulitkov in orodja ter obdelave ulitih delov, pač pa tudi z razdelitvijo ponudbe izdelkov.

move from Europe over the world to the lowest cost countries. Foundries have to take this challenge by offering superior, technically competitive solutions. Some very successful smaller foundries are visible and present in the potential markets worldwide, also answering the increasing demand for local footprints.

The developed industrial nations in Europe, and particularly Europe's foundry industry, must aim for gaining and defending the technological leadership. As mentioned above, there are numerous worldwide trends that can be served by successful foundries: reducing the weight of cast parts will remain a prime goal, based on intelligent design for low weight and function-integrated parts. The mix of material, i.e. different metals in one cast part (composite casting), but also hybrid constructions will increase. All this requires more and very target-oriented developments of alloys.

The investment needs, especially also the enforcement to invest into environmentally uncritical and energy-efficient solutions, is a big challenge for foundries – at this time obviously primarily in Europe. In parallel, there is a permanent need for investments into productivity, logistics, surfacetreatment, alloyadjustment, electro mobility etc. With respect to this, a financially sound situation and with that a sound change and innovation capability characterizes a successful foundry.

Here, cooperations with other companies could be helpful. Investments can be split by a clear and fair division of labor, not only in the field of mold and tool design as well as machining of cast parts, but also by splitting the range of products.

Casting has a Future!

If there is a reasonable economic and political framework, the casting production

Litje ima prihodnost!

Če obstaja razumen gospodarski in politični okvir, ga lahko livarska proizvodnja v nekaj letih doseže in tudi preseže. Potencial za rešitve na področju livarstva še ni izčrpan. Livarne, ki želijo ostati na tržišču, morajo biti nenehno pozorne na svoje marže. Litje je kapitalsko intenzivna proizvodnja in zahteva dosledno naložbeno politiko. Nobena livarna ne more zagotoviti zvečanja proizvodnje in konkurenčnosti brez naložb. Trenutno so naložbe v zmanjšanje stroškov pogosto bolj smiselne kot pa naložbe v zvečanje prometa. Bolje je vlagati v prilagodljivost proizvodnje kot pa v maksimiranje proizvodnje samo ene proizvodne linije. Dobičkonosnost livarne odpira vrata naložbam, pripravljenost delničarjev za ponovne naložbe pa vodi v trajnostno prihodnost podjetja.

Če želi livar uspešno poslovati tudi čez deset let in dobičkonosno livarno predati naslednji generaciji ali pa novemu lastniku, potrebuje vizijo, dobro zasnovo in primerno strategijo. Podjetje lahko nekaj let preživi z izvajanjem ključnih dejavnosti, vendar pa srednje- in dolgoročno ne bo uspešno.

Obstajajo osebe v naši industriji, ki si ustvarjajo izjemno prihodnost. So primeri dobre prakse in pomembno je, da se iz njih učimo. Lahko nas naučijo, kako zaposlene vključiti v podjetje kljub vse večjim in pogostejšim spremembam v delovnem okolju. Sprejemajo odločitve in razloge, zakaj ravna transparentno ter svoje zaposlene vključujejo v procese, ne pa da bi jih zgolj obvestili o svojih odločitvah. Če takšne vodje privabimo v livarstvo, smo utemeljili še en steber v prihodnosti litja kovin.

can and will still grow within the next years. The potential for solutions in castings has not yet been exhausted. Foundries, which want to stay in the market, have to pay consequent attention to their profit margin. Casting is a capital intensive production and requires a continuous investment policy. No foundry can ensure an increase of productivity and competitiveness without investments. Currently, investments in cost reductions are often more meaningful than investments in an increase of turnover. It is more meaningful to invest in production flexibility rather than in the one maximized production of one singular product line. The profitability of the foundry opens the door for investments, the willingness of the shareholder to reinvest leads the way to a sustainable future of the company.

If a foundry entrepreneur still wants to be successful in business in 10 years and to pass over a profitable foundry to the next generation or a new owner, he needs visions, a good concept and a suitable strategy. A business can survive for some years from a repeated bread and butter business, but in a mid- or long-term this will not be successful.

There are people in our industry, who create their future impressively. They are good examples and it is important to learn from them! They can teach how to integrate employees into the company, despite more and more frequent changes in the working environment. They make their decisions and reasons why they act in a certain way transparent and involve their employees into processes rather than just informing them about what was decided. If such managers are attracted by foundry business, another column for the future of metal casting is founded.

Izzivi e-pogonskih komponent – rešitve v livarskih tehnologijah

Challenges E-Drive Components – Solutions in Casting Technology

0 Uvod

Avtomobilska industrija se zaradi pomanjkanja fosilnih goriv in zahtev političnega preoblikovanja energetske politike sooča z velikimi izzivi. Elektromobilnost postaja središče zanimanja in proizvajalce originalne opreme sili v premislek – ali naj tradicionalne pogonske sisteme pustijo za seboj in se podajo na pot usvajanja novih konceptov elektronskih pogonov?

Vse manjša količina virov in vse več pravnih predpisov vodita v porast obratovalnih stroškov za tradicionalne motorje z notranjim izgorevanjem. Dodatno vse večja količina emisij CO₂ po vsem svetu in visoka okoljska osveščenost sprožata debato o skorajšnjem energetskem prehodu, kar se odraža v strogih okoljskih zakonodajah in državnih razvojnih programih. E-mobilnost in elektrifikacija vozil, ki jo spremlja, pridobivata vse več pozornosti.

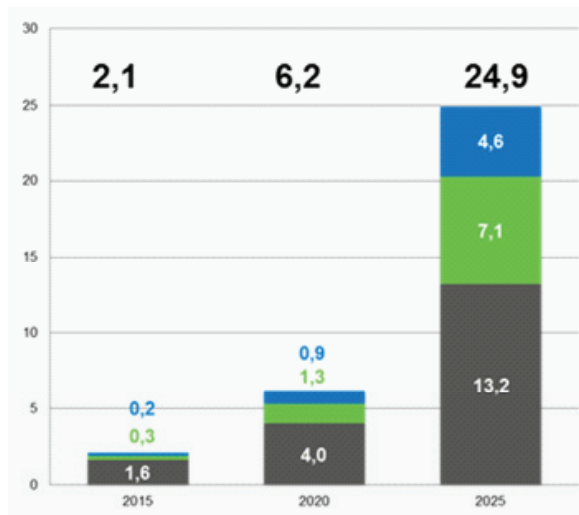
Velja splošno predvidevanje, da bodo električni pogoni srednje- ali dolgoročno zamenjali klasične motorje z notranjim izgorevanjem. Vendar pa do tega trenutka ne obstaja niti dogovor o natančnem datumu, kdaj naj bi se to zgodilo, niti o časovnem obdobju, kako dolgo bodo hibridne različice prisotne na tržišču. Napovedi trenutno predvidevajo pomemben porast tržnega deleža električnih in hibridnih vozil v naslednjih nekaj letih (gl. Slika 1).

0 Introduction

Due to shortage of fossil fuels as well as to requirements of a political turnaround in energy policies the automotive industry is facing great challenges. E-mobility becomes the center of interest and forces the OEMs to rethink – leaving conventional powertrains behind and towards fostering new e-drive concepts.

The progressing shortage of resources as well as the increasing number of legal regulations leads to increasing operating costs for traditional combustion engines. Furthermore globally increasing CO₂ emissions and a high environmental consciousness are driving the discussion about a nearby energy transition, expressed by strict environmental laws and governmental development programs. E-mobility and the accompanying electrification of vehicles continuously gain attention. It is commonly assumed that e-drives will replace traditional combustion engines on a mid- to long-term basis. Up to now, however, there is neither a consensus about the exact date of this incident nor about the period of time on how long hybrid solutions will stay in the market. Forecasts currently anticipate a significant increase of market shares for electric and hybrid vehicles over the next few years (see figure 1).

Due to the electrification of the powertrain the demand for die casting components for the realization of e-drives



Slika 1. Svetovna proizvodnja EV [v mio.]¹

Figure 1. Global EV Production [Mio.]¹

¹ Roland Berger (2016): Global Automotive Supplier Study 2016

Zaradi elektrifikacije pogonskih sistemov se bo povpraševanje po kokilno litih komponentah za izvedbo elektronskih pogonov bistveno zvečalo. Velika sprememba v zgradbi vozil in vgrajene komponente bodo dolgotrajno vplivale na livarsko industrijo: številne tradicionalne kokilno lite komponente klasičnih pogonskih sistemov (motorni blok, glava motorja, ohišje menjalnika itn.) se bodo močno spremenile ali prenehale obstajati, zamenjale pa jih bodo nove lite komponente električnih pogonov. Hkrati bo potreba po lahkih komponentah, ki jo bo spremljal upad teže, v ospredje postavila pomen litih komponent, izdelanih iz neželeznih kovin, kot je aluminij.

Tukaj so izjemno pomembna ohišja električnih motorjev in akumulatorjev. To so izjemno kompleksni elementi zaradi vdelave različnih funkcij (npr. hladilnih kanalov). Prav tako se pričakuje, da se bodo dimenzije litih komponent zvečale, zvečala pa se bo tudi velikost serij, kar bo povzročila vse obsežnejša elektrifikacija. To predstavlja izjemen izziv zlasti za razvoj izdelkov in inženiring.

will increase significantly. The major change of the vehicle structure and of the built-in components will have a lasting effect on the foundry industry: A large number of conventional die casting components of the conventional powertrain (engine block, cylinder head, transmission housing, etc.) will change dramatically or drop completely and will be replaced by the new casting components of electrical drives. At the same time the necessity for lightweight solutions accompanied by the reduction of weight will push the significance of casting components made of non-ferrous metal like aluminum forward.

In this context the housings of e-motors and batteries are of great relevance.

These are highly complex elements due to the integration of additional functions (e.g. cooling channels). Furthermore it is expected that the dimensions of the casting components will expand and that the batch size will increase, both caused by the growing electrification. This represents a major challenge especially for product development and engineering.

Za izpolnitev zahtev glede teh novih litih komponent je nujna vpeljava novih postopkov in metod v verigo ustvarjanja vrednosti. To vpliva zlasti na same postopke ulivanja. Ekonomsko in tehnično primerna izbira postopka ulivanja je odvisna od kompleksnosti litja in zahtevanega števila proizvedenih delov. Zahteve glede lastnosti komponent, zlasti glede tesnjenja (neprepustnosti) in stabilnosti pri trku, so izjemno velike. Poleg tega je treba upoštevati tudi nadaljnje postopke na področjih mehanske obdelave, spajanja in sestavljanja. Zato so potrebne zmožnosti raznolike in zahtevajo celovito oceno celotne procesne verige. Proizvodni koraki, ki sledijo postopku ulivanja, bodo pridobili pomen v verigi ustvarjanja vrednosti.

Izzivi električno gnanih komponent, izdelanih iz aluminijastih litih delov, ki se pojavljajo pri potencialnih postopkih ulivanja, so podrobneje obravnavani v nadaljevanju.

1 Dvodelni obod ohišja električnega motorja

Danes je odstotek električnih motorjev na področju pogonskih sistemov v osebnih vozilih še vedno zelo majhen. Zato je tudi količina proizvedenih delov precej nizka. Trenutno ohišje električnega motorja družbe Nemak za vozilo BMW I3/I8 je zasnovano za proizvodnjo s kokilnim litjem. Kljub temu pa mora litje izpolniti visoke zahteve glede kakovosti. Da bi dosegli specifikacije glede trdnosti komponent in odpornosti proti koroziji, se uporablja livna zlitina AlSi z nizko vsebnostjo železa in bakra. Ohišje je hlajeno v tekočem mediju. Za izvedbo kompleksne konfiguracije, ki obdaja tudi sam motor, je ohišje zasnovano v dveh delih (gl. Sliko 2), da je primerno za proizvodnjo s kokilnim litjem, saj danes ni razpoložljivih ustreznih tehnologij za serijsko proizvodnjo,

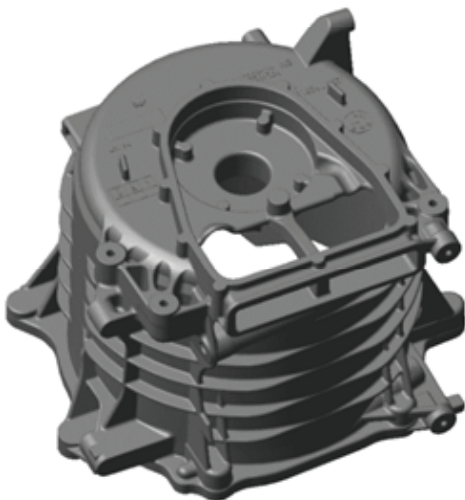
New processes and methods along the value-added chain are necessary to achieve the requirements for these new casting components. Mainly casting processes themselves are affected. Depending on the complexity of the die and the required number of pieces an economically and technically suitable casting process has to be selected. The required properties for the components, especially in the area of tightness (leak proof) and crash-stability, are very high. Apart from this, downstream processes in the area of mechanical treating, joining and assembly have to be considered. Therefore needed competences are diverse and require an overall evaluation of the entire process chain. The manufacturing steps which are downstream of the casting process will gain significance in the value-added chain.

The challenges of e-drive components made of aluminum-casting under consideration of potential casting processes are examined in more detail below.

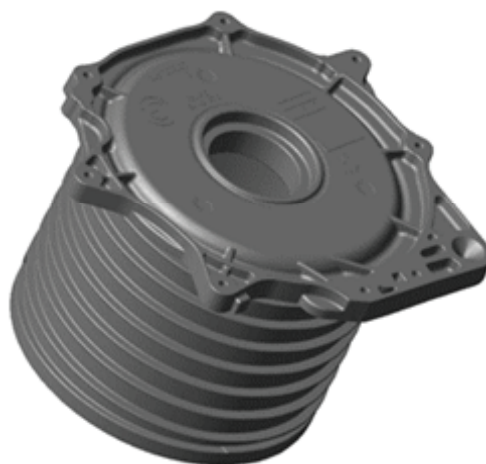
1 Two-part enclosure of e-motor housing

Today, the percentage of e-motors in the powertrain of passenger cars is still a single digit number. Correspondingly, the number of produced parts is rather low. Nemak's current e-motor housing for the BMW I3/I8 is designed for die casting production.

Nevertheless, the casting has to achieve high quality requirements. To achieve the specifications of the components strength and corrosion resistance an AlSi casting alloy with a low content of iron and copper is used. The housing is cooled through a liquid medium. To realize the complex configuration which also encloses the motor itself, the housing is produced as a two part design (see figure 2) in order to



Masa za litje 6,7 kg / Zunanje ohišje
Casting mass 6,7 kg / Outer housing



Masa za litje 4,5 kg / Notranje ohišje
Casting mass 4,5 kg / Inner housing

Slika 2. Dvodelni obod ohišja električnega motorja za vozilo BMW I3/I8

Figure 2. Two-part enclosure of e-motor housing for BMW I3/I8

ki omogoča izvedbo kompletov jeder z zajedami. Danes objavljene tehnike z jedri iz soli ne izpolnjujejo izjemnih zahtev v zvezi z notranjimi jedri za proizvodnjo ohišij električnih motorjev. Proizvodni postopek teh vrst ulitkov se izvaja s popolnoma opremljenim strojem za litje, ki izvaja tudi preizkuse puščanja. Za doseganje potrebnih lastnosti trdnosti so vsi deli ulivani pod vakuumom, nato pa še toplotno obdelani. Za zagotavljanje površine, ki skorajda ni porozna, je treba ohranjati ozko okno procesnih parametrov.

Poleg izpolnjevanja zahtev glede poroznosti je potrebno posebno pozornost nameniti tudi obdelavi delov po mehanski obdelavi s stroji zaradi majhnih dovoljenih odstopanj z vidika dimenzij.

2 Enodelni obod ohišja električnega motorja

Za prihodnja ohišja električnih motorjev je enodelno ohišje poleg standardnega,

enable a suitability for a production in die casting processes, since until today there is no technology available suitable for serial production which is able to realize core packages with undercuts. Nowadays published salt-core techniques don't meet the extraordinary requirements which internal cores for the production of e-motor housings require. The production process of these kinds of castings is realized with a fully equipped casting machine which also has the leakage test integrated. To reach the properties in concern of strength all parts are casted in vacuum and afterwards heat-treatment processed. To obtain a surface with almost no porosity a narrow window of process parameters must be kept.

Apart from compliance with the requirements of porosity, special attention should be paid to the treatment of the parts after the mechanical machining due to the narrow dimensional tolerances.

dvodelnega ohišja, ki se že uporablja pri serijski proizvodnji, realna možnost.

Visoka raven integracije, ki je potrebna tudi pri elektronskih pogonih najnovejše generacije, je zahtevna naloga, pri kateri so postopki kokilnega litja ključnega pomena. En primer je združitev elektronike pogona, električnega motorja in menjalnika v eno ohišje. Zaradi kompleksnosti zasnove, vključno s konfiguracijo hlajenja, sta na voljo dva procesa – nizkotlačno litje (LPDC) ali litje v pesek s peščenim jedrom (CPS® – Core Package System).

Na podlagi trenutnih konceptov je družba Nemak razvila ohišje električnega motorja, s katerim je prikazala, kaj je mogoče izvajati z nizkotlačnim litjem (LPDC) in tudi z litjem v pesek s peščenim jedrom (CPS®) (gl. Sliko 3). Za oceno potenciala obeh postopkov litja so osnovni zasnovi dodali tudi zahtevne spremembe lastnosti litja brez upoštevanja funkcije, npr. akumulacija mase v neugodnih položajih, ki se podaljša v priključke.

Demonstrator vključuje:

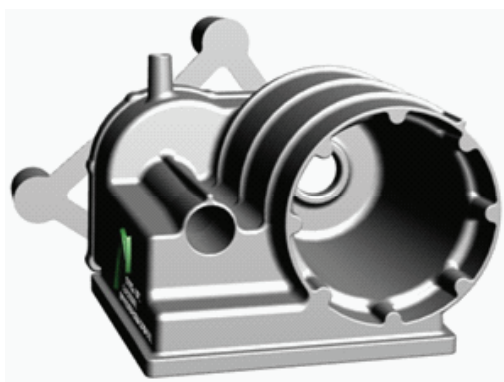
- prostor za stator,
- prostor za pogonsko elektroniko,



2 Single-part enclosure of e-motor housing

For future e-motors housings as single-piece housing apart from the common, two-part design, which is already applied in serial production, will be a realistic option. The high level of integration required also for e-drives of the latest generation is a challenging task which die casting processes are critical to cover. One example is the joining of power electronic, e-motor and transmission together in an integral housing. The complexity of the design including the cooling configuration makes Low Pressure Die Casting (LPDC) and the CPS® - Core Package Sand casting to the processes of choice.

Following current concepts, Nemak has developed an e-motor housing for demonstration reasons which can be casted in LPDC as well as in CPS® (see figure 3). In order to assess the potential of both casting processes additional challenging changes in casting properties in the basic design have been applied with no relevance to the function, e.g. mass accumulations in



Slika 3. Enodelni liti demonstrator ohišja, zasnovan za postopek nizkotlačnega litja (LPDC)

Figure 3. Single-part casted demonstrator housing designed for LPDC

- vmesnike za povezavo z menjalnikom/pogonskim sistemom.

Zahtevapozitivizirajočesoočazomejenim prostorom za montažo, kar zahteva stena debeline manj kot 3 mm, filigranske rebrne strukture (tankostenska ojačitvena rebra in rebra za zapolnjevanje, ki so omejena v največji možni meri.

Izziv predstavlja kompleksno jedro za ulivanje blokov motorjev, ki obdaja stator (gl. Sliko 4).

Za nizkotlačno litje je značilen postopek polnjenja, ki ga je mogoče dobro nadzorovati. Na podlagi preseka, ki ga je treba zapolniti, je mogoče prilagoditi optimalno hitrost polnjenja za omejevanje tvorbe zračnih žepkov in mehurjev v največji možni meri. S pomočjo številnih napajalnikov je mogoče širjenje litine po kalupu v največji možni meri omejiti z optimalnim dovajalnim postopkom in ga tako zavreti v povezavi z zmanjševanjem poroznosti. Ta postopek omogočajo številni hladilni obtoki, ki jih je mogoče nadzorovati, vdeleni v orodja. Ti pomagajo prilagajati toplotni gradient pri ulivanju. Pri zapolnjevanju oblike je izjemno

unfavorable positions extended to the fin junctions.

