

# 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](mailto:drustvo.livarjev@siol.net)  
[www.drustvo-livarjev.si](http://www.drustvo-livarjev.si)

## Glavni in odgovorni urednik /

Chief and responsible editor:  
prof. dr. Alojz Križman  
E-mail: [probatus@triera.net](mailto:probatus@triera.net)

## Tehnično urejanje / Technical editoring:

mag. Mirjam Jan-Blažič

## Uredniški odbor / Editorial board:

prof. dr. Alojz Križman, Univerza v Mariboru  
prof. dr. Primož Mrvar, Univerza v Ljubljani  
prof. dr. Jože Medved, Univerza v Ljubljani  
doc. dr. Gorazd Lojen, Univerza v Mariboru  
prof. dr. Andreas Bührlig-Polaczek, Giesserei Institut RWTH Aachen  
prof. dr. Peter Schumacher, Montanuniversität Leoben  
prof. dr. Reinhard Döpp, TU Clausthal  
prof. dr. Jozef Suchý, AGH Krakov  
prof. dr. Jaromír 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,

## Lektorji / Lectors:

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

## Tisk / Print:

Flex d.o.o.

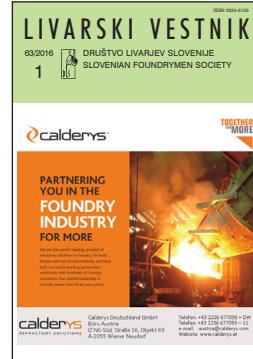
## Naklada / Circulation:

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

**Letna naročnina:** 35 EUR z DDV

**Year subscription:** 35 EUR (included PP)

Dano v tisk: marec 2016



## Naslov/Adress:

Calderys Deutschland GmbH  
Büro Austria, IZ Nö-Süd,  
Strasse 16, Objekt 69  
A-2355 Wiener Neudorf

T:+43 2236 677090 + DW  
F:+43 2236 677093 - 11  
E:austria@calderys.com  
<http://www.calderys.at>

## VSEBINA / CONTENTS

Stran / Page:

H. Kerber, M. Riegler, G. Schindelbacher, P. Schumacher:  
**Nove možnosti z izboljšano opremo za preskušanje bentonitne peščene mešanice / New Possibilities with Improved Green Sand Testing Facilities**

2

Molnar, D., Sandor, B., Dul, J.:  
**Simulacija livnosti tekočih kovin z različnim reološkim obnašanjem / Flowability Simulation of Liquid Metals with Different Rheological Behaviour**

15

J. Medved, S. Kores, P. Mrvar, A. Križman, M. Vončina:  
**Vpliv dodatka Zr na lastnosti Al zlitin / Influence of Zr addition on Al alloys properties**

29

I. Naglič, S. Ilić, B. Markoli, M. Dolenc, B. Leskovar, Ž. Filipič, M. Perhoč, J. Kranner, M. Bizjak, B. Skela, L. Kelhar, Š. Kozole, D. Gerčar, T. Ramšak:  
**Modifikacija zlitine AISi7Mg lite v peščeno formo / Modification of AISi7Mg alloy cast in to a sand mould**

36

## AKTUALNO / ACTUAL

Pregled svetovne lивarske proizvodnje v letu 2014	48
Okoljevarstvena problematika za livarne	52
Seje organov Društva livarjev Slovenije	53
Euroguss 2016	56
Portoriž 2016	57
Koledar dogodkov	57

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

## Nove možnosti z izboljšano opremo za preskušanje bentonitne peščene mešanice

### New Possibilities with Improved Green Sand Testing Facilities

#### Izvleček

Kakovost form iz svežega peska je poglavitna za kakovost ulitka in zmanjšanje površinskih napak. V večini industrijskih okolij se še vedno uporabljajo ročno vodenih strojev, katerih zasnova je iz prejšnjega stoletja. Medtem ko omogočajo te zastarele naprave ohranjati kakovost v livařnici, se z njimi ne dobi novih dodatnih informacij o kakovosti bentonitne peščene mešanice. Ta prispevek bo dal informacije o razvoju nove opreme za preskušanje zgoščevanja in stiskanja bentonitnih peščenih mešanic, preskušanje trdnosti mokrih peskov, ki daje primerjavo z vrednostmi, ki se dobijo z ročno vodenimi stroji. V okviru predstavitev bomo vpeljali pojme iz zrnavostnih sistemov za obnašanje bentonitnih peščenih mešanic.

#### Abstract

The quality of green sand moulds is paramount for the casting quality and reduction of surface defects. In most industrial environments hand driven machines which concepts were developed in the last century are still used. While these old fashioned apparatuses can help to maintain quality in a foundry no new additional information on the green sand quality will be obtained. This presentation will give information on the development of novel green sand testing facilities for compaction, pressure, as well as wet strength testing and gives comparison to values obtained by manually operated machines. Within the presentation concepts for granular systems will be introduced for the behaviour of green sands.

## 1 Uvod

Spošno znanje v livařnách o lastnostih bentonitne peščene mešanice in njegovem vplivu na obnašanje livařskih napak se je občutno zmanjšalo z uporabo zunanjega preskušanja peskov in zaradi zunanjih svetovalcev. Poleg tega je malo ali vsaj premalo raziskav v okviru univerz, ki bi financirale pomembne študije o lastnostih bentonitnih peščenih mešanic. Ne poudarja se dovolj, da je večina livařskih napak pri litju v pesek povezana z nezadostnim

## 1 Introduction

The general knowledge within foundries on green sand properties and its influence on casting defect behaviour has significantly decreased as a result of external sand testing and dependence of external consultants. Moreover even within University research little or too few research has been performed to attract funding for significant studies on green sand properties. It cannot be stressed enough that in sand casting the majority of casting defect can be related to

upravljanjem s bentonitno peščeno mešanico. Zadnje raziskave in razvoj so podpirali le dobavitelji livarske industrije z glavnim poudarkom na anorganskih sistemih veziv na osnovi vodnega stekla in zmanjšanju fenolnih vezivnih sredstev v organskih vezivih zaradi zmanjšanja emisij in neprijetnih vonjav, ki pa na drugi strani povečujejo tekočnost peska ali trdnost forme.

Ves ta pozitiven razvoj je bil dosežen z zelo zastarelo, ročno upravljano opremo za preskušanje peskov in zanemarjal se je razvoj natančnejše opreme za preskušanje peskov. Te ročno upravljane preskuševalne naprave še vedno predstavljajo dejansko stanje na tem področju. Da bi izboljšali lastnosti bentonitnih peščenih mešanic in razumeli njihovo obnašanje, je razvoj novih preiskovalnih metod bistven. Skoraj istočasno in vzporedno je potekal razvoj navpične preiskovalne naprave na IFG-inštitutu v Düsseldorfu [1] v sodelovanju s podjetjem Jung Instruments GmbH in vodoravne preiskovalne naprave na Danski tehnični univerzi DTU [2,3,4] v okviru doktorskega raziskovalnega dela.

Za klasično preskušanje bentonitnih peščenih mešanic so se uporabili vzorci bentonitne peščene mešanice, ki so bili stisnjeni s tremi udarci in imeli geometrijo Ø50 mm x 50 mm. Nato se je z ročno upravljano ročico ali pri modernejših napravah z ročico, ki jo nastavlja električni servomotor, nastavilo preskušanje trdnosti s tlakom, strigom, dvojnim strigom, s cepljenjem, natezne trdnosti in natezne trdnosti v mokrem. Za posamezne naloge se uporabljajo posebni vložki. Za zelo občutljive preskuse v mokrem ali preskušanje s stiskanjem se uporabljajo ločene naprave. Slabosti teh metod preskušanja je ročno upravljanje, ki je odvisno od upravljalca in v vseh primerih vizualno odčitavanje rezultatov, ki ne omogoča neposrednega

an insufficient green sand management. Recent research and development has been only supported by suppliers of the foundry industry, however, with a major emphasis on anorganic water glass binder systems and the reduction of phenolic binder in organic binders to reduce emission and unpleasant smells while simultaneously increasing e.g. fluidity or strength.

All these positive developments were mainly performed with very old fashioned manually driven sand testing equipment and a significant aspect of the development of more accurate sand testing equipment was neglected. Nevertheless these manually driven sand testing apparatuses still represent state of the art sand testing equipment. In order to improve green sand properties and its understanding thereof it is essential to develop new testing methods. Nearly simultaneously parallel development ensued for a vertical testing machine at the IFG Institute in Düsseldorf [1] in collaboration with the company Jung Instruments GmbH and of a horizontal testing machine at the Technical University of Denmark DTU [2,3,4] within a PhD research work.

Conventional green sand testing is on samples which are compacted with 3 impacts to a standardised geometry of a Ø50 x 50mm green sand body. Subsequently green-compression, - shear, - double-shear, -splitting-strength, - tensile, - wet-tensile testing is on a testing apparatus with manual driven crank or in modern(ised) machines by a geared electric servomotor. Special inserts are used to adapt for the testing tasks. For the extreme sensitive wet tensile test or the compaction test separate testing machines are used. The disadvantages of these testing procedures are that manual driven testing equipment is user dependent and that in all cases measurement is by a visual read out via a friction dial which does not permit direct feeding of the data

vnašanja teh v elektronski sistem kakovosti. Poleg tega ne omogoča risanja krivulj sila-pomik kot pri klasičnem preskušanju materialov, niti se dobljeni rezultati ne morejo uporabili v znanstvene namene, kot je simulacija mehanskega obnašanja forme iz svežega peska z metodo končnih elementov.

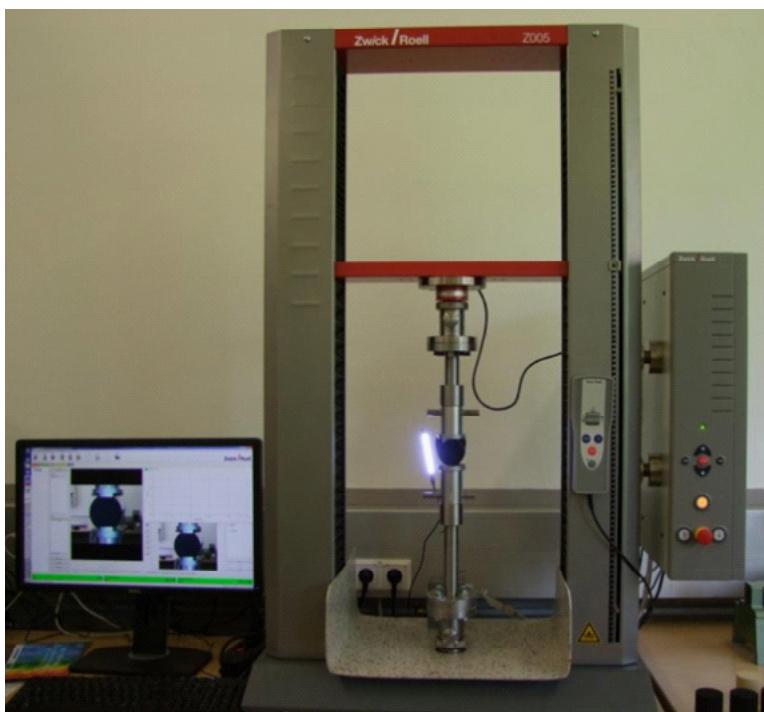
Te pomanjkljivosti so pripeljale do razvoja navpičnih naprav za preskušanje peska z risanjem diagramov sila – premik. Preskušanje natezne trdnosti peskov je težavno, ker so sile pri tem preskušanju zelo majhne v primerjavi s silami v kovinah. Zato ostaja, da se razišče, če preje odkrite prehodne cone na začetku krivulj sila – premik predstavljajo odziv obremenjenega svežega peska, ali če je treba razviti natančnejše postopke preskušanja.

V nadaljevanju bomo predstavili razvoj modernih metod preskušanja svežega

into an electronic quality system. Moreover, no force-displacement curves such as in the classical material testing equipment are obtained and the obtained data cannot be used for scientific purposes such as in finite element simulation of the mechanical behaviour for green sand moulds.

It is these disadvantages which led to the first developments of a vertical sand testing machine which force-displacement plots. Tensile testing of green sands is difficult to perform as the forces present are very small compared to those of metals. Therefore, it remains to be explored if the earlier detected transition zones at the beginning of force displacement curves are a response of the green sand under load or if a more accurate testing procedure needs to be developed.

In the following sections results of the development of modern sand testing



**Slika 1:** Univerzalni stroj za preskušanje svežih peskov (Zwick Z005)

**Figure 1:** Universal green sand testing machine (Zwick Z005).

peska z upoštevanjem modernih metod zgoščevanja z udarci in jih primerjali s klasičnim ročno vodenim preskušanjem industrijskih bentonitnih peščenih mešanic.

## 2 Preskusne metode

### 2.1 Univerzalni stroj za preskušanje peskov

V primerjavi s kovinskimi materiali so za preskušanje bentonitne peščene mešanice potrebne zelo majhne sile. V primeru nateznega preskušanja mokrega peska so sile lahko le 5-10 N, kar pomeni, da je treba zelo paziti, da se dobijo ponovljivi rezultati. Zato so potrebne zelo občutljive in natančne obremenitvene celice, ki dovoljujejo visoko frekvenco meritev, da se izdelajo občutljive krivulje sila – premik vzorcev peščenih form iz svežega peska. V splošnem se od moderne opreme za preskušanje bentonitnih peščenih mešanic pričakuje naslednje:

- velika frekvanca meritev in dovolj velik RAM
- sprotro (on-line) zasledovanje krivulj sila – premik
- uporabniku prilagojeno programiranje
- obremenitvene celice z visoko ločljivostjo, da se olajšajo meritve natezne trdnosti v mokrem
- prilagodljiva elektronska dokumentacija rezultatov in predstavitev
- vgradnja v sisteme za zagotavljanje kakovosti

Zaradi takih zahtev se uporabljajo posebni univerzalni preskuševalni stroji, kot je naš uporabljeni Zwick Z005, ki omogočajo veliko stopnjo prostosti pri majhnih preskuševalnih obremenitvah. Za ta preskuševalni stroj smo prilagodili klasične vložke, podobne tistim kot pri ročno vodenih strojih, kar kaže slika 2. Posebna pozornost

methods taking into account modern impact compaction methods will be presented in comparison to classical manual testing equipment for industrial green sands.

## 2 Experimental Methods

### 2.1 Universal Sand testing machine

In comparison to metallic material only very small forces are required for the testing of green sand. In the case of the wet tensile test the forces can be as low as 5-10 N which emphasizes the care which is required to achieve reproducible results. Therefore extreme sensitive and precise load cells permitting a high measurement frequency are required to measure the sensitive force-distance curves of the weak and brittle granular material behaviour of green sand mould samples. Overall the following requirements exist for a modern sand testing facility:

- High measurement frequency and sufficient RAM
- Observation of force-distance curves online
- Flexible programming for the user
- Load cell with high resolution to facilitate wet tensile strength measurements
- Flexible electronic documentation of results and their representation
- Incorporation into quality assurance systems

Based on these requirements only high end universal testing machines such as the Zwick Z005 machines used here give this degree of freedom for small testing loads. For this universal testing machine conventional inserts similar to those existing in manual testing were adapted, see figure 2. Special care was taken to facilitate measurements within the symmetry axis of samples and that as little as possible alignment of the

je bila posvečena, da so bile lahko meritve izvedene z vzorci obstoječe simetrije in da se je vzorec čim manj prilagajal uporabljeni sili. Posebno natezni preskus v mokrem je zahteval posebno prilagoditev majhnim pričakovanim silam in dodatni uporabljeni toploti za posnemanje kondenzacijske cone v bentonitni peščeni mešanici. Za stroj Zwick Z005 je bil razvit poseben nosilec za proporcionalno-integralno-diferencialno (PID) krmiljen vir toplote (slika 1), da se olajša natezni preskus vzorcev svežih peskov v mokrem. Dodatno je bila nameščena povezava z video kamero, da se med preskušanjem lahko opazovalo obnašanje vzorcev svežega peska.

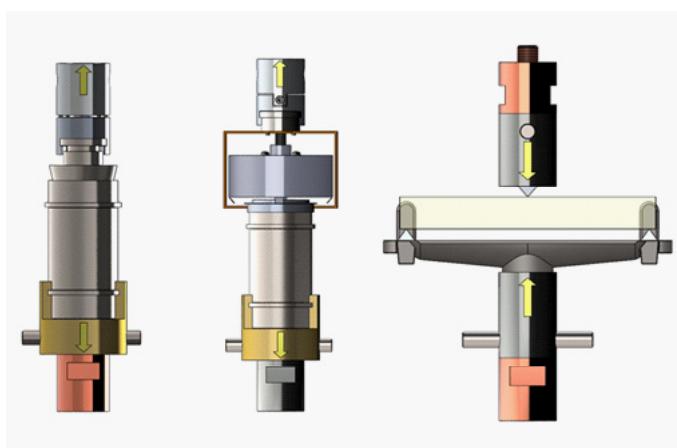
## 2.2 Mešanica svežega peska

Mešanice po 20 kg svežega peska so bile pripravljene z dvoosnim mešalnikom (Kollergang, Simpson). Njihove sestave so v razpredelnici 1. Sestavine so bile ločeno stehtane in dodane v mešalnik. V osnovi so mešanice vsebovale različne deleže bentonita in vode, da so se dosegli različni trdnostni nivoji za nadaljnje preskušanje s klasičnimi ročno vodenimi in modernimi napravami, kot je univerzalni stroj Zwick Z005. Peščenim mešanicam se je

sample to the applied force was observed. In particular the wet tensile test required special adaption to the low expected forces and the additional heat involved to mimic the condensation zone in green sand. A special holder was developed by Zwick Z005 (see figure 1) with a PID controlled heat source to facilitate wet tensile testing of green sand samples. Additionally a link to video camera was installed to see the overall behaviour of the tested green sand samples online.

## 2.2 Green Sand Mixture

Greensand mixtures of each 20 kg were produced by double shaft edge mixer (Kollergang, Simpson) which composition is seen in table 1. Components were individually weight and added to the mixer. Principally, the mixtures contain different bentonite and water content to obtain different strength levels in subsequent testing on the classical hand driven and newly developed sand testing on the universal testing machine by Zwick (Z005). The sand mixtures were kept without given rise to excessive trying. For this purpose bags within plastic containers with tight lids were used.



**Slika 2:** Vložki za preskušanje svežega peska na tlak, strig, dvojni strig, razkol, na nateg, nateg v mokrem in upogib

**Figure 2:** Green sand testing inserts for compression, shear, double shear, splitting, tensile, wet tensile and bending strength measurements

**Razpredelnica 1:** Mešanice po 20 kg svežega peska in dodatkov**Table 1:** Green sand mixtures and additives

za vsakih 20 kg / of each 20 kg	voda / water [%]	bentonit / bentonite [%]	premogov prah / coal dust [%]	voda / water [kg]	bentonit / bentonite [kg]	premogov prah / coal dust [kg]
mešanica 1 / mixture 1	3,00	6,50	--	0,60	1,30	--
mešanica 1 / mixture 2	5,00	6,50	--	1,00	1,30	--
mešanica 3 / mixture 3	4,00	5,00	--	0,80	1,00	
mešanica 3 + C/ mixture 3 + C	4,00	5,00	3,00	0,80	1,00	0,60
mešanica 4 / mixture 4	4,00	8,00	--	0,80	1,60	--
mešanica 4 + C / mixture 4 + C	4,00	8,00	3,00	0,80	1,60	0,60

preprečevalo čezmerno sušenje. Za to so se uporabile plastične posode s tesnimi pokrovi.

### 3 Rezultati

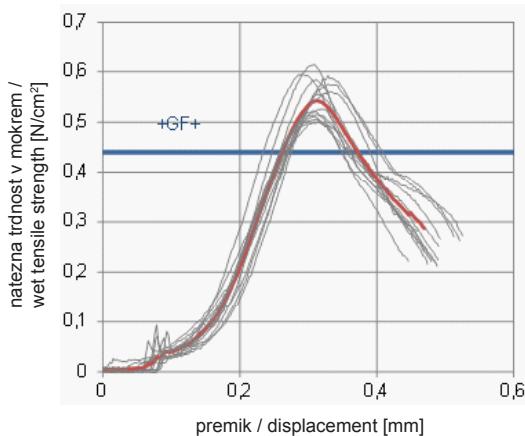
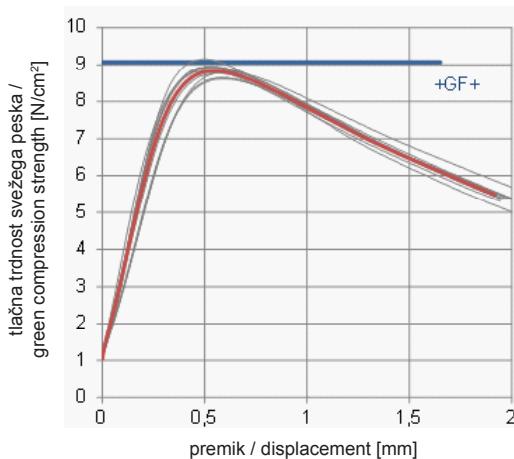
Za primerjavo nove preskuševalne metode s klasičnimi ročnimi preskusi je bilo narejenih vsaj 10 preskušanj z vsako metodo na vsakem preskusnem stroju z vzorci vsake mešanice peskov. A natezni preskusi so bili narejeni le na univerzalnem preskusnem stroju. Obsežno ovrednotenje povprečnih vrednosti in standardnih deviacij tlačne, cepilne, natezne trdnosti svežega peska in natezne trdnosti v mokrem, preskusov z dvojnim strigom na obeh strojih, z ročnim vodenjem in na univerzalnem stroju, prikazuje razpredelnica 2. Najvišja vrednost na univerzalnem stroju je bila izbrana za primerjanje s klasično metodo. Najvišje izmerjene vrednosti na univerzalnem stroju so bile v okviru standardnih deviacij tako pri klasični kot pri novi metodi preskušanja. Jasno se vidi, da so pri novi metodi manjše standardne deviacije kot pri klasični metodi pri vseh preskušanih peskih in vseh preskuševalnih metodah. Najbolj

### 3 Results

For a comparison of the new testing method to the conventional manual tests at least 10 samples of each sand mixture were tested for each testing machine and method. However the green sand tensile tests were only measured on the universal testing machine. Extensive evaluation of the mean value and standard deviation can be seen in table 2 for the compression, splitting strength, green tensile, wet tensile and double shear tests for both conventional hand driven and universal testing apparatuses. For the universal testing apparatus the maximum value was chosen for comparison to the classical method. The maximum values measured on the universal testing method are within the standard deviations of both the classical and new testing method. As a clear trend the new method shows a smaller standard deviation compared to the classical method for all sand mixtures and testing methods investigated. Most importantly measurements on the universal testing machines give force-displacement or strength-displacement curves respectively. In figure 3 a and 3b are shown the green-

