

LIVARSKI VESTNIK

Izdajatelj / Publisher:

Društvo livarjev Slovenije
Lepi pot 6, P.P. 424, SI-1001 Ljubljana
Tel.: ++ 386 1 25 22 488
Fax: ++386 1 426 99 34
E-mail: drustvo.livarjev@siol.net
www.drustvo-livarjev.si

Glavni in odgovorni urednik /**Chief and responsible editor:**

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

Tehnično urejanje / Technical editing:

mag. Mirjam Jan-Blažić

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. Faruk Unkić, Univerza Zagreb
dr. Milan Lampič, Fritz Winter, Stadtallendorf

Prevod v angleški jezik /**Translation into English:**

prof. dr. Andrej Paulin, Darja Srakar-Tomanič

Lektorji / Lectors:

Angleški jezik / English:
dipl. ing. Peter Haensel, Düsseldorf
Slovenski jezik / Slovene:
prof. Janina Šifrer

Tisk / Print:

Fleks d.o.o.

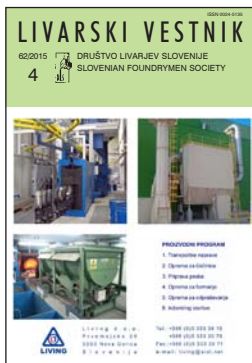
Naklada / Circulation:

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: september 2015



Naslov/Address:

Living d.o.o.
Prvomajska 39
SI-5000 Nova Gorica

Direktor: Aleksander Ferjančič

T: +386 (0)5 33 33 810

F: +386 (0)5 33 33 071

E: info@living.si

<http://www.living.si>

VSEBINA / CONTENTS

Stran / Page:

T. Trout, K. Ripplinger, A. Sholapurwalla, S. Scott, S. Mitra,
M. Diehm:

**Uporaba simulacije za pretvarjanje ulivanja v kokilo z
vakuumskim odstranjevanjem zraka v ulivanje v kokilo
s klasičnim zračenjem / Conversion of a Vacuum-Assist
Casting to a Conventionally Vented Casting with the Aid
of Casting Simulation**

176

Turen, Y., Elen, L.:

**Vpliv dodatkov antimona (Sb) na mikrostrukturo in
mehanske lastnosti zlitine AZ91 / Effect of Antimony
Additions on Microstructure and Mechanical Properties
of AZ91 Alloy**

187

Zdenka Zovko Brodarac, Davor Stanić:

**Karakterizacija lastnosti tlačno ulite inovativne zlitine
AlSi9MgMn / Characterization of Innovative High Pressure
Die Casting AlSi9MgMn Alloy Properties**

195

Franč Zupanič, Tonica Bončina, Christian Gspan:

**Izločki v aluminijevi kvazikristalni zlitini / Precipitates in
an aluminium quasicrystalline alloy**

209

AKTUALNO / ACTUAL

Sodelovanje društva v organih WFO 219

55. mednarodno livarsko posvetovanje Portorož 2015 220

Poročilo o seminarjih Društva livarjev Slovenije v letu 2015 232

Koledar dogodkov 233

56. mednarodno livarsko posvetovanje Portorož 2016 /
56th International Foundry Conference Portorož 2016 234

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

Uporaba simulacije za pretvarjanje ulivanja v kokilo z vakuumskim odstranjevanjem zraka v ulivanje v kokilo s klasičnim zračenjem

Conversion of a Vacuum-Assist Casting to a Conventionally Vented Casting with the Aid of Casting Simulation

Izvilleček

V današnjih konkurenčnih razmerah je sposobnost izdelati visokokakovostne tlačno ulite sestavne dele ob sočasnem zmanjševanju proizvodnih stroškov in časa, potrebnega za razvijanje, izziv za sodobno livarsko industrijo. Tako pri snovanju novih delov kot pri ponovnem konstruiranju takih delov omogoča računalniško krmiljeno modeliranje veliko prihrankov tako med fazo razvijanja kot v fazi izdelovanja. Z odstranjevanjem napak v ulitkih in s tem zmanjšanje izmečka ter njegove predelave lahko livarji izboljšajo kakovost in stalnost kakovosti izdelkov ter pridejo do boljših konstrukcij, ki omogočajo boljše izkoristke. Simuliranje ulivanja kot orodje za napovedovanje poteka procesa naj se uporabi za celoten proces, za zapolnjevanje forme, napovedovanje livarskih napak, napredne analize, kot so analize toplotnih napetosti in popačenja oblik strojnega dela, kar pomaga pri ustreznem odločanju že v prvih fazah izdelovalnega procesa. Proces ulivanja zajema tudi predhodne faze, kot sta izdelava ulivnega in dovodnega sistema, konstruiranje ulitka, in faze, ki ulivanju sledijo, kot so čiščenje, toplotna obdelava in strojna obdelava, ki določajo glavne lastnosti strojnega dela. Zato bodo ti različni koraki vplivali tudi na učinkovito delovanje dela, ki je bil vgrajen v končni izdelek in izpostavljen dejanskim razmeram pri uporabi.

Pripravek daje pregled zadnjega razvoja v podjetju Honda Engineering of North America z ekspertizo simulacije, narejene v ESI North America, ki so ga pospešile zahteve industrije. Poudarek je bil na nedavnih raziskavah, ki omogočajo uspešno spreminjanje obstoječega ulivanja v kokilo z vakuumskim odstranjevanjem zraka v ulivanje v kokilo s standardnim zračenjem.

Medtem ko vakuum potencialno pomaga obvladovati zrak v votlinah kokile, predstavlja dodatne stroške z vakuumskimi komponentami, priključenimi na kokilo, in opremo za ustvarjanje vakuumu. Za ta primer študija predstavlja pregled učnih lekcij, ki smo se jih naučili pri preklopu na vakuum na klasično zračenje kokile, kako se je simulacija uporabila za ugotavljanje in popravljanje možnih napak pri ulivanju zaradi sprememb pri upravljanju z zrakom in koristna navodila za uspešno uporabo klasičnega zračenja.

Ključne besede: simulacija ulivanja, konstrukcija kokile, ulitki, tlačno ulivanje, toplotne napetosti, tlačno ulivanje v vakuumu.

Summary

In the current competitive environment, the capability to produce die casting components of high quality while at the same time reducing production cost and development times is a

challenge the foundry industry faces today. Whether it is the design of a new component or redesign of existing products, computer aided modeling has proved that there are several cost savings to be gained in the process development and production stage. By eliminating product defects and reducing scrap and rework, the foundrymen can achieve improved and more consistent product quality and more efficient designs that produce higher yields.

Casting simulation provides predictive evaluation tools to be applied on the entire casting process, including filling and solidification defects, and also advanced analysis like thermal stresses & part distortion to assist in making the appropriate decisions at an early stage of the manufacturing process. The casting sequence also involves upstream steps like gating and die design operations and downstream steps like trimming, heat treatment & machining operations that will determine the main properties of the component. As a consequence these different steps will influence as well the effective performance of the part once assembled in the final product and submitted to real conditions of use.

This presentation provides an overview of latest developments, driven by the requirements from the industry with a focus on a recent work involving successful conversion of an existing vacuum-assist die casting to a conventionally vented die design at Honda Engineering of North America with the simulation expertise from ESI North America.

While vacuum assist is a potential solution to manage the air in the die cavities, there is an added cost in the vacuum components connected to the die cavity, and die machine "infrastructure" in providing the equipment to create the vacuum in the die. This case study provides an overview of the lessons learned in making the switch from a vacuum to conventional venting die design, how simulation was used to identify & correct potential defects in the casting due to the air management change, and helpful guidelines for successful implementation of conventional venting.

Key words: casting simulation, die design, die castings, HPDC, thermal stresses, vacuum die casting

1 Uvod

V današnjih konkurenčnih razmerah je sposobnost izdelati visokokakovostne tlačno ulite sestavne dele ob sočasnem zmanjševanju proizvodnih stroškov in časa, potrebnega za razvijanje, izziv za sodobno livarsko industrijo. Tako pri snovanju novih delov kot pri ponovnem konstruiranju takih delov omogoča računalniško krmiljeno modeliranje veliko prihrankov tako med fazo razvijanja kot v fazi izdelovanja. Z odstranjevanjem napak v ulitkih in s tem zmanjšanje izmečka ter njegove predelave lahko livarji izboljšajo kakovost in stalnost kakovosti izdelkov ter pridejo do boljših konstrukcij, ki omogočajo boljše

1 Introduction

In the current competitive environment, the capability to produce die casting components of high quality while at the same time reducing production cost and development times is a challenge the foundry industry faces today. Whether it is the design of a new component or redesign of existing products, computer aided modeling has proved that there are several cost savings to be gained in the process development and production stage. By eliminating product defects and reducing scrap and rework, the foundrymen can achieve improved and more consistent product quality and more efficient designs that produce higher yields.

izkoristke. Pri načrtovanju ulivnega sistema in dovodnih kanalov za tlačno litje je treba zelo paziti, da je tok taline tak, da se vanjo ujame čim manj zraka. Idealni primer je tisti, ki izrine ves zrak v izhod iz kokile in zračnike. Priljubljena metoda za upravljanje z zrakom je, da se odstrani čim več zraka, kar je bila tudi ideja uporabe vakuumiranja kokile. Medtem ko vakuum potencialno pomaga obvladovati zrak v votlinah kokile, predstavlja dodatne stroške z vakuumskimi komponentami, priključenimi na kokilo, in opremo za ustvarjanje vakuumu.

Napredne računalniško podprte tehnologije modeliranja procesov dajejo danes koristne informacije livarskemu inženirju že v prvih fazah razvijanja izdelka. To skrajša čas med fazo zasnove in fazo izdelave v življenjskem ciklu novega izdelka. Podjetje Honda Engineering of North America je spremenilo obstoječ sistem ulivanja v kokilo z vakuumskim odstranjevanjem zraka v ulivanje v klasično zračeno kokilo. Več konstrukcijskih izzivov je bilo povezanih z uporabo vakuumirane kokile. Tudi prihranki časa in zmanjšanje stroškov so motivirali podjetje Honda Engineering of North America, da spremeni več kokil z vakuumskim odstranjevanjem zraka v klasično zračene kokile.

Da bi lahko izkoristili prednosti stroškovnega izboljšanja pri prehodu na klasično zračenje kokil, so morali v podjetju Honda Engineering of North America rekonstruirati celotne ulivne sisteme in dovodne sisteme, da so zagotovili podobne, če ne celo boljše kakovosti delov kot pri ulivanju v kokilo z vakuumskim odstranjevanjem zraka. Rezultat je bila uspešna spremenjena konstrukcija orodja na klasično zračenje, ki je že pri prvih poskusih dalo dobre ulitke.

Prispevek predstavlja pregled učnih lekcij, ki smo se jih naučili pri prekloplitvi z vakuumu na klasično zračenje kokile, kako

When designing the gating, runner, and overflows of a high pressure die casting, great care is taken in creating a fluid pattern that minimizes air entrapment, with the ideal pattern being one that "pushes" all of the air to available overflows and vents. A popular method for managing the air is to simply remove as much of it as possible, which is the idea behind using vacuum assist. While vacuum assist is a potential solution, there is an added cost in the vacuum components connected to the die cavity, and die machine "infrastructure" in providing the equipment to create the vacuum in the die.

Thanks to advanced computer aided technologies process modeling provides valuable information that facilitates participation by the foundry engineer early in the product development stage. This reduces the time between the concept stage and production stage in the life of a new component. Honda Engineering of North America converted an existing vacuum-assist die casting to a conventionally vented casting. There are several design challenges associated with using a vacuum vented design. Also, the time and cost saving benefits associated with moving to a conventional venting system motivated Honda Engineering of North America to convert several of their vacuum assisted die design to conventional vented design.

But in order to take advantage of these cost benefits of moving to a conventional die design, Honda Engineering of North America team had to redesign some of their gating, runner and overall system to guarantee similar if not better part quality as the vacuum assisted die design. The result was a successful tooling re-design using only conventional venting which produced good castings from the first run.

This paper describes the lessons learned in making the switch from a vacuum to conventional venting die design, how

se je simulacija uporabila za ugotavljanje in popravljanje možnih napak pri ulivanju zaradi spremenjenega upravljanja z zrakom in koristna navodila za uspešno uporabo klasičnega zračenja.

2 Izzivi zaradi slabosti sedanjega sistema s kokilo z vakuumskim odstranjevanjem zraka

S sedanjo konstrukcijo vakuumskega odstranjevanja zraka iz kokile je bilo več težav, zato je podjetje Honda Power Equipment opustilo uporabo vakuuma. Prva omejitev so bili stroški vzdrževanja teh kokil. Odločitev, da se preide z vakuumskega odstranjevanja zraka na klasično zračenje, je bila sprejeta v podjetju Honda Manufacturing zaradi naslednjih vzrokov: prihranek okoli 2000–3000 USD za vsak hladilni zračnik. Prihranki stroškov so se seštevali in za zapleteno kokilo so kmalu dosegli več deset tisoč USD. Hladilno zračenje tudi zmanjšuje zmožnost dobrega spenjanja kokile, če se kaj dodaja na stično površino. Zato je spenjanje zahtevalo več energije. Drugi vzrok za prehod na klasični način zračenja je bilo neugodno nastajanje obrobkov, povezano z vakuumskim sistemom. Kot se vidi na slikah 1 in 2 je vakuumski sistem povzročil čezmeren nastanek obrobkov v ulivnem sistemu, dovodnih kanalih in območjih zračnikov. To je povzročalo, da so obročki začeli vdirati v votline vodil in kokile se niso več dobro zapirale, kar je pomenilo še več obrobkov v naslednjih ciklih.

Glavni izziv pri spremembi sistema z vakuumskim odstranjevanjem zraka v sistem s klasičnim zračenjem je bil poskus ohraniti čim več sedanjih dovodnih kanalov in ulivnega sistema, da bi se izognili popolni spremembi konstrukcije kokilnih vložkov in nosilnih blokov. V podjetju Honda

simulation identified was used to correct potential defects in the casting due to the air management change, and helpful guidelines for successful implementation of conventional venting.

2 Challenges in Current Vacuum Assisted System

There were several challenges associated with the current vacuum assisted die design so Honda Power Equipment wanted to move away from using vacuum. The primary constraint being the cost maintenance of these dies. A decision to convert the vacuum assisted dies to traditional venting systems was made at Honda Manufacturing due to the following reasons; cost saving of approx. \$2,000 to \$3,000 on each chill vent. This cost saving would quickly add up and for a complex die as this could amount to tens of thousands of dollars. Chill venting also diminishes clamping capacity by adding to the surface area. This would lead to more power required for clamping. Another reason to move to a more conventional approach is to prevent bad flashing associated with vacuums design. As seen in Figure 1 and Figure 2, vacuum systems can lead to excessive flashing in the chill runner and chill vent area. This in turn leads to the flash starting to enter into the guide pin holes creating a larger issue by not allowing the dies to close correctly thereby leading to more flashing in the subsequent die cycles.

The main challenge of converting from a vacuum assist to a conventional venting system was to try and retain as much of the current runner and gating system as possible so as to avoid a complete redesign of existing die inserts and die holder blocks. Computer modeling was used by Honda Engineering of North America to achieve



Slika 1: Obrobek v kanalu hladilnega zračnika

Figure 1: Flashing in Chill Vent Runner



Slika 2: Čezmerni obrobek v hladilnem zračniku

Figure 2: Excessive Flashing seen in Chill Vent

Engineering of North America so uporabili računalniško simuliranje, da so dosegli ta cilj. Računalniško simuliranje se je izkazalo za učinkovito orodje v livarski industriji s ciljem, da se natančno modelirajo vse fizikalne zakonitosti procesa tako, da se identificirajo in učinkovito krmilijo pomembne spremenljivke. Z opazovanjem celotnega procesa litja v virtualnem okolju na računalniku postanejo težave, povezane s tokovi taline, potek strjevanja in popačenje oblike ulitka livarskemu inženirju nazorne. Simulacija omogoča tudi preizkušanje konstrukcij novih sistemov ulivanja in zračenja ter novih tehnik simulacije poleg spreminjanja tehničnih konstrukcij v zgodnjih fazah razvijanja. S tradicionalnimi pristopi bi bilo to skoraj nemogoče zaradi velikih stroškov po metodi poskusa in napake med proizvodnjo.

Da je računalniško podprto modeliranje zelo uporabno pri konstruiranju, mora izpolnjevati veliko nalog. Simulacija procesov mora biti sposobna natančno modelirati lastnosti za široko območje livarskih zlitin. Tudi procesne razmere

this goal. Computer simulation has proven to be an effective tool in the foundry industry with a goal to accurately model all of the underlying physics of the process so that important process variables may be identified and effectively controlled. By visualizing the entire casting process in a virtual environment on the computer, problems associated with fluid flow, solidification and part distortion become apparent to the foundry engineer. Simulation also allows the testing of novel gating and venting designs and process modeling techniques, along with re-engineering designs in the early stages of development. Within the traditional approach, this would be undesirable due to the high cost associated with trial and error on the production floor.

For computer aided modeling to be successfully implemented into the design stage, it should perform a wide variety of tasks. Process simulation must have the capability to accurately model the properties of a wide range of casting alloys. Also, process conditions like initial melt temperatures, slow shot to fast shot

kot začetna temperatura taline, prehod s počasnega v hitro vbrizganje, hitrosti bata, predgrevanje kokile morajo biti opisane tako, kot bi jih predstavil strežnik procesa v livarni. Pri sedanjem konstruiranju mora programska oprema za računalniško modeliranje omogočiti, da se kot končni rezultat dobi ocena, kakšne so zmožnosti modeliranja pri spreminjanju konstrukcije vakuumirane kokile v konstrukcijo kokile s standardnim zračenjem in istočasno biti sposobna izdelati še analizo napetosti, ki pomaga razumeti, kakšne sile delujejo na nosilce kokile. To je kritično pri napovedi, ali se bo kokila deformirala med obratovanjem in ali se bodo pojavljali čezmerni obročki.

Ta prispevek ni osredotočen na sedanji vakuumski sistem, ampak na ponovno konstruiranje ulivnega sistema z bolj klasičnim zračenjem kokile in na težave, ki so povezane s to spremembo.

3 Sprememba sistema z vakuumskim odstranjevanjem zraka v sistem s klasičnim zračenjem

Odločilo se je, da se v osnovi ohrani obstoječi ulivni in dovodni sistem v kokili z vakuumskim odstranjevanjem zraka. Po pričakovanju so se občutno zmanjšale težave z obročki, nastopile pa so nove težave z vključki zraka in hladnimi zv. Slika 3 kaže tip napak (hladni zvar), ki so nastale v ulitkih, ko se je prešlo nazaj na klasični način zračenja.

Ujet zrak ali zračni vključki predstavljajo večino napak pri tlačnem litju in s tem izmeček. Postavitev mesta vstopa, konstrukcija vstopa in način prelivanja taline so kritični koraki pri krmiljenju zapolnjevanja zadnjih območij kokile in zmanjševanju napak v ulitku. Taka sprememba konstrukcije bi lahko vodila do velikega izmečka zaradi napak v izvedbi ulivnega sistema in s tem

transitions, piston velocities, and preheat of the die must be described just as the operator would on the shop floor. In the current design, the computer modeling software should be able to consider the ability to model vacuum assist and venting design changes on the final outcome and at the same time be able to model stress analysis to assist in understanding the forces on the die holders. This is critical in predicting whether the dies will deform under operating conditions to create excessive flashing.

This paper does not focus on the current vacuum system but on the gating redesign to convert to a more traditional venting design configuration and problems associated with making this change.

3. Redesign of Vacuum Venting to Convention Venting System

In the baseline design it was decided to use the existing gating and runner design as in the vacuum assist process. As expected, the flash problem vastly improved but created issues with air entrapment and misruns. Figure 3 shows the type of defects (misrun / cold spot) seen in the casting when moving to a traditional venting design.

Trapped air or air entrapment contributes to a majority of high pressure die casting defects and rejections. The placement and design of gates and overflows is a critical step in controlling the last areas to fill and reducing part defects. This redesign could lead to a high reject rate due to the gating design imperfections and subsequent filling pattern problems. Instead of retooling the die several times in trial-and-error fashion, the gating was redesigned with the assistance of computer modeling. In order to understand the problems associated with moving from a vacuum assist to a conventional system



Slika 3: Hladni zvar pri klasični konstrukciji zračenja

Figure 3: Misruns in conventional venting design

kasnejših težav pri zapolnjevanju forme. Namesto da bi večkrat predelali kokilo po metodi poskusa in napake, smo za spreminjanje izvedbe ulivnega sistema uporabili računalniško modeliranje. Da bi razumeli težave, povezane s preходом z vakuumskega odstranjevanja zraka na klasično zračenje, smo pripravili računski model, ki povezuje obstoječo konstrukcijo in hitro analizo, ter uporabili programsko opremo za livarske simulacije ProCAST.

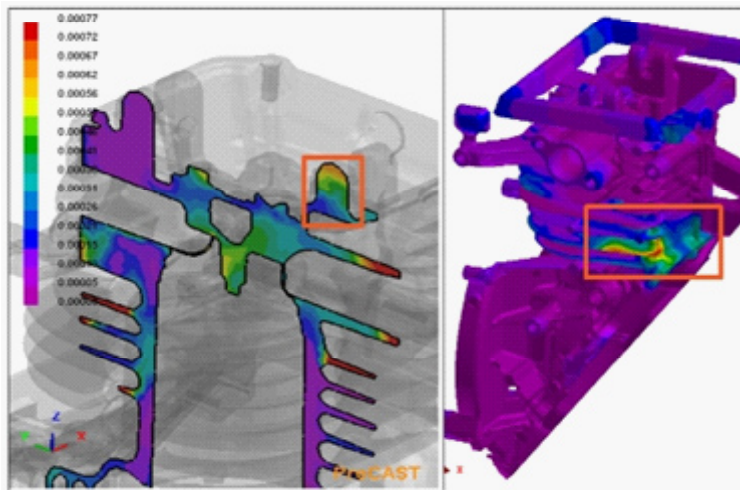
Osnovna razporeditev kaže velike predele poroznosti v območju nihajnega vzvoda in hladilnega rebra, kot kaže slika 4. To so kritična območja v ulitku in treba je bilo dobro razumeti, kaj povzroča ta zaplet. Računalniški model je jasno pokazal, da je bila staljena kovina najprej potisnjena v območje preliva, šele potem pa se je vrnila v nihajni vzvod, kar je pripeljalo do ujetja zraka. Nihajni vzvod se je tudi zadnji strdil, kar je povzročilo poroznost v njem.

