

LIVARSKI VESTNIK

Izdajatelj / Publisher:

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

Glavni in odgovorni urednik / Chief and responsible editor:

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

Tehnično urejanje / Technical editing:

mag. Mirjam Jan-Blažić

Uredniški odbor / Editorial board:

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

Prevod v angleški jezik /

Translation into English:

Marvelingua, Aljaž Seničar s.p.

Lektorji / Lectors:

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

Tisk / Print:

Fleks d.o.o.

Naklada / Circulation:

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

Letna naročnina: 35 EUR z DDV

Year subscription: 35 EUR (included PP)

Dano v tisk: junij 2019



HIDRIA d.o.o.
PE Alutec
Spodnja Kanomlja 23
SI-5281 Spodnja Idrija

Direktor PE Alutec: Martin HLADNIK

T: +386 5 375 65 13
F: +386 5 375 64 74
E: info@hidria.com
<http://www.hidria.com>

VSEBINA / CONTENTS

Stran / Page:

- G. Gyarmati, G. Fegyverneki, D. Molnár, M. Tokár:** Učinkovitost čiščenja taline z različnimi talili in njihov vpliv na stopnjo evtektične modifikacije zlitine AISi7MgCu / The Melt Cleaning Efficiency of Different Fluxes and Their Effect on the Eutectic Modification Level of AISi7MgCu Alloy **70**
- C. Delgado, E. Garitaonandia, L. Unamunzaga, A. Martínez, I. García, J. Rios, J. Luis Rodríguez:** Integracija nove tehnologije regeneracije peska v livarnah jekla za valorizacijo odpadnega livarskega peska v livarski in gradbeni industriji / Integration of a novel mechanical sand reclamation technology in a steel foundry to maximise SFS valorisation in foundry and construction applications **88**
- M. Žbontar, R. Cerc Korošec, M. Petrič, M. Vončina, J. Čevka, J. Medved:** Uporaba sol-gel tehnologije v livarskih premazih / Application of Sol-Gel Technology in Foundry Coatings **111**
- F. Zupanič, M. Steinacher, T. Bončina:** Lita mikrostruktura nove aluminijeve zlitine AA 6086 / As-cast microstructure of a novel Al-Mg-Si alloy **125**

AKTUALNO / CURRENT

- Koledar livarskih prireditev 2019 in 2020 **136**
- Razgovor z direktorjem PE HIDRIA ALUTEC HIDRIA d. o. o. g. Martinom Hladnikom **137**
63. avstrijsko livarsko posvetovanje **142**
- PROGRAM / PROGRAMME: WFO-Technical Forum in 59. IFC Portorož 2019 / WFO-Technical Forum and 59TH IFC Portorož 2019 **148**

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

Učinkovitost čiščenja taline z različnimi talili in njihov vpliv na stopnjo evtektične modifikacije zlitine AlSi7MgCu

The Melt Cleaning Efficiency of Different Fluxes and Their Effect on the Eutectic Modification Level of AlSi7MgCu Alloy

Izvleček

Danes se trdna talila uporabljajo v livarnah za zmanjšanje vsebnosti vključkov v talinah aluminijeve zlitine. Učinek talil se določa glede na njihovo kemično sestavo, morfologijo, dodano količino, pa tudi glede na temperaturo taline in način dodajanja talil. Po drugi strani lahko reakcije, ki jih sproža talilo, povzročijo večjo oksidacijo legirnih elementov, ki so podvrženi oksidaciji. Zato lahko uporaba močno reaktivnih talil pri talinah, obdelanih s Sr, povzroči hitrejše slabljenje Sr in neustrezno stopnjo evtektične modifikacije. V tej študiji je opisan učinek štirih različnih talil na kakovost taline in slabljenje Sr. Najprej smo preučili vsebnost vključkov, nato pa še slabljenje Sr v talinah, obdelanih s talilom.

Ključne besede: aluminijeva zlitina, vključki, obdelava taline, modifikacija

Abstract

Nowadays, solid fluxes are widely used in foundries in order to reduce the inclusion content of aluminium alloy melts. The effect of fluxes is determined by their chemical composition, morphology, added quantity, as well as the temperature of the melt and the method of flux addition. On the other hand, the reactions promoted by the flux can result in the increased oxidation rate of alloying elements which are prone to oxidation. Thus, the application of highly reactive fluxes in case of Sr-treated melts can cause accelerated Sr-fading and inappropriate eutectic modification level. In this study, the effect of four different fluxes on the melt quality and Sr fading is described. First, the inclusion content and then, the Sr fading of the flux-treated metal was examined.

Keywords: Aluminium alloy, Inclusions, Melt treatment, Modification

1 Uvod

Vključki so diskontinuitete materiala, ki so nekovinske ali včasih intermetalne faze, vdelane v kovinsko matrico [1]. Vključki lahko nastanejo v obliki trdnih delcev, obojev ali tekočih kapljic (vključki talila) na staljenih zlitinah [2, 3]. Količina in vrsta vključkov v talini se določata s kakovostjo šarže in

1 Introduction

Inclusions are discontinuities of the material, which are non-metallic or sometimes intermetallic phases embedded in a metallic matrix [1]. Inclusions can occur in the form of solid particles, films or liquid droplets (flux inclusions) in the molten alloys [2, 3]. The quantity and type of inclusions

legirnih materialov, pa tudi s parametri taljenja in procesi rokovanja s talino. Najpogostejši vključki v aluminijevih zlitinah so nekovinske komponente: oksidi, nitridi, karbidi in boridi [3, 4]. Vključki zmanjšujejo mehanske lastnosti z umikanjem iz učinkovitega presečnega območja ob obremenitvi in zaradi koncentracije obremenitev v fazni meji vključka. Vključki v talini lahko negativno vplivajo na tekočnost taline ter preprečujejo interdendritno dovajanje [5]. *Campbell* [3] je dokazal, da so najbolj škodljivi vključki tako imenovani bifilmi, ki so posledica odnašanja oksidnega filma s površine taline. Ti dvojni oksidni filmi delujejo kot razpoke v mikrostrukturi in pomembno vplivajo na tvorbo poroznosti v aluminijevih zlitinah.

Obdelava s talilom navadno zajema dodatek mešanice trdnih anorganskih spojin k talini. Te spojine lahko opravljajo več funkcij, kot je odstranjevanje nekovinskih nečistoč iz taline, zaščita površine taline ali rafiniranje in/ali razplinjevanje staljene taline [6]. Učinek talil se določa glede na njihovo kemično sestavo, morfologijo, dodano količino, pa tudi glede na temperaturo taline in načina dodajanja talil. Pomembno je, da lahko spojine v talilih pri delovni temperaturi tvorijo visoko pretočne mešanice z nizko tališno vrednostjo [7]. Na splošno lahko osnovne komponente talila razvrstimo v štiri glavne skupine glede na primarni vpliv na mešanico: kloridi, fluoridi, topila aluminijevih oksidov in oksidacijske spojine. Kloridi se najpogosteje uporabljajo zaradi učinkov utekočinjevanja, vendar pa se lahko uporabljajo tudi kot polnila in nosilne snovi. Soli fluoridov delujejo kot površinsko aktivne snovi ter močijo vmesno površino med vključki in tekočo kovino. Zato soli fluoridov spodbujajo ločevanje vključkov. Oksidacijske snovi se uporabljajo za pospeševanje eksotermnih kemičnih reakcij, ki spodbujajo koalescenca večjih

in the melt are determined by the quality of charge and alloying materials, as well as the parameters of melting and melt handling processes. The most common inclusions in aluminium alloys are non-metallic compounds: oxides, nitrides, carbides, and borides [3, 4]. Inclusions reduce mechanical properties by detracting from the effective cross-sectional area when stress is applied and because of the concentration of stresses at the inclusion interface. Inclusions in the melt can negatively influence melt fluidity and prevent interdendritic feeding [5]. It has been demonstrated by *Campbell* [3] that the most deleterious inclusions are the so-called bifilms, which are the results of the entrainment of the surface oxide film of the melt. These double oxide films are acting as cracks in the microstructure and have a significant role in porosity formation in aluminium alloys.

Flux treatment usually includes the addition of a solid blend of inorganic compounds to the melt. These compounds may perform several functions, such as the removal of non-metallic impurities from the melt, the protection of the melt surface or the refinement and/or degassing of the molten alloy [6]. The effect of fluxes is determined by their chemical composition, morphology, added quantity, as well as the temperature of the melt and the method of flux addition. It is important that the compounds in the fluxes should be able to form low-melting high-fluidity mixtures at working temperature [7]. Generally, the base flux components can be classified into four major groups based on their primary influence on the mixture: chlorides, fluorides, solvents of aluminium oxides and oxidizing compounds. Chlorides are mostly used for their fluidizing effects, but they can also be used as fillers and carriers. Fluoride salts act as surfactants and wet the interface between the inclusions and the liquid metal.

aluminijevih kapljic, ujetih v peno. Po drugi strani omogoča vročina, ki se sprošča med reakcijami, lažjo vmesno reakcijo med stopljenim talilom in vključki v talini [6, 7].

Mehanske lastnosti zlitin Al-Si je mogoče pomembno izboljšati z dodatkom kemičnih modifikatorjev, kot so Sr, Na ali Sb, ki vplivajo na morfologijo in finost evtektičnih faz Si. Majhne količine Sr povzročijo modifikacijo evtektičnih delcev Si iz grobih lističev v fino vlakneno obliko. Vendar pa se z daljšim časom zadrževanja tekoče zlitine učinek modifikacije evtektičnih silicijevih delcev izgubi zaradi slabljenja Sr, ki ga povzročijo kemične reakcije, ki porabljajo raztopljeni Sr v talini. Večina talil za čiščenje, ki se uporabljajo v industriji, vsebuje visoko reaktivne oksidacijske spojine, ki spodbujajo eksotermne reakcije. Po drugi strani lahko reakcije, ki jih sproža talilo, povzročijo večjo oksidacijo legirnih elementov, ki so podvrženi oksidaciji. Zato lahko uporaba zelo reaktivnih talil v primeru talin, obdelanih s Sr, povzroči hitrejšo slabljenje Sr in neustrezno stopnjo evtektične modifikacije [7, 8].

2 Eksperimentalno delo

2.1 Obdelava taline

Obdelava taline, ki zajema rotacijsko razplinjevanje s plinom N_2 in dodatek talila, je bila izvedena na talini zlitine Al-7Si-0,4Mg-0,5Cu (za razpone koncentracij preučevane zlitine si oglejte Preglednico 1) z uporabo štirih različnih talil A(B, C, in D). Vsako talilo je bilo uporabljeno v 8 različnih ciklih obdelave. V enem ciklu je bila obdelana približno 1 tona kovine. Kovina je bila stopljena v jašku talilnice, nato pa s prenosnim loncem prenesena v zadrževalno peč, kjer se je izvajala obdelava taline (Slika 1). V vsakem primeru je bila talina zlita v

Therefore, fluoride salts promote inclusion separation. Oxidizing compounds are used to accelerate exothermic chemical reactions, which stimulate the coalescence of larger aluminium droplets trapped in the dross. On the other hand, the heat released during the reactions facilitate the interfacial reactions between the molten flux and the inclusions in the melt [6, 7].

The mechanical properties of Al-Si alloys can be significantly improved by the addition of chemical modifiers like Sr, Na or Sb, that affect the morphology and fineness of eutectic Si phases. Small amounts of Sr cause the modification of the eutectic Si particles from a coarse flake-like morphology into a fine fibrous one. However, as the holding time of the liquid alloy increases, the modification effect on the eutectic silicon particles is lost due to Sr-fading which is caused by the chemical reactions that consume the dissolved Sr in the melt. Most cleaning fluxes used in the industrial practice contain highly reactive oxidizing compounds that promote exothermic reactions. On the other hand, the reactions promoted by the flux can result in the increased oxidation rate of alloying elements which are prone to oxidation. Thus, the application of highly reactive fluxes in case of Sr-treated melts can cause accelerated Sr-fading and inappropriate eutectic modification level [7, 8].

2 Experimental Procedure

2.1 Melt Processing

Melt treatments consisting of rotary degassing with N_2 gas and flux addition were executed on an Al-7Si-0.4Mg-0.5Cu alloy (see Table 1. for concentration ranges of the studied alloy) melt using four different fluxes (A, B, C and D). Each flux was used ineight



Sl. 1. Stopnje priprave taline: a) zlivanje iz talilne peči, b) prenos taline v zadrževalno peč in c) obdelava taline

Fig. 1. The stages of melt preparation: a) pouring from melting furnace, b) melt transport to holding furnace, and c) melt processing

Preglednica 1. Razponi koncentracije legirnih elementov, ki so prisotni v zlitini

Table 1. The concentration ranges of alloying elements present in the alloy

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Sr
wt. %	6,5–7,5	< 0,2	0,45–0,58	< 0,1	0,36–0,45	< 0,2	0,017–0,030

manjšo količino taline (pribl. 200 kg), ki je ostala v zadrževalni peči od predhodnega cikla. Pred obdelavo talin je bilo dodano ustrezno število palic predzlitine Al-10Sr (število palic je bilo od 1 do 3, odvisno od rezultatov optične emisijske spektrometrije) z namenom povečanja koncentracije Sr v zlitini na raven med 170 in 300 ppm. Parametri obdelave in količina dodanega topila (400 g) so bili enaki v vsakem ciklu. Hitrost pretoka plina N_2 je znašala 20 l/min; rotor se je vrtel s hitrostjo 500 vrt./min med tvorjenjem vrtnicev in s hitrostjo 250 vrt./min v fazi razplinjevanja. Obdelava je vsakokrat potekala 10 minut. Temperatura stopljene kovine v zadrževalni peči je bila med 740 in 750 °C.

Po obdelavi z dodajanjem talila so bili zbrani in preučeni vzorci pene z vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM) v kombinaciji z energijsko disperzivno rentgensko spektrometrijo (analiza EDS). Z energijsko disperzivno rentgensko

treatment cycles. The quantity of metal treated in one cycle was approximately one ton. The metal was melted in a stack smelter, then transported by a transport ladle to a resistance heated holding furnace where the melt treatments were performed (Fig. 1). In each case, the melt was poured onto a lesser quantity of melt (ca. 200 kg), which remained in the holding furnace from the previous cycle. Before the melt treatments, an appropriate number of Al-10Sr master alloy rods were added to the melt (the number of rods was 1 to 3 depending on optical emission spectrometry results) in order to raise the Sr-concentration of the alloy to a level between 170 and 300 ppm. The treatment parameters and the quantity of flux added (400 g) were the same in each cycle. The N_2 gas flow rate was 20 L/min; the rotor revolution was 500 RPM during vortex formation and 250 RPM in the degassing phase. The treatment time was 10 minutes in each case. The molten metal

spektrometrijo je bila izmerjena tudi elementna sestava talil, ki se uporabljajo pri obdelavi talin.

2.2 Analiza vključkov

Vsebnost vključkov v talinah, obdelanih z različnimi talili, je bila preučena z oceno vzorcev form K, ki so bile pripravljene v kokili, imenovani forma K. Forma in nekaj primerov površin razpok na vzorcih forme K je prikazanih na Sliki 2. Vzorec sam po sebi je ploska plošča s štirimi zarezi, ki delujejo kot točke preloma. Razpokano površino vzorcev je mogoče preveriti bodisi vizualno bodisi z mikroskopom. Glede na število vključkov je mogoče določiti vrednost K, ki se lahko uporabi za kvantitativno karakterizacijo čistosti taline (enačba št. 1).

$$K = \frac{S}{n}, \quad (1)$$

kjer je K vrednost forme K, n je število pregledanih vzorcev, S pa je skupno število vključkov, najdenih v n kosih [5].

Učinek različnih talil na čistost kovine je bila ocenjena s primerjavo vrednosti K , določenih pred obdelavo taline in po njej. Odstotkovna vrednost spremembe v vrednostih K (ΔK [%]) je bila izračunana z enačbo št. 2.

$$\Delta K = \frac{K_2 - K_1}{K_1} \cdot 100 \quad (2)$$

temperature in the holding furnace was maintained between 740 °C and 750 °C.

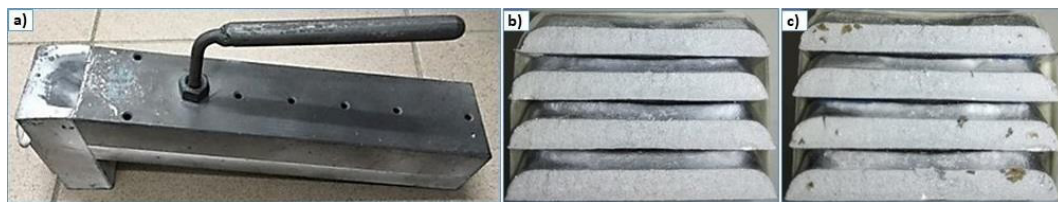
After the fluxing treatments, dross samples were collected and examined with a scanning electron microscope (SEM) combined with energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS analysis). The elemental composition of fluxes used in the melt treatments was also measured with energy dispersive X-ray spectroscopy.

2.2 Inclusion Analysis

The inclusion content of the melts treated with different fluxes was investigated by the evaluation of K-mould samples, which were prepared in a gravity die called K-mould. The mould and some examples of fracture surfaces of K-mould specimens are illustrated in Fig. 2. The sample itself is a flat plate with four notches that act as fracture points. The fracture surface of samples can be examined either by visual inspection or with a microscope. Based on the number of inclusions, a K-value can be determined which can be used for the quantitative characterization of the melt purity (Eq. 1).

$$K = \frac{S}{n} \quad (1)$$

where K is the K-mould value, n is the number of examined samples, and S is the total number of inclusions found in n pieces [5].



Sl. 2. a) aparatura s formami K; jamičasta površina vzorcev v primeru b) dobre in c) slabe kakovosti taline

Fig. 2. a) K-mold apparatus; the fracture surface of samples in case of b) good and c) bad melt quality

kjer je K_1 vrednost K , določena pred obdelavo taline, in K_2 vrednost K , določena po obdelavi taline. Med vsako pripravo taline so bili vzorci forme K uliti trikrat, hkrati pa je bilo ulitih pet vzorcev. Med preučevanjem 32 ciklov (8 ciklov/mešanica talila) je bilo ustvarjenih 480 vzorcev forme K . V vsakem primeru so bili vzorci forme K pripravljeni iz taline v prenosnem loncu. Po zlitju taline v zadrževalno peč in odstranitvi nastale mokre pene je bila pripravljena nova serija vzorcev forme K . Tretja serija vzorcev je bila ulita po posnemanju, temu je sledilo dodajanje, nato pa še razplinjevanje. Razpokana površina vzorcev forme K je bila preverjena s stereomikroskopom s 25-kratno povečavo. Vključki, najdeni na razpokani površini, so bili preverjeni s SEM, kombiniranim z analizo EDS.

2.3 Sestava zlitine

Elementna sestava zlitine je bila določena z optično emisijsko spektrometrijo vzorcev, ulitih pri isti stopnji priprave taline. Sprememba v ravni Sr (Sr^{loss} [%]) taline med obdelavami z različnimi talili je bila izračunana z naslednjo enačbo:

$$Sr^{loss} = \frac{m_{Total}^{Sr} - m_{After\ treatment}^{Sr}}{m_{Total}^{Sr}} \cdot 100, \quad (3)$$

kjer je $m_{After\ treatment}^{Sr}$ [g] masa Sr , prisotnega v talini po obdelavi taline, izračunano na podlagi rezultatov spektrometrije, in m_{Total}^{Sr} [g] je skupna količina Sr , prisotnega v talini na začetku obdelave taline. To se izračuna kot:

$$m_{Total}^{Sr} = m_{Before\ treatment}^{Sr} + m_{Added}^{Sr} \quad (4)$$

kjer je $m_{Before\ treatment}^{Sr}$ [g] masa Sr , prisotnega v talini pred obdelavo taline in dodatkom palic predzlitine Sr in m_{Added}^{Sr} [g] je količina dodanega Sr v obliki palic predzlitine $Al-10Sr$, ki ga je mogoče izračunati na podlagi

The effect of different fluxes on the melt purity was evaluated using the comparison of the K -values determined before and after the melt treatments. The percentage of change in K -values (ΔK [%]) was calculated using Eq. 2.

$$\Delta K = \frac{K_2 - K_1}{K_1} \cdot 100 \quad (2)$$

where K_1 is the K -value determined before the melt treatment and K_2 is the K -value determined after the melt treatment. During each melt preparation, K -mould samples were cast 3 times and the number of samples cast at once was 5. During the investigated 32 cycles (8 cycle/flux blend), 480 K -mould samples were made. In each case, the first K -mould samples were prepared from the melt in the transport ladle. After the melt was poured into the holding furnace and the produced wet dross was removed, another series of K -mould samples were prepared. The third series of samples were cast after skimming, following the fluxing and degassing treatment. The fracture surface of K -mould samples was inspected with a stereomicroscope at a magnification of 25X. The inclusions found on the fracture surfaces were examined with SEM combined with EDS analysis.

2.3 The Composition of the Alloy

The elemental composition of the alloy was determined with the optical emission spectrometry of samples cast at each stage of melt preparation. The change in the Sr level (Sr^{loss} [%]) of the melt during the treatments with different fluxes was calculated using the following equation:

$$Sr^{loss} = \frac{m_{Total}^{Sr} - m_{After\ treatment}^{Sr}}{m_{Total}^{Sr}} \cdot 100, \quad (3)$$

where $m_{After\ treatment}^{Sr}$ [g] is the mass of Sr present in the melt after melt processing

števila dodanih palic (ena palica predzlitine tehta 200 g).

2.4 Termična analiza

Glavna pomanjkljivost določitve ravni Sr z optično emisijsko spektrometrijo je, da rezultati ne podajo nobene informacije o obliki Sr v talini. Zaradi slabljenja Sr je lahko Sr prisoten v obliki takšnih spojin, ki ne sodelujejo v procesu evtektične modifikacije. Vendar pa je mogoče s pomočjo toplotne analize zlahka določiti količino »aktivnega« Sr, ki povzroča evtektično modifikacijo [8]. Temperatura evtektične rasti ($T_{E,G}^{Al-Si}$ [°C]), ki jo je mogoče določiti glede na krivuljo ohlajanja in njen prvi derivat glede na čas (Slika 3a), zagotovi ustrezne informacije o stopnji evtektične modifikacije zlitine. Zaradi dodatka Sr se strjevanje evtektične faze Al-Si začne pri nižji temperaturi z večjo podhladitvijo. Posledično se temperatura evtektične nukleacije (T_{NUC}^{Al-Si} [°C]) in temperatura evtektične tvorbe ($T_{E,G}^{Al-Si}$ [°C]) znižata. Razlika med temperaturo evtektične tvorbe nemodificirane in modificirane zlitine ($\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ [°C]) je neposredno povezana s stopnjo evtektične modifikacije dane zlitine (Slika 3b) [9–11].

Med preizkušanjem so bili preskusi toplotne analize izvedeni pred obdelavo taline in po njej. Vzorci so bili odvzeti z ulivanjem taline v valjaste kovinske posodice (premera 40 mm in globine 40 mm). Posodica za preskušanje pri toplotni analizi je bila predhodno segreti na 200 °C. Preskusni vzorci pri TA so v povprečju tehtali 110 ± 10 g. Podatki za toplotno analizo so bili zbrani s pomočjo sistema za pridobivanje podatkov, povezanega z osebnim računalnikom. Temperature med 700 in 400 °C so bile zabeležene pri vseh preskusih. Sprememba

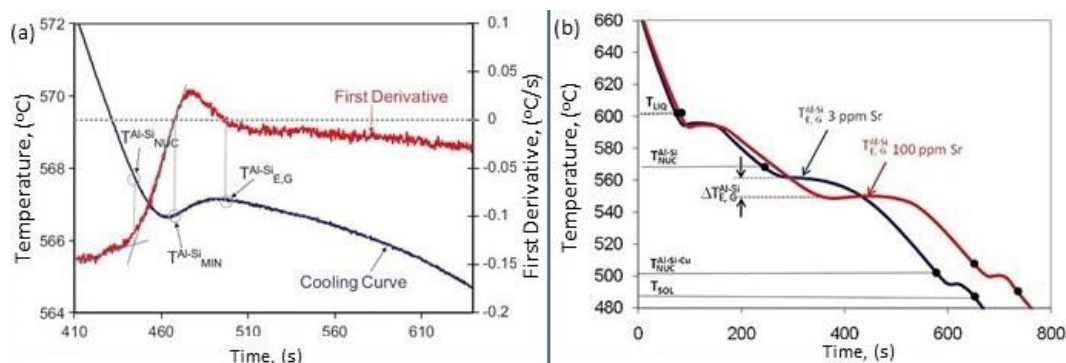
calculated from spectrometry results, and m_{Total}^{Sr} [g] is the total quantity of Sr present in the melt at the beginning of the melt treatment. It is calculated as:

$$m_{Total}^{Sr} = m_{Before\ treatment}^{Sr} + m_{Added}^{Sr} \quad (4)$$

where $m_{Before\ treatment}^{Sr}$ [g] is the mass of Sr present in the melt before melt processing and the addition of Sr master alloy rods, and m_{Added}^{Sr} [g] is the quantity of added Sr in the form of Al-10Sr master alloy rods, which can be calculated based on the number of rods added (the mass of one master alloy rod is 200 g).

2.4 Thermal Analysis

The main drawback of Sr level determination with optical emission spectrometry is, that the results do not give information about the form of the Sr in the melt. As a result of Sr fading, Sr can be present in the form of such compounds that do not participate in the eutectic modification process. However, with the aid of thermal analysis, the quantity of "active" Sr which causes eutectic modification can be easily evaluated [8]. The eutectic growth temperature ($T_{E,G}^{Al-Si}$ [°C]) which can be determined from the cooling curve and its first derivative with respect to time (Fig. 3. a), provides adequate information about the eutectic modification level of the alloy. As a result of Sr addition, the solidification of the Al-Si eutectic phase begins at a lower temperature with larger undercooling. As a consequence, the eutectic nucleation temperature (T_{NUC}^{Al-Si} [°C]) and the eutectic growth temperature ($T_{E,G}^{Al-Si}$ [°C]) are lowered. The difference between the eutectic growth temperature of an unmodified and a modified alloy ($\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ [°C]) is directly related to the



SI. 3. a) Določitev ($T_{E,G}^{Al-Si}$) z uporabo krivulje ohlajanja in njenega prvega derivata [12] b) krivulja ohlajanja nemodificirane (3 ppm Sr) in modificirane zlitine (100 ppm Sr) [13]

Fig. 3. a) The determination of $T_{E,G}^{Al-Si}$ using the cooling curve and its first derivative [12] b) the cooling curve of an unmodified (3 ppm Sr) and a modified (100 ppm Sr) alloy [13]

v temperaturi evtektične tvorbe ($T_{E,G}^{Al-Si}$ [°C]) je bila izračunana z enačbo št. 5:

$$\Delta T_{E,G}^{Al-Si} = T_{E,G,Unmodified}^{Al-Si} - T_{E,G,Modified}^{Al-Si} \quad (5)$$

kjer je $T_{E,G,Modified}^{Al-Si}$ [°C] temperatura evtektične tvorbe modificirane zlitine, določena na podlagi krivulje hlajenja, in njena prva izpeljanka in $T_{E,G,Unmodified}^{Al-Si}$ [°C] je temperatura evtektične tvorbe nemodificirane zlitine, določena na podlagi kemijske sestave zlitine z uporabe naslednje enačbe [14]:

$$T_{E,G,Unmodified}^{Al-Si} = 577 - \frac{12.5}{c_{Si}} \cdot (4.43 \cdot c_{Mg} + 1.43 \cdot c_{Fe} + 1.93 \cdot c_{Cu} + 3.0 \cdot c_{Mn}) \quad (6)$$

kjer so c_{Si} , c_{Mg} , c_{Fe} , c_{Cu} in c_{Mn} koncentraciji elementov, navedenih v podpisih pri odstotkih mas. Med preučevanjem so bile izvedene toplotne analize, zadevna analiza pa je bila opravljena pred obdelavami z rotacijskim razplinjevanjem in dodajanjem talila $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$. Učinek obdelave talin na stopnjo evtektične modifikacije je bil ocenjen s primerjavo sprememb v vrednostih $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$

eutectic modification level of the given alloy (Fig. 3.b) [9-11].

During the experiments, thermal analysis tests were executed before and after the melt treatments. The samples were taken by pouring aluminium melt into a cylindrical steel cup (40 mm in diameter, 40 mm deep). The thermal analysis test cup was preheated to 200 °C. The average weight of the TA test samples was 110 ± 10 g. The data for thermal analysis were collected by using a data acquisition system linked to a personal computer. The temperatures between 700 °C and 400 °C were recorded for all the experiments. The change in eutectic growth temperature ($\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ [°C]) was calculated using Eq. 5:

$$\Delta T_{E,G}^{Al-Si} = T_{E,G,Unmodified}^{Al-Si} - T_{E,G,Modified}^{Al-Si} \quad (5)$$

where $T_{E,G,Modified}^{Al-Si}$ [°C] is the eutectic growth temperature of the modified alloy determined from the cooling curve and its first derivative and $T_{E,G,Unmodified}^{Al-Si}$ [°C] is the eutectic growth temperature of the unmodified alloy determined from the

povzročenih z obdelavo taline z različnimi talili (enačba št. 7).

$$\Delta T_{E,G,Change}^{Al-Si} = \Delta T_{E,G,After\ treatment}^{Al-Si} - \Delta T_{E,G,Before\ treatment}^{Al-Si} \quad (7)$$

kjer je $\Delta T_{E,G,Change}^{Al-Si}$ [°C] sprememba $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ vrednosti, ki jih je povzročila obdelava z dodajanjem, $\Delta T_{E,G,After\ treatment}^{Al-Si}$ [°C] in $\Delta T_{E,G,Before\ treatment}^{Al-Si}$ [°C] sta $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ vrednosti, določeni po obdelavi in pred obdelavo taline.

3 Rezultati in razprava

3.1 Vsebnost vključkov

Povprečne vrednosti K talin na različnih stopnjah priprave taline so predstavljene na Sliki 4.

Mogoče je razbrati, da so imele taline različne vsebnosti vključkov celo v prenosnem loncu, kar je bila posledica razlik v kakovosti materialov v šarži. V vsakem primeru je bila talina v prenosnem loncu zlita na majhno količino taline, ki je ostala v zadrževalni peči še od predhodnega cikla. Tako je na vsebnost vključkov v talini vplivala kakovost preostale taline. Uporabljena mešanica talila tako neposredno vpliva na povprečne vrednosti K talin tudi pred izvedbo obdelav. Povprečne vrednosti ΔK za vsako mešanico talil so prikazane na Sliki 5.

Obdelave, izvedene s talilom C, so bile najučinkovitejše pri zmanjševanju vrednosti K, talilo B pa je bilo drugo najučinkovitejše. Mešanica talil A je imela najslabše rezultate. Obdelave talin, izvedene s talilom A, so privedle do večje vsebnosti vključkov v talini, kar je povzročilo pozitivno spremembo povprečne vrednosti K. Primer vključkov, najdenih med pregledovanjem vzorcev forme K, je prikazan na Sliki 6.

chemical composition of the alloy using the following equation [14]:

$$T_{E,G,Unmodified}^{Al-Si} = 577 - \frac{12.5}{c_{Si}} \cdot (4.43 \cdot c_{Mg} + 1.43 \cdot c_{Fe} + 1.93 \cdot c_{Cu} + 3.0 \cdot c_{Mn}) \quad (6)$$

where c_{Si} , c_{Mg} , c_{Fe} , c_{Cu} in c_{Mn} are the concentrations of elements indicated in the subscripts in weight percent. Throughout the investigations thermal analyses were conducted and the respective $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ was determined before and after the rotary degassing and flux addition treatments. The effect of melt treatments on the eutectic modification level was evaluated by the comparison of the changes in the values of $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ caused by the melt treatments with different fluxes (Eq. 7).

$$\Delta T_{E,G,Change}^{Al-Si} = \Delta T_{E,G,After\ treatment}^{Al-Si} - \Delta T_{E,G,Before\ treatment}^{Al-Si} \quad (7)$$

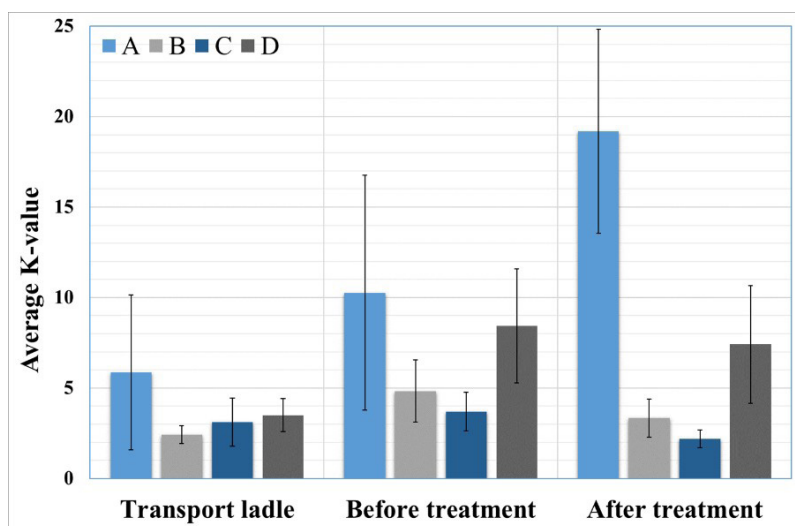
where $\Delta T_{E,G,Change}^{Al-Si}$ [°C] is the change in $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ values caused by the fluxing treatment, $\Delta T_{E,G,After\ treatment}^{Al-Si}$ [°C] and $\Delta T_{E,G,Before\ treatment}^{Al-Si}$ [°C] are the $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ values determined after and before the melt treatment, respectively.