The demonstrator provides:

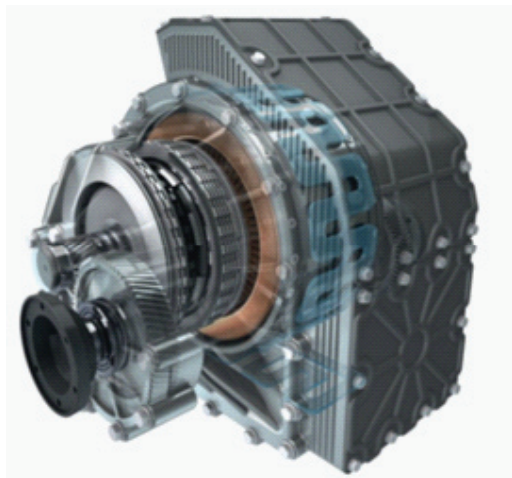
- Space for the stator
- Space for power electronics
- Interfaces to connect the transmission/powertrain

The requirement "Lightweighting" is facing a limited installation space, realized by wall thicknesses below 3 mm, filigree rip structures (thin-walled stiffening ribs) and filling-ribs, which are reduced to a minimum.

A challenge is the complex water jacket around the stator (see figure 4).

Low Pressure Die Casting is characterized by its well controllable filling process. Depending on the cross section to be filled, the optimal filling velocity is adjustable to reduce the generation of oxide and blisters to a minimum. Using multiple riser pipes, wall-thickness accumulations spread in the casting part can be minimized through an optimal feeding process and therefore suppressed due to shrinkage of the porosity. This process is supported by multiple, controllable cooler circuits integrated in the tools. Those help to adjust the thermal gradient in the casting. The temperature of the tool also plays a major role during the form-filling. Especially for parts with thin wall thicknesses in areas far away from the riser pipe a perfect filling is only guaranteed if the tool temperature is high enough. Considering this technical conditions casting components achieve the high requirements to the mechanical properties (such as tensile strength, 0,2% yield strength, ...).

The CPS® process as established method for the production of functional and highly stressable aluminum engine blocks is characterized by the combination of its design freedom, its productivity and the high mechanical properties. A specialty of the



Slika 4. Kompleksna zasnova hladilnega kanala

Figure 4. Complex design of a cooling channel

pomembna tudi temperatura orodja. Zlasti pri delih s tankimi stenami na predelih, ki so zelo oddaljeni od napajalnika, je popolno polnjenje zagotovljeno samo v primeru zadostno visoke temperature orodja. Ob upoštevanju teh tehničnih pogojev lite komponente izpolnjujejo visoke zahteve glede mehanskih lastnosti (kot je natezna trdnost, 0,2-odstotna meja teženja itn.).

Za proces CPS®, ki je uveljavljen kot metoda za proizvodnjo funkcionalnih aluminijastih motornih blokov, ki prenesajo velike napetosti, je značilna kombinacija svobode pri zasnovi, storilnosti in visokomehanskih lastnostih. Posebnost procesa CPS® je izvedba kompleksnih in zelo natančnih geometrij kanala, ki odpira široko področje možnih aplikacij za opisano metodo. Poleg tega je kombinacija procesa CPS® z aditivno proizvodnjo jeder »brez orodja« primerna za hitro proizvodnjo prototipov. Ta tehnika omogoča hitro in učinkovito izdelavo tako različnih dizajnov kot funkcionalne prototipe. Pravzaprav se z litjem prvega dela že prikažejo funkcionalni parametri morebitnega procesa serijske proizvodnje.

Zaradi tesne povezanosti produktnih razvojnih centrov (PDC) družbe Nemak je mogoče zagotoviti hitro izvedbo od prve zasnove do prvega litja prototipov. Največji izziv je bil razvoj postopkov tehnologije litja za izvedbo teh novih komponent s pomočjo procesa CPS®. Začetna točka dela v Dillingenu je bil predhodno omenjeni model CAD demonstratorja. Na tej osnovi je bil razvit koncept postopka litja s pomočjo simulacije polnjenja in strjevanja. Hkrati je bil v produktnem razvojnem centru v Dillingenu zasnovan komplet jeder iz peska za izvedbo prvih ulitkov. Ker je bil ta postopek del notranjega projekta v okviru raziskav in razvoja, ki je še v teku, je bilo jedro izdelano s proizvodnim postopkom 3-D tiskanje. Po eni strani je bilo mogoče

CPS® process is the realization of complex and very fine channel geometries which open a wide field of possible applications for the described method. Furthermore the combination of CPS® with "tool-free" additive manufacturing of cores is suitable for a fast production of prototypes. With this technique different designs can be realized quick and efficient as functional prototypes. Virtually, with casting of the first part functional parameters of a possible serial production process are displayed.

Due to the close link of Nemak's Product Development Centers (PDC) a fast realization from the first design to the first casting of the prototypes could be realized. The main challenge was the development of casting technology processes to realize such new components using CPS®. Starting point for the work in Dillingen was the aforementioned CAD model of the demonstrator. Based on this the conception of the casting process was developed by means of filling and solidification simulation. In parallel the core package was designed to realize first castings in the PDC in Dillingen. As this work was part of a currently running internal R&D project, 3D printing was considered as production process of the cores. On one hand it was possible to increase the knowledge in practical experience with this comparatively young technology to assess its potential for future use, on the other hand a lot of different designs e.g. the water jacket could be produced efficiently in small numbers without any additional costs for tools.

3 Battery housing

An additional application field for casting components in e-driven vehicles are battery housings. Here a competition between several manufacturing processes is

pridobiti znanje na podlagi praktičnih izkušenj s to razmeroma mlado tehnologijo za oceno njenega potenciala za prihodnjo rabo, po drugi pa bi bilo mogoče učinkovito izdelati številne različne dizajne npr. jedro za ulivanje blokov motorjev v majhnem številu brez dodatnih stroškov za orodje.

3 Ohišje akumulatorja

Dodatno področje uporabe litih komponent pri električnih vozilih so ohišja akumulatorjev. Na tem področju je mogoče pričakovati konkurenco med različnimi proizvodnimi procesi. Ni mogoče izključiti niti hibridnih rešitev, ki ulitke združujejo s pločevino in ekstrudirnimi profili. Zaradi vse večjega števila bodo ohišja razvita tudi kot modularne zasnove. Vse težje je podajati zanesljive izjave glede potrebnega števila in dimenzij teh kosov. Zdi se, da trdno drži samo dejstvo, da morajo biti ohišja opremljena z učinkovitim hladilnim sistemom zaradi velikih toplotnih izgub, ki so značilne za polno obremenjene akumulatorje. Glede na uporabo v hibridnih ali električnih vozilih morajo ohišja izpolnjevati različne zahteve. Pri snovanju teh komponent je treba upoštevati odpornost proti koroziji, neprepustnost ter zahteve glede elektromagnetne združljivosti in trkov.

Pri proizvodnji večjega števila ohišij brez kompleksnega hladilnega sistema prednjači visokotlačno litje (HPDC). Omejitve dimenzij ohišij trenutno postavljajo zmogljivosti strojev za litje (najv. 4.500 ton). Modularne zasnove, ki ponujajo možnost različnih moči in dometov, podobno kot pri motorjih z notranjim izgorevanjem, kažejo visok potencial za prihodnjo uporabo (gl. Sliko 5).

Druga možnost so hibridne rešitve. Aluminijasti ulitki v kombinaciji s profili lahko dosegajo mnogo večje dimenzije.

expected. Hybrid solutions which combine castings with metal sheet and extrusion profiles are conceivable. Caused by their increasing size, housings will also be developed as modular concepts. It is getting more and more difficult to make reliable statements regarding the number of pieces needed and dimensions of these parts. Fix seems to be only the fact, that the housings have to be equipped with an efficient cooling system due to the high heat loss caused by the batteries under full load. Depending on the use in hybrids or e-vehicles the housings have to match different demands.

Resistance against corrosion, leak proof, EMC- and crash requirements have to be considered when designing the components.

For high number production of housings without a complex cooling system High Pressure Die Casting (HPDC) is the favored process. The limit for housing dimensions is currently set by the capability of casting machines (max. 4500 T). Modular concepts which offer a possibility to differentiate in power and range, similar to internal combustion engines, show a high potential for future applications (see figure 5).

Hybrid solutions are another option. Aluminum castings are combined with profiles and reach together towards much higher dimensions. The main requirement is to have the joining technology under control.

In case complex cooling channels are required HPDC is not the preferred process anymore. Low Pressure Die Casting (LPDC) makes it possible to cast sand cores and to enclose tubes to optimize cooling characteristics. When casting tubes into aluminum a reproducible junction between casting part and insert is crucial for an efficient cooling. Figure 7 shows a demonstrator which is used for basic investigations. The complete filling of

Poglavitna zahteva je nadzor nad tehnologijo spajanja.

Če so potrebni kompleksni hladilni kanali, visokotlačno litje ni več prva izbira. Nizkotlačno litje (LPDC) omogoča litje v jedra iz peska in dodajanje cevi za optimizacijo lastnosti hlajenja. Pri ulivanju cevi v aluminij je ponovljiv spoj med ulitim delom in vstavkom ključnega pomena za zagotavljanje učinkovitega hlajenja. Na Sliki 7 je prikazan demonstrator, ki se uporablja za osnovne preiskave. Celovito polnjenje oblik in izbira materiala cevi nista edina vidika, ki ju je treba imeti pod nadzorom. Treba je razviti tudi simulacijska orodja za lažjo uporabo teh rešitev v prihodnje.

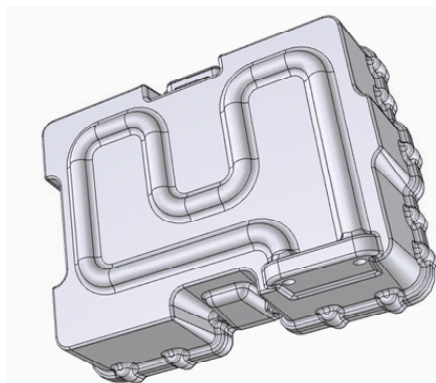
Pri uporabi peščenih jeder je popolna odstranitev peska, podobno kot pri glavah valjev in blokih, precejšen zalogaj.

Kot smo že omenili, se bo v bližnji prihodnosti razvila močna konkurenca med različnimi proizvodnimi procesi z vidika optimizacije stroškov in teže.

the forms and the material selection of the tubes is not the only challenge which has to be controlled. Furthermore the simulation tools have to be developed to facilitate the adaption of such solutions in the future.

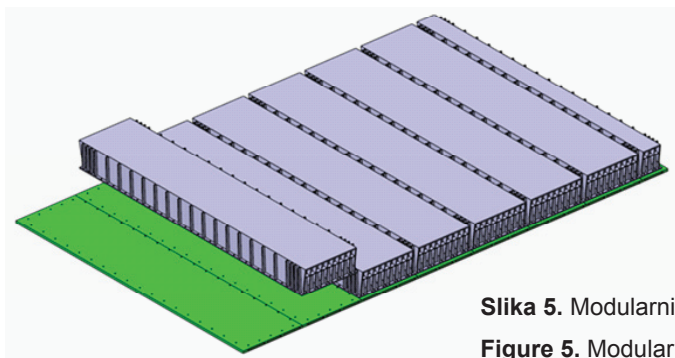
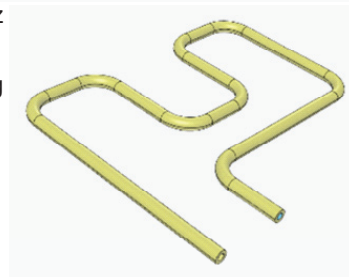
With utilization of sand cores the complete removal of the sand, similar as in cylinder heads and blocks is quite challenging.

As mentioned before, there will be a strong competition between several production processes in the near future, in order to optimize costs and weight.



Slika 6. Demonstrator ohišja akumulatorja z vdelanimi hladilnimi kanali

Figure 6. Demonstrator of battery housing with integrated cooling channels



Slika 5. Modularni koncept akumulatorskega modula

Figure 5. Modular concept of battery module

Zdenka Zovko Brodarac¹, Davor Stanić²

¹Univerza Zagreb, Metalurška fakulteta / University of Zagreb Faculty of Metallurgy, Aleja narodnih heroja 3, 44103 Sisak, Hrvatska / Croatia

²CIMOS-P.P.C. Buzet, d.o.o., Most 24, 52420 Buzet; Politehnika Pula – Tehnično-poslovna fakulteta / Polytechnic Pula - College of applied sciences, Riva 6, 52100 Pula, Hrvatska / Croatia

Vpliv toplotne obdelave na razvoj lastnosti pri zlitini AlSi7Mg(Cu)

Influence of Heat Treatment on AlSi7Mg(Cu) Alloy Properties Development

Izvleček

Zasnova materialov skozi izbor kemijske sestave, termodinamično modeliranje, obdelava s cepljenjem in modificiranjem, pravi razvoju tehnologije za litje, ki mu sledi ustrezna toplotna obdelava, bi lahko izboljšali lastnosti ulitkov. Zaradi zapletenih geometrij ulitkov in značilnosti strank so proizvajalci ulitkov prisiljeni k uvajanju proizvodnih postopkov, ki vključujejo dodatne korake, npr. toplotno obdelavo. Zahteven postopek, ki poteka pri razmeroma visoki temperaturi in je poleg tega še dolgotrajen, učinkuje na mikrostrukturne spremembe materiala ter tako neposredno vpliva na njegove mehanske lastnosti. Pomemben vidik za nove izboljšave in uporabe je poglobitev razumevanja spreminjanja mikrostrukturnih sestavin kot posledice toplotne obdelave in posledično izboljšanih mehanskih lastnosti. Toplotno obdelavo spremljajo povišani stroški in daljši proizvodni časi, ki vodijo do slabše konkurenčnosti proizvajalcev ulitkov. Primerjava pridobljenih lastnosti navadnih ulitkov ter toplotno obdelanih ulitkov razkriva, da so uvedeni proizvodni postopki tesno povezani z denarnimi in časovnimi naložbami v odnosu z doseženimi izboljšavami lastnosti.

Običajne zlitine AlSi7Mg so pogosta izbira za proizvodnjo ulitkov zapletenih geometrij. Snovanje novih kemijskih sestav zlitine AlSi7Mg(Cu) z dodatkom Cu (do 1,435 wt.%) predstavlja izziv na poti k doseganju naprednih mehanskih lastnosti že pri običajnih, torej neobdelanih ulitkih. Širok razpon zapletenih reakcij in intermetalnih faz izhajata iz številnih interakcij legirnih elementov (Si, Mg, Cu) in elementov v sledovih (Fe, Mn). Toplotna obdelava učinkuje na spremembo morfologije železnih faz in izboljšavo mikrostrukturne sestavine ter izboljša kovinsko matriko sekundarnih elementov za legiranje, kot sta Cu in Mg. Natančna določitev vedenja zlitine je bila izvedena z modeliranjem faznega diagrama ravnovesja, sočasne toplotne analize in metalografskih raziskav obeh stanj, torej tako običajnih kot toplotno obdelanih ulitkov. Toplotno obdelane mikrostrukture se spremenijo, npr. prečistijo se, v njih pa poteče enakomerna porazdelitev mikrostruktur, izboljša se kovinska matrika magnezija in bakra ter posledično fragmentacije faz, ki se strdijo nazadnje.

Inovativna kemijska sestava in znano zaporedje strjevanja določenih faz ter njihova morfologija in porazdelitev pa pomenijo znatno izboljšanje nateznih mehanskih lastnosti že pri običajnih ulitkih.

Toplotna obdelava ne vpliva na bistveno izboljšanje mehanskih lastnosti.

Ključne besede: zlitina AlSi7Mg(Cu), baker, mikrostruktura, toplotna obdelava, mehanske lastnosti

Abstract

The design of materials through the selection of the chemical composition, thermodynamic modelling, melt treatment by inoculation and modification, correctly developed casting

technology followed by adequate heat treatment could improve casting properties. Due to castings complex geometry and customer properties, casting manufacturers are forced to adopt production process with additional steps such as heat treatment. Rigorous regime with relatively high temperature and long holding time indicates the microstructural changes in the material, thus indirectly affects the mechanical properties of the material. An important aspect for further improvement and application is to develop a better understanding of the microstructural constituent changes due to performed heat treatment and consequently improved mechanical properties. Heat treatment is accompanied with increased costs and longer time for total production, which cause lower competitiveness of casting producer per produced casting. Comparison of obtained properties in as-cast and heat-treated state reveals an evaluation of applied production procedures, closely connected with investments in money and time vs. obtained properties improvement.

Conventional AlSi7Mg alloy represents a frequent selection for complex geometry castings production. Designing of new chemical composition of AlSi7Mg(Cu) alloy with extra addition of Cu (up to 1.435 wt.%) represents a challenge in order to achieve advanced mechanical properties already in as-cast state. A wide range of complex reactions and intermetallic phases occurs due to numerous alloying (Si, Mg, Cu) and trace elements (Fe, Mn) interaction. Performed heat treatment influences on iron bearing phases' morphology change, refining of microstructural constituents and enrichment of metal matrix on secondary alloying elements such as Cu and Mg. Exact determination of alloy behaviour was performed by modelling of equilibrium phase diagram, simultaneous thermal analysis and metallographic investigations in both states, as-cast and heat-treated, respectively. Heat-treated microstructure experiences the change like refining and uniform distribution of microconstituents, metal matrix enrichment on magnesium and copper, and therefore fragmentation of last solidifying phases'.

Innovated chemical composition and determined solidification sequence of particular phases as well as their morphology and distribution comprehend to significant increase of tensile mechanical properties already in as-cast state. Heat treatment did not influenced on significant improve of mechanical properties.

Keywords: AlSi7Mg(Cu) alloy, copper, microstructure, heat treatment, mechanical properties

1 Uvod

Varnostni in obremenjeni ulitki iz aluminijeve zlitine so izpostavljeni visokim zahtevam na tržišču glede kakovosti materiala in lastnosti. Kakovost aluminijevih ulitkov je v veliki meri odvisna od procesa litja in parametrov, pa tudi kemijske sestave, ki pomembno vpliva na njihove mehanske lastnosti [1]. Zato postaja inovativen razvoj zelo trdnih aluminijevih zlitin obvezna sestavina strukturnih komponent v avtomobilski industriji.

1 Introduction

Safety loaded aluminium alloy castings have been exposed to high market demands related to material and properties quality as a whole. The quality of aluminium components mainly depends from casting process and parameters, as well as from chemical composition, which significantly affects the mechanical properties [1]. Therefore, the innovative development of high strength aluminium alloys becomes

Zaradi odlične livnosti in dobrega razmerja med trdnostjo in težo, zlasti v primeru toplotno obdelanih ulitkov, je tradicionalna zlitina AlSi7Mg pogosta izbira pri izdelavi ulitkov zapletenih geometrij z visokimi varnostnimi zahtevami. Te zlitine so primerne za široko paleto aplikacij, kot so hladilni ventilatorji motorjev, ohišja motorjev, dele, ki se vrtijo z visoko hitrostjo, strukturne letalske komponente, črpalke za gorivo, ohišja kompresorjev itd. [2, 3]. Strjevalno zaporedje se pri hipoevtektičnih zlitinah AlSi7Mg začne z razvojem primarnih aluminijevih dendritov α_{Al} in nastankom dendritne mreže, sledi pa evtektična reakcija ($\alpha_{Al} + \beta_{Si}$) na primarnih zrnih α_{Al} ali samostojno na prisotnem nosilcu železa in/ali drugih nečistočah nukleantov z drugačno kristalografsko usmerjenostjo [4]. Način nastanka evtektika določa obseg in morfologijo evtektične faze, pa tudi delež poroznosti v mikrostrukturi. Glavni in najpomembnejši legirni element pri klasični zlitini AlSi7Mg je Si, za katerega sta značilni visoka pretočnost in zmanjšanje krčenja, sledi pa mu Mg, ki je odgovoren za večjo trdnost zlasti v primeru toplotne obdelave [5–7]. Vsebnost sekundarnih legirnih elementov (Mg, Cu) pomembno vpliva na postopek strjevanja zlitine Al-Si in izboljšanje njenih lastnosti, zlasti trdnosti pri sobni in zvišani temperaturi [8–17].