Glavni ugotovljen vzrok za to težavo je bil sedanji ulivni sistem iz dveh vstopov na vrhu, ki sta nepravilno usmerjala tok

a computational model was put together based on the existing design and quick analysis was run using ProCAST, a casting simulation modeling software.

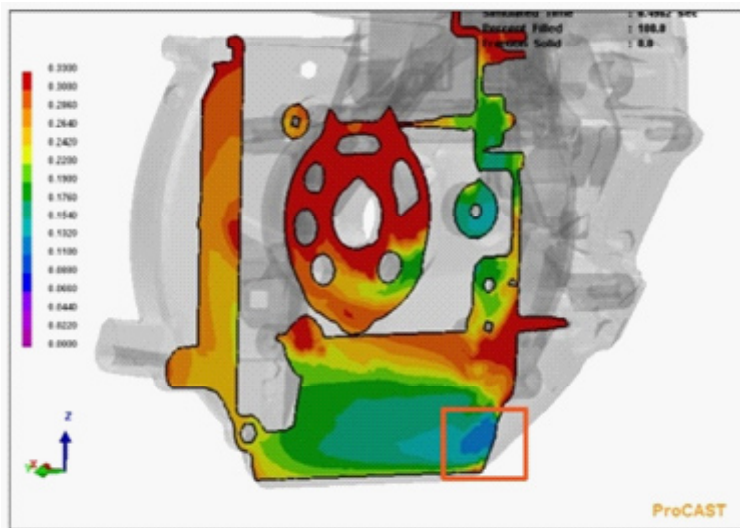
The baseline configuration showed considerable porosity issues in the rocker arm area and the cooling fin areas as shown in Figure 4. These are critical areas in the casting and a clear understanding of what was causing this problem was needed. The computer model clearly showed that the molten metal was being forced in the overflow area first and then the metal was backtracking to the rocker arm, leading to air entrapment. The rocker arms were also the last to freeze leading to porosity issues.

The main reason identified for this problem was the current gating design of the top two gates which were channeling the flow incorrectly into the die cavity. Figure 5 demonstrates some of the challenges faced in moving from a vacuum system to a conventional system. Flow related defects like mixing of the hot and cold metal pushing against may lead to lamination



Slika 4: Osnovna analiza kokile pokaže ujetje zraka v nihajnem vzvodu (levo) in hladilnih rebrih (desno)

Figure 4: Baseline die analysis shows air entrainment in the rocker arm (left) & cooling fins (right)

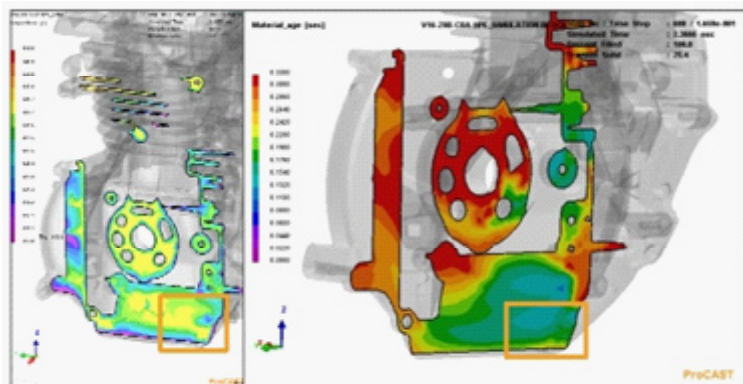


Slika 5: Osnovna analiza kokile kaže različno stare strjene taline okoli kritičnega območja, kar vodi do nepravilne uravnoteženosti toka taline

Figure 5: Baseline die analysis shows different material age around the critical section leading to improper flow balancing

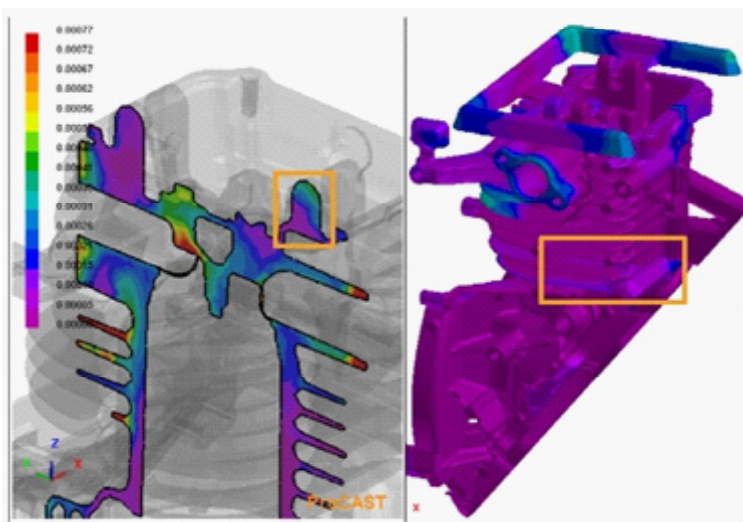
taline v votlino kokile. Slika 5 prikazuje nekaj izzivov, ki nastanejo pri prehodu s sistema vakuumskega odstranjevanja zraka na klasični sistem zračenja. Napake, povezane s tokom taline, kot je mešanje vroče in hladne taline pri potiskanju, lahko povzročijo plastovitost, ki je škodljiva za kakovost končnega ulitka. Mešanje vroče in hladne kovine se pri simulaciji jasno vidi iz črte med staro in novo talino, ki kaže vročo (novejšo) in hladno (starejšo) talino

behaviour which is detrimental to the final part quality. The hot & cold metal mixing is clearly evident in the simulation from the Material Age contour, indicating hot (lower age) & cold (higher age), metal in the critical section, similar to the misrun shown in Figure 3. This is a direct influence of unbalanced gating design and the inability of the venting system to remove the air out of the system effectively.



Slika 6: Končna konstrukcija kaže izboljšane temperaturne gradiente (na levi) in pomeni enakomerno porazdelitev starosti materiala (na desni), kar vodi do manj mešanja in do uravnoteženega toka taline.

Figure 6: Final design shows improved Temperature Gradients (on left) means more uniform distribution of Aging material (on right) leading less mixing & balanced flow behaviour



Slika 7: Spremenjena konstrukcija kaže manjše ujetje zraka na mestu nihajnega vzvoda (levo) in hladilnega rebra (desno)

Figure 7: Modified design showing lower Air entrainments at the rocker arm (on left) & cooling fin locations (on right)

v kritičnem delu, podobno kot pri hladnem zvaru na sliki 3. To je neposreden vpliv neuravnoteženega ulivnega sistema in nezmožnosti učinkovitega odstranjevanja zraka iz sistema.

Nujna bi bila sprememba izvedbe ulivnega in dovodnega sistema ter mogoče tudi mestapreliva. Računalniško modeliranje se je večkrat ponovilo, da so se ugotovile točke zastajanja taline in potrebni so bili spremenjeni prerezi v ulivnem sistemu, da se uravnotežijo tokovi taline v določenih območjih. Taka izboljšana toplotna bilanca je pripeljala do pravilnega temperaturnega

A redesign of the gating and runner system and perhaps overflow placement would typically be needed. Several iterations were run in the computer model to ascertain the choke points and changes were made to make the gates wider or choke them to change the flow balance in certain regions. This improved the thermal balance leading to proper temperature gradient through the troubled areas eliminating the porosity problem as shown in Figure 6.

The redesign of the gating design showed less air entrainment than the baseline analysis. Particle velocity confirmed

gradienta v problematičnih območjih, kar je odpravilo tudi težavo nastanka poroznosti, kot kaže slika 6.

Nova izvedba ulivnega sistema kaže na manjše ujetje zraka kot pri osnovni analizi. Hitrosti delcev so potrdile to obnašanje pri tokovih taline. Občutno izboljšanje se vidi v območju nihajnega vzvoda in rebra. Območje nihajnega vzvoda se zapolnjuje počasneje kot prej zaradi nove konstrukcije ulivnega sistema, kar vodi do ujetja manj zraka, ker ima zrak sedaj možnost, da učinkoviteje uide skozi zračnike kot pri osnovni izvedbi. Nova konstrukcija spodnjih vhodov tudi vodi do bolj neposrednega toka taline z dna proti vrhu, ko tok potiska zrak/ujete pline navzgor proti prelivom. Slika 7 kaže spodnje zračne žepe v popravljeni izvedbi ulivnega sistema glede na prvotno konstrukcijo (slika 4) na mestih, kjer sta nihajni vzvod in rebro, kar potrjuje, da nova izvedba omogoča boljšo kakovost ulitka. Dodani so bili dodatni zračniki, da se odstranijo žepi ujetega zraka še v drugih območjih. Predlagano je bilo tudi povečanje prelivnega kanala, da se iz kokile odstranijo ujeti plini. S temi spremembami se je tudi tvorba obrobkov občutno zmanjšala v primerjavi s kokilo z vakuumskim odstranjevanjem zraka.

4 Povzetek in sklep

Ko smo spremenili ulivni in zračilni sistem, se je odstotek dobrih ulitkov povečal s 70 % na 81,5 %, čas izpada proizvodnje se je zmanjšal z 71,5 % na 89,5 % in krajši čas, potreben za odstranjevanje obrobkov s kokile, je pomenil manj dela z obrezovalno stiskalnico. Ta sprememba konstrukcije kokile je pripeljala do znižanja stroškov v primerjavi s sedanjim procesom vakuumskega zračenja. Podjetje Honda Manufacturing je sedaj spremenila 4 kokile z vakuumskim odstranjevanjem zraka na

this flow behaviour. There was a significant improvement seen near the rocker arms and fin area. The rocker arm area filled slower than before due to the gating redesign leading to less air entrapment due to the ability of the air to escape through the vents more effectively than the baseline design. The redesign of the bottom gates also leads to a more directional flow from bottom to top pushing the air/trapped gases upwards to the overflows. Figure 7 shows lower air entrainments in the modified gating design at the rocker arm & cooling fin locations when compared to the baseline design in Figure 4, thereby confirming that the redesign will lead to better part quality.

Additional gas vents were added to eliminate air entrapment pockets in other areas of the component. Also an increased overflow runner size was proposed to eject the trapped gases out of the die. Due to this redesign the flashing situation with the vacuum design was vastly improved too.

4 Summary & Conclusion

After implementing the modification in the gating the venting system, the "as cast" good part percentage increased from 70% to 81.5%. Down time ratio improved from 71.5% to 89.5% and less time cleaning flash from die meant less trouble in trim press. This redesign led to a significant cost saving over the existing vacuum assist process. Honda Manufacturing has currently converted 4 of their vacuum assisted die design to conventional system leading to even more significant cost, time and energy savings.

Advanced casting simulation tools like ProCAST allow the foundry engineer to quickly bridge the gap between design and manufacturing. Optimization or improved efficiency during the manufacturing cycle

klasično zračenje, kar je pripeljalo do še občutnejšega zmanjšanja stroškov in večjih časovnih ter energijskih prihrankov.

Napredno orodje za simulacijo litja ProCAST omogoča livarskemu inženirju, da hitro premosti vrzel med načrtovanjem in proizvodnjo. Optimizacija ali izboljšana učinkovitost med proizvodnim ciklom vodi do občutnih prihrankov časa in stroškov. Računalniška analiza je sredstvo za preverjanje idej konstruiranja in ugotavljanja učinkov »kaj, če« z minimalnimi stroški, ker se izognemo dolgotrajnim in dragim predelavam in ponovnim izdelavam orodja.

leads to substantial time and cost savings. Computer analysis provides the means for verifying design ideas and viewing the effects of "what ifs" at minimal costs, by avoiding time-consuming and expensive rework and retooling.

Vpliv dodatkov antimona (Sb) na mikrostrukturo in mehanske lastnosti zlitine AZ91

Effect of Antimony Additions on Microstructure and Mechanical Properties of AZ91 Alloy

Izvleček

Obdelan je bil učinek dodatka antimona (0,2, 0,5 in 1,0 mas. %) na mikrostrukturo in mehanske lastnosti zlitine AZ91. Dodatek antimona udobni mikrostrukturo v ulitem stanju in tudi nastale intermetalne delce Mg_3Sb_2 . Ugotovljeno je bilo, da se trdnostne lastnosti z dodanim Sb povečajo, a duktilnost rahlo zmanjša. Najvišje trdnostne lastnosti so bile dosežene pri dodatku 0,5 mas. % Sb.

Ključne besede: magnezij, zlitina AZ91, mikrostruktura, mehanske lastnosti

Abstract

In this study, effect of antimony addition (0.2, 0.5 and 1 wt.% Sb mass fraction) on the microstructure and mechanical properties of AZ91 alloy has been studied. Addition of Sb resulted in there finement of the as-cast structure and also the formation of Mg_3Sb_2 intermetallic particles. The strength properties are found to increase in Sb added alloys with slight reduction in ductility. However, the maximum strength properties are obtained with 0.5 % Sb addition.

Key words: Magnesium, AZ91 alloy, Microstructure, Mechanical properties

1. Uvod

Kot najlažji kovinski konstrukcijski material z veliko specifično trdnostjo, specifično togostjo in dobro strojno obdelovalnostjo se magnezij in njegove zlitine zaradi svoje majhne gostote vse bolj uporabljajo na mnogih področjih tehnike, vključno s prenosnimi mikroelektronskimi napravami, telekomunikacijami, letalsko in vesoljsko tehniko in avtomobilsko industrijo [1]. Posebno zlitina AZ91 ($Mg_{90}Al_{9}Zn_{0,8}Mn_{0,2}$) je najbolj uporabljana magnezijeva zlitina. Njena uporaba predstavlja okoli 90 % celotne porabe vseh ulitih magnezijevih izdelkov [2]. Analizirali smo vpliv dodatkov stranskih zlitinskih elementov, kot so Ca, Bi, Pb in redke zemlje, na izboljšavo litja,

1. Introduction

As the lightest metallic structural material, high specific strength, specific stiffness and machinability, magnesium and its alloys are increasingly used in many engineering areas including portable microelectronics, telecommunication, aerospace and automobile industries due to their low density [1]. Especially, alloy AZ91 ($Mg_{90}Al_{9}Zn_{0,8}Mn_{0,2}$) is the most favoured magnesium alloy, being used in approximately 90 % of all magnesium cast products [2]. Additions of minor alloying elements such as Ca, Bi, Pb and rare earth (RE) to AZ91 alloy have been studied to improve casting, microstructure stability or creep properties of the alloy [3-8].

mikrostrukturno stabilnost ali lastnosti, povezane z lezenjem zlitine [3-8].

Izboljšanje nateznih lastnosti magnezijevih zlitin vrste AZ, tako pri sobni kot pri povišanih temperaturah, se lahko doseže z uporabo stranskih zlitinskih elementov, kot je Sb, ki tvori stabilne nove faze v magnezijevih zlitinah v ulitem stanju. Glede na binarni fazni diagram Mg-Sb [9] je topnost antimona zanemarljiva, zato se pričakuje nastanek zelo stabilne intermetalne faze Mg_3Sb_2 . V literaturi je več podatkov, da se mehanske lastnosti magnezijevih zlitih lahko izboljšajo z dodajanjem Sb [10,11]. Nayyeri in Mahmudi [10] sta npr. raziskovala odpornost proti lezenju ulite binarne zlitine Mg_5Sn z dodanim Sb. Alizadeh in Mahmudi [11] sta analizirala vpliv dodatka Sb na mikrostrukturo in visokotemperaturne mehanske lastnosti zlitine Mg-Zn v ulitem stanju. Literaturni pregled je odkril, da je učinek Sb kot stranskega zlitinskega elementa na magnezijeve zlitine vrste AZ, posebno na AZ91, v ulitem stanju majhen. Zato je bil cilj te raziskave ugotoviti učinek manjših dodatkov Sb na mikrostrukturo in mehanske lastnosti zlitin AZ91 v ulitem stanju.

2. Poskusi

Bloke Mg, Al, Zn in Sb z najmanjšo čistostjo 99,9 % smo nabavili pri Skarya Metal Co., Turčija. Zlitine smo izdelovali tako, da smo skupaj talili čisti Mg in dodatke Al v grafitnem loncu pod zaščitno atmosfero argona pri 750 oC ter potem pred litjem počakali 20 min. Zn in Sb smo dodali 5 min pred litjem, da bi se izognili izgubam Zn in Sb zaradi izparevanja. Izbrali smo deleže Sb 0,2 mas. %, 0,5 mas. % in 1,0 mas. %. Kemične sestave analiziranih zlitin so prikazane v razpredelnici 1.

Enhancement in the tensile properties of AZ series magnesium alloys, both at ambient and elevated temperatures, could be facilitated by using minor alloying elements such as Sb, which produce stable second phase constituent in the as-cast condition of magnesium alloys. According to the Mg-Sb binary phase diagram [9], the solubility of Sb is negligible, therefore, highly stable intermetallic phase Mg_3Sb_2 is expected to form. There are several reports in the literature that the mechanical properties of magnesium alloys could be increased by Sb [10,11] addition. For example, Nayyeri and Mahmudi [10] studied creep resistance of a Sb added cast Mg-5Sn binary alloy. Alizadeh and Mahmudi [11] studied the effect of Sb addition on the microstructure and high-temperature mechanical properties of as-cast Mg-Zn alloy. Literature review revealed that the effect of Sb (as a minor alloying addition) to AZ series Mg alloys, especially AZ91 alloy in as cast condition, is scarce. Therefore, the objective of the present study was to characterize effect of minor Sb additions on the microstructure and mechanical properties of as-cast AZ91 alloys.

2 Experimental procedure

Mg, Al, Zn, Sb ingots with a minimum purity of 99.9 % were purchased from Sakarya Metal Co., Turkey. The alloys were prepared by melting pure Mg together with Al alloying additions in a graphite crucible under Ar gas atmosphere at 750 oC and then held for 20 min before pouring. Zn and Sb additions were carried out 5 min before casting to avoid losses of Zn and Sb due to vaporization. The amount of Sb content in AZ91 alloy has been selected as 0.2, 0.5 and 1.0 %. The chemical compositions of the studied alloys are shown in Table 1.

Razpredelnica 1. Kemična sestava zlitin

Table 1. Chemical composition of the alloys

Zlitina / Alloy	Elementi (mas.%) / Elements(% , mass fraction)				
	Al	Zn	Mn	Sb	Mg
AZ91	9.23	0.96	0.17	-	ost. / Bal.
AZ91+0.2Sb	8.89	1.08	0.21	0.19	ost. / Bal.
AZ91+0.5Sb	9.12	0.98	0.23	0.53	ost. / Bal.
AZ91+1Sb	8.71	1.03	0.19	0.96	ost. / Bal.

Staljene zlitine smo ulili pod zaščitno atmosfero SF₆ v predgreto (250 oC) litoželezno kokilo. Za preiskave smo uporabili preskušance v ulitem stanju. Trdoto smo ugotavljali z merilnikom trdote po Vickersu z obremenitvijo 50 N. Preskušance za natezne preskuse, dolge 40 mm in s premerom 8 mm, smo izdelali s strojno obdelavo. Natezni preskusi so potekali v skladu s standardom ASTM E 8M-99 s hitrostjo obremenjevanja 0,5 mm/min pri sobni temperaturi. Za mikrostrukturno analizo so bili pripravljeni kockasti vzorci 10 mm x 10 mm x 10 mm, izrezani iz sredine vsakega preskušanca. Eno ploskev smo zbrusili na brusilnih papirjih 220, 400 in 600, nato polirali z diamantno pasto (1 µm). Za mikrostrukturne preiskave smo uporabili svetlobni mikroskop in vrstični mikroskop Phillips XL30 ESEM.

The molten alloys were cast under protective SF₆ gas into a preheated (250 oC) cast iron mould. The alloy specimens were used in as-cast condition for the experiments. The hardness values were determined by Vickers hardness testing with a load of 50 N. The tensile test samples having 40 mm in length and 8 mm in diameter were machined. The tensile tests were performed (ASTM E 8M-99) with a crosshead speed of 0.5mm/min at room temperature. Samples having 10x10x10 mm cube were cut from the centre of the each specimen then one face of the cube subsequently ground with 220, 400 and 600 grit emery papers followed by polishing with 1µm diamond paste for microstructural evaluations. Microstructural evaluations were carried out by optical light microscopy and Phillips XL30 ESEM scanning electron microscopy (SEM).