3 Results and discussion

3.1 Inclusion content

The average K-values of the melts at the different stages of melt preparation can be observed in Fig. 4.

It can be seen that the melts had different inclusion contents even in the transport ladle which was the result of the differences in the quality of charge materials. In each case, the melt in the transport ladle was poured onto a small quantity of melt remaining in the holding furnace from the previous cycle. Thus, the inclusion content of the melt was

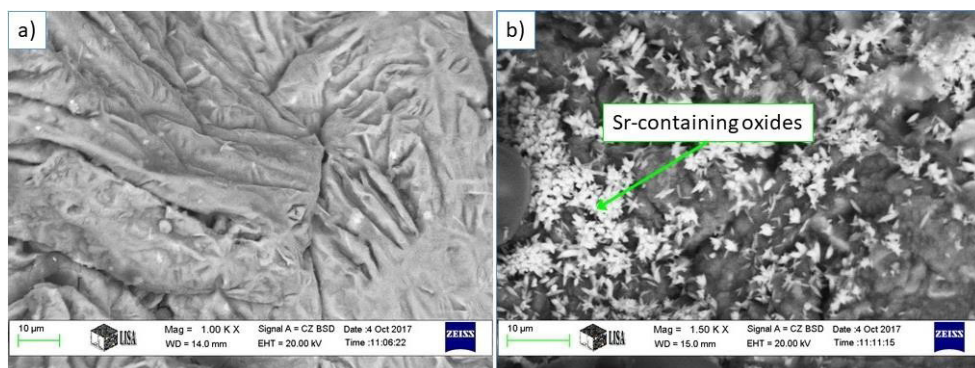
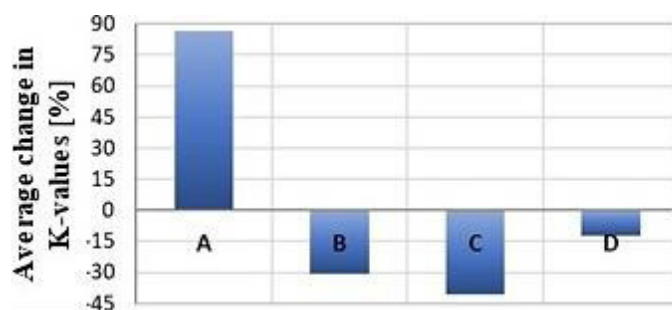


Sl. 4. Povprečne vrednosti K različnih stopnjah priprave taline

Fig. 4. Average K-values at the different stages of melt preparation

Sl. 5. Povprečna sprememba v vrednostih K (ΔK)

Fig. 5. The average change in K-values (ΔK)



Sl. 6. Vključki, najdeni na jamičasti površini vzorcev forme K a) nagubani oksidni film in b) vključek pene v delcih, ki vsebujejo Sr

Fig. 6. Inclusions found on a fracture surface of K-mould specimens a) creased oxide film and b) dross inclusion with Sr-containing particles

V večini primerov so bili nagubani vključki, podobni filmu, prisotni na jamičastih površinah. Na podlagi analize EDS so imeli vključki v večini primerov pomembno vsebnost kisika, dušika, magnezija in stroncija. Zato so najdeni vključki verjetno nekovinske spojine, kot so Al_2O_3 , AlN , $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, in oksidi, ki vsebujejo Sr. Prisotnost stroncijevih oksidov je neizogibna posledica slabljenja Sr.

3.2 Analiza talila in vzorcev penaste žilindre

Elementna sestava talil, izmerjena z energijsko disperzivno rentgensko spektrometrijo (EDS) in posnetki SEM zrn talila, so prikazani na Sliki 7. Predstavljene sestave so bile izmerjene na površinskem območju zrn talila. Vrednosti elementne sestave talila D, predstavljene na Sliki 7, so bile izmerjene na treh različnih zrnih.

Meritve elementne sestave različnih zrn talila so bile opravljene na primeru talil A, B in C. Na podlagi ugotovitev so bile izmerjene vrednosti sestave skorajda identične. Zato imajo zrna talila enako kemično sestavo. Kot je razvidno iz Slike 7, imajo zrna talila D bistveno drugače vrednosti sestave, kar je skladno z literaturo [7] pogosta lastnost praškastih talil. Nehomogenost kemične sestave talila D bi lahko bila glavni razlog za nižje vrednosti ΔK in posledično slabšo sposobnost čiščenja taline.

Izmerjene vrednosti elementne sestave se lahko uporabijo za predvidevanje kakovosti in količine osnovnih komponent talila, kot so kloridi, fluoridi in oksidacijske spojine. Glede na vsebnosti klora in natrija v talilu A so zrna v večini sestavljena iz NaCl , ki ima sorazmerno visoko tališče ($801\text{ }^\circ\text{C}$ [6]), zato je mogoče, da se zrna tega talila ne morejo stopiti med procesom taljenja. Ker so bila zrna talila po dodajanju v

influenced by the quality of the residual melt. This way, the applied flux blends had an indirect effect on the average K-values of the melts even before the treatments were carried out. The average ΔK values for each flux blends are illustrated in Fig. 5.

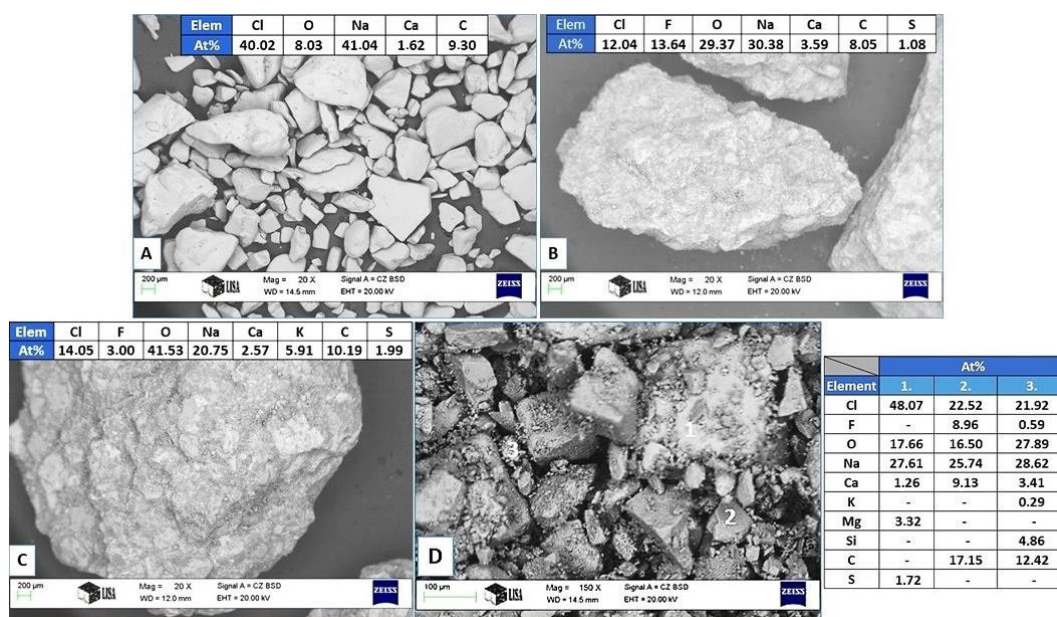
The treatments executed with flux C were the most effective in reducing the K-values and flux B was the second most efficient. Flux blend A had the poorest results. The melt treatments performed with flux A resulted in the increased inclusion content of the melt, which caused a positive change in the average K-value. An example of inclusions found during the examination of K-mould samples can be seen in Fig. 6.

In most cases, creased film-like inclusions were found on the fracture surfaces. Based on the EDS analysis, in most cases, the inclusions had significant oxygen, nitrogen, magnesium and strontium content. Therefore, the inclusions found are probably nonmetallic compounds like Al_2O_3 , AlN , $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ and Sr-containing oxides. The presence of strontium-oxides is the inevitable consequence of Sr-fading.

3.2 The Analysis of Flux and Dross Samples

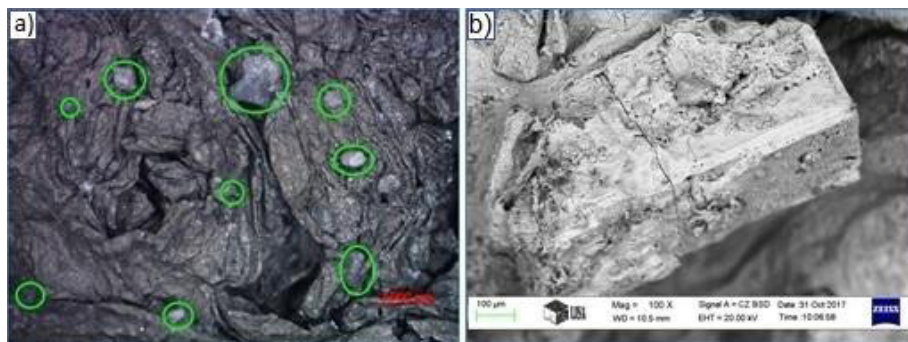
The elemental composition of fluxes measured with energy dispersive X-ray spectrometer (EDS) and the SEM images of flux grains are shown in Fig. 7. The compositions presented were measured on the surface area of the flux grains. The elemental composition values of flux D presented in Fig. 7. were measured in case of three different grains.

Elemental composition measurements on different flux grains were executed in case of flux A, B and C. It was found, that the measured composition values are almost identical. Therefore, the flux grains



Sl. 7. Posnetki SEM in elementne sestave zrn talila

Fig. 7. The SEM images and elemental compositions of flux grains



Sl. 8. a) Stereomikroskopski in b) posnetki SEM vzorcev pene z zrn talila

Fig. 8. a) Stereomicroscopic and b) SEM images of dross samples containing flux grains

trdnem stanju, niso mogla izvesti nobenega ukrepa za odstranitev vključkov. Nadalje so prispevala k poslabšanju kakovosti taline z odnašanjem površinskega oksidnega filma taline med dodajanjem talila, kar je privedlo do višjih vrednosti K. Pomemben dokaz tega

have consistent chemical composition. As it can be seen in Fig. 7., the grains of flux *D* have significantly different composition values, which is a common attribute of powder fluxes according to the literature [7]. The inhomogeneity of the chemical

procesa je, da so bila številna zrna najdena v vzorcih pene po obdelavi s talilom A (gl. Slika 8), ki je imelo enako kemično sestavo kot talila, predstavljena na Sliki 7.

Zaradi vsebnosti fluora in kisika v talilu B je slednje relativno bogato s fluoridi in oksidacijskimi spojinami. Talilo C vsebuje največ oksidacijskih spojin, vendar pa je vsebnost fluora in fluorida v tem talilu bistveno nižja od vsebnosti v talilu B. Na podlagi primerjave izmerjenih vrednosti K in elementne sestave talil je mogoče sklepati, da bolj učinkoviti talili B in C vsebujeta reaktivne komponente (kot so oksidacijske spojine in fluoridi) z večjimi vrednostmi koncentracije, njuna zrna pa imajo enako kemično sestavo.

Na podlagi preverjanj vzorcev pene z načinoma SEM in EDS imajo vzorci pene, odvzeti po obdelavah talin, izvedenih s talili B, C in D, podobno sestavo. V vseh vzorcih pene, odvzetih med obdelavo taline z omenjenimi talili so imeli veliko vsebnost kisika in stroncija, kar je dokaz hitrejšje oksidacije Sr med obdelavami taline (Slika 9). V vzorcih pene, vezanih na talilo A, ni bilo mogoče zaznati količine oksidov, ki vsebujejo Sr, kar bi lahko pomenilo, da obdelave s tem talilom zanemarljivo vplivajo na slabljenje Sr.

3.3 Analiza slabljenja Sr

Povprečna sprememba v ravni Sr (Sr^{loss} [%]) taline med obdelavami z različnimi talili, določena z enačbo št. 3, je prikazana na Sliki 10.

Povprečne vrednosti $\Delta T_{E,G,Change}^{Al-Si}$ [°C], izračunane z enačbo št. 7, za vsako talilo, so predstavljene na Sliki 11.

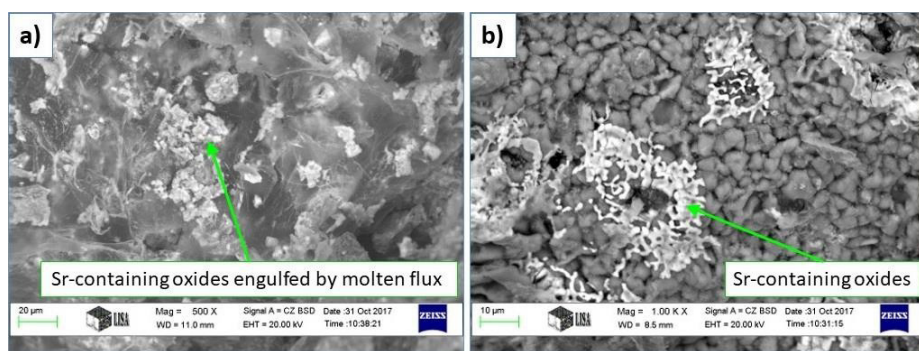
Kot je razvidno iz Slike 10 in 11, izračunana izguba Sr in vrednosti $\Delta T_{E,G,Change}^{Al-Si}$ kažejo enako nagnjenost k slabljenju Sr. Večja kot je izguba Sr, kot je nakazala

composition of flux D could be the main reason for the lower ΔK values and thus the lower efficiency of melt cleaning.

The measured elemental composition values can be used to predict the quality and quantity of basic flux components like chlorides, fluorides and oxidizing compounds. Based on the chlorine and sodium content of flux A, the grains mainly consist of NaCl which has a relatively high melting point (801 °C [6]), so it is possible that the grains of this flux could not melt during melt processing. Since the flux grains were in solid state after addition, they were not capable of carrying out any inclusion removing action. Moreover, they contributed to the degradation of melt quality via the entrainment of the surface oxide film of the melt during flux addition, which resulted in higher K-values. An important evidence of this process is that numerous flux grains were found in the dross samples taken after the treatments with flux A (see Fig. 8.), which had the same chemical composition as the ones presented in Fig. 7.

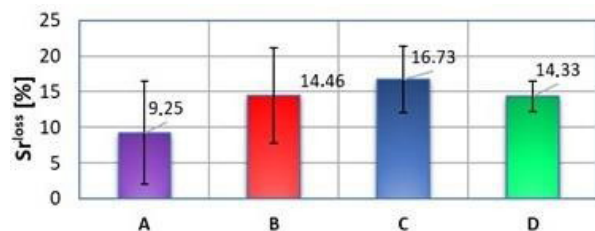
Based on the fluorine and oxygen content of flux B, the flux is relatively rich in fluorides and oxidizing compounds. Flux C contains the highest amount of oxidizing compounds, but the fluorine and thus the fluoride content of this flux is significantly lower than in flux B. By the comparison of the measured K-values and the elemental composition of fluxes it can be concluded that the more effective fluxes (B and C) contain reactive components (like oxidizing compounds and fluorides) at higher concentration values and their grains have consistent chemical composition.

Based on the SEM and EDS examinations of dross samples, the composition of dross taken after melt treatments conducted with fluxes B, C and D are similar in composition. All the dross samples created during the melt processing



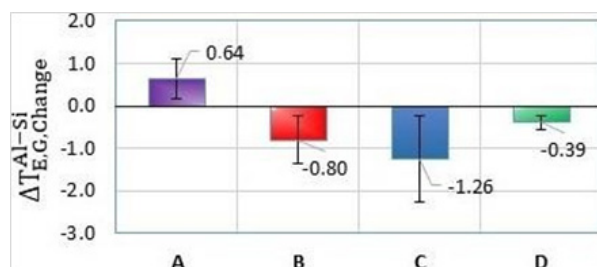
SI. 9. Posnetki SEM vzorcev pene, ki vsebujejo stroncijeve okside

Fig. 9. SEM images of dross samples containing strontium oxides



SI. 10. Povprečna izguba Sr med obdelavami taline z različnimi talili na podlagi spektrometrije

Fig. 10. Average Sr-loss during melt treatments with different fluxes based on spectrometry



SI. 11. Povprečna sprememba v vrednostih $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ pri uporabi različnih talil

Fig. 11. Average change of $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ values in the case of using different fluxes

with the mentioned fluxes all had significant oxygen and strontium content, which is an evidence of the accelerated oxidation of Sr during melt treatments (Fig. 9). There was no detectable amount of Sr-containing oxides in dross samples related to flux A, which could suggest that the treatments with this flux have a negligible effect on Sr-fading.

3.3 The analysis of Sr-fading

The average change in the Sr level ($Sr^{loss}[\%]$) of the melt during the treatments with different fluxes determined with Eq. 3. is illustrated in Fig. 10.

The average $\Delta T_{E,G}^{Al-Si} [^{\circ}C]$ values calculated with Eq. 7. for each flux are presented in Fig. 11.

As it can be seen in Fig. 10. and Fig. 11., the calculated Sr^{loss} and $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ values indicate the same tendency of Sr-fading. The higher the Sr-loss was according to spectroscopy, the

spektroskopija, nižje je bilo evtektično podhlajanje in posledično je bila $\Delta T_{E,G,Change}^{Al-Si}$, kar pomeni nižjo stopnjo evtektične modifikacije. Na podlagi rezultatov, prikazanih na Sliki 11, se je v primeru talila B, C in D stopnja evtektične modifikacije znižala kljub dejstvu, da so bile talini pred obdelavami dodane palice predzlitine Sr. Med obdelavami s talilom A se je raven modifikacije povečala zaradi dodatka predzlitine. Tako je na podlagi toplotne analize in preiskave SEM vzorcev pene razvidno, da obdelave s talilom A zanemarljivo vplivajo na slabljenje Sr.

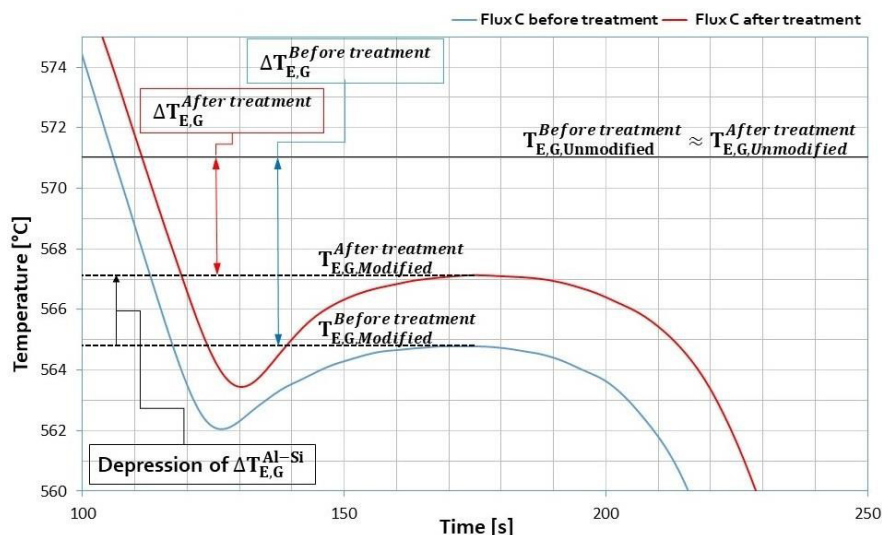
Največja vrednost Sr^{loss} in najpomembnejše znižanje vrednosti $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ je bilo določeno v primeru talin C in B. Razlaga za to je v elementni sestavi talil, predstavljenih na Sliki 7. Glede na vsebnost kisika v talilih imata talili B in C večjo koncentracijo reaktivnih komponent (kot so oksidirajoče komponente). Zato se med postopki dodajanja topila odvijajo intenzivnejše eksotermne reakcije, ki spodbujajo hitrejšo oksidacijo Sr in posledično nižjo raven modifikacije zlitine. Primer spremembe vrednosti $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ zaradi obdelave s talilom C je predstavljen na Sliki 12, kjer je vrednost $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ upadla za 2,19 °C. To je bilo najpomembnejše znižanje stopnje modifikacije med preskusi. Za pridobitev informacij o spremembah v mikrostrukturi zaradi opisanega obsega zmanjšanja vrednosti $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ so bili strjeni vzorci uporabljeni za beleženje krivulj ohlajanja, predstavljeni na Sliki 12, prerezani na pol. Po potrebni metalografski pripravi (brušenje in loščenje) je bil opravljen pregled mikrostrukture vzorcev.

Raven modifikacije (RM) vzorcev je bila analizirana s pomočjo sistema za ocenjevanje modifikacije, ki ga je predlagalo Ameriško društvo livarjev (American Foundry Society) [8]. Analiziranih je bilo 20 mikrografov na vzorec s 500-kratno

lower the eutectic undercooling and thus, the $\Delta T_{E,G,Change}^{Al-Si}$ was, which indicate a lower eutectic modification level. Based on the results demonstrated in Fig. 11., in case of flux B, C and D the eutectic modification level decreased despite the fact that Sr master alloy rods were added to the melt before the treatments. During the treatments with flux A the modification level increased as a result of master alloy addition. Thus, it is evident based on the thermal analysis and the SEM investigation of dross samples, that the treatments with flux A have a negligible effect on Sr-fading.

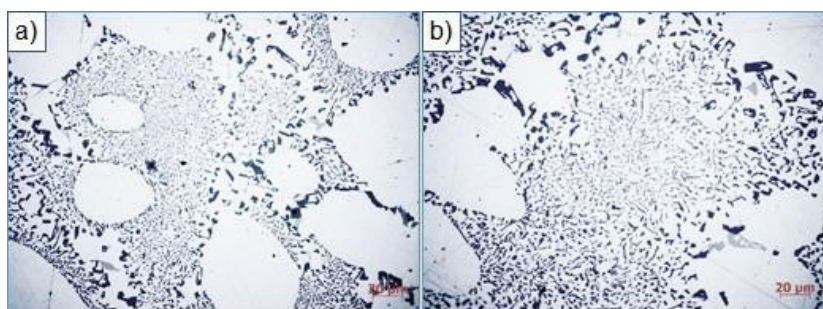
The highest Sr^{loss} and the most significant amount of depression in the value of $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ was determined in case of flux C and B. The explanation could be found in the elemental composition of fluxes presented in Fig. 7. Based on the oxygen content of the fluxes, flux B and C contain higher concentration of reactive components (like oxidizing compounds). Thus, more intensive exothermic reactions take place during fluxing treatments, which promote accelerated Sr oxidation and as a result, the lower modification level of the alloy. An example of the change in $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ value caused by the melt treatment with flux C is presented in Fig. 12., where the value of $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ was reduced by 2.19 °C. This was the most significant reduction of modification level measured during the experiments. In order to get information on the changes in the microstructure caused by the described amount of reduction in the $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ value, the solidified samples used for recording the cooling curves presented in Fig. 12 have been cut in half. After the necessary metallographic preparation (grinding and polishing), the microstructure of the samples was examined.

The modification level (ML) of the samples was analysed using the modification rating system proposed by the American



SI. 12. Znižanje ravno eutektične modifikacije med obdelavo taline s talilom C

Fig. 12. The reduction of eutectic modification level during melt treatment with flux C



SI. 13. Mikrostrukture vzorcev toplotne analize, ulitih a) pred in b) po obdelavi taline s talilom C

Fig. 13. The microstructures of the thermal analysis samples cast a) before and b) after melt treatment with flux C

povečavo. Po podatkih je stopnja modifikacije zlitine padla s 3,5 (pred obdelavo) na 2,9 (po obdelavi), in to je samo za 0,6 nižja vrednost stopnje modifikacije vzorcev. Na Sliki 13 so prikazani primeri tipičnih mikrostruktur pregledanih vzorcev.

Kot je razvidno iz Slike 13, so imeli vzorci, uliti po obdelavi taline, večje in bolj igličaste silicijske lističe, vendar pa razlika

Foundry Society [8]. 20 micrographs per sample with a magnification of 500X were analysed. It was found, that the modification level of the alloy depressed from 3.5 (before treatment) to 2.9 (after treatment), which is only a value of 0.6 difference in modification level of the specimens. Fig. 13. shows examples of typical microstructures of the examined samples.

med mikrostrukturami ni zelo pomembna. Ker je sprememba v mikrostrukturi zanemarljiva tudi pri najopaznejšem zmanjšanju izmerjenih $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ med preskusi, je jasno, da je bila stopnja modifikacije evtektične mikrostrukture uspešno ohranjena pri uporabi vseh talil, zato ni potrebe po dodatnem legiranju Sr po obdelavi taline.

4 Sklepi

Na podlagi rezultatov te študije je mogoče sklepati, da sta sposobnost čiščenja različnih talil in njihov vpliv na raven modifikacije zlitine močno odvisna od kemijske sestave. Glede na rezultate preskusov forme K je bilo talilo C najučinkovitejše pri odstranjevanju vključkov, vendar pa vsebuje večjo koncentracijo oksidacijskih spojin kot ostala talila. To na podlagi rezultatov optične emisijske spektrometrije povzroči bistveno hitrejše slabljenje Sr med obdelavami taline. Vendar pa na podlagi mikrostrukturnih opažanj učinek tega talila na slabljenje Sr (in nobenega drugega od preučevanih talil) ni tako pomemben, da bi bilo poleg običajne količine dodatka Sr potrebno še dodatno legiranje s Sr.

Treba je poudariti, da je treba poleg spektrometrije toplotno analizo izvesti pri preučevanju vplivov različnih obdelav taline na raven modifikacije zlitin Al-Si.

Zahvala

Opisana študija je del projekta EFOP-3.6.1-16-2016-00011 »Younger and Renewing University – Innovative Knowledge City – institutional development of the University of Miskolc aiming at intelligent specialisation« v okviru programa Szechenyi 2020. Izvedbo tega projekta je podprla Evropska unija s

As it can be seen in Fig. 13. the sample cast after melt treatment had larger and more acicular silicon flakes, but the difference between the microstructures is not remarkably significant. As the microstructural change is negligible even in case of the most notable reduction of $\Delta T_{E,G}^{Al-Si}$ measured during our experiments, it is evident that the modification level of the eutectic microstructure was successfully maintained using all fluxes, so there is no need for additional Sr alloying following the melt treatments.

4 Conclusions

From the results of the present study, it can be concluded that the melt cleaning efficiency of different fluxes and their effect on the modification level of the alloy is highly dependent on their chemical composition. Based on the results of K-mould tests, flux C was the most effective in inclusion removal, but it contains a higher concentration of oxidizing compounds than the other fluxes. This causes significantly accelerated Sr-fading during the melt treatments according to the optical emission spectrometry results. However, based on the microstructural observations, the effect on Sr-fading of this flux (and none of the other investigated fluxes) is not so significant, that additional Sr-alloying is needed besides the usual quantity of Sr-addition.

It should be noted, that thermal analysis is necessary besides spectrometry when the effects of different melt treatments on the modification level of Al-Si alloys are investigated.

Acknowledgement

The described study was carried out as part of the EFOP-3.6.1-16-2016-00011

sofinanciranjem Evropskega socialnega sklada.

“Younger and Renewing University – Innovative Knowledge City – institutional development of the University of Miskolc aiming at intelligent specialisation” project implemented in the framework of the Szechenyi 2020 program. The realization of this project is supported by the European Union, co-financed by the European Social Fund.

Viri / References

- [1] P. K. Trojan: Inclusion-Forming Reactions. v delu: ASM Handbook. Letnik 15.: Casting, ASM International, 2008, str. 74–83.
- [2] J. Morscheiser, P. Le Brun, M. Gökelma, M. Badowski, T. Dang, S. Tewes: Observation on Inclusion Settling by LiMCA and PoDFA Analysis in Aluminium Melts. International Aluminium Journal. Letnik 91. Št. 4. 2015, str. 56–61.
- [3] J. Campbell: Complete Casting Handbook 2nd Edition – Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design. Boston: Butterworth-Heinemann, 2015. ISBN: 978-0-444-63509-9
- [4] R. Gallo: I have Inclusions! Determining the Best Cost Saving Approach. Modern Casting. Letnik 107. Št. 8. 2017, str. 31–35.
- [5] S. W. Hudson, D. Apelian: Inclusion Detection in Molten Aluminum: Current Art and New Avenues for in Situ Analysis. International Journal of Metalcasting. Letnik 10. Št. 3. 2016, str. 315–321.
- [6] T. A. Utigard, K. Friesen, R. R. Roy, J. Lim, A. Silny, C. Dupuis: The Properties and Uses of Fluxes in Molten Aluminum Processing. JOM. Letnik 50. Št. 11. 1998, str. 38–43.
- [7] R. Gallo, D. Neff: Aluminum Fluxes and Fluxing Practice. in: ASM Handbook Vol. 15.: Casting, ASM International, 2008, str. 230–239.
- [8] G. K. Sigworth: The Modification of Al-Si Casting Alloys: Important Practical and Theoretical Aspects. AFS Transactions, 2008. Letnik 94, str. 115–140.
- [9] M. Djurdjevic, H. Jiang, J. Sokolowski: On-Line Prediction of Aluminum-Silicon Eutectic Modification Level Using Thermal Analysis. Materials Characterization Letnik 46. Št. 1. 2001, str. 31–38.
- [10] M. Malekan, S. G. Shabestari: Computer-Aided Cooling Curve Thermal Analysis Used to Predict the Quality of Aluminum Alloys. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Letnik 103. Št. 2. 2011, str. 453–458.
- [11] S. Eguskiza, A. Niklas, A. I. Fernández-Calvo, F. Santos, M. Djurdjevic: Study of Strontium Fading in Al-Si-Mg and Al-Si-Mg-Cu Alloy by Thermal Analysis. International Journal of Metalcasting. Letnik 9. Št. 3. 2015, str. 43–50.
- [12] F. C. Robles-Hernandez, J. M. H. Ramírez, R. Mackay: Al-Si Alloys - Automotive, Aeronautical, and Aerospace Applications. Springer International Publishing AG, 2017. ISBN 978-3-319-58380-8
- [13] J. Pavlović-Krštić: Impact of casting parameters and chemical composition on the solidification behaviour of Al-Si-Cu hypoeutectic alloy. Doktorska disertacija, Univerza Otto von Guericke v Magdeburgu, 2010. str. 120.
- [14] D. Apelian, G. K. Sigworth, K. R. Whaler: Assessment of Grain Refinement and Modification of Al-Si Foundry Alloys by Thermal Analysis. AFS Transactions. Letnik 92. 1984, str. 297–307.

Integracija nove tehnologije regeneracije peska v livarnah jekla za valorizacijo odpadnega livarskega peska v livarski in gradbeni industriji

Integration of a novel mechanical sand reclamation technology in a steel foundry to maximise SFS valorisation in foundry and construction applications

Izvilleček

Ena največjih okoljskih težav, s katero se danes sooča livarska industrija, je odstranjevanje odpadnega livarskega peska (SFS). Odlagališča livarskega peska zato v Evropi ostajajo resno okoljsko vprašanje, ne zaradi nevarnosti odpadkov, pač pa zaradi njihove obsežnosti.