Dodani magnezij do 0,7 wt.% krepi precipitacijo evtektične faze α_{Al} -Mg₂Si in/ali intermetalnih spojin, bogatih z Mg [17, 18]. Pomembno zvečanje trdnosti pri visoki temperaturi smo dosegli po obdelavi raztopine zaradi aktivacije strjevanja pri precipitaciji z razvojem magnezijevih faz. Večjo trdnost zlitin, ki vsebujejo Mg, pri visoki temperaturi je mogoče pripisati samo precipitaciji sekundarne faze Mg₂Si [17]. Glede na vsebnost Mg se lahko trdnost teženja, natezna trdnost in elongacija zlitin Al-Si-Mg v litem stanju spreminjajo. Trdnost

an imperative for structural components in automotive industry.

Excellent castability and favourable relation between strength and weight, especially in the heat-treated state, indicate conventional AlSi7Mg alloy as a frequent choice for complex geometry castings with high properties demand. These alloys are suitable for a wide range of applications, such as engine cooling fans, crank cases, high speed rotating parts, structural aerospace components, fuel pumps, compressor cases, etc. [2,3]. The solidification sequence of hypoeutectic AlSi7Mg alloys begins with development of primary aluminum dendrites α_{Al} and formation of dendritic network, followed by eutectic reaction ($\alpha_{Al} + \beta_{Si}$) on the primary grains α_{Al} or independently on present iron bearing and/or other impurities nucleants with different crystallographic orientation [4]. The way of eutectic occurs determines the amount and morphology of eutectic phase, and also the porosity ratio in the microstructure. The primary and most important alloying element in conventional AlSi7Mg alloy is Si, which is characterized by high fluidity and reduction in shrinkage, followed by Mg responsible for strength increase especially in heat-treated state [5-7]. Secondary alloying elements content (Mg, Cu) significantly influences on solidification manner of an Al-Si alloy and their properties improvement, especially in strength at room and elevated temperatures [8-17].

Magnesium addition up to 0.7 wt. % has a strengthening effect by precipitation of α_{Al} -Mg₂Si eutectic phase and/or Mg-rich intermetallics [17, 18]. The significant increase in strength at high temperature was achieved after solution treatment due to activating precipitation hardening through evolution of Mg bearing phases. The increase in high temperature strength of the Mg containing alloys can only be

teženja se povečuje ob večji vsebnosti Mg. Nasprotno pa večje fazno razmerje Mg_2Si nima bistvenega vpliva na pridobljene vrednosti z vidika trdnosti. Obratno pa se elongacija z zvečanjem razmerja Mg in Mg_2Si zmanjša [11].

Tudi Cu se pogosto uporablja kot legirni element za večjo trdnost litih zlitih, zlasti pri toplotni obdelavi. Pri zlitinah Al-Si je Cu dodan v razmerju med 1,5–3,5 wt.% in zato ustvarja intermetalno fazo Al_2Cu in/ali druge bakrove intermetalne faze, kot je Al_2CuMg [12–14]. Baker povečuje obseg strjevanja zlitine in omogoča boljše pogoje za nastanek poroznosti [19, 20].

Literatura navaja številne raziskave vpliva legirnih elementov na lastnosti zlitine AlSi7Mg [21–23]. Soodvisnost modeliranja faznega diagrama ravnovesja, rezultatov toplotne analize in prepoznavanje mikrosestavin omogočajo določitev termodinamične stabilnosti zlitine in njenega vedenja v litem stanju ter po toplotni obdelavi [24]. Klasična zlitina AlSi7Mg, ki je skladna s številnimi standardi (EN 1706, IDM 4234) [25, 26], je bila predhodno predmet raziskave [27, 28]. Kemijska sestava, ki jo zahteva standard, je prikazana v Preglednici 1.

Standard avtomobilskih proizvajalcev [26] omejuje dovoljeno vsebnost določenih elementov, kot je magnezij, povečuje pa dovoljeno vsebnost železa, faze katerega pri ustreznih morfologijah pomenijo večjo trdnost aluminijevih zlitin. Zahtevane mehanske lastnosti vzorcev iz zlitine

atributed to the precipitation of secondary phase Mg_2Si [17]. The yield strength, tensile strength and elongation of the as-cast Al-Si-Mg alloys can vary with the Mg content. The yield strength increases with increasing of Mg content. In contrary, an increase of Mg_2Si phase ratio does not affect significantly obtained strength values. Conversely, the elongation was decreased with an increase of Mg and Mg_2Si ratio [11].

Also, Cu is commonly used as an alloying element to increase the strength of cast alloys, especially when heat treatment is applied. In Al-Si alloys, Cu is usually added in levels between 1.5 – 3.5 wt.% thus forming the intermetallic phase Al_2Cu and/or other Cu-bearing intermetallics like Al_2CuMg [12–14]. Copper increases the solidification range of an alloy, and facilitates the condition of porosity formation [19, 20].

Literature survey reveals a number of investigations related to the influence of alloying elements on the AlSi7Mg alloy properties [21–23]. Correlation of equilibrium phase diagram modelling, thermal analysis results and microconstituents identification enables determination of thermodynamic stability of an alloy and its behaviour in as-cast and heat-treated state [24]. The conventional AlSi7Mg alloy, corresponded to the numerous standards (EN 1706, IDM 4234) [25, 26], has been investigated previously [27, 28]. Chemical composition requested by standard is presented in Table 1.

Preglednica 1. Kemijska sestava zlitine AlSi7Mg [25]

Table 1. Chemical composition of AlSi7Mg alloy [25]

Standardna oznaka / Standard mark	wt. %	Kemijski element / Chemical element									
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Ni	Pb	Bal.
EN AC 42000	min.	6,5				0,20		0,05			
	maks.	7,5	0,55	0,20	0,35	0,65	0,15	0,25	0,15	0,15	0,15

AlSi7Mg v litem stanju so prikazane v Preglednici 2 [25].

Preglednica 2. Mehanske lastnosti kokilno litih vzorcev iz zlitine AlSi7Mg v litem stanju [25]

Table 2. Mechanical properties of AlSi7Mg alloy of die cast samples in as-cast state [25]

	R _{p0.2} [MPa]	R _m [MPa]	A50 [%]
EN AC 42000	90	170	2,5

Namen te raziskave je bil določiti vpliv toplotne obdelave na spreminjajoče lastnosti zlitine AlSi7Mg(Cu). Vedenje zlitine in mehanske lastnosti so bili določeni s predhodno določitvijo strjevalnega zaporedja s pomočjo termodinamičnega modeliranja in sočasne toplotne analize. Učinek toplotne obdelave je bil ocenjen na podlagi razvoja mikrostrukture in preiskav mehanskih lastnosti ter njihovi primerjavi s podatki, pridobljenimi v litem stanju.

2 Poskusni postopek

Lastnosti na novo zasnovane zlitine AlSi7Mg(Cu) so bile opredeljene v litem stanju in po toplotni obdelavi. Raziskava zajema razvoj faznega diagrama ravnesja, sočasno toplotno analizo ter analizo mikrostrukturnih in mehanskih lastnosti.

Modeliranje faznega diagrama ravnesja smo opravili s programom ThermoCalc (TCW 5.0). Talino AlSi7Mg(Cu) smo pripravili v indukcijski peči ABB IMTK 2000, obdelava taline pa zajema cepljenje s predzlitino AlTi5B in modifikacijo s predzlitino AlSr10. Analizo kemijske sestave smo opravili z optičnim spektrometrom ARL-3460.

Talino novo zasnovane zlitine AlSi7Mg(Cu) smo pripravili v indukcijski peči ABB IMTK 2000 z ingoti in povratnim razmerjem dovajanega materiala 1:1. Po

Automotive producers standard [26] narrows allowed content for particular elements such as Mg, while raising the allowed content of Fe, whose phases in corresponding morphologies comprehend to the strength increase of aluminum alloys. Required mechanical properties of samples of AlSi7Mg alloy in as-cast state are indicated in Table 2 [25].

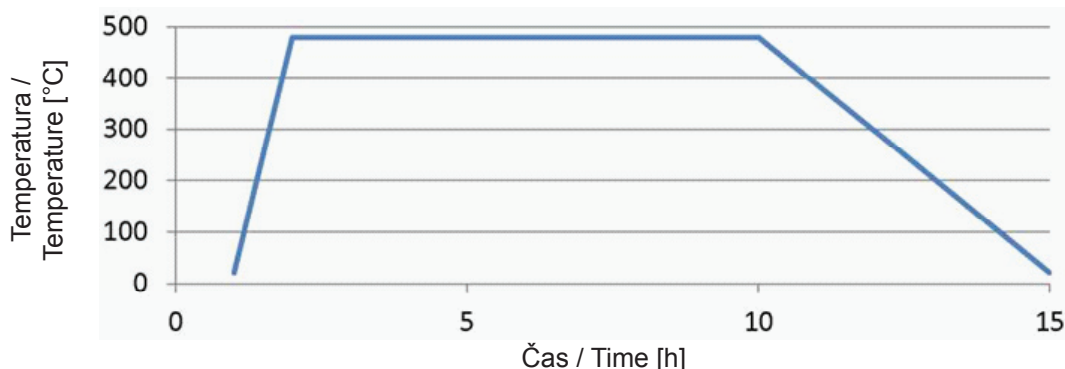
The aim of this investigation was to determine the heat treatment influence on innovate AlSi7Mg(Cu) alloy properties. Alloy behaviour and mechanical properties were determined by preliminary solidification sequence determination using thermodynamic modelling and simultaneous thermal analysis. Heat treatment effect was evaluated on microstructure development and mechanical features investigation and comparison with those obtained in as-cast state.

2 Experimental

Characterization of newly designed AlSi7Mg(Cu) alloy has been performed in as-cast and heat-treated state. Investigation comprehends the development of an equilibrium phase diagram, simultaneous thermal analysis, microstructural, and mechanical properties analysis.

The modelling of an equilibrium phase diagram has been performed using ThermoCalc (TCW 5.0) program. The melt of AlSi7Mg(Cu) was prepared in an induction furnace ABB IMTK 2000 Melt treatment comprehends inoculation with AlTi5B and modification with AlSr10 master alloy. Chemical composition analysis was obtained on an optical spectrometer ARL-3460.

Newly designed AlSi7Mg(Cu) alloy melt was prepared in an induction furnace ABB IMTK 2000 with the ingot and return ratio



Slika 1. Režim toplotne obdelave

Figure 1. Heat treatment regime

topljenju pri temperaturi 770 ± 5 °C smo talino razplinili z nitrogenom (N₂) s pomočjo opreme MTS 1500 – Foseco. Talino smo obdelali s cepljenjem s predzlitino AlTi5B in modifikacijo s predzlitino AlSr10. Analizo kemijske sestave smo opravili z optičnim spektrometrom ARL-3460.

Toplotna obdelava je potekala po naslednjem postopku: segrevanje od sobne temperature do temperature žarjenja 480 °C – 2 uri, ohranjanje končne temperature žarjenja – 8 ur, sledilo je zračno hlajenje, kot je prikazano na Sliki 1.

Vzorci za metalografsko raziskavo smo pripravili s standardnim metalografskim postopkom za pripravo z mletjem in poliranjem, sledilo pa je jedkanje v 0,5-odstotni fluorovodikovi kislini. Metalografske raziskave zajemajo metalografske raziskave (Olympus GX 51) in mikrostrukturne raziskave (vrstični elektronski mikroskop Tescan Vega TS 5136 MM).

Sočasno toplotno analizo z metodo diferencialne toplotne analize smo opravili z izvajanjem segrevanja in hlajenja pri hitrosti 10 K/min z opremo Netzsch STA 409 C/CD, da bi določili pomembne temperaturne vrednosti pri faznih transformacijah in precipitaciji.

in charge material 1: 1. After melting at a temperature of 770 ± 5 °C, the degassing of the melt was performed with the nitrogen (N₂) using a MTS 1500 - Foseco equipment. Melt treatment was performed through inoculation with AlTi5B master alloys and modification with AlSr10 master alloy. Chemical composition analysis was performed on an optical emission spectrometer ARL-3460.

Heat treatment was performed following the regime: heating, starting from room temperature to the annealing temperature of 480° C for 2 hours, and the retention of the final annealing temperature during 8h, followed by air cooling, as shown in Figure 1.

Samples for metallographic investigation were prepared by standard metallographic preparation procedure by grinding and polishing, followed by etching in 0.5% HF. Metallographic investigations comprehends metallographic investigations (Olympus GX 51) and microstructural investigations (scanning electron microscopes Tescan Vega TS 5136 MM).

A simultaneous thermal analysis by differential thermal analysis method was performed by heating and cooling rates

Raziskave mehanskih nateznih lastnosti smo opravili na preizkusni napravi MTS 810 pri sobni temperaturi $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ skladno s standardom EN 10002-1: 1998 [29].

3 Rezultati in razprava

Novo kemijsko spojino zlitine AlSi7Mg(Cu) z dodatkom bakra smo zasnovali in primerjali s predhodno raziskano klasično zlitino AlSi7Mg [28], kot je prikazano v Preglednici 3.

Novo zasnovana zlitina je skladna s standardom EN 42000 AC za zlitino AlSi7Mg v povezavi z vsebnostjo osnovnih legiranih elementov (Si in Mg) ter elementov v sledih, kot sta Fe in Mn. Odklon je bil uveden z bistvenim zvečanjem vsebnosti Cu.

Modeliranje novo zasnovane zlitine AlSi7Mg(Cu) s programom ThermoCalc (TCW 5.0) je potekalo skladno s predhodno izračunanim faznim diagramom ravnovesja [29]. Interakcija legiranih elementov in elementov v sledovih odkriva širok nabor intermetalnih faz, ki jim sledi izračun strjevalnega zaporedja zlitine AlSi7Mg(Cu). Izračunano strjevalno zaporedje ravnovesja zlitine AlSi7Mg(Cu) je prikazano v Preglednici 4.

Mikrostrukturo zlitine AlSi7Mg(Cu) v litem stanju (F) in po toplotni obdelavi (T) smo raziskali s pomočjo svetlobne mikroskopije, kot je prikazano na Sliki 2.

Manjša povečava (100-kratna) kaže enakomerno porazdeljenost primarne dendritne mreže z enakomerno

of 10 K/min at Netzsch STA 409 C / CD equipment in order to reveal significant temperature of phase transformations and precipitation.

Mechanical tensile properties investigations were performed on testing machine MTS 810, at room temperature $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ in accordance to EN 10002-1: 1998 [29].

3 Results and Discussion

New chemical composition of AlSi7Mg(Cu) alloy with extra addition of copper has been designed and compared with previously investigated conventional AlSi7Mg alloy [28], as shown in Table 3.

The newly designed alloy complies with the EN 42000 AC standard for AlSi7Mg alloy in relation to the content of the base alloying elements (Si and Mg), and trace elements such as Fe and Mn. Deviation has been implemented with significant increase in Cu content.

Modelling of newly designed AlSi7Mg(Cu) alloy by ThermoCalc (TCW 5.0) program resulted with previously calculated equilibrium phase diagram [29]. The interaction of alloying and trace elements reveals a wide range of intermetallic phases, followed with calculation of solidification sequence of AlSi7Mg(Cu). Calculated equilibrium solidification sequence of AlSi7Mg(Cu) alloy is shown in Table 4.

Microstructure of AlSi7Mg(Cu) alloy in as-cast (F) and heat-treated (T) state was

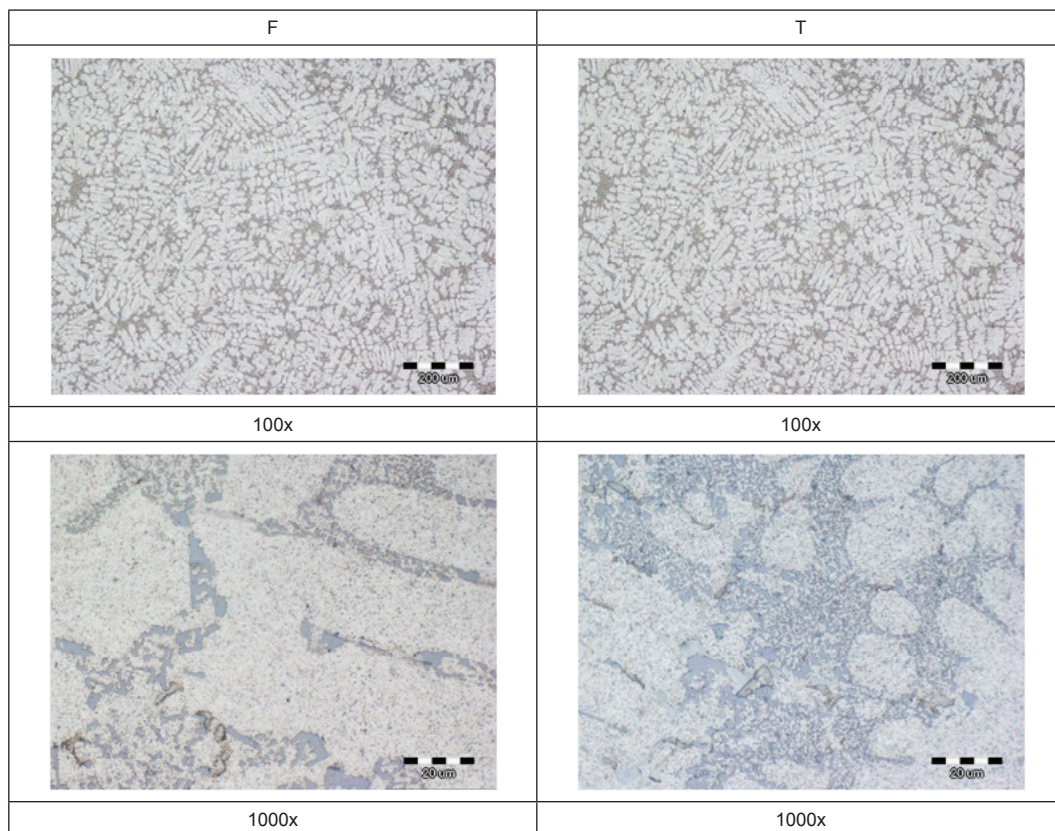
Preglednica 3. Kemijska sestava zlitin AlSi7Mg/AlSi7Mg(Cu)

Table 3. The chemical compositions of AlSi7Mg / AlSi7Mg(Cu) alloys

Element, wt. %	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Sr
AlSi7Mg	7,008	0,101	0,130	0,010	0,320	0,139	0,0121
AlSi7Mg(Cu)	7,527	0,235	1,435	0,076	0,348	0,147	0,0223

Preglednica 4. Izračunano strjevalno zaporedje ravnovesja zlitine AlSi7Mg(Cu)**Table 4.** Calculated equilibrium solidification sequence of AlSi7Mg(Cu) alloy

Opis reakcije	Reaction description	Reakcija
Temperatura likidusa, T_l	Liquidus temperature, T_l	$L \rightarrow L_1 + \alpha\text{Al}$
Evtektična temperatura, T_e	Eutectic temperature, T_e	$L_1 + \alpha_{\text{Al}} \rightarrow L_2 + \alpha_{\text{Al}} + (\alpha_{\text{Al}} + \beta_{\text{Si}})$
Temperatura pri precipitaciji sekundarnih intermetalnih faz, T_1	Precipitation of secondary intermetallic phases temperature, T_1	$L_2 + (\alpha_{\text{Al}} + \beta_{\text{Si}}) \rightarrow L_3 + (\alpha_{\text{Al}} + \beta_{\text{Si}}) + \text{Al}_{15}(\text{FeMn})_3\text{Si}_2$
Temperatura pri precipitaciji sekundarnih intermetalnih faz, T_2	Precipitation of secondary intermetallic phases temperature, T_2	$L_3 \rightarrow L_4 + \text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$
Temperatura pri precipitaciji sekundarnih intermetalnih faz, T_3	Precipitation of secondary intermetallic phases temperature, T_3	$L_4 + \text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6 \rightarrow L_5 + \text{Al}_8\text{FeMg}_3\text{Si}_6$
Temperatura pri precipitaciji sekundarnih intermetalnih faz, T_4	Precipitation of secondary intermetallic phases temperature, T_4	$L_5 \rightarrow L_6 + \text{Al}_7\text{Cu}_2\text{M}$
Temperatura pri precipitaciji sekundarnih intermetalnih faz, Temperatura solidusa, T_s	Precipitation of secondary intermetallic phases temperature, Solidus temperature, T_s	$L_6 \rightarrow \text{Al}_2\text{Cu}$