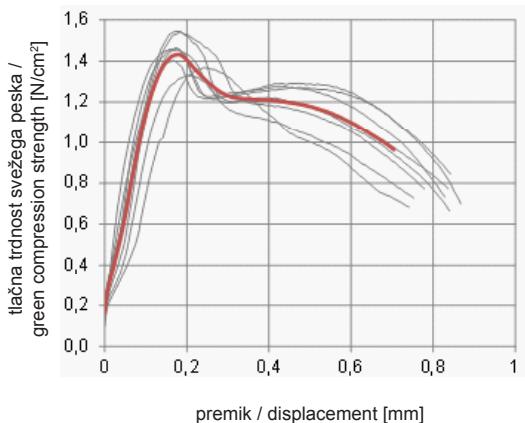
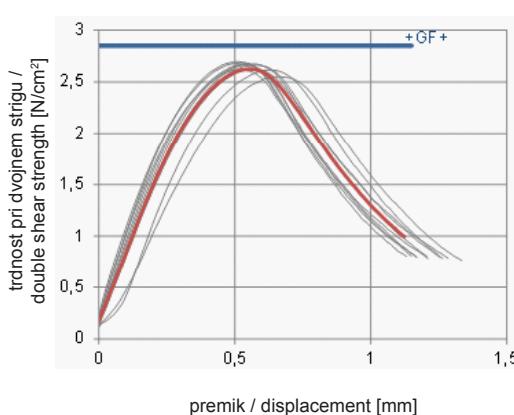
pomembno je, da se z univerzalnim strojem dobijo krivulje sila – premik odnosno trdnost – raztezek. Sliki 3 a in 3 b kažeta krivulje sila – premik za tlačni preskus s svežim peskom, preskus z dvojnim strigom, natezni preskus s svežim peskom in natezni preskus v mokrem. Dodatno sta srednja vrednost in standardna deviacija klasično izmerjenih vrednosti prikazani v modrem in označeni z »+GF+« glede na uporabljeni klasični

compression, double-shear, green-tensile and wet tensile strength - displacement curves. Additionally the mean value and the standard deviation of the conventionally measured data are shown in blue, marked “+GF+”, with respect to the used conventional testing apparatus. For each measuring method the curves show a closely bunched bundle of curves which exhibit a nearly common maximum point



**Slika 3a:** Tlačna trdnost svežega peska in natezna trdnost v mokrem

**Figure 3a:** Green compression and wet tensile strength



**Slika 3b:** Trdnost svežega peska pri dvojnem strigu in natezna trdnost

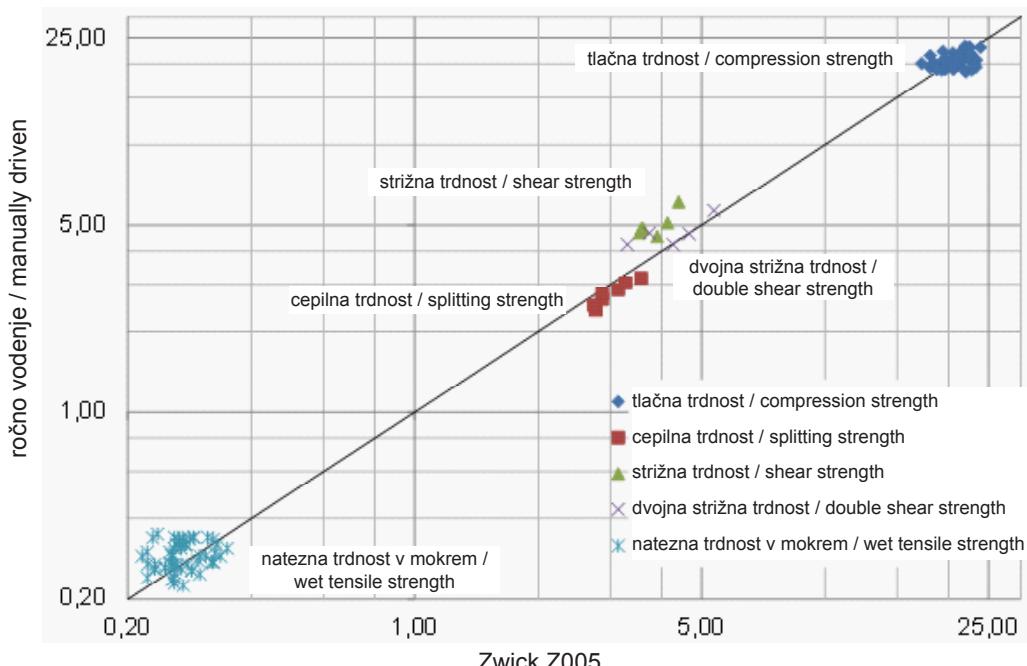
**Figure 3b:** Green double shear and tensile tensile strength

preskuševalni stroj. Pri vsaki meritni metodi so krivulje kot snop krivulj, ki imajo skoraj skupno najvišjo vrednost, ki dobro ustreza standardni deviaciji vrednosti, ki se je dobila s klasično metodo. Treba je poudariti, da so natezni preskusi v mokrem najbolj občutljiva metoda preskušanja. Posebno pozornost je treba posvetiti umerjanju klasičnih strojev za natezne preskuse v mokrem. Ko smo to naredili, se lahko dosežejo zadovoljivo ponovljivi rezultati, ki dovolj dobro ustrezajo rezultatom na univerzalnem preskuševalnem stroju.

Vse rezultate preskušanja svežih peskov lahko vidimo na diagramu na sliki 4, ki zajema tako klasične ročno vodene metode kot metode univerzalnega

which corresponds well within the standard deviation to the value obtained by the classical method. It is to point out that the wet tensile tests represent the most sensible testing method. Particular attention must be paid to the calibration of the conventional wet tensile test machines. Once this has been performed satisfactory reproducible results can be achieved which correspond well to that of the values obtained by the universal testing machine.

The overall results of the green sand testing can be visualized by plot of the values obtained of both conventional hand driven and universal testing methods seen in figure 4. Small deviations can only be seen for the sensitive wet tensile test in



Slika 4: Primerjava trdnostnih vrednosti, dobljenih z ročno vodenim in z univezalnim preskuševalnim strojem

Figure 4: Comparison of manual driven and on a universal testing machine obtained strength values

**Razpredelnica 2:** Povprečne vrednosti trdnosti svežega peska in standardna deviacija za različne metode preskušanja peščenih mešanic, opisane v razpredelnici 1

**Table 2:** Green sand strength mean values and standard deviation for different testing methods of sand mixture described in table 1

meritev / measurement		tlačna trdnost / compressive strength [N/cm <sup>2</sup> ]	cepilna trdnost / splitting strength [N/cm <sup>2</sup> ]	natezna trdnost bentonitne peščene mešanice / green tensile strength [N/cm <sup>2</sup> ]	natezna trdnost v mokrem / wet tensile strength [N/cm <sup>2</sup> ]	dvojna strižna trdnost / double shear strength [N/cm <sup>2</sup> ]
M 1	klasično / conventional	6,63	1,19	-	0,32	1,95
		s	0,25	0,06	-	0,06
	Zwick	6,47	1,22	1,12	0,35	1,92
		s	0,18	0,03	0,14	0,07
M 2	klasično / conventional	5,92	1,04	-	0,35	1,79
		s	0,09	0,05	-	0,03
	Zwick	5,85	1,11	0,99	0,41	1,73
		s	0,07	0,01	0,02	0,02
M 3	klasično / conventional	4,76	0,73	-	0,27	1,33
		s	0,10	0,07	-	0,05
	Zwick	4,58	0,83	0,75	0,32	1,10
		s	0,08	0,01	0,01	0,03
M 3+C	klasično / conventional	5,82	0,84	-	0,26	1,58
		s	0,06	0,05	-	0,04
	Zwick	5,59	0,99	0,89	0,39	1,53
		s	0,10	0,02	0,03	0,03
M 4	klasično / conventional	7,93	1,37	-	0,41	2,44
		s	0,12	0,05	-	0,06
	Zwick	7,82	1,51	1,42	0,53	2,26
		s	0,12	0,02	0,04	0,04
M 4+C	klasično / conventional	9,07	1,65	-	0,44	2,85
		s	0,09	0,05	-	0,04
	Zwick	8,85	1,64	1,40	0,61	2,65
		s	0,16	0,02	0,15	0,04

preskušanja. Majhna odstopanja lahko zaznamo le pri občutljivem nateznom preskusu v mokrem posebno pri peščenih mešanicah z majhno trdnostjo. Tukaj je potrebno posebno pozornost posvetiti umerjanju klasičnih strojev za merjenje natezne trdnosti v mokrem, kot omenjeno že prej. Pri manj zapletenih merilnih metodah, kot je preskušanje vpliva tlačne trdnosti

particular for low strength sand mixtures. Here particular attention must be given to the calibration of the conventional wet tensile testing machines as mentioned above. For less complex measurement methods such as compression crack-strength and shear testing very good correlation can be found for conventional hand driven and modern universal testing methods.

na nastanek razpok in merjenje strižne trdnosti, se dobe zelo dobre korelacije med klasičnimi ročno vodenimi in modernimi univerzalnimi metodami preskušanja.

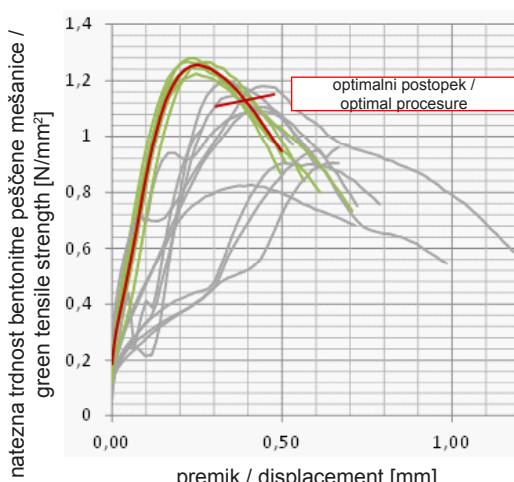
#### 4 Razprava

Najbolj pomembno je, da začetna oblika krivulje trdnost – pomik lahko določeno informacijo, če se spoštuje pravilen postopek preskušanja. Npr. če se groba površina vzorca dotika nosilca vzorca, predno se uporabi polna sila preskušanja vzorca, lahko to pripelje do spremenljivih oblik krivulje, do stopnic ali celo nastanka minimov [5]. Predvsem pri najmanjših upogibnih momentih ali enostranskih tlačnih ali nateznih silah med začetno obremenitvijo vzorca iz »mehkega« bentonitne peščene mešanice se lahko to vidi med meritvijo s to občutljivo metodo na začetni krivulji. Čeprav se ti učinki pri obremenjevanju vzorca lahko pojavijo tudi pri klasični metodi, se to ne bo zaznalo pri največji merjeni vrednosti. Primerjavo krivulj nateznih preskusov bentonitnih peščenih mešanic daje slika 5, na kateri so vidne podoptimirane in zglajene

#### 4 Discussion

Most importantly the initial shape of the strength displacement curve can give some information if the correct test procedure has been adhered to. In particular a settling of the rough sample surface to the sample holder until the full testing force is applied to the sample can lead to inconsistent curve shapes with steps and even minima [5]. In particular the lowest bending moments or one sided compression or tensile forces during the initial loading of the “soft” green sand sample can become visible in the initial curve during this sensitive measurement method. However, while these effects of sample loading will also occur in conventional testing this will not be detected in the maximum value measured. For comparison curves for the green tensile test are shown in figure 5 in which suboptimal and smooth optimised curve shapes can be seen. From figure 5 is clearly apparent that curves which do not show a smooth increase to a maximum will have lower maximum value.

With optimised measurement techniques in figure 6 each 10 force



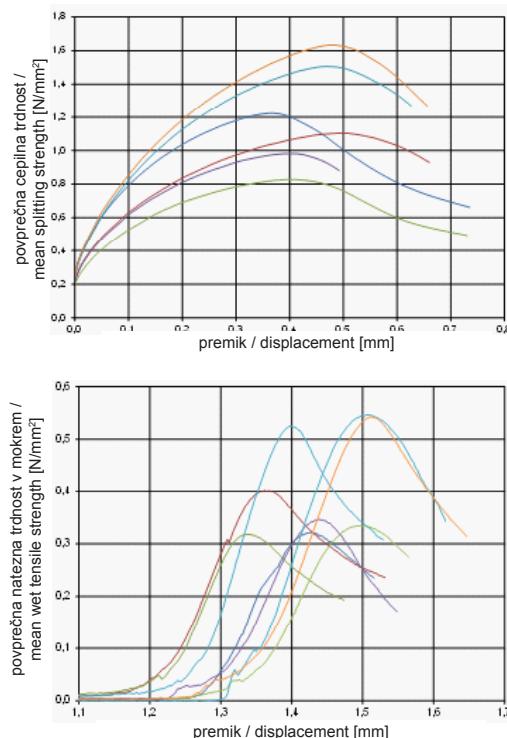
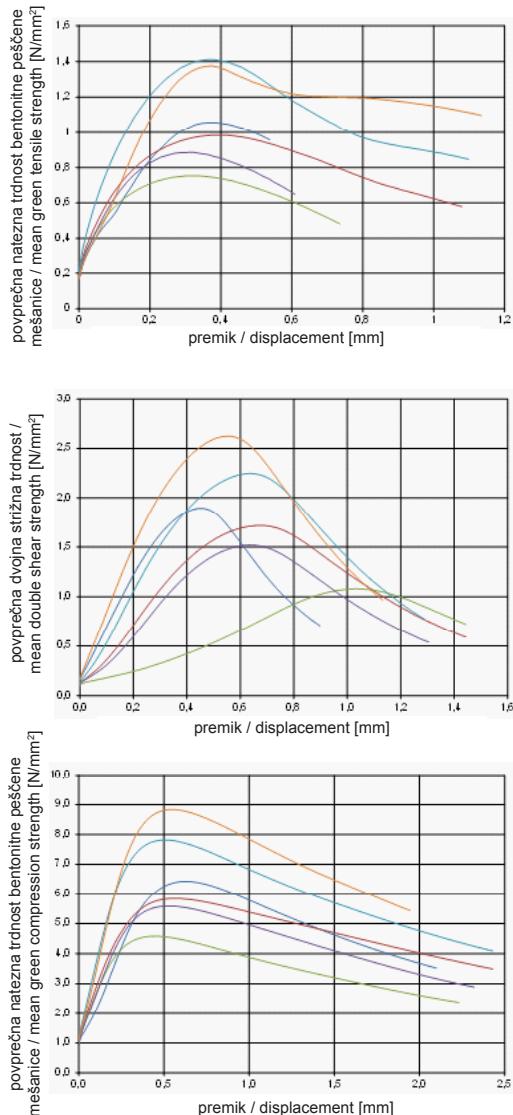
**Slika 5:** Krivulje natezna trdnost – premik za različne postopke preskušanja, prikaz nestacionarnih krivulj in krivulj za optimiran postopek

**Figure 5:** Green Tensile Strength-displacement curves for different test procedure and showing non steady curves and the curve for the optimised test procedure

optimirane krivulje. Slika 5 jasno kaže, da imajo krivulje brez mehkega prehoda v maksimum nižjo največjo vrednost.

Pri optimirani tehniki meritev na sliki 6 je vsaka od 10 krivulj sila – premik prikazana kot povprečna vrednost za dano peščeno mešanico in narejena je primerjava z drugimi peščenimi mešanicami za uporabljeno metodo preskušanja. Sklepne

displacement curves are shown as mean for a given sand mixtures and compared to the other sand mixtures for a given measuring methods. The summary curves of green compression, splitting strength, double shear, green tensile and wet tensile curves elucidates the behaviour of green sand. The maximum values of these curves represent the following interactions



**Slika 5:** Povprečne vrednosti krivulj 10 meritev tlačne, cepilne, natezne, dvojne strižne trdnosti in trdnosti v mokrem različnih peščenih mešanic

**Figure 5:** Mean values of 10 measurement curves for different sand mixtures for compression, splitting, tensile, double shear and wet tensile testing

krivulje za tlačno trdnost bentonitne peščene mešanice, cepilno trdnost, dvojno strižno trdnost, natezno trdnostjo bentonitne peščene mešanice in natezno trdnostjo v mokrem osvetlju obnašanje bentonitnih peščenih mešanic. Največje vrednosti teh krivulj predstavljajo naslednje interakcije s bentonitnimi peščenimi mešanicami: a) majhen delež bentonita (5 %) vodi do majhne trdnosti in brez dodatka premogovega prahu so te trdnosti še manjše (mešanici 3 in 3+C); b) velik delež bentonita (8 %) omogoča višje trdnosti, medtem ko nadaljnje povečanje deležev ima učinek le ob povečanju deležev premogovega prahu (mešanici 4 in 4+C). Zanimivo je, da sta mešanici 1 in 2 z vmesnim deležem 6,5 % bentonita med temi vrednostmi trdnosti.

Zelo pomembno je pripomniti, da se dodatne informacije lahko dobijo iz oblik krivulj sila – premik. Krivulje trdnost – premik kažejo značilno gladko obliko brez stopnic in imajo jasno izražen maksimum. S povečanjem premika krivulje kažejo še nekaj odpora proti deformaciji po dosegu maksimuma. To obnašanje je popolnoma drugačno kot pri krhkih steklih. Odpornost po doseženem maksimumu se lahko pripiše plastičnemu obnašanju zrnatega materiala, sestavljenega iz peska, premoga, bentonita, vode in praznin. Predvsem delež vode ima pomemben učinek na plastičnost. To kaže, da dipolne vezi in drsenje med ploščicami bentonita omogočajo določeno plastično obnašanje, ki je opazno pri preskusih s tlačno komponento [6].

## 5 Sklepi

Nova metoda preskušanja bentonitnih peščenih mešanic z univerzalnim strojem daje krivulje trdnost – premik z zelo veliko ločljivostjo, če se pravilno pristopi k preskušanju. Rezultati te nove metode se

within green sands. A low bentonite content (5%) leads to low strength, without coal addition the strength values are even lower (mixtures 3 and 3+C). High bentonite contents (8%) achieve high strength values whereas a further increase is noticeable with further addition of coal (mixture 4 and 4+C). Interestingly mixtures 1 and 2 with a medium bentonite content of 6.5% are found in between these strength values.

It is very important to note that additional information can be found in the shape of the force-displacement curves. The strength-displacement curves show characteristic smooth curves without any steps being present which exhibit a clear maximum. With increasing displacement the curves show still some resistance against deformation after the maximum. This behaviour is clearly different to brittle glasses. The resistance after the maximum can be described as plastic behaviour of the granular material consisting of sand, coal, bentonite, water and free volume. In particular the water content has an important effect of the plasticity displayed. This suggests that the dipole bonding and sliding between bentonite plates facilitates some plastic behaviour visible in testing methods with a compressive component [6].

## 5 Summary

The novel green sand testing method using a universal testing machine can give strength displacements curves of very high resolution if correct test procedures are adhered to. The results of this novel method correlated well with their maximum value to the single value measured by conventional manual driven test apparatuses. However the electronically obtained data can give additional information. In particular the initial

pri največjih vrednostih dobro ujemajo s posameznimi vrednostmi, dobljenimi z ročno vodenimi klasičnimi napravami. Vendar elektronsko dobljeni podatki lahko dajo dodatne informacije. Predvsem začetno povečanje oziroma hitrost doseganja največje vrednosti daje podatek o odpornosti forme proti deformaciji, tj. proti krčenju, ko se upoštevajo vplivi temperature. Maksimum in prikazano plastično obnašanje po doseganju maksimuma lahko v prihodnosti dajo informacijo o obnašanju bentonitnih peščenih mešanic kot zrnatega materiala. S takimi meritvami bo v bodoče možno računanje obnašanja forme po metodi končnih elementov, analizo lastnosti, ki so odvisne od temperature in te metode razširiti še na druge vrste formarskih materialov, kot so organska in anorganska jedra.

## Zahvala

To delo je financirala avstrijska agencija za raziskave FFG. Avtorji so predvsem hvaležni za koristne razprave s prof. W. Volkom in dr. H. Polzinom kot tudi za prispevke naših industrijskih partnerjev.

## Viri / References

- [1] Giesserei 99 07(2011), p. 46.
- [2] U. Nwagou, Dissertation DTU, Denmark (2012).
- [3] U. Nwagou et al. Int. J. Foundry Research 64(2012) issue 2
- [4] G. Schindelbacher et al., Giesserei 100 (2014) p. 40.
- [5] H. Kerber et al., Gießereirundschau 60,3/4(2013) p. 58
- [6] E. Flemming, W. Tilch, Formstoffe und Formverfahren, 1. Auflage, Deutscher Verlag für Grundstofindustrie, Leipzig – Stuttgart 1993, p. 58.

increase respectively rate to the maximum value will give the resistance of the mould against deformation against shrinkage once temperature influences are considered. The maximum and the displayed plastic behaviour after the maximum will give in the future more information of the material behaviour of green sands as a granular material. For future finite element calculations of the mould behaviour, temperature dependent property relationship can be obtained with this type of measurement which can also expand to other types of mould materials such as organic and anorganic cores.

## Acknowledgements

This work is supported by the Austrian Funding Agency FFG. The authors are particular thankful to the fruitful discussions with Prof. W. Volk and Dr. H. Polzin as well the input from all our industrial partners.

Molnar, D.<sup>1</sup>, Sandor, B.<sup>2</sup>, Dul, J.<sup>3</sup>

Univerza Miskolc, Inštitut za metalurgijo in livarstvo, Madžarska /  
Institute of Foundry Engineering, University of Miskolc, Hungary

## Simulacija livnosti tekočih kovin z različnim reološkim obnašanjem

## Flowability Simulation of Liquid Metals with Different Rheological Behaviour

### Povzetek

Tlačno litje je proces, s katerim se dobi skoraj končna oblika izdelka in pri katerem talina pod tlakom turbulentno zapoljuje livno votlino pred začetkom strjevanja. Obstajajo še druge tehnologije tlačnega litja kot ulivanje v testastem stanju, ki je bilo razvito, da se poveča kakovost ulitkov. Na simulacijo livnosti in sposobnosti zapolnjevanja forme vplivajo različni parametri kot temperatura taline in kokile, viskoznost v coni gobastega strjevanja, delež trdnih delcev in lastnosti toka. Razvili smo model krmilne prostornine za simulacijo litja v testastem stanju z uporabo trgovske računalniške opreme NovaFlow&Solid. Napravili smo več poskusnih simulacij, da bi preiskali livnost standardne zlitine AlSi7Mg in njen obliko.

**Ključne besede:** ulivanje v testastem stanju, obnašanje toka, tokovni preskus, računalniška simulacija

### Abstract

High pressure die casting is a near net shape process where turbulent filling and rapid solidification occurs under high pressure conditions. Alternative die casting technologies such as rheocasting have been developed in order to increase the quality of castings. The simulation of flowability and fillability is influenced by several factors such as temperature of the melt and the die, viscosity behaviour in the mushy zone, solid particle ratio and flow properties. Here a control volume model is developed to simulate the rheocasting process based on the commercial software NovaFlow&Solid. Several simulation trials were carried out to examine the flowability of normal AlSi7Mg alloy and its semisolid version.