Pristop, ki se uporablja pri projektu LIFE ECO-SANDFILL, zajema preoblikovanje odpadkov livarske industrije v uporabne surovine za livarstvo in druge industrijske panoge, posledica česar je manjša obremenitev odlagališč ter manj vplivov na okolje, vezanih na odstranjevanje ter ekstrakcijo neobnovljivih mineralnih virov. V ta namen je bil izdelan in v krogotok peska za kalupe integriran nov sistem za mehansko regeneracijo odpadnega livarskega peska s centrifugalno silo v Baskiji (Španija). Odpadni livarski pesek, ki se proizvaja v livarni, se obdela v prototipnem postopku, ki odstrani nečistoče, ki so posledica vezivnih sredstev in livnih procesov, ter tako zagotavlja zahtevano kakovost materiala za različne aplikacije, predvidene v projektu Okoljska, tehnična in gospodarska učinkovitost, ki bo predvidoma potrjena v treh celovitih študijah primera, ki bodo izvedene v sklopu izgradnje visoko hitrostnega železniškega omrežja Madrid-Irun v bližini livarne ter v pilotnem litju jeklenih delov v sami livarni z uporabo iz regeneriranega peska izdelanih form.

V tem prispevku so opisane pripravljalne dejavnosti pred izvedbo litja in konstrukcije s poudarkom predvsem na raziskavah odmerjanja in karakterizacijskih preskusih na nizu peščenih vzorcev ter primerkov, proizvedenih z uporabo odpadnega livarskega peska (neobdelanega in regeneriranega). Na podlagi rezultatov kemijske analize je bilo zaključeno, da regenerirani pesek, pridobljen v integriranem in s kemijskim peščenim tokokrogom livarne povezanem prototipnem postopku, izpolnjuje okoljske pogoje za uporabo v gradbeništvu ter ga je posledično mogoče varno uporabljati v maltah, materialih z nadzorovano nizko trdnostjo in nasipih, seveda ob upoštevanju tehničnih zahtev. Ugotovljeno je bilo, da regenerirani pesek ne izpolnjuje strogih zahtev proizvodnje jekla v livarski industriji, vendar bi se lahko uporabil kot delna zamenjava za termalno regenerirani pesek, ki se uporablja kot modelni pesek v formah (sistem PEP-SET).

Ključne besede: Odpadni livarski pesek, SFS, regeneracija livarskega peska, sekundarni agregati, predelava odpadkov, krožno gospodarstvo

Abstract

One of the most pressing environmental concerns that metal casting industry faces nowadays is the disposal of Spent Foundry Sand (SFS). Landfill of foundry sand remains a severe environmental problem in Europe, not because of hazardousness of waste, but due to its significant quantity.

The approach taken in LIFE ECO-SANDFILL project involves turning waste from the casting industry into useful feedstock for foundry and other industrial sectors, leading to reducing landfill of waste and decreasing the environmental impacts associated with disposal and extraction of non-renewable mineral resources. To this end, a prototype of a novel mechanical SFS reclamation system has been constructed and integrated in the moulding sand circuit of a steel foundry located in the Basque Country (ES). The SFS generated in the foundry is treated in the prototype to remove impurities from binders and the casting process and to make the reclaimed sand reach the required quality for the different applications envisaged in the project. The environmental, technical and economic performance of the solution is planned to be validated in three full-scale case studies to be executed in the construction works for the Madrid- Irun High-Speed Railway Network, in the vicinity of the foundry, and through a pilot casting trial of steel parts in the foundry itself, using reclaimed sand in the manufacture of the moulds.

This paper describes the preparatory activities carried out before executing the casting and construction demos, focused on dosage studies and characterisation tests of a series of sand samples and specimens manufactured using SFS (untreated and reclaimed) in their formulations. From the chemical analysis results, it has been concluded that the reclaimed sand obtained in the prototype coupled to the sand circuit of the foundry fulfils environmental conditions for construction applications and could be safely used in mortar, CLSM and embankment demos, provided that applicable technical requirements are met. In the case of foundry applications, it has been found, that reclaimed sand does not meet the stringent specifications for coremaking, but it might be a partial replacement for the thermally recovered sand used as facing sand in moulds (PEP-SET system).

Key words: Spent Foundry Sand, SFS, Moulding Sand Reclamation, Secondary Aggregates, Waste Recovery, Circular Economy,

1 Uvod

Proizvodnja odpadnega livarskega peska (SFS – Spent Foundry Sand) je neizogibna posledica postopkov litja kovin. Večina livarn po vsem svetu uporablja peščene forme in jedra, ki pa jih po litju zavržejo. Pri tem načinu dela prihaja do velikih količin odpadnega peska, kar predstavlja približno 60-85 % vseh trdnih odpadkov, ki nastanejo pri livarstvu. Na podlagi podatkov Evropskega združenja livarn (CAEF) je

1 Introduction

The Spent Foundry Sand (SFS) generation is intrinsic to metal casting processes. Most of the ferrous foundries use sand moulds and cores for casting, which are discarded after pouring. That practice generates large amounts of waste sand, representing approximately 60-85% of total solid waste from the foundry. According to statistics from CAEF, the European Foundry Association, about 1900 ferrous

bilo leta 2016 v Evropi aktivnih približno 1.900 železolivarskih enot [1]. Na evropski ravni ni natančnih podatkov o letni količini odpadnega železolivarskega peska, vendar pa znaša 4,5–9 metričnih ton/letno [2]. Samo 25–30 % tega odpadnega peska se regenerira v omejenem številu aplikacij, npr. v industriji cementa, na kmetijskih zemljiščih in za zasipavanje odlagališč odpadkov, preostali pesek pa se še vedno znajde na odlagališčih. Dane razmere nakazujejo možnost iskanja novih priložnosti valorizacije za preusmeritev nenevarnega odpadnega peska iz odlagališč in deponij.

Uporaba odpadnega livarskega peska kot fini agregat v po surovinah požrešnem sektorju, npr. v gradbeništvu, zagotavlja obetavne možnosti valorizacije. Pesek mora izpolnjevati ustrezne tehnične zahteve za posamezne aplikacije kot tudi niz okoljskih zahtev za njegovo uporabo v nevezani obliki, kjer je pesek v neposrednem stiku s prstjo. S strani EU financiran projekt LIFE ECO-SANDFILL je usmerjen v raziskavo uporabe odpadnega livarskega peska kot fini agregat v gradbeništvu, še posebej za geotehnične aplikacije (nasipi) in tekoče malte ter materiale z nadzorovano nizko trdnostjo (CLSM – Controlled Low Strength Material). Prav tako se ocenjuje potencial visoko kakovostne ponovne uporabe v livarstvu.

2 Materiali in metode

2.1 Tok SFS za valorizacijo

Livarna jekla FUNDICIONES DEL ESTANDA, S.A. v svoji oblikovalnici uporablja dve vrsti peska: pesek za sveže forme (pri čemer se bentonit uporablja kot vezivo) in kemično vezani pesek na osnovi fenola ter izocianata. Po končanem litju in odstranitvi kovinskih delov iz form se pesek,

foundry units were active in 2016 in Europe [1]. There are no accurate records on a European level of annual amounts of ferrous foundry sand waste, but it can be estimated in the range 4.5–9 Mt/yr [2]. Only 25–30% of that waste sand is recovered in a few applications, namely in cement industry, agricultural soils and landfill covering, and the remaining percentage is still landfilled. That situation offers an opportunity to seek new valorisation alternatives to divert non-hazardous sand waste from landfill and deposit.

The use of SFS as secondary fine aggregates in a material intensive sector such as construction offers promising valorisation options. The sand must meet technical specifications relevant for each application and, additionally, fulfil several environmental conditions for unbound uses, where the sand is directly in contact with the soil. The EU-funded LIFE ECO-SANDFILL project is investigating the use of SFS as a fine aggregate in construction applications, specifically for geotechnical applications (embankments) and for flowable mortars and Controlled Low Strength Material (CLSM). The potential for high-quality reuse in foundry is being evaluated also.

2 Materials and Methods

2.1 SFS flows for valorisation

Steel foundry FUNDICIONES DEL ESTANDA, S.A. employs two types of sand in their moulding shop: green sand (using bentonite as binder) and chemically bonded sand of the "Phenolic-Isocyanate" type. After casting and metal parts demoulding, the sand from used moulds and cores enter sand treatment and regeneration circuits in the foundry. The primary recovery circuit of the green sand at ESTANDA consists

ki se uporablja v formah in jedrih, obdela in vstopi v krogotok regeneracije v livarni. Primarni krogotok regeneracije peska za sveže forme v livarni ESTANDA zajema vibracijska sita, magnetni separator, poligonalno sito in hladilnik peska. Pri uporabi kemično vezanega peska poteka regeneracija na dveh ravneh:

- primarna regeneracija, ki zajema mehanske obdelave za razdrobitev in ločitev peska od form in jeder, da pesek znova prevzame svojo izvirno velikost jeder, ločevanje tujkov (kovin, peščenih kep, plastičnih elementov itd.) in finih delcev, ter korak, v katerem poteka separacija kromita. Regenerirani kremenčev pesek še vedno vsebuje odpadno vezivo, ki delno veže peščena zrna;
- sekundarna regeneracija: približno 15 % primarno regeneriranega peska se dodatno obdela s termalno regeneracijo. Preostala plast veziva se zažge in kakovost pridobljenega kremenčevega peska ustreza zahtevani kakovosti za uporabo v formah.

V prvih stopnjah projekta LIFE ECO-SANDFILL smo preučevali dve značilnosti pretoka odpadnega peska v livarni: **presežni pesek za sveže forme (GREEN SFS)** ter **kemično vezani in preprihani pesek iz krogotoka (SHEM SFS)**, ki se redno odvaja iz povezanih krogotokov za osvežitev krožečih pretokov peska, se odvedeta na odlagališče odpadkov. Vzorci teh dveh tokov SFS so bili podvrženi poskusom regeneracije v predstavitvenem objektu družbe ONDARLAN, S.L., za: (i) določitev obsega odstranitve nečistoč pri uporabi nove tehnike regeneracije; in (ii) izbiro optimalnih ravni delovnih spremenljivk za zagon prototipa regeneracije v industrijskih pogojih za proizvodnjo peska želene kakovosti za predvidene preskuse pri uporabi v livarstvu in gradbeništvu.

of vibrating sieves, magnetic separator, polygonal sieve and sand cooler. In the case of used chemically-bonded sand two levels of recovery are applied:

- Primary regeneration, consisting of mechanical treatments to break down and particulate sand from moulds and cores back to its original grain size, separating foreign materials (metal, sand lumps, plastic elements...) and fines, and of a chromite separation step. The silica sand recovered still retains spent binder, which coats partially the sand grains.
- Secondary regeneration: approximately 15% of the primarily regenerated sand is further processed by thermal reclamation. The remains of binder layer are burnt and the silica sand obtained is of the quality required to be used as facing sand in moulds.

In the first stages of the LIFE ECO-SANDFILL project, the characteristics of two waste sand flows of the foundry have been studied: **surplus green sand (GREEN SFS)** and **chemical circuit purged sand (CHEM SFS)**, which are periodically extracted from their respective circuits, to freshen the recirculating sand flows, and are landfilled. Samples of those two SFS streams have been subjected to reclamation adjustment trials on a demonstration plant at ONDARLAN, S.L., in order to: (i) quantify the degree of impurity removal obtained by the novel reclaiming technique; and (ii) select the optimal levels of operation variables to run the reclamation prototype on industrial conditions to produce sand of the required quality for the envisaged demos in foundry and construction applications.

2.2 Opis tehnike regeneracije SFS

Nova tehnika regeneracije, ki so jo uvedli in jo preskušajo v livarni ESTANDA, zajema regeneracijo z izpiralnikom s centrifugalno silo, v katerem se peščena zrna v zaprtem sistemu drgnejo med seboj in tudi ob stene, pri čemer se s površine kremenčevega peska učinkovito odstranijo nečistoče. Ena od prednosti te tehnologije je vsestranskost, saj jo je mogoče prilagoditi lastnostim peska (sestava in vezivo) in zahtevanim specifikacijam glede na njegovo končno uporabo. Glavne komponente tovrstnega regeneratorja peska so:

1. DROBILNA KOMORA: ohišje valjaste oblike, kamor se SFS dovaja in mehansko drobi. Delovne spremenljivke, ki nadzorujejo proces drobljenja:
 - količina SFS, ki vstopa v komoro (obseg serije, kg);
 - čas zadrževanja ali čas obdelave znotraj komore (s);
 - hitrost vrtenja v drobilni komori (vrt./min);
2. ZVRTINČENA PLAST: pod drobilno komoro. Ko se cikel obdelave SFS (cikel mehanskega drobljenja) zaključi, obdelani pesek preide na zvrtničeno plast, v drobilno komoro pa bo poslana nova pošiljka SFS za zagon novega cikla obdelave. Zrak od zunaj prihaja do zvrtničene plasti prek ventilatorja, ki ločuje težje delce regeneriranega peska od finejših delcev (prah), medtem ko regenerirani presek potuje naprej proti izhodu zvrtničene plasti. Pretok zraka in moč ventilatorja sta konstantno enaka skozi celoten proces vrtničenja. Regenerirani pesek se zbere na izhodu zvrtničene plasti. Delovni parametri, ki jih je mogoče prilagoditi pri vsaki seriji, sta pretok zraka (m^3/h) in moč ventilatorja (kW);

2.2 Description of SFS Reclamation Technique

The new reclamation technique integrated and tested in ESTANDA foundry consists in scrubber style reclamation with centrifugal force, in which the sand is rubbed together and against the walls in a closed system, removing effectively impurities from the surface of the silica sand. One of the advantages of this technology is the versatility, as it can be re-adjusted according to the characteristics of the sand (composition and binder) and the specifications requested for its final application. The main components of a sand reclaiming of that type are:

1. ATTRITION CHAMBER: cylindrical shape body, where SFS is fed and mechanically attrited. Operational variables that control the attrition process:
 - amount of SFS entering the chamber (batch size, kg).
 - residence time or treatment time inside the chamber (sec).
 - rotation speed of the attrition chamber (rpm)
2. FLUIDISED BED: located below the attrition chamber. When the SFS treatment cycle (mechanical attrition cycle) is over, the treated sand is discharged to the fluidised bed, and a new load of SFS is let into the attrition chamber to initiate a new treatment cycle. An air stream from the outside is conducted to the fluidised bed by means of a fan, which separates the heavier particles of recovered sand from the finer (dust), while the recovered sand is advancing towards the fluidised bed outlet. The air flow and fan power are kept constant throughout the fluidisation process. Reclaimed sand is collected at the outlet of the fluidised bed. The

3. OKVIR ZA CIKLONIRANJE: pri spuščanju finih delcev med fazo vrtničenja se prva separacija finih delcev odvija v ciklonu, pri čemer ločuje fine delce (prah) od težjih zrn prejetega peska, ki potuje proti izhodu zvrtničene plasti;

4. FILTRIRANJE ZA ODSTRANITEV PRAHU: oprema za filtriranje prašnih delcev, ki je prisotna na koncu procesa regeneracije peska, je v osnovi sestavljena iz vodoravnih filtrirnih cevi, ki se občasno čistijo s stisnjenim zrakom, ki ga sprožijo magnetni ventili, poganja pa jo ventilator, ki proizvaja konstantno sesanje pod vakuumom. Ta filter zadrži prah, ki nastane pri procesu, prav pa se izloči prek vretena in alveolarnega ventila, nato pa se izloči v vsebnik. Na tej stopnji je mogoče prilagajati dve delovni spremenljivki:

- pretok zraka (m^3/h) in moč ventilatorja (kW);
- padec tlaka ($\text{mm H}_2\text{O}$).

V projektu so bile lastnosti prototipa in komponente prilagojene obstoječim inštalacijam v livarni ESTANDA, značilnostim pri dovodu peska (CHEM SFS) in zahtevanim specifikacijam za regenerirani pesek, upoštevane pa so bile tudi smernice za okoljsko primerno zasnovo. Prototip za regeneracijo, ki ga je po meri izdelala družba ONDARLAN (nazivna zmogljivost postaje = 5 t/h), je bil združen z obstoječim krogotokom za regeneracijo kemičnega peska na točki, kjer se sistem za primarno regeneracijo zaključí, zato je na zahtevo mogoče primarno regenerirani pesek preusmeriti v opremo za regeneracijo LIFE ECO-SANDFILL, obdelani pesek s prototipom pa je mogoče

- preusmeriti bodisi v silose s podpornim peskom ali silose z modelnim peskom v oblikovalnici livarne ob upoštevanju

operational parameters that can be adjusted in each run are air flow (m^3/h) and fan power (kW).

3. CYCLONING BODY: in the ascending of the fines during fluidisation phase, a first separation of fines occurs into the cyclone, separating fines (dust) from the heaviest grains of the recovered sand going to the outlet of the fluidised bed.

4. DUST EXHAUSTING FILTRATION: a fines filtration equipment is placed at the end of the sand reclaiming process, consisting basically of horizontal filter sleeves, that are periodically cleaned by means of compressed air actuated by solenoid valves, and driven by a fan which produces a constant vacuum suction. This filter retains the dust of the process, which is extracted by means of a screw and alveolar valve and is discharged on a container. Two operational variables can be adjusted at this stage:

- Air flow (m^3/h) and dust extractor fan power (kW)
- Pressure drop ($\text{mm H}_2\text{O}$)

In the project, the prototype features and components have been adapted to the existing installations at ESTANDA, to the input sand (CHEM SFS) properties and to specifications requested to the reclaimed sand and have followed ecodesign guidelines. The custom-built reclamation prototype constructed by ONDARLAN (nominal treatment capacity = 5 t/h) has been coupled to the existing recovery circuit of the chemical sand, in a point after the primary regeneration system, so that the primarily regenerated sand can be diverted into the LIFE ECO-SANDFILL reclamation equipment on demand and the prototype's sand output can be either

- conveyed to the backing sand or facing

- kakovosti peska, zbrati v zbiralnikih za uporabo zunaj krogotokov peska livarne (gradbeni agregati).

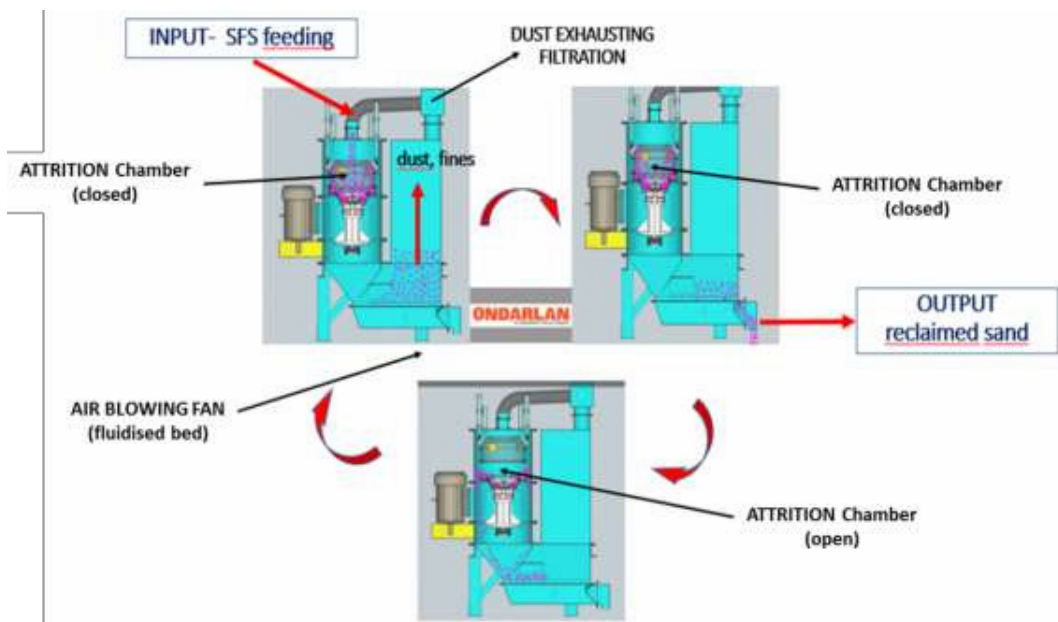
- sand silos of the foundry's moulding shop, depending on sand quality; collected in container for uses out of the sand circuit of the foundry (construction aggregates).

2.3 Prikaz valorizacije SFS v gradbeništvu

Demonstratorji v realnem gradbenem okolju so načrtovali validacijo kakovosti livarskega peska iz livarne ESTANDA (regeneriranega ali ne) za uporabo kot fine agregate v več gradbenih aplikacijah kot zamenjavo za naravni pesek; za določitev najustrežnejših pogojev za uporabo in razmerja zamenjave pri formulaciji izdelkov za optimizacijo učinkovitosti izdelka s tehničnega, gospodarskega in okoljskega vidika. Trije preskusi so zasnovani tako, da bodo izpolnjevalki zahtevane specifikacije

2.3 Demonstration of SFS valorisation in construction

Demonstrators in real construction environment have been planned to validate the quality of waste foundry sand from ESTANDA (further reclaimed or not) to be used as fine aggregates in several construction applications, as a replacement of natural sand; and to define the best use conditions and substitution ratio in the formulation of the products, in order to optimise the product performance from the technical, economic and environmental



SI. 1. Delovni cikel tehnologije za regeneracijo SFS, uporabljen v projektu LIFE ECO-SANDFILL

Fig. 1. Operation cycle of SFS reclaiming technology applied in LIFE ECO-SANDFILL

za infrastrukturna dela na delovišču, kjer poteka izgradnja železniškega omrežja s progo za hitri vlak na relaciji Madrid-Irún, ki je približno 20 km oddaljena od livarskih objektov:

1. **materiali z nadzorovano nizko trdnostjo (CLSM)** za postopke zasipavanj. CLSM je tekoča in samozgoščevalna malta nizke trdnosti, ki navadno vsebuje mešanico 1.700/100/200–350 kg/m³ peska/cementa/vode; predvidena je za zasipavanje vrzeli ali jarkov pri popravilih v urbanih okoljih ali podhodih za tire v železniškem omrežju. Pri teh aplikacijah mora izdelani material z nadzorovano nizko trdnostjo zagotavljati enoosno tlačno trdnost (USC) v višini 1 MPa;
2. **tekoča zalivna malta** za nekonstrukcijske aplikacije, kot so betonski oboki v predorih, zapolnjevanje vodnjakov za črpanje in prelivnih bazenov ali malta za zasipavanje pri temeljnih ploščah na nasipih. Zahtevana enoosna tlačna trdnost (USC) pri tovrstnih aplikacijah je 15 MPa;
3. **nasipi.** Uporaba SFS kot zrnat polnilni material pri izgradnji nasipov brez oblog za zamejitev, ki izkazuje tehnično učinkovitost (lastnosti stiskanja, zmogljivost obremenitve, stabilnost itd.) ter odsotnost nevarnosti za okolje (težave z luženjem). Inženirske zahteve za zrnati polnilni material, ki se lahko uporablja pri izgradnji nasipov, so določene v španskih predpisih o izgradnji cest in mostov Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) – 3. del, 330. člen).

Za izvedbo preizkusov na dejanskih deloviščih je treba pridobiti dovoljenje za pilotno preizkušanje s strani Oddelka

point of view. Three demos are designed that will meet specifications requested for infrastructure works on the worksite of a section under construction of the High-Speed Train Madrid-Irún railway network, located approximately 20 km away from the foundry installations:

1. **Controlled Low Strength Materials (CLSM)** for backfilling applications. CLSM is a flowable, self-compacting, low strength mortar, typically consisting of a mixture of 1700/100/200-350 kg/m³ of sand/cement/water, respectively; designed to backfill voids or trenches in urban repair works or underpasses for tracks in the railway network. For such applications, manufactured CLSM is requested to guarantee Uniaxial Compressive Strength (UCS) of 1 MPa.
2. **Flowable filling mortar** for non-structural applications, such as tunnel concrete coverings, filling in pumping well and decanting pool, or backfilling mortar in foundation slabs of embankments. The requested value of Uniaxial Compressive Strength for that applications is 15 MPa.
3. **Embankment.** Use of SFS as granular filling material for embankment construction with no liners to encapsulate them, demonstrating technical performance (compaction properties, loading capacity, stability...) and non-existence of environmental risks (leaching issues). The engineering requirements for granular filling material to be used for embankment constructions are laid down in Spanish regulations on Road and Bridge Works (Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) - Part 3, Art.330).

The execution of the demos on a real worksite requires an authorisation

za okolje, prostor in gradnjo stanovanj baskovske vlade (Španija). Prošnja za dovoljenje mora obsegati podroben opis preskusov in rezultate standardnih testov za določitev lastnosti odpadkov, ki bodo predmet valorizacije, ki so jih izvedli akreditirani laboratoriji, pod pogojem, da je uporaba skladna z veljavnimi okoljskimi in tehničnimi pogoji. Če valorizacija SFS v gradbeništvu ni posebej obravnavana s katerim koli predpisom na evropski ali lokalni ravni, se pogoji, določeni v predpisih Baskije v zvezi z valorizacijo recikliranih agregatov iz gradbenih odpadkov in odpadkov iz rušenja [3], uporabljajo kot referenca:

- reciklirani agregati, predvideni za nevezane aplikacije (nasipi), morajo izpolnjevati tehnične zahteve (330. člen, PG-3), pa tudi naslednje okoljske pogoje: skladnost z mejnimi vrednostmi za izcedne vode v zvezi pri odlaganju inertnih odpadkov [4] in mejnimi vrednostmi za koncentracijo onesnaževal, kot so navedene v predpisu, ki ureja onesnaževanje tal [5];
- sekundarni agregati v hidravlični vezanih aplikacijah: okoljski pogoji niso vzpostavljeni; livarski pesek mora biti skladen z veljavnimi tehničnimi zahtevami za agregate, navedenimi v specifičnih standardih ali predpisih:
 - tekoča zalivna malta: tehnične specifikacije UNE EN 13139 za agregate za malte;
 - CLSM: na voljo ni noben standard UNE ali EN; uporabljajo se specifične zahteve za gradbišča v zvezi s finimi agregati za predvideno aplikacijo.

Hkrati je družba ACCIONA izvajala poskuse za preučevanje optimalnih pogojev za uporabo odpadnega livarskega peska v vezanih in nevezanih aplikacijah za zagotovitev skladnosti s tehničnimi

for a pilot experience by the Department of the Environment, Territorial Planning and Housing of the Basque Government (ES). The application for the authorisation must include a detailed description of the demos and the results of standardised characterisation tests of the waste to be valorised, performed by accredited laboratories, proving that it complies with environmental and technical conditions applicable. Given that the SFS valorisation in construction sector is not specifically addressed in any regulation at European or local level, the conditions set out in existing regulations in the Basque Country on valorisation of recycled aggregates from construction and demolition waste [3] have been used as a reference:

- recycled aggregates intended for unbound applications (embankment) must fulfil relevant technical requirements (Art.330, PG-3) as well as the following environmental conditions: meet leachate limit values for inert waste landfilling [4] and contaminant concentration limit values stated in soil pollution regulation [5];
- secondary aggregates in hydraulically bound applications: no environmental conditions given; foundry sand must meet applicable technical requirements for aggregates in specific standards or regulations:
 - Flowable filling mortar: UNE EN 13139 technical specifications for mortar aggregates
 - CLSM: no UNE or EN standard available; specific construction site requirements applied to fine aggregates for the intended application.

In parallel, ACCIONA has conducted experimental tests to investigate the optimal conditions for the use of waste foundry sand in bound and unbound applications, to

zahtevami ob hkratni zagotovitvi največje količine valoriziranega SFS. Preučevali so učinkovitost (uporabnost, trajnost, mehanska odpornost) različnih količin cementa, vode, naravnega peska in SFS (neobdelanega in regeneriranega s prototipom), pa tudi stisljivost in nosilnost SFS v vzdržljivih tleh v jedrih in temeljih nasipov.

2.4 Preizkušanje ponovne uporabe v livarskih aplikacijah

Družba ESTANDA uporablja sistem brez toplotne obdelave (NO BAKE), ki se imenuje PEP SET, pri katerem se veziva dodajajo na osnovi večkratne reakcije med fenolno smolo in izocianatno komponento. Sistem PEP SET zajema trikomponentni sistem, ki vsebuje vezivo (del 1), trdilo (del 2) in tekoči katalizator (dobavitelj: ASK Chemicals). Livarna izvaja dva proizvodna programa form za proizvodnjo različnih vrst ulitkov (zavorni koluti in komponente za cementno industrijo). V osnovi se razlikujeta glede na sestavo mešanice peska v pretoku peska v mešanico ter v razmerju mas peska in kemičnih veziv za tvorbo dela »modelnega peska« v formi. V mešanicah se uporabljajo trije tipi peska iz krogotoka v različnih razmerjih (Slika 2): termalno regeneriran pesek (»pesek TR«), primarno regeneriran pesek (»pesek MR«) ter pesek z majhnim odstotkom svežega peska (»novi pesek«), ki se doda za »osvežitev« mešanice v krogotoku in preprečevanje upadanja kakovosti v naslednjih ciklih regeneracije.

Preizkus litja je predviden za validacijo uporabe regeneriranega peska v prototipu LIFE ECO-SANDFILL v peščenih mešanicah za proizvodnjo ulitkov. Pred tem se izvede raziskava v laboratoriju z izbori najobetavnejše mešanice in določitev najprimernejših pogojev proizvodnje ulitkov.

guarantee meeting technical requirements while maximising the amount of SFS valorised. The performance (workability, durability, mechanical resistance...) of different dosages of cement, water, natural sand and SFS (untreated and reclaimed in the prototype) has been studied; as well as compactibility and bearing capacity of SFS as tolerable soil in the core and foundation of embankments.

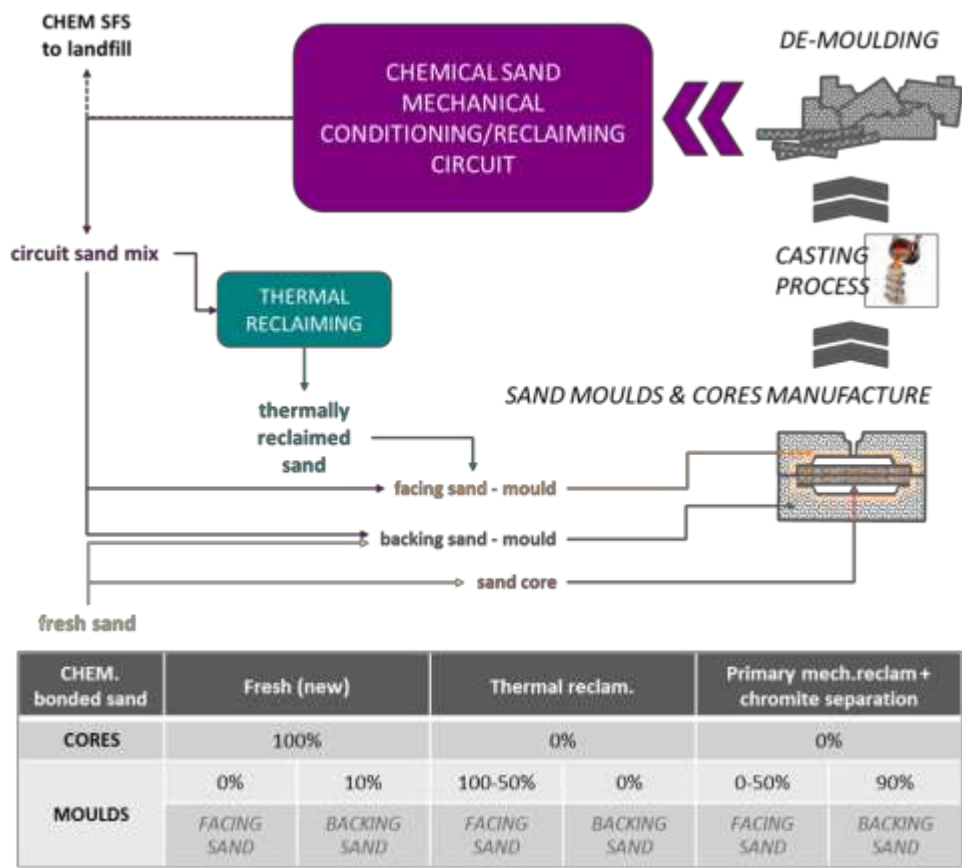
2.4 Demonstration of Reuse in Foundry Applications

ESTANDA applies a NO BAKE system, the so-called PEP SET system, with binders based on a poly addition reaction between a phenolic resin and an isocyanate component. PEP SET involves a three-component system consisting of a binder (part 1), a hardener (part 2) and a liquid catalyst (supplier: ASK Chemicals). The foundry follows two mould manufacturing programmes for producing different series of castings (brake discs and cement industry components). Differences are basically in the composition of the sand mix in the sand flow to the mixer and in the mass ratios of sand and chemical binders to form the "facing sand" part of the mould. Three types of sand from the circuit are used in different proportions in the mixtures (Figure 2): thermally reclaimed sand ('TR sand'), primarily regenerated sand ('MR sand') and a small percentage of fresh sand ('new') —added in order to 'freshen' the circuit mix and prevent it from degrading over successive recovery cycles.