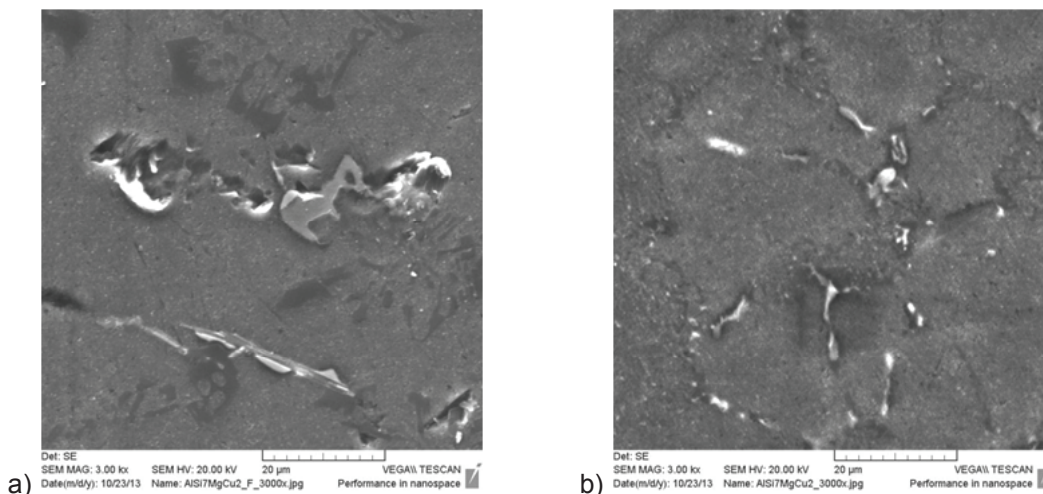
Slika 2. Mikrografi zlitine AlSi7Mg(Cu), pridobljeni s svetlobno mikroskopijo**Figure 2.** Micrographs of AlSi7MG(Cu) alloy obtained by light microscopy

porazdeljenimi interdendritnimi območji v obeh stanjih, litem (F) in po toplotni obdelavi (F). Večja povečava kaže bolj grobe in prekinjene veje dendrita, posejane z intermetalnimi fazami nosilcev železa iglaste oblike (Al_5SiFe) in hrapave sekundarne intermetalne faze na mejah zrn v litem stanju (F). Največja povečava (1.000-kratna) kaže prisotnost nespremenjenih evtektov (mešana vlakna in lamelarna oblika). Po toplotni obdelavi (T) se kaže enakomerna razporejenost vlaknastih oblik glavnega evtekt ($\alpha_{\text{Al}} + \beta_{\text{Si}}$). Zadnje faze strjevanja so bile opažene na mejah zrn. Njihova oblika in barva kaže sekundarne evtektične faze $\alpha_{\text{Al}} - \text{Al}_2\text{Cu}$ (delci in klastri ploščic) ter $\alpha_{\text{Al}} - \text{Mg}_2\text{Si}$ (tanki razvejani črni delci) v litem stanju (F). Stanje po toplotni obdelavi (F) kaže dobro razdelane sekundarne intermetalne faze na mejah zrn.

Primerjavaporazdelitvemikrostrukturnih sestavnih delov in velikosti, zaznane z vrstičnimi elektronskimi mikroskopi, pri največji povečavi je prikazana na Sliki 3.

investigated using light microscopy, as shown in Figure 2.

A smaller magnification (100x) reveals uniform distribution of primary dendritic network with evenly distributed interdendritic areas in both states, as-cast (F) and heat-treated (F), respectively. Higher magnification indicates rougher and broken dendritic branches dotted with iron-bearing intermetallic phases with needlelike morphology, (Al_5SiFe), and coarse secondary intermetallic phases at grain boundaries in as-cast state (F). The highest magnification (1000x) indicates the presence of undermodified eutectic (mixed fiber and lamella morphology). Heat-treated state (T) indicated uniformly distributed fiber morphology of main eutectic ($\alpha_{\text{Al}} + \beta_{\text{Si}}$). Last solidifying phases have been noticed at grain boundaries. Their morphology and colour reveals secondary eutectic phases $\alpha_{\text{Al}} - \text{Al}_2\text{Cu}$ (platelets particles and clusters) and $\alpha_{\text{Al}} - \text{Mg}_2\text{Si}$ (thin ramified black particles) in as-cast (F) state. Heat-



Slika 3. Vrstični elektronski posnetki zlitine AlSi7Mg(Cu) v a) litem stanju in b) po toplotni obdelavi (F)

Figure 3. Scanning electron images of AlSi7Mg(Cu) alloy in a) as-cast and b) heat-treated state (F)

Toplotna obdelava pozitivno vpliva na enakomerno porazdelitev in izboljšavo intermetalnih faz. Morfološko škodljive intermetalne faze, obogatene v železu in znane kot faza P (Al_5SiFe), pri tovrstni obliki niso več prisotne. Po toplotni obdelavi so odpravljeni tudi klastri Al_2Cu . Opazili smo obogateno kovinsko matriko (α_{Al}) pri Cu in Mg, kot je prikazano v Preglednici 5.

Preglednica 5. Kemijska sestava kovinske matrike zlitine AlSi7Mg(Cu)

Table 5. Chemical composition of AlSi7Mg(Cu) alloy metal matrix

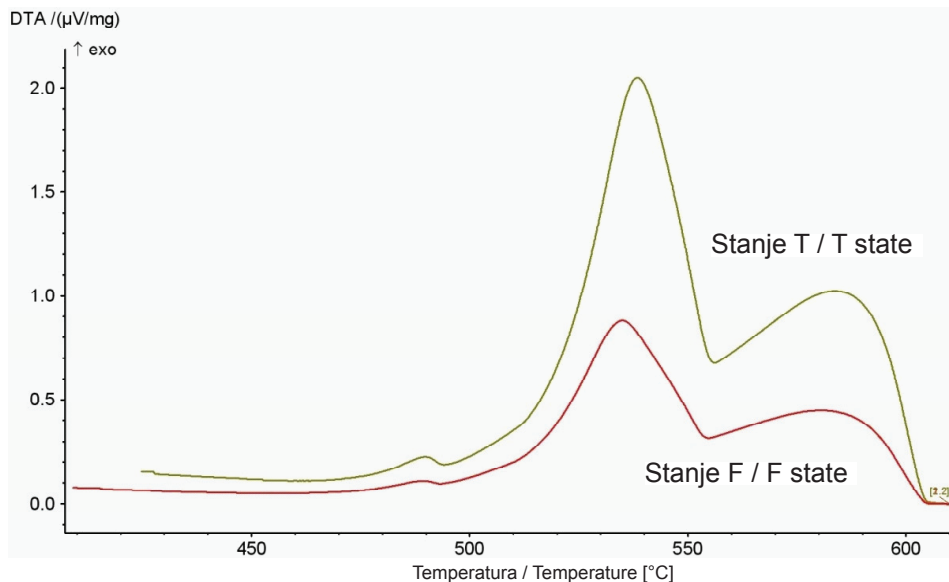
Kemijska sestava / Chemical composition, wt. %	Al	Si	Cu	Mg
AlSi7Mg(Cu)-F	96,02	0,52	1,49	1,93
AlSi7Mg(Cu)-T	96,06	-	2,55	1,40

treated state (F) reveals fine fragmented secondary intermetallic phases' at the grain boundaries.

Comparison of microstructural constituents' distribution and size revealed with scanning electron images at higher magnification is given in Figure 3.

Heat treatment has a positive influence on uniform distribution and refining of intermetallic phases'. Morphological detrimental intermetallic phases enriched in iron known as β phase (Al_5SiFe) are no longer present in that particular morphology. Also, Al_2Cu clusters have been resolved in heat-treated state. Enrichment of metal matrix (α_{Al}) in Cu and Mg has been noticed as shown in table 5.

Simultaneous thermal analysis enabled identification of significant thermodynamic changes in AlSi7Mg(Cu) alloy during solidification process. Comparison of the



Slika 4. Primerjava hladilnih krivulj zlitine AlSi7Mg(Cu) pri sočasni toplotni analizi v litem stanju in po toplotni obdelavi

Figure 4. Comparison of simultaneous thermal analysis cooling curves of AlSi7Mg(Cu) alloy in as-cast and heat-treated state

Sočasna toplotna analiza je omogočila prepoznavanje pomembnih toplotnih sprememb pri zlitini AlSi7Mg(Cu) med procesom strjevanja. Primerjava oblike krivulje hlajenja v litem stanju in po toplotni obdelavi je pokazala podobno vedenje, kot je prikazano na Sliki 4.

Krivulji segrevanja in hlajenja zlitine AlSi7Mg(Cu) v obeh stanjih sta pokazali doseganje istih temperatur pri faznih transformacijah in precipitaciji, kot je prikazano v Preglednici 6. Primerjava modeliranja faznega diagrama ravnovesja se kaže v sočasni toplotni analizi, mikrostruktura raziskava pa kaže strjevalno zaporedje zlitine AlSi7Mg(Cu).

Poleg dendritske mreže je treba najprej oceniti železove iglaste formacije Al_5SiFe in/ali kompleksno formacijo, podobno kitajskim pismenkam, $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Cu})_3\text{Si}_2$. Ustrezno razmerje precipitata Cu in Mg v kovinski matrici, medtem ko masa kohezijsko tvori kompleksne evtektične klastre $\text{Al}_8\text{Mg}_3(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Si}_6$ in faze $\text{Al}_5\text{Mg}_8\text{Si}_6\text{Cu}_2$. Strjevanje se zaključi s precipitacijo

cooling curves shape for as-cast and heat-treated state revealed similar behaviour as shown in Figure 4.

The heating and cooling curves of AlSi7Mg(Cu) alloy in both states resulted in establishing the exact temperatures of phase transformations and precipitation, as shown in Table 6. Comparison of equilibrium phase diagram modelling results with simultaneous thermal analysis and microstructural investigations indicates the solidification sequence of AlSi7Mg(Cu) alloy.

Beside dendrite network, first to evaluate is iron-based needlelike Al_5SiFe and/or complex Chinese script formation $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Cu})_3\text{Si}_2$. Appropriate ratio of Cu and Mg precipitate in a metal matrix, while the bulk cohesively forms complex eutectic clusters of $\text{Al}_8\text{Mg}_3(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Si}_6$ and $\text{Al}_5\text{Mg}_8\text{Si}_6\text{Cu}_2$ phase. Solidification ends with secondary eutectic phase precipitations $\alpha_{\text{Al}} + \text{Mg}_2\text{Si}$ and $\alpha_{\text{Al}} + \text{Al}_2\text{Cu}$. Heat-treated state reveals higher significant temperatures of phase transformation and precipitation.

Preglednica 6. Pomembne temperaturne vrednosti pri fazni transformaciji in precipitaciji zlitine AlSi7Mg(Cu)

Table 6. Significant temperatures of phase transformation and precipitation of AlSi7Mg(Cu) alloy

Opis reakcije / Reaction description	Reakcija / Reaction	Stanje T/F T / F state [°C]	Stanje T/T, T / T state [°C]
Temperatura likvidusa, T _l / Liquidus temperature, T _l	$\text{L} \rightarrow \text{L}_1 + \alpha_{\text{Al}} + \text{Al}_5\text{SiFe} + \text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Cu})_3\text{Si}_2$	603,7	603,7
Evtektična temperatura, T _e / Eutectic temperature, T _e	$\text{L}_1 + \alpha_{\text{Al}} \rightarrow \text{L}_2 + \alpha_{\text{Al}} + (\alpha_{\text{Al}} + \beta_{\text{Si}})$	550,5	554,6
Temperatura pri precipitaciji sekundarnih intermetalnih faz, T ₁ / Precipitation of secondary intermetallic phases temperature, T ₁	$\text{L}_2 \rightarrow \text{L}_3 + \text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6 + \text{Al}_8\text{Mg}_3(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Si}_6$	527,8	531,6
Temperatura pri precipitaciji sekundarnih intermetalnih faz, T ₂ / Precipitation of secondary intermetallic phases temperature, T ₂	$\text{L}_3 \rightarrow \text{L}_4 + \alpha_{\text{Al}} + \text{Mg}_2\text{Si}$	494,0	493,6
Temperatura pri precipitaciji sekundarnih intermetalnih faz, temperatura solidusa, T _s / Precipitation of secondary intermetallic phases temperature, Solidus temperature, T _s	$\text{L}_4 \rightarrow \text{L}_5 + \alpha_{\text{Al}} + \text{Al}_2\text{Cu}$	467,9	534,1

sekundarne evtektične faze $\alpha_{Al} + Mg_2Si$ in $\alpha_{Al} + Al_2Cu$. Toplotna obdelava razkriva pomembnejše temperaturne vrednosti pri fazni transformaciji in precipitaciji.

Raziskali smo tudi natezne mehanske lastnosti zlitine AlSi7Mg(Cu). Primerjava lastnosti nove zlitine AlSi7Mg(Cu) tako v litem stanju (F) [28, 30] in po toplotni obdelavi (T) ter predhodno raziskane klasične zlitine AlSi7Mg [27] je prikazana v Preglednici 6.

Opazili smo pomembno zvečanje meje teženja in natezne trdnosti nove zlitine AlSi7Mg(Cu) v litem stanju, kar je mogoče pripisati kompleksnim interakcijam faze $Al_{15}(Fe,Mn,Cu)_3Si_2$, spremenjenem dodatku Cu, pa tudi formaciji gostih faz $Al_5Cu_2Mg_8Si_6$ in $Al_8Mg_3(Fe,Mn)Si_6$. Elongacija v litem stanju se je bistveno zmanjšala. Opazili smo slabšo trdnost teženja in natezno trdnost po toplotni obdelavi. Edina prednost toplotne obdelave je bistveno večja elongacija A_{50} .

4 Sklepi

Zasnova inovativne zlitine AlSi7Mg(Cu) odkriva širok razpon zapletenih reakcij in možnih intermetalnih faz zaradi interakcije legirnih elementov in elementov v sledovih. Razvoj mikrostrukture in določitev strjevalnega zaporedja omogoča opredelitev nove zlitine in njenih lastnosti tako v litem stanju kot po toplotni obdelavi. Njihove interakcije pri procesu strjevanja smo določili z modeliranjem faznega diagrama ravnovesja, sočasno toplotno analizo ter raziskavo mikrostrukturnih in mehanskih lastnosti. Dodatek Cu (do 1,435 wt.%) kot sekundarni legirni element sproža dodatno interakcijo s Fe, Mn in Mg. Določitev strjevalnega zaporedja zlitine AlSi7Mg(Cu) z natančno določenimi pomembnimi temperaturnimi vrednostmi fazne transformacije in precipitacije ter korelacija z zaznano obliko in velikostjo

Tensile mechanical properties AlSi7Mg(Cu) alloy has been also investigated. Comparison of those obtained for new one AlSi7Mg(Cu) in both as-cast (F) [28, 30] and heat-treated (T) state and previously investigated conventional AlSi7Mg [27] is shown in Table 6.

Preglednica 6. Natezne mehanske lastnosti zlitine AlSi7Mg(Cu) v litem stanju

Table 6. Tensile mechanical properties of AlSi7Mg(Cu) alloy in as-cast state

Zlitina / Alloy	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{50} [%]
AlSi7Mg	120	165	6,3
AlSi7Mg(Cu)-F	143	234	3,1
AlSi7Mg(Cu)-T	100	221	6,5

Significant increase in yield strength and tensile strength of innovative AlSi7Mg(Cu) alloy in as-cast state has been noticed, which can be attributed to the complex interactions of $Al_{15}(Fe,Mn,Cu)_3Si_2$ phase modified with Cu addition as well as to the formation of compacted $Al_5Cu_2Mg_8Si_6$ and $Al_8Mg_3(Fe,Mn)Si_6$ phases'. Elongation in as-cast state has been significantly decreased. Lowering the yield and tensile strength in heat-treated state was noticed. The only benefit of heat treatment was indicated in significant increase of elongation A_{50} .

4 Conclusion

Designing of innovative AlSi7Mg(Cu) alloy reveals a wide range of complex reactions and possible intermetallic phases due to the interaction of alloying and trace elements. Evolution of microstructure and determination of solidification sequence enables the characterization of new alloy and its properties in both states as-cast and heat-treated. Determination of their

mikrostrukturnih sestavin omogoča predvidevanje njenega vedenja.

Širok nabor ugodnih intermetalnih faz omogoča pregled možnih povezav, vključno z razvojem nateznih mehanskih lastnosti že v litem stanju. Primerjava trdnosti teženja in natezne trdnosti pri pogosto uporabljeni zlitini AlSi7Mg kaže bistveno zvečanje preiskovanih lastnosti za inovativno kemijsko sestavo zlitine AlSi7Mg(Cu) v litem stanju, medtem ko toplotna obdelava ni bistveno vplivala na izboljšave.

5 Zahvala

Raziskave so bile opravljene v sodelovanju z družbami CIMOS P.P.C. Buzet, d.o.o., Buzet, Hrvaška. Raziskave smo opravili v okviru preiskovane teme »Design and Characterization of Innovative Engineering Alloys« (Zasnova in opredelitev inovativnih tehničnih litin), oznaka: TP167, ki jo je finančno podprla Univerza v Zagrebu v okviru zagotavljanja finančne podpore raziskavam.

interactions in solidification process was performed by modelling of equilibrium phase diagram, simultaneous thermal analysis, microstructural and mechanical investigations. An extra addition of Cu (up to 1,435 wt.%) as a secondary alloying element initiates additional interaction with Fe, Mn and Mg. Determination of AlSi7Mg(Cu) alloy solidification sequence with exact significant temperatures of phase transformation and precipitation and correlation with revealed morphology and size of microstructure constituents enables prediction of its behaviour.

Wide spectra of favourable intermetallic phases enable an overview of strong connections comprehending to the tensile mechanical properties development already in as-cast state. The comparison of yield and tensile strength with commonly used AlSi7Mg alloy indicates a significant increase of investigated properties for innovative chemistry of AlSi7Mg(Cu) alloy in as-cast state, while performed heat treatment did not influence on significant improvement.

5 Acknowledgement

Investigations have been performed in collaboration with companies CIMOS-P.P.C. Buzet, d.o.o., Buzet, Croatia. Investigations were performed within the research topic "Design and Characterization of Innovative Engineering Alloys", Code: TP167 funded by the University of Zagreb within the Framework of Financial Support of Research.