**Key-words:** semi-solid rheocasting, flow behaviour, flow-test, computer simulation

### 1 Ulivanje v testastem stanju

Lahke kovine se v velikem obsegu uporabljajo v avtomobilski industriji in industriji transportnih sredstev kot kovne ali livne zlitine. Pred kratkim je evropska aluminijksa zveza (EEA) poročala, da se

### 1 Semi-solid metal processing

Lightweight metals are used extensively by the automotive and transport industries, both in wrought and cast forms. Recently the European Aluminium Association (EEA) reported that the amount of aluminium used

je količina aluminija v novih evropskih avtomobilih povečala s 50 kg leta 1990 na 140 kg leta 2010 [1], zato ni presenetljivo, da še narašča trend uporabe aluminija in aluminijevih zlitin v avtomobilski industriji in industriji transportnih sredstev. Ulični aluminijski deli so predvsem kot deli šasij in deli obesnih mehanizmov, koles, krmilnih mehanizmov, glavnih valjev, zavornih bobnov, ojnic itn. Danes se po podatkih EEA uporablja okoli 73 % livnih zlitin v Evropi v sektorju transportnih sredstev [1]. Zaradi velike produktivnosti, dimenzijske stabilnosti in izvrstne površinske dodelave se velika količina teh delov izdeluje s tlačnim litjem.

Pri iskanju izboljšanih lastnosti zlitin so se v zadnjih štirih desetletjih razvile in vpeljale na tržišče številne tehnike litja kot oblikovanje v testastem stanju ali stiskalno litje. Stiskalno litje je način izdelave delov s skoraj končno obliko, pri katerem se tekoča kovina skuje v končno obliko znotraj zaprte kokile. Združuje trdnost in celovitost izkovka z ekonomičnostjo in prilagodljivostjo konstrukcije ulitka. Izvor procesa je Sovjetska zveza, potem se je sredi 1970ih let začel trgovsko uporabljati za izdelavo sestavnih delov iz neželeznih kovin. V primerjavi s klasičnimi tehnikami ulivanja imajo tako izdelani ulitki zelo dobro kombinacijo trdnosti in raztezka, ki izvira predvsem iz njihove velike gostote ter drobnejše in bolj homogene mikrostrukture [2].

### 1.1 Zahteve po podhladitvi

Gonilna sila vsake fazne transformacije vključno s strjevanjem je sprememba proste energije. Molsko ali prostorninsko prosto energijo lahko izrazimo kot

$$F = E + P \times v - T \times S, \quad (1)$$

kjer je  $E$  notranja energija (tj. količina potrebnega dela za izločenje atomov iz

in new European cars had risen from 50 kg in 1990 to 140 kg in 2010 [1], so it is not surprising to see there is a growing tendency to employ aluminium and aluminium alloys in the automotive and transport industries. Cast aluminium components are mainly used in chassis and suspension applications, wheels, steering parts, cylinder heads, brake drums, connecting rods, etc. Today, based on data from the EEA, some 73 % of cast alloys go into the transport sector in Europe [1] and due to high production rate and dimensional stability as well as excellent surface finish and high volume production, a large number of these parts are produced by high pressure die casting method.

In the search for improved alloy properties, a number of casting techniques have been developed and introduced on the market in last four decades, such as semi-solid forming or squeeze casting. Squeeze casting is a casting method of producing near-net-shape parts in which the liquid metal charge is forged to shape inside closed dies. It combines the strength and integrity of forging with the economy and design of flexibility of casting. The process originated in the USSR, then in the mid-1970s became commercially available for custom manufacture of nonferrous components. Compared with conventional casting techniques, squeeze cast products have a very good combination of strength and elongation, which mainly comes from their high density and finer and more homogenous microstructures. [2]

### 1.1 The Undercooling Requirement

The driving force of any phase transformation, including solidification, is the change in free energy. The free energy per mole (molar free energy) or per unit volume

faze v neskončnost), P tlak, v prostornina, T temperatura in S entropija. Termodinamika zagotavlja, da se lahko notranja energija v sistemu brez zunanjih vplivov le zmanjšuje. Spremembo proste energije lahko opišemo kot vsoto povečkov, ki so posledica sprostitev posameznih predpostavk:

$$\Delta F = -\Delta G_v + \Delta G_r + \Delta G_T + \Delta G_c + \Delta F_p \quad (2)$$

Štirje pozitivni členi na desni strani enačbe so povečanje proste energije zaradi ukrivljenosti ploskve, temperature, sestave in spremembe tlaka. Sedaj pa ovrednotimo posamezne člene v tej enačbi.

Gonilna sila za ovrednotenje kroglastih kristalnih zrn je podhladitev ukrivljenosti. Ko se prostornina trdnega delca v tekočini zmanjšuje, se povečuje razmerje njegove površine in prostornine in prispevek medfazne energije k celotni entalpiji delca se povečuje. Tako se celotna entalpija trdne faze povečuje, če se velikost delcev v sistemu tekoče – trdn zmanjšuje.

Ko se velikost delca poveča za dr, kjer je r polmer delca, mora biti delo, potrebno za nastanek nove površine,  $d(4\pi r^2 \gamma)dr$ , enako delu, ki je posledica zmanjšanja proste prostorninske energije,

$$\frac{d}{dr} (4/3 \pi r^3 \Delta G_v) \quad (3)$$

Če po diferenciranju oboje izenačimo, je povečanje proste energije:

$$\Delta G_v = 2\gamma/r = \gamma K \quad (4)$$

Kjer je  $\gamma$  površinska energija med tekočino in trdnino in K je ukrivljenost. Potem se iz definicije za podhladitev:

$$\Delta T = \Delta G_v / \Delta S_f \quad (5)$$

dobi,

$$\Delta S_f \Delta T_r = \gamma K \text{ or}$$

$$\Delta T_r = T_e - T_r = (\gamma / (\Delta S_f)) K = \Gamma K \quad (6)$$

Kjer je  $\Delta T_r$  podhladitev ukrivljenosti,  $T_e$  ravnotežna temperatura (taljenja) krogle

(volumetric free energy) of a substance can be expressed as:

$$F = E + P \times v - T \times S, \quad (1)$$

where E is internal energy (i.e. the amount of work required to separate the atoms of the phase to infinity), P is pressure, v is volume, T is temperature and S is entropy. Thermodynamics stipulate that in a system without outside intervention, the free energy can only decrease.

The change in free energy can be described by the sum of the increase resulting from the relaxation of each particular assumption:

$$\Delta F = -\Delta G_v + \Delta G_r + \Delta G_T + \Delta G_c + \Delta F_p \quad (2)$$

The four positive right-hand terms are the increase in free energy because of curvature, temperature, composition, and pressure variation, respectively. Let us now evaluate the terms in this equation.

The driving force in the evaluation of spheroidal grains is the curvature undercooling. As the volume of a solid particle in a liquid decreases, its surface/volume ratio increases and the contribution of the interface energy to the total free enthalpy of the particle increases. Thus, when the particle size decreases in a liquid-solid system, the total free enthalpy of the solid increases.

When the particle increases by dr, where r is the radius, the work resulting from the formation of a new surface,  $d(4\pi r^2 \gamma)dr$ , must be equal to that resulting from the decrease in the free volumetric energy,

$$\frac{d}{dr} (4/3 \pi r^3 \Delta G_v) \quad (3)$$

Equating the two, after differentiation, the increase in free energy is:

$$\Delta G_v = 2\gamma/r = \gamma K \quad (4)$$

s premerom  $r$  in  $\Gamma$  Gibbs-Thomsonov koeficient.

## 1.2 Mehanizem nastanka kroglastega kristalnega zrna

Nastanek grobe mikrostrukture ali zorenje je pomemben vidik pri njenem nastajanju v testastem procesu. Predstavili smo odnose med velikostjo delcev, izotermnim strigov in časom trajanja striga, kar kaže, da se velikost delca pri tvorbi okroglega delca s časom veča, vendar se velikost delcev, če izhajamo iz dendritne rozetaste oblike, zmanjšuje. Med zorenjem delci postajajo manjši in povprečna velikost faze  $\alpha$ -Al se veča, ker majhni delci izginjajo. Zmanjšanje medfazne energije celotnega območja je gonilna sila za Ostwaldovo zorenje, ki se lahko v primeru difuzijskega prenosa mase opiše s ti. enačbo za hitrost zlepjanja delcev med mešanjem (FSW – friction stir welding, op. prev.). Ta enačba prilagaja teorijo Ostwaldovega zorenja sistemom v testastem stanju:

$$D_m^3 - D_0^3 = F_{vf} \times K_{LSW} \times (t - t_0) \quad (7)$$

Kjer je  $D_m$  povprečni premer delcev po času  $t$ ,  $D_0$  začetni povprečni premer, ko je  $t$  enak  $t_0$ ,  $F_{vf}$  je funkcija prostorninskega deleža trdne faze in  $K_{LSW}$  je konstanta rasti.

V primeru konvektivnega nastajanja grobih delcev je bilo pokazano, da se s povečanim prenosom mase ne samo povečuje nastajanje grobih delcev, ampak se spremeni tudi kinetika nastajanja grobih delcev. Nova enačba za hitrost nastajanja delcev je bila izpeljana za delce, ki se gibljejo s Stokesovo hitrostjo. Potem se povprečna velikost delcev veča s časom kot

$$D^2 - D_0^2 = A \times K_{LSW} \times ((1 - f_s)^{2/3}) / f_s \times \omega^{1/3} \times t \quad (8)$$

where  $\gamma$  is the liquid-solid surface energy, and  $K$  is the curvature. Then, from the definition of undercooling:

$$\Delta T = \Delta G_v / \Delta S_t \quad (5)$$

can be obtained,

$$\Delta S_f \Delta T_r = \gamma K \text{ or}$$

$$\Delta T_r = T_e - T_e^r = (\gamma / (\Delta S_f)) K = \Gamma K \quad (6)$$

where  $\Delta T_r$  is the curvature undercooling,  $T_e$  is the equilibrium (melting) temperature for a sphere of radius  $r$ , and  $\Gamma$  is the Gibbs-Thomson coefficient.

## 1.2 Mechanism of Spheroidal Grain Evolution

Coarsening or ripening is an important aspect of the microstructure evolution in semi-solid processes. The relationship between particle size, isothermal shearing and shearing time has been presented which states that the particle size increases with time when spherodisation occurs, but particle size decreases when going from dendritic rosette-like shape. During ripening, the particles become smaller and the average size of  $\alpha$ -Al phase increases, as small particles tend to disappear. The reduction in interfacial energy of particles total area is the driving force for the Ostwald ripening, which can be described by the so-called FSW rate equation in the case of diffusive mass transport. A rate equation adapts Ostwald's ripening theory modified to semi-solid systems:

$$D_m^3 - D_0^3 = F_{vf} \times K_{LSW} \times (t - t_0) \quad (7)$$

where  $D_m$  is the mean diameter of the particles after time  $t$ ,  $D_0$  is the initial average diameter when  $t$  equals  $t_0$ ,  $F_{vf}$  is a function of solid volume fraction and  $K_{LSW}$  is the growth constant.

In the case of convective coarsening it

kjer se parameter  $\omega$  nanaša na frekvenco rotacije in A je konstanta, ki zajema difuzijski koeficient [3-5]

## 2 Simulacija procesa v testastem stanju

NovaFlow&Solid je paket programske opreme za simulacijo krmilne prostornine, ki ga je razvilo švedsko podjetje NovaCast Technologies AB in ga od leta 1993 stalno razvija. Zakoni o ohranitvi (mase, impulzov in energije) so fizikalno-matematična osnova programskih modelov. Ti zakoni o ohranitvi upoštevajo fazne prehode pri strjevanju ulitka, natančno geometrijo ulitka in kokile, izmenjavo toplotne in mase z okolico.

Lastnosti fluidov imajo glavno vlogo pri razvijanju matematičnih modelov za simulacijo tokov tekočin. Treba je uporabiti jasne predpostavke, po katerih se predpostavi, da je lastnost tekočine konstantna in kako je odvisna od temperature, tlaka itn. Če so lastnosti odvisne od spremenjanja temperature, se pojavi nova povezava med različnimi enačbami o ohranitvi. Lastnosti vstopajo v enačbe o hranitvi kot koeficienti. Velikost teh koeficientov lahko spremeni celotno sliko toka.

**Gostota tekočine** je definirana kot količnik mase in prostornine tekočine. Če se vzame mejna vrednost količnika pri infinitezimalni prostornini, je s tem definirana enačba za gostoto  $\rho$ , [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]. V splošnem je gostota tekočine odvisna od temperature in tlaka. Pri tekočinah, pri katerih se lahko privzame, da so nestisljive, je njihova gostota odvisna le od temperature.

**Specifična toplota** je definirana kot količina toplotne, ki je potrebna, da se segreje enota mase snovi za enoto temperature. Ta toplota se lahko meri v razmerah konstantne prostornine ali konstantnega tlaka. Pri

was shown that coarsening is not only enhanced, as fluid flow leads to a faster mass transport, but also the coarsening kinetics are changed. A new rate equation is derived for solid particles moving with Stokes speed. Then the average particle size increases with time as

$$D^2 - D_0^2 = \\ = A \times K_{LSW} \times ((1 - f_s)^{2/3}) / f_s \times \omega^{1/3} \times t \quad (8)$$

where the parameter  $\omega$  refers to the rotation frequency and A is the constant containing the diffusion coefficient. [3-5]

## 2 Simulation of Semi-Solid Process

NovaFlow&Solid is a Control Volume simulation software package which is developed by Swedish NovaCast Technologies AB under continual development since 1993. Conservation laws (of matter balance, pulse and energy) form the foundation of physical-mathematical models of the programme. These conservation laws take into account the phase transitions taking place in the solidifying casting, the exact geometry of the casting and mould, and heat mass exchange with environment.

Properties of fluids play a primary role for the development of mathematical models for fluid flow simulation. One should make clear assumptions about which property can be assumed to be constant and which depends on temperature, pressure, etc. Where properties depend on temperature variable, an additional coupling between various conservation equations arises. Properties enter as coefficients in the conversation equations. The magnitude of these coefficients can change the overall picture of the flow.

**Mass density** of the fluid is defined as the ratio of the mass of the fluid to the

tekočinah sta toploti enaki. V sistemu SI je enota za specifično toploto J/(kg K).

**Entalpija** trdnin in tekočin se lahko definira kot

$$H = H_R + \int_{T_R}^T c_p dT \quad (9)$$

Kjer je  $T_R$  vzeta kot referenčna temperatura. Entalpija trdnin in tekočin je merilo vsebovane toplotne v enoti mase. Zato se lahko za vsako temperaturo vzorca vsebovana toplota izračuna iz entalpije kot produkt entalpije in mase. Entalpija je po definiciji monotona krivulja, enota po SI je J/kg.

Toplota se lahko prenaša z difuzijo. Ta mehanizem prenosa toplote se imenuje prevajanje. Toplotni tok je definiran kot količina toplote, ki steče v enoti časa skozi enoto prereza. Toplotni tok pri prenosu toplote s prevajanjem opisuje Fourierjev zakon z enačbo:

$$q_i = -k \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (10)$$

Kjer  $q_i$  označuje topotni tok, ki je vektor s tremi komponentami (v treh prostorskih smereh). Na desni strani enačbe sta temperaturni gradient in proporcionalnostna konstanta, ki predstavlja prevod toplote, katerega enota v SI je W/(mK).

**Viskoznost** opisuje zmožnost tekočin, da prenašajo gibalno količino z difuzijo. Po analogiji s Fourierjevim zakonom za prevajanje toplote je tok gibalne količine fluida:

$$T_{ij} = -\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (11)$$

Kjer je proporcionalnostna konstanta  $\mu$  dinamična viskoznost.

Zmnožek mase (m) in hitrosti (v) daje gibalno količino in njen tok se lahko dobi na naslednji način:

$$mv/tA = ma/A = F/A = \tau. \quad (12)$$

Sila (F), deljena s ploskvijo (A), na kateri sila deluje, daje napetost ( $\tau$ ) na tej ploskvi.

volume occupied by this fluid. Taking the limiting value of this ratio for the infinitesimal volume, we obtain the defining equation of density  $\rho$ , [kg/m<sup>3</sup>]. In a general case, fluid density depends on temperature and pressure. For liquids, if the incompressibility assumption is adopted, density depends only on temperature.

**Specific heat** is defined as the amount of heat needed to heat up a unit mass of substance by one unit of temperature. This heat can be measured either under the condition of constant volume or constant pressure. For liquids they are identical, in SI the unit of the specific heat is [J/(kgK)].

**Enthalpy** for solids and liquids can be defined as

$$H = H_R + \int_{T_R}^T c_p dT \quad (9)$$

where  $T_R$  has been chosen as a convenient reference temperature. The enthalpy of solids and liquids is a measure of the heat content per unit mass. Therefore, at any temperature, the heat content of the specimen can be calculated from the enthalpy by taking the product of the enthalpy times the mass of the specimen. Enthalpy, according to the definition, is always a monotonic curve. The SI unit of enthalpy is [J/kg].

Heat can be transmitted by means of diffusive exchange. This mechanism of heat transfer is conduction. Heat flux is defined as the amount of heat that flows per unit time through the unit of area. The flux of heat exchanged by conduction is described by the Fourier law, which is given by the equation

$$q_i = -k \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (10)$$

where  $q_i$  denotes the heat flux, which is a vector with three components (in spatial directions). On the left side we have the temperature gradient and the proportionality constant  $k$ , which is the heat conductivity. The SI unit is [W/(K.m)].

Viskoznost taline kovinske zlitine je vedno odvisna od temperature. Za večino talin kovinskih zlitin se lahko viskoznost nad temperaturo likvidus privzame kot konstanta. Med temperaturo likvidus in temperaturo solidus se viskoznost testaste mešanice veča, kar upočasnjuje, včasih celo ustavi tok fluida. V SI je enota za viskoznost pascal (Pa). Poleg dinamične viskoznosti se pogosto uporablja tudi kinematična viskoznost ( $v$ ). Kinematična in dinamična viskoznost sta med seboj povezani z enačbo

$$v = \mu/\rho [m^2/s]. \quad (13)$$

**Prag livnosti (CLFu)** je delež tekoče faze, nad katerim se uporabljajo Navier-Stokesove enačbe. Kristali, ki nastajajo v

**Viscosity** describes the ability of fluids to transfer momentum by virtue of diffusion. By analogy to the Fourier law of heat conduction, the flux of momentum of the fluid is given by the equation

$$\tau_{ij} = -\mu (\partial u_i / \partial x_j) \quad (11)$$

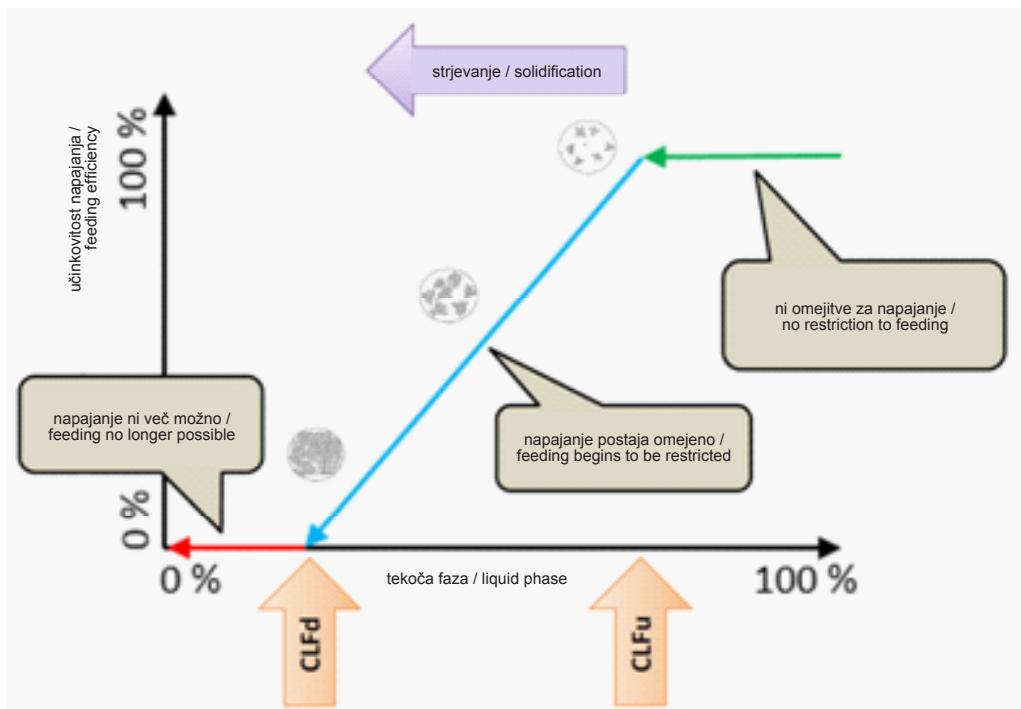
where the proportionality constant  $\mu$  is the dynamic viscosity.

The product of mass ( $m$ ) and velocity ( $v$ ) gives momentum, and its flux can be obtained in the following way

$$mv/tA = ma/A = F/A = \tau. \quad (12)$$

Force ( $F$ ) divided by the surface ( $A$ ) on which this force acts, gives the stress ( $\tau$ ) on this surface.

Viscosity of the metal-alloy melt is always temperature dependent. For most



Slika 1: Razlaga praga livnosti in praga pronicanja

Figure 1: Explanation of the fluidity and percolation thresholds

prostornini tekočine prosto tečejo skupaj s talino.

**Prag pronicanja** (CLFu) je vrednost deleža tekoče faze, pod katerim je tok taline brez plastične deformacije [6,7]. Prag livnosti in prag pronicanja pojasnjuje slika 1.

Tlačno litje je izdelovalni postopek, pri katerem se staljena kovina pod občutno povišanim tlakom vbrizga v jekleno kokilo livnega stroja, da se oblikuje ulitek. Proizvodni cikel tlačnega litja je sestavljen iz zajemanja taline, potiskanja bata in hitrega zapolnjevanja kokile. Jeklena kokila, navadno s temperaturo 200-300 °C, razprši latentno topoto in med strjevanjem bat deluje na ulitek s hidravličnim tlakom, da se kompenzira strjevalno krčenje. Zaporne sile do 4000 t so trgovsko izvedljive, da se vzdržijo veliki tlaki. Potem se kokila odpre in ulitek izvrže. Hidravlično energijo omogoča računalniški sistem, ki dovoljuje krmiljenje položaja kovine, hitrosti in pospeška bata, da se optimirata tok in tlak med zapolnjevanjem forme in med strjevanjem.

Med simulacijskimi poskusi smo preiskali učinke naslednjih tehničkih parametrov:

- hitrost bata v prvi fazi (m/s),
- hitrost bata v drugi fazi (m/s),
- temperaturo kokile (°C),
- temperaturo taline (°C).

### 3 Preiskovana geometrija

Za analizo livnosti smo izdelali vzorec s posebno geometrijo, ki smo jo imenovali 'meander' in ki se lahko vidi na sliki 2. Celotna dolžina vzorca je bila 1874 mm in njegov presek 50 mm<sup>2</sup>. 3D geometrija je opisana kot mreža strukturiranega kubičnega elementa z dimenzijo 2 mm. Celotno število celic je bilo 949 050. Začetne in robne pogoje lahko vidimo na sliki 3.