A casting trial is planned to validate eventually the use of sand reclaimed in the LIFE ECO-SANDFILL prototype in the sand mixtures to manufacture moulds. Previously, lab scale research is being conducted to select the most promising mixture and the

Predlaganih je bilo osem različnih formulacij, pri katerih nastopajo različne mešanice treh različnih vrst peska. Odmerek veziv in katalizatorja se spreminja po potrebi, da se zagotovi skladnost z zahtevami družbe ESTANDA v zvezi s časom odstranjevanja in trajanjem formanja ulitka v programih za proizvodnjo ulitkov. Formulacije so bile uporabljene za pripravo standardnih vzorcev za mehanske teste za preizkušanje učinkov dodatka regeneriranega peska SHEM SFS na mehanske lastnosti (upogibna trdnost,

best mould manufacturing conditions. Eight formulations have been proposed in which different portions of the three grades of sand are mixed together. Dosage of binders and catalyst is modified as needed to meet ESTANDA's requirements of strip time and bench life in their mould manufacturing programmes. The formulations have been used to prepare standard specimens for mechanical tests to investigate the effects of reclaimed CHEM SFS additions on mechanical properties (flexural strength,



SI. 2. Mešanica različnih peskov, ki se uporablja pri ulitkih in jedrih, v livni liniji s kemično vezanim peskom v družbi ESTANDA (predhodno prototip LIFE ECO-SANDFILL)

Fig. 2. Mixture of sand grades used in moulds and cores in the chemically bonded sand casting line at ESTANDA (before LIFE ECO-SANDFILL prototype)

Preglednica 1. Formulacije mešanic peskov pri vzorcih za preskušanje mehanskih lastnosti ulitkov

Table 1. Sand mix formulations of specimens for testing mechanical properties of moulds

Št. ID formulacije / Formulation ID	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08
Pesek / Sand TR	100 %	0 %	0 %	50 %	0 %	50 %	75 %	25 %
Pesek / Sand MR	0 %	100 %	0 %	50 %	50 %	0 %	0 %	25 %
ECO-SANDFILL	0 %	0 %	100 %	0 %	50 %	50 %	25 %	50 %

odpornost proti praskam) smole brez
pečenja, vezane s formarskim peskom.

scratch hardness) of no-bake resin bonded
moulding sand.

3 Rezultati

3.1 Izbira optimalnih pogojev za regeneracijo SFS

Tehnike zasnovane poskuse so bile uporabljene za izbiro 20 kombinacij spremenljivk procesa regeneracije na različnih ravneh za izvedbo serije poizkusov v predstavitvenem objektu v družbi ONDARLAN z namenom prilagajanja procesa lastnostim SFS (GREEN in CHEM), ki ga je ustvarila družba ESTANDA, ter za doseganje zahtevane končne kakovosti za aplikacije v livarstvu in gradbeništvu.

Izhodne vzorce, zajeti pri vsakem preskusu regeneracije, je analiziral oddelek za raziskave metalurških procesov IK4-AZTERLAN, in sicer v zvezi z vrsto parametrov, določenih kot merila za izključitev: žarilno izgubo (LOI), velikost delcev (številka drobnosti AFA in odstotek finih delcev), odstotek topnega klorida in sulfata, vsebnost bentonita (metilensko modrilo) in vlage. Pri vsaki seriji regeneracije so izmerili odstotek izvzetih delcev (zbrani izpušni prašni delci) glede na maso dovajanega SFS. Analiza SEM-EDS vzorcev peska je zagotovila orodje za vizualno oceno obsega čiščenja površine

3 Results

3.1 Selection of optimal SFS reclamation conditions

Design of Experiments techniques were used to choose 20 combinations of reclamation process variables at different levels to run a series of experiments on a demonstration plant at ONDARLAN, aimed at adjusting the process to the characteristics of the SFS (GREEN and CHEM) generated by ESTANDA and achieving the final quality required for the foundry and construction applications.

Output samples taken from every reclamation trial were analysed by IK4-AZTERLAN for a set of parameters established as cut-off criteria: Lost on Ignition (LOI), particle size (AFA fineness number and % fines), % soluble chloride and sulphate, bentonite content (Methylene Blue) and moisture. For each reclamation run, the percentage of rejects (exhaust dust collected) by mass of SFS fed was measured. SEM-EDS analysis of samples of sand provided a tool to evaluate by visual inspection the extent of the surface cleaning of the sand grains, to spot foreign particles

zrn peska za zaznavanje tujkov in določitev delno kvantitativne kemične sestave. Rezultati so pokazali:

- CHEM SFS: vsi regenerirani izhodni vzorci so skladni s specifikacijami za izključitev za predvidene aplikacije v gradbeništvu in proizvodnjo ulitkov v livarstvu. LOI in zahteve v zvezi s finimi delci za izdelovanje jeder niso bile dosežene. Izkoristek regeneracije > 95 %;
- GREEN SFS: vsi regenerirani izhodni vzorci so skladni s specifikacijami za LIO in AFA, vendar pa niso izpolnili specifikacij za % finih delcev za proizvodnjo jeder in ulitkov v livarstvu. Merila za izključitev za gradbeništvo so bila izpolnjena. Izkoristek regeneracije je bil 80–90 %,
- padec vrednosti LOI v višini med 60 in 30 % je dosegel pesek CHEM SFS, pesek GREEN SFS pa je dosegel padec 65–80 %, pri čemer so bile vse končne vrednosti LOI regeneriranega peska SFS < 1 %,
- zmerno povečanje finosti zrn peska CHEM SFS po poskusih regeneracije (število AFA se je povečalo za 0,5–2 enoti), pomemben porast pa je bilo mogoče zaznati pri regeneriranem pesku GREEN (število AGA se je povečalo za 10–20 enot, vsebnost finih delcev pa za 400–1.500 %).

Ob upoštevanju danih rezultatov se obseg delovnih spremenljivk procesa regeneracije, ki omogočajo optimizacijo dosežene stopnje očiščenosti peska SFS, ob združevanju največje možne storilnosti in kakovosti regeneracije regeneriranega peska določi kot:

- tip SFS: primarno regeneriran kemično vezan in občasno prepihan pesek iz krogotoka kemičnega peska družbe ESTANDA (CHEM SFS),
- nosilna zmogljivost drobilne komore:

and to determine semi-quantitatively chemical composition. The results indicated:

- CHEM SFS: all reclaimed output samples met cut-off specifications for the envisaged construction applications and mould manufacturing in foundry. LOI and fines requirements for coremaking were not achieved. Reclamation yield > 95%.
- GREEN SFS: all reclaimed output samples met LOI & AFA, but did not meet % fines specifications for coremaking and mould manufacturing in foundry. Cut-off criteria for construction were met. Reclamation yield 80-90%
- Drop in LOI values between 60% and 30% achieved in CHEM SFS and 65%-80% in GREEN SFS, with all final LOI values of reclaimed SFS <1%.
- Moderate increment in fineness of CHEM SFS after reclamation trials (AFA number grown by 0.5-2 units), but considerable in reclaimed GREEN sand (AFA number risen by 10-20 units and fines content by 400%-1500%)

Considering the observed results, the range of operation variables of the reclaiming process that allow to optimise the degree of cleaning achieved on the SFS, combining highest productivity and recoverability quality of reclaimed sand are established as:

- SFS type: chemically bonded sand primarily regenerated, periodically purged from ESTANDA's chemical sand circuit (CHEM SFS)
- Attrition chamber loading capacity: 60-70% (Batch size: 60-70 kg)
- Rotation speed of the attrition chamber (motor): 2000-2500 rpm
- Cycle time (residence time in attrition chamber): 60-90 s
- Number of reclaiming cycles: 1
- Stable air flow conditions (fluidised bed): fan power = 3.7 kW



Sl. 3. Regeneracijski prototip LIFE ECO-SANDFILL, nameščen v družbi ESTANDA (levo), in primerjava posnetkov SEM (100-kratna povečava) kemično vezanega peska SFS (desno zgoraj) ter posnetek po obdelavi v sistemu (desno spodaj)

Fig. 3. LIFE ECO-SANDFILL reclamation prototype installed at ESTANDA (left) and compared SEM images (100x magn.) of chemically bonded SFS before (right, top) and after treatment in the system (right, bottom)

- 60–70 % (obseg serije: 60–70 kg),
- hitrost vrtenja drobilne komore (motor): 2.000–2.500 vrt./min,
- čas cikla (čas prisotnosti v drobilni komori): 60–90 s,
- število ciklov regeneracije: 1,
- pogoji za stabilen pretok zraka (zvrtničena plast): moč ventilatorja = 3,7 kW,
- Stable Pressure drop (fluidised bed) = 160 – 180 mm H₂O
- Stable air flow conditions (dust exhausting equipment) = 5400 m³/h.

Through the application of multicriteria analysis, GAIKER-IK4 ecodesigned the optimal operating conditions of the reclamation process of CHEM SFS, by

- padec v stabilnem tlaku (zvrtničena plast) = 160–180 mm H₂O,
- pogoji stabilnega pretoka zraka (oprema za izpuh delcev) = 5.400 m³/h.

Prek uporabe analize z več merili je oddelek za okolje in recikliranje GAIKER-IK4 okoljsko primerno zasnoval delovne pogoje procesa regeneracije peska CHEM SFS z uskladitvijo najboljši lastnosti v pridobljenem pesku in najmanjši možni vpliv procesa regeneracije (glede na potencial globalnega segrevanja, abiotsko izčrpavanje, potencial izčrpavanja ozonske plasti, zakisljevanje, evτροφikacijo ter potencial ustvarjanja fotokemičnega ozona). Na podlagi teh hipotez so bili določeni najprimernejši delovni pogoji z naslednjimi parametri: obseg serije: 60 kg, hitrost vrtenja motorja v drobilni komori znaša 2.235 vrt./min s časom prisotnosti 60 s.

Ta priporočila so bila upoštevana v načrtih družbe ONDARLAN za izgradnjo in delovanje regeneracijskega tipa po meri, ki bo priključen na instalacije družbe ESTANDA. Zaradi delovnih omejitev, ki izhajajo iz povezave s krogotokom livarskega peska, je bilo končno obratovanje prototipa za regeneracijo pod industrijskimi pogoji prilagojeno na obseg serije 42,3 kg (čas nalaganja = 15 s), pri čemer se je zmogljivost obdelave peska CHEM SFS na prototipu med preskušanjem projekta zmanjšala na 1,8 t/h.

3.2 Določitev lastnosti SFS kot agregatov za gradbene preskuse. Optimizacija odmerjanja

Oddelek za raziskave metalurških procesov IK4-AZTERLAN in družba ACCIONA sta analizirala štiri stopnje peska, vzete iz livarne, da sta preverila, ali je pesek skladen z okoljskimi in tehničnimi pogoji, določenimi

reconciliating best properties in the sand obtained and minimal environmental impact of the reclamation process (in terms of Global Warming Potential, Abiotic Depletion, Ozone Layer Depletion Potential, Acidification, Eutrophication and Photochemical Ozone Creation Potential). Under those hypotheses, the best operational conditions were set at: batch size = 60 kg, rotational speed of the motor of the attrition chamber equal to 2235 rpm and residence time = 60 s.

Those recommendations were taken into account in ONDARLAN's designs for constructing and operating the custom-built reclaimer prototype to be attached to ESTANDA installations. Due to operational constraints stemming from the connection to the foundry sand circuit, the final operation of the reclamation prototype on industrial conditions was adjusted to a batch size of 42.3 kg (loading time = 15 s), reducing the treatment capacity of CHEM SFS on the prototype during project demos down to 1.8 t/h.

3.2 Characterisation of SFS as Aggregates for Construction Demos. Optimisation of Dosage

Four grades of sand taken from the foundry were analysed by IK4-AZTERLAN and ACCIONA to check if they complied with the environmental and technical conditions set by Basque Public Authorities for executing the construction demos:

- Surplus green sand ('untreated' GREEN SFS) and chemically bonded sand ('untreated' CHEM SFS) extracted from ESTANDA's moulding sand circuits
- Reclaimed GREEN and CHEM SFS, treated in the reclamation equipment assembled by ONDARLAN

s strani baskovskih javnih organov za izvedbo gradbenih preskusov:

- presežni pesek za sveže forme (»neobdelani« GREEN SFS) in kemično vezani pesek (»neobdelani« CHEM SFS), odvzet iz krogotokov livarskega peska v družbi ESTANDA;
- regenerirani pesek GREEN in CHEM SFS, obdelan z opremo za regeneracijo, sestavljeno s strani družbe ONDARLAN.

Okoljski analitiki so navedli, da je bila koncentracija potencialnih onesnaževal/ nevarnih snovi v kemični sestavi vseh vzorcev peska vselej pod s predpisi določenimi mejnimi vrednostmi, vendar pa so bili okoljski pogoji v njihovih ocenah (preskusi z luženjem) izpolnjeni samo v primeru peska CHEM SFS, regeneriranega v prototipu. Zato se lahko pesek varno uporablja samo pri gradbenih poizkusih v aplikacijah v vezani obliki (malta, CLSM) in nevezani obliki (nasipi), pod pogojem, da so izpolnjene tudi ustrezne tehnične zadeve. V tem oziru:

- tehnične zahteve za tla pri nasipih (PG-3): preskusi, ki jih je izvedla družba ACCIONA, so določili, da je regenerirani pesek CHEM SFS skladen z mejnimi vrednostmi v zvezi z dopustnimi tlemi za uporabo v jedru in temeljih nasipov ($\text{CBR} \geq 3$). Spremenjeni podatki po Proctorju so pokazali suho gostoto/ optimalno vsebnost vlage v višini $1,78 \text{ t/m}^3 / 10,0 \%$. Vendar pa pesek SFS kaže občasno stopnjevanje in sferično obliko, ki negativno vpliva na stisljivost in stabilnost nasipa. Zato je bil podan predlog za mešanje peska z odvzemnim materialom v razmerju 80 : 20;
- lastnosti, določene v standardu UNE EN 13139 za agregate za malte (mejne in deklarirane vrednosti), je določil akreditiran laboratorij pri regeneriranem

The environmental analytics indicated that the concentration of potential contaminants/hazardous substances in chemical composition of all the sand samples were always below regulated limit values, but the environmental conditions in their eluates (leaching tests) were only fulfilled in the case of CHEM SFS reclaimed in the prototype. Therefore, that sand could be safely used in bound (mortar, CLSM) and unbound applications (embankment) in the construction demos, provided that the corresponding technical requirements were also met. In this regard technical requirements for soil in embankment (PG-3): tests carried out by ACCIONA determined that reclaimed CHEM SFS met the limit values for tolerable soil to be used in the core and foundation of embankments ($\text{CBR} \geq 3$). The modified proctor showed a dry density / optimum moisture content of $1.78 \text{ t/m}^3 / 10.0\%$. However, SFS shows discontinuous grading and spherical shape that compromises the compactibility and embankment stability. For this reason, it has been proposed to blend it with borrow material at an 80:20 ratio.

- the properties specified in UNE-EN 13139 for aggregates for mortars (threshold and declared values) were determined by an accredited laboratory on the reclaimed CHEM sand. Measured values on the sand were below threshold values, except for fines content and volume stability (as water soluble substances). The measured alkali-silica reactivity (declared value) indicated potential reactivity. Those results recommended designing the mortar demo in a temporary non-structural application on the worksite.

Apart from characterising the sand as fine aggregates, it is necessary to define the maximum substitution ratio achievable

Preglednica 2. Določitev lastnosti regeneriranega peska CHEM SFS skladno s 330. členom PG-3**Table 2.** Characterisation of reclaimed CHEM SFS according to PG-3 Art.330

Lastnost / Property	Mejna vrednost (dopustna tla) / Limit Value (tolerable soil)	Regenerirani pesek CHEM SFS / Reclaimed CHEM SFS
Organska snov / Organic Matter	< 2 %	0,66
Vsebnost mavca / Gypsum Content	< 5 %	0,31
Topne soli / Soluble Salts	< 1 %	0,06
Vrednost CBR (temelji in jedro) / CBR Value (Foundation & Core)	> 3	5,1
Tekoča meja (če je prožna) / Liquid Limit (if Plastic)	< 65	Ni prožna / Not plastic
Indeks prožnosti (če je prožen) / Plasticity Index (if Plastic)	če je LL > 40, PI > 0,73 *(LL-20)	Ni prožna / Not plastic
Sesutje / Collapse	< 1 %	0,09
Nabrekanje / Swelling	< 3 %	1,9

pesku CHEM. Izmerjene vrednosti za pesek so bile pod mejnimi vrednostmi, razen v primeru vsebnosti finih delcev in prostorninske stabilnosti (kot v vodi topne snovi). Izmerjena reaktivnost alkalov in kremena (deklarirana vrednost) je kazala potencialno reaktivnost. Ti rezultati so bili uporabljeni kot priporočilo pri oblikovanju preskusa malte v začasni nekonstrukcijski aplikaciji na delovišču.

Poleg določanja lastnosti peska kot agregata s finimi delci je treba določiti največje razmerje zamenjave, ki ga je mogoče doseči pri hidravlično vezanih aplikacijah (malta, CLSM). Za ta namen je družba ACCIONA izvedla študijo odmerjanja, v kateri je spreminjala količino cementa, vode, dodatkov za strjevanje, naravnega peska in peska SFS. V študiji so bile uporabljene surovine in dodatki, ki se uporabljajo pri dejanskih infrastrukturnih deloviščih, kjer se izvajajo preskusi:

in the hydraulically bound applications (mortar, CLSM). To this end, ACCIONA has performed a dosage study, varying the quantities of cement, water, setting additives, natural sand and SFS. Raw materials and admixtures used on the real infrastructure worksite to host the demos have been used in the study:

- UCS values over 2 MPa were measured at 28 days for mixtures of CLSM with 100% substitution of natural sand with reclaimed CHEM SFS. It guarantees fulfilment of the target UCS set by ACCIONA for the CLSM applications in the project (>1 MPa) and, consequently, 100% substitution ratio would be used for CLSM demo applications.
- Reclaimed CHEM SFS used as substitute fine aggregates in mortar mixtures with sand substitution ratios >50% caused high cement consumption, growing water demand and a 10% reduction of uniaxial compression strength after 28 days (versus UCS

Preglednica 3. Preverjeni odmerki v laboratoriju za malte in CLSM, predvideni za uporabo v preskusih

Table 3. Dosages tested in laboratory for mortars and CLSM to be used in demos

Komponente v / Components in 1 m ³ , kg	Malta / Mortar	CLSM
Cement 42,5 R (visoka vrednost UCS v zgodnjih fazah in dolgoročno) / Cement 42.5R (high UCS at early ages and long-term)	350	200
Voda / Water	300	257
Naravni pesek / Natural Sand	675	-
Regenerirani pesek CHEM SFS / Reclaimed CHEM SFS	680	1.337
Dodatek X-SEED (pospeševalnik strjevanja) / X-Seed Additive (hardening accelerator)	19	10
Gostota / Density (kg/m ³)	2,1	1,8
Enoosna tlačna odpornost pri 1 dnevu / Uniaxial Compression Resistance at 1 day (MPa)	3,09	0
Oсна tlačna odpornost pri 7 dneh / Axial Compression Resistance at 7 Days (MPa)	22	2,3
Oсна tlačna odpornost pri 28 dneh / Axial Compression Resistance at 28 Days (MPa)	20	2,4

- vrednosti enoosne tlačne trdnosti (USC), večje od 2 MPa, so bile izmerjene pri 28 dneh pri mešanicah CLSM s 100-% zamenjavo naravnega peska z regeneriranim peskom CHEM SFS. Zagotavlja izpolnitev ciljnih vrednosti UCS, ki jih je družba ACCIONA določila za aplikacije CLSM v projektu (> 1 MPa), in posledično bi bilo za aplikacije s preskusi CLSM uporabljeno razmerje s 100-% zamenjavo;
- regenerirani pesek CHEM SFS, ki se uporablja kot nadomestek finih agregatov pri mešanicah z malto z razmerjem zamenjave peska >50 %, je povzročil visoko porabo cementa, kar je po 28 dneh privedlo do večje porabe vode in 10 % manjše enoosne tlačne trdnosti (v primerjavi z UCS po 7 dneh). Zaradi zaznanih slabših mehanskih lastnosti je bila odsvetovana uporaba višjih razmerij zamenjave, če bi bilo treba zagotoviti

after 7 days). That observed loss in mechanical performance advised against the use of higher substitution ratios if the durability and resistance of the mortar application were to be secured. From an economic view point, reclaimed CHEM SFS dosages >50% required higher consumption of cement, water and additives and, so, mortar manufacturing costs rose.

In order to enlarge the knowledge about effects of SFS dosage in the evolution of mortar durability and mechanical resistance, ACCIONA has fabricated standardised lab specimens of several mortar mixtures, using ordinary cement 42.5N of medium strength and varying the % of substitution of natural sand with SFS (0%, 10%, 20%, 35%, 50%). Results of the UCS values after 7 and 28 days are available that show reduced UCS values versus the control experiment for all dosages. However, there are no losses

trajnost in obstojnost aplikacije z malto. Z gospodarskega vidika so odmerki > 50 % regeneriranega peska CHEM SFS zahtevali več cementa, vode in dodatkov, tako da so se stroški izdelave malte povečali.

Za boljše poznavanje učinkov odmerjanja peska SFS pri razvoju trajnosti in mehanske odpornosti malte je družba ACCIONA proizvedla standardizirane laboratorijske vzorce različnih mešanic malt z uporabo navadnega cementa 42,5 N srednje trdnosti in s spreminjanjem % zamenjave naravnega peska s peskom SFS (0 %, 10 %, 20 %, 35 %, 50 %). Rezultati vrednosti UCS po 7 in 28 dneh kažejo manjše vrednosti UCS v primerjavi s kontrolnimi preskušanji za vse odmerke. Vendar pa pri nobeni malti ni bil zabeležen upad mehanske odpornosti med 28 in 7 dnev. Spremljanje bo za dolgoročno spremljanje odpornosti malte razširjeno z meritvami UCS po 90, 180 in 365 dneh.

3.3 Ocena regeneriranega peska kot livarskega peska

Prva serija vzorcev veziv je bila pripravljena z uporabo fiksne vsebnosti katalizatorja (4 %) in treh ravni smol (0,85 %, 1,01 % in 1,15 %) v mešanicah, pri čemer je bilo hranjeno razmerje med dvema vezivnima komponentama 55 : 45. Tipi peska (TR, MR, ECO-SANDFILL) so bili mehansko zmešani v samodejnem mešalniku peska glede na njihove deleže v vsaki zasnovani formulaciji (Preglednica 1), nato pa so bili dodani katalizator in smolnata veziva ter pomešani s peskom v ustreznih razmerjih. Dodatno je bila za primerjavo preskušena mešanica z novim peskom z majhnim dodatkom primarno regeneriranega peska (»novo/MR«).

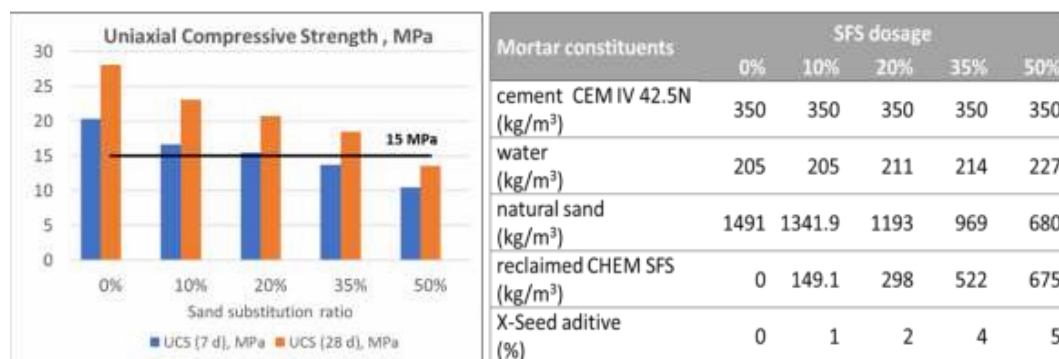
Transverzalna trdnost skozi čas, čas odstranjevanja in trajanje formiranja so bili

of mechanical resistance between 28 and 7 days observed in any of the mortars. Monitoring will be extended with UCS measurements after 90, 180 and 365 days to check mortar resistance in the long term.

3.3 Evaluation of Reclaimed SFS as Moulding Sand

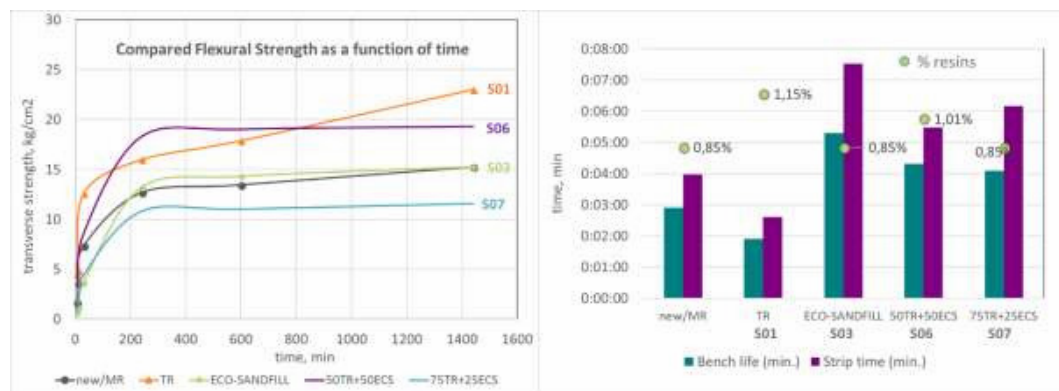
A first series of bending specimens has been prepared, using a fixed catalyst content (4%) and three levels of resins (0.85%, 1.01% and 1.15%) in the mixtures, keeping the ratio between the two binder components at 55:45. The types of sand (TR, MR, ECO-SANDFILL) were mechanically mixed in an automatic sand mixer according to their shares in each designed formulation (Table 1) and then the catalyst and resin binders were added and mixed with the sand in the adequate proportions. Additionally, a mixture of new sand containing low addition of primary regenerated sand ('new/MR') has been tested for comparison purposes.

Transverse strength over time, strip time and bench life have been measured on that first series of moulding sand mixtures specimen. The values of bending resistance after 24 hours of moulding sand specimens manufactured with 100% ECO-SANDFILL reclaimed sand (S03) and specimens of 100% new/MR sand, both with 0.85% resins, are the same. However, strip time and bench life of the S02 specimen are significantly higher. Bench life to strip ratio of that mixture is 0.70 (versus 0.73 ratio of 100% new/MR and 100%TR specimens). Taking as a reference the 100%TR formulation (S01), the increasing share of ECO-SANDFILL sand in moulding sand mixtures tends to cause increasing bench life and strip time values. However, reducing or raising the amount of hardener and catalyst can control curing speed and satisfy the



SI. 4. Študija spremljanja tlačne odpornosti malt s spreminjanjem odmerka SFS

Fig. 4. Monitoring study of compression resistance of mortars with varying SFS dosage



SI. 5. Rezultati upogibnih preskusov, trajanja formanja in časov odstranjevanja pri formulacijah z livarskim peskom

Fig. 5. Results of bending tests, bench life and strip time for moulding sand formulations

izmerjeni pri prvi seriji vzorcev mešanic z livarskim peskom. Vrednosti upogibne odpornosti po 24 urah pri vzorcih z livarskim peskom, izdelanih s 100-% regeneriranim peskom ECO-SANDFILL (S03), in vzorci 100-% novim peskom/peskom MR, oba z 0,85 % smol, so bile enake. Vendar pa sta bila čas odstranjevanja in trajanje formanja vzorca S02 bistveno daljša. Razmerje med trajanjem formanja in časom odstranjevanja pri tej mešanici je bilo 0,70 (v primerjavi z

foundry's requirement. The combined effect of increasing share of resins and higher dosage of reclaimed ECO-SANDFILL sand is proven by the evolution of bench life and strip time in TR + ECO-SANDFILL mixtures: strip time of S06 mixture is lower than S07 formulation, as resins content increases by 0.15%; (bench life to strip time ratio rises from 0.66 to 0.79).

razmerjem 0,73 pri vzorcih s 100-% novim peskom/peskom MR in 100-% vzorci TR). Ob upoštevanju formulacije s 100-% peskom TR (S01) večanje deleža peska ECO-SANDFILL v mešanicah z livarskim peskom povečuje vrednosti trajanja formanja in časa odstranjevanja. Vendar pa lahko zmanjševanje ali večanje količine trdilnega sredstva in katalizatorja nadzoruje hitrost strjevanja ter izpolni zahteve livarne. Kombinirani učinek vse večjega deleža smol in večji odmerek regeneriranega peska ECO-SANDFILL je dokazan z razvojem trajanja formanja in časa odstranjevanja pri mešanicah peska TR + ECO-SANDFILL: čas odstranjevanja mešanice S06 je krajši kot pri formulaciji S07, saj se vsebnost smole poveča za 0,15 % (razmerje med trajanjem formanja in časom odstranjevanja se poveča z 0,66 na 0,79).

4 Sklepi

Odpadni livarski pesek spada med nenevarne odpadke, kajti ni lužnat. Ker pa je odpadek, ga je treba predati pooblašteni službi za obdelavo podatkov. Vse to omejuje možnosti valorizacije. Poskusni postopek LIFE ECO-SANDFILL je dokazal, da izpostavitve odpadnega peska določenim postopkom obdelave za odstranitev tujkov in nečistoč razširi njegove možnosti valorizacije. Tehnologija mehanskega drobljenja, ki se uporablja v projektu, omogoča, da kemično vezani pesek SFS (PEP SET) doseže merila sprejemljivosti za ponovno uporabo livarskega peska v različnih gradbenih aplikacijah:

- dosežena stopnja čistosti pomaga, da je regenerirani pesek SFS v okviru mejnih vrednosti za luženje za inertne odpadke, ter omogoča, da se uporabi kot zrnati polnilni material pri geotehničnih aplikacijah. Regenerirani livarski pesek je na podlagi svojih

4 Conclusions

Spent foundry sands are classified as non-hazardous waste due to their leaching behaviour and, being a waste, they have to be handled by an authorised waste manager, all of which restricts their valorisation possibilities. The LIFE ECO-SANDFILL experimental procedure has demonstrated that subjecting the waste sand to some conditioning to remove foreign materials and impurities expands its valorisation options. The mechanical attrition technology implemented in the project enables chemically bonded SFS (PEP SET) to reach the acceptance criteria for reusing foundry sand in different construction applications:

- The cleaning degree achieved helps reclaimed SFS comply with leachate limits for inert waste and makes possible to use it as granular filling material in geotechnical applications. The characteristics of that reclaimed foundry sand classified it as tolerable soil in the core and foundation of embankments (PG-3, Art.330), blended 80:20 with borrow material to enhance compactibility.
- When used as 100% substitute for natural sand in CLSM applications, the compressive strength requirement of 1 MPa for trenches backfilling is satisfied.
- The dosage and durability studies of flowable mortars indicate that it could be employed as secondary aggregate in non-structural backfilling applications (specified UCS = 15 MPa) using sand substitution ratios $\leq 10\%$. That secures that UCS values drop less than 20% with regard to those of an equivalent mortar without SFS. Type of cement and additives in the mixtures strongly influence the mechanical resistance of the mortar and can help increase

lastnosti razvrščen kot dopustna tla v jedrih in temeljih nasipov (PG-3, 330. člen) z mešalnim razmerjem 80 : 20 z odvzemnim materialom za izboljšanje trdnosti;

- ko se uporablja kot 100-% nadomestek za naravni pesek pri aplikacijah CLSM, je izpolnjena zahteva za tlačno trdnost v višini 1 MPa pri zasipavanju jarkov;
- študije odmerkov in trajnosti tekočih malt kažejo, da bi ga bilo mogoče uporabiti kot sekundarni agregat pri nekonstrukcijskih aplikacijah zasipavanj (določena vrednost UCS = 15 MPa) z uporabo razmerij zamenjave peska ≤ 10 %. To zagotavlja, da se vrednosti UCS zmanjšajo za manj kot 20 % glede na vrednosti enakovredne malte brez peska SFS. Vrsta cementa in dodatkov v mešanicah močno vpliva na mehansko trdnost malte in lahko pripomore k povečanju razmerja zamenjave do 50 %. Ne glede na opaženo izgubo mehanskih lastnosti odmerki regeneriranega peska CHEM SFS, ki so večji od 50 %, zahtevajo večjo porabo cementa, vode in dodatkov, kar pa poveča stroške izdelave malte.