Viri / References

- [1] S. Seifeddine, Effect of cooling rate and Fe and Mn content on the tensile and fatigue properties of the Al-10%Si-2%Cu casting alloy, PhD Thesis, Jonkoping University, Jonkoping, 2008
- [2] F. Stadler, H. Antrekowitsch, W. Fragner, H. Kaufmann, E. Pinatel, P. Uggowitzer, The effect of main alloying elements on the physical properties of Al-Si foundry alloys, *Materials Science and Engineering A*, 560 (2013), str. 481–491
- [3] J. Olofsson, I.L. Svensson, P. Lava, D. Debruyne, Characterisation and investigation of local variations in mechanical behaviour in cast aluminium using gradient solidification, Digital Image Correlation and finite element simulation, *Materials & Design*, 56 (2014), str. 755–762
- [4] A. K. Dahle, J. Hjelen, L. Arnberg, Formation of hypoeutectic Al-Si alloys, *Proceedings of the 4th International Conference on Solidification Processing*, Sheffield, 1997, 527530–
- [5] ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys. Ohio: ASM International, Materials Park 1993.
- [6] L. Backerund, G. Chai, J. Tamminen, *Solidification Characteristics of Aluminium Alloys: Foundry Alloys Vol. 2*, Stockholm: AFS/Skanaluminium; 1999.
- [7] D. Dispinar, J. Campbell, Metal quality studies in secondary remelting of aluminium, *J. Inst. Cast Met. Eng.*, 178 (2004), str. 78–86.
- [8] K. Dahle, L. Arnberg, Development of strength in solidifying aluminium alloys, *Acta Materialia*, 45 (2) (1997) 547–559, doi: 10.1016/S1359-6454(96)00203-0
- [9] N. A. Belov, D. G. Eskin, A. A. Aksenov, *Multicomponent phase diagrams, Applications for commercial aluminum alloys*, Elsevier, London, 2005, str. 47–52,
- [10] Z. Zovko Brodarac, F. Unkić, J. Medved, P. Mrvar, Determination of solidification sequence of the AlMg9 alloy, *Kovove Mater.* 50 (1) (2012), str. 59–67.
- [11] S. Ji, F. Yan, Z. Fan, *A High Strength Aluminium Alloy for High Pressure Die Casting*, *Light Metals 2016, Aluminum Alloys, Processing and Characterization, Alloy Development and Applications* (E. Williams), The Minerals, Metals & Materials Society, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, p. 207–212
- [12] J. Backman, *Processing aspects for improving mechanical properties in aluminium castings* (PhD Thesis, Linköping: Linköping University, Jonkoping: Jonkoping University), 1999, urn:nbn:se:liu:diva-30074
- [13] E. R. Wang, X. D. Hui, S. S. Wang, Y. F. Zhao, G. L. Chen, Improved mechanical properties in cast Al-Si alloys by combined alloying of Fe and Cu, *Materials Science and Engineering A*, 527 (29–30) (2010) 7878–7884, doi: 10.1016/j.msea.2010.08.058
- [14] Z. Zovko Brodarac, N. Dolić, F. Unkić, Influence of copper content on microstructure development of AlSi9Cu3 alloy, *J. Min. Metall. Sect. B-Metall.* 50 (1) B (2014), str. 53–60, doi:10.2298/JMMB130125009B
- [15] F. H. Samuel, A. M. Samuel, H. W. Doty, Factors controlling the type and morphology of Cu-containing phases in 319 Al alloy, *AFS Trans.*, 104 (1996), str. 893–901.
- [16] T. Pabel, S. Bozorgi, C. Kneibl, K. Faerber, P. Drivetrain, P. Schumacher, Einfluss der Legierungselemente auf die HeiBrissneigung bei AlSi7MgCu-Gusslegierungen, *Giesserei*, 99, 2012, 9, str. 30–37

- [17] F. Stadler, H. Antrekowitsch, W. Fragner, H. Kaufmann, P. Uggowitzer Effect of main alloying elements on strength of Al-Si foundry alloys at elevated temperatures, *International Journal of Cast Metals Research*, 25 (2012), str. 215–224, doi: 10.1179/1743133612Y.0000000004
- [18] M. Zamani, Al-Si Alloys - Microstructure and Mechanical Properties at Ambient and Elevated temperature, PhD Thesis, Jonkoping University, School of Engineering, Department of Materials and Manufacturing, 2015
- [19] C. H. Cacers, M. B. Djurdjević, T. J. Stockwell, J. H. Sokolowski, The effect of Cu content on the level of microporosity in Al-Si-Cu-Mg casting alloys, *Scripta Mater.* 40 (5) (1999), str. 631–637
- [20] S. G. Shabestari, H. Moemeni, Effect of copper and solidification conditions on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloys, *Mater Process Technol.* 153–154 (2004), str. 193–198, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.302
- [21] I. Dugić, F. Henriksson, C. Strebel, O. Kosmaz, S. Seifeddine, On the Effect of Alloying Element Range on the Mechanical Properties of Recycled Aluminium Alloy EN AB-46000, *Light Metals 2016, Aluminum Alloys, Processing and Characterization, Alloy Development and Applications* (E. Williams), The Minerals, Metals & Materials Society, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, str. 115–120
- [22] M. Zamani, S. Seifeddine, E. Ghassemali, Effect of cooling rate and eutectic modification on texture and grain structure, *La Metallurgia Italiana*, 108 (6) (2016) 2932
- [23] M. Tocci, A. Pola, L. Raza, L. Armellin, U. Afeltra Optimization of heat treatment parameters for a nonconventional Al-Si-Mg alloy with Cr addition by DOE method, *La Metallurgia Italiana*, 108 (6) (2016) 141–144
- [24] M. B. Djurdjević, G. Huber, Z. Odanović, Synergy between thermal analysis and simulation *J Therm Anal Calorim.* 111 (2) (2013) 1365–1373, doi: 10.1007/s10973-012-2389-0
- [25] EN 1706:2010 Aluminij in aluminijeve zlitine – Ulitki – Kemična sestava in mehanske lastnosti
- [26] IDM 4234, Honeywell – Garret, Industrial Division specification, Aluminium alloy castings 356-F, revision K, 2008
- [27] D. Stanić, Z. Zovko Brodarac, F. Unkić, Mikrostrukturna i mehanicka svojstva kokilno lijevanih uzoraka AlSi7Mg legure (Microstructure and mechanical properties of AlSi7Mg alloy samples cast in permanent mould, in Croatian), *Proceedings book of 9th International Foundrymen Conference* (ed. F. Unkić), Sisak, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, 2009, CD_ROM 17-2009
- [28] Z. Zovko Brodarac, D. Stanić, Study of innovative AlSi7MgCu alloy with improved properties, 56. IFC – Mednarodno livarsko posvetovanje Portorož 2016, *Zborniki konferenc* (ed. A. Križman, P. Mrvar, J. Medved, P. Schumacher, R. Deike, M. Jan-Blažić, M. Debelek), Ljubljana, Slovenija, 2016., 66-67, CD_ROM (prispevek in extenso)
- [29] EN 10002-1:1998 Kovinski materiali – preverjanje natezne trdnosti – 1. del: preskusna metoda (pri sobni temperaturi)
- [30] Z. Zovko Brodarac, D. Stanić, T. Holjevac Grgurić, Solidification sequence of innovative AlSi7Mg(Cu) alloy, 48th International October Conference on Mining and Metallurgy (N. Strbac, D. Zivkovic), University of Belgrade Technical Faculty in Bor, Zajecar, 2016, str. 375–378

Maja Vončina¹, Jožef Medved¹, Stanislav Kores², Pan Xie³, Andreas Cziegler⁴, Peter Schumacher⁴

¹ Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta / University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Aškerčeva cesta 12, 1000 Ljubljana, Slovenija / Slovenia

² Talum Tovarna aluminija d. d. Kidričevo, Tovarniška cesta 10, 2325 Kidričevo, Slovenija / Slovenia

³ Center for High Resolution Electron Microscopy, College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, L.R. Kitajska / P.R. China

⁴ Montanuniversität Leoben, Chair of Casting Research, Franz-Josef-Straße 18, 8700 Leoben, Avstrija / Austria

Vpliv molibdena in cirkonija na aluminijeve livarske zlitine

Effect of Molybdenum and Zirconium on Aluminium Casting Alloys

Povzetek

Modeliranje razvoja mikrostrukture med izdelavo omogoča globlje razumevanje sinergijskega vpliva različnih obdelovalnih parametrov, ki vplivajo na razvoj mikrostrukture. Cilj je bil razviti aluminijevo livarsko zlitino, ki ima izboljšane mehanske lastnosti, hkrati pa zmanjšuje težo končnega izdelka, ki se uporablja v avtomobilski industriji. Raziskane so bile mikrostruktura in mehanske lastnosti zlitine AlSi9Cu3(Fe) ob prisotnosti različnih kombinacij dodatkov Zr in Mo. Lite eksperimentalne zlitine so bile izpostavljene toplotni obdelavi T6. Natezne preizkuse smo izvedli za vse eksperimentalne zlitine pri 25 °C. Za proučevanje nastanka različnih intermetalnih faz smo uporabili optično mikroskopijo in elektronski mikroanalizator. Ugotovljeno je bilo, da lahko optimalna kombinacija dodatka Zr in Mo rahlo izboljša mehanske lastnosti preiskovane zlitine v litem stanju in znatno v toplotno obdelanem stanju T6.

Ključne besede: Al-livarske zlitine, prehodne kovine, mikrostruktura, toplotna obdelava, mehanske lastnosti

Abstract

Modelling of the evolution of microstructure during processing enables the deeper understanding of synergetic influence of various processing parameters that influences on the evolution of microstructure. The aim was to develop aluminium casting alloy, which have improved mechanical properties, while reducing the weight of the finished product used in the automotive industry. The microstructure evolution and mechanical properties of AlSi9Cu3(Fe) die casting alloy were investigated in the presence of various combinations of Zr and Mo additions. The cast experimental alloys were exposed to T6 heat treatment. Tensile tests were made for all experimental alloys at 25 °C. Optical microscopy and electron micro-analyzer were used to study the formation of different intermetallic phases. It was established that the optimal combination of Zr and Mo addition to investigated Al-casting alloy can slightly improve the mechanical properties in as-cast state and significantly in T6 heat treated state.

Key words: Al-casting alloys, Transition metals, Microstructure, Heat treatment, Mechanical properties

0 Uvod

Mikrostrukturne komponente zlitin iz sistema Al-Si odločilno vplivajo na mehanske in tehnološke lastnosti ulitkov. Izboljšanje mehanskih lastnosti dosežemo z udrobnjevanjem α -Al in/ali modifikacijo evtektika (α -Al + β -Si) in visoke hitrosti ohlajanja. Pomembna lastnost precipitacije sistemov strjevanja zlitin Al-Si je tudi odvisnost od ravnovesja topljivosti bakra in magnezija v zmesnih kristalih α -Al v povezavi s temperaturo. Baker v zlitini AlSi9Cu3 med termalnim kaljenjem zmanjšuje odpornost proti koroziji in izboljšuje mehanske lastnosti [1]. Železo povečuje odpornost proti razpokam v vročem in zmanjšuje verjetnost sprijetja ulitka v formo. Železo pri Al-livarskih zlitinah zmanjšuje voljnost. Tvori netopne faze Al_3Fe , Al_6FeMn in Al_5FeSi , ki izboljšujejo trdnost, zlasti pri višjih temperaturah. Z zvečanjem koncentracije železa in posledično netopnih faz se livnost in zmožnost dovajanja zmanjšata. Magnezij je osnova za trdnost in trdoto pri termalno kaljenih zlitinah Al-Si in se pogosto uporablja pri kompleksnih zlitinah Al-Si, ki vsebujejo baker, mangan, nikelj in druge elemente. Mangan je pri litih zlitinah običajno obravnavan kot nečistoča, v zelo majhnih koncentracijah pa ga lahko najdemo v zlitinah za gravitacijsko litje. Mangan je pomemben legirni element pri gnetnih Al zlitinah. Če zlitina ni pozneje oblikovana, mangan ne igra tako pomembne vloge. Večji volumski odstotek faze Al_6Mn lahko zveča trdnost ulitka. [2]

Ob tako širokem razponu uporabe aluminijevih zlitih za najrazličnejše namene na zlitine vplivajo sestava, udrobnjevanje in ustrezna toplotna obdelava. Z izbiro ustrezne toplotne obdelave lahko dosežemo želene mikrostrukture in posledično potrebne mehanske lastnosti. Za toplotno obdelavo se odločimo, ko želimo pri določeni sestavi doseči maksimalno trdnost

0 Introduction

The microstructural components of alloys from Al-Si system have a decisive influence on the mechanical and technological properties of castings. The increase in mechanical properties is achieved by the grain-refining of α -Al and/or modification of eutectic (α -Al + β -Si) and high cooling rate. An important feature of the precipitation hardening systems of Al-Si alloys is also the dependence of the equilibrium solubility of the copper and magnesium in the solid solution α -Al regarding the temperature. Copper in alloy AlSi9Cu3 reduces corrosion resistance and increases mechanical properties by thermal hardening [1]. The iron increases the resistance to cracks in hot and reduces the tendency of sticking the casting to the die. Iron in Al-casting alloys reduces ductility. It forms the insoluble phases Al_3Fe , Al_6FeMn and Al_5FeSi , which improve strength, especially at elevated temperatures. By increasing the concentration of iron and thus the insoluble phases, the castability and the feeding ability are reduced. Magnesium is the basis for strength and hardness in heat-treated Al-Si alloys and is widely used in complex Al-Si alloys containing copper, manganese, nickel and other elements. Manganese is usually treated as impurity in cast alloys and it can be found in very low concentrations in alloys for gravity casting. Manganese is an important alloying element in the wrought Al-alloys. If the alloy is not subsequently formed, it does not play such an important role. A larger volume fraction of Al_6Mn phase may increase the casting strength. [2]

On such a wide range of use of aluminium alloys for various purposes, the composition, the grain-refining and the corresponding heat treatment influences the properties. By selecting the appropriate heat treatment, the desired microstructure

s pomočjo žarjenja, gašenja raztopine ter strjevanja s precipitacijo, ki lahko poteka po naravnem postopku ali umetno. Z ustrezno toplotno obdelavo ulitkov lahko dosežemo naslednje: večjo trdnost in posledično obdelovalnost materiala, večjo trdoto, stabilnejše mehanske in fizične lastnosti, dimenzijsko stabilnost, odpravo preostale obremenitve, povzročene med ulivanjem, tempranjem, obdelavo itd. [3, 4, 5, 6]

Natezna trdnost zlitine AlSi9Cu3 je 240–310 N/mm², raztezek pa približno 4 %. Trdota po Brinellu znaša 80–120 HB. [7]

Modifikacije zlitine Al-Si pri uporabi na visoki temperaturah so bile že velikokrat predmet raziskav. [8, 9, 10, 11] Pri legiranju livarskih Al-litin za uporabo pri visokih temperaturah morajo biti izpolnjeni štirje pogoji [12]: legirni element mora biti (i) zmožen oblikovati toplotno stabilno fazo strjevanja, (ii) izkazovati nizko topnost v matriki Al, (iii) imeti nizko prevodnost v matriki Al in (iv) ohranjati zmožnost litine za klasično strjevanje. Aluminijeve zlitine iz sistema Al-Si-Cu-Mg z mikrododatkom Cr, Ti, V in Zr izboljšujejo mehanske lastnosti po toplotni obdelavi T6, pri čemer se meja teženja poveča za 30 %, natezna trdnost pa za 5 % glede na osnovno zlitino pod enakimi pogoji [13]. Ti/Zr/V skupaj z Al in Si tvorijo fazo Al(ZrTiV)Si, ki povečuje trdnostne lastnosti zlitine AlSi7Cu1 za 20 do 40-krat in kaže na 11,5 do 15-kratno boljšo prevodnost v primerjavi s komercialno zlitino A380. [14]

Pri toplotni obdelavi zlitine AlSi7Cu1Mg0,5 z dodatkom 0,21 wt.% Ti, 0,3 wt.% V in 0,47 wt.% Zr, se faze Cu in Mg z evtektičnim Si raztopijo, medtem ko faza (AlSi)_x(TiVZr) s tetragonalno kristalno strukturo ostane odporna do temperature 696–705 °C, kar poveča temperaturno stabilnost preiskovanih zlitin. [15] Trdota tovrstne zlitine po toplotni obdelavi T6 znaša 96 HRF. Pri takšni zlitini AlSi7Cu1Mg0,5

and, consequently, the required mechanical properties may be achieved. Heat treatment is used when maximum strength is desired in a given composition by means of a process of solution annealing, quenching and precipitation hardening, which may be natural or artificial. By appropriate heat treatment of castings, the following can be achieved: improved strength and consequently machinability of the material, increase in hardness, stabilized mechanical and physical properties, ensured dimensional stability, eliminated residual stresses caused during casting, tempering, treatment ... [3, 4, 5, 6].

The tensile strength of the AlSi9Cu3 alloy is 240-310 N/mm², and the elongation is about 4 %. The hardness measured according to Brinell is 80-120 HB. [7]

Al-Si alloy modification studies for high temperature applications have been the subject of numerous studies. [8, 9, 10, 11] For the alloying of foundry Al-alloys for use at high temperatures, four conditions should be met [12]: the alloying element must (i) be able to form a thermally stable hardening phase, (ii) exhibit low solubility in the Al matrix, (iii) has low diffusivity in the Al-matrix, and (iv) retain the ability of the alloy for conventional solidification. Aluminium alloys from the Al-Si-Cu-Mg system with micro-addition of Cr, Ti, V and Zr elements increase the mechanical properties after the T6 heat treatment, whereas yield strength increases for 30 % and tensile strength for 5 % regarding to the base alloy under the same conditions [13]. Ti/Zr/V together with Al and Si form Al (ZrTiV) Si phase, which increases the tensile properties of AlSi7Cu1 alloy by 20-40 % and shows by 11.5-15 times better ductility compared to the commercial alloy A380. [14]

During the heat treatment of the alloy AlSi7Cu1Mg0.5 with the addition of 0.21 wt. % Ti, 0.3 wt. % V and 0.47 wt. % Zr, Cu-

z dodatkom Ti, V in Zr se lahko tvorijo naslednje faze: $\text{Cu}_{15}\text{Al}_{43}\text{Si}$, $\text{Al}_5\text{Mg}_9\text{Si}_8\text{Cu}_2$ in $\text{Al}_{14}\text{FeMg}_4\text{Si}_6$ ter intermetalne faze $\text{Al}_3\text{Si}_{26}\text{TiV}_{10}\text{Fe}$ in $\text{Al}_{13}\text{Si}_2\text{Ti}_3\text{Zr}$, pri čemer se med topilnim žarjenjem faze $\text{Cu}_{15}\text{Al}_{43}\text{Si}$ in $\text{Al}_5\text{Mg}_9\text{Si}_8\text{Cu}_2$ raztopijo, železove faze pri AlSiCuFe in $\text{Al}_9\text{Mg}_{12}\text{Si}_6\text{Fe}$ pa ostanejo neraztopljene. Intermetalne faze $\text{Al}_{27}\text{SiTiZr}_9$ in AlSiTiVFe ostanejo v mikrostrukturi v majhnih količinah. [16] Če zlitini A354 dodamo 0,2 wt.% Zr in 0,2 wt.% Ni, se v mikrostrukturi tvorijo intermetalne faze $(\text{Al},\text{Si})_3(\text{Zr},\text{Ti})$, Al_3CuNi in Al_9NiFe . Z dvigom temperature se natezna trdnost teh zlitin zmanjša zaradi večjega deleža faz Ni in Zr, medtem ko so pri 300 °C napetostne lastnosti (končna natezna trdnost in meja teženja) 30 % višje v primerjavi z osnovno zlitino. Skupna koncentracija Ni in Zr ne sme preseči 0,4 wt.%. [17]

Trdnostne lastnosti zlitine Al7Si0,5Cu0,3Mg z dodatkom Mo (0,3 wt.%) se ohranijo kljub izpostavljenosti visokim temperaturam. Z lezenjem povezane lastnosti pri tovrstni zlitini se izboljšajo. Meja plastičnosti, natezne trdnosti in raztezka se z dodatkom Mo zveča za 25, 15 in 35 %. V tem primeru se tvorijo precipitati $\text{Al}-(\text{Fe}, \text{Mo})-\text{Si}$, ki so stabilni pri 300 °C in zavirajo dislokacijske ovire, ki strjujejo matriko. [18] V kombinaciji z Mn (<0,5 wt.%) se koncentracija precipitátov poveča, velikost precipitátov pa se zmanjša. [19] Mo zavira tudi tvorbo škodljive faze $\beta\text{-Al5FeSi}$ in tvori fazo $\text{Al}-(\text{Fe},\text{Mo})-\text{Si}$ kubične strukture. [18, 19].