3. Rezultati in razprava

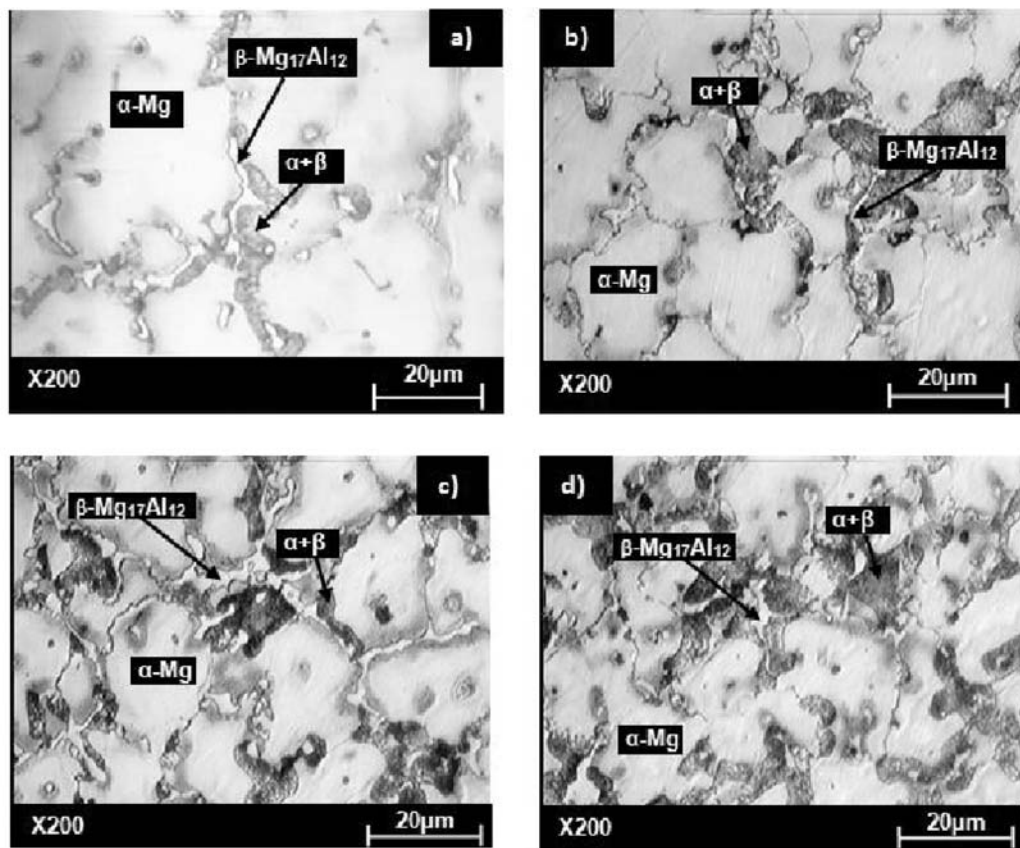
3.1 Mikrostruktura

Slika 1 kaže mikrostrukture zlitin AZ91 + xSb (x = 0, 0,2, 0,5, 1,0) v ulitem stanju. Kot se vidi iz slike 1(a), je zlitina AZ91 v ulitem stanju sestavljena iz primarne α-Mg osnove, popačenega eutektika β-Mg17Al12 in sekundarno izločene faze

3. Results and discussion

3.1 Microstructure

Figure 1 shows the microstructures of as-cast AZ91 + xSb (x = 0, 0.2, 0.5, 1.0 %) alloys. As shown in Fig.1(a), as-cast AZ91 alloy consists of primary α-Mg matrix, divorced eutectic β-Mg17Al12 phase and



Slika 1. Mikrostrukture zlitin AZ91(a), Z91 + 0,2% Sb (b), AZ91 + 0,5% Sb (c) in AZ91 + 1% Sb (d) v svetlobnem mikroskopu

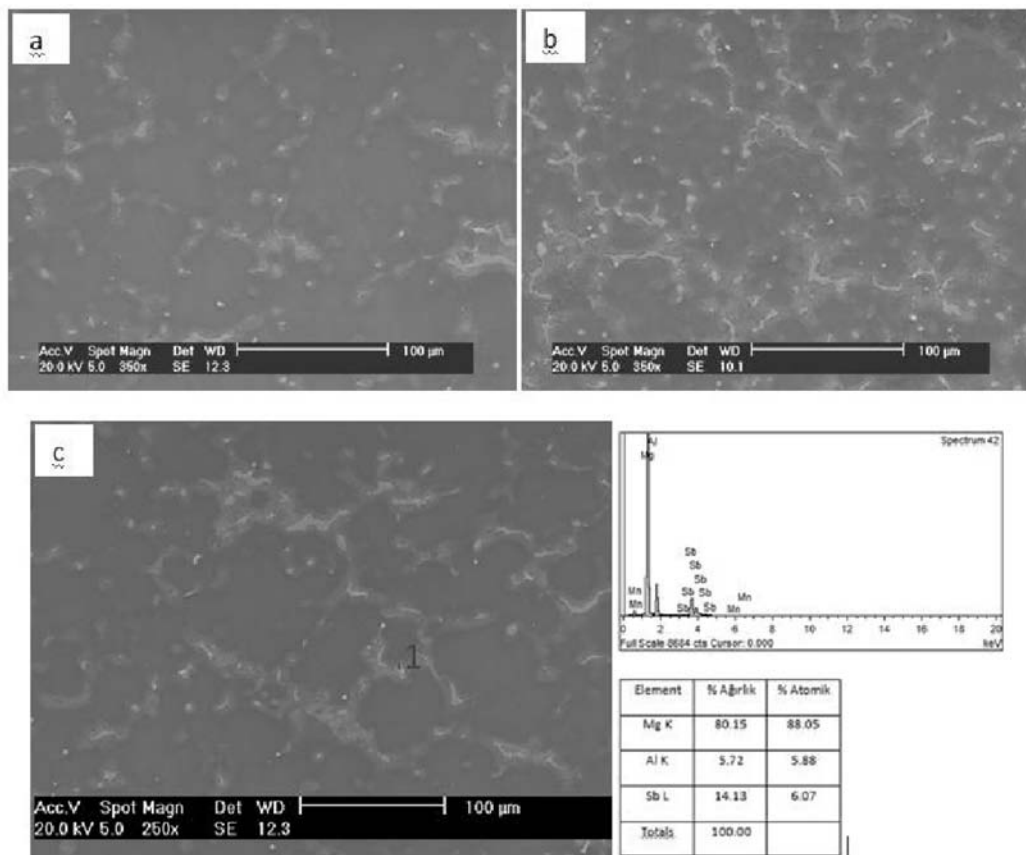
Figure 1. Optical microstructures of AZ91(a), Z91+0.2%Sb (b), AZ91+0.5%Sb (c) and AZ91+1%Sb (d) alloys

β -Mg₁₇Al₁₂. Izločki evtektične faze tvorijo mreže na mejah zrn. Z dodatkom Sb se groba evtektična faza udrobni in postane nezvezna, a pojavijo se nove kosmičaste in zrnate faze.

Slika 2(a)–(c) kaže SEM-posnetke zlitine AZ91 z dodatki Sb in brez njih pri večji povečavi. Dobro se vidi, da dodatek Sb zlitini AZ91 pretvori lamelaste evtektike v popolnoma popačene β evtektike. Že prej so poročali [12–14], da je nastanek popolnoma popačenega, deloma popačenega in

secondary precipitated β -Mg₁₇Al₁₂ phase. The eutectic phase precipitates in the form of network at grain boundaries. With the addition of Sb, coarse eutectic phase is refined and becomes discontinuous, and new flaky and granular phases occur.

Fig. 2(a)–(c) show higher magnification of SEM micrographs of AZ91 alloy with and without Sb added alloys. Evidently, addition of Sb to AZ91 alloy transformed lamellar eutectics into fully divorced β eutectics. It has been previously reported [12–14] that



Slika 2. SEM-posnetki zlitin AZ91 + 0,2 % Sb (a), AZ91 + 0,5 % Sb (b) in AZ91 + 1 % Sb (c) pri večji povečavi

Figure 2. Higher magnification of SEM micrographs of AZ91+0.2%Sb (a), AZ91+0.5%Sb (b) and AZ91+1%Sb (c) alloys

lamelastega eutektika, ki nastajajo v magnezijevih zlitinah, odvisen od dodatkov zlitinskih elementov.

Kot kaže slika 2c se je nova faza pojavila kot popolnoma popačeni β -evtektik pri zlitini z 1,0 mas. % Sb. EDS-analiza je pokazala, da ta faza vsebuje Sb kot tudi Mg in Al v fazi Mg_3Sb_2 . Prisotnost faze Mg_3Sb_2 v zlitini AZ91, ki vsebuje Sb, je očitna, kot kaže slika 2c.

fully divorced, partially divorced and lamellar eutectic morphologies can be formed in magnesium alloys depending on alloying additions.

A different phase in the fully divorced β eutectics have been appeared in 1.0 % Sb containing alloys as shown in Fig. 2(c). EDS analysis showed that this phase contains Sb as well as Mg and Al being Mg_3Sb_2 phase. Presence of Mg_3Sb_2 phase in Sb containing AZ91 alloy is evident as shown in Fig. 2(c).

3.2 Mehanske lastnosti

Kot kaže slika 3, se trdota HV večja z dodajanjem Sb. Slika 3 tudi kaže, da natezna trdnost pri pretrgu in meja tečenja dosežeta največjo vrednost pri deležu Sb 0,5 mas %. Na drugi strani večji delež Sb (> 0,5 mas. %) zmanjša natezno trdnost pri pretrgu in napetost tečenja. To je lahko zato, ker postanejo izločki faze Mg_3Sb_2 bolj grobi. Poleg tega smo v β -evtektikih opazili nove delce, ki vsebujejo Sb (Mg_3Sb_2) ter razpoke med β -evtektiki in Mg_3Sb_2 , kot jasno kaže slika 2c. Zato prekomerno dodajanje Sb vodi do bolj grobih delcev Mg_3Sb_2 in povečanega pojavljanja razpok v vročem, o čemer smo razpravljali že prej, in to je vzrok za zmanjšanje trdnosti in plastičnosti, kar je v popolnem soglasju z delom Jihue in sodelavcev [15]. Povečanje trdote HV, natezne trdnosti pri pretrgu in napetosti tečenja so pripisali udrobnjenju mikrostrukture. Odnos med velikostjo zrn in napetostjo tečenja se lahko izrazi z Hall-Petschovim obrazcem:

$$\sigma_s = \sigma_0 + kD^{-1/2} \quad 1)$$

kjer je σ_s napetost tečenja, σ_0 in k sta konstanti in D je velikost zrn. Iz enačbe (1) se vidi, da se napetost tečenja večja z zmanjševanjem velikosti zrna. In zmanjševanje velikosti zrn pomeni povečanje mej zrn, kar lahko izboljša mehanske lastnosti magnezijeve zlitine, ker kristalne meje zavirajo gibanje dislokacij.

4 Sklepi

Naslednji sklepi se lahko naredijo iz te raziskave:

- pri dodatku 0,2 mas. % Sb je bila mikrostruktura drobnejša kot pri osnovni zlitini AZ91. Ko se je delež Sb povečal

3.2 Mechanical Properties

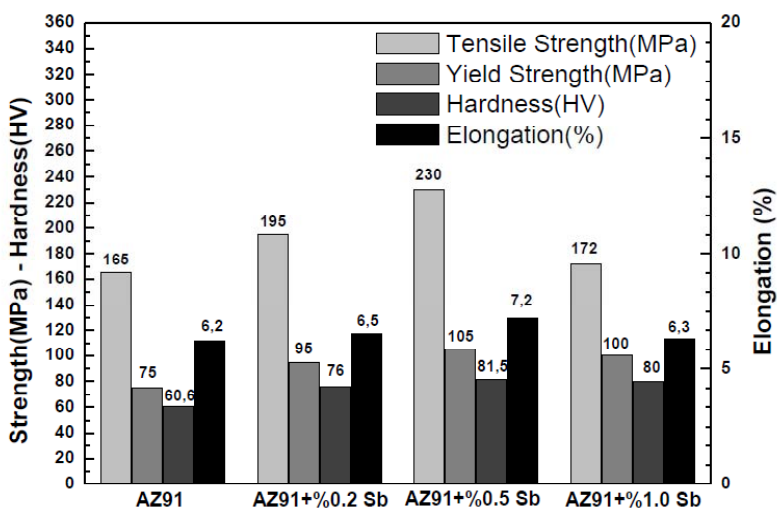
It can be seen that the HV increases as the Sb content of the AZ91 alloy increases investigated as depicted in Fig. 3. Fig. 3 also shows that the UTS and YS reach the peak values as Sn content is 0.5 %. On the other hand, higher Sb content (>0.5 %) also had resulted in the reduction of a UTS and YS. This was believed to be due to coarsening effect of Mg_3Sb_2 precipitates. Indeed, a different particle containing Sb (Mg_3Sb_2) in the β eutectics has been observed and crack at the interface between β eutectics and Mg_3Sb_2 is evident as shown in Fig. 2(c). Therefore, excessive Sb addition leads to the coarsening of Mg_3Sb_2 particles as well as increased hot tearing as discussed earlier, and thus results in the decline of strength and plasticity of the alloy entirely consistent with the work of Jihua et al. [15]. The increase in HV, UTS and YS was attributed to decrease in grain size of the microstructure. The relationship between grain size and YS can be expressed according to Hall-Petch formulation as follows;

$$\sigma_s = \sigma_0 + kD^{-1/2} \quad 1)$$

where σ_s is the YS, σ_0 and k are constant, and D is the grain size. It is known from Eq.(1) that the YS increases with decreasing grain size. And decreasing the grain size means increasing grain boundaries, which can improve the mechanical properties of magnesium alloy because the grain boundaries can hinder the dislocation motion.

4 Conclusions

The following conclusions can be drawn from the present study:



Slika 3. Natezna trdnost pri pretrgu (UTS), trdota HV, raztezek (EL) in napetost tečenja (YS) zlitine AZ91 kot funkcija deleža Sb

Figure. 3. Ultimate tensile strength (UTS), hardness (HV), elongation (EL) and yield strength (YS) of AZ91 alloy as a function of its Sb content

- nad 0,5 mas. %, so zrna začela rasti;
- z dodanjem Sb se je v mikrostrukturi zlitine AZ91 pojavila intermetalna faza Mg_3Sb_2 . Delež intermetalne faze Mg_3Sb_2 se je večal z večanjem deleža Sb v zlitini;
- natezna napetost pri pretrgu, napetost tečenja in trdota HV so se znatno povečale z dodajanjem Sb do 0,5 mas. %, nato so se do dodatka 1,0 mas. % začele manjšati.
- The microstructure was refined and grain size was reduced with 0.5 % Sb addition to base AZ91 alloy. As Sb addition is increased above 0.5 %, the grains begin to coarsen
- Mg_3Sb_2 intermetallic phase has appeared in the microstructure of AZ91 alloy with Sb addition. The amount of the Mg_3Sb_2 phases increased with increasing the Sb content of the alloys.
- UTS, YS and HV were increased considerably with addition of up to 0.5 % Sb then decreased with increasing Sb content up to 1.0 %.

Viri / References

- [1] Gaines L, Cuenca R, Stodolsky F, Wu S. Potential automotive uses of wrought magnesium alloys. In: Automotive technology development - detroit. USA;1996. p. 1-7.

-
- [2] Blawert C, Hort N, Kainer KU. Automotive applications of magnesium and its alloys. *Trans Indian Inst Met* 2004;57:397-408.
 - [3] Pekguleryuz MO, Kaya AA. Creep resistant magnesium alloys for powertrain applications. *AdvEng Mater* 2004;5:866-78.
 - [4] Balasubramani N, Srinivasan A, Pillai UTS, Pai BC. Effect of Pb and Sb additions on the precipitation kinetics of AZ91 magnesium alloy. *Mater SciEng A* 2007;457:275-81.
 - [5] Guangyin Y, Yangshan S, Wenjiang D. Effects of Sb addition on the microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy. *ScrMater* 2000;43:1009-13.
 - [6] Guangyin Y, Yangshan S, Wenjiang D. Effects of bismuth and antimony additions on the microstructure and mechanical properties of AZ91magnesium alloy. *Mater SciEng A* 2001;308:38-44.
 - [7] Zang Z, Couture A, Luo A. An investigation of the properties of Mg-Zn-Al alloys. *Scr Mater* 1998;39:45-53.
 - [8] Wenwen D, Yangshan S, Xuegang M, Feng X, Min Z, DengyunW. Microstructure and mechanical properties of Mg-Al based alloy with calcium and rare earth additions. *Mater SciEng A* 2003;356:1-7.
 - [9] PALIWAL M, JUNG I H. Thermodynamic modeling of the Mg-Bi and Mg-Sb binary systems and short-range-ordering behavior of the liquid solutions [J]. *CALPHAD: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*, 2009, 33(4): 744-754.
 - [10] Nayyeri G., Mahmudi R., Effects of Sb additions on the microstructure and impression creep behavior of a cast Mg-5Sn alloy. *Materials Science and Engineering: A*. Volume 527, 2010, Pages 669-678.
 - [11] Alizadeh R., Mahmudi R., Evaluating high-temperature mechanical behavior of cast Mg- 4Zn-xSb magnesium alloys by shear punch testing. *Materials Science and Engineering: A* Volume 527, 2010, Pages 3975-3983.
 - [12] Srinivasan A, Swaminathan J, Gunjan MK, Pillai UTS, Pai BC. Effect of intermetallic phases on the creep behavior of AZ91 magnesium alloy. *Mater SciEng A* 2010;527:1395-403.
 - [13] Zhao MC, Liu M, Song G, Atrens A. Influence of the b-phase morphology on the corrosion of the Mg alloy AZ91. *CorrosSci* 2008;50:1939-53.
 - [14] Xiao DH, Song M, Zhang FQ, He YH. Characterization and preparation of Mg-Al-Zn alloys with minor Sc. *J Alloys Compd* 2009;484:416-21.
 - [15] Jihua C, Zhenhua C, Hongge Y, Fuquan Z, Kun L. Effects of Sn addition on microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Al alloys. *J Alloys Compd* 2008;461:209-15.

Karakterizacija lastnosti tlačno ulite inovativne zlitine AlSi9MgMn

Characterization of Innovative High Pressure Die Casting AlSi9MgMn Alloy Properties

Izvilleček

Zaradi nenavadne kemične sestave smo preiskali novo večkomponentno zlitino AlSi9MgMn. Zlitina AlSi9MgMn je prva aluminijeva zlitina z malo železa in večjim deležem mangana, ki so jo razvili za tlačno ulite avtomobilске dele in sestave. Za to zlitino so značilne izboljšane mehanske lastnosti pri hitrem ohlajanju ulitkov, kot sta duktilnost in žilavost, zaradi nastajanja kroglaste intermetalne faze $Al_xMn_yFe_zSi_u$. Karakterizacija nove večkomponentne hitro ohlajane zlitine AlSi9MgMn za tlačno ulite dele kaže, da nastajajo kroglaste intermetalne faze, ki neposredno vplivajo na izboljšane mehanske lastnosti.

Raziskava je odkrila nastanek značilnih mikrostrukturnih sestavin glede na morfologijo in sestavo: primarni aluminij (α_{Al}) z mešano dendritno-kroglasto morfologijo, kompleksno kroglasto/poliedrično intermetalno fazo $Al_xMn_yFe_zSi_u$ in glavnim evtektikom ($\alpha_{Al} + \beta_{Si}$) v meddendritnih prostorih. Kompleksna intermetalna faza $Al_xMn_yFe_zSi_u$, ki nastaja pri velikih hitrostih ohlajanja, je kroglasta ali poliedrična, kar kaže na njeno neodvisno nastajanje v prvih fazah strjevanja. Lokalne podhladitve in tekoče stanje omogočata neposredno nukleacijo ravnotežne faze v talini tako, da nastajajo in rastejo posamezna zrna ali se debelijo že preje nastala zrna, ki jih je prinesla difuzija v talini.

Morfologija evtektika je mešana lamelno-vlaknata. Dobljene mehanske lastnosti so bile zelo visoke v primerjavi z navadnimi aluminijevimi avtomobilskimi zlitinami. Pomembno razliko smo ugotovili pri povečanju ohlajevalne/strjevalne hitrosti z vzorci različnih premerov. Vzorci, ki so se zaradi svoje geometrije (manjši premer) hitreje ohlajali, so imeli višje napetosti tečenja, natezne trdnosti in raztezke zaradi drobnejše mikrostrukture, dobro vidne kroglaste mikrostrukture primarnega aluminija, intermetalne faze $Al_xMn_yFe_zSi_u$ in popolnoma modificiranega vlaknatega evtektika.

Ključne besede: zlitina AlSi9MgMn, razvoj mikrostrukture, mehanske lastnosti, tlačno ulivanje

Abstract

Novel multicomponent AlSi9MgMn alloy has been investigated due to unusual chemical composition. An AlSi9MgMn alloy is the first aluminum alloy with low iron and intentionally high manganese content developed for structural automotive casting parts and sets produced by high pressure die casting process. This alloy has been characterised by enhanced mechanical properties of castings such as ductility and toughness at high cooling rates due to evolution of intermetallic $Al_xMn_yFe_zSi_u$ phase in globular manner. Characterization of novel multicomponent AlSi9MgMn alloy at high cooling rate related to high pressure die casting indicates evolution of fine intermetallic phases with globular morphology which directly influence on development of enhanced mechanical properties.

Investigation revealed evolution of characteristic microstructural constituents on the base of their morphology and chemical composition: primary aluminum (α_{Al}) with mixed dendrite and globular morphology, complex intermetallic phase $Al_xMn_yFe_zSi_u$ in globular / polyhedron morphology, main eutectic in interdendritic spaces ($\alpha_{Al} + \beta_{Si}$). Complex intermetallic phase $Al_xMn_yFe_zSi_u$ evaluated at high cooling rate reveals globular or polyhedron morphology which indicates independently evolution in early stages of solidification, due to both local undercooling and liquid composition which allow direct nucleation of the equilibrium phase in the liquid by individual nucleation and growth or by increase in thickness of that originated previously, that have been transported mainly by diffusion in the liquid.

Eutectic possesses mixed lamellar and fibrous morphology. Obtained mechanical properties were very high when compared to common aluminium automotive alloys. A significant differentiation has been established due to increasing of cooling / solidification rate obtained by several sample diameters. Test samples exposed to higher cooling rate due to their geometry (smaller diameter) show increase in yield and tensile strength and elongation due to finer microstructure, prominent globular microstructure of primary aluminium, intermetallic $Al_xMn_yFe_zSi_u$ phase and completely modified fibrous eutectic.

Characterization of novel multicomponent AlSi9MgMn alloy indicates applicability of this material for safety automotive parts due to obtained high values of mechanical properties.

Key words: AlSi9MgMn alloy, microstructure development, mechanical properties, high pressure die casting.

1 Uvod

Ker se aluminijeve zlitine zelo široko uporabljajo v številnih industrijah, se zahteve po kakovosti usmerjajo na izboljšane mikrostrukture in mehanske ter tehnološke lastnosti. Nova večkomponentna zlitina AlSi9MgMn je prva z majhnim deležem železa in namensko povečanim deležem mangana, ki je bila razvita za konstrukcijske tlačno ulite avtomobilske ulitke. Značilnosti te tehnologije so, da ugodno vpliva na razvoj mikrostrukture zaradi nastajanja kroglaste / poliedrične intermetalne faze $Al_xMn_yFe_zSi_u$, kar izboljšuje mehanske lastnosti ulitkov, kot sta duktilnost in žilavost.

Ker ta zlitina ni standardizirana z mednarodnim standardom, ne EN niti AA, ampak le kratko opisana v internem standardu proizvajalca [1], predstavlja izziv za razumevanje mehanizma strjevanja. Dodatek posebnih zlitinskih elementov, kot

1 Introduction

Since aluminium alloys have found their wide application in numerous industries, quality requirements allocated new features regarding microstructural, mechanical and technological properties. Novel multicomponent AlSi9MgMn alloy is the first one with low iron and intentionally high manganese content developed for structural automotive casting produced by high pressure die casting process. Characteristics of this technology favourably affect the microstructure development through evolution of intermetallic $Al_xMn_yFe_zSi_u$ phase in globular / polyhedron manner and thus enhance mechanical properties of castings such as ductility and toughness.