V zvezi s ponovno uporabo kemično vezanega peska SFS, regeneriranega v prototipu LIFE ECO-SANDFILL v oblikovalnici v železolivarni regenerirani pesek, pridobljen v prototipu, ne izpolnjuje zahtev za izdelavo jeder kot zamenjava za novi pesek. Potekajo raziskave za določitev, v kolikšni meri lahko pesek zamenja termalno regenerirani pesek kot modelni pesek v formah ter potrebne prilagoditve v % smol in katalizatorja v formulacijah.

Zahvala

Projekt LIFE ECO-SANDFILL (2016–2019) je sofinanciran s programom LIFE Evropske unije (Št. sporazuma o nepovratnih sredstvih LIFE15 ENV/ES/000612).

substitution ratio up to 50%. Apart from the observed loss in engineering properties, reclaimed CHEM SFS dosages over 50% require higher consumption of cement, water and additives, increasing mortar manufacturing costs.

Regarding the reuse of chemically bonded SFS reclaimed in the LIFE ECO-SANDFILL prototype in the moulding shop of the steel foundry, the recovered sand obtained in the prototype does not meet the requirements for core making, as a replacement of new sand. Research is in progress to establish to what extent it can replace thermally regenerated sand as facing sand in moulds and the necessary adjustments of % of resins and catalyst in the formulations.

Acknowledgement

LIFE ECO-SANDFILL (2016–2019) is co-financed by the LIFE Programme of the European Union (Grant Agreement No. LIFE15 ENV/ES/000612).

Viri / References

- [1] CAEF. Statistics. 2016. Prevezeto dne 20. 11. 2017, <http://www.caef.eu/downloads/kategorie.asp?kat=9>
- [2] Delgado, C.; Martinez, A.; Garitaonandia, E. (2016). *Diagnosis of surplus sand generation in EU and its demand among construction sector*. Končno poročilo D3 o projektu LIFE ECO-SANDFILL, ki je sofinanciran s programom LIFE Evropske unije (Št. sporazuma o nepovratnih sredstvih LIFE15 ENV/ES/000612). Na voljo na povezavi http://www.life-ecosandfill.eu/files/6615/0036/3868/D3_web_version.pdf / Deliverable D3 report of the LIFE ECO-SANDFILL project co-financed by the EU under the LIFE Programme (GA No. LIFE15 ENV/ES/000612)., Available from http://www.life-ecosandfill.eu/files/6615/0036/3868/D3_web_version.pdf
- [3] Predpis baskovske vlade z dne 12. januarja 2015 o recikliranih agregatih (*ORDEN del 12/01/2015 utilización de los áridos reciclados procedentes de la valorización de RCD*)) /
- [4] Odločba Sveta 2003/33/ES o določitvi meril in postopkov za sprejemanje odpadkov na odlagališčih / Council Decision 2003/33/EC establishing criteria and procedures for the acceptance of waste at landfills.
- [5] Zakon baskovskega parlamenta št. 4/2015 o preprečevanju in odpravljanju onesnaževanja tal / Basque Parliament Law 4/2015 on the prevention and correction of soil pollution (*Ley 4/2015, de 25 de junio, para la prevención y corrección de la contaminación del suelo*)

Uporaba sol-gel tehnologije v livarskih premazih

Application of Sol-Gel Technology in Foundry Coatings

Izvleček

Sloj premaza na peščeni formi ali jedru ustvarja visoko temperaturno bariero med talino in formo ter s tem preprečuje reakcije med njima. To posredno vpliva tudi na izboljšanje površine ulitkov. Temeljne zahteve ognjevdržnih premazov so: zagotavljanje ustrezne poroznosti, visoke ognjevdržnosti ter preprečevanje fizikalno-kemijskih reakcij med talino in premazom (penetracija, mazanje, raztapljanje). Optimizacijo sestave premaza, ki bi čim bolj izpolnil vse zgoraj omenjene zahteve, je možno doseči z dodajanjem sol-gel komponente. Uporaba sol-gel postopka v proizvodnji livarskih premazov je nova tehnologija. Dodatek sol-gel komponente izboljša površino ulitkov in reološke lastnosti premaza; pri tem pa ima pomembno vlogo razmerje sóla glede na ostale komponente. Dodana sol-gel komponenta zmanjša viskoznost premaza, kar pa izboljša mazljivost in s tem posledično omogoča boljše površino ulitka. Namen raziskave je bil raziskati učinek uporabe sol-gel komponente kot dodatka k premazu na vodni osnovi s cirkonskim polnilom.

Preučevali smo vpliv treh kemijsko različnih sol-gel komponent iter različnih masnih razmerij med osnovnim premazom in sol-gel komponento na površino ulitkov. Rezultati kažejo, da uporaba sol-gel komponente izboljša površinsko kakovost ulitkov.

Ključne besede: vodni premaz s cirkonskim polnilom, premaz s sol-gel komponento, površina ulitka, globina penetracije premaza

Abstract

The mould or core coating creates a high thermal integrity barrier between the metal and the mould in the reduction of the thermal shock experienced by the sand system. The basic requirements for refractory coatings are to ensure adequate porosity and high refractoriness, and to prevent the physicochemical reaction at the metal-coating interface (lubrication, solution, penetration). Optimization of the composite coatings to fulfil all the above-mentioned requirements can be achieved by adding the sol-gel component. The use of the sol-gel process in the production of foundry coatings has been a new technology. The addition of sol-gel components significantly improves the surface of castings and its rheological properties; where an important role also has the ratio of sol relative to other components. The added sol-gel component reduces the viscosity of the coating, which improves its lubricity and consequently enables a better casting surface. The purpose of this research was to investigate the effect of using the sol-gel component as an additive to the water-based coating with a zircon filler.

We studied the influence of three chemically different sol-gel components and the influence of various mass ratios between the basic coating and the sol-gel component on

the casting surfaces. The results indicate that the use of the sol-gel component significantly improves the quality of casting surfaces.

Key words: water-based coating with zirconium filler, coating with added sol-gel component, surface of casting, coating penetration depth

1 Uvod

Premazi za forme in jedra so nujni pomožni materiali v proizvodnji ulitkov. Osnovna naloga livarskih premazov je zagotavljanje učinkovite ognjevdružne pregrade med peščeno formo ali jedrom in talino pri procesu litja in strjevanja. To zagotavlja gladko in čisto površino ulitkov, pri čemer ne nastajajo napake pripečenega peska ali napake zaradi penetracije kovine v formo (grudice, vdolbinice ali hrapava površina). Uporaba visokokakovostnih premazov bistveno vpliva na zmanjšanje dragih postopkov čiščenja orodja in nadaljnega obdelovanja ulitka, kar posledično vpliva tudi na zmanjšanje proizvodnih stroškov v livarni. [1 - 4]

Premaz je sestavljen iz več komponent, pri čemer je njegova uporaba oziroma sestava odvisna od uporabe litine (barvna kovina, jeklo, siva litina), kemijskih lastnosti (pH – kisel, bazičen, nevtralen) in materiala forme ali jedra. Za jeklene litine se v premazih največkrat uporablja ognjevdružno polnilo na osnovi cirkona, kromita, sintermagnezita, olivina in drugih keramičnih materialov z visoko temperaturo taljenja. [1 - 4]

Raziskave so pokazale, da je večina današnjih premazov odvisna od namena uporabe, zato lahko vsebujejo preko dvajset različnih komponent. Da premaz zagotavlja določene lastnosti mora vsebovati naslednje štiri glavne komponente in druge dodatke [1 - 4]:

- ognjevdružno polnilo,
- tekoči nosilec,
- suspenzijsko sredstvo in

1 Introduction

Coatings for moulds and cores are essential auxiliary materials in the production of castings. The basic task of foundry coatings is to provide an effective refractory barrier between the sand form or the core and the melt during the casting and solidification process. This ensures a smooth and clean surface of castings, without sand burn on, pick-ups and other surface defects (metal penetration, veining, erosion). The use of high-quality coatings significantly influences the cost of cleaning procedures of the tool and further processing of the casting, which consequently also influences the reduction of production costs in the foundry. [1 - 4]

The coating consists of several components, and its use or composition depends on the use of cast iron (non-ferrous metal, steel, gray cast iron), chemical properties (pH - acid, basic, neutral) and material of the mould or core. For steel castings the most commonly used refractory filler is based on zircon, chromite, sintermagnesite, olivine and other ceramic powders with high melting temperature. For other castings it is not necessary to use such a high refractory filler as the casting does not reach such high temperatures. [1 - 4]

Researches have shown that most of today's coatings depend on the purpose of the application, so they can contain over twenty different components. To provide certain properties, the coating must include the following four main components and other additives [1 - 4]:

- Refractory filler

- vezivo.

Premaz se na formo ali jedro nanaša na različne načine, in sicer s čopičem ali krpico, potapljanjem, pršenjem ali polivanjem. Izbira metode nanosa je odvisna od obsega proizvodnje, ekonomičnosti postopka, velikosti in kompleksnosti forme ali jedra itd. [1 - 4]

Dodatek sol-gel komponente v premaz naj bi izboljšal reološke lastnosti in površino ulitka. Z izboljšanjem reoloških lastnosti se posledično izboljšajo tudi mazljivost, nanašanje in oprijemljivost na peščene forme ali jedra. Poleg tega pa mora premaz zagotavljati tudi visokotemperaturno bariero med talino in peščeno formo ter preprečevati reakcije med kovinsko talino in materialom forme. S tem zmanjšamo površinske napake na končnih izdelkih. Poudariti moramo, da področje uporabe sol-gel komponente v premazih še ni dovolj raziskano, sklepa pa se, da bi lahko dosegli boljše funkcionalne lastnosti, kar bi prišlo prav proizvajalcem premazov kot tudi uporabnikom le-teh. [5 - 9]

Sól je zmes majhnih delcev dveh (ali več) snovi, ki je navidezno homogena, in jo imenujemo disperzni sistem. Snov, ki je v zmesi v manjši množini, je dispergirana faza; le-ta je porazdeljena v disperznem mediju. Velikost delcev trdne dispergirane faze je med 1-100 nm. Nanometrski koloidni delci sola nastanejo s hidrolizo molekul prekuzorja, ki nato kondenzirajo. Pri določenih pogojih se koloidni delci lahko povežejo v tridimenzionalno neurejeno in po celotnem volumnu razvejano mrežo – pri čemer se tvori gel. Ločimo dva osnovna postopka sol-gel sinteze: anorganski (koloidni) in organski (polimerni oz. alkoksidni). Po koloidni poti gel nastane z aglomeracijo gostih koloidnih delcev, pri polimerni pa s polimerizacijo polimernih verig. [5 - 9]

- Binder agent
- Suspension agent
- Liquid carrier

Coatings can be applied to the mould or core in different ways. They can be applied as brushing and swabbing, spraying, dip coating and flow coating. The selection of the application method depends on the range of production, the economy of the process, the size and complexity of the mould or core, etc. [1 - 4]

The addition of the sol-gel component to the coating should improve the rheological properties and surface of the casting, and consequently it should improve lubrication, application and adhesion to sand moulds or cores. In addition, the coating must also provide a high temperature barrier between the melt and the sand mould and prevent the reactions between the melt and the mould material. With this we reduce the surface defects on finished castings. It should be emphasized that the field of the sol-gel component in the coatings has not yet been sufficiently studied, and it is concluded that it would be possible to achieve better functional properties, which would benefit both the coating manufacturers and the users of these coatings. [5 - 9]

Sól is a mixture of small particles of two (or more) substances that are seemingly homogeneous – a so called dispersion system. A substance in the mixture in a smaller amount is a dispersed phase; it is distributed in a dispersive medium. The particle size of the solid dispersed phase is between 1-100 nm. The nanometer colloidal particles of the sól are formed by hydrolysis of the precursor molecules, which are then condensed. Under certain conditions, the colloidal particles can be linked to a three-dimensional, unregulated and branched network through the entire volume - forming a gel. We distinguish two basic processes of sol-gel synthesis: inorganic (colloidal) and

2 Eksperimentalno delo

Kot osnovni premaz smo uporabljali vodni premaz s cirkonskim polnilom (Aquadur ZP), v katerega smo dodajali različne vrste in količine sól komponent. Okvirna sestava premaza Aquadura ZP je naslednja:

- 83 mas. % ognjevzdržnega polnila (cirkon, Al-silikati),
- 2 mas. % organskega veziva in
- 15 mas. % vode.

Sintetizirani smo tri različne sól komponente:

- Sól 1 (na osnovi HCl),
- Sól 2 (na osnovi TEOS-a),
- Sól 3 (na osnovi H_2SO_4).

V premaz smo dodajali 10 in 25 mas. % sól komponente, v nekaterih primerih pa smo dodatno pripravili še premaze s 15 in 20 mas. % sól komponente.

Pred pripravo merilnih celic smo pripravili termoelemente, ki smo jih kasneje vstavili v merilno celico, s pomočjo katerih smo med postopkom vlivanja in strjevanja merili temperature. Merilne celice smo premazali s čopičem in jih pripravili za sušenje v peči. Pred samim sušenjem v merilno celico vstavimo termoelement, kot je prikazano na Sliki 1, ter jih sestavimo skupaj. V peč (Slika 2) jih damo z namenom izločevanja tekočega nosilca iz premaza – s tem se na formi ustvari samo trden sloj premaza. Po sušenju so bile merilne celice pripravljene na ulivanje (Slika 3).

Med postopkom sušenja merilnih celic smo v indukcijski peči že talili sivo litino, ki smo jo kasneje ulili v pripravljene merilne celice. Za taljenje sive litine smo potrebovali od 30 do 45 minut. Temperatura taline pred ulivanjem je bila okoli $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Za ulivanje sive litine smo se odločili, ker je sorazmerno preprosta za uporabo, ima dobre livne sposobnosti, dobro trdnost in je cenovno dostopna. Pri ulivanju sive litine smo

organic (polymeric or alkoxide) pathways. With colloidal path, the gel is formed by agglomeration of dense colloidal particles, and by polymeric path the gel is formed by polymerization of polymer chains. [5 - 9]

2 Experimental Work

As a primer we used water based coating with zircon filler Aquadur ZP), into which various types and quantities (10 wt. % and 25 wt. %) of sól components were added. The rough composition of the Aquadur ZP coating is as follows:

- 83 wt. % refractory filler (zircon, Al-silicates)
- 2 wt. % organic binder
- 15 wt. % water.

We have synthesized three different sól components:

- Sól 1 (based on HCl)
- Sól 2 (based on TEOS)
- Sól 3 (based on H_2SO_4)

Before preparing the measuring cells, we had prepared thermoelements, which were later inserted into the measuring cell. With those elements we measured the temperature during the casting process. The application that we used to coat the measuring cells was brushing (figure 1). After brushing the moulds were prepared for drying in the furnace. Before the measuring cells were placed in a furnace (figure 2), where our intention was to remove the liquid carrier from the coating and only create a hard layer on the form, we had inserted the thermoelement into the measuring cell and composed it. After drying, the measuring cells were ready for casting (figure 3).

During the drying process of the measuring cells, the grey cast iron was melted in the induction furnace, which was later casted into the prepared measuring cells. We needed 30 to 45 minutes to cast



Sl. 1. Premazana celica z vstavljenim termoelementom, pred sušenjem

Fig. 1. Coated measuring cell with inserted thermoelement, before drying



Sl. 2. Sušenje merilnih celic v peči

Fig. 2. Drying of the measuring cells in the furnace



Sl. 3. Postopek vlivanja sive litine v peščene celice

Fig. 3. The casting process of grey cast iron into sand cells

termoelemente tipa K zaščitili s kvarčnimi zaščitnimi cevkami.

Za razumevanje obnašanja premazov na peščeni formi ali jedru je bila potrebna dosledna karakterizacija. Karakterizacijo

grey cast iron. The melt temperature before casting was about 1300 ° C. We decided to cast cast iron because it is relatively easy to use, has good casting properties, good strength and is affordable. When casting

premazov smo opravili z naslednjimi postopki:

- pregled površine z optičnim mikroskopom,
- globina penetracije premaza,
- mazljivost in nanos premaza,
- viskoznost in gostota premaza.

3 Rezultati in diskusija

3.1 Površina ulitkov

Osnovni premaz Aquadur ZP je v obliki paste. Tak premaz se težko nanaša, zato smo ga pred nanosom na površino forme morali redčiti z destilirano vodo. V našem primeru smo premaz redčili s 7,5 mas. % vode, da smo formo s čopičem lažje premazali. Po redčenju je bil premaz še vedno gost in se je težko nanašal. Poleg tega, da ta premaz ni bil tako mazljiv, je zaradi velike gostote puščal sledi premazovanja s čopičem (sliki 4 in 5).

Sól komponenta je v tekočem stanju preden gelira, zato po dodatku le-te v premaz ni potrebno dodatno redčenje premaza z destilirano vodo. Ko smo v premaz dodali sól komponento, smo ga s tem že razredčili. Mazljivost premaza je bila nato odvisna od vrste in količine sól komponente, ki smo jo primešali v premaz. Premazi s sól komponento na osnovi TEOS-a so bili težje mazljivi kot premazi s sól komponento na osnovi HCl ali H_2SO_4 .

Pri ulitkih, kjer smo uporabili premaz z dodano komponento sól 1 (na osnovi HCl), smo dobili najboljše rezultate površine ulitka. Površina je bila v primerjavi z ulitki brez sól komponente bolj gladka in z manj napakami pripečenega peska. Na površino ulitka v veliki meri vpliva količina dodane sól komponente, saj smo v primeru, kjer smo v premaz dodali 25 mas. % sól komponente (Slika 7), dobili nekoliko boljše rezultate kot

cast iron, K-type thermoelements are protected with quartz protective tubes.

In order to understand the behaviour of coatings on sand mould or core, a consistent characterization was required. The parameters that we used for characterization of our foundry coating are listed below:

- Examination of the surface with an optical microscope
- Depth of penetration of the coating
- Lubrication and application of the coating
- Viscosity and density of the coating

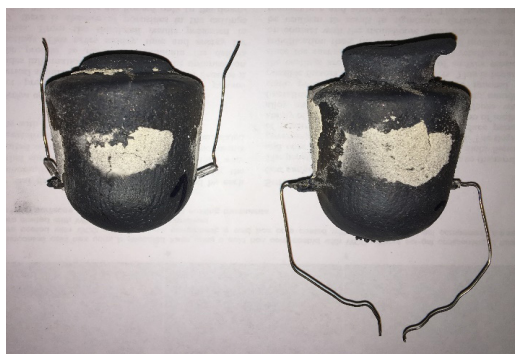
3 Results and Discussion

3.1 Surface of the Castings

The basic coating Aquadur ZP is in paste form. Coatings in the form of paste are difficult to apply, so they have to be diluted with distilled water before being applied to the surface of the mould. In our case, the coating was diluted with 7.5 wt. % of water – the brushing was easier. After diluting, the coating was still dense and difficult to apply. Furthermore, it was less applicable, due to its high density, and the traces of brush on it could there be seen. (figure 4 and 5).

The sól component is in liquid state before it comes to the gel. After the addition of sól to the coating, there is no need to dilute it with distilled water. It was diluted by the addition of the sól component to the coating. The application of the coating was then dependent on the type and quantity of the sól component that was added to the coating. Coatings based on TEOS were harder to apply than coatings based on HCl or H_2SO_4 .

For castings, where the coating with the added sól 1 component (based on HCl) was used, we obtained the best results on the casting surfaces. The surface was smoother



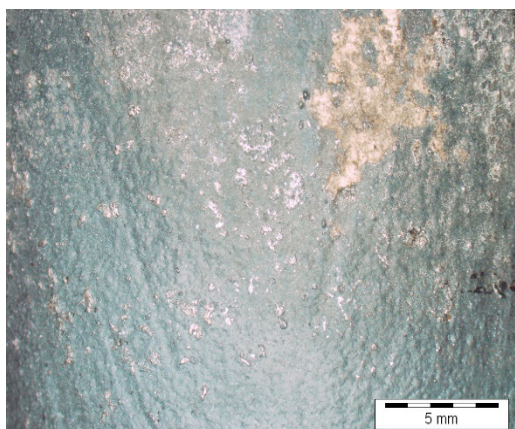
Sl. 4. Ulitek brez sól komponente takoj po odstranitvi iz merilne celice

Fig. 4. Casting where we used coating without the sól component immediately after removal from the measuring cell



Sl. 5. Ulitek brez sól komponente, očiščen

Fig. 5. Casting where we used coating without sól component, cleaned



Sl. 6. Površina ulitka (10x povečava), kjer je bil uporabljen premaz S1 – 10

Fig. 6. Casting surface (10x magnification), where coating S1 - 10 was used



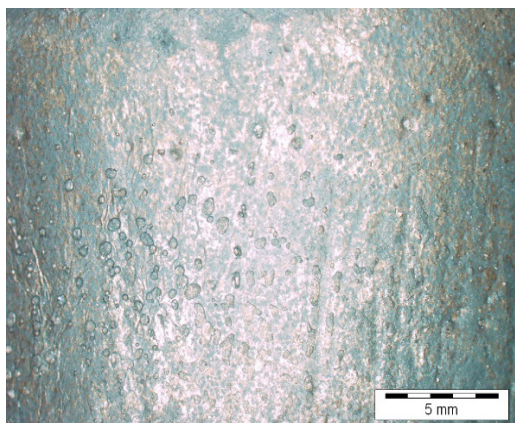
Sl. 7. Površina ulitka (10x povečava), kjer je bil uporabljen premaz S1 – 25

Fig. 7. Casting surface (10x magnification), where coating S1 - 25 was used

pri premazu, kjer smo dodali 10 mas. % sól komponente (Slika 6).

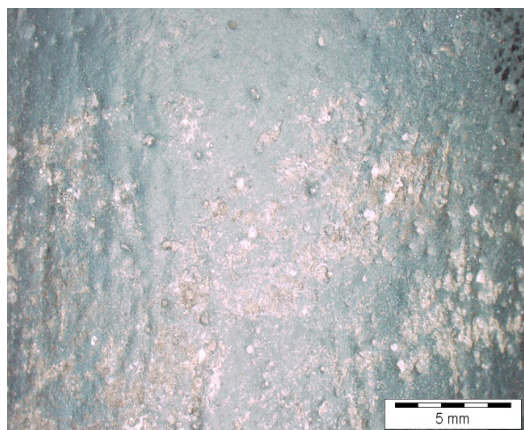
Pri premazih z dodano komponento sól 2 so na površini ulitka vidne nekakšne črtice, ki so posledica slabe mazljivosti premaza. Slabo mazljivost premaza lahko pripišemo nestabilnosti sóla 2, saj

in comparison to the castings without the sól component and with fewer defects of sand-burn on it. The casting surface is largely influenced by the amount of the added sól component. Results with coatings where we added 25 wt.% of the sól component (figure 7) were slightly better in comparison



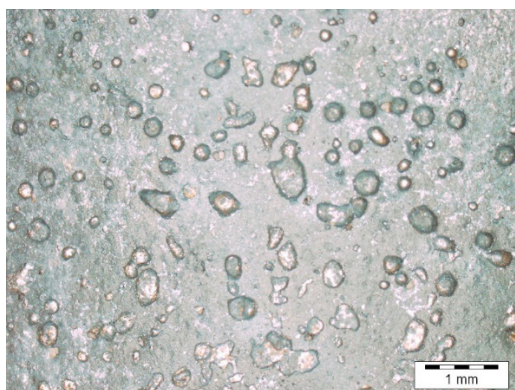
SI. 8. Površina ulitka (10x povečava), kjer je bil uporabljen premaz S2 – 10

Fig. 8. Casting surface (10x magnification), where coating S2 - 10 was used



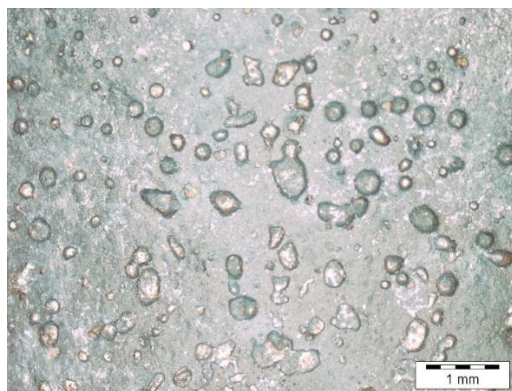
SI. 9. Površina ulitka (10x povečava), kjer je bil uporabljen premaz S2 – 25

Fig. 9. Casting surface (10x magnification), where coating S2 - 25 was used



SI. 10. Površina ulitka (10x povečava), kjer je bil uporabljen premaz S3 – 10

Fig. 10. Casting surface (10x magnification), where coating S3 - 10 was used



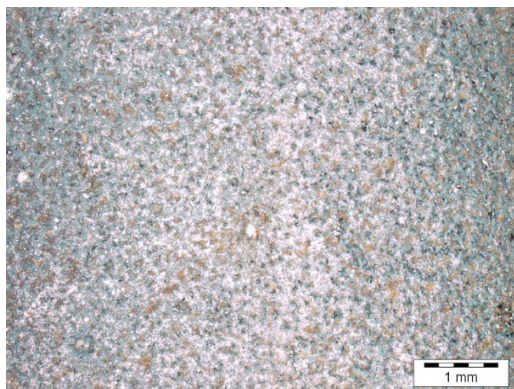
SI. 11. Površina ulitka (10x povečava), kjer je bil uporabljen premaz S3 – 25

Fig. 11. Casting surface (10x magnification), where coating S3 - 25 was used

je le-ta v času nanosa najverjetneje že geliral. Ob primerjavi površin, kjer je bil uporabljen premaz z 10 mas. % (Slika 8) in premaz s 25 mas. % (Slika 9) dodane sól 2 komponente, vidimo, da ni bistvene razlike na površini, kar pomeni, da pri uporabi sól komponente na osnovi TEOS-a količina dodanega sóla nima bistvenega

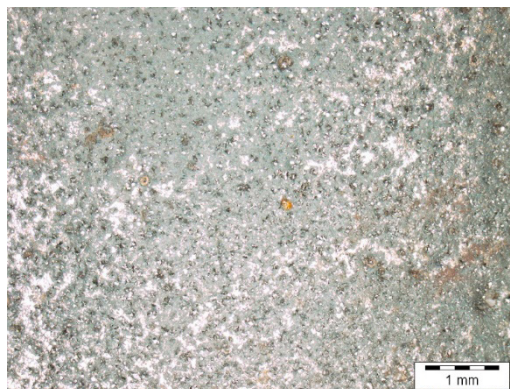
to the coatings where we added 10 wt. % of the sól component (figure 6).

In the coatings with the added sól 2 component, there are some visible traces on the casting surface due to the low lubricity of the coating. The poor lubricity of the coating can be attributed to the instability of the sól 2 component, which has already gelled at



Sl. 12. Površina ulitka (10x povečava), kjer je bil uporabljen premaz S3 – 10

Fig. 12. Casting surface (10x magnification), where coating S4 - 10 was used



Sl. 13. Površina ulitka (10x povečava), kjer je bil uporabljen premaz S3 – 25

Fig. 13. Casting surface (10x magnification), where coating S4 - 25 was used

pomena. Na obeh površinah so vidne sledi pripečenega peska, kar povzroča napake na površini, prav tako so na obeh ulitkih vidne sledi premazovanja merilne celice s čopičem. Četudi površina na ulitkih ni tako gladka in enakomerna, je vseeno boljša, kot površina kjer smo uporabili premaz brez dodane sól komponente. Dodatek sól komponente v premaz torej vsekakor vpliva na izboljšanje površine ulitka, vendar pa je pri tem odvisno, kateri sól smo v premazu uporabili.

Pri tretjem ulivanju smo uporabili premaze z dodano komponento sól 3. Površina ulitkov je boljša kot pri premazu s komponento sól 2, vendar še vedno slabša kot pri premazih s komponento sól 1. Vsekakor je tudi ta premaz (z dodano komponento sól 3) še vedno vidno boljši od premaza brez dodane sól komponente.

Na površini ni večjih napak. Čeprav površina ni tako gladka, je bilo tukaj zelo malo napak pripečenega peska. Na površini ulitka so se v obeh primerih, tako pri 10 mas. % (slika 10) kot tudi pri 25 mas. % (Slika 11) dodane sól komponente, pojavili mehurčki. Pojav mehurjenja lahko pripišemo preveliki

the time of application. When comparing surfaces, where a coating with 10 wt. % (figure 8) and a coating with 25 wt. % (figure 9) added sól 2 component was used, we see that there is no significant difference in the surface area, which means that when using sól component based on TEOS, the amount of added sól is not that important. On both surfaces there are visible errors of sand-burn on and the traces of brushing, visible due to the same reason – sól 2 has already gelled at the time of application. Even if the casting surface is not so smooth and even, it is still better than the surface where the coating without the added sól component was used. The addition of the sól component to the coating therefore certainly influences the improvement of the casting surface, but it depends on the type and the quantity of sól used in the coating.

In the cases where we used coatings with the added sól 3 component, the casting surface is better than in the coating with the sól 2 component, but still worse than in the coatings with the sól 1 component. By all means, this coating (with added sól

poroznosti premaza, kar pomeni, da je bil premaz prepusten za talino. Lahko pa so mehurji tudi posledica reakcij na meji med formo/premazom/talino.

Najboljše rezultate glede površine ulitkov smo dobili pri uporabi premaza z dodano komponento sól 1. Iz tega razloga smo se odločili, da premaze s to komponento ponovno pripravimo in jih še enkrat preizkusimo ter nekoliko bolj podrobno raziščemo - premaze z dodano komponento sól 4 (identičen komponenti sól 1).

Iz površine je razvidno (Sliki 12 in 13), da nam komponenta sól 4 v premazu daje bolj gladko površino, glede na premaz, kjer nismo uporabili sól komponente. Prav tako je površina ulitka, kjer smo imeli v premazu 25 mas. % sóla, najbolj gladka, z najmanj napakami.

3.2 Penetracija premaza v formo

Penetracija je bila odvisna od vrste, količine in časa uporabe premaza (razvidno v Tabeli 1). Naša predpostavka je bila, da bo penetracija najgloblja pri premazih s 25 mas. % dodane sól komponente, vendar v vseh primerih ni bilo tako. Pri premazih z dodano komponento sól 2 je penetracija pri 25 mas. % dodane sól komponente nižja kot pri premazu z 10 mas. % sól komponente, kar ponovno lahko pripišemo nestabilnemu sólu, ki je bil dodan v premaz. Lahko sklepamo, da je premaz z dodano komponento sól 2 v času našega nanašanja že geliral. V ostalih primerih je bila penetracija premazov s 25 mas. % dodane sól komponente globlja kot pri premazih z 10 mas. % dodane sól komponente.

Poleg količine dodane sól komponente pa je na penetracijo vplival tudi čas med izdelavo in uporabo premaza, saj se penetraciji kjer smo uporabili identičen

3 component) is still visibly better than the coating without the added sól component.

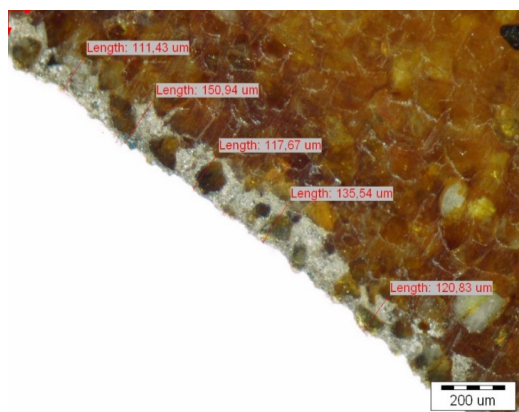
There are no major defects on the surface. Although the surface is not that smooth, here there were very few mistakes due to the sandburn. With both coatings – either with 10 wt. % (figure 10) and 25wt. % (figure 11) sól 3 component, there were blisters on the casting surface. The blistering effect can be attributed to the excessive porosity of the coating, which means that the coating was too permeable to the melt. However, blisters may also be due to reactions at the border between form / coating / melt.