Skladno s predhodnimi raziskavami je bila opravljena analiza dodatka Zr in/ali Mo k zlitini AlSi9Cu3 , pri čemer je bila opravljena analiza vpliva dodatka Zr in/ali Mo na mikrostrukturo in mehanske lastnosti zlitine AlSi9Cu3 v litem stanju in toplotno obdelanem stanju.

and Mg-phases along with the eutectic Si dissolve, while the $(\text{AlSi})_x(\text{TiVZr})$ phase of tetragonal crystal structure stays resistant up to 696 to 705 °C, which increases the temperature stability of the examined alloys. [15] The hardness of such an alloy after the T6 heat treatment is 96 HRF. In such an AlSi7Cu1Mg0,5 alloy with the addition of Ti, V and Zr following phases may form: $\text{Cu}_{15}\text{Al}_{43}\text{Si}$, $\text{Al}_5\text{Mg}_9\text{Si}_8\text{Cu}_2$ and $\text{Al}_{14}\text{FeMg}_4\text{Si}_6$ and intermetallic phases $\text{Al}_3\text{Si}_{26}\text{TiV}_{10}\text{Fe}$ and $\text{Al}_{13}\text{Si}_2\text{Ti}_3\text{Zr}$, where in during the T6 soluble annealing phases $\text{Cu}_{15}\text{Al}_{43}\text{Si}$ and $\text{Al}_5\text{Mg}_9\text{Si}_8\text{Cu}_2$ dissolve, while Fe-phases AlSiCuFe and $\text{Al}_9\text{Mg}_{12}\text{Si}_6\text{Fe}$ remain undissolved. The intermetallic phases $\text{Al}_{27}\text{SiTiZr}_9$ and AlSiTiVFe remain in the microstructure in small quantities. [16] In the case that in the alloy A354 are added 0.2 wt. % Zr and 0.2 wt. % Ni, intermetallic phases $(\text{Al},\text{Si})_3(\text{Zr},\text{Ti})$, Al_3CuNi and Al_9NiFe are formed in the microstructure. By rising the temperature tensile strength of these alloys decrease as a result of increasing proportion of Ni and Zr-phases, while at 300 °C the tensile properties (ultimate tensile strength and yield strength) are for 30 % higher as compared with the base alloy. The total Ni and Zr concentrations should not exceed 0.4 wt. %. [17]

The strength properties of the alloy Al7Si0.5Cu0.3Mg with the addition of Mo (0.3 wt. %) are maintained despite exposure to an elevated temperature. The creep properties in such an alloy improve. The limit of plasticity, tensile strength and elongation increases by 25, 15 and 35 % with the addition of Mo. In this case $\text{Al}-(\text{Fe},\text{Mo})-\text{Si}$ precipitates are formed, which are stable at 300 °C, and inhibit dislocations barriers which hardens the matrix. [18] In combination with Mn (<0.5 wt. %), the precipitation concentration increases, whereas the size of precipitations is reduced. [19] Mo also inhibits the formation

1 Eksperimetano delo

Raziskovali smo hipoevtektične zlitine AlSi9Cu3 brez (osnove) in z dodatkom prehodnih elementov Zr in/ali Mo. Oznake eksperimentalnih zlitin in njihove kemijske sestave so predstavljene v Preglednici 1. Zlitine smo stopili v indukcijski peči, kjer smo po načrtih kot predzlitinama AlZr10 in AlMo5 dodali dodatek Zr in Mo. Za izdelavo visokokakovostne taline smo talino z mešalom vsaj 10 minut razplinjevali z Ar, indeks gostote (IG) pa smo izmerili pred litjem. Ko je indeks gostote padel pod vrednost 2, smo lahko začeli z ulivanjem.

Iz vsake eksperimentalne zlitine smo izdelali serije po pet ulitkov v formah za ulivanje preizkušancev za natezni preizkus (Sl. 1a). Po rezanju ulitkov v preizkušance za natezne preizkuse smo vse vzorce označili, kot je prikazano na Sliki 1b. Preizkušance smo pripravili skladno s standardom DIN 50125, natezne preizkuse pa opravili z napravo INSTRON 8802 skladno s standardom EN ISO 6892-1 A224.

Za primerjavo litega in toplotno obdelanega stanja preiskovanih zlitin smo na šestih vzorcih iz vsake eksperimentalne zlitine izvedli toplotno obdelavo T6. Toplotna obdelava T6 je potekala po naslednjem postopku:

of the harmful β -Al5FeSi phase and forms Al- (Fe,Mo)-Si phase of cubic structure. [18, 19].

According to previous researches, an analysis of Zr and/or Mo addition to AlSi9Cu3 alloy was made, whereas the impact analysis of Zr and/or Mo addition on the microstructure and mechanical properties of the AlSi9Cu3 alloy in cast and heat-treated state was made.

1 Experimental Work

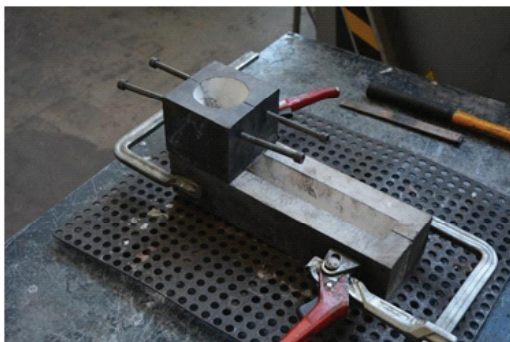
Hypoeutectic AlSi9Cu3 die casting alloys, without a base and in addition of the transition elements Zr or/and Mo, were investigated. The experimental alloy designations and its chemical compositions are presented in Table 1. The alloys were melted in an induction furnace, whereas various planned additions of Zr and Mo were added as master alloys AlZr10 and AlMo5. In order to produce a high quality melt, the melt was degassed using Ar for at least 10 min with the Impeller, whereas the density index (DI) was measured before casting. When the DI was below 2, the casting could start.

From each experimental alloy the series of five castings were casted into the die for casting the tensile samples (Fig.

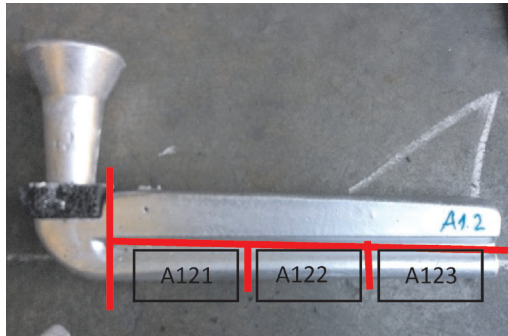
Preglednica 1. Oznaka zlitine in kemijska sestava eksperimentalnih zlitin / wt. %

Table 1. Alloy designation and chemical composition of experimental alloys / wt. %.

AlSi9Cu3	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Zr	Mo	Al
A1	8,284	0,258	3,076	0,172	0,309	0,078	0,073	0,004	0,001	preostanek / rest
A2	8,198	0,262	3,028	0,172	0,313	0,078	0,074	0,095	0,006	preostanek / rest
A3	7,895	0,263	2,951	0,168	0,300	0,075	0,068	0,110	0,110	preostanek / rest
A4	7,684	0,274	2,844	0,165	0,290	0,072	0,066	0,107	0,180	preostanek / rest
A5	8,203	0,258	3,029	0,172	0,308	0,078	0,078	0,002	0,008	preostanek / rest
A6	8,512	0,291	3,524	0,179	0,370	0,082	0,067	0,189	0,016	preostanek / rest
A7	7,895	0,280	2,942	0,168	0,301	0,075	0,068	0,179	0,113	preostanek / rest
A8	7,887	0,302	2,991	0,166	0,302	0,074	0,065	0,176	0,190	preostanek / rest



a)



b)

Slika 1. Forma za ulitke za natezne preizkuse (a) in ulitek iz forme z oznako preseka in vzorca (b): številka pomeni vrsto zlitine, prva številka pomeni sestavo zlitine, druga serijo ulitka iz eksperimentalne litine, zadnja pa vzorec iz ulitka za natezni preizkus

Figure 1. The die for the tensile castings (a) and the casting from the die where the cutting and the sample marking is marked (b): letter means the type of the alloy, first number means the alloy composition, second number means the serial casting from the experimental alloy and the last number means the sample from the casting for the tensile test

1. žarjenje raztopine pri 520 °C 2 uri,
2. kaljenje v vodi do sobne temperature,
3. umetno staranje pri 180 °C 5 ur,
4. hlajenje na zraku do sobne temperature.

Po toplotni obdelavi T6 smo za natezni preizkus pripravili po pet vzorcev vsake eksperimentalne zlitine. En preostali vzorec smo uporabili za analizo mikrostrukture. Popolno mikrostrukturno analizo smo opravili z optično mikroskopijo. Metalografske vzorce smo pripravili skladno s standardnim metalografskim postopkom: prvo brušenje (brusni papir z granulacijami 80, 320 in 1.200), sledilo je poliranje približno 5 minut s suspenzijo iz diamantnih zrn 3 µm (CT Diamond Suspension Mono) in končno poliranje približno 20 sekund z alkalno suspenzijo iz koloidnega kremena 0,5 µm (Colloidal Silica Suspension 50nm Alkaline). S svetlobnim mikroskopom ZEISS AXIO Imager A1m smo z različnimi povečavami fotografirali mikrostrukturo vseh eksperimentalnih vzorcev v litem in

1a). Afterwards the castings were cut into the samples for the tensile tests, whereas all the samples were marked as shown in Fig. 1b. The tensile samples were prepared according to standard DIN 50125 and the tensile tests were made on INSTRON 8802 according to standard EN ISO 6892-1 A224.

To compare the as-cast state and heat treated state of the investigated alloys, T6 heat treatment was conducted on six samples from each experimental alloy. T6 heat treatment was conducted as follows:

1. Solution annealing at 520 °C for 2h
2. Quenching in water to room temperature
3. Artificial ageing at 180 °C for 5h
4. Cooling in air to room temperature

After the T6 heat treatment five samples from each experimental alloy were prepared for the tensile test. One sample, that was left, was used for the microstructure analysis. In order to do complete microstructure analysis, optical microscopy was used.

toplotno obdelanem stanju. Kvantitativno in kvalitativno analizo mikrostrukture štirih vzorcev (A823, B823, A843 in B843) v litem in toplotno obdelanem stanju smo opravili z vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM) JEOL 7200F-JSM, opremljenim s spektrometroma EDS in WDS, ki omogoča analizo sestave faze.

2 Rezultati in razprava

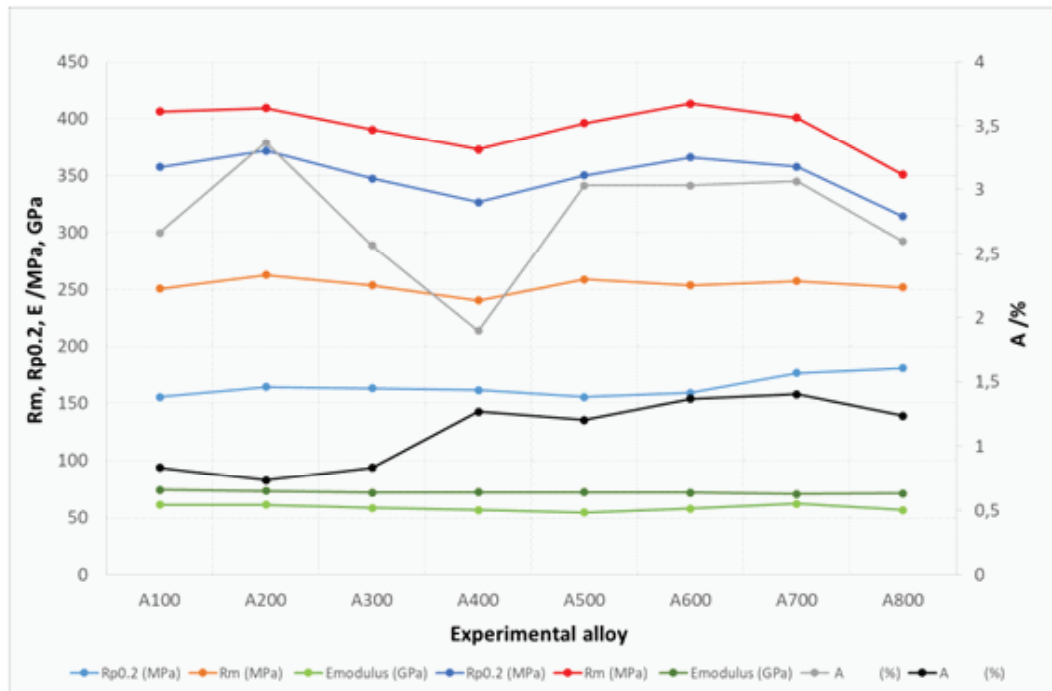
Pri vsaki raziskovani zlitini smo preizkusili pet vzorcev v litem in toplotno obdelanem stanju. Pridobljene podatke, obdelane kot maksimume in minimume, smo odstranili iz izračunov povprečja. Pridobljeni rezultati vseh nateznih preizkusov so predstavljeni v Preglednici 2. Na Sliki 2 je prikazana primerjava nateznih lastnosti za eksperimentalne zlitine A (AlSi9Cu3), svetle barve prikazujejo rezultate pri litem stanju, temne pa stanje pri toplotno obdelanem stanju. Sklepamo lahko, da dodatek 0,2 wt.% Mo (zlitina A4 in A8) ni primeren; mehanske lastnosti so slabše kot pri manjšem dodatku Mo. Toplotna obdelava poveča R_m , $R_{p_{0.2}}$ in E , zmanjša pa raztezek. Dodatka Zr in Mo ugodno vplivata na raztezek pri toplotno obdelanem stanju. Pri toplotno obdelanem stanju smo najvišji vrednosti R_m (~420 MPa) in $R_{p_{0.2}}$ (~375 MPa) dosegli pri zlitinah A2 in A6, medtem ko smo samo Zr dodali v zlitino AlSi9Cu3.

Z namenom analize mikrostrukturnih komponent, tvorjenih na osnovi Zr in Mo, smo na vseh eksperimentalnih vzorcih opravili optično analizo mikrostrukture. Slika 3 predstavlja svetlobnomikroskopski posnetek vzorcev A1 (osnovna zlitina), A2 (zlitina z 0,1 wt.% Zr) in A8 (zlitina z 0,2 wt.% Zr in 0,2 wt.% Mo) v litem in toplotno obdelanem stanju pri 1.000-kratni povečavi. Na svetlobnomikroskopskih posnetkih so označene glavne komponente

Metallographic samples were prepared according to standard metallographic procedure: first grinding (80, 320 and 1200 grinding paper), followed by polishing with 3 μm CT Diamond Suspension Mono for approximately five minutes and finished by polishing with 0.5 μm Colloidal Silica Suspension 50nm Alkaline for approximately 20 s. Using light microscope ZEISS AXIO Imager A1m the microstructure of all experimental samples in as-cast and heat treated state were photographed at various magnification. The quantitative and qualitative microstructure analysis of four samples (A823, B823, A843 and B843) in as-cast and heat treated state were made using Scanning electron microscope (SEM) JEOL 7200F-JSM equipped with EDS and WDS- spectrometers, which enables the analysis of phase composition.

2 Results and Discussion

From each investigated alloy five samples were tested in as-cast and heat treated state. Gained data were processed as the maximum and minimum results were eliminated from the average calculations. The collected results from all tensile tests are presented in Table 2. Fig. 2 presents the comparison of tensile properties for experimental alloys A (AlSi9Cu3), whereas light colours present the results in as-cast state and dark colours after the heat treatment. It can be concluded, that the addition of 0.2 wt.% Mo (alloy A4 and A8) is not suitable; the mechanical properties are lower as at the lower additions of Mo. Heat treatment increases R_m , $R_{p_{0.2}}$ and E , whereas it lowers elongation. The additions of Zr and Mo have favorable impact on the elongation in heat treated state. In heat treated state the maximum R_m (~420 MPa) and $R_{p_{0.2}}$ (~375 MPa) were achieved in



Slika 2. Grafična predstavitev vseh rezultatov nateznega preizkusa za eksperimentalno zlitino A v litem stanju (svetle barve) in po toplotni obdelavi T6 (temne barve)

Figure 2. Graphical presentation of all results from the tensile test for experimental alloy A in as-cast state (light colours) and after T6 heat treatment (dark colours)

Preglednica 2. Natezne lastnosti za vse eksperimentalne zlitine v litem in toplotno obdelanem stanju

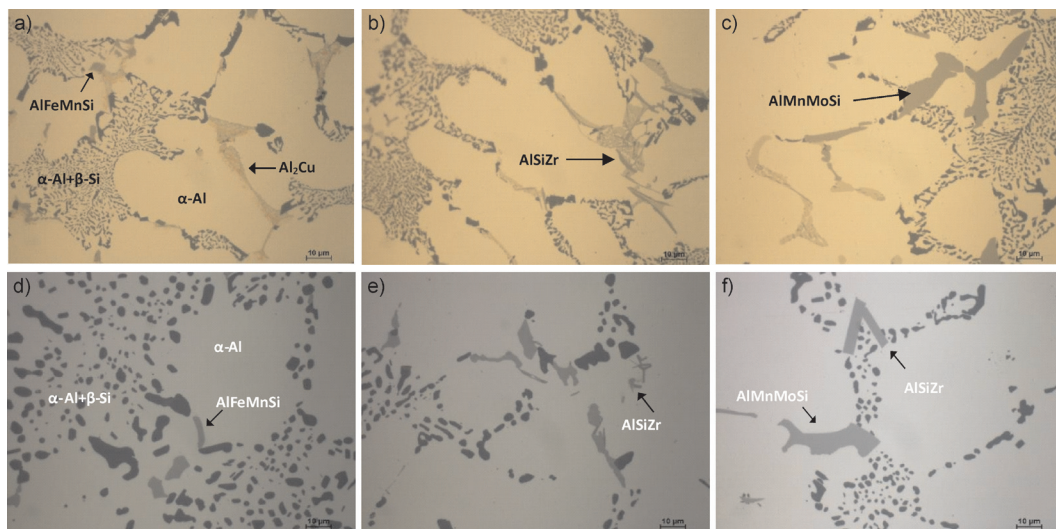
Table 2. Tensile properties for all experimental alloys in as-cast and heat treated state

Zlitina / Alloy	V litem stanju / cast state				V toplotno obdelanem stanju T6 / T6 As-heat treated state			
	Rp _{0.2} (MPa)	Rm (MPa)	A (%)	Modul elastičnosti / (GPa)	Rp _{0.2} (MPa)	Rm (MPa)	A (%)	Modul elastičnosti / Emodulus (GPa)
A100	155,0	250,7	2,7	60,7	357,3	406,3	0,8	73,8
A200	164,0	262,7	3,4	60,9	371,7	409,3	0,7	73,0
A300	162,7	253,7	2,6	58,2	347,3	390,3	0,8	71,5
A400	161,3	240,3	1,9	56,2	326,7	372,7	1,3	71,7
A500	155,0	258,7	3,0	54,2	350,0	396,0	1,2	71,8
A600	158,7	253,7	3,0	57,5	365,7	413,3	1,4	71,4
A700	176,0	257,3	3,1	61,8	357,7	401,0	1,4	70,2
A800	180,3	251,7	2,6	56,3	314,3	350,7	1,2	70,9

mikrostrukture. Pri osnovni zlitini A smo opazili naslednje mikrostrukturne komponente (Sl. 3a): α -Al, evtektik (α -Al + β -Si), evtektična faza Al_2Cu in evtektična faza AlFeMnSi (predvidoma $\text{Al}_{15}(\text{Fe,Mn})_3\text{Si}_2$). Ko smo v zlitino dodali Zr, je prišlo do faze z iglasto formacijo, kar smo pozneje analizirali kot fazo AlSiZr (Sl. 3b). Po drugi strani Mo v zlitini ni tvoril nove intermetalne faze, pač pa se je vdelal v fazo AlFeMnMoSi , včasih je nadomestil Fe in tvoril novo fazo AlFeMnMoSi z drugačno morfologijo (Sl. 3c). Tvoril je tudi formacijo, podobno kitajskim pismenkam, le da je bila ta bolj zaobljene oblike, kar bi lahko bil vzrok za izboljšane mehanske lastnosti. Po toplotni obdelavi T6 v mikrostrukturi nismo zaznali nobene evtektične faze Al_2Cu (Sl. 3d). Evtektična faza Si in AlFeMnSi je bila v mikrostrukturi nekoliko bolj zaobljena in fragmentirana, ravno tako faza AlFeMnSi (Sl. 3f). Toplotna obdelava T6 ni vplivala na fazo Zr (Sl. 3e).

alloy A2 and A6, where only Zr was added in the alloy AlSi9Cu3 .