Since this alloy has not been classified in international standard, neither EN nor AA, only briefly described in manufacturer norm [1], it represents challenge for understanding

sta magnezij in tudi mangan ter železo, lahko izboljša mehanske in tehnološke lastnosti ulitka [2-12].

Ker ta zlitina ni standardizirana z mednarodnim standardom, ampak le kratko opisana v internem standardu proizvajalca, predstavlja izziv za razumevanje mehanizma strjevanja. Delež prehodnih elementov in njihova razmerja imajo pomemben vpliv na nastanek faze Al-(Mn,Fe)-Si.

Primerjavo kemične sestave zlitine AlSi9MgMn z velikim deležem Mn, kar zahteva proizvajalčev standard [1] in dejanskega vzorca, daje razpredelnica 1.

Primerjava kemične sestave ni pokazala odklona od vrednosti, ki jih zahteva proizvajalčev standard. Deleža železa in mangana se občutno razlikujeta od deležev v navadnih aluminijevih zlitinah in zato nakazujeta nastajanje kompleksne faze $Al_xMn_yFe_zSi_u$.

of its solidification mechanism. Addition of particular alloying elements such as magnesium as well as manganese and iron can improve mechanical and technological properties of casting [2-12].

Since this alloy has not been classified in international standard, only briefly described in manufacturer norm, it represents challenge for understanding of its solidification mechanism. Transition elements content and there ratio have significant influence on evolution of the Al-(Mn,Fe)-Si phase.

Compared overview of chemical composition of AlSi9MgMn alloy with high Mn content required by manufacturer norm [1] and real sample is given in table 1.

Comparison of chemical composition values has not brought out any deviation from values requested by manufacturer norm. Iron and manganese values,

Razpredelnica 1. Kemična sestava zlitine AlSi9MgMn

Table 1. Chemical composition of the AlSi9MgMn alloy

Vzorec / Sample	Element (mas. %) / (% , mass fraction)			
	Si	Fe	Mn	Mg
Standard proizvajalca [1] / Manufacturer norm [1]	9,5 - 11,5	0,15	0,50 - 0,80	0,10 - 0,50
Preiskovani vzorec / Investigated sample	10,568	0,0858	0,6192	0,2399

Razpredelnica 2. Potek strjevanja zlitine AlSi9MgMn [13,14,15]

Table 2. Solidification sequence of the AlSi9MgMn alloy [13,14,15]

Št. r. / R. No.	Reakcija Reaction	T/°C TCW	T/°C DSC
1	$L \rightarrow L_1 + Al_3Fe/(Al_6Mn) \leftrightarrow Al_xMn_yFe_zSi_u$	612,85	>612
2	$L_1 \rightarrow L_2 + Al_xMn_yFe_zSi_u + \alpha_{Al}$	589,85	588
3	$L_2 \rightarrow L_3 + \alpha_{Al} + Al_xMn_yFe_zSi_u + Al_5FeSi$	573,85	573,4
4	$L_3 \rightarrow L_4 + \alpha_{Al} + \beta_{Si}$	565,85	571,5
5	$L_4 + Al_5FeSi \rightarrow L_5 + Al_8Mg_3FeSi_6$	-	566,7
6	$L_5 \rightarrow \alpha_{Al} + Mg_2Si$	489,85	553

Numerično modeliranje ravnotežnega faznega diagrama (TCW), diferencialna vrstična kalorimetrična analiza (DSC) in enostavna termična analiza (STA) so se usklajeno uporabili pri preiskavah mikrostrukture za ugotavljanje zaporedja nastajanja faz pri strjevanju zlitine AlSi9MgMn, kar kaže razpredelnica 2 [13,14,15].

Termodinamični izračun poteka strjevanja je razkril naslednje zaporedje nastajanja faz: izločanje visokotemperaturne faze $Al_xMn_yFe_zSi_u$, nastanek primarne dendritne mreže, glavna evtektična reakcija in končno nastanek sekundarne evtektične faze Mg_2Si .

Iz taline neodvisno izločena faza $Al_xMn_yFe_zSi_u$ in njene mikrostrukturne značilnosti zaradi velike ohlajevalne hitrosti zelo močno vplivajo na mehanske lastnosti. Kroglasto-poliedričnamorfologijapredstavlja potencial za izboljšanje mehanskih lastnosti in s tem za varnost kritičnih sestavnih delov. Cilj prispevka je bil karakterizirati novo večkomponentno tehnično zlitino AlSi9MgMn z velikim deležem Mn in ustrezne vrednosti mehanskih lastnosti, ki jih omogoča tlačno ulivanje.

2. Materiali in metode

Vzorci zlitine AlSi9MgMn smo že predhodno preiskali z več metodami, da smo ugotovili potek in mehanizme strjevanja [13,14,15]. Priprava taline je obsegala razplinjevanje in modificiranje s predzlitino AlSr10. Indeks končnega razplinjenja je bil 1,330 % in delež stroncija 0,0096 mas. %.

Simulacija ulivanja in strjevanja v posebej narejeni kokili je potekala po standardnem postopku. Ulivanje in strjevanje ulitkov/preizkušancev smo simulirali z računalniško opremo MAGMASoft. Celotna 3D-geometrija kokile je bila izdelana s programom CATIA,

significantly differ from those in common aluminium alloys, and therefore indicate formation of complex $Al_xMn_yFe_zSi_u$ phase.

Numerical modelling of equilibrium phase diagram (TCW) and performed differential scanning calorimetry (DSC) analysis and simple thermal analysis (STA) correlated to microstructure investigations resulted in solidification sequence determination of AlSi9MgMn alloy, as follows in table 2 [13,14,15].

Thermodynamic calculation revealed solidification sequence with corresponded temperatures as follows: precipitation of high temperature $Al_xMn_yFe_zSi_u$ phase, development of primary dendrite network, main eutectic reaction, and finally secondary eutectic phase Mg_2Si .

Independently precipitated $Al_xMn_yFe_zSi_u$ phase from bulk liquid, and its microstructural features, due to high cooling rate, strongly influences on mechanical properties development. Its globular / polyhedron morphology made a potential for increasing of mechanical properties, and therefore an application for safety critical parts. The aim of this article was to characterise novel multicomponent technical AlSi9MgMn alloy with high addition of Mn and corresponded mechanical values produced by high pressure die casting.

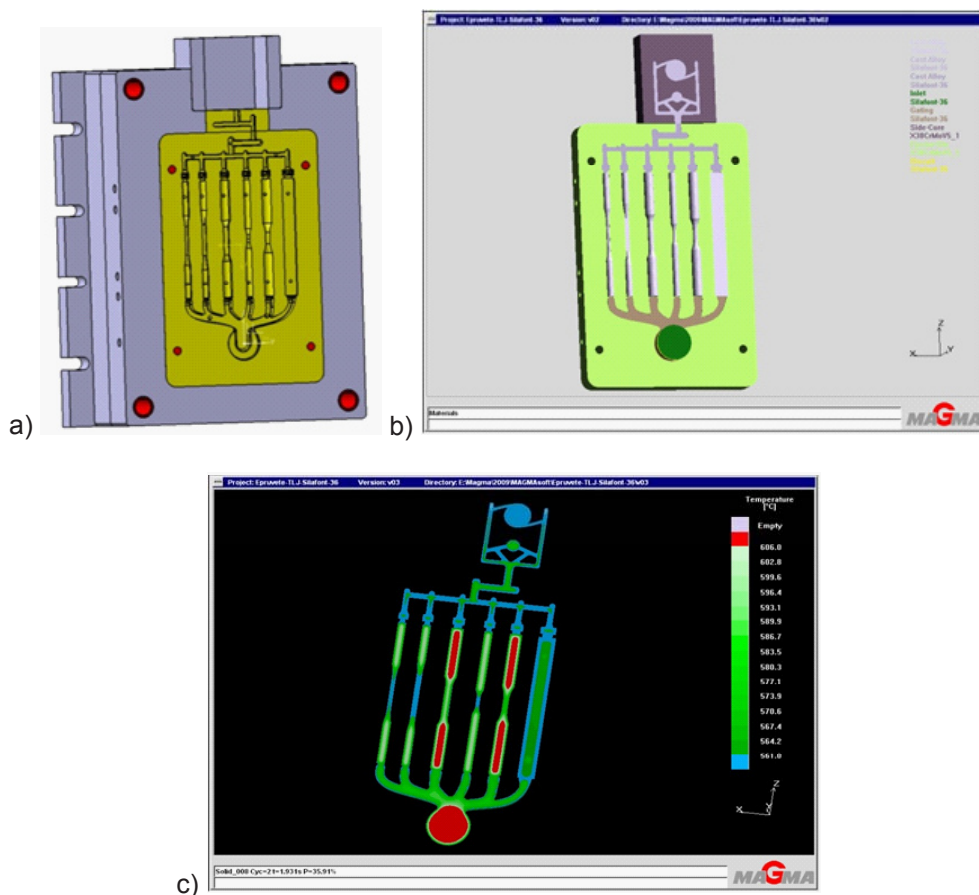
2. Materials and Methods

AlSi9MgMn alloy samples was previously investigated by multidisciplinary approach in order to determine solidification sequence and mechanism [13,14,15]. Melt preparation included degassing and modification by AlSr10 master alloy. Final degassing index was 1,330 % and strontium content 0,0096 %.

Pouring and solidification simulation in specially designed die was performed

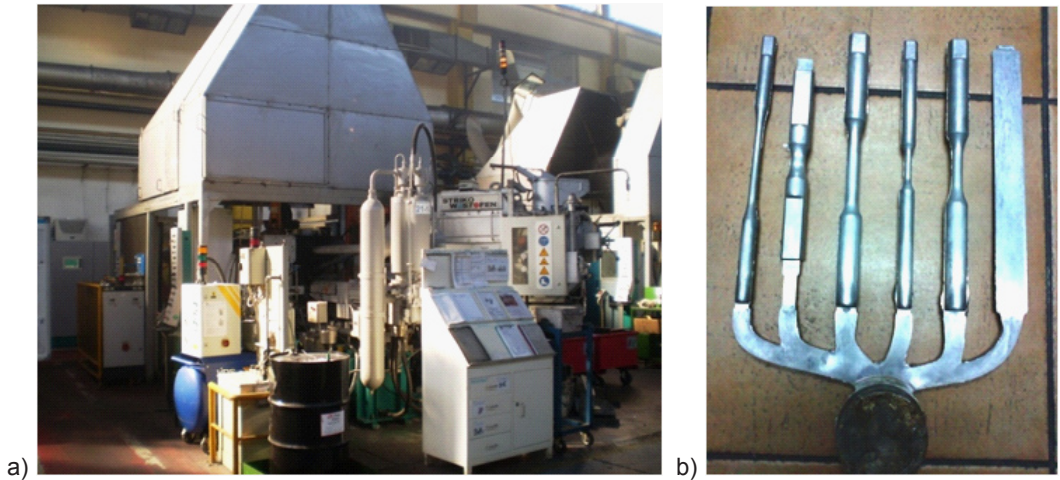
pretvorjena v STL-format in uvožena v MAGMA-predprocesor. Ustrezne skupine materialov in ustrezne lastnosti, ki so bile izbrane iz podatkovne baze, smo označili z ulitek, ulivni sistem, napajalnik, peščena forma (slika 1a). Simulacijo smo napravili, da bi napovedali potek ulivanja in strjevanja in potrdili ustrezen tehnološki nastanek ulitka (slika 1b, 1c).

by standard procedure. Pouring and solidification of castings/test samples were accompanied by numerical simulation by MAGMASoft. Complete mould 3D geometry was prepared in CATIA and converted in STL format and afterwards imported in MAGMA pre-processor. Corresponded group of materials and corresponded properties selected from data base have



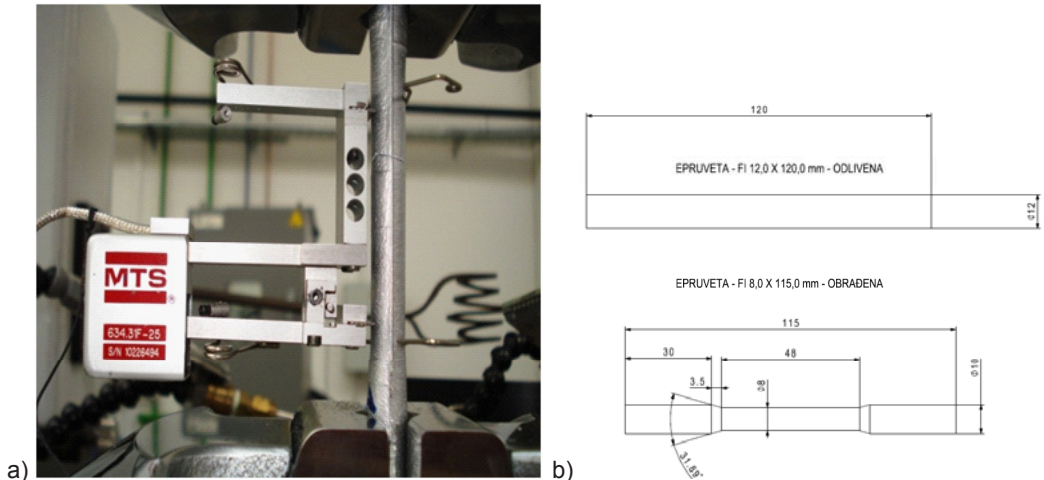
Slika 1. a) 3D model gibljivega dela kokile, konstruiran z računalniško opremo "CATIA", b) Geometrija gibljivega dela v "MAGMA-postprocesorju", c) Numerična simulacija strjevanja tlačno ulitih preskušancev po času $t = 1,93$ s

Figure 1. a) 3D model of moving part of die designed in "CATIA" software, b) Geometry of moving part in "MAGMA post-processor", c) Numerical simulation of solidification of test samples cast by high pressure die casting technology after $t = 1,93$ s



Slika 2. a) Kompletna celica za tlačno ulivanje BUHLER-42D, opremljena z vakuumsko napravo "PROVAC", b) Ulit grozd 6 preskušancev za mehanske preskuse po standardu ISO 377

Figure 2. a) Complete cell for high pressure dies casting BUHLER-42D equipped with "PROVAC" vacuum device, b) Cast cluster with six test samples for mechanical investigation according to ISO standard 377



Slika 3. Ugotavljanje mehanskih lastnosti; a) preiskava na licu mesta, b) preskušanec pred strojno obdelavo in po njej

Figure 3. Mechanical properties investigation; a) investigation "in situ", b) test sample prior and after mechanical treatment for mechanical properties investigation

Mehanski preskušanci so bili uliti s strojem "BUHLER 42D" v skladu s procesnimi parametri (slika 2a). Preskušanci

been assigned: casting, pouring system, feeder, sand mould (Figure 1a). Simulation was performed in order to predict the

so bili tlačno uliti v standardnem orodju v skladu s standardom ISO 377:1997 (slika 2b). Pred ulivanjem se je orodje priključilo na vakuumsko napravo »PROVAC«, da bi ulivanje potekalo brez zračnega upora in brez naplinjenja, ki bi povzročilo plinsko poroznost in nezveznost preskušancev.

Povprečna ohlajevalna hitrost celotnega ulitka se je izračunala iz numerične simulacije in je bila $r_c = 63$ K/s.

Mehanske lastnosti tako pripravljenih preskušancev smo ugotavljali z univerzalnim strojem MTS 810, opremljenim z elektronskim merilnikom raztezov (slika 3). Ugotavljali smo natezno trdnost, napetost tečenja in raztezek preskušancev v ulitem stanju iz obdelane taline.

Trdoto po Brinellu HB5/250/15 smo ugotavljali z merilnikom trdote WOLPERT DIA TESTOR 3a

Za metalografsko analizo smo uporabili preskušance po mehanskih preskusih. Metalografski obrusi so bili pripravljeni po standardnem postopku brušenja in poliranja za aluminijeve zlitine. Mikrostrukturo smo odkrili z jedkanjem vzorcev v 0,5 % HF. Za metalografsko analizo ugotavljanja posameznih mikrostrukturnih sestavin smo uporabili svetlobni mikroskop Olympus GX 51. Mikroposnetke smo naredili z digitalno kamero Olympus DP70 ter jih obdelali pri različnih povečavah z računalniško opremo Analysis®MaterialsResearchLab. Mikrostrukturna preiskava je odkrila porazdelitev in morfologijo posameznih

pouring and solidification path and confirm adequate technological development of casting (Figure 1b, 1c).

Samples for mechanical testing were cast on "BUHLER 42D" machine according to determined specific process parameters (Figure 2a). Casting of test specimens was performed in the standard tool for high pressure die casting in accordance to ISO 377:1997 standard (Figure 2b). Prior the pouring the "PROVAC" vacuum device was used in order to secure casting without resistance and air entrapment and to prevent the formation of gas porosity and discontinuity occurrence in the test samples.

Calculation of average cooling rate for entire casting obtained by numerical simulation indicates the following cooling rate $r_c = 63$ K/s.

Investigation of mechanical properties of prepared samples was performed on universal testing machine MTS 810 equipped by electronic extensimeter (Figure 3). Tensile strength, yield strength and elongation of test samples in both, as-cast and melt-treated state were determined.

Also, Brinell hardness was established HB5/250/15 on hardness tester WOLPERT DIA TESTOR 3a.

Metallographic analysis was performed on test samples after mechanical properties investigation. Metallographic samples were prepared by standard procedure

Razpredelnica 3. Kemična sestava ulitkov iz zlitine AlSi9MgMn

Table 3. Chemical composition of AlSi9MgMn alloy castings.

Preiskovan vzorec / Investigated sample	Elementi (mas. %) / Elements (% mass fraction)										
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Ni	Cr	Pb	Sr
Tlačni ulitki / HPDC	10,568	0,0858	0,0005	0,6192	0,2399	0,0064	0,0491	0,0021	0,0041	0,0032	0,0096

faz. Določene faze so se ugotavljale s kemično sestavo, ugotovljeno z vrstičnim elektronskim mikroskopom Tescan Vega z EDS-napravo.

3 Rezultati in razprava

Kemično sestavo zlitine AlSi9MgMn kaže razpredelnica 3.

Mikrostrukturo zlitine AlSi9MgMn smo preiskovali s svetlobnim in vrstičnim elektronskim mikroskopom. Svetlobna mikroskopija je omogočila vizualno razpoznavanje posameznih faz na osnovi morfologije in barve s primerjanjem v atlasu mikrostruktur. Značilne mikrostrukture pri dveh povečavah in za različne premere vzorcev, od katerih je bila odvisna hitrost ohlajevanja/strjevanja, so prikazane na sliki 4.

Mikrostrukturna analiza je omogočila prepoznavanje značilnih faz, ki so prisotne v zlitini AlSi9MgMn: primarni aluminij (α_{Al}) z mešano dendritno-kroglasto morfologijo, kroglasto-poliedrično kompleksno fazo $Al_xMn_yFe_zSi_u$, glavni evtektik ($\alpha_{Al} + \beta_{Si}$) v meddendritnih prostorih. Evtektik ima mešano lamelasto-vlaknato morfologijo. Pri preskušancih manjšega premera je zaradi velike hitrosti ohlajanja/strjevanja prevladovala kroglasta morfologija primarnega aluminija in vlaknata oblika evtektika.

Kompleksna intermetalna faza, ki nastaja po reakcijah 1 in/ali 2 (razpredelnica 2) zaradi lokalnih podhladitev in sestave taline, omogoča neposredno nukleacijo ravnotežne faze $Al_xMn_yFe_zSi_u$ v talini; vse sestavine za nastajanje novih delcev faze $Al_xMn_yFe_zSi_u$ se oblikujejo ali z individualno nukleacijo in rastjo delcev, ali z debelitvijo preje nastalih delcev, ki jih prenaša predvsem difuzija v talini.

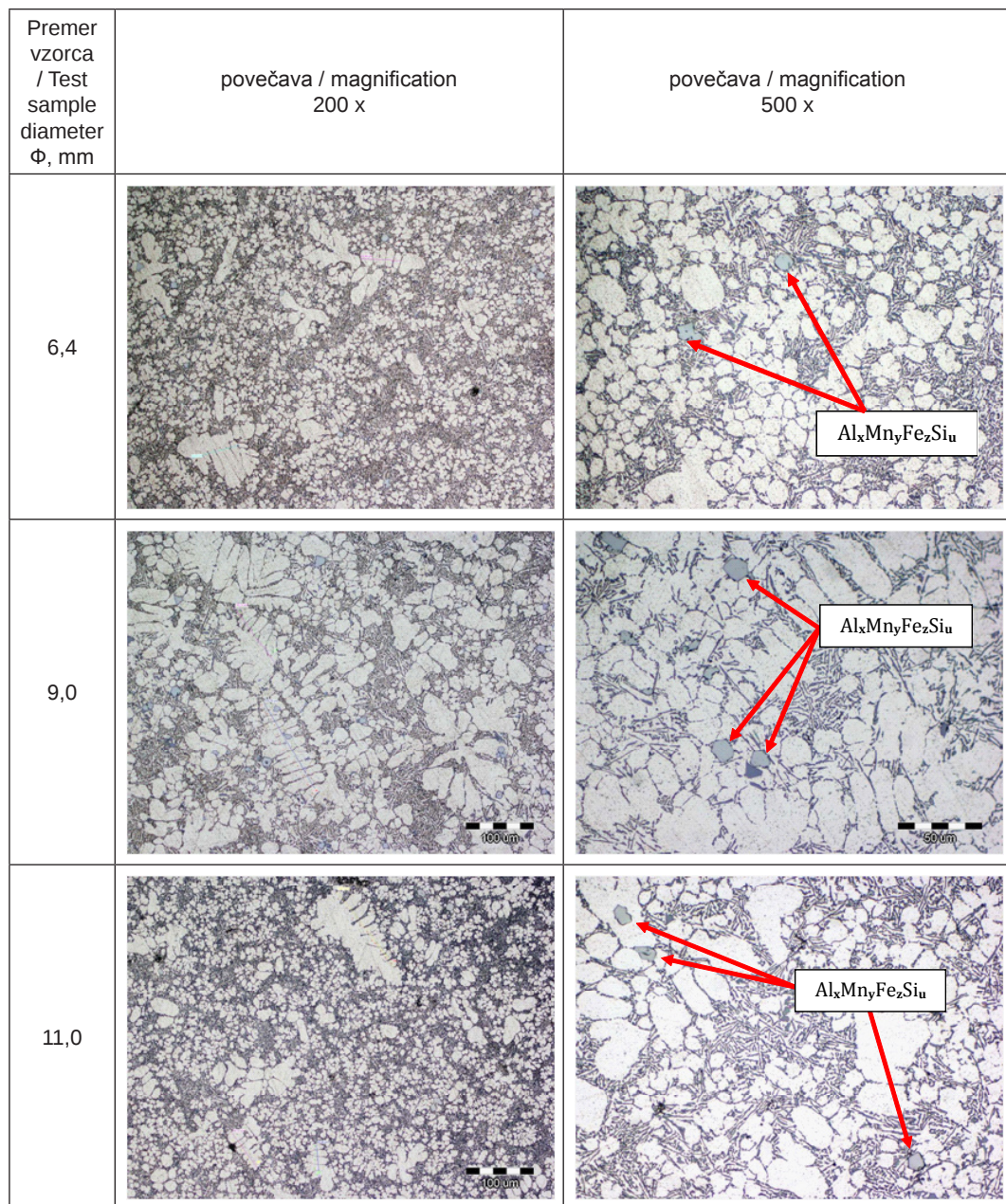
of grinding and polishing for aluminum alloys. For microstructure revealing the etching in 0,5% HF was performed. Metallographic analysis was performed on optical microscope Olympus GX 51 in order to identify particular microstructural constituents. Sample micrographics were acquisitioned by digital camera Olympus DP70, while the analysis was performed by Analysis®MaterialsResearchLab software at different magnification. Microstructural investigation indicated distribution and morphology of particular phase. Particular phases were recognized by chemical composition scanning electron microscope Tescan Vega by EDS investigation (energy dispersive spectrometry).