The best results on the casting surface were obtained when using the coating with the added sól 1 component. Due to this reason, we decided to re-prepare the coatings with this component, test them again and examine in more detail – those were coatings with the added sól 4 component (identical to the sól 1 component).

If we compare the casting surface (Figs. 12 and 13) with added sól component to the coating and the one without it, we can see that the added sól component produces a smoother surface. Here we gained the similar results as before – casting surface was smoother with coatings where a higher amount of sól component (25 wt. %) was used and there were also fewer defects on the surface.

3.2 Depth of Penetration of the Coating

Penetration depended on the type, quantity and the time of use of the coating (table 1). Our assumption was that the penetration would be deepest in coatings with 25 wt. % of added sól component. We can confirm this assumption in all cases but in the cases where coatings with added sól 2 component were used. For coatings with added sól 2



Sl. 14. Prikaz merjenja penetracije z optičnim mikroskopom

Fig. 14. Penetration measurement with optical microscope

premaz (premazi z dodano komponento sól 1 in premazi z dodano komponento sól 4) bistveno razlikujeta. Tukaj razliko v penetraciji lahko pripišemo času uporabe premaza, saj smo premaze z dodano komponento sól 4 nanесли isti dan, kot smo jih pripravili, medtem ko smo premaze z dodano komponento sól 1 uporabili v 4 – 5 dneh, po tem, ko smo jih pripravili. Slika 14 prikazuje merjenje globine penetracije.

component, penetration with 25 wt. % added sól 2 component is lower than with coating with 10 wt.% added sól 2 component, which can again be attributed to an unstable sól 2 added to the coating. We can conclude that the coating with the added sól 2 component had already been gelled during our application. In other cases, penetration of the coatings with 25 wt. % of added sól component was deeper than in the coatings with 10 wt. % added sól component. Figure 14 shows the measurement of penetration depth.

The penetration was also influenced by the time of use – time between the preparation and the application of the coating. We can confirm that as we compare coatings with added sól 1 and sól 4 (which are identical). Coatings with added sól 4 component have considerably deeper penetration in comparison to the coatings with added sól 1 component. This is due to the time of use – coatings with sól 4 component were used the same day as we prepared them, while coatings with added sól 1 component were used four or five days after we prepared them.

Tabela 1. Povprečna globina penetracije za posamezne premaze glede na vrsto in količino dodane sól komponente

Table 1. Average penetration depth for individual coatings according to the type and quantity of added sól components

Uporabljen sól v premazu / Used sól in coating		
ZP (brez sóla) / ZP (without sól)	170,05	
	10 % dodane sól komponente / 10 % added sól component (µm)	25 % dodane sól komponente / 25 % added sól component (µm)
Sól 1	133,73	164,52
Sól 2	135,82	130,22
Sól 3	127,29	288,25
Sól 4	528,33	569,18

3.3 Viskoznost in gostota

Viskoznost in gostota sta bili izmerjeni za premaze z dodano komponento sól 4. Oba parametra zavisita od količine dodane sól komponente, kar lahko razberemo iz tabel 2 in 3. Tako gostota kot viskoznost sta najnižji pri premazih z največ dodane sól komponente in obratno najvišji pri premazih z najmanj dodane sól komponente. Gostoto smo lahko izmerili vsem premazom ne glede na količino dodane sól komponente, medtem ko viskoznosti ni bilo možno izmeriti pri premazih z 10 mas. % in brez dodane sól komponente, saj sta bila preveč viskozna, da bi tekla skozi iztočni viskozimeter. Podatki merjenja gostote in viskoznosti so podani v tabeli.

Tabela 3. Viskoznost premazov glede na količino dodane sól komponente

Table 3. Viscosity of coatings according to the quantity of added sól components

Premaz / Coating	Viskoznost / Viscosity (s)
ZP	Nismo mogli izmeriti / non measurable
S4 – 10	Nismo mogli izmeriti / non measurable
S4 – 15	31,5
S4 – 20	16,0
S4 - 25	12,5

4 Zaključek

Znano je, da sól znatno vpliva na izboljšanje površine ulitka in na penetracijo premaza v formo. Z dobljenimi rezultati smo prišli do sledečih zaključkov:

- površine ulitkov so v primerjavi s premazom brez sól komponente v vseh primerih boljše, bolj homogene in z manj napakami pripečenega peska, ne

3.3 Viscosity and Density

The viscosity and density were measured for coatings with added sól 4 component. Both parameters depend on the amount of added sól component. Both the density and the viscosity are the lowest in coatings with the highest added sól component and vice versa - the highest in coatings with the least added sól component. The density was measured for all coatings regardless of the amount of added sól component, while the viscosity could not be measured for coatings with 10 wt. % and without added sól component, because they were too viscous to flow through the viscometer. Data of density and viscosity measurement are given in the table.

Tabela 2. Gostota premazov glede na količino dodane sól komponente

Table 2. Density of coatings according to the quantity of added sól components

Premaz / Coating	Gostota / Density (g/ml)
ZP	2,77
S4 – 10	2,35
S4 – 15	2,21
S4 – 20	2,10
S4 - 25	1,97

4 Conclusion

It is known that sól component significantly affects the improvement of the surface of the casting and the penetration of the coating into the mold. With the results we obtained the following conclusions:

- The surface of the castings is better, more homogeneous and with fewer defects of sand-burn compared with the coating without sól component, regardless of the type and quantity of

glede na to, katero vrsto in količino sóla smo uporabili. Najboljše rezultate glede površine smo dobili pri premazih, kjer smo uporabili sól 1 in sól 4 (ki imata enako sestavo) na osnovi HCl. Poleg vrste dodane sól komponente je odvisna tudi količina le-te, in sicer smo najboljše rezultate, kot je bilo pričakovano, dobili, kjer smo dodali največ sól komponente. Industrijsko bolj uporabni bi bili premazi z manj dodane sól komponente, ki so prav tako pokazali dovolj dobre rezultate in so primerni za testiranje v livarni;

- nanašanje in mazljivost premazov sta bila odvisna od vrste in količine dodane sól komponente. Kot smo predpostavili, so se premazi, kjer je bilo dodane več sól komponente, mazali lažje kot tisti, kjer je bilo dodane manj sól komponente oziroma je sploh ni bilo. Hipoteza je bila potrjena v vseh primerih, razen pri sólu 2 (na osnovi TEOS-a), kjer je bilo mazanje izredno težko, saj je bil premaz izredno viskozen, ker je verjetno že prišlo do geliranja, preden smo premaz nanесли na površino;
- penetracija je bila odvisna od vrste, količine in časa uporabe premaza. Naša predpostavka je bila, da bo penetracija najgloblja pri premazih s 25 mas. % dodane sól komponente, vendar v vseh primerih ni bilo tako. Pri premazih z dodano komponento sól 2 je penetracija pri 25 mas. % dodane sól komponente nižja kot pri premazu z 10 mas. % sól komponente. V ostalih primerih je bila penetracija premazov s 25 mas. % dodane sól komponente globlja kot pri premazih z 10 mas. % dodane sól komponente. Poleg količine dodane sól komponente pa je na penetracijo vplival tudi čas med izdelavo in uporabo premaza, kar se je zgodilo pri premazih s komponento sól

the sól used. The best surface results were obtained in coatings where sól 1 and sól 4 (having the same composition) based on HCl were used. In addition to the type of added sól component, the amount of the component depends on it. The best results, as expected, were obtained when a higher amount of sól component was added. Industrial coatings would be more cohesive with less added sól components, which also showed good results, and are suitable for testing in the foundry.

- The application and lubrication of the coatings depend on the type and quantity of the added sól component. As we have assumed, coatings, where higher amount of sól component was added, were lubricated more easily than those where fewer sól component was added. The hypothesis was confirmed in all cases, except in case with added sól 2 component (based on TEOS), where the lubrication was extremely difficult, since the coating was extremely viscous, as it was likely that gelation had already occurred before the coating was applied to the surface.
- Penetration depends on the type, quantity and the time of use of the coating. Our assumption was that the penetration would be deepest where we used coatings with 25 wt. % added sól component, but in all cases this was not true. For coatings with added sól 2 component, penetration where we used coating with 25 wt. % added sól component is lower than in coating with 10 wt. % sól component. In other cases, penetration of coatings with 25 wt. % added sól component was deeper than in coatings with 10 wt. % added sól component. In addition to the amount of added sól component, the penetration

- 1 in premazih s komponento sól 4;
- viskoznost in gostota premazov zavisita od količine dodane sól komponente. Tako gostota kot viskoznost sta najnižji pri premazih z največ dodane sól komponente in obratno najvišji pri premazih z najmanj dodane sól komponente. Gostoto smo lahko izmerili vsem premazom ne glede na količino dodane sól komponente, medtem ko viskoznosti ni bilo možno izmeriti pri premazih z 10 mas. % in brez dodane sól komponente, saj sta bila preveč viskozna, da bi tekla skozi iztočni viskozimeter.
- also depends on the time of use – time between preparation and application. Viscosity and density of coatings depend on the amount of added sól component. Both the density and the viscosity are the lowest in coatings with the highest added sól component and vice versa the highest in coatings with the least added sól component. The density can be measured for all coatings regardless of the amount of added sól component, while the viscosity could not be measured for coatings with 10 wt. % and without the added sól component as they were too viscous to flow through the viscometer.

Viri / Literature

- [1] AĆIMOVIĆ-PAVLOVIĆ, Z., PRSTIĆ, A., ANDRIĆ, L., MILOŠEVIĆ, V., MILIĆEVIĆ, S.: Ceramic Coating for Cast House Application, Ceramic Coatings - Applications in Engineering, Prof. Feng Shi (Ed.), 2012 ISBN: 978-953-51-0083-6, InTech, dostopno na svetovnem spletu: <http://www.intechopen.com/books/ceramic-coatingsapplications-in-engineering/ceramic-coatings-for-application-in-foundry> [Navedeno: 15.03.2018].
- [2] NWAOGU, U.C., TIEDJE, N.S.: Foundry Coating Tehnology: A Review. Materials Science and Application, 2011, 2, 1143-1160
- [3] BROWN, J. R.: Foseco Ferrous Foundryman's Handbook, Pergamon Press, Oxford, 2000.
- [4] AĆIMOVIĆ-PAVLOVIĆ, Z. A.: Zaštitni premazi u livarstvu. Monografija, Beograd, 2009.
- [5] NWAOGU, U. C., TIEDJE, N. S. New Sol-Gel Coatings to Improve Casting Quality. DTU Mechanical Engineering, 2011.
- [6] PIERRE, A. C. Introduction to sol-gel processing. New York: Springer Science + Business Media 1998
- [7] ZARZYCKI, J.: Past and Present of Sol-Gel Science and Technoogy, Journal of Sol-Gel Science and Technology, 8, 17-22 (1997)
- [8] BRINKER, C.J., SCHERER, G. W.: Sol-gel Sciencs, Academic Press, New York, 1990
- [9] SCHUBERT, U., HÜSING, N.: Synthesis of Inorganic Materials, Wiley, 2. izdaja, Weinheim, 2005)

Lita mikrostruktura nove aluminijeve zlitine AA 6086

As-cast microstructure of a novel Al-Mg-Si alloy

Povzetek

V raziskavi smo preiskali mikrostrukturo nove zlitine AA 6086, ki je modificirana aluminijeve zlitine 6082 z bakrom, silicijem in cirkonijem. Drogove zlitine s premerom 282 mm smo polkontinuirno lili s postopkom HTAS (Hot Top – Air Slip, litje s kokilo v obliki poroznega grafitnega obroča). Vzorce z glave in noge izbranega droga smo metalografsko pripravili in preiskali z različnimi metodami, kot so svetlobna mikroskopija, vrstična elektronska mikroskopija z mikrokemično analizo, diferenčna termična analiza ter rentgenska fazna analiza.

Mikrostruktura je bila sestavljena iz enakoosnih kristalnih zrn aluminijeve trdne raztopine α -Al ter različnih mikrostrukturnih sestavin v meddendritnih prostorih in po kristalnih mejah. Z metalografsko analizo smo identificirali sedem faz: α -AlMnSi, Mg_2Si , Al_3Zr , Si_2Zr , β -Si, Al_2Cu in Q-AlCuMgSi. Od teh je največ faze α -AlMnSi, ki vsebuje še nekaj Fe in Cr. Faza Mg_2Si ima obliko pismenk. Cirkonij je v glavnem vezan v Al_3Zr ter delno tudi v Si_2Zr . Faze Al_2Cu , β -Si in Q-AlCuMgSi so bile navzoče v otočkih, ki so nastali z večfazno eutektično reakcijo preostale taline ob zaključku strjevanja.

Procese pri strjevanju smo modelirali z uporabo Scheilovega modela, ki je dal dobro ujemanje z eksperimentalnimi podatki. Na osnovi analize rezultatov eksperimentov ter modeliranja smo podali verjetni potek strjevanja obravnavane zlitine.

Ključne besede: aluminijeva zlitina, cirkonij, lito stanje, mikrostruktura, strjevanje

Abstract

We have investigated the microstructure of a modified aluminium alloy 6082 with additions of copper and zirconium. The billets of this alloy, with the diameter of 282 mm, were semi-continuously cast using HTAS (Hot Top – Air Slip). Samples from the bottom and head of a billet were prepared by metallographic methods, and investigated using different methods, such as light microscopy, scanning electron microscopy with microchemical analysis, differential scanning calorimetry and X-ray diffraction.

The microstructure consisted of equiaxed dendritic grains of aluminium solid solution α -Al and different phases in the interdendritic regions and crystal grains. The metallographic investigation revealed seven additional phases: α -AlMnSi, Mg_2Si , Al_3Zr , Si_2Zr , β -Si, Al_2Cu in Q-AlCuMgSi. Among them, the highest volume fraction belong to α -AlMnSi that also contained some Fe in Cr. The phase Mg_2Si was in the shape of Chinese script. Zirconium was mainly present in Al_3Zr and partly in Si_2Zr . The phases Al_2Cu , β -Si in Q-AlCuMgSi were present with the islands that formed via a multicomponent eutectic reaction of the remaining liquid during the last stage of solidification.

The processes during solidification were modelled by using the Scheil model, which gave rather good matching with the experimental data. By analysing the results of the experiments and of the Scheil model, we proposed a probable course of solidification of the investigated alloy.

Keywords: aluminium alloy, zirconium, as-cast condition, microstructure, solidification

1 Uvod

Izdelava zelenih vozil, za katera je značilna manjša poraba goriva in zmanjšanje izpustov toplogrednih plinov, je nuja za avtomobilsko industrijo. Eden izmed ukrepov za doseg tega cilja je zmanjšanje mase vozil. To se lahko doseže z zamenjavo težjih jeklenih delov z deli, izdelanih iz lažjih, visokotrdnostnih in hkrati žilavih aluminijevih zlitin. Visokotrdnostne zlitine serije 7xxx (Al-Zn) imajo majhno preoblikovalnost in žilavost. Zato je cilj razviti nove visokotrdnostne zlitine iz serije 6xxx (Al-Mg-Si), ki imajo v osnovnih izpeljankah manjšo trdnost, vendar odlično žilavost in korozijsko obstojnost [1, 2].

Aluminijeve gnetne zlitine, ki temeljijo na sistemu Al-Mg-Si (serija 6xxx), se polkontinuirno lijejo in nato preoblikujejo, končne lastnosti pa dobijo z ustrezno toplotno obdelavo. Pri litju drogov se velikokrat uporablja metoda litja s kokilo v obliki poroznega grafitnega obroča, skozi katerega se med litjem vpihava mešanica olja in zraka, ki ustvari zračno režo med ulitkom in kokilo, HTAS (kratica izvira iz angleškega poimenovanja Hot Top - Air Slip), ki je shematično prikazan na sliki 1 [3].

Čeprav dobijo zlitine na osnovi Al-Mg-Si končne lastnosti šele po preoblikovanju in toplotni obdelavi, ima litje zelo velik vpliv na končne lastnosti. Prevelikih pomanjkljivosti pri litju ni mogoče popolnoma odpraviti z nadaljnjimi postopki. Pomembna je začetna velikost in oblika kristalnih zrn, porazdelitev elementov in mikrostrukturnih sestavin, vrste faz, ki nastanejo ob koncu strjevanja, ter napake, ki se pojavijo na površini in v notranjosti drogov.

Pri razvoju nove zlitine je bila optimirana celotna sestava, predvsem pa je pomemben sočasen dodatek cirkonija in bakra. Dodatek cirkonija že lahko vpliva na velikost kristalnih zrn v litem stanju, čeprav

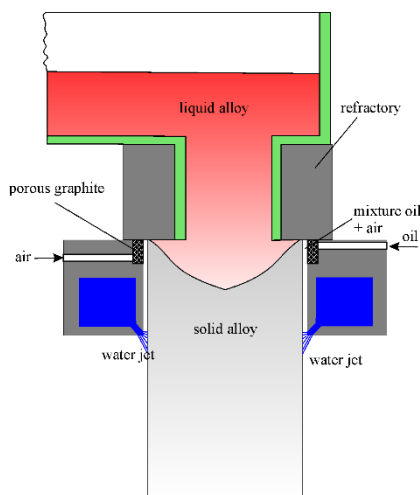
1 Introduction

The manufacturing of green vehicles, which are characterised by lower fuel consumptions and greenhouse gas emissions, is a necessity for the automotive industry. One of the measures is the replacement of heavy steel parts with parts made of lighter, high-strength and, at the same time, extremely tough aluminium alloys. High-strength alloys from the 7xxx series (Al-Zr) have a small forming ability and toughness. Therefore, it is a goal to develop high-strength 6xxx alloys (Al-Mg-Si), which have basically lower strength, but excellent toughness and corrosion resistance [1, 2].

Aluminium wrought alloys, based on the system Al-Mg-Si (6xxx), are normally semi-continuously cast, and then formed, and the final properties are obtained by heat treatment. The method is often used for casting of billets [3]. It is shown schematically in Fig. 1.

Despite of the fact, that the final properties of Al-Mg-Si alloys are obtained after forming and heat treatment, the casting process has a very important influence on the final properties. Further processing steps cannot remove all deficiencies by casting. The initial grain size, grain shape, distribution of the elements and microstructural constituents, types of phases that formed during final stages of solidification, and defects that form at the surface and inside the bars are very important.

By development of a novel alloy, complete chemical composition of the alloy was optimised. The most important are zirconium and copper additions. Zirconium can decrease the size of crystal grains in the liquid state. However, it is that the presence of zirconium in the alloy can reduce the efficiency of Al-Ti-B grain refiners. It is



SI. 1. Shematičen prikaz postopka litja po postopku HTAS

Fig. 1. Schematic presentation of HTAS-process (Hot Top – Air Slip)

je tudi znano, da dodatek cirkonija zmanjša učinek običajnega udrobnila, kot je npr. zlitina Al-Ti-B. Predvsem je pomembno, da pri višjih temperaturah tvori disperzoide Al_3Zr , ki močno zmanjšajo nagnjenje k rasti kristalnih zrn pri toplotni obdelavi in vročem preoblikovanju [4, 5]. Tako prispeva cirkonij k višji trdnosti zlitin zaradi disperzijskega utrjanja osnove ter zaradi utrjanja s kristalnimi mejami, ki je mnogo močnejše, če so kristalna zrna zelo majhna.

Glavni utrjevalni učinek v zlitinah Al-Mg-Si predstavljajo izločki β' in β'' . Ti izločki so metastabilne variante ravnotežne faze Mg_2Si . Zato se tudi ti izločki pretvorijo v fazo Mg_2Si , še posebej, če se zlitina zadržuje dalj časa pri povišanih temperaturah (med temperaturo staranja in temperaturo solvus). Ob dodatku bakra tem zlitinam dobimo v bistvu kombinacijo med zlitinami 6xxx in 2xxx. V zlitinah prevladuje faza Q-AlCuMgSi in ne faza Q-Al₂Cu, ki je večinska v zlitinah 2xxx. Pri staranju v trdni raztopini nastajajo

important that zirconium forms Al_3Zr dispersoids at higher temperatures [4, 5]. These dispersoids considerably decrease the tendency to crystal growth during heat treatment and hot plastic deformation. In this way, zirconium contributes to strengthening of the alloys by dispersion hardening and hardening by crystal grains. Namely, the latter hardening is more important when the crystal grains are fine.

The strengthening effect in Al-Mg-Si alloys is achieved through β' in β'' precipitates. These precipitates are metastable variants of the equilibrium Mg_2Si phase. These precipitates are turned to Mg_2Si when the alloy is held longer times at higher temperatures (between the aging and solvus temperatures). By the addition of copper to Al-Mn-Si we obtain a combination of 6xxx and 2xxx alloy. In these alloys dominates Q-AlCuMgSi and not $\Theta\text{-Al}_2\text{Cu}$, which is predominant in 2xxx alloys. During aging Q' precipitates are formed in the $\alpha\text{-Al}$, which strengthen the matrix in addition to β'' precipitates [6]. By modification of Al-Mg-Si alloys by the additions of zirconium and copper, some strengthening mechanisms are enhanced, leading to tensile strengths close to that of 7xxx alloy, but with much higher toughness.

The main aim of this contribution is to determine in detail the cast microstructure of the novel high-strength Al-Mn-Si alloy that contains zirconium and copper, and to explain the course of solidification on the basis of the experimental results and results of the Scheil solidification model.

2 Experimental work

The alloy was prepared in an induction furnace (Junkers) at temperature of 760 °C. The fraction of zirconium was 0.16 wt.%, which was added with the master alloy

izločki Q', ki poleg faze b'' ae dodatno utrjujejo trdno raztopino [6]. Torej se zaradi dodajanja cirkonija in bakra zlitinam Al-Mg-Si okrepijo mehanizmi utrjanja, kar lahko vodi do nateznih trdnosti, ki so skoraj enakovredne nateznim trdnostim zlitin 7xxx, vendar ob mnogo večji žilavosti.

Glavni cilj tega prispevka je natančno opredeliti lito mikrostrukturo nove visokotrdnostne zlitine Al-Mg-Si (AA 6086), ki vsebuje cirkonij in baker, ter podati potek strjevanja na temelju eksperimentalnih rezultatov in rezultatov modeliranja strjevanja s Scheilovim modelom.

2 Eksperimentalno delo

Priprava taline je potekala v indukcijskih pečeh (Junkers) na temperaturi 760 °C. Delež cirkonija, ki se je dodajal s predzlitino AlZr10, je znašal 0,16 mas. %. Tako pripravljena talina je bila prelita v zadrževalno peč, v kateri je bila 90 min na temperaturi med 730 in 740 °C. Drogove te zlitine s premerom 282 mm smo polkontinuirno lili po postopku HTAS, dodatek AlTi5B1 je bil 3 kg/t taline. Sestava zlitine je v tabeli 1.

Diferenčna termična analiza (DTA) je bila izvedena na napravi Mettler Toledo 851, pri kateri smo v argonu vzorec segrevali in ohlajali s hitrostjo 10 °C/min. Predzlitino AlZr10 ter vzorce v ulitem stanju smo metalografsko preiskali s svetlobnim mikroskopom Nikon EPIPHOT 300 in programsko opremo analySIS ter vrstičnima elektronskima mikroskopoma

AlZr10. The melt was poured into the holding furnace for 90 minutes at temperatures between 730 in 740 °C. The billets with the diameter of 282 mm were semi-continuously cast with a HTAS method. The addition of grain refiner AlTi5B1 was 3 kg/t of melt. The chemical composition of the alloy is given in Table 1.

The differential thermal analysis was carried using Mettler Toledo 851. The sample was heated and cooled with the rate of 10 °C/min. The master alloy AlZr10 and samples in the as-cast condition were metallographically examined using a light microscope Nikon EPIPHOT 300 and software analySIS, and two scanning electron microscopes FEI Helios Nanolab 650 in Sirion 400 NC. In SEMs, we also carried out microchemical analysis using EDS. The x-ray diffraction was done at synchrotron Elettra (Trst, Italy), by using X-rays with a wavelength of 0.099996 nm. A software Thermocalc and database we have simulated solidification according to the Scheil model.

3 Results and discussion

3.1 Metallographic analysis

The microstructure of the master alloy AlZr10 consisted of aluminium solid solution α -Al and particles of the tetragonal Al_3Zr phase, which was in form of platelets (Fig. 2). Their length typically exceeded 200 nm, while their thickness was ten times smaller. X-ray diffraction revealed also the $Al_{13}Fe_4$

Tabela 1. Kemijska sestava modificirane aluminijeve zlitine 6082

Table 1. The chemical composition of the modified 6082 alloy

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr
mas. % wt. %	1.31	0.24	0.25	0.71	0.86	0.16	0.15	0.03	0.16

FEI Helios Nanolab 650 in Sirion 400 NC. Prav tako smo izvedli mikrokemično analizo EDS v vrstičnih elektronskih mikroskopih. Rentgenska fazna analiza je bila narejena na sinhrotronu Elettra (Trst, Italija), pri čemer smo uporabili rentgensko sevanje z valovno dolžino 0,0999996 nm. S programom ThermoCalc in uporabo baze podatkov TCAL5 smo simulirali potek strjevanja po Scheilovem modelu.

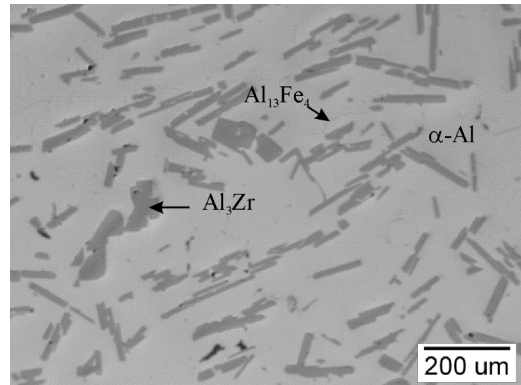
3 Rezultati in diskusija

3.1 Metalografska analiza

Mikrostruktura predzlitine AlZr10 je bila sestavljena iz osnove α -Al in delcev tetragonalne faze Al_3Zr , ki je imela obliko ploščic (slika 2). Dolžina ploščic je večinoma presegala 200 nm, debelina pa je bila okoli desetkrat manjša. Rentgenska fazna analiza je pokazala, da je v predzlitini tudi faza $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ (tabela 2), saj je v predzlitini 0,25–0,30 % Fe.

Na sliki 3 je svetlobnomikroskopski posnetek mikrostrukture zlitine AA 6086, iz

phase (Table 2). Namely, the master alloy contained 0.25-0.30 % Fe.



Sl. 2. Mikrostruktura predzlitine AlZr10 (SM).

Fig. 2. The microstructure of the master alloy AlZr10 (light micrograph).

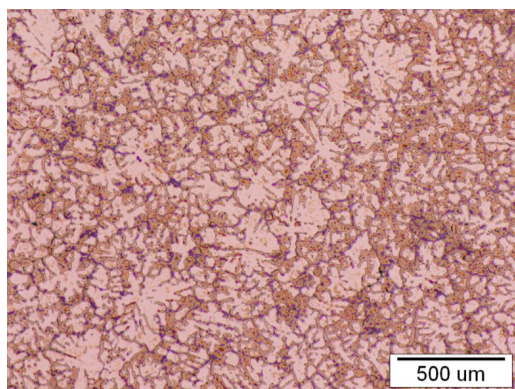
Figure 3 shows a light micrograph of the modified alloy 6082 in the as-cast condition. The microstructure consisted of equiaxed dendritic grains of α -Al. The grain size was 235 μm , determined using the linear

Tabela 2. Mrežni parametri faz v nm v zlitini 6086 (pdf – powder diffraction file)

Table 2. The lattice parameters of phases in a modified alloy 6082, given in nm (pdf – powder diffraction file)

	Glava droga / Head of the bar	Noga droga / Butt of the bar	Predzlitina AlZr10 Master alloy AlZr10
Al, pdf 04-0787	$a = 0,40464 \pm 0,00024$	$a = 0,40480 \pm 0,00012$	$a = 0,40482 \pm 0,00006$
ZrSi_2 , pdf 32-1499	$a = 0,37460 \pm 0,00369$ $b = 1,47837 \pm 0,00688$ $c = 0,36344 \pm 0,00390$	$a = 0,37069 \pm 0,00115$ $b = 1,47500 \pm 0,00246$ $c = 0,36559 \pm 0,00079$	
Mg_2Si , pdf 35-0773	$a = 0,63447 \pm 0,00071$	$a = 0,63489 \pm 0,00059$	
Al_3Zr , pdf 65-5706	$a = 0,40040 \pm 0,00156$ $c = 1,72983 \pm 0,00044$	$a = 0,40125 \pm 0,00147$ $c = 1,73132 \pm 0,00057$	$a = 0,40110 \pm 0,00081$ $c = 1,72727 \pm 0,00024$
alfa-AlMnSi, pdf 87-0528 $\text{Al}_{14,01}\text{MnSi}_{0,74}$	$a = 1,26231 \pm 0,00277$	$a = 1,26364 \pm 0,00091$	
$\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$, pdf 29-0042			$a = 0,77502 \pm 0,00216$ $b = 2,41501 \pm 0,01078$ $c = 0,39955 \pm 0,00190$

katere je razvidno, da je bila mikrostruktura sestavljena iz enakoosnih dendritnih kristalnih zrn aluminijeve trdne raztopine aAl. Velikost kristalnih zrn, opredeljena z linearno metodo, je bila 235 nm. Mikrostruktura glave in noge droga je bila zelo podobna. Pravzaprav nismo mogli najti pomembnih razlik, zato vsi rezultati in razprava veljajo za celotni drog.



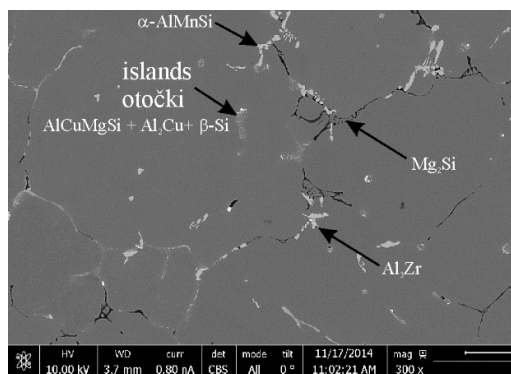
Sl. 3. Lita mikrostruktura zlitine AA 6086, izdelane po postopku HTAS (SM)

Fig. 3. The as-cast microstructure of the alloy Al-Si-Mg, with additions of Zr and Cu, cast by HTAS-method (light micrograph)

Ostale faze so navzoče v meddendritnih prostorih in so jasneje opazne na mikroposnetku z odbitimi elektroni (slika 4). Z različnimi metodami metalografske analize smo identificirali sedem faz: α -AlMnSi, Mg_2Si , Al_3Zr , Si_2Zr , β -Si, Al_2Cu in Q-AlCuMgSi. Od teh je največ faze α -AlMnSi, ki vsebuje še nekaj Fe in Cr. Ta faza je svetlosive barve. Faza Mg_2Si je črna in ima obliko pismenk. Cirkonij je v glavnem vezan v Al_3Zr ter delno tudi v Si_2Zr . Obe fazi sta na mikroposnetkih z odbitimi elektroni najbolj svetli. Dokaz o obstoju obeh faz, ki vsebujeta cirkonij, je na sliki 5, kjer je prikazana porazdelitev elementov

intercept method. The microstructures of the head and bottom of the billets were almost identical, because it was not possible to find important differences. Therefore, all results and discussion are valid for the whole billet.