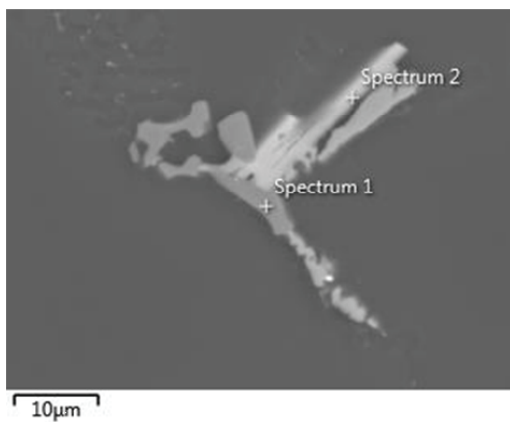
In order to analyze the microstructure components formed on base of Zr and Mo all experimental samples were exposed to optical microstructure analysis. Fig.3 presents micrographs of samples A1 (base alloy), A2 (alloy with 0.1 wt. % Zr) and A8 (alloy with 0.2 wt.% Zr and 0.2 wt.% Mo) in as-cast and heat treated state at 1000x magnification. On the micrographs the main microstructure components are marked. In base alloy A following microstructure components were detected (Fig. 3a): α -Al, eutectic (α -Al + β -Si), eutectic Al_2Cu -phase and eutectic AlFeMnSi -phase (presumably $\text{Al}_{15}(\text{Fe,Mn})_3\text{Si}_2$). When Zr was added in the alloy needle-like phase occurred, which was later analysed as AlSiZr -phase (Fig. 3b). On the other hand, Mo in the alloy did not form new intermetallic phase, but it incorporated into AlFeMnSi -phase, sometimes replaced Fe and formed new AlFeMnMoSi phase



Slika 3. Mikrostruktura nekaterih eksperimentalnih vzorcev. A123 (a), A223 (b) in A823 (c) v litem stanju ter A143 (d), A243 (e) in A843 (f) po toplotni obdelavi T6 pri 1.000-kratni povečavi

Figure 3. Microstructure of some experimental samples: A123 (a), A223 (b) and A823 (c) in as cast state and A143 (d), A243 (e) and A843 (f) in T6 heat treated state at 1000x magnifications

Na Slikah 4 in 5 sta predstavljeni in analizirani fazi Zr in Mo. S preslikavanjem smo potrdili, da je Zr tvoril skupaj z Al, Ti in Si, Mo pa skupaj z Al, Fe, Mn in Si (Sl. 5). Po toplotni obdelavi so bile faze Al_2Cu , AlSiZr in AlFeMnMoSi tesneje povezane in bolj zaobljene, kot je prikazano na Sliki 5.



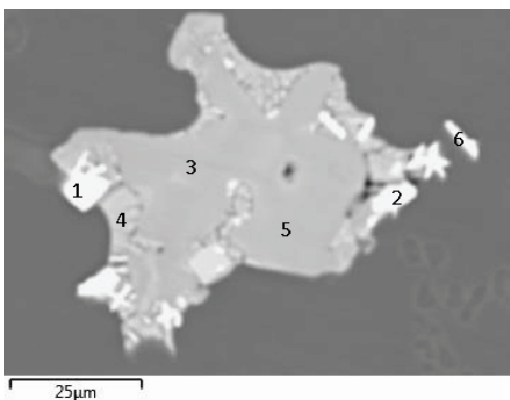
with a different morphology (Fig. 3c). It formed also in a shape of a chinese-script, only more roundish, which could be the reason for improvement in mechanical properties. After T6 heat treatment no Al_2Cu -eutectic phase could be detected in the microstructure (Fig. 3d). Eutectic Si and AlFeMnSi phase appeared more roundish and fragmented in the microstructure, the same as AlFeMnMoSi -phase (Fig.3f). T6 heat treatment have no impact on Zr-phase (Fig.3e).

In Fig. 4 and 5 Zr- and Mo-bearing phases are presented and analyzed. Mapping confirmed, that Zr formed together

Slika 4. Mikrograf SEM vzorca A823 z analizo EDS

Figure 4. SEM micrograph of sample A823 with the corresponding EDS analysis

Element	Al	Si	Mn	Fe	Cu	Mo	Mg	Ti	Zr	
Spectrum 1	58.45	9.31	7.1	16.52	4.19	4.43				AlFeMnMoSi
Spectrum 2	43.44	10.24			6.23		2.41	0.61	37.07	AlSiZr



Slika 5. Mikrograf SEM vzorca A843 z analizo EDS

Figure 5. SEM micrograph of sample A843 with the corresponding EDS analysis

Element	Al	Si	Ti	Cu	Zr	Mn	Fe	Mo	Mg	
Spekter 1	4,58	33,25	2,74	0,76	58,66					AlSiZr
Spekter 2	29,68	26,09	1,89	2,6	39,75					AlSiZr
Spekter 3	74,2	4,35	0,09	0,48		2,58	0,54	17,75		AlMnMoSi
Spekter 4	67,9	6,43		25,68						Al_2Cu
Spekter 5	54,98	9,25	0,04	5,03	0,56	5,83	14,45	9,86		AlFeMnMoSi
Spekter 6	12,24	31,97	1,91	2,19	51,22				0,47	AlSiZr

Sestava faz je podobna kot pri zlitini v litem stanju.

3 Sklepi

Iz dobljenih rezultatov lahko sklepamo naslednje:

- toplotna obdelava poveča R_m , $R_{p_{0,2}}$ in E , zmanjša pa raztezek zlitine AlSi9Cu3. Dodatka Zr in Mo ugodno vplivata na raztezek pri toplotno obdelanem stanju. Pri toplotno obdelanem stanju smo dosegli najvišji vrednosti R_m (~420 MPa) in $R_{p_{0,2}}$ (~375 MPa), medtem ko smo samo Zr dodali v zlitino AlSi9Cu3. Dodatek 0,2 wt.% Mo ni primeren; mehanske lastnosti so slabše kot pri manjšem dodatku Mo.
- Pri osnovni zlitini AlSi9Cu3 smo zaznali naslednje mikrostrukturalne komponente: α -Al, evtekt (α -Al + β -Si), evtektična faza Al_2Cu in evtektična faza AlFeMnSi ($Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$) skladno s pričakovanji. Pri dodatku Zr v zlitino se je tvorila faza z iglasto formacijo. Mo v zlitini se je vdelal v fazo AlFeMnMoSi, v nekaterih primerih je nadomestil Fe in tvoril novo fazo AlFeMnMoSi z drugačno morfologijo v podobi nekoliko zaobljene kitajske pismenke. Pri toplotni obdelavi T6 nismo zaznali evtektične faze Al_2Cu , pri evtektični fazi Si in AlFeMnSi (AlFeMnMoSi) pa se je v mikrostrukturi pojavila nekoliko bolj zaobljena in fragmentirana oblika.
- Z analizo SEM smo potrdili, da je Zr združil z Al, Ti in Si, Mo pa z Al, Fe, Mn in Si. Po toplotni obdelavi so bile faze Al_2Cu , AlSiZr in AlFeMnMoSi tesneje povezane in bolj zaobljene.

4 Zahvale

Avtorji se zahvaljujemo Avstrijski akademiji znanosti za priložnost sodelovanja pri

with Al, Ti and Si and Mo together with Al, Fe, Mn and Si (Fig. 5). After the heat treatment phases Al_2Cu , AlSiZr and AlFeMnMoSi formed more together and more roundish, as it is shown on Fig. 5. The composition of phases is similar as in the alloy in as-cast state.

3 Conclusion

From the presented results it can be concluded:

- Heat treatment increases R_m , $R_{p_{0,2}}$ and E , whereas it lowers elongation of AlSi9Cu3 alloy. The additions of Zr and Mo have favorable impact on the elongation in heat treated state. In heat treated state the maximum R_m (~420 MPa) and $R_{p_{0,2}}$ (~375 MPa) were achieved, where only Zr was added in the alloy AlSi9Cu3. The addition of 0.2 wt.% Mo is not suitable; the mechanical properties are lower as at the lower additions of Mo.
- In base AlSi9Cu3 alloy following microstructure components were detected: α -Al, eutectic (α -Al + β -Si), eutectic Al_2Cu phase and eutectic AlFeMnSi phase ($Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$), as it was expected. When Zr was added in the alloy needle-like phase formed. Mo in the alloy incorporated into AlFeMnSi phase, in some cases replaced Fe, and formed new AlFeMnMoSi phase with a different morphology in a more roundish Chinese script. At T6 heat treated state no Al_2Cu -eutectic phase could be detected, whereas eutectic Si and AlFeMnSi (AlFeMnMoSi) phase appeared more roundish and fragmented in the microstructure.
- SEM analysis confirmed that Zr formed together with Al, Ti and Si and Mo together with Al, Fe, Mn and Si. After the heat treatment phases Al_2Cu ,

projektu Joint Excellence in Science and Humanities, ki podpira sodelovanje znanstvenikov iz razliĉnih drŹav. To delo sta podprla tudi Ministrstvo za izobraŹevanje, znanost in Źport ter Evropski sklad za regionalni razvoj v okviru Evropske komisije. To delo je bilo opravljeno v okviru programa Materiali in tehnologije za nove aplikacije (MARTINA, Źt. zahtevka: C3330-16-529008) in programa P2-0344(B), funkcionalno ocenjeni materiali.

AlSiZr and AlFeMnMoSi formed more connected and more roundish.

4 Acknowledgements

Authors would like to thank to Österreichische Akademie der Wissenschaften for the opportunity to work on the project Joint Excellence in Science and Humanities, which supported the collaboration of scientists from different countries. This work was also supported by A Republic of Slovenia, Ministry of Education, Science and Sport and by European Commission, European Regional Development. This work was made in a frame of program Materials and Technologies for New Applications (MARTINA, grand number: C3330-16-529008) and Programme P2-0344(B), Functionally graded materials.

5 Viri / References

- 1 BAKER H., Alloy Phase Diagrams. ASM Handbook – Volume 3. ASM International, Materials Park. Ohio, 1992.
- 2 ASM Metals HandBook Volume 15 – Casting, objavljeno leta 1988.
- 3 DAVIS J. R., ASM Specialty Handbook, Aluminium and Aluminium Alloys. ASM International, 1993, str. 220–224.
- 4 ASM HANDBOOK, Volume 4, Heat Treating, ASM International, The Materials Information Company, 1991.
- 5 S. C. Weakley-Bollin, W. Donlon, C. Wolverton, W. J. Jones, in J. E. Allison, Modelling the Age-Hardening Behaviour of Al-Si-Cu Alloys, Metallurgical and Materials Transactions A, 35a (2004), str. 2407–2418.
- 6 O. R. Myhr, Ø. Grong, S. J. Andersen, Modelling of the age hardening behaviour of Al-Mg-Si alloys, Acta mater. 49 (2001) str. 65–75.
- 7 <http://www.limatherm.com/img/fck/8910041/limatherm/File/Technical%20information/Aluminium%20specification.pdf>
- 8 S.K. Shaha, F. Czerwinski, W. Kasprzak, D.L. Chen, Work hardening and texture during compression deformation of the Al–Si–Cu–Mg alloy modified with V, Zr and Ti, J. Alloy. Compd. 593 (2014), str. 290–299.
- 9 T. Gao, X. Zhu, Q. Sun, X. Liu, Morphological evolution of ZrAlSi phase and its impact on the elevated-temperature properties of Al–Si piston alloy, J. Alloy. Compd. 567 (2013), str. 82–88.
- 10 S.K. Shaha, F. Czerwinski, W. Kasprzak, D.L. Chen, Tensile and compressive

- deformation behavior of the Al–Si–Cu–Mg cast alloy with additions of Zr, V and Ti, Mater. Des. 59 (2014), str. 352–358.
- 11 S.K. Shaha, F. Czerwinski, W. Kasprzak, J. Friedman, D.L. Chen, Effect of Zr, V and Ti on hot compression behavior of the Al–Si cast alloy for powertrain applications, J. Alloy. Compd. 615 (2014), str. 1019–1031.
 - 12 K.E. Knippling, Development of a Nanoscale Precipitation-strengthened Creepresistant Aluminum Alloy Containing Trialuminide Precipitates, Northwestern University, Evanston, IL, 2006.
 - 13 S.K. Shaha, F. Czerwinski, W. Kasprzak, J. Friedman, D.L. Chen, Ageing characteristics and high-temperature tensile properties of Al–Si–Cu–Mg alloys with micro-additions of Cr, Ti, V and Zr, Materials Science & Engineering A, A 652 (2016), str. 353–364
 - 14 S.K. Shaha, F. Czerwinski, W. Kasprzak, J. Friedman, D.L. Chen, Microstructure and mechanical properties of Al–Si cast alloy with additions of Zr–V–Ti, Materials & Design 83 (2015), str. 801–812
 - 15 S.K. Shaha, F. Czerwinski, W. Kasprzak, J. Friedman, D.L. Chen, Thermal stability of (AlSi)_x(ZrVTi) intermetallic phases in the Al–Si–Cu–Mg cast alloy with additions of Ti, V, and Zr, Thermochemica Acta 595 (2014), str. 11–16
 - 16 W. Kasprzak, B. S. Amirkhiz, M. Niewczas, Structure and properties of cast Al–Si based alloy with Zr–V–Ti additions and its evaluation of high temperature performance, Journal of Alloys and Compounds 595 (2014), str. 67–79
 - 17 A.M.A. Mohamed, F.H. Samuel, Saleh Al Kahtani, Microstructure, tensile properties and fracture behavior of high temperature Al–Si–Mg–Cu cast alloys, Materials Science & Engineering A577 (2013), str. 64–72
 - 18 A.R. Farkoosh, X. Grant Chen, M. Pekguleryuz, Dispersoid strengthening of a high temperature Al–Si–Cu–Mg alloy via Mo addition, Materials Science & Engineering A 620 (2015), str. 181–189
 - 19 A.R. Farkoosh, X. Grant Chen, M. Pekguleryuz, Interaction between molybdenum and manganese to form effective dispersoids in an Al–Si–Cu–Mg alloy and their influence on creep resistance

AKTUALNO / CURRENT

Koledar livarskih prireditev 2018

Datum dogodka	Ime dogodka	Lokacija
26.- 27. 04. 2018	Grosse Giessereitechnische Tagung (Osterreich, Schweiz, Deutschland)	Salzburg, Avstrija
16.-18.05. 2018	17th International Foundrymen Conference	Opatija, Hrvaška
04.- 05.06.2018	10. Industrijski forum IRT	Portorož, Slovenija
12. - 14. 09. 2018	58. IFC - mednarodno livarsko posvetovanje Portorož	Portorož, Slovenije
23.- 27. 09. 2018	73rd World Foundry Congress »Creative Foundry« in Generalna skupščina WFO	Krakow, Poljska
11..10.2018	IFF- International Foundry Forum	Amsterdam, Nizozemska

AKTUALNO / CURRENT**EUROGUSS****Sejem EUROGUSS 2018**

V času od 16. do 18.1.2018 je v Nürnbergu v Nemčiji potekal največji evropski sejem za tlačno litje, na katerem je sodelovala celotna veriga v procesu nastajanja končnega livarskega izdelka - tlačnega ulitka, od proizvajalcev surovin in drugih pomožnih materialov, livarskih in obdelovalnih strojev, do tehnologij in tehnoloških procesov. Poudarek sejma je bil na inovativnih dosežkih na področju tlačnega litja aluminija, cinka in magnezija.

Sejem poteka vsaki dve leti na isti lokaciji in uspešno raste. Tako je denimo na prejšnjem sejmu leta 2016 bilo 578 razstavljalcev, letos pa že 642 iz 33 držav. Več kot polovica udeležencev je prihajala izven Nemčije, od tega največ iz Italije (128), Turčije (23), Avstrije in Španije (19). Na tem uradnem seznamu se je znašla s 14 udeleženci skupaj s Švico tudi Slovenija. Udeležba slovenskih livarn na sejmu se je razširila od zadnje sejske prireditve v letu 2016. Letos so bile prisotne naslednje livarne:

LTH Castings d.o.o., HIDRIA Rotomatika d.o.o., DIFA d.o.o., TALUM d.d., Livarna Gorica d.o.o., Iskra-ISD d.o.o., Kovinoplastika Lož d.o.o. in Blisk Livarstvo.

Razstavni programi EVROGUSS-a so bili predstavljeni v naslednji paleti tehnologij, procesov in izdelkov: livarne za tlačno litje, stroji in naprave za tlačno litje, periferne naprave in sistemi, talilne peči in oprema, kalupi in oprema, hitra izdelava prototipov in orodij, ločilna sredstva in delovni materiali, zlitine in kovine, naknadna obdelava ulitkov, CNC obdelava, cementacija in kaljenje, površinske obdelave, merilna, kontrolna in regulacijska tehnika, nadzor in zagotavljanje kakovosti, preizkušanje materialov, pogonska tehnika, transport in manipulacija, varovanje okolja, odstranjevanje odpadkov, zaščita pri delu, celovite rešitve za livarne, sistemi vodenja za livarne, sistemi DAD, DAM, DNC, CAE, PPS, CAQ IN CASE, metode simulacij in izračunov, raziskave, razvoj in storitve, inženiring, združenja in strokovni tisk.



Letošnja bilanca udeležbe na sejmu znaša več kot 12.000 obiskovalcev, ki niso obiskali samo sejmskih razstavnih prostorov, ampak so se udeležili tudi Mednarodne nemške konference tlačnega litja, ki je potekala sočasno. V programu konference je bilo 23 predavanj, kjer so bili predstavljeni vrhunski dosežki v industriji in razvojne smernice, predvsem z vidika trenutnih trendov na področju Industrija 4.0, globalizacije, električne mobilnosti in njihovih vplivov na proizvodnjo tlačnega litja.

Poročala: mag. Mirjam Jan-Blažič

AKTUALNO / CURRENT**Seminar o okoljevarstveni problematiki**

Vsakoletni seminar o okoljevarstveni problematiki, ki ga Društvo livarjev Slovenije organizira, v skladu s svojim programom dela vsako leto v februarju, je letos potekal pod naslovom: »Novosti in veljavna zakonodaja na področju okoljevarstvene problematike za livarne«. Izvajalec tega seminarja je tudi letos bila Služba za varstvo okolja Gospodarske zbornice Slovenije s predavateljicami: Janjo Leban in Antonijo Božič Cerar. Seminarja se je udeležilo skupno 17 udeležencev iz naslednjih podjetij članic Društva: Almos d.o.o., Cimos d.d., Eta d.o.o., Iskra-ISD d.o.o., Kovis-livarna d.o.o., Livarna Gorica d.o.o., Livarna Titan d.o.o., Litostroj specialna livarna d.o.o., LTH Castings d.o.o., Teklom d.o.o. in Valji d.o.o. Udeleženci so bili seznanjeni z vrstami okoljevarstvenih dovoljenj, ki jih predpisuje Zakon o varstvu okolja in z IED uredbo, ki opredeljuje vrste dejavnosti in naprav, ki lahko povzročajo onesnaževanje okolja večjega obsega skozi emisije v vode in zrak. Po mnenju GZS je uredba strožja od Direktive EU, ker v slovenski pravni red ne prenaša določb, ki omogočajo, da se iz doseganja skladnosti z mejnim vrednostmi izvzamejo srednje komunalne naprave, ki obratujejo manj kot 500 obratovalnih ur. Posledično so strožje tudi zahteve za monitoring emisij, glede na to, da so meritve potrebne za snovi, za katere so z direktivo/uredbo določene mejne vrednosti. Posebno podrobno je bilo obdelana problematika zagotavljanja predhodnih postopkov za presoje vplivov na okolje, kaj je potrebno slediti po gradbenem zakon pri izdaji gradbenega dovoljenja v integralnem postopku, kako je z okoljevarstvenimi dovoljenji za odpadke, vode ali zrak, kako do poročila o stanju podzemne vode ali stanja tal. V nadaljevanju je obravnavana tematika Krožnega gospodarstva in metodologija ReSOLVE (obnavljanje in ponovna vzpostavitev naravnega kapitala, boljša izkoriščenost in izraba izdelkov), kritične surovine in nevarne snovi v proizvodnji.



Udeleženci seminarja so se seznanili tudi z novo Uredbo o emisiji snovi v zrak, iz srednjih kurilnih naprav, plinskih turbin in nepremičnih motorjev.

V programu dela Društva za programsko obdobje 2018 bo Društvo februarja 2019 zopet organiziralo seminar z aktualno okoljevarstveno tematiko, s katero se srečujemo v naših livarnah.