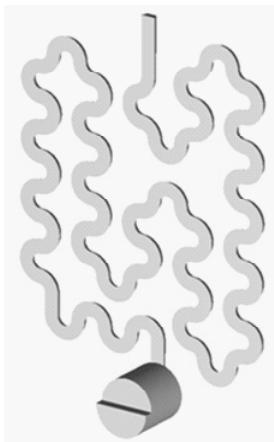
metal alloy melts, viscosity above the liquidus temperature can be assumed constant. Between the liquidus and the solidus temperature, viscosity of the semi-solid mixture grows, slowing down and eventually blocking the flow. In SI the unit of dynamic viscosity is the pascal (Pa). Besides the dynamic viscosity, the kinematic viscosity ( $\nu$ ) is often used. Kinematic and dynamic viscosities are related to one other by the equation

$$\nu = \mu/\rho \text{ [m}^2/\text{s}]. \quad (13)$$

**Fluidity threshold** (CLFu) is the value of the liquid phase fraction above which the Navier-Stokes equations are applicable. The crystals nucleated in the liquid volume freely flow together with the melt.

**Percolation threshold** (CLFd) is the value of the liquid phase fraction below which the melt flow is absent without plastic deformation [6,7]. An explanation of the fluidity threshold and percolation threshold can be seen in Figure 1.

High pressure die casting (HPDC) is a manufacturing process in which molten metal injected with a die casting machine under force using considerable pressure into a steel mould or die to form products. A production cycle in HPDC consists of metal ladling, plunger movement and rapid die filling. The steel die, typically 200-300 °C, dissipates the latent heat, and during solidification the casting is pressurised hydraulically by the plunger to feed the solidification shrinkage. Locking forces up to 4,000 tons are commercially available to withstand the large pressures. Eventually, the die is opened and the casting is ejected. The hydraulic energy is provided by a computerised system that permits control of metal position, velocity and plunger acceleration to optimise the flow and the pressure during filling and solidification.



zlitina / alloy	EN AC - 42000
kokila / die	jeklo / steel 1.2343
kinematična viskoznost / kinematic viscosity	0.4 - 416 [ $\times 10^{-5}$ m <sup>2</sup> /s]
hitrost bata, 1. faza / piston velocity, 1st phase	0.1 - 1.8 [m/s]
hitrost bata, 2. faza / piston velocity, 2nd phase	1 - 3 [m/s]
temperature kokile / die temperature	180 - 240 [°C]
temperature litja / pouring temperature	586 - 650 [°C]

**Slika 2:** Ulitek 'meander' in začetni ter robni pogoji**Figure 2:** Meander casting part and initial and boundary conditions

Podatki poskusov so v razpredelnici 1.

During simulation experiments the effect of the following technological parameters are examined:

- Piston velocity in the first phase (m/s);

#### Razpredelnica 1: Podatki poskusov

**Table 1:** Experimental matrix

poskus / experiment	zlitina / alloy	kinematična viskoznost / kinematic viscosity	hitrost bata, 1. faza / piston velocity 1st phase	hitrost bata, 2. faza / piston velocity 2nd phase	temperatura kokile / die temperature	temperatura taline / melt temperature	opombe / notes
		[ $10^{-5}$ m <sup>2</sup> /s]					
A	Standard EN-AC 42000	0.4 <sup>(1)</sup>	0.1	1	180	590	<sup>(2)</sup>
B	Standard EN-AC 42000	0.4 <sup>(1)</sup>	0.1	(1→) 3	(180→) 240	(590→) 650	<sup>(3)</sup>
C	SB-1	(0.4→) 416	0.1	3	240	(650→) 590	
D	SB-2	(416→) 41.6	0.1	3	240	590	
E	SB-3	(41.6→) 4.16	0.1	3	240	590	
F	SB-3	4.16	(0.1→)0.5	(3→)2	(240→)200	590	
G	Standard EN-AC 42000	0.4 <sup>(1)</sup>	(0.5→)0.1	(2→)3	(200→)150	(590→)650	
H	SB-4	8.3	0.2(4)	(15→)200	(650→)586		
I	SB-4	8.3	(0.2→)1.8	200	586		
J <sup>(5)</sup>	SB-4	8.3	1.8	200	586		
K <sup>(5)</sup>	EN-AC42100	8.3	1.8	200	586		

(1) iz podatkovne baze; (2) začetek 2. faze je premaknjen; (3) normalno pregrta zlitina;

(4) vsi postopki zapolnjevanja z dano hitrostjo bata; (5)spremenjena geometrija ulitka

(1) From software database; (2) Starting point of the 2nd phase is repositioned; (3) Normal overheated alloy;

(4) All filling process with a given piston velocity; (5) Modified casting geometry

## 4 Rezultati

Rezultati poskusov A in B so na sliki 3.

V poskusu A je bila obravnavana zlitina po standardu EN-AC 42000 pri temperaturi litja  $590\text{ }^{\circ}\text{C}$  (med  $T_{\text{liquidus}}$  in  $T_{\text{solidus}}$ ) pri hitrostih bata 0,1 in 1,0 m/s v kokili s temperature 180  $^{\circ}\text{C}$ . Izračunana dolžina toka je bila 270 mm, kar je 15 % celotne dolžine vzorca. Na rezultat je verjetno vplivala nepravilna nastavitev začetne točke 2. faze, ki je bila prestavljena. V poskusu B je bila ulita standardizirana pregreta zlitina EN-AC 42000 (temperatura litja  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ , temperatura kokile 240  $^{\circ}\text{C}$ , hitrost bata v 2. fazi 3 m/s). Dolžina toka je bila 920 mm, kar predstavlja 51 % celotne dolžine vzorca. Če je talina pregreta, se poviša temperatura kokile in doseže pravilen preklop, dolžina toka se poveča za 36 %.

V poskusih C, D in E smo preskušali zlitine v testastem stanju. Lastnosti testastega stanja so se dosegle s programsko datoteko: kinematična viskoznost se je prilagajala s temperaturo litja ( $416 \rightarrow 41.6 \rightarrow 4.16 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ). Rezultate kaže slika 4.

Na osnovi poskusa E smo spremenili tehnologijo tako, da smo spremenili hitrosti bata in začetne temperature. Rezultate

- Piston velocity in the second phase (m/s);
- Temperature of the die ( $^{\circ}\text{C}$ );
- Temperature of the melt ( $^{\circ}\text{C}$ ).

## 3 Examined geometry

For the analysis of flowability a special specimen geometry is developed which is called a "meander" and can be seen in Figure 2. Total length of the specimen is 1874 mm, and the cross section of it is 50 mm<sup>2</sup>. The 3D geometry is described by a structured cubic element mesh with a dimension of 2 mm. The total number of cells is 949,050. Initial and boundary conditions can be seen in Figure 3.

The experimental matrix can be seen in Table 1.

## 4 Results

The results of Experiment A and B can be seen in Figure 3.

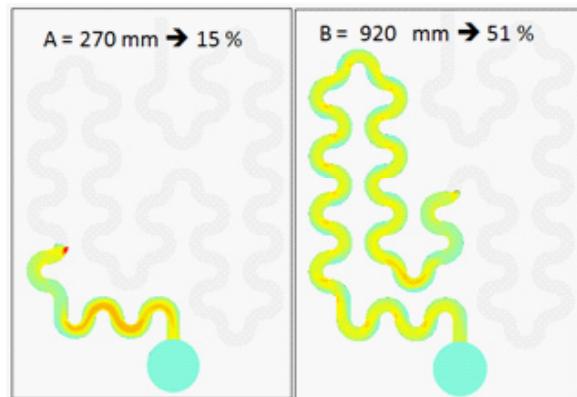
In Experiment A a standard EN-AC 42000 alloy is calculated at  $590\text{ }^{\circ}\text{C}$  pouring temperature (between  $T_{\text{liquidus}}$  and  $T_{\text{solidus}}$ ), with 0.1 m/s and 1 m/s piston velocities for

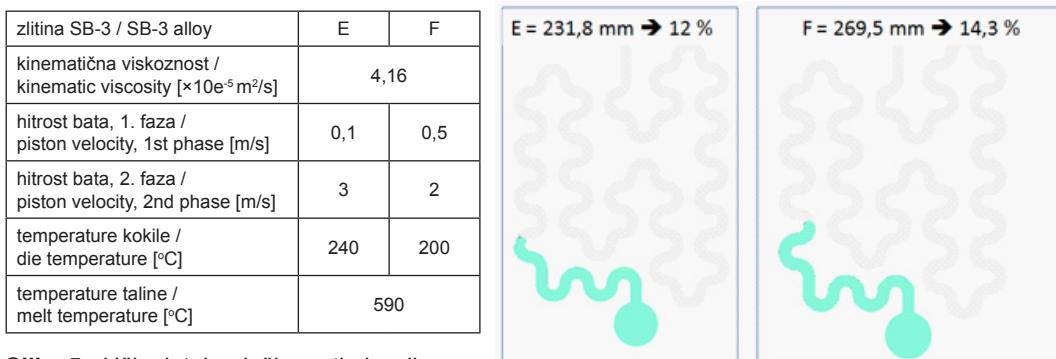
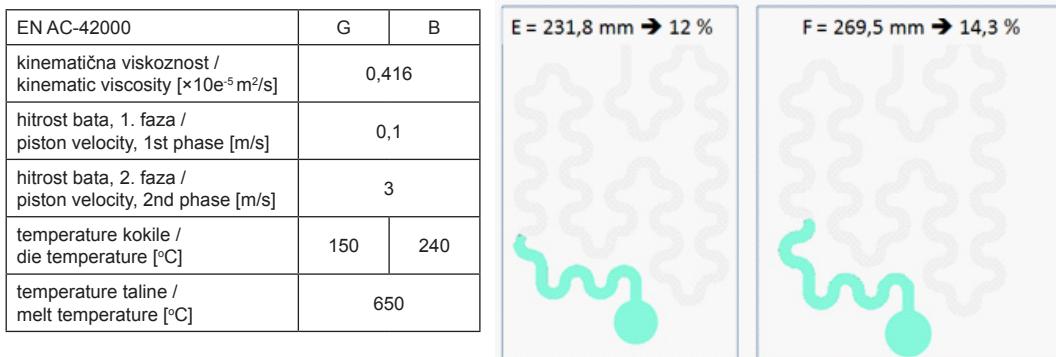
	A	B
hitrost bata, 2. faza / piston velocity, 2nd phase [m/s]	1	3
temperature kokile / die temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]	180	240
temperature taline / melt temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]	590	650
preklop / switching point	prestavljeno / repositioned	
kinematična viskoznost / kinematic viscosity [ $\times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ]	0.4	

+ 36%

Slika 3: Rezultati poskusov A in B

Figure 3: Results of Experiments A and B

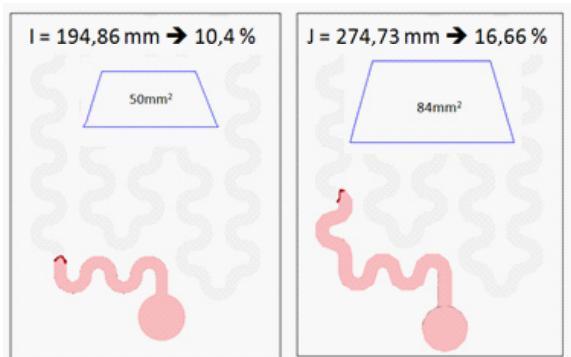


**Slika 4:** Primerjava rezultatov poskusov C, D in E**Figure 4:** Comparison of the results of experiment C, D and E**Slika 5:** Učinek tehnološke optimizacije**Figure 5:** Effects of technological optimisation**Slika 6:** Vpliv temperature kokile na dolžino toka**Figure 6:** Effects of die temperature on flow length

prikazuje slika 5. S to spremembo se je dolžina toka povečala za 2,3 %.

a die with the temperature of 180°C. The calculated flow length is 270 mm, which is

sprememba geometrije / geometry modification	I 50 mm <sup>2</sup>	J 84 mm <sup>2</sup>
kinematicna viskoznost / kinematic viscosity [ $\times 10e^{-5}$ m <sup>2</sup> /s]	8,3	
hitrost bata, 1. faza / piston velocity, 1st phase [m/s]	1,8	
hitrost bata, 2. faza / piston velocity, 2nd phase [m/s]	1,8	
temperature kokile / die temperature [°C]	200	
temperature taline / melt temperature [°C]	568	



Slika 7: Učinki spremembe geometrije

Figure 7. Effects of geometry modification

Za standardizirano pregreto zlitino smo preiskali vpliv temperature kokile. S spremenjanjem vrednosti od 150 °C do 240 °C smo dosegli povečanje za 9,8 % (slika 6).

Na osnovi rezultatov, ki so jih dale spremembe, smo izboljšali geometrijo vzorca. Ohranili smo glavne mere, le prerez kanala smo povečali s 50 mm<sup>2</sup> na 84 mm<sup>2</sup>. Učinek se vidi na sliki 7.

## 5 Sklepi

Povzeti rezultati so prikazani v razpredelnici 2.

Rezultati simulacije so pokazali, da tako material kot tehnološki parametri vplivajo na lastnosti in dolžino toka pri tlačnem litju v testastem stanju. Temperaturo gošče in pravilno temperaturo kokile se lahko določi s simulacijo, a natančna kinematicna viskoznost ulivane zlitine se mora izmeriti med litjem. Sprememba geometrije vzorca je bila primerna za raziskovanje procesa, toda pri bodočih poskusih se bodo uporabljali prerezi 50 mm<sup>2</sup>, ker je debelina stene kanalov bližje dejanskim tlačno ulitim delom.

15% of the total length of the specimen. The result is probably also affected by the improper position of the starting point of the 2nd phase, which is repositioned. In Experiment B a standard overheated EN-AC 42000 alloy was cast (pouring temperature: 650 °C, die temperature: 240 °C, piston velocity in the 2nd phase: 3 m/s). The flow length is 920 mm, which is 51% of the total length of the specimen. If the melt is overheated, the die temperature is increased, and the correct switching point position is achieved, the flow length can be increased by 36%.

In Experiments C, D and E semi-solid alloys were examined. Semi-solid properties were developed based on the software database: the value of kinematic viscosity was modified by the pouring temperature (416→41.6→4.16 \*10-5 m<sup>2</sup>/s). Results can be seen in Figure 4.

Based on the results of experiment E technological modifications were carried out by changing the piston velocities and the initial temperatures. Results can be seen in Figure 5. With the modification this flow length can be increased by 2.3%.

The effect of the die temperature on flow length was also examined for a standard

**Razpredelnica 2:** Povzetek rezultatov**Table 2:** Summary of results

	standardizirana zlitina proti standardizirani zlitini / standard alloy vs. standard alloy	prerez / cross section mm <sup>2</sup>	kinematična viskoznost / kinematic viscosity m <sup>2</sup> /s	hitrost bata, 1. faza / piston velocity 1 <sup>st</sup> phase m/s		hitrost bata, 2. faza / piston velocity 2 <sup>nd</sup> phase m/s		temperatura kokile / die temperature °C	temperatura taline / melt temperature °C	sprememba dolžine toka / change of flow length %
				↑	↑	↑	↑			
A→B		-	-	↑	↑	↑	↑	-36		
G→B		-	-	-	-	↑	-	+9.8		
	standardizirana zlitina proti testasti zlitini / standard alloy vs. semi-solid alloy	prerez / cross section mm <sup>2</sup>	kinematična viskoznost / kinematic viscosity m <sup>2</sup> /s	hitrost bata, 1. faza / piston velocity 1 <sup>st</sup> phase m/s		hitrost bata, 2. faza / piston velocity 2 <sup>nd</sup> phase m/s		temperatura kokile / die temperature °C	temperatura taline / melt temperature °C	sprememba dolžine toka / change of flow length %
				↑	↑	↑	↑			
A→I		-	↑	↑	↑	↑	↑	-	-	-5
	testasta zlitina proti testasti zlitini / semi-solid alloy vs. semi-solid alloy	prerez / cross section mm <sup>2</sup>	kinematična viskoznost / kinematic viscosity m <sup>2</sup> /s	hitrost bata, 1. faza / piston velocity 1 <sup>st</sup> phase m/s		hitrost bata, 2. faza / piston velocity 2 <sup>nd</sup> phase m/s		temperatura kokile / die temperature °C	temperatura taline / melt temperature °C	sprememba dolžine toka / change of flow length %
				↑	↑	↑	↑			
C→E		-	↓	-	-	-	-	-	-	+10.8
I→J		↑	-	-	-	-	-	-	-	+6.2

V prihodnjih poskusih bomo ulite vzorce primerjali z rezultati računanja in simulacijski model bomo ovrednotili z dobljenimi rezultati vitem stanju.

overheated alloy. By changing the values from 150 °C to 240 °C, a 9.8% increment can be achieved (see Figure 6).

Based on the results modification of the specimen geometry was implemented. The overall dimensions were kept but the cross section of the channel flow was increased from 50 mm<sup>2</sup> to 84 mm<sup>2</sup>. The effect of this can be seen in Figure 7.

## 5 Conclusions

A summary of results can be seen in Table 2.

Based on the simulation results it was found that both material and technological parameters affect the flow-length properties of semi-solid high pressure die castings. Pouring temperature of the slurry and the proper temperature of the die can be determined with the help of simulation, but the exact kinematic viscosity of the poured alloy must be measured during casting. Both geometry variations of the specimen are appropriate for the investigation of the process but in our future experiments the 50 mm<sup>2</sup> cross-sectioned specimen will be used because the wall thickness of it is closer to real high pressure casting parts.

In future experiments casting samples will be poured and compared with the calculated results and the simulation model will be validated by the as-cast results.

## Viri / References

- [1] Aluminium in cars, unlocking the light-weighting potential. European Aluminium Association, <http://www.european-aluminium.eu>, 2011
- [2] Franklin, J.R., Das, A.A., 1984. Squeeze casting—a review of the status. *British Foundryman* 77, 150–158
- [3] M.C. Flemings: Behavior of Metal Alloys in the Semisolid State. *Metallurgical Transactions A*, 1991, p. 957-981
- [4] D.M. Stefanescu: Science and Engineering of Casting Solidification. Springer, 2009
- [5] L. Ratke, A. Sharma, D. Kohli: Effect of process parameters on properties of Al-Si alloys cast by Rapid Slurry Formation (RSF) technique. *Materials Science and Engineering* 27, 2011
- [6] Jesper Hattel: Fundamentals of numerical modeling of casting processes Polyteknisk Forlag, Lyngby, Denmark, 2005
- [7] Andreas Ljung: Improving prediction and the possibilities with CV technology. Presented at NovaCast User Meeting, Gothenburg, 2014

J. Medved<sup>1</sup>, S. Kores<sup>2</sup>, P. Mrvar<sup>1</sup>, A. Križman<sup>3</sup>, M. Vončina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univerza v Ljubljani, Naravoslovno-tehniška fakulteta, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenija / University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Slovenia

<sup>2</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija / University of Maribor, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenia

## Vpliv dodatka Zr na lastnosti Al zlitin

## Influence of Zr addition on Al alloys properties

### Povzetek

V moderni industrijski praksi se zgodi, da standardne aluminijeve livarske zlitine, tudi visoko kakovostne, ne izpolnjujejo strogih zahtev za aplikacije na različnih tehnoloških področjih. Eden od najbolj zanimivih sistemov aluminijevih zlitin je Al-Zn-Mg-Cu, ki je osnovni sistem za razvoj najboljših zlitin za kovanje tipa AA 7075 z visokimi mehanskimi lastnostmi. Zlitine z dodatkom cirkonija imajo velik potencial za razvoj aplikacij pri povišanih temperaturah. V procesu optimizacije mehanskih lastnosti aluminijevih zlitin se dodaja cirkonij v koncentracijah 0,1 - 0,25 mas. % in povzroči nastanek majhnih izločkov Al<sub>3</sub>Zr. V prispevku bomo govorili o preiskavah zlitin iz sistemov Al-X-Zr, z uporabo termodinamskih izračunov ravnotežij (Thermo-Calc), različnih termičnih analiz in opredelitevijo nastale mikrostrukture in ustreznih lastnosti z optično in vrstično elektronsko mikroskopijo.

**Ključne besede:** Al zlitine, dodatek Zr, termodinamika, termična analiza

### Abstract

In modern industrial practice standard casting alloys, including high-quality materials, do not satisfy the rigorous requirements for applications in different areas of technology. One of the most attractive systems for new casting alloy developers is the Al-Zn-Mg-Cu, which is the basic system for development of the strongest wrought alloys of the AA7075 type. Alloys with the zirconium addition have significant potential for the development of applications at elevated temperatures. In the process of optimizing the mechanical properties of aluminium alloys, the addition of the 0.1 – 0.25 % (mass fraction in this article) of Zr was suggested in order to enhance the formation of small precipitates of Al<sub>3</sub>Zr. In this article, about the alloys from Al-X-Zr systems, will be discussed using thermodynamic equilibrium calculations (Thermo-Calc), various thermal analysis, optical and scanning electron microscopy in order to identify the generated microstructures and corresponding properties.

**Key words:** Al alloys, Zr addition, thermodynamics, thermal analysis

### 1 Uvod

Eden od najbolj zanimivih sistemov za aluminijeve zlitine je Al-Zn-Mg-Cu, ki je osnovni sistem za razvoj najboljših zlitin za kovanje tipa AA7075. Povprečna natezna

### 1 introduction

One of the attractive systems for new casting alloy developers is the Al-Zn-Mg-Cu system, which is the basic system for development of the strongest wrought alloys

trdnost za to zlitino v T6 stanju je do 570 MPa. Zlitine iz sistema Al-Fe-Ti imajo velik potencial za razvoj za aplikacije pri povišanih temperaturah. Dodatni legirni elementi, kot so krom, mangan in cirkonij se dodajajo za nadzor kristalnih zrn in podzrn in tako vplivajo na izboljšanje lastnosti. V procesu optimizacije mehanskih lastnosti aluminijevih zlitin je mogoče dodajati cirkonij v koncentracijah 0,1 - 0,25 mas. % in povzroči nastanek majhnih izločkov Al<sub>3</sub>Zr [2]. Dodatek Si in Fe zmanjša topnost Mn ter pospeši hitrost izločanje sekundarnih Mn-faz, kot je Al<sub>6</sub>(Fe,Mn), kakor tudi poveča tvorbo Al<sub>3</sub>Zr izločkov [1]. V skladu z literaturo [3], sta v sistemu Al-Fe-Mn-Si v ravnotežju dve glavni fazi:  $\alpha$ Al in  $\beta$ Si ter: Al<sub>6</sub>(Fe,Mn) in  $\alpha$ -AlMnFeSi. V Al-kotu sistema Al-Mn-Zr literatura ne poroča o ternarnih spojinah [4].

Med homogenizacijo se pojavijo spremembe v razvoju mikrostrukture zaradi večje hitrosti difuzije. Znano je, da ima Mn nizko difuzivnost v Al [5]. Eksperimentalne spremembe opažene pri Du [5] kažejo, da ima potek odvisnosti temperatura/čas, poleg začetne temperature ter lite strukture, prav tako velik vpliv na naravo izločkov in sestavo delcev.

Preiskovane so bile zlitine iz sistemov Al-X-Zr, z uporabo termodinamskih izračunov ravnotežij (Thermo-Calc), različnih termičnih analiz in opredelitevjo nastale mikrostrukture ter ustreznih lastnosti z optično in vrstično elektronsko mikroskopijo.