Other phases that were present in the interdendritic areas are clearly visible in the backscattered electron image (Fig. 4). By using different metallographic techniques, seven phases were identified: α -AlMnSi, Mg_2Si , Al_3Zr , Si_2Zr , β -Si, Al_2Cu in Q-AlCuMgSi. Among these phases, α -AlMnSi prevailed, which contained also Fe and Cr. This phase has a bright-gray colour in Fig. 4. Mg_2Si is black, and has a shape of Chinese script. Zirconium is mainly in Al_3Zr , but also in Si_2Zr . Both phases appeared the brightest in backscattered electron micrographs. A proof for the existence of two phases containing Zr comes from the distribution of alloying elements in Fig. 5. It is clear that Si_2Zr crystalizes on the pre-existing Al_3Zr -particles during solidification. Al_2Cu , β -Si and Q-AlCuMgSi were present in islands formed during the multi-phase



Sl. 4. Lita mikrostruktura zlitine AA 6086, izdelane po postopku HTAS (SEM, slika z odbitimi elektroni)

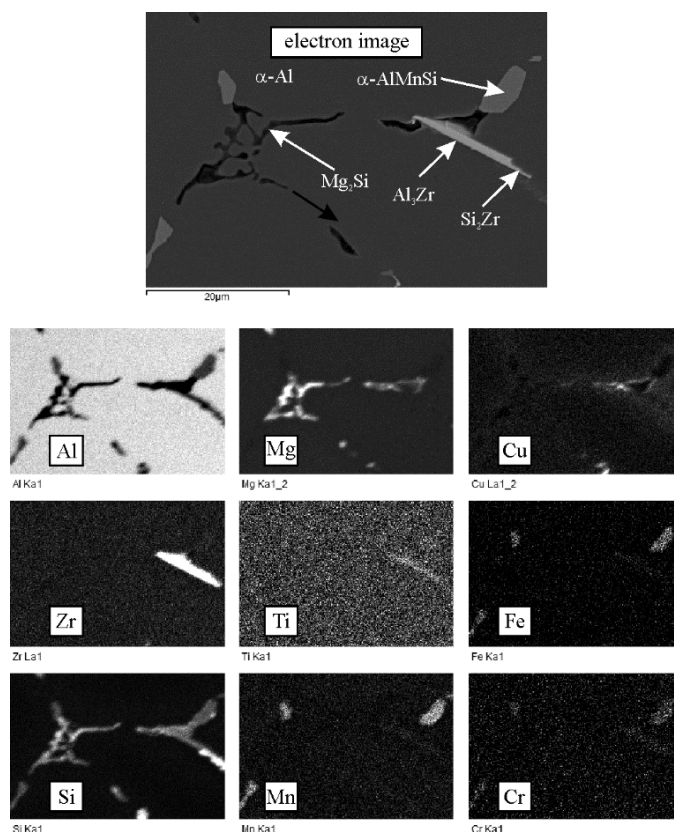
Fig. 4. The as-cast microstructure of the alloy Al-Si-Mg, with additions of Zr and Cu, cast by HTAS-method (light micrograph)

v meddendritnem prostoru. Kaže, da faza Si_2Zr kristalizira na Al_3Zr pri strjevanju. Faze Al_2Cu , $\beta\text{-Si}$ in Q-AlCuMgSi so bile navzoče v otočkih, ki so nastali z večfazno evtektično reakcijo (slika 6).

Z rentgensko fazno analizo (slika 7) smo identificirali in opredelili mrežne parametre za $\alpha\text{-Al}$, tetragonalni Al_3Zr , $\alpha\text{-AlMnSi}$, Mg_2Si in Si_2Zr . Lege vrhov faze AlMgSiCu se skoraj v celoti ujemajo z $\alpha\text{-AlMnSi}$. Ker faza $\alpha\text{-AlMnSi}$ prevladuje, bi na osnovi rentgenske fazne analize težko sklepali, da je v zlitini Q-AlMgSiCu . Pojavi se nekaj manjših vrhov, ki morda pripadajo Al_2Cu . Po drugi strani pa rezultati kažejo,

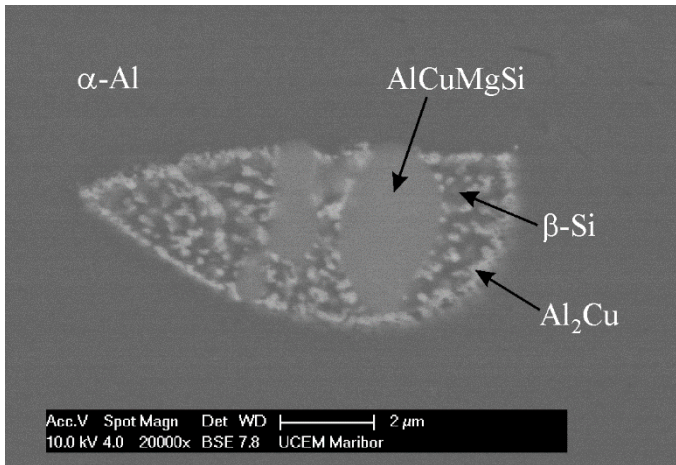
eutectic reaction, taking place during the terminal stages of solidification (Figure 6).

With X-ray diffraction (Figure 7), we have identified $\alpha\text{-Al}$, tetragonal Al_3Zr , $\alpha\text{-AlMnSi}$, Mg_2Si in Si_2Zr , and determined their lattice parameters (Table 2). The peak positions of AlMgSiCu and $\alpha\text{-AlMnSi}$ almost completely coincided. Since the phase $\alpha\text{-AlMnSi}$ prevailed in the microstructure, X-ray diffraction does not give conclusive proof for the presence of AlMgSiCu . There were also few peaks belonging to Al_2Cu . On the other hand, few peaks confirmed the presence of $\beta\text{-Si}$. Nevertheless, the fractions of AlMnSiCu , Al_2Cu and $\beta\text{-Si}$ was very small,



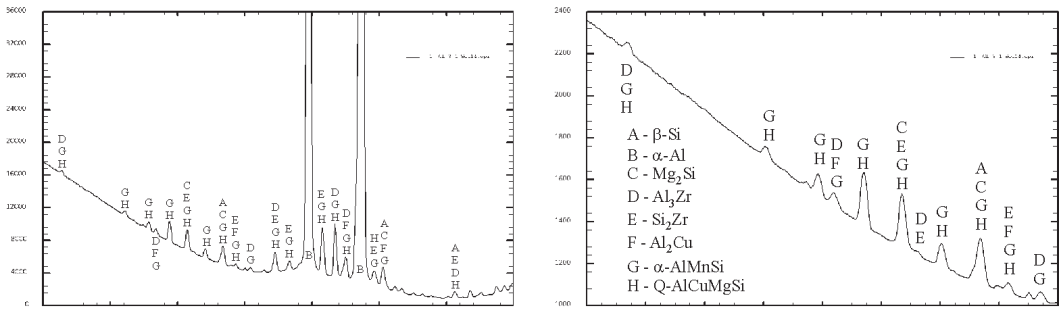
SI. 5. Elektronski mikroposnetek z odbitimi elektroni in porazdelitev elementov v tem območju

Fig. 5. The backscattered electron micrograph and distribution of the elements in the same area



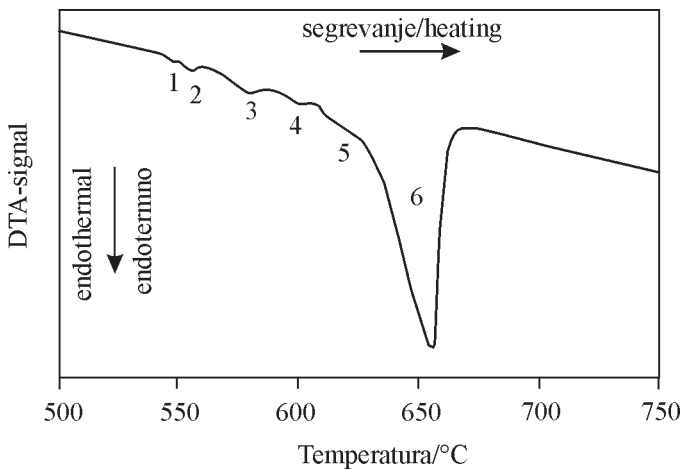
Sl. 6. Elektronski mikroposnetek z odbitimi elektroni območja, ki se je strdilo nazadnje.

Fig. 6. The backscattered electron micrograph of the area, where the last stages of the solidification took place



Slika 7. Rentgenska fazna analiza zlitine 6086 v litem stanju, ki kaže, da se vrhovi več faz prekrivajo.

Fig. 7. X-ray diffraction of the modified alloy 6082, showing that the peaks of several phases coincided



Sl. 8. Segrevalna DTA-krivulja. Začetno stanje je bilo lito stanje, hitrost segrevanja je bila $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$ v argonu

Fig. 8. The heating DTA-curve. The initial condition was as-cast condition, the heating rate was $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$ in argon

da je navzoč tudi manjši delež silicija. Majhne deleži Q-AlMgSiCu, Al_2Cu in b-Si smo potrdili z EDS pri 5 kV. Te faze se lahko brez težav raztopijo pri nadaljnjem homogenizacijskem žarjenju.

3.2 Razvoj mikrostrukture med strjevanjem

Strjevanje pri litju drogov gotovo ne poteka ravnotežno. Veliko bolj je verjetno strjevanje, ki je blizu Scheilovemu modelu [7]. Pri tem modelu se privzame, da ni difuzije v trdnem, medtem ko ima preostala talina homogeno sestavo. Ravnotežje se doseže le na fazni meji trdno-tekoče. Model lahko napove kristalne izceje v trdnih raztopinah in faze, ki nastanejo pri strjevanju. Izračun za dano zlitino je pokazal, da poteka strjevanje preko devetnajstih reakcij, pri katerih se pojavi petnajst trdnih faz. V dejanskih razmerah ni nujno, da bi se pojavile vse faze, ker morda ni pogojev za nastanek vseh faz, poleg tega pa lahko nekatere faze izginejo pri reakcijah peritektičnega in prehodnega tipa. Pri metalografski analizi tudi ne moremo ugotoviti vseh nastalih faz, če je njihov fazni delež zelo majhen. Vse faze, ki smo jih identificirali pri metalografski preiskavi, je napovedal tudi Scheilov model. Faze so se praviloma pojavile v okviru večfaznih reakcij.

Pri segrevanju potekajo reakcije v obratnem zaporedju kot pri ohlajanju. Namig o številu reakcij lahko dobimo pri segrevanju raziskovane zlitine iz začetnega litega stanja. V ta namen smo izvedli DTA-analizo s hitrostjo segrevanja $10\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$, nastala segrevalna krivulja pa je prikazana na sliki 8. Na krivulji je zaporedje številnih vrhov, ki se med seboj deloma prekrivajo; označeni so s številkami od 1 do 6. Največji je vrh 6, pri katerem se pri segrevanju tali a-Al, pri ohlajanju pa a-Al nastane.

thus these phases can easily dissolved during subsequent homogenization.

3.2 Microstructure evolution during solidification

The solidification of the billets definitely does not take place under equilibrium conditions. It is much more probable that the solidification problem is closer to the Scheil model [7]. The Scheil solidification model supposes that there is no diffusion in the solid state, and that the remaining liquid possesses the homogeneous chemical composition. The equilibrium is attained only at the solid-liquid interface. The model can predict the microsegregation in the solid solutions and phases that can form during solidification. The calculation for the present alloy has shown that the solidification process should take place over 19 reactions, and that 15 different solid phases can form. It is not necessary that during solidification all predicted phases appear, and it is even less probable that all appear in the as-cast microstructure. Namely, some phases do not have convenient conditions for their nucleation, while some phases can disappear during peritectic and transition reactions. In addition, if the volume fraction of a phase is very small, it is difficult to identify it using metallography. It is important to stress that all experimentally identified phases were predicted by the Scheil solidification model. These phases usually appeared by the multiphase reactions.

During segregation, the reactions take place in the opposite order than upon cooling. An indication about the number of reactions can be obtained by heating of the investigated alloy from the initial as-cast condition. For that purpose, a DTA-analysis was carried out at the heating rate of $10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Kot omenjeno, strjevanje poteka v nasprotni smeri. Od faz, ki smo jih našli v mikrostrukturi, se prvi pojavi tetragonalni Al_3Zr pri temperaturi nekoliko nad 700°C . Torej nastane Al_3Zr kot primarna trdna faza. Na DTA-krivulji ni ustreznega vrha, povsem mogoče zato, ker je fazni delež Al_3Zr zelo majhen. Pri približno 640°C nastane $\alpha\text{-Al}$, s peritektično reakcijo, pri kateri talina reagira z Al_3Zr (vrh 6). V ravnotežnih razmerah bi se moral Al_3Zr popolnoma porabiti. Na nekaterih delcih Al_3Zr se morda nukleira $\alpha\text{-Al}$, medtem ko ostale delce Al_3Zr rastoči dendriti $\alpha\text{-Al}$ potiskajo v preostalo talino; to je v bistvu v meddendritni prostor, v katerem najdemo Al_3Zr po strjevanju.

Faza $\alpha\text{-AlMnSi}$ začne nastajati z evtektično reakcijo pri približno 630°C . Pri tem se vrh 5 prekriva z mnogo večjim vrhom 6, tako da vrh 5 ni samostojen. Pri vrhu 4 se pojavi faza Si_2Zr , ki delno prekrije ploščice Al_3Zr (glej sliko 5). Vrh 3 je povezan z nastankom faze Mg_2Si . Ta raste v okviru heterogenega zloga skupaj z $\alpha\text{-Al}$. Čeprav se hkrati z Mg_2Si izloča še več faz, raste lokalno ločeno in ima videz binarnega evtektika, v katerem ima faza Mg_2Si obliko pismenk. Pri vrhu 2 nastane v zadnjih območjih preostale taline faza Q-AlCuMgSi , povsem na koncu pa še fazi $\beta\text{-Si}$ in Al_2Cu (vrh 1). Obe fazi nastaneta pri večfaznih evtektičnih reakcijah, ki so značilne za zaključke strjevanj v večkomponentnih sistemih.

S kombinacijo metalografske analize litega stanja, termične analize in Scheilovega modela strjevanja lahko racionalno razložimo potek strjevanja sodobne večkomponentne zlitine.

min^{-1} , and the DTA heating curve is shown in Fig. 8. The curve shows the sequence of several peaks that partly overlap. They are indicated by numbers from 1 to 6. The highest is the peak 6. This peak is caused by melting of $\alpha\text{-Al}$, however, during cooling $\alpha\text{-Al}$ is formed.

As mentioned before, the solidification takes place in the opposite direction. Among the phases that were identified in the microstructure, the first phase that appears in the tetragonal Al_3Zr that should form at temperature slightly above 700°C . Therefore, Al_3Zr forms as a primary phase. DTA-curve does not indicate any corresponding peak. It is likely that the volume fraction of Al_3Zr is too small. At around 640°C forms $\alpha\text{-Al}$, via a peritectic reaction, at which the liquid phase reacts with Al_3Zr (peak 6). Under equilibrium conditions, all $\text{V Al}_3\text{Zr}$ should be consumed. The aluminium grains $\alpha\text{-Al}$ may form on some Al_3Zr -particles, while other remaining Al_3Zr are pushed by the growing dendrites into the remaining liquid; that is in the interdendritic regions, where Al_3Zr is found after solidification.

Phase $\alpha\text{-AlMnSi}$ starts to form around 630°C by a eutectic reaction. The peak 5 overlaps by the much greater peak 6; therefore, peak 5 is not standalone. At peak 4, appears Si_2Zr that partly covers Al_3Zr platelets (see Figure 5). Peak 3 is related to the formation of Mg_2Si . This phase grows in the form of heterogeneous microstructural constituent together with $\alpha\text{-Al}$. In spite of the fact that several phases crystallize from the liquid together with Mg_2Si , Mg_2Si grows together with $\alpha\text{-Al}$ in separate regions as a binary eutectic, and has the shape of Chinese script. Peak 2 indicates the formation of Q-AlCuMgSi . At the terminal stages of solidification form also $\beta\text{-Si}$ in Al_2Cu (peak 1). Both phases formed by multiphase eutectic reactions that are

4 Zaključki

Z raziskavo nove aluminijeve zlitine AA 6086, smo prišli do naslednjih zaključkov:

- mikrostruktura je bila sestavljena iz enakoosnih kristalnih zrn aluminijeve trdne raztopine aAl ter različnih mikrostrukturnih sestavin v meddendritnih prostorih in po kristalnih mejah;
- v meddendritnem prostoru smo identificirali sedem faz: α -AlMnSi, Mg_2Si , Al_3Zr , Si_2Zr , β -Si, Al_2Cu in Q-AlCuMgSi;
- največ je bilo faze α -AlMnSi, ki je vsebovala še nekaj Fe in Cr. Faza Mg_2Si ima obliko pismenk. Cirkonij je v vezan v Al_3Zr in v Si_2Zr ;
- faze Al_2Cu , β -Si in Q-AlCuMgSi so nastale z večfazno evtektično reakcijo preostale taline ob zaključku strjevanja;
- proces strjevanja poteka preko šestih stopenj. Faze, ki smo jih identificirali, smo napovedali s Scheilovim modelom strjevanja. Vseh faz, ki jih je napovedal Scheilov model strjevanja, pa nismo odkrili v mikrostrukturi.

Zahvala

Delo je bilo izvedeno v okviru Slovenske pametne specializacije, program Materiali in tehnologije za nove aplikacije, MARTINA, OP20.00369, in infrastrukturnega programa UM I0-0029, ki ga financira ARRS. Zahvaljujemo se Sincrotrone Elettra, Trst, Italija in Luisi Barba za izvedbo rentgenske fazne analize.

typical for the final stages of solidification in multi-component systems.

The combination of the metallographic analysis of the as-cast condition, thermal analysis and Scheil solidification model allowed us to rationally explain the solidification of a modern multicomponent aluminium alloy.

4 Conclusions

The investigation of the alloy Al-Mg-Si, modified by zirconium and copper, lead us to the following conclusions:

- The as-cast microstructure consisted of equiaxed dendritic grains of aluminium solid solution α -Al and different microstructural constituents in the interdendritic regions and crystal grains.
- We have identified seven phases in the interdendritic regions: α -AlMnSi, Mg_2Si , Al_3Zr , Si_2Zr , β -Si, Al_2Cu in Q-AlCuMgSi.
- The phase α -AlMnSi prevailed; containing also Fe in Cr. Mg_2Si had a form of Chinese script. Zirconium was present in Al_3Zr and Si_2Zr .
- Al_2Cu , β -Si in Q-AlCuMgSi formed via multi-phase eutectic reaction during terminal stages of solidification.
- The solidification process took place over six stages. The Scheil solidification model predicted the phases that were identified in the microstructure. On the other hand, not all phases were found in the microstructure that were predicted by the Scheil model.

Acknowledgments

The work was carried out in the framework of the Slovenian smart specialization, programme Materials and Technologies for New Applications, MARTINA, No. OP20.00369 and Infrastructure programme

UM IO-0029 financed by the National Research Agency ARRS.

Reference / References

1. H.J. McQueen, O.C. Celliers, Application of hot workability studies to extrusion processing .3. Physical and mechanical metallurgy of Al-Mg-Si and Al-Zn-Mg alloys, Can. Metall. Q., 36 (1997) 73-86.
2. Y. Himuro, K. Koyama, Y. Bekki, Precipitation behavior of zirconium compounds in Zr- bearing Al-Mg-Si alloy, in: W.J. Poole, M.A. Wells, D.J. Lloyd (Eds.) Aluminium Alloys 2006, Pts 1 and 2: Research through Innovation and Technology, Trans Tech Publications Ltd, Zurich-Uetikon, 2006, pp. 501-506.
3. R. Vertnik, M. Založnik, B. Šarler, Solution of transient direct-chill aluminium billet casting problem with simultaneous material and interphase moving boundaries by a meshless method, Engineering Analysis with Boundary Elements, 30 (2006) 847-855.
4. L. Li, Y. Zhang, C. Esling, H. Jiang, Z. Zhao, Y. Zuo, J. Cui, Crystallographic features of the primary Al₃Zr phase in as-cast Al-1.36wt% Zr alloy, Journal of Crystal Growth, 316 (2011) 172-176.
5. L. Litynska, D. Abou-Ras, G. Kostorz, J. Dutkiewicz, TEM and HREM study of Al₃Zr precipitates in an Al-Mg-Si-Zr alloy, Journal of Microscopy-Oxford, 223 (2006) 182-184.
6. D.J. Chakrabarti, D.E. Laughlin, Phase relations and precipitation in Al-Mg-Si alloys with Cu additions, Prog. Mater. Sci., 49 (2004) 389-410.
7. M. Pellizzari, Thermodynamic modeling for the alloy design of high speed steels and high chromium cast irons, Mater. Tehnol., 44 (2010) 121-127.

AKTUALNO / CURRENT

Koledar livarskih prirediteljev 2019 in 2020

Datum dogodka	Ime dogodka	Lokacija
18.-20.09. 2019	WFO-Technical Forum in 59. IFC Portorož 2019	Portorož, Slovenija
26.-27.09. 2019	Metallurgie-Kolloquium 2019	Clausthal-Zellerfeld, Nemčija
26.-30.11. 2019	Online Kongress "Einkauf 4.0" http://einkauf4.lpages.co/kongres	Preko spleta
11.-12.12. 2019	Formstoffbedingte Gussfehler (Seminar)	Düsseldorf, Nemčija
12.-13.12. 2019	Digitale Lösungen für Gießereien (Seminar)	Mainz, Nemčija
18.-19.12. 2019	Werkstoffkunde der Gusseisenwerkstoffe (Seminar)	Düsseldorf, Nemčija
14.-16.01. 2020	Euroguss internationale Fachmesse für Druckguss	Nürnberg, Nemčija
27.01. 2020	OÖ Gießereiindustrie-Treffen	Vöcklabruck, Avstrija
15.-19.06. 2020	AMB-Internationale Ausstellung für Metallbearbeitung	Stuttgart, Nemčija
18.-22.10. 2020	75 th World Foundry Congress	Busan, Južna Koreja

AKTUALNO / CURRENT

Razgovor z direktorjem PE HIDRIA ALUTEC HIDRIA d. o. o., g. Martinom Hladnikom



Martin Hladnik

Martin Hladnik dipl. ekon.(UN), sedanji direktor Poslovne enote Hidria Alutec je svojo kariero v Hidrii začel leta 2004 kot prodajnik v poslovni enoti livarstvo, bil nato vodja projektov in kasneje prevzel vodenje prodaje. Leta 2010 je postal vodja lokacije Koper in jo vodil do leta 2014, ko je za štiri leta odšel iz livarstva in kot direktor vodil PE Lamtec Slovenija, ki se ukvarja s hitrohodnim štancanjem elektro pločevine. Vodenje poslovne enote Hidria Alutec je prevzel julija 2018. Je poročen in oče treh odrasčajočih deklet, s prijatelji pa se redno udeležuje jadrskih regat tako v Sloveniji kot v sosednjih državah.

1. HIDRIA d. o. o. ima dokaj kompleksno organizacijsko obliko: HIDRIA Holding d. o. o. z nadzornim svetom korporacije ter njegovim vodstvom, ki odgovarja za korporativno vodenje in strategijo holdinga ter HIDRIA d. o. o. s korporativno odgovornostjo vodstva posameznih področij korporacije v kateri deluje 6 poslovnih enot (PE) in 2 kompetenčna centra. Kot samostojna enota je tako tudi PE Hidria Alutec v katerem delujeta tudi obe livarski proizvodni lokaciji v Spodnji Idriji ter v Kopru, kjer proizvajajo aluminijaste dele za krmilne in pogonske sisteme. Ali je taka organizacija po Vašem mnenju smiselna in učinkovita in kje vidite prednosti PE Hidria Alutec v tem sistemu globalne korporacije?

Organizacijska oblika je na prvi pogled res dokaj kompleksna. Na drugi strani je potrebno razumeti strategijo korporacije, ki se je že pred letom 2000 odločila za diverzifikacijo svojega poslovanja. Med leti 2000 in 2010 je sledilo obdobje intenzivne diverzifikacije, ki je privedla celo do prevelike razpršitve poslovanja, kar je vodstvo podjetja spremenilo v zadnji 10 letih, ko so se odprodale določene (ne)strateške investicije. Na ta način se je dosegla željena razpršenost poslovanja pri čemer so poslovne enote precej raznovrstne in hkrati tudi relativno samostojne ter posledično odgovorne za definicijo strategije razvoja poslovne enote in njeno izvedbo.

2. Podjetje ima veliko livarsko tradicijo in znanje ter je povezano s kompetenčnimi in razvojnimi centri korporacije tako, da lahko izdeluje najzahtevnejše tlačno lite dele iz Al-zlitin. Ali lahko podate osnovne podatke o količinski proizvodnji PE Hidria Alutec v zadnjih petih letih?

Količinska rast proizvodnje izdelanih Al-ulitkov je v petletnem obdobju 2014-2018 porasla za 41,1%. Leta 2014 je znašala letna proizvodnja: 4.500 ton in je potem po letih imela stalen porast: leta 2015: 5.100 ton ; leta 2016:5.500 ton; leta 2017:5.700 ton in leta 2018: 6.350 ton.



Sl. 1. Skupina ulitkov iz Al-zlitin, komponente namenjene za volanske sisteme, izdelane v PE Hidria Alutec s postopkom visokotlačnega litja (avtor slike Robert Zabukovec)

3. Proizvodnja zahtevnih in kakovostnih Al ulitkov zahteva visoko kvalificiran kader v sami neposredni proizvodnji ter seveda inženirski kader, ki sledi razvojnim tendencam in vsem zahtevam sodobne tehnologije ter računalniškega spremljanja procesov in kontrole izdelkov. Kako je z zagotavljanjem tega kadra ter njihove zmožnosti vodenja postopkov, kontrole izdelkov in stalnega sodelovanja z zahtevnimi odjemalci?

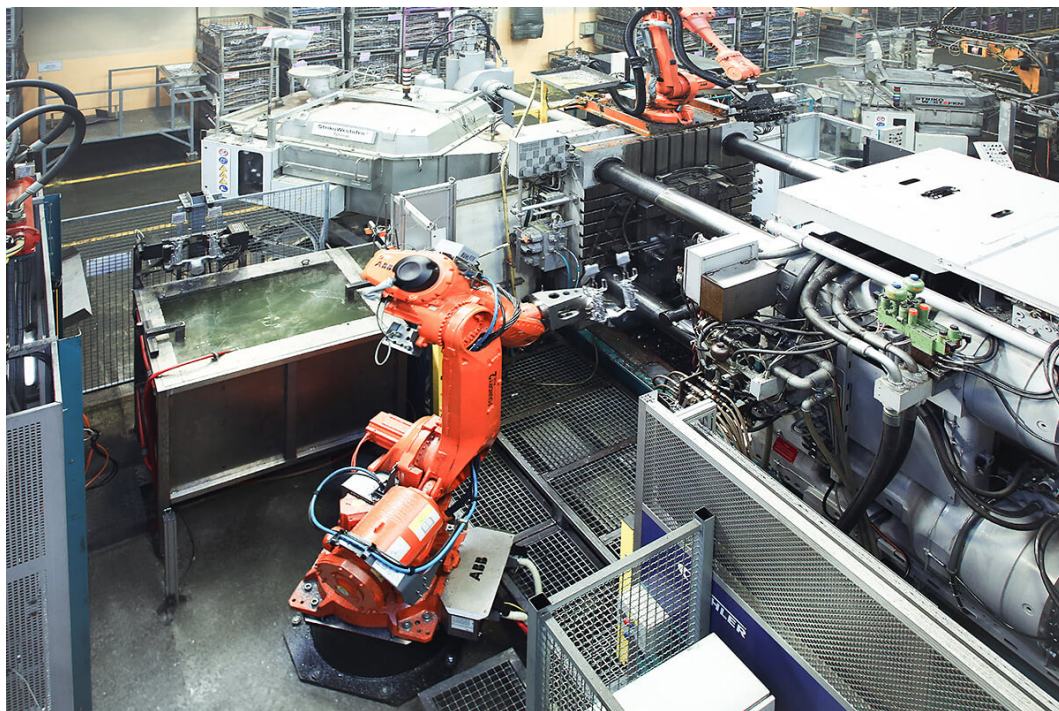
Naša dejavnost je razporejena na dve lokaciji (Sp. Idrija in Koper). Na Idrijskem ne širimo več svoje proizvodnje in smo kljub manjšemu naboru potencialnega kadra zmožni zagotavljati ustrezno strukturo zaposlenih. Večjo plansko ekspanzijo smo v zadnjih letih imeli na lokaciji v Kopru. Na tem delu Slovenije nimamo večjih težav s pridobivanjem kadra (tako kvalificiranega kot nekvalificiranega). Seveda pa sam pritok kadra še ni dovolj za uspešno poslovanje podjetja. Ključnega pomena je strokovno usposabljanje kadra po prihodu v podjetje in zagotavljanje delovanja procesov v podjetju ob čim manjših izgubah.



Sl. 2. Skupina ulitkov iz Al-zlitin, komponente za pogonske in hibridne agregate, izdelane v PE Hidria Alutec, s postopkom visokotlačnega litja (avtor slike Robert Zabukovec)

4. Kateri so bili v zadnjih petih letih na področju izdelave in obdelave vaših ulitkov najpomembnejši razvojni dosežki?

V zadnjih petih letih smo intenzivno rasli na račun močnega nemškega gospodarstva, na katerega smo tudi najbolj vezani. V tem času smo ogromno investirali v razširitev proizvodnih kapacitet. Najbolj pa smo ponosni na napredek pri digitalizaciji in avtomatizaciji proizvodnje. Uvedli smo prve robotske celice za čiščenje ulitkov, avtonomna vozila za posluževanje mehanske obdelave, povezali procese s pomočjo DMC kod in zapisov parametrov v SQL baze.



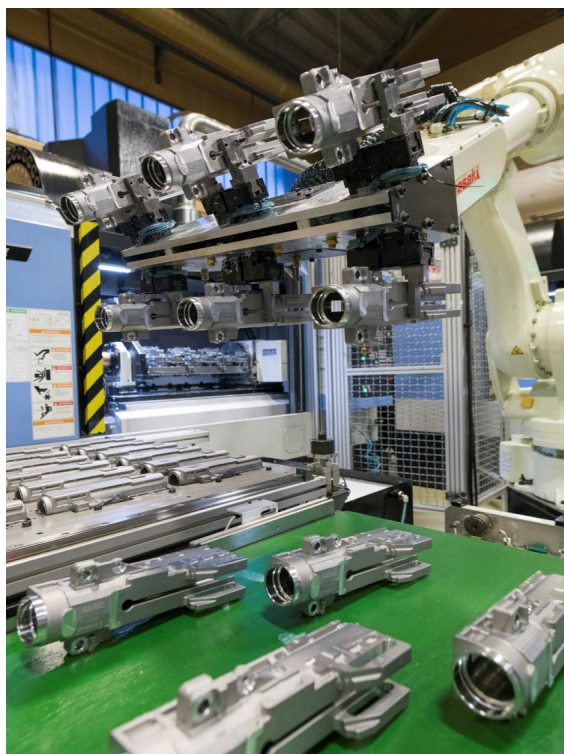
Sl. 3. Sodobna celica za visokotlačno litje Al-zlitin v PE Hidria Alutec , v celoti robotizirana (avtor slike Robert Zabukovec)

5. Usmeritev slovenskih livarn bi morala biti v tehniško zahtevnih, termično, mehansko in površinsko obdelanih ulitkih kot sestavnih in kompleksnih delov za neposredno vgradnjo v končne izdelke. Ali lahko navedete primere takih dosežkov v PE Hidria Alutec?

Livarne po svetu imajo tehniško gledano različne usmeritve. Naša vizija je proizvajati visoko zahtevne ulitke s kompleksno mehansko obdelavo. V to verjamemo in tega se poskušamo v čim večji meri držati. To vsak dan dokazujemo tudi z izdelki, ki jih proizvajamo v naših tovarnah. Namesto izpostavljanja konkretnih primerov dobrih praks bo bolj zgovoren podatek, da z našega vidika manj kot 10% prodaje predstavljajo izdelki, ki se ne skladajo z našo vizijo oz. so »enostavnejši« kot bi si želeli.

6. Livarna v Spodnji Idriji je kot sestavni del Rotomatike bila v stalnem razvoju in obvladovanju najzahtevnejših ulitkov. Kako pa je z livarno v Kopru? Kašno je bilo njeno stanje in kako je z njenim razvojem?