Poročala: mag. Mirjam Jan-Blažić

AKTUALNO / CURRENT**Seje organov Društva livarjev Slovenije**

Februarja vsako leto se izteče enoletno programsko obdobje dela Društva Livarjev Slovenije (v nadaljevanju Društva) in takrat se običajno skličejo na isti dan in na isti lokaciji, pri eni od članic, vsi organi Društva - to so Nadzorni in Izvršni odbor ter Občni zbor. Tako je bilo tudi letos. Seje organov Društva so potekale 28.2.2018 pri članici Društva iz skupine dobaviteljev za livarsko industrijo, Termit d.d. v Moravčah. Najprej se je vršila seja Nadzornega odbora, ki je obravnavala poročilo predsednice o delu Društva s doseženimi finančnimi rezultati v letu 2017. Nadzorni odbor na predložena poročila ni imel pripomb, zato je sprejel sklep, da je delo Društva potekalo v skladu s programom za leto 2017, ki je bil sprejet na lanskoletnem Občnem zboru, finančno poslovanje pa v skladu z računovodskimi standardi.

Po seji Nadzornega odbora je potekala seja Izvršnega odbora in za njo še Občni zbor društva. Takoj po odprtju Občnega zbora je predsednik uprave družbe Termit d.d., Anton Serianz, s PowerPoint predstavitev predstavil podjetje Termit d.d., nato pa so vsi člani občnega zbora imeli možnost ogleda novega dela podjetja – obrata izdelave jeder po »cold box« postopku. Vsi delegati občnega zbora so bili zelo zadovoljni, da so si lahko ogledali nov obrat in s tem bolje spoznali to uspešno podjetje. Predvidoma v naslednji številki livarskega vestnika bomo podjetje in njegove načrte predstavili v posebnem članku.

Na Izvršnem odboru in Občnem zboru društva sta bili kot osrednji točki dnevnega reda obravnavani: Poročilo predsednice o delu in finančnem poslovanju Društva v letu 2017 s stališčem Nadzornega odbora in Program dela Društva za leto 2018.

Iz poročila predsednice je razvidno, da je program dela Društva za 2017, ki je bil sprejet na Občnem zboru 15.2.2017 v KOVIS-LIVARNI d.o.o. v Štorah realiziran v celoti. Izšle so 4 redne številke Livarskega vestnika na koncu vsakega tromesečja. Organizirano je bilo več seminarjev za članice, ki so tematsko bili izbrani kot najbolj aktualni s strani Komisij za železove in neželezove livarne. Vsi seminarji so bili dobro ocenjeni s strani udeležencev in tudi dobro obiskani. Že 58. IFC v Portorožu je bilo lansko leto, sodeč po udeležbi in odzivih, tudi uspešno. Pomembna rast je bila dosežena na strani razstavljalcev na livarski razstavi. Pisarna društva je redno oskrbovala članice Društva s zelenimi članki iz svetovnih livarskih revij, ki prihajajo na Društvo skozi izmenjavo z Livarskim vestnikom. Na ravni Društva je bila pripravljena tudi statistika o doseženi količinski livarski proizvodnji v Sloveniji v letu 2016. Ta se pošilja vsako leto v namene statistike CAEF- evropskega združenja livarn in svetovne livarske statistike livarske proizvodnje, ki jo pripravlja revija druženja ameriških livarn, Modern casting. Na podlagi uveljavljenega statusa Društva, ki deluje v javnem interesu, je Društvo pridobilo na razpisih Javne agencije za raziskovalno dejavnost (ARRS) nepovratna sredstva za pokrivanje dela stroškov izdaje Livarskega vestnika, članarine za članstvo Društva v WFO-Svetovni livarski organizaciji in za udeležbo delegata na generalni skupščini WFO. Društvo je uspešno sodelovalo v okviru načrtovanih aktivnosti z drugimi društvi in livarskim asociacijami po svetu, kar je za izvajanje in uresničevanje njegovih programov še posebno pomembno. Skozi te kontakte se pridobivajo novi kakovostni predavatelji za naše seminarje in osrednjo livarsko prireditev v Portorožu ter članki za Livarski vestnik.



Slika 1. G.
Branka Slabanja,
pooblaščenka Termit
d.d. v IO pri vodenju
delegatov OZ skozi
novi obrat jedrarne.

Predsednica je v nadaljevanju poročala o finančnem poročilu Društva za leto 2017. Doseženi prihodki v letu 2017 so bili za 19 % višji kot v letu 2016. Povečanje je bilo na račun večje udeležbe in razstavljalcev na posvetovanju v Portorožu, večja seminarska aktivnost društva in več oglaševanja v Livarskem vestniku. Največji delež v prihodkih in tudi stroških predstavljajo Livarsko posvetovanje in seminarji. Glede na to, da je Društvo po Zakonu o društvih neprofitna organizacija, je potrebno skrbeti, da so prihodki in stroški približno uravnoteženi.

Poročilo Nadzornega odbora, ki je pregledal finančno poslovanje Društva, je podala predsednica Nadzornega odbora, ga. Simona STEGNE CERAJ, Livarna Gorica d.o.o.. Nadzorni svet je ugotovil, da je delo društva potekalo v skladu s prejetim programom za leto 2017, finančno poslovanje pa v skladu z računovodskimi standardi. Občni zbor je sprejel sklep, da se poročilo o realizaciji programa dela Društva za leto 2017 s poročilom o finančnem poslovanju in ugotovitvami Nadzornega odbora sprejme.

Delegati Občnega zbora so s sklicem seje prejeli podroben predlog programa dela Društva livarjev Slovenije za leto 2018. Program je bil pripravljen na podlagi finančnih okvirjev, ki so že veljali v letu 2017 (ista višina članskih prispevkov, vključno z minimalnim članskim prispevkom, ki je veljal in bo tudi v prihodnje veljal samo za podjetja, ki poslujejo s težavami).

Kot glavne naloge v programu ostanejo: izdaja revije Livarski vestnik, izvedba mednarodnega livarskega posvetovanja Portorož 2018, izmenjava Livarskega vestnika s svetovnimi livarskimi revijami, udeležba na livarskih dogodkih in sodelovanje s sorodnimi društvi, priprava statističnih podatkov o livarski proizvodnji v letu 2017, zagotavljanje delovanja društva v javnem interesu in v povezavi s tem vključevanje v razpise Javne agencije za raziskovalno dejavnost (ARRS). Posebno pomembne naloge v letošnjem programu dela pa so, tako kot lansko leto, na področju organizacije eno- ali dvodnevni seminarjev.

Strokovna komisiji za železove livarne je predlagala organizacijo naslednjih seminarjev: 3D printing RWP GmbH, Formanje in materiali za pečena jedra OGI – Livarski inštitut v Leobnu in načrtovanje ulivnega in napajalnega sistema RWP GmbH).

Komisija za neželezove livarne pa je predlagala naslednje seminarje: hlajenje in mazanje tlačnih orodij - fm. Lethiguel in Baraldi-Olma, nadaljevalni seminar za tlačno litje s praktičnim delom OGI – Livarski inštitut v Leobnu in seminar tlačnega litja za skupino visoko usposobljenih tehničnih kadrov – Buehler UZWIL, Švica).

Seminar na temo okoljevarstvene problematike za livarne v organizaciji Gospodarske zbornice Slovenije je že tradicionalno načrtovan seminar v februarju vsako leto. Za programsko leto 2018 bo organiziran februarja 2019. Če bo interes, se kaže tudi možnost organiziranja seminarja za vse livarne na temo Toplotne obdelave – RWP GmbH, januarja 2019. Dosedanja strategija sodelovanja z ÖGI- Avstrijskim livarskim inštitutom v Leobnu, Avstrija in z RWP GmbH iz Nemčije je pozitivno ocenjena v zadnjih dveh letih, zato je odloženo, da se sodelovanje nadaljuje tudi v letu 2018.



Na občnem zboru sta bili podani naslednji dve pobudi:

- prva je bila naslovljena na obe Komisiji za izbor seminarских tem v smisli, da se v program za naslednje leto vključijo tudi teme, ki se nanašajo na pripravo taline in talilnih peči ter uporabo pomožnih livarskih sredstev,
- druga pa na vodstvo Društva, da se vsa vabila za seminarje in druge prireditve redno pošiljajo tudi članom Društva, ki so dobavitelji za livarsko industrijo.

Dodatne in posebno pomembne naloge pa čakajo Društvo v zvezi s pripravo WFO-Technical foruma, ki bo 18.-20.9.2019 v Portorožu. Predsednica je informirala Občni zbor, da je za oglaševanje in promocijo WFO-Technical forum Portorož 2019 v pretežni meri že pripravljen video. Člane Društva je prosila, da se hitro odzovejo na pisno prošnjo, ki sledi v kratkem, vezano za preverjanje korektnosti podatkov o podjetjih (logotip in ime podjetja), ker je na koncu videa predvidena objava seznama vseh članic Društva z logotipom in imenom podjetja. Logotipi morajo biti ustrezne/profesionalne kakovosti oziroma resolucije za tiskana gradiva.

Občni zbor je na koncu soglasno sprejel program dela Društva za leto 2018 s predlaganimi pobudami.

Predlagano je, da bi bil naslednji občni zbor Društva februarja 2019 v Idriji pri članici Hidria Rotomatika d.o.o.

AKTUALNO / CURRENT**Kaj se dogaja z rastjo svetovne livarske proizvodnje**

»Livarska proizvodnja je po vsem svetu narastla za manj kot pol procenta že drugo leto zapored, v letu 2016.«

V tem članku povzemamo 51. raziskavo, ki je pod naslovom »Cenzus of World Casting« objavila revija Ameriškega združenja livarn Modern Casting, decembra 2017.

V letu 2016 je svetovna livarska proizvodnja znašala skupaj 104.4 mio ton odlitkov in je približno enaka doseženi količinski proizvodnji v letu 2015, ki je znašala 104.1 milijona ton. Stopnja rasti 2014/2015 je znašala 0,4 %, 2015/2016 pa 0,2%. Rast svetovne livarske proizvodnje doživlja stagnacijo.

V predstavljeni zadnji aktualni statistiki svetovne livarske proizvodnje je bilo vključeno 36 držav iz štirih kontinentov. Pri 32 državah, ki so poslale podatke za zadnji dve leti, jih je 14 poročalo o neznatni rasti livarske proizvodnje. Informacije za ta statistični prikaz so bile pridobljene od združenj in organizacij kovinskih materialov iz teh držav. Podatki so odraz obsega transportiranih odlitkov za leto 2016. To so zadnji aktualni podatki, ki so bili na voljo.

Na 10 največjih nacionalnih proizvajalcev odpade kar 91.6 milijona ton livarske proizvodnje od skupno 104.4 milijone ton.

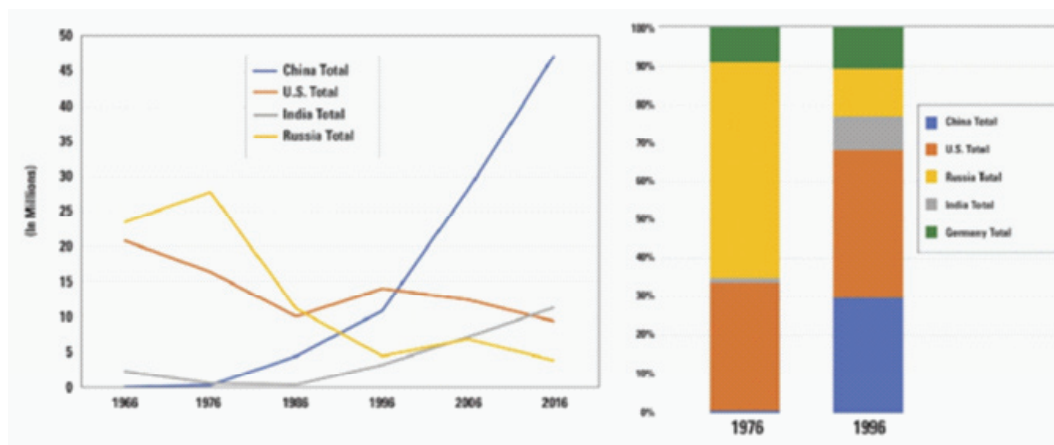
Združenje Kitajskih livarn poroča o 5.4% rasti proizvodnje od leta 2015, kar na koncu znaša 47.2 milijona ton, to pa je 45% celotne svetovne livarske proizvodnje. Indijskih livarski inštitut poroča tudi o 5.4% porastu livarske proizvodnje v Indiji in ta znaša 11.35 milijonov ton. S to količino se uvrščajo pred ZDA, kjer je v letih 2015 in 2016 prišlo sodeč po poslanih podatkih do padca tonaže v primerjavi z letom 2014, zaradi nižje železarske, naftne in kmetijske proizvodnje ter rudarstva. ZDA pričakuje v letu 2018 2.8% porast proizvodnje v tonah in 4.7% porast v prodaji odlitkov.

Preostalih 10 najboljših svetovnih nacij po obsegu količinske livarske proizvodnje v letu 2016 so Japonska z 5.2 mio ton, Nemčija z 5.2 mio ton, Rusija z 3.9 mio ton, Republika Koreja z 2.6 mio toni, Mehika z 2.5mio ton (podatki iz 2015), Brazilija z 2.1 mio ton in Italija z 2.1 mio ton.

Svetovna livarska proizvodnja železovih litin, vključno s sivo, nodularno in temprano litino ter jeklom je bila nižja za 1%. Če upoštevamo, da železove litine predstavljajo 80% celotne tonaže, je ta vpliv bil evidenten pri mnogih državah. Proizvodnja neželeznih litin pa je dosegla 5.7% rast, pri čemer je razpoznaven tudi trend uporabe lahkih kovin tam kjer so bile prej tipično aplicirane železove litine.

Iz zbranih podatkov o svetovni livarski proizvodnji v zadnjih 50-ih letih, ki so bili obdelani s strani revije Modern Casting, lahko primerjamo gibanja livarske industrije po celem svetu v tem obdobju. V grafikonu spodaj je predstavljen 10-letni trend Kitajske in Indije v primerjavi z ZDA in Rusijo.

Grafikon predstavlja 20-letno obdobje, ko se je proizvodnja Indije in Kitajske narasla od zanemarljivega do precejšnjega deleža.



(graf iz revije Modern Casting, izdaja za december 2017)

Skupna svetovna proizvodnja

Siva litina	Nodularna litina	Temprana litina	Jeklo litina	Baker	Aluminij	Magnezij	Cink	Druge neželezne	Skupno
46.241.871	25.467.378	817.620	10.652.260	1.872.213	17.876.299	317.578	1.005.656	128.056	104.378.931

Individualne države

Država	Siva litina	Nodularna litina	Temprana litina	Jeklo litina	Baker	Aluminij	Magnezij	Cink	Druge neželezne	Skupno
Avstrija	43.362	101.770	-	11.284	-	140.840	6.256	-	12.347	314.859
Belgija	26.900	7.200	-	17.400	-	783	-	-	-	52.283
Bosna in Hercegovina	17.500	9.100	-	1.350	-	10.500	-	-	-	38.450
Češka	158.000	51.800	-	61.000	20.000	98.000	-	1.000	-	389.800
Danska	20.400	52.500	-	-	779	3.117	-	-	128	76.924
Finska	15.300	33.500	-	8.400	2.630	2.114	-	86	-	62.030
Francija	531.500	675.200	-	57.000	17.724	324.102	-	20.329	2.340	1.628.195
Hrvaška	31.100	11.800	-	50	221	25.174	-	25	15	68.385
Italija	714.200	381.200	-	57.000	66.081	782.691	7.384	70.474	654	2.079.684
Madžarska	21.700	57.900	-	3.800	1.681	118.246	391	2.985	123	206.826
Nemčija	2.234.900	1.509.900	-	174.200	78.471	1.096.707	17.398	56.247	1	5.167.824
Norveška	10.900	19.200	-	-	6.373	-	-	-	-	36.473
Poljska	48.400	166.200	-	50.500	6.100	331.500	-	7.600	2.900	1.048.800
Portugalska	39.400	93.400	-	7.800	16.000	32.400	-	-	-	189.000
Romunija	20.565	4.306	505	6.893	3.590	82.057	5.000	115	137	123.168
Slovenija	74.235	30.906	3.100	31.344	974	47.584	26	3.494	65	191.781
Srbija	26.368	8.220	-	12.125	2.010	10.120	1	42	-	58.886
Španija	379.900	671.400	-	65.600	15.098	138.591	-	9.079	706	1.280.374
Švedska	159.600	49.500	-	21.215	6.934	63.089	1.482	8.531	-	290.351
Švica	35.400	22.800	-	1.100	2.308	12.902	-	989	-	75.499
Ukrajina**	400.000	120.000	30.000	580.000	60.000	280.000	15.000	25.000	50.000	1.560.000
Velika Britanija	125.800	178.500	-	40.700	8.500	123.200	3.000	7.000	-	486.700

**podatki iz 2015

A) vključuje cev iz litega železa

Azija										
Država	Siva litina	Nodularna litina	Temprana litina	Jeklo litina	Baker	Aluminij	Magnezij	Cink	Druge neželezne	Skupno
Kitajska	20.350.000	13.200.000	600.000	5.100.000	800.000	6.900.000		250.000		47.200.000
Indija	7.890.000	1.180.000	50.000	1.010.000		1.220.000				11.350.000
Japonska A)	2.224.000	1.301.300	41.000	150.100	77.400	1.380.570		23.530	5.400	5.203.300
Koreja	1.073.500	707.800	3.000	163.100	26.300	623.200	13.100			2.610.000
Pakistan	142.000	24.540		42.600	12.400	16.300			2.200	240.040
Rusija*	2.000.000	380.000	20.000	800.000	100.000	450.000	100.000	50.000		3.900.000
Tajvan	510.425	187.711		66.028	32.662	303.020				1.099.846
Tajska**	72.400	28.800	29.500	29.800	26.100	105.400		24.000		316.400
Turčija	650.000	655.000		166.000	22.500	370.000		35.000		1.898.500

*podatki iz 2014

Afrika										
Država	Siva litina	Nodularna litina	Temprana litina	Jeklo litina	Baker	Aluminij	Magnezij	Cink	Druge neželezne	Skupno
Južna Afrika	145.000	163.200		85.000	7.000	24.000		500		424.700

Število livarn po državah

Država	Siva litina	Jeklo litina	Neželezne	Skupno 2016
Avstrija	20	3	35	58
Belgija	10	5	6	21
Bosna in Hercegovina	5	2	4	11
Brazilijska	408	153	484	1.045
Češka	71		37	108
Danska	8		7	15
Finska	11	7	13	31
Francija	86	34	291	411
Hrvaška	26	5		31
Indija				4.600
Italija	140	37	878	1.055
Japonska**				1.612
Južna Afrika		79	86	165
Kanada*				175
Kitajska	14.000	4.000	8.000	26.000
Koreja	523	141	235	899
Mehika**				681
Madžarska	28	9	87	124

Država	Siva litina	Jeklo litina	Neželezne	Skupno 2016
Nemčija	195	46	340	581
Norveška	6	3	6	15
Pakistan	1.580	55	170	1.805
Poljska	185	36	240	461
Portugalska	23	8	57	88
Romunija	35	20	50	105
Rusija				1.140
Srbija	11	8	17	36
Slovenija				46
Španija	45	29	52	126
Švedska	27	12	59	98
Švica	15	2	30	47
Tajska*	280	40	260	580
Turčija	439	105	383	297
Ukrajina	270	280	290	840
Velika Britanija	216		204	420
ZDA	625	349	987	1.961
SKUPNO	19.288	5.468	14.494	46.318

*podatki iz 2014, **podatki iz 2011 **podatki iz 2015



DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE
SLOVENIAN FOUNDRYMEN SOCIETY

vas vljudno vabi na / invites you to

58. IFC - MEDNARODNO LIVARSKO POSVETOVANJE
58th IFC - INTERNATIONAL FOUNDRY CONFERENCE

PORTOROŽ 2018

s spremljajočo razstavo / with accompanying exhibition

12.-14. september 2018

Informacije/Contact: Društvo livarjev Slovenije,
Lepi pot 6, p.p. 424, 1001 Ljubljana
T: 01 2522 488, F: 01 4269 934 drustvo.livarjev@siol.net, www.drustvo-livarjev.si

ZAPISKI / NOTES