## 2 Eksperimentalno delo

Termodinamični izračun je bil narejen s Thermo-Calc programske opremo z bazami podatkov TCAI1 in SSOL5. Z uporabo termodinamičnih izračunov so bili na podlagi kemične sestave narejeni izopletni fazni diagrami zlitin A1 in A2 (Tabela 1).

of the AA7075 type. The average value of ultimate tensile strength for this alloy in the T6 state is 570 MPa. Al-Fe-Ti-based alloys are considered to have a considerable potential for the development of materials for high-temperature applications. Other alloying elements such as chromium, manganese, and zirconium are added for the control of grain and subgrain structures, which also contribute to the strengthening. In the process of optimizing the mechanical properties of Al alloys, the addition of element Zr (0.1 – 0.15 %) was suggested in order to enhance the formation of small dispersions Al<sub>3</sub>Zr [2]. The addition of Si and Fe decrease the solubility of Mn, accelerate the precipitation rate of secondary Mn-bearing phases, such as Al<sub>6</sub>(Fe,Mn), as well as increase the formation of Al<sub>3</sub>Zr particles [1]. According to literature [3], two main phases beside (Al) and (Si) are in equilibrium regarding the Al-rich corner of the Al-Fe-Mn-Si system: Al<sub>6</sub>(Fe,Mn) and  $\alpha$ -AlMnFeSi. No ternary compounds have been reported in Al-rich corner of the Al-Mn-Zr system [4].

During the homogenization changes in the evolution of microstructure due to higher rates of diffusion occur. Mn has been known to have a low diffusivity in Al [5]. Experimental changes observed by Du [5] suggest that, besides the starting temperature and the as-cast structure, the temperature/time history of the alloy also has an effect on the nature of the dispersoids and constituent of the particles.

Alloys from Al-X-Zr system were investigated using thermodynamic equilibrium calculations (Thermo-Calc), various thermal analysis, and optical and scanning electron microscopy, in order to identify the generated microstructures and corresponding properties.

Vzorci so bili staljeni v indukcijski peči v grafitnem loncu, čemur je sledila enostavna termična analiza. Iz podatkov, pridobljenih z meritvijo, so bile izrisane ohlajevalne krivulje in njihovi odvodi ter določene značilne točke strjevanja. Metalografske preiskave vzorcev so bile izvedene z vrstičnim elektronskim mikroskopom JEOL JSM-5610. Mehanske lastnosti so bile določene na napravi Instron 1255.

**Tabela 1:** Kemijska sestava litih vzorcev preiskovanih zlitin v mas. %

**Table 1:** Chemical composition of the as-cast samples % ( mass fraction )

El.	Al	Mn	Zr	Fe	Si	Zn	Ti
A1	99,18	0,003	0,160	0,517	0,082	0,009	0,02
A2	99,62	0,002	0,001	0,238	0,096	0,002	0,02

### 3 Rezultati in diskusija

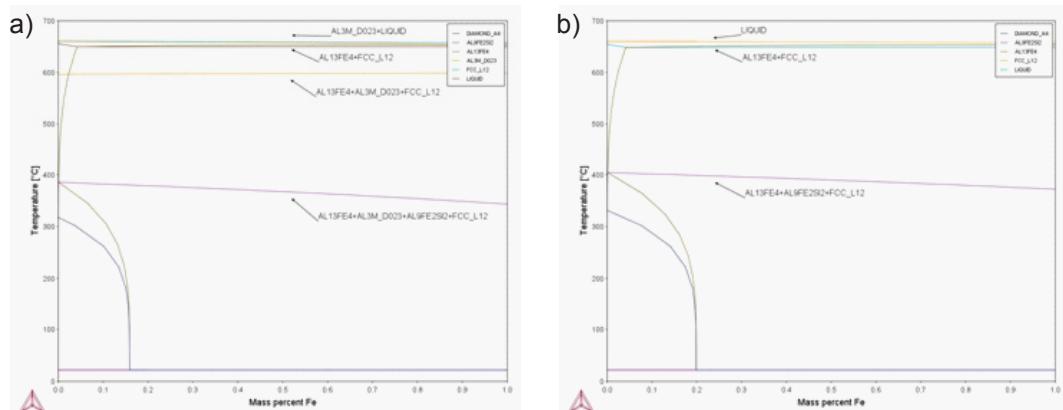
Na podlagi podatkov kemijske analize (Tabela 1) sta bila izrisana ravnotežna izopletna fazna diagrama vzorcev A1 in A2 (slika 1). Iz rezultatov kemičnih analiz

### 2. Experimental

Thermodynamic calculations were done with Thermo-Calc software (TCW5) using TCAI1 and SSOL5 database. Using the thermodynamic calculations the isopleth phase diagrams of alloys A1 and A2 (Fig. 1) on the basis of chemical composition (Table 1), were made. The samples were melted in the induction furnace in graphite crucible, furthermore simple thermal analysis was performed. From the data obtained in the programme Origin cooling curves and their derivatives were sketched, whereas the characteristic points were determined. Metallographic examinations of samples were performed by scanning electron microscope JEOL JSM-5610. Mechanical properties were analyzed using the Instron 1255.

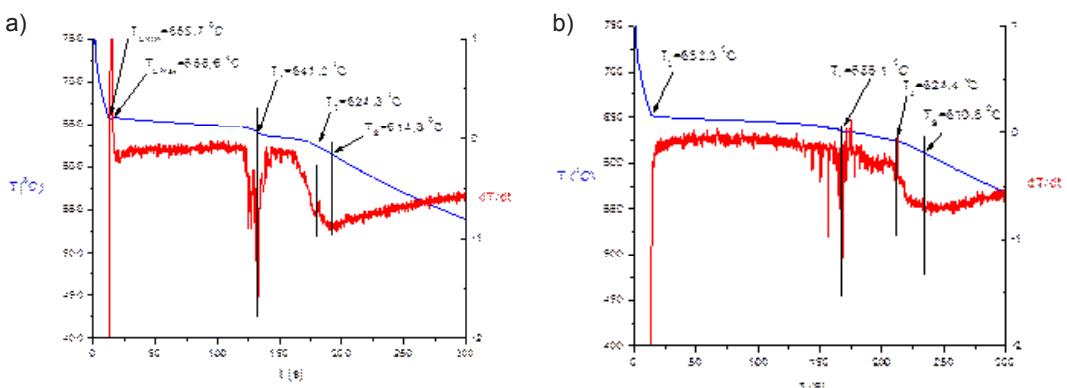
### 3 Results and Discussion

Based on the data of chemical analysis (Table 1) equilibrium isopleth phase diagrams of the sample A1 and A2 were sketched. From chemical analysis and Thermo-Calc results,



**Slika 1:** Izopletni fazni diagram za vzorca A1 (a) in A2 (b), Thermo-Calc, TCAI1

**Figure 1:** Isopleth phase diagram for sample A1 (a) and A2 (b), Thermo-Calc, TCAI1



**Slika 2:** Ohlajevalni krivulji vzorcev A1 (a) in A2 (b), (TLmin - minimalna likvidus temperatura, TLmax - maksimalna likvidus temperatura, TL – likvidus temperatura, T1 strjevanje faze 1, T2 – Strjevanje faze 2, Ts – solidus temperatura)

**Figure 2:** Cooling curves of the samples A1 (a) and A2 (b), (TLmin - minimum liquidus temperature, TLmax - maximum liquidus temperature, TL – liquidus temperature, T1 solidification of the phase 1, T2 – solidification of the phase 2, Ts – solidus temperature)

in ravnotežnih termodinamičnih izračunov lahko opišemo teoretični potek strjevanja obeh zlitin (Tabela 2).

Ohlajevalni krivulji vzorcev A1 in A2 sta prikazani na sliki 2.

**Tabela 2:** Potek strjevanja

**Table 2:** Course of the solidification

A1		A2	
651,1 °C	L + αAl + Al3Zr	651,8 °C	L + αAl
642,8 °C	L + αAl + Al3Zr + Al13Fe4	638,6 °C	L + αAl + Al13Fe4
638,6 °C	L + αAl + Al13Fe4	626,7 °C	αAl + Al13Fe4
633,3 °C	L + αAl + Al3Zr + Al13Fe4		
627,2 °C	αAl + Al3Zr + Al13Fe4		

$T_L$  in  $T_s$  predstavlja likvidus in solidus temperaturo. Pri obeh vzorcih je opaziti sorazmerno dobro ujemanje med eksperimentalno dobljenimi in termodinamično izračunanimi podatki.

theoretical course of solidification of both alloys could be described (Table 2).

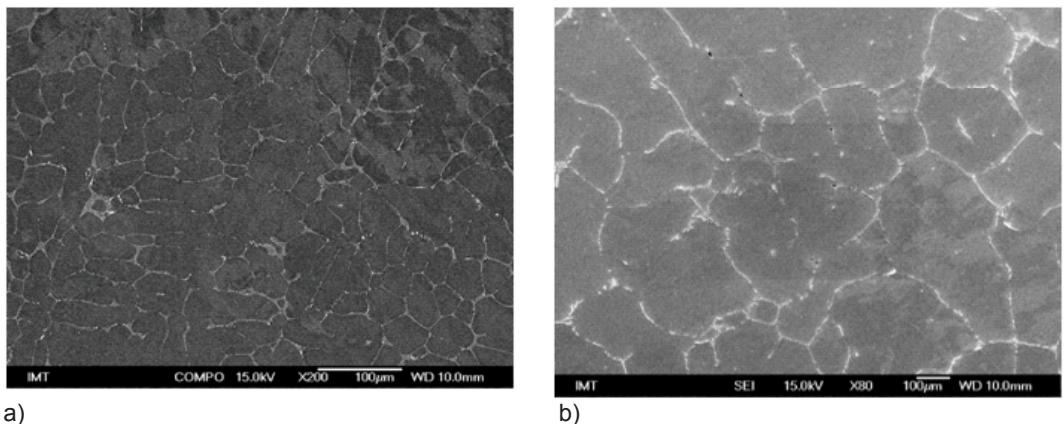
Cooling curves for samples A1 and A2 are shown on Fig. 2.

**Tabela 3:** Karakteristične temperature strjevanja dobljene s termično analizo.

**Table 3:** Characteristic temperatures determined with thermal analysis

A1		A2	
$T_{L\min}$	655.7	$T_L$	652.3
$T_{L\max}$	658.6		
$T_1$	641.2	$T_1$	635.1
$T_2$	624.3	$T_2$	624.4
$T_S$	614.8	$T_S$	610.6

$T_L$  and  $T_s$  represent liquidus and solidus temperatures, respectively. In the case of both samples, a relatively good comparison between the experimental and the thermodynamically calculated data was achieved.



**Slika 3:** Mikrostrukturi zlitin A1(a) in A2 (b), SEM

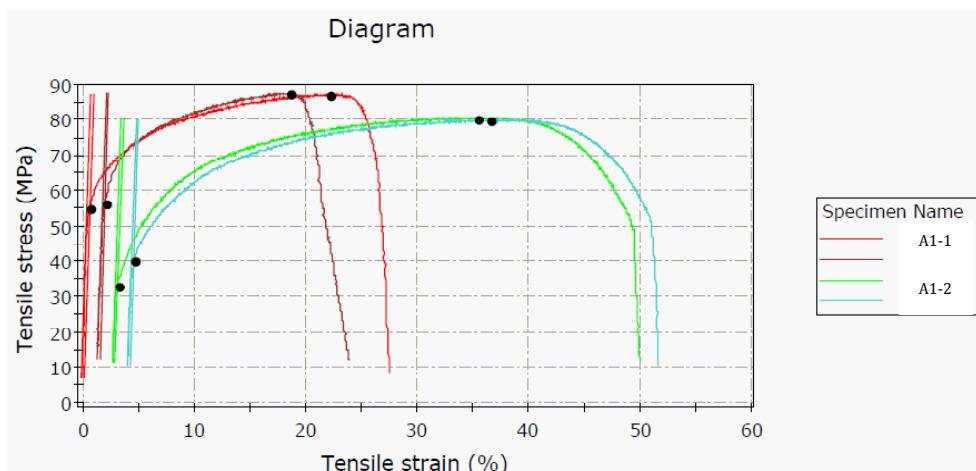
**Figure 3:** SEM snapshot of A1 (a) and A2 (b) sample

Mikroposnetki obeh zlitin (SEM) so prikazani na sliki 3.

V vzorcih A1 in A2 smo z EDS analizo določili vse faze, ki smo jih pričakovali na osnovi termodinamičnih izračunov. V zlitini A1 so prisotne naslednje faze:  $\alpha_{\text{Al}}$ ,  $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$  in  $\text{Al}_3\text{Zr}$  (tabela 2). Poleg teh je EDS analiza pokazala še fazo titanovega

Results of SEM microscopy are presented on Fig. 3.

The samples A1 and A2 all the phases that were expected on the basis of thermodynamic calculations were found. In the alloy A1 following phases are present:  $\alpha_{\text{Al}}$ ,  $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$  and  $\text{Al}_3\text{Zr}$  (Table 2). In addition, the EDS analysis showed



**Slika 4:** Mehanske lastnosti zlitin A1 in A2

**Figure 4:** Mechanical properties of A1 and A2

borida, kot posledica premodificiranja zlitine. V zlitini A2 pa je pri sobni temperaturi pričakovana mikrostruktura sestavljena iz faz:  $\alpha_{\text{Al}}$  in  $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$  (tabela 2). Z EDS smo zaznali tudi fazo, ki vsebuje baker in je z termodinamičnim izračunom nismo določili.

Slika 4 in tabela 4 prikazuje rezultate nateznih preizkusov.

**Tabela 4:** Mehanske lastnosti A1 in A2

**Table 4:** Mechanical properties of A1 and A2

Vzorec / Sample	Rm (MPa)	A (%)	RP0,2 (MPa)
A1-1	87	20,4	55
A1-2	88	17,1	56
A2-1	81	41,2	33
A2-2	80	43,1	40

Opaziti je, da ima vzorec A1, ki vsebuje Zr, večjo mejo plastičnosti in natezno trdnost ter ustrezno manjši raztezek.

Na slikah 5 in 6 sta prikazana izopletna fazna diagrama za aluminijevi livarski zlitini AlSi9Cu3 in AlSi10Mg. Ravnotežni termodinamični izračun faznih diagramov je bil izveden s programom Thermo Calc in bazo podatkov TCAI1.

Podobno kot v gnetnih aluminijevih zlitinah se pri dodatku cirkonija tvori faza  $\text{Al}_3\text{Zr}$ , ki se strjuje v zadnjem strjevalnem območju. Na osnovi termodinamičnega izračuna lahko sklepamo, da bi dodatek cirkonija (0,1 – 0,25 mas.%) povečal mehanske lastnosti in povečal temperaturno stabilnost. Za potrditev sklepanega je potrebno opraviti laboratorijsko in industrijsko preizkušanje.

#### 4 Zaključki

Okanterizirani in analizirani sta bili dve zlitini: A1 (s Zr) in A2. S pomočjo kemijske sestave in termodinamskih izračunov je bila

the phase on base of titanium boride, as a result of overmodification of the alloy. At the alloy A2 at room temperature, the expected microstructure is composed of:  $\alpha_{\text{Al}}$  and  $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$  (Table 2). Using EDS analysis, the phase containing the copper was also detected, whereas at the thermodynamic calculations was not found.

Figure 4 and Table 4 show the result of mechanical tests.

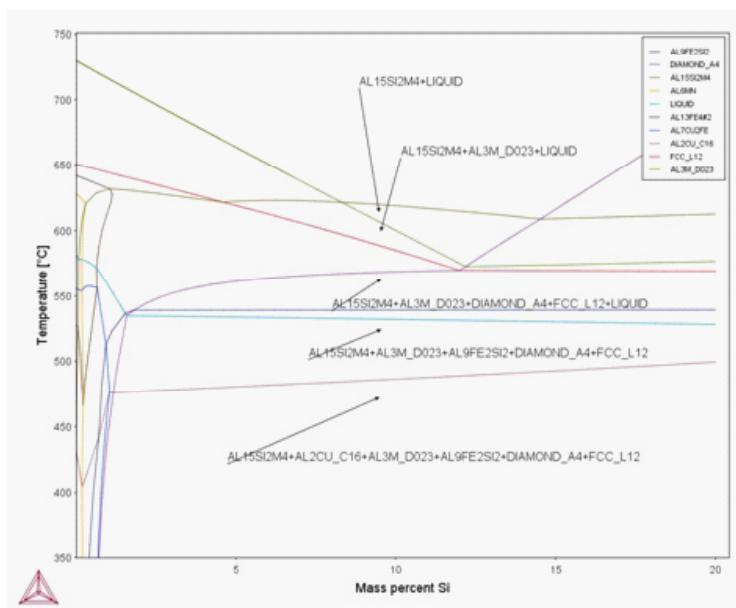
It could be seen that the sample A1 with Zr has higher yield and tensile strength and corresponding smaller elongation.

Figures 5 and 6 show isopleth phase diagrams for aluminium foundry alloys, AlSi9Cu3 and AlSi10Mg. Equilibrium thermodynamic calculation of phase diagrams was carried out with Thermo-Calc programme and database TCAI1.

Similar as in the forming aluminium alloys, the addition of zirconium causes the formation of  $\text{Al}_3\text{Zr}$  phase, which solidifies in the final solidification zone. On the basis of thermodynamic calculations it can be suggested that the addition of zirconium (from 0.1 to 0.25 wt. %) increases mechanical properties and increases temperature stability. To confirm these allegations, further laboratory and industrial testing should be made.

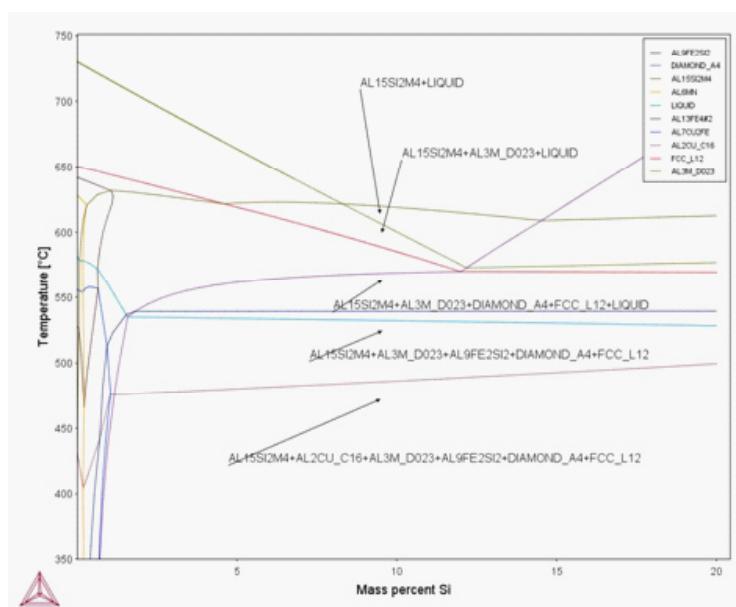
#### 4 Conclusion

Synthesised and characterised were two aluminium alloys A1 (with Zr) and A2. From chemical composition and thermodynamic calculations the path of solidification was predicted. The main phases, that are present in the alloy, are:  $\alpha_{\text{Al}}$  and  $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$  which is solidified in the form of a eutectic and phase on the base of Zr ( $\text{Al}_3\text{Zr}$ ). These microstructural constituents were also analysed by metallographic analysis.



**Slika 5:** Izračunani izopletni fazni diagram za zlitino AlSi9Cu3 z dodatkom Zr

**Figure 5:** Calculated isopleth phase diagram for AlSi9Cu3 alloy with Zr



**Slika 6:** Izračunani izopletni fazni diagram za zlitino AlSi10Mg z dodatkom Zr

**Figure 6:** Calculated isopleth phase diagram for AlSi10Mg alloy with Zr

opisan potek strjevanja preiskovanih zlitin. Prisotne so bile naslednje faze:  $\alpha$ -Al,  $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ , ki se strdi v obliki evtektika, ter faza na osnovi Zr ( $\text{Al}_3\text{Zr}$ ). Te mikrostrukturne sestavine so bile analizirane tudi z metalografsko analizo. Preiskave mehanskih lastnosti so pokazale, da je natezna trdnost zlitine A1 višja kot zlitine A2, vendar pa je raztezek zlitine A2 višja od zlitine A1.

Rezultati in podatki iz literature podajajo, da dodatek cirkonija v koncentracijah od 0,1 do 0,25 mas. % izboljša mehanske lastnosti zlitine, kar bi se lahko uspešno uporabilo tudi pri izboljšanju kakovosti aluminijevih livarskih zlitin.

### Acknowledgements

This work was financially supported by a project of the Slovene human resources development and scholarship fund "Po kreativni poti do znanja". The authors also wish to thank the graduate students at Faculty of Natural Sciences and Engineering that contributed to the experimental work done in this research.

Investigations of mechanical properties have shown that the tensile strength of the alloy A1 is higher than of the alloy A2, whereas the elongation at the alloy A2 is higher than that in the alloy A1.

The results and the literature data show the addition of Zr of 0.1 to 0.25 % improves the mechanical properties of the alloy, which may successfully be used in aluminium foundry alloys.

### Acknowledgements

This work was financially supported by a project of the Slovene human resources development and scholarship fund "Po kreativni poti do znanja". The authors also wish to thank the graduate students at Faculty of Natural Sciences and Engineering that contributed to the experimental work done in this research.

### Viri / References

- [1] M. Karlík, T. Maník, H. Lauschmann., Journal of Alloys and Compounds 515 (2012) 108-113.
- [2] B. Forbord, H. Hallem, N. Ryum, K. Marthinsen., Materials Science and Engineering A 387-389 (2004) 936-939.
- [3] M. Poková, M. Cieslar, J. Lacaze., Manufacturing Technology 12 (2012) 212-217.
- [4] A. Johansen., Microstructures and properties of aluminium-magnesium alloys with additions of manganese, zirconium and scandium, The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2000, p. 15.
- [5] Q. Du, W. J. Poole, M. A. Wells, N. C. Parson., Acta Materialia 61 (2013) 4961-4973.

I. Naglič<sup>1</sup>, S. Ilić<sup>2</sup>, B. Markoli<sup>1</sup>, M. Dolenec<sup>3</sup>, B. Leskovar<sup>1</sup>, Ž. Filipič<sup>1</sup>, M. Perhoč<sup>1</sup>, J. Kraner<sup>1</sup>, M. Bizjak<sup>1</sup>, B. Skela<sup>1</sup>, L. Kelhar<sup>3</sup>, Š. Kozole<sup>1</sup>, D. Gerčar<sup>1</sup>, T. Ramšak<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Livarstvo Krim d.o.o., Dolenjska cesta 83, 1000 Ljubljana, Slovenija / Slovenia

<sup>3</sup> Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana / Jožef Stefan International Postgraduate School, Jamova 39, 1000 Ljubljana, Slovenija / Slovenia

## Modifikacija zlitine AlSi7Mg lite v peščeno formo

## Modification of AlSi7Mg alloy cast in to a sand mould

### Povzetek

Ocenjevali smo vpliv komercialnih modifikatorjev na osnovi stroncija in natrija (SIMODAL 77) na ulitke zlitine AlSi7Mg, ulite v peščene kokile. Pripravili smo ulitke z različnimi debelinami stene ulitka z namenom ugotavljanja vpliva ohlajevalne hitrosti. Vpliv modifikacije na evtekski silicij smo ugotavljali z metodo svetlobne mikroskopije. Evtekski silicij v ulitkih zlitine AlSi7Mg z debelinami sten 10 in 20 mm je modificiran v primeru dodatka 0,3 mas. % sredstva SIMODAL 77 oziroma dodatka med 0,02 in 0,03 mas. % stroncija. Pri ulitku z debelino stene 40 mm evtekski silicij ni bil popolnoma modificiran. V primeru modifikacije s stroncijem je evtekski silicij ostal modificiran tudi po pretaljevanju zlitine. Pri modifikaciji z natrijem v obliki sredstva SIMODAL 77 pa ostane po pretaljevanju evtekski silicij nemodificiran.