3 Results and Discussion

Chemical composition of AlSi9MgMn alloy castings is shown in table 3.

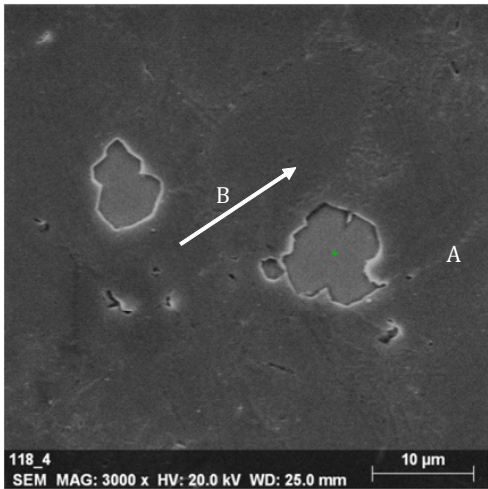
Microstructural investigation of AlSi9MgMn alloy was performed in optical and scanning electron microscope. Optical microscopy enables visual recognition of particular phases on the base of their morphology and colour by comparison with those in atlas of microstructure. Characteristic microstructure in comparative magnification overview related to test sample diameter i.e. cooling / solidification rate are shown in Figure 4.

Microstructural analysis enable visual recognition of characteristic phases present in AlSi9MgMn alloy: primary aluminum (α_{Al}) with mixed dendrite and globular morphology, complex intermetallic phase $Al_xMn_yFe_zSi_u$ in globular / polyhedron morphology, main eutectic in interdendritic spaces ($\alpha_{Al} + \beta_{Si}$). Eutectic possesses mixed lamellar and fibrous morphology. Smaller test sample diameter promotes globular morphology of primary aluminum as well



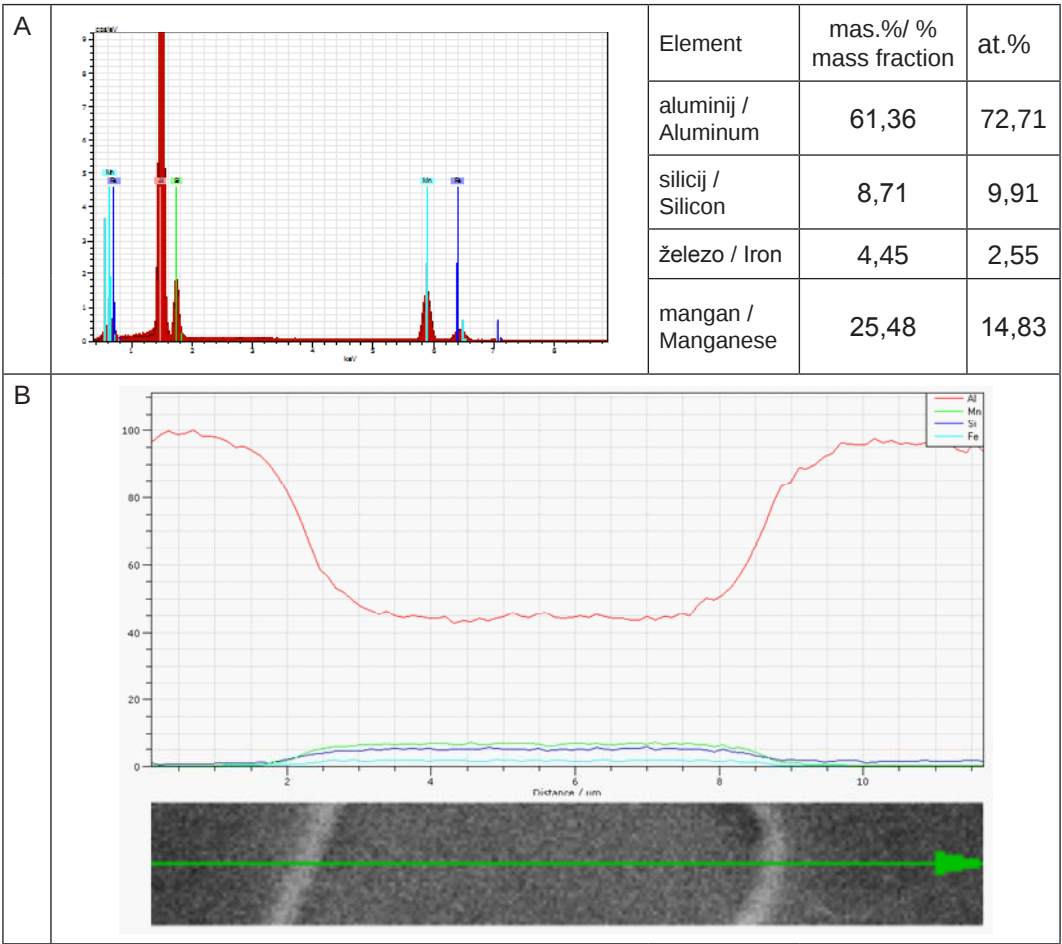
Slika 4. Mikrostrukturalna analiza preskušancev s primerjalnim pregledom, pri ustrezni povečavi in označitvi značilne faz

Figure 4. Microstructural analysis of test samples in comparative overview with corresponded magnification with labelled characteristic $Al_xMn_yFe_zSi_u$ phase: a) 200x, b) 500x



Slika 5.EDS-preiskava določenih intermetalnih sestavin; A) $Al_xMn_yFe_zSi_u$, B) linijska analiza

Figure 5. EDS investigation of particular intermetallic constituents; A) $Al_xMn_yFe_zSi_u$, B) Line analysis



Ker je bila mikrostruktura preskušancev pri tlačnem litju zelo drobnozrnata zaradi velike ohlajevalne hitrosti, nekaterih pričakovanih sestavin nismo zaznali pri svetlobni mikroskopiji. O neugodnih grobih zrnih faze Al_5FeSi , o fazi $\text{Al}_8\text{Mg}_3\text{FeSi}_6$, ki se je na koncu izločila na iglicah Al_5FeSi in o sekundarni evtektični fazi Mg_2Si z razvejano morfologijo in porazdeljeni po kristalnih mejah, ki nastajajo pri majhnih ohlajevalnih hitrostih, smo že poročali [16].

Natančno smo identificirali posamezne mikrostrukturne komponente z vrstično elektronsko mikroskopijo in energijsko-disperzijsko spektrometrijo (slika 5).

Preiskava posameznih faz z EDS je odkrila prisotnost primarnega aluminija αAl , intermetalne faze $\text{Al}_x\text{Mn}_y\text{Fe}_z\text{Si}_u$ (A) in glavnega evtektika $\alpha\text{Al}+\beta\text{Si}$. Linijska analiza je omogočila vpogled v koncentracije elementov zunaj in znotraj faze $\text{Al}_x\text{Mn}_y\text{Fe}_z\text{Si}_u$ (B). Koncentracija aluminija se je v fazi $\text{Al}_x\text{Mn}_y\text{Fe}_z\text{Si}_u$ zmanjšala, medtem ko so se koncentracije Mn, Si in Fe povečale. Največje povečanje smo opazili pri Mn, od ~0,25 na ~7,00 %, medtem ko se je koncentracija Fe povečala od ~0,25 na ~1,50 %. Razmerje koncentracij prehodnih elementov Mn: Fe je bilo v fazi $\text{Al}_x\text{Mn}_y\text{Fe}_z\text{Si}_u$ 4,5–5,5.

Intermetalna faza $\text{Al}_x\text{Mn}_y\text{Fe}_z\text{Si}_u$, ki je nastala pri velikih hitrostih ohlajanja, je imela kroglasto-poliedrično morfologijo, kar kaže na neodvisno nastajanje v zgodnjih fazah strjevanja. Preračun razmerja elementov na število dobljenih sestav te faze (Fe+Mn) kaže konstantno vsoto okoli 30 mas. % pri manjšem spreminjanju razmerja elementov med nastajanjem faze.

Metalografske značilnosti mikrostrukturnih sestavin imajo pomemben vpliv na mehanske lastnosti. Od mehanskih lastnosti smo ugotavljali natezno trdnost, napetost tečenja, raztezke in trdoto po Brinellu (razpredelnica 4).

as fibrous morphology of eutectic, all due to high cooling / solidification rate.

Complex intermetallic phase $\text{Al}_x\text{Mn}_y\text{Fe}_z\text{Si}_u$ forms by the reactions 1 and/or 2 (Table 2) due to both local undercooling and liquid composition which allow direct nucleation of the equilibrium $\text{Al}_x\text{Mn}_y\text{Fe}_z\text{Si}_u$ phase in the liquid; all the components Fe, Mn and Si for building the new particles of the $\text{Al}_x\text{Mn}_y\text{Fe}_z\text{Si}_u$ phase either by individual nucleation and growth or by increase in thickness of that originated previously, that have been transported mainly by diffusion in the liquid.

Since the samples microstructure was very fine, due to high cooling rate performed by applied high pressure die casting technology, some of expected constituent have not been established by optical microscopy analysis. Unfavorable blocky Al_5FeSi , final precipitated phases on the magnesium base $\text{Al}_8\text{Mg}_3\text{FeSi}_6$ evolved on Al_5FeSi needles and secondary eutectic phase Mg_2Si in characteristic ramified morphology distributed on the grain boundaries were established elsewhere at low cooling rates [16].

Exact identification of particular microstructural components was performed by scanning electron microscopy using energy dispersive spectrometer (Figure 5).

Investigation of particular phases by EDS reveals presence of primary aluminium αAl , intermetallic $\text{Al}_x\text{Mn}_y\text{Fe}_z\text{Si}_u$ phase (A), and main eutectic $\alpha_{\text{Al}}+\beta_{\text{Si}}$. Line analysis enables insight in elements ratio change outside and inside the $\text{Al}_x\text{Mn}_y\text{Fe}_z\text{Si}_u$ phase (B). Aluminum ratio decreases inside the $\text{Al}_x\text{Mn}_y\text{Fe}_z\text{Si}_u$ phase, while Mn, Si and Fe ratio increase. The most significant increase has been noticed for Mn ratio from ~0,25 to ~7,00%, while Fe ratio increase from ~0,25 to ~1,50%. The ratio of transition elements Mn:Fe inside the $\text{Al}_x\text{Mn}_y\text{Fe}_z\text{Si}_u$ phase is in range 4,5-5,5.

Razpredelnica 4. Mehanske lastnosti ulitkov iz zlitine AlSi9MgMn v odvisnosti od premera preskušanca, tj. hitrosti ohlajevanja/strjevanja

Table 4. Mechanical properties values for AlSi9MgMn alloy castings related to test sample diameter i.e. cooling / solidification rate.

Premer preskušanca / Test sample diameter, Φ mm	$R_{p0,2}$ (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	Δl (%)	HB
6,4	153	306	5,8	85,2
9,0	154	274	3,8	79,61
11,0	125	242	3,3	89

Dobljene mehanske lastnosti so zelo visoke v primerjavi z navadnimi aluminijevimi avtomobilskimi zlitinami. Občutne razlike smo ugotovili pri povečanju ohlajevalne/strjevalne hitrosti. Pri preskušancu z manjšim premerom, tj. tanjšo steno, sta bili napetost tečenja in natezna trdnost višji zaradi drobnejše, v glavnem kroglasto-poliedrične morfologije primarnega aluminija, intermetalne faze $Al_xMn_yFe_zSi_u$ in popolnoma modificiranega vlaknatega eutektika. Trdota po Brinellu ni pokazala neke pravilne odvisnosti, čeprav so bile njene vrednosti mnogo večje, kot jih zahteva standard.

4 Sklepi

Prispevek poroča o preiskavi nove večkomponentnetehnične zlitine AlSi9MgMn z velikim deležem Mn, namenjene običajno za tlačno litje, ki je bila med litjem hitro ohlajena.

- Svetlobna in vrstična mikroskopija sta omogočila identificirati značilne mikrostrukturne sestavine na osnovi njihove morfologije in kemične sestave: primarni aluminij z mešano kroglasto-

Intermetallic phase $Al_xMn_yFe_zSi_u$ evaluated at high cooling rate reveals globular / polyedric morphology, which indicates independently evolution in early stages of solidification. Recalculation of the element ratios on the number of obtained chemical composition of this phase (Fe+Mn) indicates constant sum around 30 % (mass fraction) with minor replacement in elements ratio occurred during formation.

Metallographic features of microstructural constituents have a significant impact on mechanical properties development.

Mechanical properties investigation resulted in yield and tensile strength, elongation and Brinell hardness determination (Table 4).

Obtained mechanical properties were very high when compared to common aluminium automotive alloys. A significant differentiation has been established due to increasing of cooling / solidification rate. Smaller test sample diameter i.e. thinner wall shows increase in yield and tensile strength and elongation due to finer microstructure, prominent globular / polyhedron microstructure of primary aluminium, intermetallic $Al_xMn_yFe_zSi_u$ phase and completely modified fibrous eutectic. Brinell hardness has not shown any regularity, although the values are much higher than those required by norm.

4 Conclusions

Novel multicomponent technical AlSi9MgMn alloy with high manganese content usually intended for high pressure die casting was investigated in this work at high cooling rate conditions.

- Optical and scanning electron microscopy enables identification of characteristic microstructural

dendritno morfologijo, kompleksno intermetalno spojino $Al_xMn_yFe_zSi_u$ s kroglasto/poliedrično morfologijo, glavni evtektik ($\alpha_{Al} + \beta_{Si}$) v meddendritnih prostorih

- Kompleksna intermetalna faza $Al_xMn_yFe_zSi_u$, ima kroglasto/poliedrično morfologijo zaradi neodvisne individualne nukleacije ravnotežne faze kot posledice lokalnih podhladitev in sestave taline pri velikih ohlajevalnih/strjevalnih hitrostih. Vsota Fe+Mn je konstantna pri okoli 30 mas. % ob manjšem odstopanju deleža obeh elementov v njunem razmerju med nastajanjem.
- Glavni evtektik ($\alpha_{Al} + \beta_{Si}$) ima lamelasto-vlaknato morfologijo v odvisnosti od ohlajevalne/strjevalne hitrosti.
- Ugotovljene mehanske lastnosti so zelo visoke, a občutne razlike so nastale s povečanjem ohlajevalne/strjevalne hitrosti v vzorcih z različnimi premeri. Tanjši vzorci so imeli zaradi drobnejše mikrostrukture kot posledice tanjše debeline stene, dobro vidne kroglaste mikrostrukture primarnega aluminija, intermetalne faze $Al_xMn_yFe_zSi_u$ in popolnoma modificiranega vlaknatega evtektika večjo napetost tečenja, natezno trdnost in raztezek. Trdota po Brinellu ni pokazala neke pravilne odvisnosti, a vse njene vrednosti so bile mnogo višje od zahtevanih v standardu.

Karakterizacija nove večkomponentne zlitine AlSi9MgMn z dobrimi mehanskimi lastnostmi zaradi drobnih mikrostrukturnih sestavin in njihovih ugodnih morfologij kaže, da je ta material primeren za izdelavo varnih kritičnih sestavnih delov in sestavov v avtomobilski industriji.

constituents on the base of their morphology and chemical composition: primary aluminum (α_{Al}) with mixed dendrite and globular morphology, complex intermetallic phase $Al_xMn_yFe_zSi_u$ in globular / polyhedron morphology, main eutectic in interdendritic spaces ($\alpha_{Al} + \beta_{Si}$).

- Complex intermetallic phase $Al_xMn_yFe_zSi_u$ reveals in globular / polyhedron morphology by independent individual nucleation of equilibrium phase due to both local undercooling and liquid composition at high cooling/solidification rates. Sum (Fe+Mn) has been constant at ~30 % mass fraction with minor replacement in elements ratio occurred during formation.
- Main eutectic ($\alpha_{Al} + \beta_{Si}$) evaluate in mixed lamellar – fibrous morphology related to cooling/solidification rate.
- Obtained mechanical properties were very high, although significant differentiation has been established due to increasing of cooling/solidification rate obtained by several sample diameters. Smaller test sample diameter i.e. thinner wall shows increase in yield and tensile strength and elongation due to finer microstructure, prominent globular microstructure of primary aluminium, intermetallic $Al_xMn_yFe_zSi_u$ phase and completely modified fibrous eutectic. Brinell hardness has not show any regularity, although the values are much higher than those required by norm.

Characterization of novel multicomponent AlSi9MgMn alloy with high mechanical properties related to fine microstructure constituents and their favourable morphologies indicate applicability of this material for safety critical parts and sets in automotive industry.

Viri / References

- [1] RHEINFELDEN, catalogue: SILAFONT 36- AlSi9MgMn
- [2] G. Barlock, L. F. Mondolfo, Structure of some aluminium-iron-magnesium-manganese-silicon alloys, *Zeitschrift für Metallkunde / Materials Research and Advanced Techniques*, 66 (10), 1995, 605-611
- [3] J. E. Tibballs, J. A. Horst, C. J. Simensen, Precipitation of α -Al(Fe,Mn)Si from the melt, *Journal of materials science* 36 (2001), 937-941
- [4] M. Warmuzek, K. Rabczak, J. Sieniawski, The course of the peritectic transformation in the Al-rich Al-Fe-Mn-Si alloys, *Journal of Materials Processing Technology* 162-163 (2005) 422-428
- [5] M. Warmuzek, J. Sieniawski, K. Wicher, G. Mrówka, The study of the distribution of the transition metals and Si during primary precipitation of the intermetallic phases in Al-Mn-Si alloys, *Journal of Materials Processing Technology* 175 (2006) 421-426
- [6] L. Backerund, G. Chai, J. Tamminen, *Solidification Characteristics of Aluminium Alloys*, Volume 2, Foundry Alloys, AFS/Skanaluminium, Stockholm, 1999.
- [7] M. V. Kral, A crystallographic identification of intermetallic phases in Al-Si alloys, *Mater. Lett.*, 59 (2005), pp. 2271-2276
- [8] M. Tash, F. H. Samuel, F. Mucciardi, Effect of metallurgical parameters on the hardness and microstructural characterization of as-cast and heat-treated 356 and 319 aluminum alloys *Mater. Sci. Eng. A*, 443 (2007), pp. 185-201
- [9] S. Belmares-Perales, M. Castro-Román, M. Herrera-Trejo, L. E. Ramírez-Vidaurre, Effect of cooling rate and Fe/Mn weight ratio on volume fractions of α -AlFeSi and β -AlFeSi phases in Al-7.3Si-3.5Cu alloy, *Metals and Materials International*, (14) 2008, 3, 307-314
- [10] A. Couture, Iron in aluminum casting alloys - a literature survey, *International cast metals journal*, 6 (1981), 4, 9-17
- [11] P. N. Crepeau, Effect of Iron in Al-Si Casting Alloys: A Critical Review, *AFS Transactions*, 103 (1995), 361-366.
- [12] C. M. Dinnis, J. A. Taylor, A. K. Dahle, As-cast morphology of iron-intermetallics in Al-Si foundry alloys, *Scripta Mater.*, 53 (2005), pp. 955-958
- [13] Z. Zovko Brodarac, D. Stanić, F. Unkić, Investigation of AlSi9MgMn alloy solidification by thermal analysis, *Conference Proceedings of 52nd International Foundry Conference Portorož 2012*, Slovenia, 58-59
- [14] D. Stanić, Influence of the solidification conditions and melt treatment on microstructural and mechanical properties of AlSi9MgMn alloy, PhD Thesis, University of Zagreb, Faculty of Metallurgy, Sisak, 2012
- [15] Z. Zovko Brodarac, D. Stanić, Effect of the cooling rate on distribution of transition elements in the intermetallic Al-Mn-Fe-Si phase in AlSi9MgMn alloy, 71st World Foundry Congress, Advanced Sustainable Foundry, May, 19-21, 2014., Bilbao, Spain, World Foundry Organization, Non ferrous_10
- [16] Z. Zovko Brodarac, D. Stanić, Characterization of novel multicomponent AlSi9MgMn alloy at low cooling rate, *Proceeding book of MATRIB 2014*, Croatian Society for Materials and Tribology, Zagreb, 2014., 637-646

Izločki v aluminijevi kvazikristalni zlitini

Precipitates in an aluminium quasicrystalline alloy

Izvleček

Aluminijeve kvazikristalne zlitine predstavljajo nov razred visokotrdnostnih aluminijevih zlitin in imajo velik potencial za uporabo na različnih področjih. Raziskali smo aluminijevo kvazikristalno zlitino, ki vsebuje baker. Dodatek bakra omogoča utrjanje zlitine pri toplotni obdelavi. Zlitine smo izdelali z gravitacijskim litjem v bakreno kokilo. Pri strjevanju so nastali kvazikristali, ki so bili navzoči v obliki primarnih delcev ter kot sestavni del evtektika. Potem smo zlitine toplotno obdelali, da smo dosegli stanje T5. Po tej toplotni obdelavi se trdota vzorcev ni bistveno spremenila. Podrobna preiskava s presežno elektronsko mikroskopijo (TEM) je pokazala, da so v zlitini različni izločki. Na nastanek izločkov je imela največji vpliv temperatura toplotne obdelave. Pri nižjih temperaturah so nastali binarni izločki Al-Cu, v vmesnem temperaturnem območju so nastajali kvazikristalni izločki, medtem ko so se pri višjih temperaturah tvorili izločki faze $\text{Al}_{20}\text{Mn}_3\text{Cu}_2$.