**Ključne besede:** aluminijeva zlิตina, litje, modifikacija, mikrostruktura

### Abstract

In this work the effect of commercial strontium and sodium (SIMODAL 77) modifiers in sand cast AlSi7Mg alloy were evaluated. Castings with different wall thickness were prepared to evaluate the effect of modifiers at different cooling rates. Light microscopy was used to assess the effect of eutectic silicon modification. It was found that 0.3 % (mass fraction in this article) of modifier SIMODAL 77 and between 0.02 and 0.03 % Sr effectively modified the eutectic silicon in AlSi7Mg alloy castings with wall thickness of 10 and 20 mm. Eutectic silicon was not fully modified when the wall thickness was 40 mm. Eutectic silicon remained modified after remelting in the case of strontium whilst sodium from SIMODAL 77 failed in this respect.

**Keywords:** aluminium alloy, casting, modification, microstructure

### 1 Uvod

Zlitine na osnovi Al-Si predstavljajo veliko in pomembno skupino aluminijevih livnih zlitin.

### 1 Introduction

Cast Al-Si alloys represent a large and important group of aluminium alloys.

Aluminij s silicijem tvori enostavni evtekski sistem z evteksko točko pri temperaturi 577 °C in 12,6 mas. % Si. Zaradi prisotnosti magnezija v zlitini AlSi7Mg se lahko takšna zlitina dodatno utruje z naravnim ali umetnim staranjem [1]. V zlitinah z več kot 5 mas. % Si dosežemo izboljšanje mehanskih lastnosti z modifikacijo evtekskega silicija. Modifikacijo evtekskega silicija iz lamelne oblike do drobne globulitne oblike, lahko dosežemo z hitrim ohlajanjem ali/in z dodajanjem nekaterih elementov, kot so npr. kalcij, natrij, stroncij in antimон [2]. Modifikacija evtektika povzroči znižanje evtekske temperature in premik evtekske točke do 14,1 mas. % Si [1]. Modifikacija evtektika zviša natezno trdnost in raztezek modificiranih zlitin glede na nemodificirane [3]. Poleg izboljšanih mehanskih lastnosti zlitine kažejo tudi izboljšane livne lastnosti. Te se odražajo predvsem v hitrejšem toku taline in napajanju livne votline ter v izboljšani odpornosti proti visoko temperaturnemu pokanju [2].

Cilj dela temelji na ovrednotenju vplivov komercialnih modifikatorjev, kot sta predzlitina Al-Sr10 (z 10 mas. % Sr) in sredstvo SIMODAL 77 (natrij), pri izbrani livni temperaturi, preteklu časa od dodatka modifikatorja do litja in ohlajevalni hitrosti doseženi z različnimi debelinami sten ulitka.

## 2 Eksperimentalno delo

Peščene forme za ulivanje zlitine AlSi7Mg so bile utrjene s sistemom vodnega stekla in CO<sub>2</sub>. Dimenzijske ulitke z debelinami sten 10, 20 in 40 mm so prikazane na sliki 1. Taljenje zlitine je potekalo v komorni peči pri temperaturi 750 °C. Masa taline posameznem taljenju je znašala okoli 1,4 kg. Kemijska sestava komercialne zlitine, ki smo jo uporabljali, je podana v tabeli

Aluminium and silicon form a simple eutectic system with eutectic point at 12.6 % Si and 577 °C. Due to the presence of magnesium, the AlSi7Mg casting alloy can be additionally strengthened by natural or artificial aging [1]. In alloys containing 5 % Si or more a great benefit can be achieved by structural modification of eutectic lamellae. Modification of eutectic silicon from lamellar to a finer lamellar or fibrous eutectic network can be achieved by rapid cooling or/and addition of certain elements like calcium, sodium, strontium and antimony [2]. This modification causes the lowering of eutectic temperature and a shift of the eutectic point to 14.1 % Si [1]. Modification of eutectic is a great benefit since the alloys with modified eutectic silicon possess increased ultimate tensile strength and elongation compared to unmodified alloys [3]. Beside improved mechanical properties, modified alloys also display better casting performance. This is characterized by faster flow and feeding of the casting cavity and also superior resistance to elevated-temperature cracking [2].

The aim of this work was to evaluate the effect of commercial modifiers like Al-Sr10 (with 10 % Sr) and SIMODAL 77 (sodium) in selected conditions like temperature of the melt prior to casting, time after addition of the modifier and the cooling rate achieved by variations in wall thickness of the castings.

## 2 Experimental work

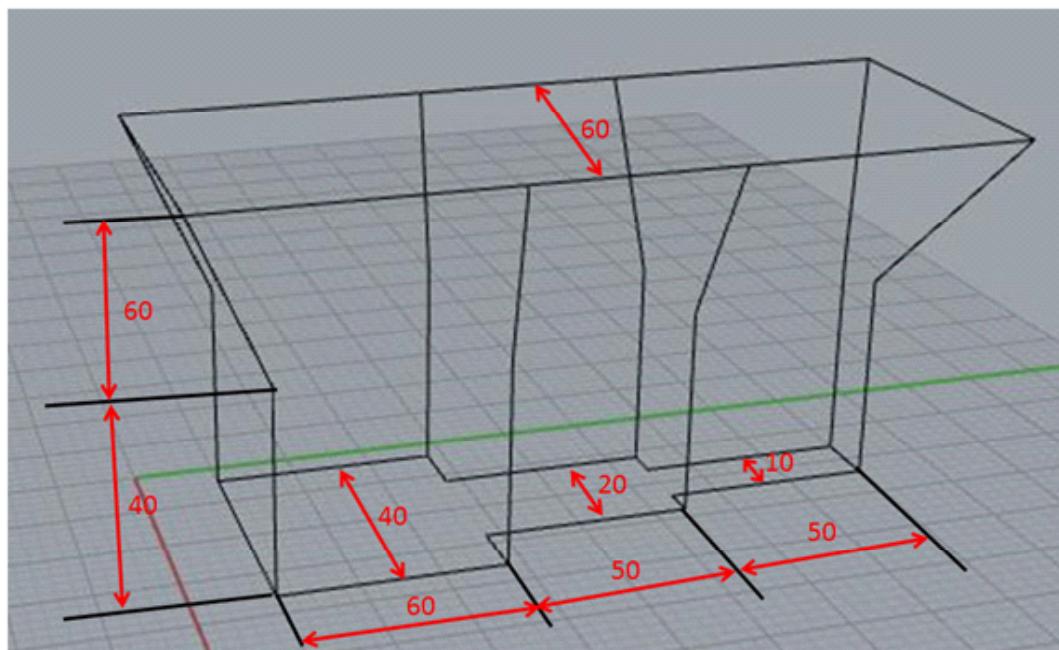
Sand moulds for the casting of the AlSi7Mg alloy were prepared via the sodium silicate process. Dimensions of the mould with different wall thicknesses of 10, 20 and 40 mm are presented in Figure 1. Melting of the alloy was performed in a chamber furnace at the temperature of 750 °C and weight

1. Zlitino smo ulili 15 minut po dodatku modifikatorja v talino. Kot modifikatorja smo uporabljali stroncij, v obliki predzlitine Al-Sr10 (z 10 mas. % Sr) in natrij v obliki sredstva SIMODAL 77. Pri dodajanju stroncija smo talino intenzivno mešali. V primeru dodajanja sredstva SIMODAL 77 (natrij), pa smo uporabili jekleno posodo z izvrtinami tako, da smo lahko kos tablete sredstva potopili v talino. Pretaljevanje izbranih zlitin je prav tako kot modificiranje potekalo pri temperaturi 750 °C. Talina je bila pri pretaljevanju zadržana na tej temperaturi približno 60 min in nato ulita v lvno votilno.

Metalografski vzorci so bili odvzeti iz osrednjega dela stene ulitka debeline 10, 20 in 40 mm. Vzorci so bili nato vloženi v maso, brušeni in polirani s 3 µm diamantno pasto. Končno poliranje je potekalo s suspenzijo SiO<sub>2</sub>. Poliranju je sledilo jedkanje vzorcev z

of each batch was approximately 1.4 kg. Chemical composition of the commercial alloy which was used in this experiment is presented in Table 1. Casting of the alloy was performed 15 min. after the addition of modifier into the melt. Modifiers used in this work were strontium in the form of Al-Sr10 master alloy which contained 10.0 % Sr and sodium in the form of commercial modifying tablets SIMODAL 77. In the case of the addition of strontium, melt was mixed after the addition of master alloy. Addition of SIMODAL 77 (sodium) was carried out by a steel pot with drilled holes which was used to plunge the pieces of tablet into the melt. Remelting of some modified alloys was also performed at 750 °C and the melt was held for approximately 60 min. at that temperature before it was cast again.

Metallographic samples were cut from the central region of the castings with 10,



**Slika 1:** Dimenzijsne ulitke z debelinami sten 10, 20 in 40 mm

**Figure 1:** Dimensions of casting with 10, 20 and 40 mm wall thickness

raztopino NaOH. Pri analizi mikrostrukture smo uporabljali svetlobni mikroskop ZEISS AXIO Imager A1m, opremljenim z digitalno kamero AxioCam ICc 3 in programsko opremo za zajemanje in obdelavo slik Axio Vision.

**Tabela 1:** Kemična sestava livne zlitine AlSi7Mg v mas. %

**Table 1:** Composition of cast AlSi7Mg alloy in % (mass fraction)

	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
AlSi <sub>7</sub> Mg	92,44	6,94	0,12	< 0,01	< 0,01	0,37	0,02	0,09

## 2 Rezultati in diskusija

Mikrostrukture ulitkov z debelinami sten 10, 20 in 40 mm, brez dodatka modifikatorja in z dodatkom sredstva SIMODAL 77 ter različnimi dodatki predzlitine Al-Sr10 so predstavljene na slikah 2-4. Analiza mikrostruktur je pokazala, da dodatek 0,3 mas. % sredstva SIMODAL 77 ustrezno modificira evtektik v primeru sten debeline 10 in 20 mm. Pri ulitku z debelino stene 40 mm (slika 4b) ostane evtektski silicij še vedno deloma v obliki lamel. Sklepamo, da v takšnih primerih potrebujemo večje deleže modifikatorja za ustrezno modifikacijo evtektika.

Analize mikrostruktur ulitkov z debelino stene 10 in 20 mm so pokazale, da v primeru dodatka 0,005 mas. % Sr v obliki predzlitine Al-Sr10 evtektik ni v celoti modificiran, medtem ko je v primeru 0,01 in 0,02 mas. % Sr ta modificiran v celoti (slike 2-4). Analize mikrostruktur pri ulitkih z debelino stene 40 mm so pokazale, da v primeru dodatka 0,03 mas. % Sr v mikrostrukturi še vedno zasledimo prisotnost lamelnega evtektika (slika 4f). Prav tako lahko opazimo, da se mikrostrukturi zlitin z 0,02 in 0,03 mas. % Sr bistveno ne razlikujeta (slika 4e in 4f). Na

20 and 40 mm thick wall. Samples were mounted, ground and polished with 3 µm diamond paste. Final polishing was done with colloidal silica. Samples were also etched with NaOH right after the polishing. Light microscopy was performed using ZEISS AXIO Imager.A1m equipped with digital camera AxioCam ICc 3 and software for digital image processing Axio Vision.

## 2 Results and Discussion

Microstructures of castings with 10, 20 and 40 mm wall thickness without the addition of modifier and with the addition of SIMODAL 77 and different additions of Al-Sr10 are presented in Figures 2-4. Microstructures reveal that the addition of 0.3 % of SIMODAL 77 (sodium) adequately modified the eutectic in the case of 10 and 20 mm thick wall while in the case of 40 mm thick wall (Figure 4b) some lamellar eutectic silicon was still present in the microstructure. This result suggests that larger quantity of modifier might be needed in cases like that.

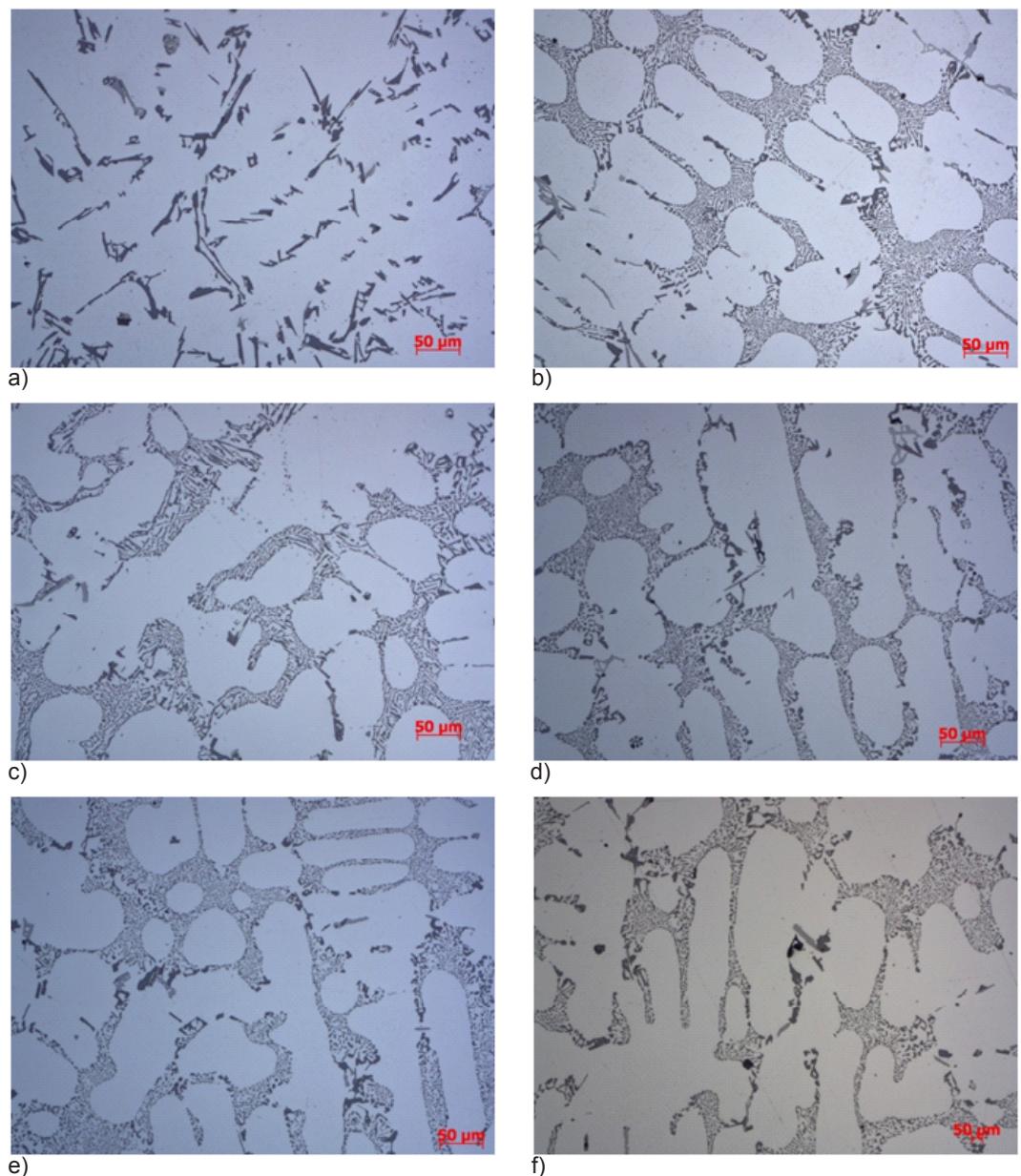
Microstructures of castings with 10 and 20 mm wall thickness reveal that 0.005 % Sr in the form of Al-Sr10 master alloy was not sufficient to fully modify the eutectic while additions of 0.01 and 0.02 % Sr were, as presented in Figures 2-4. Microstructures in the case of the castings with 40 mm wall thickness revealed that even in the case of the addition of 0.03 % Sr lamellar eutectic was still present in the microstructure (Figure 4f). It is also obvious that microstructures of alloys with the addition of 0.02 and 0.03 % of strontium did not differ much from each other (Figure 4e and 4f). This might mean that larger quantities of modifier alone might not be sufficient to modify the eutectic silicon. It is known that strontium is effective even after several hours after it has been

podlagi tega lahko sklepamo, da z dodatki večjega deleža modifikatorja verjetno tudi ne bomo ustrezno modificirali evtekskega silicija. Znano je, da je stroncij kot modifikator učinkovit še več ur po dodatku v talino. Njegova učinkovitost v odvisnosti od časa po dodatku v talino narašča še 6 h[3]. Glede na to, da smo zlitino ulivali 15 min po dodatku modifikatorja, obstaja verjetnost, da bi daljši časi zadrževanja taline po dodatku večjih deležev stroncija lahko vodili do bolj učinkovite modifikacije. Obstajajo tudi predzlitine s 5 mas.% Sr in 3,5 mas. % Sr. Predzlitine z manjšim deležem stroncija so lahko bolj učinkovite v primeru kratkih časov po dodatku modifikatorja v talino, ker so verjetno delci s stroncijem bogate intermetalne faze v teh zlitinah manjši. Dokazano je bilo, da je modifikator Al-Sr10 v obliki žice z manjšimi delci intermetalnih faz  $\text{Al}_4\text{Sr}$  učinkovitejši pri krajših časih po dodatku sredstva v talino kot modifikator Al-Sr10 v obliki blokov, kjer so intermetalne faze  $\text{Al}_4\text{Sr}$  večje [4]. Delci intermetalne faze  $\text{Al}_4\text{Sr}$  v modifikatorju se morajo raztopliti v talini zlitine, kar je predpogoj za učinkovitost modifikatorja. Večji delci se za razliko od manjših raztoplajo dlje časa. Stroncij, raztopljen v talini, se mora enakomerno porazdeliti po talini, kar omogoča učinkovito modifikacijo evtekskega silicija. Zelo pomembno je zato tudi mešanje taline, ki poleg tega tudi prepreči kopiranje stroncija v bližini raztoplajoče intermetalne faze  $\text{Al}_4\text{Sr}$ , kar bi lahko povzročilo počasnejše raztplavljanje te faze.

Na sliki 5 so predstavljene mikrostrukture ulitkov zlitine AlSi7Mg z debelino stene 10 mm brez dodatka modifikatorja in z dodatkom 0,02 mas. % Sr in 0,3 mas. % sredstva SIMODAL 77. Na tej sliki sta predstavljeni tudi mikrostrukturi prej omenjenih zlitin (z dodatkom stroncija in sredstva SIMODAL 77) po pretaljevanju. Analiza mikrostrukture kaže, da

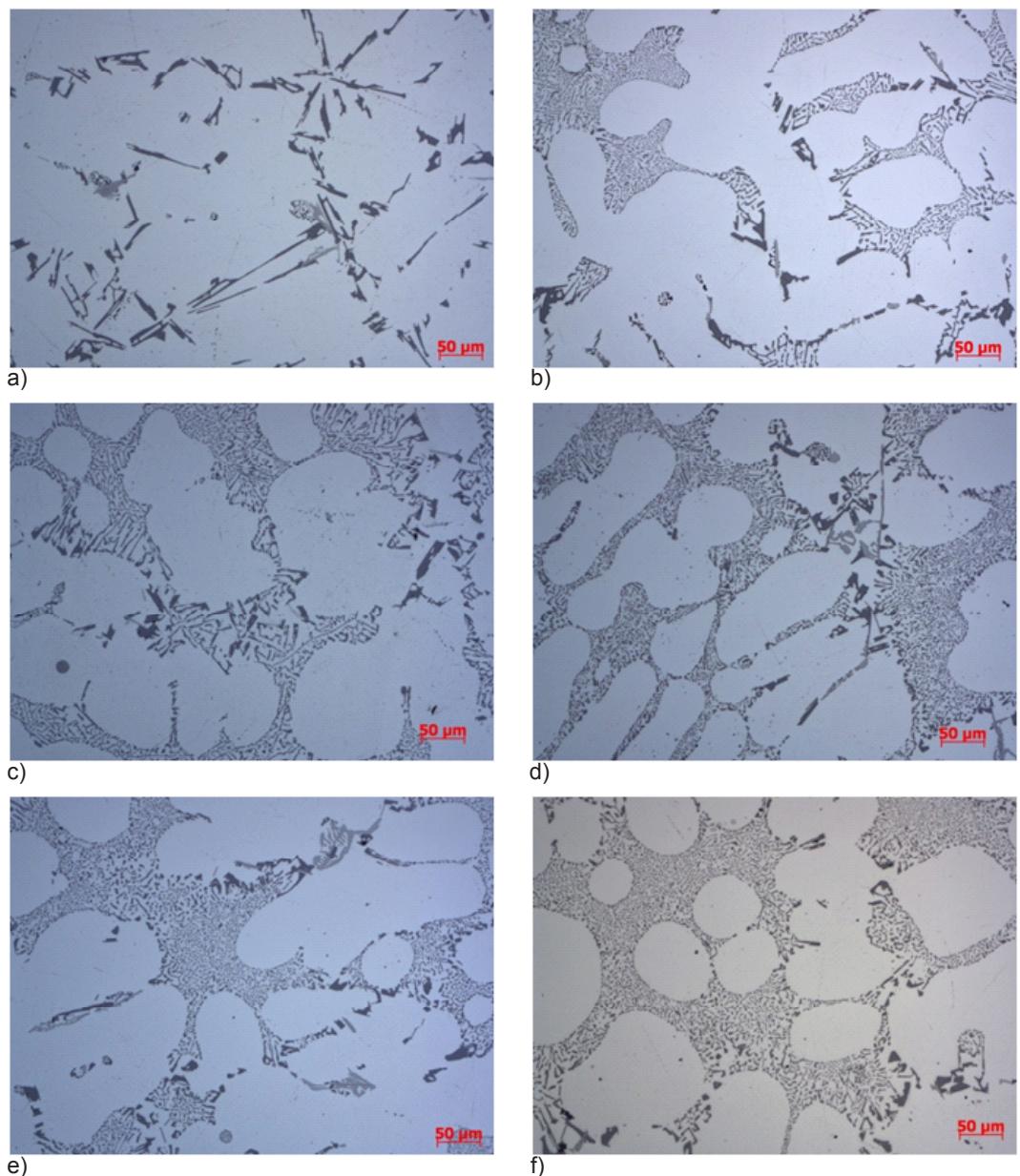
added to the molten alloy. Effect of strontium is still increasing six hours after the addition of modifier [3]. As our alloys were cast only 15 min. after the addition of modifier, longer times after the addition of larger quantities of strontium would most likely lead to a more pronounced modification. It should also be mentioned that master alloys with lower content of strontium, like master alloys with 5 and 3.5 % are also available in the market. Those might be more effective even at short times after the addition of modifier since particles of strontium-rich intermetallic phases within those modifiers probably have smaller mean diameter. It was already demonstrated that Al-Sr10 master alloy is more effective at short times when added as wire (smaller  $\text{Al}_4\text{Sr}$  phases) than in the form of ingot as  $\text{Al}_4\text{Sr}$  phases are larger [4]. For the effectiveness of these master alloys intermetallic particles present in these alloys must dissolve in the molten Al-based alloy. Larger particles need more time to dissolve than the smaller ones. Strontium from dissolved  $\text{Al}_4\text{Sr}$  phase for instance should also be evenly distributed in the melt to enable effective modification of eutectic silicon. Consequently mixing of the melt is also of a great importance since it prevents local build-ups of strontium in the vicinity of the dissolving  $\text{Al}_4\text{Sr}$  phase which in turn slows down its dissolution.