Ključne besede: toplotna obdelava, aluminijeva zlitina, izločki, kvazikristal, TEM.

Abstract

Aluminium quasicrystalline alloys represent a novel class of high-strength alloys. They possess a great potential for practical applications in many fields. In this study, we used a quasicrystalline Al-alloy with a copper addition in order to achieve strengthening by heat treatment. The alloys were prepared by casting into a copper mould. Quasicrystals formed during solidification. They were present either as a primary phase or as a part of a quasicrystal-containing eutectic. Afterwards, the samples were subjected to T5 heat treatment. The hardness of melt-spun ribbons increased considerably, while the hardness of gravitationally cast samples did not change noticeably. Detailed investigation using transmission electron microscopy (TEM) showed that different types of precipitates can form, depending primarily on the heat treatment temperature. At lower temperatures binary Al-Cu precipitates formed, in the intermediate region prevailed the formation of quasicrystalline precipitates, while at higher temperatures formed $\text{Al}_{20}\text{Mn}_3\text{Cu}_2$ precipitates.

Keywords: heat treatment, aluminium alloy, precipitates, quasicrystal, TEM.

1 Uvod

S kvazikristali utrjene Al-zlitine imajo lahko izvrstno kombinacijo trdnosti in duktilnosti. Ikozaedrična kvazikristalna faza (IQC), ki je prisotna v teh zlitinah, je metastabilna.

1 Introduction

Quasicrystal-strengthened Al-alloys can possess excellent combinations of strength and ductility. An icosahedral quasicrystalline phase (IQC) present in these alloys is

Zlitine se lahko izdelajo s hitrim strjevanjem in dodatnim stiskanjem [1]. Nekateri elementi (Be, Ce, Si) stabilizirajo zlitine s kvazikristalno fazo v sistemu Al-Mn in se lahko izdelajo z navadno tehnologijo ulivanja. Te zlitine lahko v ulitem stanju dosežejo veliko trdnost, ki se lahko v nekaterih primerih celo poveča s toplotno obdelavo. Tak primer predstavljajo trakovi iz zlitine Al-Mn-Be-Cu, brizgane na hlajeno podlago. Trdota teh trakov se poveča za 50 % po toplotni obdelavi pri 300 °C in 400 °C v primerjavi z ulitim stanjem [2]. Te zlitine lahko tudi ohranijo trdnost do mnogo višjih temperatur kot trgovske Al-zlitine. Vendar bo potrebnih še veliko raziskav, preden se bodo lahko industrijsko izdelovale.

Pri naši raziskavi smo uporabljali 1000-krat manjše ohlajevalne hitrosti, kot se uporabljajo pri postopku brizganja taline na hlajeno podlago. Kljub temu so nastali primarni kvazikristali pri strjevanju zlitine Al-Mn-Be-Cu, osnova pa je bila prenasočena z zlitinskimi elementi. Cilj naše raziskave je bil ugotoviti učinek toplotne obdelave na izločevalne procese in vlogo primarne kvazikristalne faze.

2 Eksperimentalni del

Preiskovana zlitina je vsebovala 4,24 mas. % Mn, 0,68 mas. % Be, 4,44 mas. % Cu in 90,94 mas. % Al. Narejena je bila iz predzlitin Al-Mn, Al-Cu, Al-Be in aluminija 99,89, ki smo jih stali v vakuumski indukcijski peči. Najprej smo talino ulili v valjaste kokile s premerom 50 mm, potem pa nastali ulitek pretalili v bakreni kokili z izmerami 100 mm x 10 mm x 1 mm, da bi dosegli ohlajevalne hitrosti v območju 1000 K/s. Vzorce smo umetno starali 24 h na zraku pri 200 °C, 300 °C, 400 °C in 500 °C. Nato smo jih preiskali z XRD s sinhrotronskimi rentgenskimi žarki z valovno dolžino 0,1 nm (Sincrotrone Elettra,

metastable. These alloys can be made using rapid solidification and then compacted [1] [3]. Some elements (Be, Ce, Si) stabilize quasicrystalline phase alloys based on Al-Mn system, and can be produced by common casting methods. These alloys can attain considerably strength in the as-cast condition, and in some cases, heat treatment can further enhance the strength. The examples were Al-Mn-Be-Cu melt-spun ribbons. In this ribbons, the hardness increased for 50% after heat treatment at 300 °C and 400 °C in comparison to the as-cast state [2]. These alloys can also retain strength to much higher temperature than commercial Al-alloys. However, much work is still necessary for industrial production of these alloys.

In this work, about 1000-times smaller cooling rates were used as during melt spinning. Nevertheless, primary IQC formed upon solidification in an Al-Mn-Be-Cu alloy, and the matrix was supersaturated with alloying elements. The aim of this investigation was to study the effect of heat treatment on the precipitation processes and the role of the primary IQC-phase.

2 Experimental

The investigated alloy contained 4.24 % Mn, 0.68 % Be, 4.44 % Cu and 90.64 % Al mass fraction. It was vacuum induction melted using Al-Mn, Al-Cu and Al-Be master alloys, and Al 99.89. It was first cast into cylindrical moulds with 50 mm in diameter, and after remelting into a copper mould with the dimensions: 100 × 10 × 1 mm to obtain cooling rates in the range of 1000 K/s. The samples were heat-treated by artificial aging at 200 °C, 300 °C, 400 °C and 500 °C for 24 hours in the air. Afterwards, they were investigated by XRD using synchrotron X-rays with a wavelength

Trieste, Italy). Folije iz vzorcev v ulitem in toplotno obdelanem stanju za preiskavo s TEM, okoli 50 nm debele, smo izdelali s fokusiranim elektronskim snopom (FIB) (FEI, Helios). Večje, podolgovate izločke iz vzorcev, toplotno obdelanih pri 500 °C, smo ekstrahirali iz osnove s kemičnim postopkom. Z elektronskim presevnim mikroskopom z veliko ločljivostjo (HRTEM), elektronskim presevnim mikroskopom s filtrirano energijo (EFTEM), vrstičnim presevnim elektronskim mikroskopom (STEM), s spektroskopijo z izgubo energije elektronov (EELS) in energijskodisperzijsko rentgensko spektroskopijo (EDXS) smo preiskovali vzorce v napravi FEI Titan 60-300.

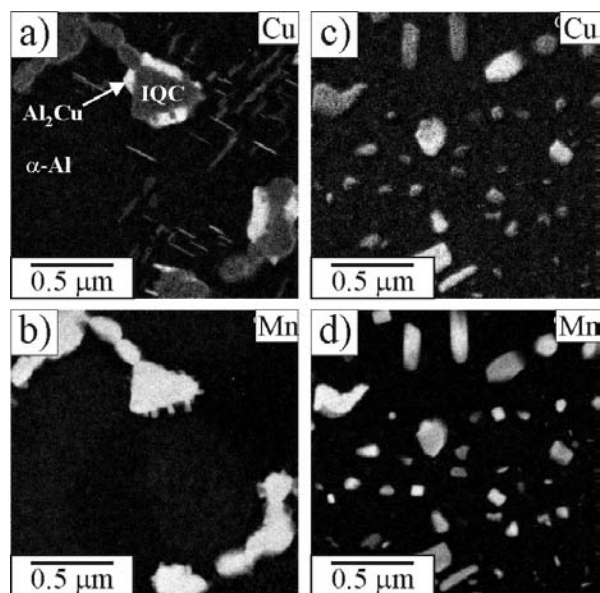
3 Rezultati in razprava

Z rentgensko difrakcijo (XRD) smo odkrili, da je zlitina sestavljena iz trdne raztopine, bogate z α -Al, kvazikristalov in Al_2Cu .

of 0.1 nm (Sincrotrone Elettra, Trieste, Italy). TEM foils with thicknesses around 50 nm were prepared using FIB (FEI, Helios) for samples in the as-cast and heat-treated states. Larger, elongated precipitates present in a sample heat-treated at 500 °C were extracted from the matrix using a chemical method. HRTEM, EFTEM, STEM, EELS and EDXS were carried out using FEI Titan 60-300.

3 Results and Discussion

XRD revealed that the alloy consisted of an Al-rich solid solution α -Al, IQC and Al_2Cu . The grain sizes of α -Al were between 5 to 10 μm . The primary IQC- and Al_2Cu particles were allocated predominantly in the intergranular regions. XRD showed no changes in the phase composition after heat treatments at 200 °C, 300 °C and 400 °C. A profound alteration occurred at 500 °C. Al_2Cu and IQC disappeared,



Slika 1. EFTEM-slike Cu in Mn v zlitinah Al-Mn-Be-Cu. a, b) 24 h pri 200 °C, in c, d) 24 h pri 400 °C

Figure 1. EFTEM maps for Cu and Mn in the Al-Mn-Be-Cu alloys. a, b) 24 h at 200 °C, and c, d) 24 h at 400 °C

Velikost zrn faze α -Al je bila 5–10 μm . Primarni kvazikristali in delci Al_2Cu so se nahajali predvsem v območjih med zrn. XRD ni pokazala sprememb po toplotnih obdelavah pri 200 °C, 300 °C in 400 °C. Velika sprememba se je pojavila pri 500 °C. Faza Al_2Cu in kvazikristali so izginili, nadomestili sta jih fazi $\text{Be}_4\text{Al}(\text{Mn},\text{Cu})$ and $\text{T-Al}_{20}\text{Mn}_3\text{Cu}_2$.

Preiskava s presevnim elektronskim mikroskopom je odkrila spremembe celo pri toplotni obdelavi pod 500 °C. Pri 200 °C so nastali ploščičasti, z bakrom bogati izločki v območjih med zrn (slika 1a,b) zaradi velike prenasitenosti z zlitinskimi elementi. Ploščice so bile dolge okoli 200 nm in debele okoli 5 nm. Razdalje med središči delcev so bile 70–100 nm. HRTEM je pokazal, da delci tvorijo semikoherentno mejo z osnovo α -Al po ravninah $\{1\ 0\ 0\}$ faze α -Al. Izločki so identični izločkom θ' v binarnih zlitinah Al-Cu [3]. Difuzijske razdalje, izračunane po metodi najmanjših kvadratov, za Cu in Mn pri 200 °C so bile 150 nm oz. 1 nm. Zato lahko nastajajo le izločki, bogati z bakrom, ker njihova tvorba zahteva difuzijo dolgega reda.

Pri 400 °C so bili prisotni paličasti izločki okroglega ali kvadratastega prereza (slika 1c,d). Bili so dolgi do 2 μm in debeli 50–100 nm.

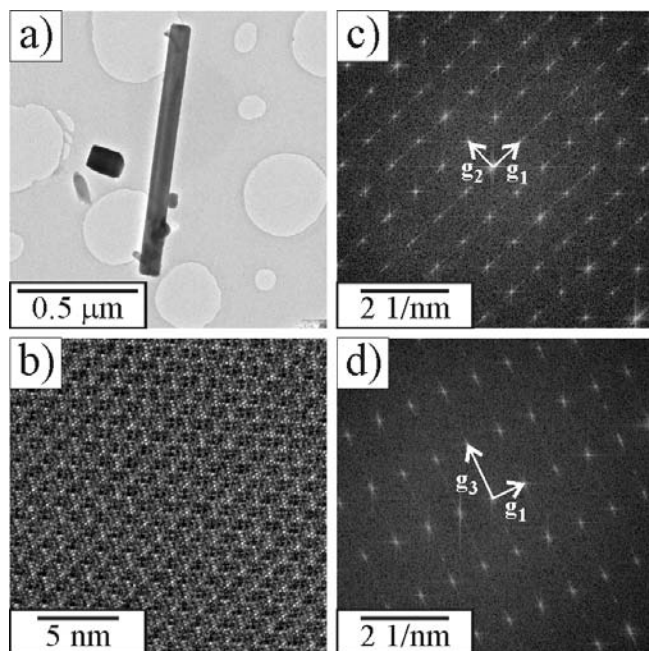
Po toplotni obdelavi 24 h pri 500 °C so v α -Al prevladovali paličasti izločki s kvadratastim prerezom. Bili so dolgi okoli 2 μm in debeli 200–400 nm (slika 2a). EDS je odkrila, da vsebujejo Al, Cu in Mn, medtem ko Be s to metodo nismo zaznali. Njihove povprečne atomske koncentracije so bile $81,4 \pm 0,64\%$, $12,0 \pm 0,61\%$ oz. $6,6 \pm 0,63\%$. Slika 2b kaže HRTEM-posnetek in slika 2c ustrezni sliki hitre Fourierove transformacije (FFT). Slika 2d kaže drugo sliko hitre Fourierove transformacije z veliko simetrijo. Obratna vektorja $\mathbf{g}(1)$ and $\mathbf{g}(3)$ sta bila pravokotna drug na drugega. Podroben

being replaced by $\text{Be}_4\text{Al}(\text{Mn},\text{Cu})$ and $\text{T-Al}_{20}\text{Mn}_3\text{Cu}_2$.

Examinations using TEM revealed microstructural changes even during heat treatments at temperatures below 500 °C. At 200 °C, plate-like copper-rich precipitates formed predominantly in the intergranular regions (Fig. 1a,b) because of higher supersaturation with alloying elements there. The plates were about 200 nm long and only about 5 nm thick. The centre-to-centre interparticle distances were between 70 and 100 nm. HRTEM showed that the particles formed a semicoherent interface with α -Al matrix on $\{1\ 0\ 0\}$ planes of α -Al. The precipitates were identical to θ' -precipitates in binary Al-Cu alloys [3]. The root-mean-square (RMS) diffusion distances for Cu and Mn at 200 °C are 150 nm and 1 nm, respectively [4]. Thus only Cu-rich precipitates can form because their formation requires long-range diffusion.

At 400 °C, the rodlike precipitates were present with circular and square-like cross-sections (Fig. 1c,d). They were up to 2 μm long, and 50–100 nm thick. The manganese RMS-diffusion distance was about 460 nm, thus Mn-mobility was sufficient to enable formation and growth of particles.

After heat treatment for 24 h at 500 °C, rodlike precipitates with the square-like cross-sections prevailed within α -Al. They were about 2 μm long, and between 200 nm and 400 nm thick. (Fig. 2a). EDS revealed that they contain Al, Cu and Mn, while Be could not be detected using this method. The average atomic concentration for Al, Mn and Cu is $81,4 \pm 0,64\%$, $12,0 \pm 0,61\%$ and $6,6 \pm 0,63\%$, respectively. Fig. 2b shows a HRTEM-image, and Fig. 2c is the corresponding FFT. Fig. 2d shows another highly symmetrical FFT. The reciprocal lattice vectors $\mathbf{g}(1)$ and $\mathbf{g}(3)$ were also perpendicular to each other. Detailed



Slika. 2. Toplotna obdelava 24 h 500 °C

a) ekstrahiran paličast izloček,
b) HRTEM-posnetek, posnet v smeri dvoštevne osi
c) FFT HRTEM-posnetka, posnetega v smeri dvoštevne osi,
d) FFT HRTEM-mikroposnetka v smeri druge dvoštevne osi.

Figure 2: Heat treatment at 500 °C for 24 h.

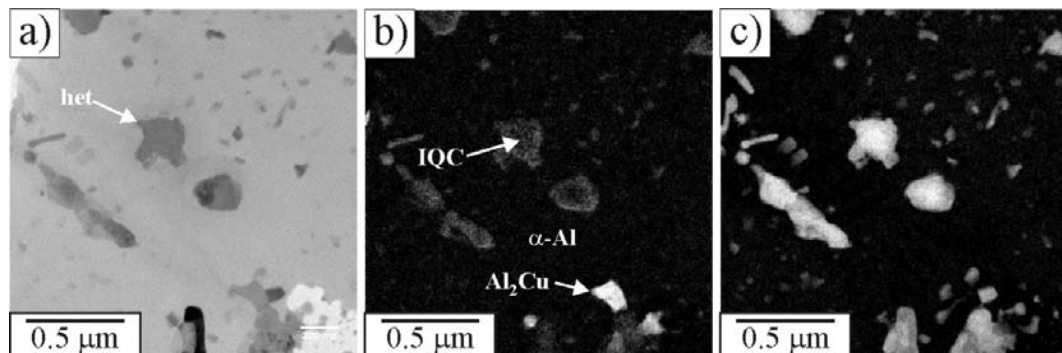
a) An extracted rodlike precipitate,
b) HRTEM-micrograph taken along a twofold axis,
c) FFT of the HRTEM-micrograph taken along twofold axis,
d) FFT of a HRTEM-micrograph taken along another twofold axis

pregled literature je odkril, da so ti izločki znani kot T-faze [5].

Vzorec smo segrevali na 300 °C. Čas segrevanja s sobne temperature na 300 °C je bil 2 minuti. V tem obdobju nismo opazili razlik v mikrostrukturi. Potem smo

study of the literature revealed that these precipitates are known as T-phase [5].

The in-situ heating was carried out at 300 °C. The heating time from room temperature to 300 °C was 2 minutes. No differences in microstructure were observed



Slika 3. Obdelava 150 minut na licu mesta pri 300 °C. a) TEM-posnetek v svetlem polju, b) EFTEM porazdelitev Cu, in c) EFTEM porazdelitev Mn

Figure 3. In-situ treatment at 300 °C for 150 min a) TEM bright-field image, b) EFTEM distribution of Cu, and c) EFTEM distribution of Mn

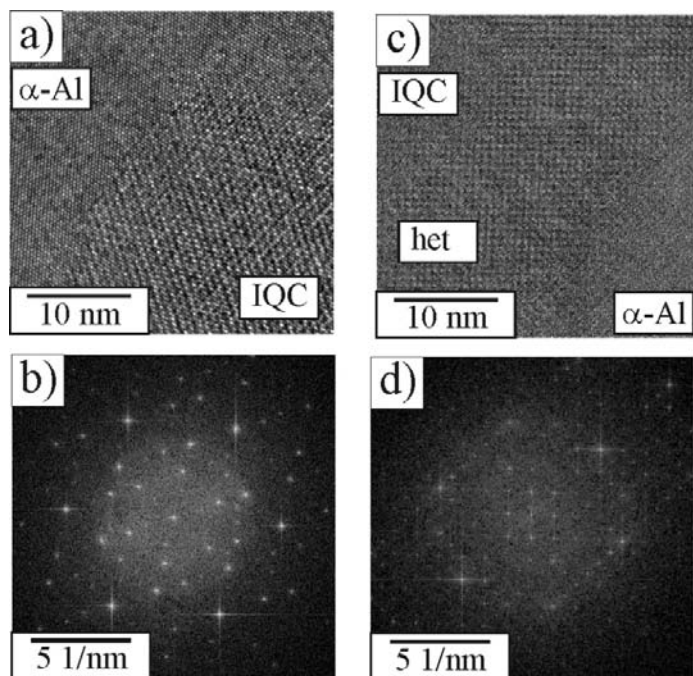
opazili tri značilne procese: (1) nastanek in rast kroglastih izločkov v osnovi α -Al, (2) nastanek in rast delcev, ki so se nukleirali na prisotnih delcih v ulitem stanju, (3) nastanek, rast in raztapljanje 300°C Al_2Cu . Elektronski mikrosposnetek in EFTEM-slike mangana in bakra iz TEM vzorca po segrevanju 150 minut pri 300°C prikazuje slika 3.

Znotraj zrn α -Al smo odkrili kroglaste izločke, ko je njihov premer dosegel okoli 10 nm. Hitrost nukleacije se je izračunala iz števila delcev po različnih časih zadrževanja pri določeni temperaturi. Inkubacijski čas pri teh razmerah je bil okoli 10 min. Po 15 min se je hitrost nukleacije začela občutno povečevati in po 20 min je dosegla največjo vrednost okoli $10^{18} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$. Po 30 min se je nukleacijska hitrost zmanjšala skoraj za dva velikostna reda in zdi se, da so po 60 min prenehali nastajati novi delci. Potem so rasli samo obstoječi izločki. Nekateri izločki so se enakomerno debelili, medtem ko so drugi postajali podolgovati. Med opazovanjem nismo zasledili zorenja. Slika 3a kaže preiskovano območje po 150 min zadrževanja pri 300°C . Ustrezne EFTEM-slike Cu in Mn kažejo, da izločki vsebujejo tako Cu kot Mn, medtem ko z uporabljeno metodo nismo zasledili Be. A je bil delež mangana mnogo večji kot delež bakra. Koncentracija Cu v izločkih je bila skoraj enaka kot v primarnih kvazikristalnih delcih, tj. v območju nekaj atomskih odstotkov. Velikosti delcev in razdalje med delci so primerljive z razdaljami za Mn, ki so izračunane po metodi najmanjših kvadratov, kar pomeni, da difuzija mangana krmili nastajanje in rast izločkov.

Po ohlavitvi vzorca na sobno temperaturo smo naredili HRTEM-posnetke, da bi analizirali zgradbo nastalih izločkov. Slika 4a kaže HRTEM-posnetek fazne meje med α -Al in izločkom. Odboj α -Al na FFT-sliki kaže, da leži aluminjska osnova na osi cone [111]. Izloček kaže troatevno simetrijo.

during this period. Afterwards, three distinct processes were observed: (1) the formation and growth of spherical precipitates within the α -Al matrix; (2) the formation and growth of particles nucleated on the particles present in the as-cast condition, and (3) the formation, growth and dissolution of Al_2Cu . An electron micrograph and EFTEM maps for Mn and Cu from the TEM specimen after 150 minutes heating to 300°C are shown in Fig. 3.