Figure 5 has the microstructures of casting with wall thickness 10 mm of alloy AlSi7Mg without and with the addition of 0.02 % Sr and 0.3 % of SIMODAL 77. Microstructures of remelted samples containing strontium and sodium (SIMODAL 77) are also presented in this figure. Microstructure revealed that remelting of strontium-modified AlSi7Mg alloy did not affect the modification effect. Microstructure of remelted sample previously modified with strontium (Figure 5d) is similar to the one before remelting (Figure 5b). Remelting of



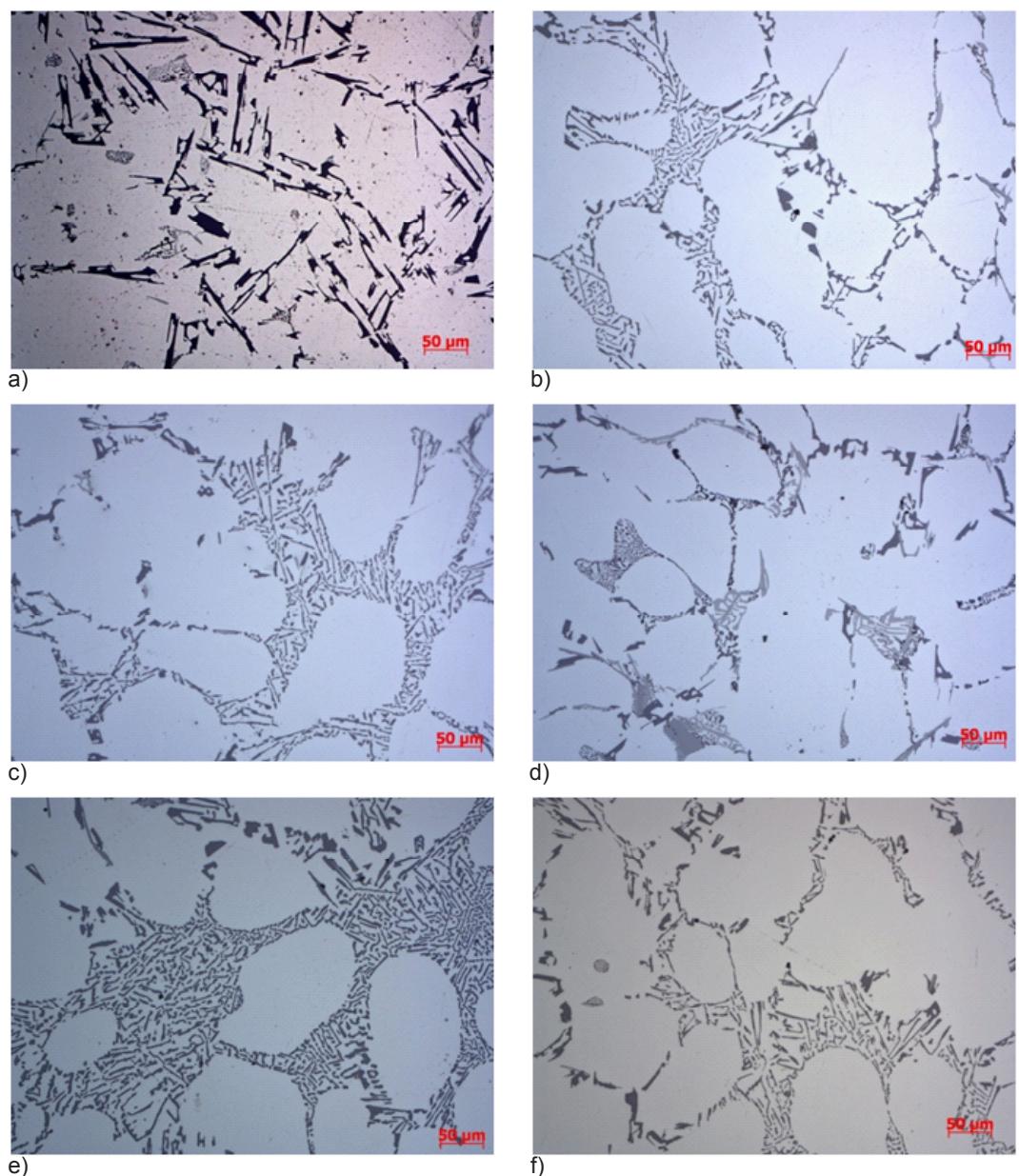
**Slika 2:** Mikrostruktura zlitine AISi7Mg z debelino stene 10 mm a) brez in z dodatkom b) 0,3 mas. % sredstva SIMODAL 77, c) 0,005 mas. % Sr, d) 0,01 mas. % Sr, e) 0,02 mas. % Sr in f) 0,03 mas. % Sr v obliki predzlitine Al-Sr10

**Figure 2:** Microstructure of AISi7Mg alloy with 10 mm wall a) without and with addition of b) 0.3 % of SIMODAL 77, c) 0.005 % Sr, d) 0.01 % Sr, e) 0.02 % Sr and f) 0.03 % Sr in the form of Al-Sr10 master alloy



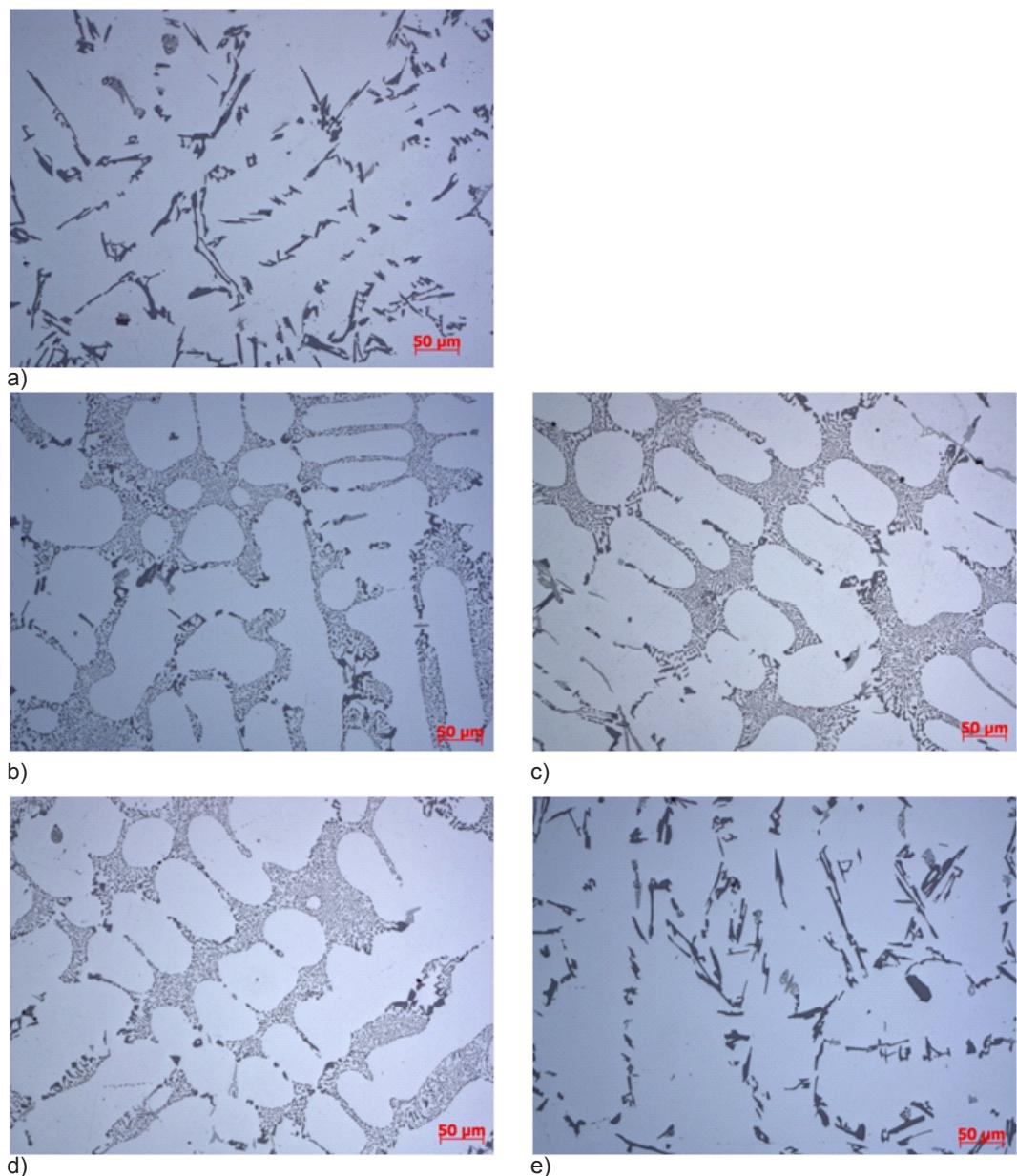
**Slika 3:** Mikrostruktura zlitine AISi7Mg z debelino stene 20 mm a) brez in z dodatkom b) 0,3 mas. % sredstva SIMODAL 77, c) 0,005 mas. % Sr, d) 0,01 mas. % Sr, e) 0,02 mas. % Sr in f) 0,03 mas. % Sr v obliki predzlitine Al-Sr10

**Figure 3:** Microstructure of AISi7Mg alloy with 20 mm wall a) without and with addition of b) 0.3 % of SIMODAL 77, c) 0.005 % Sr, d) 0.01 % Sr, e) 0.02 % Sr and f) 0.03 % Sr in the form of Al-Sr10 master alloy



**Slika 4:** Mikrostruktura zlitine AISi7Mg z debelino stene 40 mm a) brez in z dodatkom b) 0,3 mas. % sredstva SIMODAL 77, c) 0,005 mas. % Sr, d) 0,01 mas. % Sr, e) 0,02 mas. % Sr in f) 0,03 mas. % Sr v obliki predzlitine Al-Sr10

**Figure 4:** Microstructure of AISi7Mg alloy with 40 mm wall a) without and with addition of b) 0.3 % of SIMODAL 77, c) 0.005 % Sr, d) 0.01 % Sr, e) 0.02 % Sr and f) 0.03 % Sr in the form of Al-Sr10 master alloy



**Slika 5:** Mikrostruktura zlitine AISI7Mg z debelino stene 10 mm a) brez dodatka modifikatorja in b) z dodatkom 0,02 mas. % Sr, c) z dodatkom 0,3 mas. % sredstva SIMODAL 77 ter d) po pretaljevanju zlitine z dodatkom 0,02 mas. % Sr in e) po pretaljevanju zlitine z dodatkom 0,3 mas. % sredstva SIMODAL 77

**Figure 5:** Microstructure of of AISI7Mg alloy with 10 mm wall a) without the addition of modifier and b) after the addition of 0.02 % Sr, c) after the addition of 0.3 % of SIMODAL 77 and d) after remelting of sample with the addition of 0.02 % Sr and e) after remelting of sample with the addition of 0.3 % of SIMODAL 77

pretaljevanje zlitine AlSi7Mg, modificirane s stroncijem (slika 5d), nima vpliva na modifikacijo. Mikrostruktura pretaljene zlitine z dodatkom stroncija je enaka mikrostrukturi zlitine pred pretaljevanjem (slika 5b). Mikrostruktura pretaljene zlitine modificirane z natrijem (SIMODAL 77) kaže, da je učinek modifikacije po pretaljevanju izginil (slika 5e). Najverjetnejši razlog za izgubo učinka je nizko vrelisce natrija, ki ima pri temperaturi 892 °C parcialni tlak 105 Pa [5]. Mikrostruktura pretaljenega vzorca modificiranega z natrijem je popolnoma enaka mikrostrukturi vzorca brez dodatka modifikatorja (slika 5a). Na podlagi tega lahko sklepamo, da v primeru recikliranja zlitin s stroncijem, dodatno modificiranje ni potrebno. Pri pretaljevanju zlitin modificiranih z natrijem, pa potrebujemo enako količino modifikatorja, kot pri nemodificirani zlitini, da dosežemo popolno modifikacijo evtekskega silicija.

### 3 Zaključki

Ugotovljeno je bilo, da 0,3 mas. % sredstva SIMODAL 77 učinkovito modificira evtekski silicij v ulitkih zlitine AlSi7Mg s stenami debelin 10 in 20 mm. V primeru ulitka z debelino stene 40 mm pa v mikrostrukturi še vedno opazimo lamelni evtektik. Mikrostrukture ulitkov zlitine AlSi7Mg z debelinami sten 10 in 20 mm so pokazale, da je za učinkovito modifikacijo evtekskega silicija zadosten dodatek med 0,01 in 0,02 mas. % Sr. Pri ulitku z debelino stene 40 mm, pa tudi 0,03 mas. % Sr ni dovolj za popolno modifikacijo evtekskega silicija. Učinek modifikacije ulitkov zlitine AlSi7Mg modificirane s sredstvom SIMODAL 77 (natrij) po pretaljevanju popolnoma izgine. Pri modificiranju ulitkov zlitine AlSi7Mg s stroncijem pa učinek po pretaljevanju ostane nespremenjen. Natrij je po pretaljevanju

the sample with the addition of SIMODAL 77, which contained sodium as modifier revealed that the effect of modification was completely lost after remelting (Figure 5e). Most probable reason for this is its low boiling point with partial pressure of 105 Pa at 892 °C [5]. Microstructure of remelted sample modified with sodium is comparable to the one without the addition of modifier (Figure 5a). This suggests that in the case of recycling of strontium modified material no additional modifier is needed. During the remelting of material originally modified with sodium the same amount of sodium containing modifier is needed to induce the modification of eutectic silicon.

### 3 Conclusions

It was found that 0.3 % of modifier SIMODAL 77 effectively modifies the eutectic silicon in AlSi7Mg alloy castings with wall thickness of 10 and 20 mm. In the case of 40 mm wall thickness lamellar eutectic is still present in the microstructure. Microstructures of AlSi7Mg alloys with the addition of strontium revealed that 0.01 and 0.02 wt. % Sr is sufficient to eliminate the lamellar eutectic silicon in the case of the 10 and 20 mm wall thickness. In the case of the casting with wall thickness 40 mm 0.03 % Sr is not enough to fully modify the microstructure. Remelting of AlSi7Mg alloys with the addition of strontium and SIMODAL 77 (sodium) revealed that modification effect is in the case of SIMODAL 77 completely lost while in the case of the strontium the effect remained unchanged. Sodium is ineffective due to its low evaporation temperature and inability to form intermetallic phases with aluminium and silicon.

neučinkovit kot modifikator zaradi nizke temperature vrelšča in nezmožnosti tvorbe intermetalnih faz z aluminijem in silicijem.

### Zahvala

Avtorji se zahvaljujejo Javnemu skladu Republike Slovenije za razvoj kadrov in štipendij za finančno podporo tega dela v okviru razpisa »Po kreativni poti do praktičnega znanja«.

### Acknowledgements

Authors would like to acknowledge the financial support of Slovene Human Resources and Scholarship Fund under the call »Po kreativni poti do praktičnega znanja«.

### Literatura / References

- [1] Springer Handbook of Condensed Matter and Materials Data, W. Martienssen and H. Warlimont (Eds.), Springer Berlin Heidelberg 2005
- [2] ASM Handbook, Vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, K. M. Zwiller and E. L. Langer, ASM International, 1992
- [3] ASM Handbook, Vol. 15, Casting, D.M. Stefanescu, ASM International, 1992
- [4] B. Stunova and M. Lunak, Al<sub>4</sub>Sr particle sizes and morphology influence on modification of Al-Si alloys. 19th International Conference on Metallurgy and Materials, Roznov pod Radhostem, Czech Republic, 2010
- [5] ASM Handbook, Vol. 4, Heat Treating, S. M. Copley and E. L. Langer, ASM International, 1991

## AKTUALNO / ACTUAL

### 49. poročilo o svetovni livarski proizvodnji 2014

Pod zgornjim naslovom je revija ameriškega livarskega društva, Modern Casting (Vol. 105, Nr. 12, Dec. 2015, str. 26-28: 49th Census of World Casting Production) objavila članek, katerega delno povzemamo v nadaljevanju.

V letu 2014 se je nadaljeval trend naraščanja svetovne livarske proizvodnje, ki se je iz 103.229.774 ton v letu 2013 povečala na 105.182.881 ton. V statistiko za leto 2014 je bilo vključenih 37 držav iz 4 celin, ki so posredovalle podatke za zadnji dve leti. Od tega je 23 držav poročalo o povečanju svoje livarske proizvodnje v primerjavi z letom 2013. Največji porast v livarski industriji, 40,7%, je evidenten v Bosni in Hercegovini, največji padec, 35.9%, pa v Srbiji. Kitajska, do sedaj vodeča v svetovni livarski proizvodnji, je svojo proizvodnjo povečala za 1.7 milijon ton ali 3.8%, kar je v primerjavi s preostalimi državami nadpovprečna rast. Naslednji dve največji državi po livarski proizvodnji, ZDA in Indija, beležita manjšo rast in sicer, ZDA za 1.6% in Indija za 2.2%. Tri države, ki so po obsegu livarske proizvodnje približno na sredini seznama, so dosegle izredno dobre rezultate po rasti. Gre za Ukrajino z 14.3% rastjo, Turčijo z 13.4% rastjo in Tajvan z 14% rastjo. Brazilija, ki je po obsegu livarske proizvodnje na sedmem mestu pa beleži 10.9% padec proizvodnje. Pri ostalih desetih "top" državah po livarski proizvodnji so razvidna naslednja gibanja: pri Rusiji 2.4% rast, Nemčiji 1.1% rast, Koreji 2.6% rast, Italiji 2.7% rast, Japonska je ostala na istem nivoju kot v letu 2013, pri Franciji pa je evidenten 1% padec.

#### Skupna svetovna proizvodnja

Siva litina	Nodularna litina	Temprana litina	Jeklo litina	Baker	Aluminij	Magnezij	Cink	Druge neželezne	Skupno
47.795.820	25.682.246	1.112.961	11.318.922	1.745.611	16.324.073	160.808	545.661	496.779	105.182.881

#### Evropa

Država	Siva litina	Nodularna litina	Temprana litina	Jeklo litina	Baker	Aluminij	Magnezij	Cink	Druge neželezne	Skupno
Avstrija	40.709	108.397	-	16.936	-	131.410	6.619	-	13.883	317.954
Belgija	34.300	6.700	-	35.500	-	742B	-	-	-	77.242
Bosna in Hercegovina	15.200	3.600	-	4.100	-	9.410	-	-	-	32.310
Češka	175.001	55.002	3.505	75.101	6.510	90.005C	-	11.050	32	416.206
Danska	30.800	48.100	-	-	1.099	2.756	-	-	102	82.857
Finska	17.198	33.113	-	12.952	3.953	2.854	-	250	-	70.320
Francija	566.154	745.155	-	82.278	17.864	297.117C	-	18.083	2.754	1.729.405
Hrvaška	33.400	10.000	100	100	183	22.075	-	30	20	65.908
Italija	702.900	389.900	-	71.200	65.855	730.338	-	63.961	697	2.024.851
Madžarska	25.671	48.800	6	12.096	1.960	101.423	965	3.480	115	194.516
Nemčija	2.355.957	1.520.855	30.486	206.894	72.064	993.874	14.921	51.493	13	5.246.557
Norveška	11.765	25.919	-	2.384	-	6.562B	-	-	-	46.630
Poljska	489.000	145.000	11.000	55.000	6.000	340.000	-	8.000	4.300	1.058.300
Portugalska	33.516	80.748	-	7.263	10.464	23.168	-	1.296	-	156.455
Romunija	25.065	4.510	1.026	14.218	7.180	50.925	5.000	299	145	108.368
Slovaška	2.700	18.200	-	4.100	-	46.000B	-	-	-	71.000
Slovenija	80.496	34.234	6.107	32.188	754	37.244	441	6.889	-	198.353
Srbija	24.368	10.140	-	8.991	2.092	9.760	1	96	9	55.457
Španija	334.700	583.500	5.500	82.400	10.176	116.374	-	8.426	665	1.141.741
Švedska	140.700	48.900	-	14.800	7.722	40.613	1.302	7.041	-	261.078
Švica	14.900	28.600	-	1.700	2.090	17.120	-	1.207	-	65.617
Ukrajina	400.000	120.000	30.000	580.000	60.000	280.000	15.000	25.000	50.000	1.560.000

Velika Britanija	133.100	189.000	1.100	48.000	8.832	110.000	3.400	7.900	1.000	502.332
------------------	---------	---------	-------	--------	-------	---------	-------	-------	-------	---------

\*podatki iz leta 2012 \*\*podatki iz leta 2011 B) Vsebuje temprano litino C) Vse neželezna zlitina

### Amerika

Država	Siva litina	Nodularna litina	Temprana litina	Jeklo litina	Baker	Aluminij	Magnezij	Cink	Druge neželezne	Skupno
Brazilija	1.601.852	655.048	-	262.800	22.200	188.700	4.900	1.700	-	2.737.200
Kanada	382.465A	-	-	94.774	15.293	232.225B	-	-	-	724.757
Mehika**	771,7	58.947	-	78.746	140.701	600.469	109	1.007	-	1.651.679
ZDA	3.874.000	3.907.590	274.630	1.547.500	324.380	1.653.270	108.150	244.960	62.950	11.997.430

\*\*podatki iz 2011 A) vključuje nodularno litino B) vključuje vse neželezne zlitine