The spherical precipitates formed within α -Al grains were detected when their diameter reached about 10 nm. The nucleation rates were calculated from the particle count after different holding times. The incubation period under these circumstances was about 10 min. The nucleation rate started to increase considerably after 15 min, and attained the maximum value of around $10^{18} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ after 20 min holding. Nucleation rate dropped nearly by two orders of magnitude after 30 min, and the formation of new precipitates apparently stopped after 60 min. Thereafter, only growth of the existing precipitates took place. Some precipitates thickened uniformly while others became elongated. No precipitate ripening was observed during observation. Fig. 3a shows the investigated area after 150 min of holding the temperature at 300°C . Corresponding EFTEM-maps for Cu and Mn showed that precipitates contained both Cu and Mn, while Be was not detected using this method. However, the content of Mn was much higher than that of Cu. The Cu concentration in precipitates was almost the same as in the primary IQC-particles; in the range of few atomic percents. The precipitate sizes and the interparticle distances are comparable with RMS distances for Mn, indicating that Mn-diffusion limits the formation and growth of precipitates.



Slika 4. HRTEM-posnetek meje med α -Al in kvazikristalnim izločkom (a), in njegova FFT-slika (b). HRTEM-posnetek na kvazikristalni fazi (c), in njegova FFT-slika (d)

Figure 4. HRTEM of an interface between α -Al and IQC-precipitate (a), and its corresponding FFT (b). HRTEM of a precipitate formed on IQC (c), and its corresponding FFT (d)

Njegova FFT ni periodična. Razdalja med konicami se večja s srednjo vrednostjo zlatega razmerja τ ($(1+\sqrt{5})/2 \approx 1.62$) v glavnih smereh. To močno kaže, da imajo izločki ikozaedrično kvazikristalno zgradbo [6]. Mrežne ravnine se epitaksialno raztezajo od kvazikristalne faze do ploskovno centrirane kubične mreže [7]. To omogoča nastanek nizkoenergijske meje med kvazikristalno fazo in α -Al in prednost za nastajanje kvazikristalnih izločkov pred drugimi izločki. Več podrobnosti se lahko dobi v [8].

Primarni kvazikristalni izločki predstavljajo mesta heterogene nukleacije za izločke T-faze. Vsak kvazikristalni delec omogoča nastanek več izločkov T-faze. Začnejo nastajati po zadrževanju 15 min pri temperaturi. Njihove začetne velikosti so bile dolžina okoli 15 nm (vzporedno z mejo med kvazikristalno fazo in α -Al) in debelina 10 nm (navpično na mejo med kvazikristalno

After cooling the sample down back to room temperature, HRTEM images were acquired to study the structure of formed precipitates. Fig. 4a shows a HRTEM-image of the interface between α -Al and one precipitate. The α -Al reflections in FFT indicated that the Al matrix is on [111] zone axis. The precipitate exhibited a threefold symmetry. Its FFT was not periodic. The distances between peak positions increased

with the golden mean τ ($(1+\sqrt{5})/2 \approx 1.62$) in the main directions. This strongly indicates that precipitates had an icosahedral quasicrystalline structure [6]. Closer inspection showed an excellent matching between the matrix and the precipitate in the HRTEM-image, and coincidence of some diffraction spots in the corresponding FFT. The lattice planes extended epitaxially from the quasicrystalline phase to the FCC-matrix [7]. This allows the creation of a low energy interface between IQC and α -Al, and the

fazo in α -Al). Hitrost rasti je bila približno linearna s časom v smeri vzporedni z mejo in sorazmerna $t^{0.5}$ v smeri, navpični nanjo. Na koncu je bil izloček dolg 135 nm in debel 45 nm. HRTEM je pokazal dobro ujemanje med kvazibinarno fazo in α -Al. FFT-slika izločka je kazala periodičnost.

Difuzijski koeficient Cu pri 300 °C je sorazmerno velik. Temperatura je bila nad metastabilnimi temperaturami solvus za GP-cone θ'' in θ' . Tako se je lahko prenasičenost z bakrom izrazila v nastanku faze Al_2Cu . Al_2Cu je začel nastajati heterogeno na kvazikristalnih delcih približno po istem času, kot so prvi kvazikristalni delci nastali v osnovi. Razdalje med delci Al_2Cu , izračunane po metodi najmanjših kvadratov, so bile okoli 100 nm, kar ustreza razdaljam difuzije Cu. Delci Al_2Cu so rasli prvih 30 min in potem so se začeli raztapljati. Po 60 min so se skoraj vsi delci Al_2Cu raztopili, samo na določenih mestih so delci Al_2Cu vztrajali v mikrostrukturi po 150 min (delec označen s puščico na sliki 3b).

Mikrotrdotna analiza z obremenitvijo 100 mN je pokazala, da se je trdota vzorcev, toplotno obdelanih pri 200 °C, povišala z 120 HV na 130 HV po 24-urnem zadrževanju pri tej temperaturi, medtem ko se je trdota vzorcev pri 400 °C zmanjšala z 120 HV na 110 HV. Na drugi strani so imeli vzorci, toplotno obdelani pri 300 °C, največjo trdoto po približno 60 min, kar ustreza zmanjševanju nastajanja izločkov pri preiskavi s TEM na licu mesta. To kaže, da hitrost difuzije v foliji ni bila mnogo večja od difuzije v masivnem vzorcu kljub mnogo večji površini.

Rezultati te preiskave so pokazali, da lahko nastajajo različne vrste izločkov po toplotni obdelavi zlitine Al-Mn-Be-Cu. Pri 200 °C lahko zaradi omejene difuzije Mn nastajajo le z bakrom bogati izločki. Pri višjih temperaturah (550 °C) nastajajo ternarni izločki, katerih sestava je blizu ravnotežni

preference for formation of IQC precipitates before other possible precipitates. More details can be found in [8].

Primary IQC-particles represented heterogeneous nucleation sites for T-phase precipitates. Each IQC-particle enabled formation of several T-phase precipitates. They started to form after holding for around 15 min. Their initial sizes were about 15 nm in length (parallel to the IQC/ α -Al interface) and 10 nm in thickness (perpendicular to the IQC/ α -Al interface). The growth rate was approximately linear with time in the direction parallel to the interface, and proportional to $t^{0.5}$ in the direction perpendicular to it. At the end, the precipitate was 135 nm in length and 45 nm in thickness. HRTEM showed nice matching between both IQC and α -Al. FFT of the precipitate exhibited periodicity.

Diffusivity of Cu at 300 °C was rather fast. The temperature was above the metastable solvus temperatures for GP-zones, θ'' and θ' . Thus the Cu-supersaturation could only be released by formation of Al_2Cu . Al_2Cu started to form heterogeneously on primary IQC-particles approximately after the same time as first quasicrystalline precipitates formed in the matrix. The Al_2Cu interparticle distances were about 100 nm, which corresponded to Cu RMS diffusion distances. Al_2Cu particles increased in size for the first 30 min, and then started to dissolve. After 60 min almost all Al_2Cu dissolved, only occasionally remains of Al_2Cu particles persisted in microstructure after 150 min (e.g. the particle indicated by the arrow in Fig. 3b).

The microindentation study using a load of 100 mN revealed that the hardness of samples heat-treated at 200 °C slowly increased up to 24 h holding from 120 HV to 130 HV, whereas hardness of samples exposed to 400 °C decreased from 120 HV to 110 HV. On the other hand, the samples heat-treated at 300 °C exhibited

fazi τ_1 ($\text{Al}_{29}\text{Mn}_6\text{Cu}_4$). Pri vmesni temperaturi (300°C) nastajajo v trdnoraztopinski osnovi, bogati z Al, kvazikristalni delci. Primarne kvazikristalne faze predstavljajo primerno mesto za nukleacijo drugih kristalnih izločkov. Tako kvazikristalni izločki kot heretogeno nastali izločki imajo z osnovo določena kristalografska razmerja.

4 Sklepi

Rezultati te preiskave so pokazali, da lahko nastajajo različne vrste izločkov po toplotni obdelavi zlitine Al-Mn-Be-Cu. Pri 200°C lahko zaradi omejene difuzije Mn nastajajo le z bakrom bogati izločki. Pri višjih temperaturah (550°C) nastajajo ternarni izločki, katerih sestava je blizu ravnotežni fazi τ_1 ($\text{Al}_{29}\text{Mn}_6\text{Cu}_4$). Pri vmesni temperaturi (300°C) nastajajo v trdnoraztopinski osnovi, bogati z Al, kvazikristalni delci. Primarne kvazikristalne faze predstavljajo primerno mesto za nukleacijo drugih kristalnih izločkov. Tako kvazikristalni izločki kot heretogeno nastali izločki imajo z osnovo določena kristalografska razmerja.

5 Zahvale

To delo je bilo delno financirano iz raziskovalnega programa P2-0120 (Slovenska raziskovalna agencija – ARRS). Del raziskave je podprla Evropska unija. Zahvaljujemo se za podporo Evropske raziskovalne infrastrukture EUMINAFab (ustanovljena kot FP7 posebni programi, pogodba št. 226460), partner Tehnološki inštitut Karlsruhe (KIT). XRD-raziskave pri Elettra, Sincrotrone Trieste, Italija so bile financirane iz 7. okvirnega programa evropske unije (FP7/2007-2013) po pogodbi št. 226716 in CALIPSO št. 312284. Raziskave s TEM na Tehniški univerzi Graz

the maximum hardness after approximately 60 min, which coincided with the ceasing of precipitation formation in in-situ TEM study. This indicated that the diffusion rate in the foil was not much greater than in the bulk samples, in spite of much larger surface.

The results of this study showed that several types of precipitates can form upon heat treatment of an Al-Mn-Be-Cu alloy. At 200°C only Cu-rich precipitates can form, due to limited diffusion of Mn. At higher temperatures (550°C) ternary precipitates formed, closely related to the equilibrium τ_1 ($\text{Al}_{29}\text{Mn}_6\text{Cu}_4$). In the intermediate temperature range (300°C) IQC-particles formed in the Al-rich solid solution matrix, which primary IQC presented a convenient nucleation site for other crystalline precipitates. Both IQC-precipitates and heterogeneously formed crystalline precipitates had definite crystallographic relationships with the matrix.

4 Conclusions

The results of this study showed that several types of precipitates can form upon heat treatment of an Al-Mn-Be-Cu alloy. At 200°C only Cu-rich precipitates can form, due to limited diffusion of Mn. At higher temperatures (550°C) ternary precipitates formed, closely related to the equilibrium τ_1 ($\text{Al}_{29}\text{Mn}_6\text{Cu}_4$). In the intermediate temperature range (300°C) IQC-particles formed in the Al-rich solid solution matrix, which primary IQC presented a convenient nucleation site for other crystalline precipitates. Both IQC-precipitates and heterogeneously formed crystalline precipitates had definite crystallographic relationships with the matrix.

so bile financirane iz 7. okvirnega programa evropske unije po pogodbi 312483 – ESTEEM2 (Integrirana infrastrukturna iniciativa–I3)

5 Acknowledgement

This work was partly financed by the research programme P2—0120 (Slovenian Research Agency – ARRS). Part of the work was carried out with the support of the European Community. We appreciate the support of the European Research Infrastructure EUMINAFab (funded under the FP7 specific programme Capacities, Grant Agreement Number 226460), its partner Karlsruhe Institute of Technology (KIT). The XRD-investigations at Elettra, Sincrotrone Trieste, Italy, were funded by the European Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) under Grant Agreement No. 226716 and CALIPSO No. 312284. The TEM investigations at TU Graz have received funding from the European Union Seventh Framework Programme under Grant Agreement 312483 - ESTEEM2 (Integrated Infrastructure Initiative–I3).

Viri / References

- 1 T. Oz, E. Karakose and M. Keskin, *Mater. Des.* **50**, 399-412 (2013).
- 2 F. Zupanic, G. Lojen, L. Barba and T. Boncina, *Mater. Charact.* **70**, 48-54 (2012).
- 3 A. Biswas, D. J. Siegel, C. Wolverton and D. N. Seidman, *Acta Mater.* **59**, 6187-6204 (2011).
- 4 Y. Du, Y. A. Chang, B. Huang, W. Gong, Z. Jin, H. Xu, Z. Yuan, Y. Liu, Y. He and F. Y. Xie, *Materials Science and Engineering: A* **363**, 140-151 (2003).
- 5 Z. Shen, C. Liu, Q. Ding, S. Wang, X. Wei, L. Chen, J. Li and Z. Zhang, *Journal of Alloys and Compounds* **601**, 25-30 (2014).
- 6 V. Elser, *Phys. Rev. B* **32**, 4892-4898 (1985).
- 7 A. Singh and A. P. Tsai, *J. Phys.-Condes. Matter* **20**(2008).
- 8 F. Zupanič, D. Wang, C. Gspan and T. Bončina, *Mater. Charact.* **106**, 93-99 (2015).

AKTUALNO / ACTUAL



Sodelovanje društva v organih WFO

V času livarske razstave GIFA smo se v Duesseldorfu udeležili redne letne generalne skupščine Svetovne livarske organizacije (WFO) in Komisije WFO za izobraževanje in poklicni razvoj. Na generalni skupščini smo obravnavali in sprejeli zapisnik lanskoletne generalne skupščine, ki je bila junija lansko leto v Bilbao v Španiji. Skupščina se enkrat letno seznana s globalnimi trendi v livarstvu na podlagi poročil, ki jih podajo posamezne članice WFO. Na podlagi le-teh je letos pripravljeno izčrpno poročilo na nivoju WFO iz katerega so razvidni trendi ključnih sprememb v vsaki državi-članici WFO z makroekonomskega vidika in gibanja na področju livarske industrije, s obravnavo okoljevarstvene in energetske problematike. WFO-poročilo smo prejeli pred tednom in ga bomo do konca tega leta poslali na vodstva vseh podjetij članic. Nadalje so bila podana poročila o delu WFO komisij za neželezne in železne livarne, komisije za energijo in okolje ter komisije za izobraževanje in poklicni razvoj. Skupščina je obravnavala in sprejela poročilo o finančnem poslovanju za preteklo obdobje in finančni plan in plan aktivnosti za leto 2016.

Na skupščini se vsako leto vnaprej odloča tudi o kadrovskih predlogih za vodstvo WFO (predsednik in podpredsednik) in nadzorni odbor, ker mandati le-teh trajajo samo dve leti.

Na seji WFO Komisije za izobraževanje in poklicni razvoj, ki je bila ustanovljena lansko leto smo oblikovali naslednja programska izhodišča in cilje:

- Zagotoviti primerjalne analize sedanjih oblik livarskega izobraževanja in usposabljanja v posameznih okoljih, ki bi bila v pomoč nacionalnim livarskim organizacijam in livarnam v prizadevanjih za dvig znanja na področju livarskih procesov in livarskih tehnologij.
- Razviti baze podatkov in zagotoviti smernike preko WFO spletne strani za programe izobraževanja in usposabljanja, ki so na voljo
- Olajšati sodelovanje in partnerstvo za razvoj morebitnih novih programov usposabljanja s strani nacionalnih livarskih organizacij in izmenjavo dobrih praks
- Podpreti nacionalne livarske organizacije pri spodbujanju karier v livarski industriji v cilju večanja njene prepoznavnosti



g. Andrew Turner, Generalni sekretar WFO, g. Vinod Kapur, predsednik WFO



Delegati plenarne
skupščine

Komisija podpira tudi dosedanje aktivnost v smeri uveljavljanja mednarodnega potrdila o usposobljenosti za livarsko stroko za livarske kadre.

Kot možne aktivnosti v naslednjih korakihi je komisija videla tudi v organiziranju posebne Mednarodna konferenca o izobraževanju in poklicnem razvoju.

Poročala: *mag. Mirjam Jan-Blažič*

AKTUALNO / ACTUAL

55. mednarodno livarsko posvetovanje Portorož 2015

Nekaj utrinkov predvsem iz ozadja priprav na letošnji osrednji livarski dogodek Društva livarjev Slovenije, tradicionalno mednarodno livarsko posvetovanje s livarsko razstavo v Portorožu, ki je potekala v času od 16.-18.09.2015, smo vam že predstavili, sicer pretežno skozi fotografski objektiv, v tretji letošnji številki Livarskega vestnika. To pot pa sledi celovita predstavitev.

Prvi organiziran kontakt udeležencev posvetovanja in razstave je po programu bil tako kot prejšnja leta, pripravljen na predvečer delovnega pričetka posvetovanja pri županu Občine Piran. To druženje ima dvojni pomen. To je prvi spoznavni večer med udeleženci in dolgoletnimi stanovskimi prijatelji in tudi priložnost, da udeleženci slišijo najpomembnejše informacije o domačem okolju, kjer posvetovanje poteka. Za to izjemno priložnost, ki smo jo vrsto let deležni s strani Občine Piran se g. županu Petru Bossmannu prijazno zahvaljujemo.

Posvetovanje in razstavo je s pozdravnim nagovorom odprla predsednica Organizacijskega odbora posvetovanja in predsednica Društva livarjev Slovenije, mag. Mirjam Jan-Blažič, ki je uvodoma pozvala vse prisotne, da z minuto molka počastijo



Na sprejemu pri županu občine Piran, g. Petru Bossman-u

spomin na nedavno preminulega dolgoletnega in častnega predsednika Društva livarjev Slovenije, zaslužnega profesorja dr. Milana Trbižana. Po tem je na kratko predstavila tematska področja iz programa posvetovanja in pomen posvetovanja ter livarsko razstavo. Na koncu se je še posebno zahvalila vsem pokroviteljem posvetovanja in sponzorjem razstave, ki so omogočili izvedbo tradicionalnega družabnega programa, medijskim sponzorjem pa za poročanje o tem pomembnem livarskem dogodku.

Ob zavedanju vse večjega pomena znanja za razvoj livarstva, je letošnje posvetovanje bilo organizirano z motom: »Znanje za konkurenčnost livarstva«.

Med institucijami je svoje prispevke predstavilo skupaj 16 univerz, od tega 14 tujih in 6 raziskovalnih inštitutov, od tega 5 tujih, ter 13 gospodarskih organizacij od tega 8 tujih ter 3 strokovna združenja, od tega eno iz tujine. Skupaj je bilo v dveh dneh podanih 34 predavanj, med temi 10 plenarnih. Na posvetovanju je dodatno bilo predstavljenih 11 posterskih prikazov raziskovalnih projektov, od tega 8 iz tujine. Tudi v letošnjem programskem delu smo na osnovi dobrih izkušenj iz preteklega leta posvetovanje razdelili v tri tematska področja: plenarna predavanja (skupaj 10), železove litine in livarske tehnologije (skupaj 12) ter neželezne zlitine (skupaj 12). V celotnem predstavitvenem delu je vključno s soavtorji sodelovalo 159 strokovnjakov, od tega kar 107 iz tujine.

Plenarna sekcija je zajela najzanimivejša predavanja širšega značaja in je potekala ves prvi dan posveta. Predstavljeni so bili pregledi razvojnih usmeritev ter vidnejši raziskovalni dosežki. Predstavljamo najpomembnejše zaključke teh predavanj:

- **M. Schumacher, glavno poslovodstvo Zveznega združenja nemške livarske industrije, Düsseldorf, ZR Nemčija**, je glede na pomen nemškega livarstva, podal za celotno branžo zanimivo predavanje: »Stanje in izzivi nemškega in evropskega livarstva«. Prikazan je bil pregled proizvodnje ulitkov v Nemčiji in Evropski skupnosti v letu 2014. Glede na stalne zahteve po: znižanju deleža CO₂, znižanju porabe energije, znižanju stroškov na enoto proizvoda, višji stopnji obdelave, je za evropsko livarstvo imperativ v zahtevah po investiranju in s tem zadržanju vodilne tehnološke vloge. Prav tako je bila izpostavljena večna tekma med železnimi in neželeznimi zlitinami in vprašanje tehniško realnih ocen posameznih livarskih panog. Ob tem je livarstvo pod stalno zahtevo doseganja mejnih vrednosti za ulitke. Vse navedeno brezpogojno zahteva dodatna vlaganja v optimizacijo procesov ter kakovostne kadre, brez katerih ne bo mogoče zadržati sedanjih pozicij na globalnem trgu.

- **prof. dr. R. Bähr iz Univerze Otto von Guericke, Magdeburg, ZR Nemčija** je skupaj s sodelavci je predstavil temo: »Primarno oblikovanje –aditiven izdelovalni proces«. Podan je bil pregled primarnih postopkov in možnosti uporabe aditivnih postopkov: hitra izdelava prototipov, 3D printanje, 4D printanje. V osnovi gre za hitro realizacijo od CAD modela

do končnega produkta s postopki aditivne večslojne proizvodnje, ki omogoča širši izbor materialov, prihranek časa, izdelavo form, orodij in prototipov.

- **prof.dr. A. Križman iz Univerze v Mariboru** je skupaj s soavtorji podal predavanje: »Slovensko livarstvo v letu 2014 in vključevanje v strategijo razvoja metalurgije v Sloveniji v obdobju 2015-2025«. Slovensko livarstvo je v letu 2014 ustvarilo vzpodbudne rezultate, saj je količinska proizvodnja bila za 8,6% višja kot leto pred tem, število zaposlenih je poraslo za 4,4%, čisti prodajni prihodki so bili višji za 10,8%, dodana vrednost na zaposlenega pa je bila kar za 16% višja in je z vrednostjo 40.068 EUR prvič presegla mejo 40.000 EUR. Ob pripravi Slovenske strategije pametne specializacije so bili upoštevani dokumenti: Obzorje 2020, Program razvoja evropske metalurgije 2012-2022 ter načela trajnostne proizvodnje. Livarstvo kot sestavni del metalurgije je v dokumentu Strategije pametne specializacije-S4, uvrščeno v prednostno področje 9- Materiali za končne produkte, kot fokusno področje Trajnostne tehnologije v predelavi kovin in zlitin.

- **prof. dr. P. Schumacher iz Univerze za montanistiko, Leoben, Avstrija**, je s soavtorji predstavil »vidike modernih proizvodnih metod pri integriranem tlačnem litju«. Ob problemu poroznosti je izpostavil možnosti temperiranja, lokalnega zgoščanja in možnosti pravilnega izbora zlitin. Pri reševanju lokalnih temperatur in tudi lokalnega zgoščanja je najpomembnejša stabilnost v celotnem procesu litja. Vrednosti koeficienta toplotnega prenosa materiala orodja, ki so pomembne za termične simulacije, je potrebno ugotoviti s predhodnimi testi. Tudi lokalna zgoščanja je možno računalniško simulirati.

- **dr. M. Topić iz Katedre za gospodarstvo in poslovno upravljanje Univerze za montanistiko, Leoben, Avstrija**, je s soavtorji izpostavil danes zelo aktualno temo: »Livarski izdelki in njihova dodana vrednost z vidika življenjske dobe«. Direktiva Evropske energetske učinkovitosti in zakonodaja o energetske učinkovitosti zahtevata zmanjšanje porabe energije in izboljšanje okoljskih pogojev delovanja. Za preiskave učinkovitosti potenciala v livarski industriji je bil razvit modularni, multinivojski približek. Metodologija omogoča identifikacijo potenciala energetske učinkovitosti in omogoča načrtovanje, vrednotenje in optimizacijo porabe energije v livarski industriji. Ob tem življenjska doba (LCA) predstavlja pomemben del razvoja modela LCA namreč predvideva metodo določevanja vpliva na okolje proizvoda oziroma materiala in tok energije preko celotne dobavne verige, od vhoda surovin do konca življenjske dobe. Model je usmerjen na tri indikatorje relevantne za livarsko industrijo: 1. Potencial globalnega segrevanja, 2. Kumulativne energetske zahteve in 3. Kumulativne materialne zahteve.

- **prof. dr. I. Riposan, iz Politehnične univerze Bukarešta, Romunija**, je s soavtorji obdelal problematiko iz področja sivih litin: »Pospeševanje cepljenja sivih litin- rešitev za mejne proizvodne pogoje«. Veliko pregrevanje v visoko zmogljivih, srednje frekvenčnih indukcijskih pečeh, je vzrok neugodnih pogojev za nukleacijo grafita. Izredno nizka vsebnost žvepla namreč povečuje težave pri nastajanju kroglastega grafita. Rešitev za ta problem je, da po obdelavi z magnezijem dodamo ca. 0,01 % S. Modifikator in pospeševalci modificiranja (S, O, Al, Mg- CaSi) zagotavljajo ugodne pogoje. Enake učinke z resulfurizacijo lahko dosežemo tudi pri litini z vermikularnim grafitom.

- **dr. K. Weiss iz podjetja RWP GmbH, Roetgen, ZR Nemčija**, je s soavtorji podal svoje raziskave: »Izračun mikro osnove za Al-Si zlitine«. V sodobnih strojih z notranjim zgorevanjem so vse večje zahteve po visokih trdnostih in visoko mejo lezenja pri povišanih temperaturah uporabe. Pri strukturi Al-Si gre dejansko za kompozit z Al matrico in vložki

Si oziroma ob prisotnosti Fe še z FeSi iglicami. Pri visokih temperaturah uporabe (glave cilindrov) je opazno nastajanje utrujenostnih razpok. S CT analizami so bile ugotovljene 3D oblike posameznih komponent strukture. Primerjali so rezultate dobljene z novimi računskimi teorijami in rezultate meritev. Ob dobri primerljivosti so tako dobili prve aplikacije za realno stanje v ulitkih. Z računsko metodo bo torej možno predvideti realna stanja izdelanih zlitin in s tem njihovo uporabnost v zahtevnih pogojih.

- **mag. B. Kalkunte iz podjetja Calcom ESI SA, Lausanne, Švica**, je s soavtorjem predstavil aktualno temo: »Simulacije litja uspešno uporabljene v industriji kokilnega in tlačnega litja«. Z eliminiranjem napak v izdelkih, zmanjšanjem izmeta in zmanjšanjem stroškov dela, lahko livarne dosežejo izboljšave in konsistentno proizvodnjo. S simulacijsko ekspertizo je podjetje ESI uspelo, da je podjetje Honda Engineering, lahko prešel iz vakuumskega tlačnega litja nazaj h konvencionalnemu prezračevanju z oddušniki. S tem so zagotovljeni nižji proizvodni stroški pri izdelavi zelo zahtevnih ulitkov. S simulacijo strjevanja je bilo možno postopoma ponovno uporabiti cenejšo konvencionalno prezračevanje.

- **prof.dr. R. Squatrito iz raziskovalnega centra za industrijo, Univerze v Bologni, Italija** je s soavtorji podal predavanje: »Kako raziskave lahko podpirajo evropske livarne v namenu povečanja konkurenčnosti«. V avtomobilski industriji so vse večje zahteve po izdelavi komponent z nižjo težo in zagotavljanju žilavosti v zahtevnih delovnih pogojih, brez povezav med oblikovalci in proizvajalci teh komponent ni možno doseči želenih rezultatov. Med raziskovalci iz univerz ter načrtovalci v avtomobilski industriji in proizvajalci ulitkov je nujen tako imenovani »usklajen inženirski pristop in razvoj«. Gre za kreativno sinergijo na strateških področjih. Predstavljen je bil primer skupnega inženirskega reševanja ob sodelovanju Univerz v Bologni, Parmi in Modeni s podjetjem Ferrari S.p.A. pri litju visoko obremenjenih glav motorja za Ferrari V8.

- **prof.dr. P. Mrvar iz oddelka za materiale in metalurgijo Naravoslovnotehniške fakultete Univerze v Ljubljani**, je s soavtorji predstavil raziskavo: »Izdelava referenčnih vzorcev«. Izdelava referenčnih etalonov za potrebe proizvodnje na področju kovinskih materialov zahteva skrbno načrtovanje in natančnost pri izdelavi. Predstavljena je bila ena izmed tehnologij za izdelavo referenčnih etalonov z gravitacijskim litjem v trajne forme s ciljem zagotavljanja usmerjenega strjevanja. Ugotovljeno je bilo, da so vzorci uliti na bakreno ploščo, hlajeno s tekočim dušikom, bistveno bolj homogeni. Raziskana tehnologija je uporabna za aplikacijo izdelave referenčnih etalonov.

Drugi dan posvetovanja je bil namenjen predavanjem v obeh sekcijah. Težišča teh predavanj so bila v raziskavah zlitinskih sistemov, v novih tehnoloških postopkih, računalniških simulacijah in aplikacijah.

Iz sekcije železovi litin in livarskih tehnologij izpostavljam dve predavanji:

- **mag. P. Weiss iz livarskega inštituta RWTH, Univerza Aachen, ZR Nemčija**, je s soavtorji predstavil raziskavo: »Baker in aluminij v sivi litini s kroglastim grafitom z visoko vsebnostjo silicija«. Eden najpomembnejših dosežkov zadnjih let na področju sive litine je načrtovanje čistih feritnih, raztopinsko utrjenih nodularnih litin. Raziskan je bil vpliv dodatkov bakra in aluminija na mikrostrukturo in mehanske lastnosti duktilne litine z 3,8% silicija. Učinek bakra je podoben kot pri konvencionalni sivi litini. Učinka feritnega utrujanja ni. Pri dodatkih aluminija do 2% se povečajo trdnostne lastnosti, zmanjšujeta se nodularnost in raztezek pri prelomu. Aluminij torej omogoča dodatne kombinacije lastnosti.

- **U. Klančnik iz podjetja Valji d.o.o., Slovenija**, je s soavtorji predstavila temo: Karakterizacija modificirane indefinitne litine za izdelavo delovne plasti valjev. Struktura v ulitem stanju je ključnega pomena za doseganje lastnosti posameznih plasti valjev, ob tem se izpostavlja dodajanje nukleacijskih kali v talino oziroma modificiranje. Predstavljeni so bili učinki modificiranja taline s ferovanadijem in ferovolframom. Modificirana talina je bila centrifugalno ulita v predgreto cilindrično kokilo. Posamezne delovne plasti so imele v povprečju 5% višje trdote, ob tem pa ni prišlo do povečanega deleža cementita. V strukturi so bili zaznavni precipitanti na osnovi vanadija in volframa. Raven trdot je bila primerljiva z višje legiranimi indefinitnimi litinami.

Iz sekcije neželeznih zlitin omenjamo dve najzanimivejši predavanji:

- **prof.dr. W.K. Krajewski iz Fakultete za livarski inženiring, AGH Univerze Krakow, Poljska** je s soavtorji predstavil predavanje: »Obdelava staljenih Al-Zn livarskih zlitin«. Preiskovane so bile zlitine z10-12, 20 in 25-26% Zn. Zlitine so bile modificirane z dodatki TiCa1 oziroma ZnTi. Modifikacija omogoča znatno udrobnjenje in močno povečanje raztezka. Udrobnjenje poviša stabilnost strukture in duktilnost ter s tem industrijsko uporabnost teh zlitin. Doseženi raztezki 2,5 % ter trdnosti 230-250 Mpa omogočajo tehniško uporabnost teh zlitin.

- **J. Pristavec, iz podjetja Exoterm-IT, Slovenija** je s soavtorjem iz podjetja Magma GmbH, Aachen, Nemčija, predstavil inženirsko temo: »Iskanje razlogov nastanka razpok na avtomobilskih platiščih z uporabo numerične simulacije celotnega proizvodnega cikla«. Med testiranjem avtomobilskega platišča iz zlitine AlSi11Mg, je v področju zračnega ventila prihajalo do nastanka razpok. Z numerično simulacijo je bila izvedena analiza celotnega proizvodnega procesa: litje, strjevanje, ohlajanje (zrak,voda), lakiranje (toplotna obremenitev, mehanska obdelava).Test na lakiranem platišču ni pokazal pojavljanja razpok. Med postopkom lakiranja je izdelek več ur na temperaturi 150° C. S tem prihaja do popuščanja notranjih napetosti, kar prepreči nastajanje razpok. S celovito numerično simulacijo je torej možno odkrivanje napak v posameznih fazah procesa.

Znotraj obeh sekcij so bila predstavljena tematsko zelo raznovrstna predavanja, ki slonijo na znanstvenih dognanjih in izsledkih kot tudi na primerih izkušenj in dobrih praks in razvojnih dosežkov strokovnjakov znotraj livarskih podjetij. Iz celotnega sklopa le-teh omenjamo še naslednja predavanja:

- **prof.dr. I. Dugić, Linneaus University, Faculty of Technology, Växjö, Švedska:** »Vpliv ohlajevalne hitrosti na livarske napake na rotorjih iz bele litine z visoko vsebnostjo kroma«

- **prof.dr. M. Acarer s sodelavci, Selcuk University, Konya, Turčija:** »Karakterizacija superzlitine na bazi Co izdelane s precizijskim litjem«

- **prof. dr. K. Dilger s sodelavci, Braunschweig University of Technology, Braunschweig, Nemčija:** »Eksperimentalno in numerično napovedovanje življenjske dobe pri toplotni obremenitvi orodij za tlačno litje aluminijevih zlitin«

- **U. Gauermann, Electronic GmbH, Neuhausen, Nemčija:** »Zmanjšanje stroškov z uporabo sistemov procesnih podatkov«

- **Č. Mikyška s sodelavci, Livar d.d., Ivančna Gorica, Slovenija:** »Vpliv različnih pokrivnih materialov za "sandwich" postopek«

- **D. Sojer s sodelavci, Magneti Ljubljana d.d., Ljubljana, Slovenija:** »Centrifugalna atomizacija Nd-Fe-B kosmičov za uporabo pri izdelavi trajnih magnetov«

- **N.M. Talijan, University of Belgrade, Institute of Chemistry, Technology and Metallurgy, Srbija:** »Inovativni pristop k izboljšanju razpršenosti kovinskih oksidov in strukturno odvisnih lastnosti materialov za električne kontakte na osnovi srebro/kovinski oksidi«

- **T. Muhič s sodelavci, LTH Castings d.o.o., Ljubljana, Škofja Loka, Slovenija:** »Preizkušanje tesnosti vodno hlajenih ohišij elektronike s pomočjo helija v zračni atmosferi«

- **J. Kunič s partnerji, FerroČrtalič d.o.o., Slovenija:** »Uporaba abrazivov v livarski industriji«

Letošnje livarsko posvetovanje z livarsko razstavo in s številnimi uglednimi tujimi in domačimi predavatelji iz znanstvenih inštitucij in iz industrije, po odzivih sodeč, se še nadalje utrjuje kot eno od največjih mednarodnih livarskih srečanj v tem delu Evrope, kjer je evidentna visoka strokovna raven in odlična organizacija.

Zahvala vsem tistim, ki ste kakorkoli sodelovali v pripravah in uspešni izvedbi tega livarskega dogodka. Posebna zahvala gre vsem sponzorjem razstave in še posebno naslednjim pokroviteljem posvetovanja:

OMCO FENIKS SLOVENIJA d.o.o. kot zlati pokrovitelj



LTH CASTINGS d.o.o. kot srebrni pokrovitelj



LTH Castings



DiFA d.o.o. in SIAPRO d.o.o. kot bronasta pokrovitelja

Predsednik programskega odbora *Zaslужni prof.dr. Alojz Križman*

Predsednica organizacijskega odbora *Mag. Mirjam Jan-Blažič*



Plenarni predavatelji: M. Schumacher BDG, prof.dr.R. Bähr, Univerza v Magdeburgu, prof. dr. A. Križman, Univerza v Mariboru, prof. dr. P. Mrvar, Univerza v Ljubljani ter M. Jan-Blažič, predsednica



Plenarni predavatelj
prof. dr. P. Schumacher



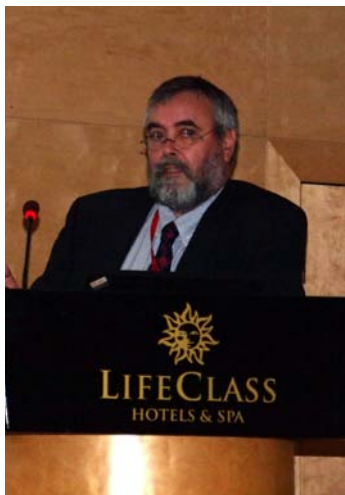
Plenarni predavatelj
dr. M. Topić



Plenarni predavatelj
prof. dr. I. Riposan



Plenarni predavatelj B. Kalkunte



Plenarni predavatelj dr. K. Weiss



Predavatelj prof. dr. R. Squatrito



Udeleženci plenarnih predavanj

Utrinek iz razstave: levo Lynn Postle, predsednica britanske revije Foundry Trade Journal in Andrew Turner, generalni sekretar WFO



Pogled na razstavo





Na razstavnem prostoru partnerjev +HAGI+ (A)



Na razstavnem prostoru Elkem-a (N)



Razstavni prostor Oskar Frech (D)



Razstavni prostor Inductotherm Europe (UK)



Na razstavnem prostoru Exoterm-it



Na razstavnem prostoru RWP GmbH (D)



Kontakti pred razstavnim prostorom Termita



Razstavni prostor Analysis (SRB)



Razstavni prostor FerroČrtalič



Predstavniki razstavnega prostora Talum



Razstavni prostor Siapro d.o.o.



Na razstavnem prostoru Mecas ESI (CH) in TC livarstvo

Razstavni prostor
Mahle Letrika
Komen



Razstavni prostor
Labena d.o.o.



Razstavni prostor
Grimas (H)





Razstavní prostor
TDR Legure



Razstavní prostor razstavljalcev Mazzon in
Faprosid (I)



Razstavní prostor
Belloi & Romagnoli
(I)



Na razstavnem prostoru EKW Kremen



Razstavní
prostor APR-
Predstavništvo tujih
sejmov



Na razstavnem prostoru Living



Razstavní prostor Primakern



Razstavni prostor KOOZ



Razstavni prostor Chemets



Razstavni prostor Topomatika



Na razstavnem prostoru Sistemske tehnike



Na razstavnem prostoru IRT 3000



Razstavni prostor Lotrič Meroslovje d.o.o.



Razstavni prostor SwatyComet

AKTUALNO / ACTUAL**Poročilo o seminarjih Društva livarjev Slovenije v letu 2015**

Na Občnem zboru Društva livarjev Slovenije smo februarja letos sprejeli program dela Društva, v katerem smo predvideli, da bo Društvo organiziralo za članstvo tri enodnevna seminarja in sicer enega za železo livarne, enega za neželezne livarne in enega za vse livarne z okoljevarstveno tematiko za livarne. Spomnili bi na to, da smo se samo internio dogovorili, da se za programske namene poslovno leto 2015 šteje od februarja 2015 do februarja 2016. Prva dva seminarja sta že realizirana, zadnji z okoljevarstveno problematiko pa je že dogovorjen z Gospodarsko zbornico Slovenije za 11. februar 2016. Skladno z dogovori smo za oba letošnja seminarja, tako za železo in jeklo livarne, kot za neželezne livarne, angažirali strokovnjake iz OGI - Avstrijskega livarskega inštituta v Leobnu, s katerim smo pričeli sodelovati že lansko jesen, ko smo organizirali osnovni seminar iz tlačnega litja.

Društvo je kot organizator seminarjev sledil predlogu, ki je bil sprejet na Občnem zboru februarja lanskega leta, da je potrebno organizirati seminarje za visoko strokovne kadre in že izkušene kadre s srednjo izobrazbo. Izbrane teme naj poglobljeno obravnavajo izbrani segment tehnoloških novosti in delno naj se posvetijo tudi osvežitvi dosedanjih znanj.

Skladno s sklepom Občnega zbora lanskega leta so bile teme seminarjev izbrane s strani imenovanih dveh strokovnih komisij, sestavljenih od predstavnikov livarn - članic Društva: za železne in jeklo livarne in za neželezne livarne. V komisiji za železne in jeklo livarne so sodelovali predstavniki iz livarn: LIVAR d.d., OMCO FENIKS d.o.o. in LITOSTROJ JEKLO d.o.o.. V Komisiji za neželezne livarne pa predstavniki livarn: LTH Castings d.o.o., HIDRIA ROTOMATIKA D.O.O. in MARIBORSKA LIVARNA d.d. Pred končnim izborom seminarjskih tem je strokovna komisija povprašala tudi za mnenje ostalih članic društva.

Izvajalec seminarjev (OGI) omejuje velikost seminarske skupine na največ 12 slušateljev, ker gre za intenzivni seminar, ki ga po svojih metodah vodita dva predavatelja. V seminar za železo livarne, ki je bil organiziran v aprilu letos, so bili vključeni predstavniki KOVIS LIVARNE d.o.o., LITOSTROJA JEKLO d.o.o., LIVARJA d.d., LIVARNE TITAN d.o.o. in livarne OMCO FENIKS d.o.o.. Tematsko je ta seminar obravnaval kakovost in vpliv tipičnih metalurških procesov na nehomogenost, kar je bilo namenjeno praktično vsem železo livarnam. Po segmentih je bila obravnavana siva litina z kroglastim grafitom, temprana litina in tudi jeklo litina.

Pri seminarju za neželezne livarne smo se srečali z visokim interesom livarn za udeležbo oz. izbrane teme izobraževanja, zato smo se skupaj s OGI odločili, da naredimo kar dva seminarja zaporedno v dveh dneh in v njih vključimo skupno 24 slušateljev. V seminarjih 30.11. in 1.12.2015 so sodelovali predstavniki naslednjih livarn: DIFA d.o.o., HIDRIA ROTOMATIKA, d.o.o., LTH CASTINGS d.o.o., MAHLE LETRIKA KOMEN d.o.o., MARIBORSKA LIVARNA d.d., TALUM d.d. in TELKOM d.o.o.. Seminarja sta bila pripravljena v dveh stopnjah: I. bazni (ponovitveni iz lanskega leta) in II. nadaljevalni.

Na podlagi dosedanjih izkušenj in ocen slušateljev bomo skupaj s komisijami za izbor tem seminarjev pripravili predloge za nadaljevalne seminarje, ki jih bomo vključili v program dela Društva za leto 2016.

Poročala: *mag. Mirjam Jan-Blažič*

AKTUALNO / ACTUAL**Koledar dogodkov**

Termin	Naziv dogodka	Kraj / država dogodka
12.-14.01.2016	EUROGUSS 2016	Nürnberg/Nemčija
16.-17.02.2016	1. Internationales Deutsches Formstoff-Forum 2016	Duisburg/Nemčija
17./18.03.2016	Aachener Giesserei-Kolloquium	Aachen/Nemčija
07./08.04.2016	60. Österreichische Giesserei-Tagung	Bad Ischl/Avstrija
14./15.04.2016	Deutscher Giessereitag 2016	Magdeburg/Nemčija
20./21.04.2016	18th Global Foundry Sourcing Conference 2016	Shanghai/Kitajska
10./13.05.2016	Intertool 2016	Wien /Avstrija
11./12.05.2016	Aalener Giesserei Kolloquium 2016	Aalen/Nemčija
22./25.05.2016	72 th World Foundry Congress 2016	Nagoya/ Japonska
12./14.06.2016	2016 China (Guangzhou) Int'l Metal & Metallurgy Exhibition	Guangzhou /Kitajska
12.-16.09.2016	Fond-Ex	Brno/Češka
20.-22.09.2016	Metal 2016	Kielce/Poljska
23.-24.09.2016	International Foundry Forum	Dresden/Nemčija



DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE SLOVENIAN FOUNDRYMEN SOCIETY

vas vljudno vabi na / invites you to

56. MEDNARODNO LIVARSKO POSVETOVANJE

56th INTERNATIONAL FOUNDRY CONFERENCE

PORTOROŽ 2016

s spremljajočo razstavo / with accompanying exhibition

14.-16. september 2016

Informacije/Contact: Društvo livarjev Slovenije,

Lepi pot 6, p.p. 424, 1001 Ljubljana,

T: +386 1 2522 488, F: +386 1 4269 934

drustvo.livarjev@siol.net, www.drustvo-livarjev.si

***Prijetne božične praznike in uspešno
novo leto želimo vsem članom
Društva livarjev Slovenije in bralcem
Livarskega vestnika.***

***Vodstvo Društva livarjev Slovenije
in redakcija Livarskega vestnika***

***We wish a merry Christmas and
a happy and prosperous new
year to all members of Slovenian
Foundrymen Society and readers
of Livarski vestnik.***

***Management team of the Slovenian
Foundrymen Society and Editorial
Board of Livarski vestnik***