### Azija

Država	Siva litina	Nodularna litina	Temprana litina	Jeklo litina	Baker	Aluminij	Magnezij	Cink	Druge neželezne	Skupno
Kitajska	20.800.000	12.400.000	600.000	5.500.000	750.000	5.850.000C	-	-	300.000	46.200.000
Indija	6.830.000	1.070.000	60.000	968.000	-	1.093.000B	-	-	-	10.021.000
Japonska*	2.135.794	1.683.250	45.001	181.679	76.611	1.382.015	-	27.293	6.394	5.538.037
Koreja	1.091.800	707.200	5.000	164.300	26.900	622.500	-	-	13.200C,D	2.630.900
Pakistan	160.000	14.500	-	35.000	11.000	12.000B	-	-	-	232.500
Rusija	2.982.000A	-	-	756.000	-	462.000B	-	-	-	4.200.000
Tajvan	618.209	237.038	-	83.122	40.128	340.724B	-	-	-	1.319.221
Tajska*	72.400	28.800	29.500	29.800	26.100	105.400	-	24.400	-	316.400
Turčija	650.000	600.000	10.000	140.000	19.000	300.000	-	31.000	-	1.750.000

\*podatki iz 2013 A) vključuje nodularno litino B) vključuje vse neželezne zlitine C) vključuje magnezij D) vključuje cink

### Afrika

Država	Siva litina	Nodularna litina	Temprana litina	Jeklo litina	Baker	Aluminij	Magnezij	Cink	Druge neželezne	Skupno
Južna Afrika	138.000	61.500	-	109.000	8.500	22.000	-	800	40.500	380.300

### Število livarn po državah

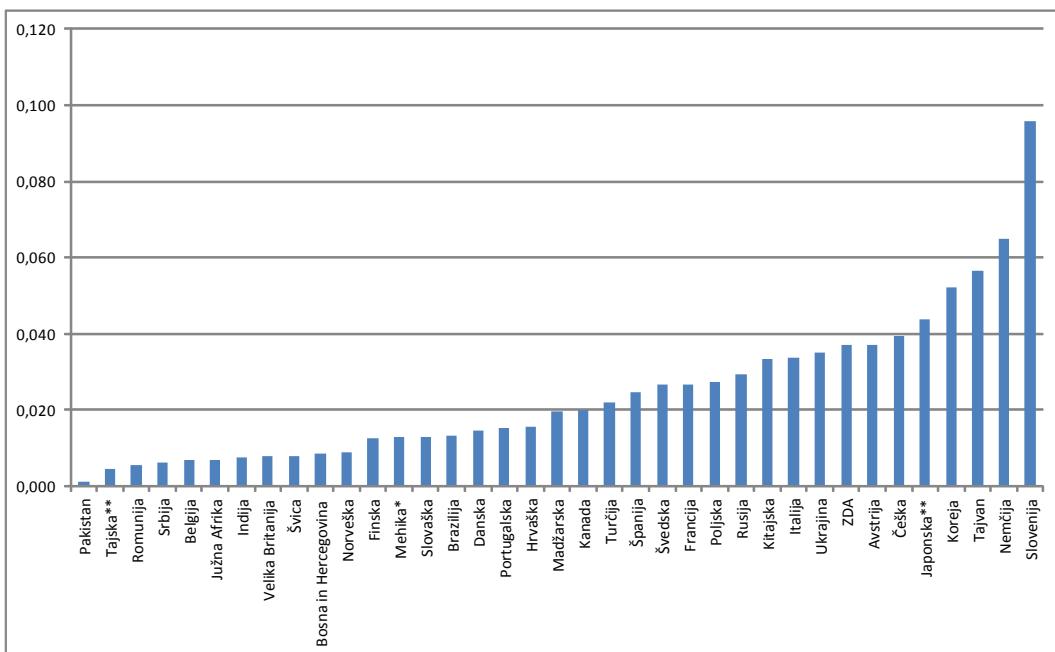
Država	Siva litina	Jeklo litina	Neželezne	Skupno		Siva litina	Jeklo litina	Neželezne	Skupno	
Avstrija	-	-	-	42		Norveška	6	3	7	16
Belgija	11	5	6	22		Pakistan	1.460	40	100	1.600
Bosna in Hercegovina	6	4	6	16		Poljska	180	36	230	446
Brazilija	516	194	630	1.340		Portugalska	30	7	31	68
Kanada	42	30	111	183		Romunija	42	37	60	139
Kitajska	15.000	5.000	6.000	26.000		Rusija	-	-	-	1.200
Hrvaška	27	5	27	59		Srbija*	12	8	18	38
Češka	85	34	66	185		Slovaška**	12	7	32	51
Danska	8	-	7	15		Slovenija	11	3	50	64
Finska	12	7	16	35		Španija	46	30	52	128
Francija	88	36	298	422		Švedska	26	11	62	99
Nemčija	254	-	341	595		Švica*	18	4	50	72
Madžarska	26	14	88	128		Tajska*	280	40	260	580
Indija	-	-	-	4.500		Turčija	493	68	358	919
Italija	149	25	913	1.087		Ukrajina	270	280	290	840
Japonska*	817	75	1.193	2.085		Velika Britanija	221	-	205	426
Južna Afrika	47	46	77	170		ZDA	634	355	989	1.978
Koreja	528	146	242	916		SKUPNO	21.532	6.717	13.154	47.145
Mehika*	175	167	339	681						

K temu pregledu revije Modern Casting prilagamo še podatke iz analize, ki smo jo opravili na Društvu livarjev Slovenije, ki pokaže, da je Slovenija še zmeraj vodeča država na svetu po količini proizvedenih ulitkov na prebivalca. Iz zadnjih dostopnih podatkov o svetovni livarski proizvodnji, ki ga povzemamo v tem članku, je Slovenija z 96kg ulitkov na prebivalca v letu 2014 zavzema zanesljivo prvo mesto na svetovni lestvici. Analiza na teh izhodiščih je bila zadnjič podana v predavanju prof. dr. Milana Trbižana, na 44. Mednarodnem livarskem posvetovanju Portorož 2004, upoštevajoč slovensko livarsko proizvodnjo v letu 2003. Takrat je Slovenska letna livarska proizvodnja na prebivalca znašala 70 kg.

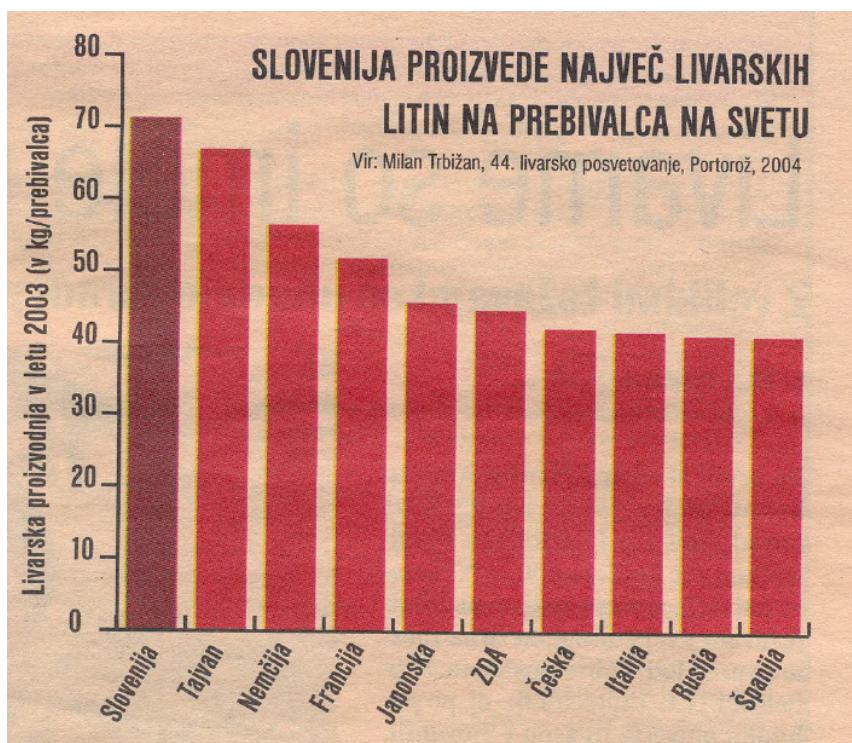
Država	Skupno	Prebivalci	Ton/ preb.	Država	Skupno	Prebivalci	Ton/preb.
Pakistan	232.500	191.768.252	0,001	Kanada	724.757	36.192.409	0,020
Tajska**	316.400	68.095.821	0,005	Turčija	1.750.000	79.362.700	0,022
Romunija	108.368	19.410.324	0,006	Španija	1.141.741	46.080.090	0,025
Srbija	55.457	8.823.085	0,006	Švedska	261.078	9.832.208	0,027
Belgija	77.242	11.352.200	0,007	Francija	1.729.405	64.594.141	0,027
Južna Afrika	380.300	55.122.333	0,007	Poljska	1.058.300	38.598.215	0,027
Indija	10.021.000	1.322.529.374	0,008	Rusija	4.200.000	143.444.466	0,029
Velika Britanija	502.332	65.003.916	0,008	Kitajska	46.200.000	1.380.621.511	0,033
Švica	65.617	8.357.558	0,008	Italija	2.024.851	59.800.104	0,034
Bosna in Hercegovina	32.310	3.804.380	0,008	Ukrajina	1.560.000	44.678.455	0,035
Norveška	46.630	5.255.415	0,009	ZDA	11.997.430	323.482.704	0,037
Finska	70.320	5.518.358	0,013	Avstrija	317.954	8.562.839	0,037
Mehika*	1.651.679	128.194.023	0,013	Češka	416.206	10.546.737	0,039
Slovaška	71.000	5.428.561	0,013	Japonska**	5.538.037	126.391.460	0,044
Brazilija	2.737.200	209.101.293	0,013	Koreja	2.630.900	50.446.840	0,052
Danska	82.857	5.684.873	0,015	Tajvan	1.319.221	23.391.650	0,056
Portugalska	156.455	10.316.740	0,015	Nemčija	5.246.557	80.684.031	0,065
Hrvaška	65.908	4.229.155	0,016	Slovenija	198.353	2.068.864	0,096
Madžarska	194.516	9.830.460	0,020				

\*podatki iz 2011 \*\*podatki iz 2013

Vir: Društvo livarjev Slovenije



Svetovna livarska proizvodnja po državah na prebivalca (ton / prebivalca)



**AKTUALNO / ACTUAL****Seminar o okoljevarstveni problematiki za livarne**

Na letošnjem februarskem seminarju o okoljevarstveni problematiki za livarne, ki sodi še v programsko leto 2015, je Služba za varstvo okolja pri Gospodarski zbornici Slovenije, kot izvajalec seminarja, 15-stim predstavnikom liven predstavila veljavno zakonodajo v letu 2015 s poudarki na spremembah in sicer le-te so bile evidentne pri naslednjih aktih: Uredbi o vrsti dejavnosti in naprav, ki lahko povzročajo onesnaževanje okolja večjega obsega (Uradni list RS št. 57/15), Pravilniku o obratovalnem monitoringu stanja tal (Ur. list RS, št. 53/15), spremembah Uredbe o posegih v okolje, za katere je treba izvesti presojo vplivov na okolje (Ur. list RS, št. 57/15), Uredbi o mejnih vrednostih emisije snovi v zrak iz velikih kurih naprav (Ur. List RS, št. 103/15), spremembi uredbe o okoljski dajatvi za onesnaževanje okolja zaradi odvajanja odpadnih voda (Ur. list RS, št. 98/15), spremembi uredbe o emisiji snovi in toploti pri odvajjanju odpadnih voda v vode in javno kanalizacijo (Ur. list RS, št. 98/15), spremembe pravilnika o prvih meritvah in obratovalnem monitoringu odpadnih voda (Ur. list RS, št. 98/15) in predpisih o odpadkih.



Predavateljica Janja Leban

Pri novostih, s katerimi se bodo livarne srečevale v letu 2016 pa je potrebno omeniti predvsem naslednje: sprejemanje Zakona o spremembah in dopolnitvah Zakona o varstvu okolja (ZVO-1), Uredbo o okoljski dajatvi za onesnaževanje zraka z emisijo CO<sub>2</sub>, Uredbo o preprečevanju večjih nesreč in zmanjševanju njihovih posledic, Uredbo o standardih kakovosti in stanju tal in OP ravnjanju z odpadki.

Na okoljevarstvenem področju je za livarne evidentna vrsta nalog, ki jih bodo morale le-te izpolniti dokaj hitro. Zato bo nadaljnje izobraževanje in prenos znanj in izkušenj na tem področju, še v letošnjem letu, zelo potrebno in pomembno za vse livarne.



Udeleženci seminarja

Poročala:  
mag. Mirjam Jan-Blažič

## AKTUALNO / ACTUAL

### Seje organov Društva livarjev Slovenije

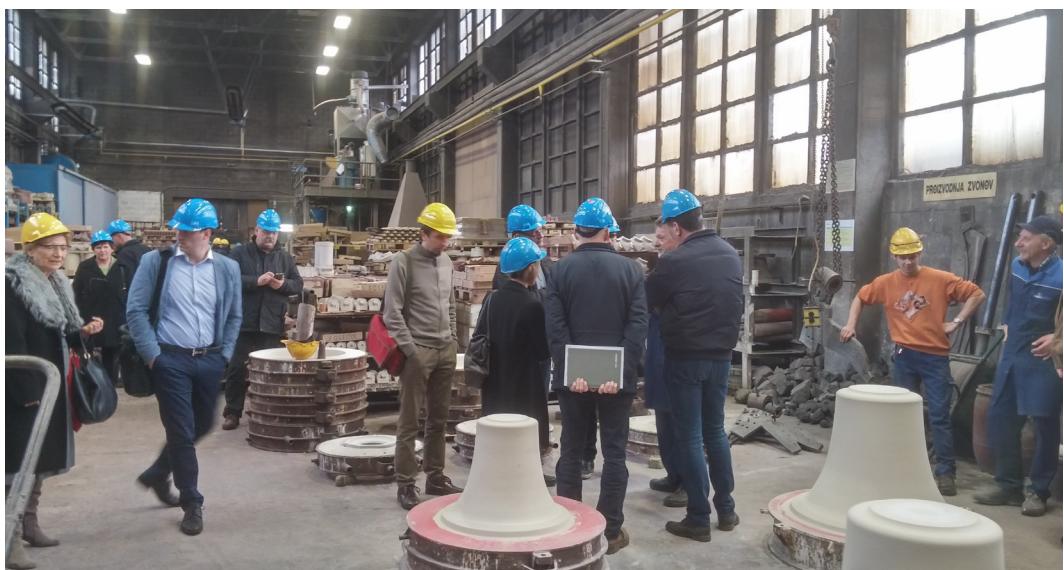
Dne 1.03.2016 so v livarni OMCO FENIKS Slovenija d.o.o. v Žalcu potekale seje vseh organov Društva livarjev Slovenije in sicer po zaporedju: najprej seja Nadzornega odbora, zatem seja Izvršnega odbora in na koncu še redni letni Občni zbor, ki je bil letos še posebno dobro obiskan s strani članic. Vodstvo livarne OMCO Feniks, kot gostitelj se je do dobra potrudil, da so se delegati Občnega zbora lahko seznanili s to zelo uspešno in moderno livarno. Omogočen jim je bil tudi ogled proizvodnih obratov, kjer je še posebno zanimiv novi del livarne, ki deluje od lanskega decembra. Podjetje OMCO Feniks smo obiskali tik pred podelitvijo letošnje nagrade Gospodarske zbornice Slovenije za izjemne gospodarske in podjetniške dosežke direktorju podjetja Borutu Triplatu, ki že vrsto let uspešno vodi to livarsko podjetje. Predvidoma bomo nagrajenca in podjetje podrobnejše predstavili v 2.letošnji številki Livarskega vestnika.

Osrednji točki organov Društva, ki so jih na ločenih sejah obravnavali sta vključevali poročilo o delu in finančnem poslovanju Društva za leto 2015, ki ga je predstavila predsednica Društva, mag. Mirjam Jan-Blažič in program dela društva za programsko leto 2016, ki je časovno opredeljeno za obdobje od 29.02. 2016 do 28.02.2017. Delo Društva v letu 2015 je potekalo po programu, ki je bil sprejet na Občnem zboru februarja 2015 v livarni ETA Cerkno. Vse programske aktivnosti za leto 2015 je Društvo realiziralo v skladu s svojim osnovnim poslanstvom in statusom Društva, ki deluje v javnem interesu. Izdane so štiri številke livarske revije Livarski vestnik, uspešno je izpeljano 55. mednarodno livarsko posvetovanje v Portorožu in štiri enodnevna seminarja za železove in neželezove livarne ter za vse članice Društva še seminar s okoljevarstveno tematiko za livarne. Seminarje za železove in neželezove livarne smo organizirali s Avstrijskim livarskim inštitutom iz Leobna, kot izvajalcem, okoljevarstveni seminar za livarne pa s Gospodarsko zbornico Slovenije. Društvo je skupaj s Celjskim sejmom pripravilo sejemske nastop članic na 6. Sejmu Livarstvo in varjenje v Celju s enodnevnim livaškim srečanjem s strokovnimi predavanji. Skozi izmenjavo velike večine svetovnih livarskih revij so le-te bile članicam stalno na razpolago. Društvo je pripravilo za svetovno livarsko statistiko statistične podatke o doseženi livaški proizvodnji v Sloveniji po vrstah litin za leto 2014. Kot članica WFO-Svetovne livarske organizacije Društvo sodeluje s svojim delegatom enkrat letno na generalni skupščini WFO, kjer poroča o dosežkih slovenskega livarstva v preteklem letu. Tradicionalna izmenjava med sorodnimi društvami skozi livaška posvetovanja poteka vsako leto z Avstrijskim in Nemškim združenjem livarjev in livaške industrije. V letu 2015 se je Društvo udeležilo specializiranih sejmov v Duesseldorfu GIFA, METEC, NEWCAST in v januarju 2016 še Eurogussa v Nuernbergu.

Finančni izid za leto 2015 je bil v skladu s predvidevanji na pozitivni nuli. S tremi članicami Društva ni bil dosežen sporazum o pripadajoči članarini. Le-te so namreč v zadnjih letih



Udeleženci Občnega zbora v novem obratu livarne OMCO Feniks



Utrip iz ogleda livarne

prispevale samo minimalni članski prispevek, do katerega so upravičene samo članice v prisilni upravi. Sreči je društvo pridobilo nekaj nepredvidenih prihodkov, ki so zagotovili, da je Društvo poslovalo vsaj s pozitivno nulo. Glavni finančni vir za Društvo je še zmeraj livarsko posvetovanje v Portorožu skozi sponzorstvo in pokroviteljstvo. Ostali prihodki so iz naslova reklam v Livarskem vestniku, dotacij ARRS za izdajo livarskega vestnika, za članarino za WFO in delovanje društva v sorodnih združenjih v tujini ter letnega članskega prispevka.

Glede na predvidoma približno isti obseg prihodkov v letu 2016 bo Društvo v letu 2016 izvajalo vse vsebine kot v letu 2015. Na področju izobraževanja članic oz. organizacije seminarjev so predvidene naslednje aktivnosti. Ker zahtevnost izbranih tem s strani strokovne komisije za livarne železovih litin presega možnosti Avstrijskega livarskega inštituta, se pristopi takoj iskanju drugega izvajalca doma ali v tujini. Sodelovanje s Avstrijskim inštitutom iz Leobna, ki je specialistično orientiran na programe neželezovih liven (še posebno visokotlačnega litja) se bo v letu nadaljevalo na novih kvalitetnejših osnovah. Organiziran bo dvodnevno seminar na lokaciji v Leobnu (po možnosti že do poletja), kjer bodo naši slušatelji lahko spoznali praktične rešitve problemov v poskusnih preiskovalnih obratih in laboratorijih inštituta.

Predlog članic je bil, da bi bilo nujno potrebno glede na velike kratkoročne zahteve po ureditvi stanja v livenah na okoljevarstvenem področju, kar se da hitro organizirati dodatno izobraževanje, kjer bi kot izvajalca le-tega vključili Agencijo Republike Slovenije za okolje, ki izdaja potrebna okoljevarstvena soglasja livenam,

Naslednji letni Občni zbor v februarju 2017 bo predvidoma v Kovis Liveni v Štorah.

Poročala:  
mag. Mirjam Jan-Blažič

**AKTUALNO / ACTUAL****Euroguss 2016**

V času od 12.01-14.01.2016 je v Nuernbergu potekal specializirani sejem EUROGUSS. Gre za strokovni sejem za tlačno litje, ki je osredotočen na inovativne rešitve v procesih te livarske tehnologije, organizira pa se vsako drugo leto. Od slovenskih podjetij so se na sejmu predstavili: DIFA d.o.o., ISKRA d.o.o., LAMAAVTOMATIZACIJA d.o.o., LTH Castings d.o.o., Orodjarstvo GORJAK in TALUM d.d.

Interes za ta sejemske dogodek vztrajno raste, saj so letos zabeležili že več kot 12.000 obiskovalcev. Vsaki drugi obiskovalec je bil izven nemških meja. Le-ti so se na enem mestu lahko srečali s tlačnimi livarnami, livarsko opremo, tehniko, s procesi in produkti, skratka celotno verigo od surovin, tehnologije in procesov do končnih izdelkov. Obdelane statistike po končanem sejmu so zelo pohvalne, saj je 98 % obiskovalcev bilo zadovoljno s sejemske ponudbo.



Že tretjič je znotraj te prireditve organizirana razstava « Research for Knowledge ». Nekaj več kot deset raziskovalnih inštitutov, univerz in tehničnih šol je pripravilo vpogled v najnovejše projekte, svoje storitve i osrednje raziskovalne teme, kot tudi možnosti na področju izobraževanja in usposabljanja.

V paviljonu »Surface Technology« smo kot novost lahko evidentirali predvsem naslednje sporočilo. Naknadna obdelava in zaščitne prevleke za funkcionalne in zelo zahtevne livarske izdelke sodijo v skupino ključnih tem za tlačne livarne. Za visoko kakovost končne obdelave so potrebni ustrezni stroji in procesne tehnologije.

V vseh treh sejemskeh dneh je na prizorišču sejma potekalo tudi dobro obiskano 16. Mednarodno nemško posvetovanje iz tlačnega litja, na katerem so sodelovali predavatelji iz Švice, Italije, Španije, Izraela, Koreje, Poljske in Češke ter Nemčije.

*Poročala:  
Mag. Mirjam Jan-Blažič*



# DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE SLOVENIAN FOUNDRYMEN SOCIETY

**vas vladno vabi na / invites you to**

**56. MEDNARODNO LIVARSKO POSVETOVANJE  
56<sup>th</sup> 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](mailto:drustvo.livarjev@siol.net), [www.drustvo-livarjev.si](http://www.drustvo-livarjev.si)**

## **AKTUALNO / ACTUAL**

Termin	Naziv dogodka	Kraj / država dogodka
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	72th 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
21.-23.09.2016	Int. Zinc Diecasting Conference	Brescia/Italija
23.-24.09.2016	International Foundry Forum	Dresden/Nemčija
28.09.-01.10.2016	48. IOC 2016	Bor/Srbija
29.09.-01.10.2016	ANKIROS – ANNOFER - TURKCAST	Istanbul/Turčija

# IPRO ING

*industrijski programi*



## hitrozaporne spojke



- *standardne spojke*
- *multi spojke*
- *"clean break" spojke*
- *specialne izvedbe spojek*



## IPRO ING

*industrijski programi*

IPRO ING do.o., Brnčičeva 9, 1231 Ljubljana - Črnuče

T: +386 1 56 11 045  
F: +386 1 56 14 911  
e: info@ipro.si  
W: www.ipro.si