Livarna v Kopru ima dolgo livarsko tradicijo. Najprej proizvodnja odlitkov za Tomos, nato je prišlo do joint-venture sodelovanja med Tomosom in AluSwiss-om, ki je po nakupu AluSwiss-a s strani Alcana postal joint-venture podjetij Alcan-TomoS. Že pred letom 2000 so se tako v podjetju proizvajali zahtevni ulitki za avtomobilsko industrijo. Livarna je takrat poleg aluminijevih zlitin ulivala tudi magnezijeve zlitine. Enovita poslovna enota smo postali leta 2007, ko je takratna Hidria Rotomatika, prevzela 100% delež v do tedaj joint-venture podjetju, ki je že bilo 30% v lasti Hidrie. Takrat smo pričeli s poenotenjem vseh procesov v podjetju in tranzicijo uspešno zaključili. Od takrat



Sl. 4. Pogled na robotizacijo mehanske obdelave ulitkov v PE Hidria, avtor slike Robert Zabukovec)

smo v koprsko livarno intenzivno vlagali in stalno posodabljali portfelj izdelkov. Danes lahko trdimo, da imamo dve tehniško dobro opremljeni livarni, ki sta s svojim kompetentnim kadrom sposobni izdelovati kompleksne izdelke. V Spodnji Idriji smo se zaradi manjših prostorskih možnosti osredotočili na izdelavo manjših produktov, medtem ko smo večje stroje in izdelke skoncentrirali v Kopru.

7. Konkurenčnost livarn na globalnem trgu zahteva tudi stalna vlaganja v tehnološki razvoj, sodobno opremo, laboratorije, informacijski sistem. Lahko navedete vrednost finančnih vložkov v PE Hidria Alutec v zadnjih petih letih?

Zavedamo se, da smo v kapitalno intenzivni panogi, zato v podjetje konstantno vlagamo preko 10% od vrednosti prodaje izdelkov.

8. Livarska industrija zahteva tudi vse večjo skrb za zagotavljanje osnovnih pogojev dela v samih proizvodnih obratih, kot seveda zagotavljanje vseh pogojev za nadzor emisij in okoljevarstvenih standardov. Kako so te zahteve rešene v PE Hidria Alutec?

Delujemo v panogi, ki je gledano z vidika okolja potratna predvsem z vidika porabe energentov. Na strani emisij veljajo stroga pravila, ki se jih je enostavno potrebno držati, na trgu dela pa velja relativno prost pretok ljudi. Skrb za čisto okolje in ustvarjanje atraktivnih delovnih mest je za nas nekako sam po sebi umeven.

9. R&R dejavnost je osnova vsakega razvoja. Ob tem je za konkurenčnost na trgu najzahtevnejših delov za avtomobilsko, strojno in elektro industrijo potrebno ob sodelovanju s kompetenčnimi centri Hidrie, tudi sodelovanje z univerzami in raziskovalnimi inštituti. Ali je PE Hidria Alutec vključena v ta sodelovanja in mogoče lahko navedete nekaj primerov tega sodelovanja?

10. Računalniško krmiljenje in vodenje procesov, avtomatizacija postopkov, robotizacija ter 100% kontrola dimenzij, lastnosti in kakovosti izdelanih ulitkov, je predpogoj za izpolnitev vseh pogojev najzahtevnejših kupcev in stalnih partnerstev. Kako zahtevam Industrije 4.0 sledi PE Hidria Alutec?

S prvimi DMC kodami na izdelkih smo z namenom zagotavljanja sledljivosti pričeli že pred več kot 10 leti. Danes omenjen sistem nadgrajujemo s sledenjem parametrom in dejanskim povezovanjem le teh tudi med procesi ter v povezavi z meritvami. Že dolgo se zavedamo, da je dimenzijska ustreznost osnovno zagotovilo osnovo za prevzem izdelka.



Sl. 5. Končna kontrola in kontrola tesnosti volanskih gredi v PE Hidria Alutec (avtor slike Robert Zabukovec)

11. Katere so osnovne smernice usmeritve PE Hidria Alutec v obdobju prihodnjih 5 let?

Po obdobju intenzivne rasti je vedno smiselno najprej zajeti sapo. Postopno ohlajanje gospodarstva, ki ga skozi znižana naročila do neke mere čutimo nam daje priložnost, da se nekoliko umirimo, premišljeno uredimo ter počistimo neučinkovitosti, ki jih s seboj prinese taka rast. Ocenjujemo, da nam bodo tudi v prihodnjih 5 letih glavnino posla predstavljale komponente za volanske sisteme. Vzporedno pa se prodajno že oziramo za posli v šele prihajajočih branžah. Posli iz področja elektromobilnosti kamor se do neke mere podajamo imajo specifično relativno počasne ramp-up krivulje. Posledično zahtevajo zelo resen in dosleden pristop s končnim ciljem biti globalno konkurenčen.

Razgovor vodil in pripravil:
zasl. prof. dr. Alojz KRIŽMAN
glavni in odgovorni urednik Livarskega vestnika

AKTUALNO / CURRENT



63. avstrijsko livarsko posvetovanje

V organizaciji Avstrijskega livarskega inštituta ÖGI Leoben, Katedre za livarstvo Montanistične univerze Leoben in Društva avstrijskih livarskih strokovnjakov Proguss, je bilo v času 11.-12. Aprila 2019 v Kongresni dvorani v Schladmingu, Avstrija, organizirano tradicionalno 63. Avstrijsko livarsko posvetovanje z motom: Spreminjanje livarne z digitalizacijo. Posvetovanja se je udeležilo 253 udeležencev iz skupaj šestih držav. Predstavitve so bile razdeljene v naslednje skupine: plenarna predavanja (skupaj 9), strokovna predavanja - lito železo (skupaj 7), strokovna predavanja – zlitine neželeznih kovin (skupaj 7). Skupaj je bilo tako predstavljenih 23 raziskovalnih in razvojnih dosežkov, skladno z zastavljeno tematiko. Na spremljajoči razstavi opreme, tehnologij, izdelkov, razvojnih dosežkov in strokovne literature je sodelovalo 24 razstavljalcev iz Nemčije, Avstrije, Švice in Slovenije. Organizatorji so za udeležence posvetovanja pripravili zbornik s povzetki vseh predavanj in seznamom vseh udeležencev. Podajamo kratek osnovni vsebinski pregled vseh predavanj.

Plenarna predavanja:

- **Bernd Oberdorfer** iz **Avstrijskega Livarskega Inštituta, Leoben, Avstrija**, je s soavtorji, D.Habe (Avstrijski livarski inštitut Leoben, Avstrija), A.H.Steinlechner, G.Haaser, M.Schwärzler, S. Maierhofer (vsi VRVis GmbH, Wien) predstavil zelo aktualno temo: **»Neposredna in interaktivna analiza podatkov računalniške tomografije(CT) in vizualizacija na osnovi virtualne realnosti«**. Zaradi kompleksnosti ulitkov so raziskave s CT zaradi zelo enostavnih globalnih hitro delujočih algoritmov pogosto nejasne. Kot alternativo za raziskave poroznosti in vizualizacijo napak so razvili poseben adaptivni segmentacijski algoritem, ki omogoča s hitro nastavljenim parametrom, nastavitve lokalnih vrednosti. S tem je možno dobiti natančnejše analize, saj interakcija poteka preko zaznanih značilnih oblik lot so: volumen, površina in sivi kontrasti. S tem dodatnim interaktivnim ločevanjem je možna hitrejša detekcija napak. Ta vizualizacija je eksperimentalno omogočena tudi z uporabo 3D - podatkovnih očal, kar prestavlja dodatno vrednost pri zelo kompleksnih ulitkih, kjer želimo določiti natančna mesta napak.

Pascha Soufi Siavoch, iz podjetja **Trusted Cyber Security Solutions GmbH, Dunaj, Avstrija**, je podal razmišljanja o vse pomembnejši problematiki: **»Pomembnost znanja iz sveta kibernetске varnosti, industrija 4.0 kot poziv za IT-varnost«**. Kibernetiski kriminal je zelo resna nevarnost za vsako podjetje. Grozijo: finančne škode, industrijsko vohunjenje, prekinitev proizvodnje, izguba reputacije in osebne odgovornosti. Popolne varnosti ni. Pri tem ne gre le za vprašanje varnosti pred zunanjimi vdori, temveč tudi za varnost v samem podjetju. Ob tem sta v stalnem tekmovanju napadalec in skrbnik rešitev kibernetске varnosti. Sočasno morajo podjetja investirati v industrijo 4.0 in je nevarnost kriminalnih vdorov še toliko večja. Odgovornost za varovanje je izključno pri vodilnem kadru industrijskih podjetij, ki mora resno pristopiti tudi k managementu varovanja.

Peter Berger, je kot predstavnik podjetja **KEY CONSULT Unternehmensberatung, Dunaj, Avstrija**, izpostavil vse resnejše zahteve po razvoju livarn s predavanjem: **»Inovacije v livarni-strategija & zahteve«**. Veliko podjetij je pred problemom odločitve katere R&R projekte podpreti in kateri projekti niso donosni. Izpostavlja se vprašanje kako pri inovacijskem ciklu več kot eno leto in času vrnitve vložka 5-7 let, izbrati in realizirati projekte. Ob tem se vedno izpostavljajo vprašanja od bazičnih raziskav v razvoj materialov, optimizacije postopkov, do sistemsko-tehniških vprašanj. Izpostavljeno je vedno vprašanje strateške relevantnosti projektov in resursov podjetja. Prikazan je bil inovacijski model portfelja na osnovi katerega se naj podjetje odloča. Odločitve je možno sprejemati le na zelo kompleksni osnovi. Potrebna je vodilna mapa tehnoloških rešitev, ki je osnova za strateško relevantno in moč resursov in omogoča odločitve o prioriteti projektov.

Matthias Steinbusch, predstavnik podjetja **Voxeljet AG, Friedberg, Nemčija**, je s soavtorjem **H.Spiegel, Westcam Datentechnik GmbH, Mills, Avstrija**, podal predavanje, ki je kot tehnološka alternativa vse bolj zanimiva za livarstvo: **»Nepredstavljivo narediti preprosto, 3D-tiskanje v livarski industriji kot odločujoča konkurenčna prednost«**. Pojem 3D-tiskanje zajema danes veliko različnih tehnologij in izdelovalnih postopkov, ki se zelo hitro dopolnjujejo in razvijajo v možnost implementacije v serijski proizvodnji, kar ustvarja nove priložnosti in alternative tudi v livarstvu. Razen tega 3D-tiskanje form in jeder z inovativnimi materiali za formanje predstavlja novo perspektivo. Velika pozornost je ob tem dana tudi kakovostno visoko vrednim izdelkom, ki jih lahko v časovno kratkem roku izdelajo za končne odjemalce.

H.Piringer, iz podjetja **VRVis GmbH, Dunaj, Avstrija** je podal predavanje: **»Pridobivanje novih spoznanj iz procesnih podatkov in podatkov kakovosti s pomočjo vizualne analitike«**. Podjetje VRVis je center za raziskave virtualne realnosti in vizualizacije. Digitalizacija postaja tudi v livarski tehniki glavna tema. Podatki iz samega livarskega procesa vsebujejo namreč veliko podatkov, ki omogočajo zelo koristne informacije o vplivu procesnih parametrov kakovosti izdelkov in s tem lahko dobimo tudi osnovo za izboljšanje kakovosti ulitkov. V praksi je seveda veliko ovir za koriščenje teh podatkov. Ob tem je prav tako ovira za sodobno analitiko tudi enostaven software, ki ga imajo livarne. Enako bi analize iz razpoložljivih sedanjih podatkovnih baz bile zelo dolgotrajne in s tem drage. Znanstveniki iz področja obdelave podatkov pa lahko z novimi algoritmi pripomorejo k hitrejši obdelavi najpomembnejših podatkov. Gre za postopek inovativne analize podatkov ob sodelovanju livarskih ekspertov in podatkovnih znanstvenikov, kar iz stroškovnega vidika predstavlja lahko najboljšo kombinacijo za optimizacijo tehnologije v livarnah. Demonstriran je bil primer take možnosti.

Peter Weiderer iz podjetja **Hubert Lang, BMW Group, Landshut, Nemčija**, je ob vseh hitrih tehniških spremembah podal zelo zanimivo temo: **»Učenje o stroju v livarni«**. Z industrijo 4.0 se proizvodnja bistveno spreminja. Za analizo in vrednotenje procesnih podatkov ima izraz učenje o stroju vse večjo vlogo. Pri livarskih procesih imamo zaradi kompleksnosti fizikalnih postopkov veliko število parametrov in senzorskih signalov, ki lahko vplivajo na kakovost ulitkov. Zaradi razumevanja medsebojnih vplivov vseh parametrov in signalov, je potrebno zelo dobro razumevanje stroja in algoritmov o medsebojnih vplivih. Samo zelo dobro razumevanje vseh medsebojnih odnosov lahko omogoča celovit nadzor stroja in obvladovanje napak v ulitkih. Predstavljen je bil projekt takšnega sistema na primeru gravitacijskega litja. V kokilo so bili vgrajeni termo senzori za termično kontrolo procesa. Algoritem nam računalniško omogoča kontrolo sprememb vseh senzorskih podatkov. S tem so podane popolnoma nove možnosti analize procesnih podatkov in optimizacije procesa.

Dario Stojičić iz podjetja **ABB AG, Wiener -Neudorf, Avstrija**, je skladno z motom posvetovanja podal predavanje: **»Robotika ob sodelovanju vizija pri ABB«**. Človek in robot bosta ob nadaljnji robotizaciji dejansko morala postati sodelavca in bosta ob istem času in v skupnem delovnem prostoru morala sodelovati v fleksibilnem in varnem procesu dela kot YuMiR-You and Me. Podani so primeri: 1.Koeksistence dveh robotov, 2.YuMi, ki poslužujeta eden preizkusno napravo in drugi stroj za litje. Oba sta pozicionirana na določenem mestu.

Kooperacija dveh robotov, ki skrbita eden za vnos, drugi za odvzem. 3. Kolaboracija kot primer: posluževalec in robot delujeta skupaj pri montaži vtičnic, vsak z določenim opravilom.

Erik Petraschek, lastnik podjetja **Heuschkel Druckguss, GmbH, Nürnberg, Nemčija**, je predstavil primer celovite transformacije podjetja: **»Od obrtnika do sodobnega industrijskega obrata - popolna prenova po prevzemu novega lastnika«**. Podjetje Auxeos GmbH je leta 2014 prevzelo dotedanjo livarno Heuschkel Druckguss GmbH in takoj sprejelo strategijo prenove v sodoben industrijski objekt. V začetku je bila postavljena jasna predispozicija prenove: manjši ulitki - srednje velike serije - visoka tehnološka raven - pozicioniranje na določenem tržišču. Prevzemnik je izpostavil tudi skupne vrednote: razvoj, izdelava prototipov, izdelava orodij, tehnologija tlačnega litja, obdelava ulitkov, izdelava sklopov. Ob tem so v skupnem interesu izpostavili: tehniško svetovanje, IATF – certifikacijo (mednarodni standard za avtomobilsko industrijo), projektni management po APQP (napredno načrtovanje kakovosti produkta) in ambiciozen program investiranja. Danes je prenovljeno podjetje kompetenten partner avtomobilski industriji.

Heimo Losbichler, Fachhochschule Oberösterreich, Campus Steyr, Avstrija, je predstavil temo, ki je aktualna za današnji razvoj: **»Vpliv digitalizacije na naše delovno okolje«**. Digitalizacija je skupen pojem za različne razvojne procese in transformacije. V preobrazbi tehnologije je pojem digitalizacije zbir različnih razvojnih komponent kot so: KI, BIG DATA, IoT, Blockchain, ki se uporabljajo v upravljanju podjetij, načrtovanju procesov, poslovnih modelih, vrednostnih mrežah, delovnem in življenjskem okolju. Izpostavljeno je bilo vprašanje, kako daleč z nadomeščanjem človeka s strojem. Ob tem je zelo pomembna definicija delitve dela med strojem in človekom. Vendar ni možna posplošitev vpliva digitalizacije na profil nalog. Digitalizacija ni nekaj, s čimer bi se sprijaznili kot z usodo. Zaradi tega se ne bi smeli spraševati, kaj bo digitalizacija pri našem poklicu spremenila, temveč kako lahko njene potenciale aktivno izkoristimo v dobrobit vsega in vseh.

Predavanja iz strokovnega področja livarstva železa in jekla:

Christian Appelt iz podjetja **ASK Chemical GmbH, Hilden, Nemčija**, je podal predavanje: **»Anorganska vezivna sredstva pri litju železa - Aktualno stanje razvoja in obeti«**. Tehnologija INOTEC predstavlja glede varčnosti resursov in energije in kot okolju prijazna alternativa veliko prednost pred dosedanjimi organskimi vezivnimi sredstvi. Prednost v primerjavi z organskimi postopki izdelave jeder je tudi zmanjšanje nevarnih emisij. Uporaba anorganskih veziv je bila do sedaj prisotna le v livarnah aluminija. Limiti so bili v termični stabilnosti, slabem razpadu jeder in uporabi vodotopnih premazov. Z vključevanjem novih jedrnih premazov so zagotovili stabilnost anorganskih vezivnih sistemov, kar je omogočilo optimizacijo sposobnosti razpada jeder. Ob sodelovanju s poslovnimi partnerji iz industrije uporabnikov je možen sistematičen nadaljnji razvoj vezivnih sredstev za izdelavo jeder v železovih livarnah.

Hubert Kerber s soavtorji, **P. Jakesch, L. Stelzer, G. Schindlbacher**, iz **Avstrijskega livarskega inštituta, Leoben, Avstrija**, je predstavil temo: **»Raziskave v vročem peskov za forme in jedra s ciljem ugotavljanja lastnosti zmeščanja in utrjevanja do 700 °C«**. Obremenitve peskov za forme in jedra v livarstvu so vsestranske. Največja je termična obremenitev, ki vpliva na stabilnost zunanje lupine. S tehnološkimi raziskovalnimi preizkusi litja ali potapljanja vzorcev v taline so dobili podatke o vzdržljivostih pri visokih temperaturah kot so: razvoj plinov, vzdržljivost na vzgon oziroma razpad. V visokotemperaturni komori so raziskovali natezno-, tlačno- in upogibno trdnost. Na Livarskem inštitutu razpolagajo s precizijsko preskusno napravo firme Zwick, ki omogoča raziskave do 700°C. Pri temperaturi 500°C so zaznavali izrazite padce trdnosti. V odvisnosti od vezivnega sistema prihaja do mehčanja in plastičnih deformacij pri 300°C in nato v odvisnosti od časa do utrjevanja in krhkosti. S tem so dobili izhodišča za nadaljnje raziskave.

Benjamin Ralph je s soavtorjem **T. Antretter** (Univerza za Montanistiko, Inštitut za mehaniko, Leoben, Avstrija), ter soavtorjem **H. Kerber** (Avstrijski livarski inštitut, Leoben, Avstrija) podal predavanje: **»Prispevek k matematični simulaciji mehanskih lastnosti formarskih peskov«**.

Raziskava formarskega peska in pripadajočih veziv je bistven vidik varovanja kakovosti izdelanega ulitka, ki zavisi od lastnosti materialov za formanje. Da bi te vplive lahko izračunali v simulacijskem modelu so morali upoštevati mikro in makro mehanska zapažanja problema. Za oboje je osnova metoda končnih elementov. Mikro mehanski model razlikuje med obema fazama: vezivni sistem in formarski pesek, pri čemer je vezivni sistem obravnavan kot elastoplastičen. Za izračun je bila osnova elementarna celica cilindričnega formarskega telesa. Pri makromehanskem modeliranju so izhajali iz znanega Mohr-Coulombovega modela. Pri tem ni šlo za ločitev faze veziva in forme. Rezultati mikro, kot tudi določeni rezultati makromehanskih simulacij, kažejo korelacije s praktičnimi preizkusi. Dognano je torej, da so lahko izvedljive tudi numerične simulacije formarskih materialov na mikromehanski bazi.

Nils Laskovski je s soavtorjema **C.Dommaschk** in **G.Wolf**, **TU Bergakademie Freiberg, Giesserei Institut, Freiberg, Nemčija**, predstavil aktualno temo: **»Eksperimentalna simulacija strjevanja debelostenskih izdelkov iz nodularne sive litine - GJS«**. Pri strjevanju debelostenske GJS prihaja zaradi počasnega ohlajanja in nizke hitrosti strjevanja do nepojasnjenih učinkov. Na Livarskem inštitutu v Freibergu so razvili aparaturu za eksperimentalno simulacijo zelo dolgih strjevalnih časov - »debelostenski simulator«, ki bi omogočal ponovljive raziskave oblikovanja strukture in mehanskih lastnosti. V sodelovanju s partnerjem iz industrije so posneli realne poteke strjevanja in ohlajanja. Nato so z majhnimi količinami taline to isto izvajali v laboratorijskem agregatu in dobili osnovne podatke za normiranje tehniških podatkov. Rezultati raziskav so ustvarili orodje za številne in ponovljive raziskave oblikovanja strukture in s tem lastnosti debelostenskih ulitkov.

Marc Walz iz podjetja **Fritz Winter Eisengiesserei GmbH&Co.KG, Stadttalendorf, Nemčija** je podal predavanje zanimivo za razvoj motorjev z notranjim zgorevanjem: **»GJV 500Si5 - material za prihajajoče motorje z notranjim zgorevanjem za gospodarska vozila«**. V zadnjih desetih letih je standardno uporabljen material za visoko obremenjene cilindre in glave cilindrov bloka motorja, bila siva litina z vermikularnim grafitom GJV 450. Prednost tega materiala je v ugodni kombinaciji termičnih, mehanskih in obdelovalnih lastnosti. Pri razvoju novih motorjev pa nastopajo problemi, ki jih je pri tem materialu možno reševati le z kompromisi dizajna. Podjetje je že od leta 2010 razvijalo novo, z zmesnimi kristali utrjeno, GJV litino, z namenom izboljšanja termomehanskih problemov utrujanja. Le z minimalnim povišanjem izdelovalnih stroškov so razvili zlitino GJV 500Si5 z boljšimi lastnostmi in boljšo obdelovalnostjo.

Konrad Weiß, predstavnik podjetja **RWP GmbH, Rötgen, Nemčija**, je izpostavil temo: **»In situ ustvarjanje lastnosti podobne litini ADI - simulacija, izvedba in dosežki na konkretnih primerih«**. V ulitkih iz sive litine s kroglastim grafitom pogosto želimo izdelati ulitke z višjimi, mehanskimi lastnostmi, kar omogoča toplotna obdelava z namenom dobiti osnovno bainitno strukturo. Struktura bainitnega litega železa je zmes igličastega ferita in z ogljikom obogatene avstenita. Za pretvorbo ferita v avstenit se ulitki žarijo v področju med 850 in 950 °C, čemur sledi ohlajanje v področje 250-450°C in pride do izotermne pretvorbe avstenita, pri čemer se avstenit obogati z ogljikom. Pri in situ ustvarjanja ADI se ulitki ohlajajo v formi v območju okrog 1000°C. Nato se material z vodo ohladi do začetka temperature martenzitne premene. Nakar sledi zelo počasno ohlajanje v formi. Tako dobimo zelo podobno strukturo kot pri ADI. Rezultat tega so natezne trdnosti ca. 1000 N/mm² in raztezek ca. 12%. Gre za metodo, ki je stroškovno in okoljevarstveno ugodnejša, zahteva pa izredno pazljivost pri delu.

Jochen Volkert, predstavnik podjetja **Promeos GmbH, Nürnberg, Nemčija**, je podal predavanje: **»SheaTelligence do livarne 4.0 - upravljanje s temperaturo v prostoru in času«**. Livarna 4.0 je dejansko digitalizacija proizvodnje ulitkov z namenom optimizacije celotne verige ustvarjanja vrednosti. Ob tem so pomembni tudi merilno tehnični posnetki vseh delnih procesov. Najpomembnejši parameter za kontrolo vseh visokotemperaturnih procesov je sama temperatura. Težko je ugotoviti reprezentativno temperaturo prostora, saj so talilne peči, ponovce, pretočni žlebovi ali orodja, vsak zase poseben element. Promeos izdeluje plinske gorilne sisteme brez plamena in toplotnotehnične

naprave, ki prostorsko in časovno upravljanje temperature optimizira z inteligentnimi procesi. HeaTelligence rešitve lahko tako pospešijo pot do livarne 4.0

Predavanja iz strokovnega področja livarstva neželeznih kovin:

Thomas Kuchar, predstavnik podjetja **ZF Gusstechnologie GmbH, Nürnberg, Nemčija**, je podal predavanje: **»Predstavitev in vrednotenje novih livarskih konceptov z več variantno simulacijo litja za določeno novo generacijo ohišij gonil z DoE metodo(DoE - Design of experiments)»**. Podal je pregled o simulativnem delu novega procesa, pri katerem so livarji integrirani že v sam razvojni proces. Predstavljeni so cilji in kriteriji vrednotenja simulacij. S pomočjo več variantne simulacije, ki je zasnovana na osnovi faktorjev načrtovanja preizkusov so prikazane odločitve v zvezi s formo in položajem ulitka v formi ter geometrija napajanja. Prav tako so predstavljena pomembnejša znanja o procesu in njegovi stabilnosti ter prikazani različni parametri procesa.

Peter Hofer-Hauser, s soavtorjem **R. Gschwandtner, Avstrijski livarski inštitut, Leoben, Avstrija**, je predstavil temo: **»Vpliv evakuiranja forme na mehanske lastnosti in sposobnost toplotne obdelave Al-tlačnih ulitkov»**. Za zlitino AlSi10MgMn, ki je danes ena izmed najširše uporabljenih zlitin za litje duktilnih in korozijsko obremenjenih delov za avtomobilsko industrijo, je bil raziskan vpliv vakuumu in toplotne obdelave na materialne lastnosti. Rezultati raziskav so pokazali, da sta evakuiranje forme (večja gostota ulitkov) in toplotna obdelava ulitkov (večja poroznost zaradi tvorbe mehurčkov) v medsebojnem nasprotju. Samo neporozni ulitki zagotavljajo tudi toplotno obdelavo brez napak. Z modeliranjem preizkušanja materiala so ugotovili parametre pri katerih lahko prihaja do napak v ulitkih. Predstavljeni so modeli in računalniški rezultati.

Adrian Buob, predstavnik podjetja **Bühler AG, Uzwil, Švica**, je imel predavanje z naslovom: **»Več učinkovitosti pri tlačnem litju kot posledica digitalne preobrazbe»**. Panoga tlačnega livarstva je pred velikimi izzivi. Na eni strani je pritisk na znižanje stroškov proizvodnje, po drugi strani pa se je zaradi elektromobilnosti spremenilo povpraševanje po ulitkih. Te izzive želi podjetje reševati z vizijo »digitalne celice«. S podjetjem Microsoft kot partnerjem je razvil vizijo platforme IoT (internet stvari) in ponuja celotno paleto e-servisa. Podjetje gradi svoj razvoj digitalizacije procesa in servisa skupaj z univerzami, inštituti in vodilnimi podjetji na tem področju. Pot v prihodnost je pogojena s popolnoma novim komunikacijskim sistemom. Razvija se lasten pameten sistem upravljanja celice v smislu optimizacije med livnim strojem in perifernimi napravami in inštrumenti ter s tem zmanjšanja mrtvega časa v procesu.

David Greif, predstavnik podjetja **AVL-AST d. o. o., Maribor, Slovenija**, je predstavil temo: **»Simulacijsko izhodišče za optimizacijo procesa toplotne obdelave»**. Fizikalne lastnosti kovinskih komponent so potrebne izboljšav, predvsem pa je nujno zagotoviti večjo trajnost uporabe in zmanjšanje obrabe ter s tem podaljšanje življenjske dobe uporabe. Problem pa povzročajo tudi zaostale notranje napetosti in deformacije, ki nastajajo pri segrevanju in hitrem ohlajanju. Pri termični obdelavi ulitkov mora numerični model upoštevati tudi uparjanje medijev. Proces toplotne obdelave lahko ob uporabi simulacijskih modelov optimiziramo, vendar moramo pri tem upoštevati čim več procesnih parametrov. Model se zelo dobro usklajuje z razpoložljivimi eksperimentalnimi podatki in omogoča optimizacijo parametrov toplotne obdelave.

Christian Rieger iz podjetja **SinusPro GmbH, Graz, Avstrija**, je ob navedbi soavtorja: **David Neulinger, Nemak GmbH, Linz, Avstrija**, podal predavanje: **»Simulacija zaostalih napetosti v aluminijevih izdelkih - simulacija z visoko natančnostjo ob pomoči dodatnega materiala»**. Cilj same raziskave je bil simulacijo zaostalih napetosti in izkrivljanja aluminijevih ulitkov med toplotno obdelavo dovesti na višjo raven natančnosti. Uporabljena metoda: na enostavnem vzorčnem izdelku (napetostna rešetka) je bila izvedena toplotna obdelava in potem izmerjene zaostale napetosti na reprezentativnem mestu. Enak proces je bil simuliran s pomočjo CFD - analize poteka temperature med gašenjem in FEM - analize poteka napetosti in izkrivljanja med gašenjem in dodatnim staranjem. Sprememba trdnosti materiala (meja lezenja) med procesom je

bila spremljana s podprogramom v FEM modelu Podprogram za spremljanje materiala je podal analitske ocene za: razvoj gostote dislokacij, difuzijo, razvoj izločkov in ovire za gibanje dislokacij. Ugotovljene so bile relativno dobre skladnosti med simulacijo in meritvami. Ob tem bi bilo potrebno še popraviti izračune poteka temperature in modela za izločevalno utrjevanje.

Anton Stich, AG Ingolstadt, Nemčija je s soavtorji: **F. Gulden, Friedrich –Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Nemčija** in **D. Peter Hofer-Hauser, Avstrijski livarski inštitut, Leoben, Avstrija**, podal predavanje: »Litje z delci utrjenih Al-zavornih plošč za elektrificirano vožnjo«. V elektrificiranih vozilih bi lahko sistemi za ponovno pridobivanje energije velik del zavorne energije shranjevali v bateriji. S tem bi v pilotiranih avtomobilih v izrednih situacijah lahko predvideli vožnjo. Zaradi manjšega trenja na zavorni plošči in s tem nižjih temperatur, bi pridobili potencial za aluminij. Kompoziti z Al- matrico so dobro obrabno in korozijsko obstojni. Po naročilu podjetja Audi so na Avstrijskem livarskem inštitutu poskusno gravitacijsko ulili v pesek in kokile zavorne plošče in obroče iz s SiC delci obogatene AISI zlitine. Po raziskavah ulitih delov na inštitutu, so v podjetju Audi testirali zavore pri različnih obremenitvah in temperaturah na trenje, obrabo in tvorbo triboloških filmov. Ugotovili so, da se potrebni tribološki filmi tvorijo le pri Al-zavorah, ki so bile utrjene z SiC delci in je možna temperaturna obremenitev do 400°C ter je obraba manjša kot pri sivi litini.

Thomas Pabel, Avstrijski livarski inštitut Leoben, Avstrija, je s soavtorji **C.Kneiβl** in **T.Petkov (Avstrijski livarski inštitut Leoben, Avstrija)** **H. Schröttner (Center za elektronsko mikroskopijo, Graz, Avstrija)**, **J.Li (Montanuniversität Leoben, Katedra za livarstvo, Leoben, Avstrija)**, podal vedno aktualno temo: »Vplivi spremljevalnih elementov na kakovost ulitkov«. Recikliranje in trgovina z odpadki ter zlitinami vodijo v zlitinah lahkih kovin do sledi nečistoč in spremljevalnih elementov, kar lahko pripelje do procesnih in kakovostnih problemov. Do sedaj niso bile raziskane zgornje meje dovoljenih kombinacij teh vključkov. S pomočjo ThermoCalc software programa so izračunali vplive spremljevalnih elementov in kombinacije elementov na tvorbo strukture in posameznih strukturnih faz. Vplive na livarsko-tehnološke lastnosti kot na mehanske lastnosti so ugotavljali s ciljnim količinami dodatkov in njihovimi kombinacijami. Ugotovili so zelo dobro korelacijo med izračuni in realnimi ulitki. Za lažje razumevanje nastanka in določitve intermetalnih spojin so bile izvedene raziskave z raster in transmisijsko elektronsko mikroskopijo. Osnovno spoznanje vseh izvedenih raziskav je, da praktično noben spremljevalni element nima pragu do katerega te nečistoče ne bi imele kritičnega vpliva. Ugotovljeni pa so bili tudi kompenzacijski vplivi dveh različnih spremljevalnih elementov. Ob tem je pozitivno, da je nastal Kompetenčni center, ki tako za izdelovalce zlitin, kot tudi za livarne in uporabnike ulitkov lahko daje neodvisne ocene za kakovost in uporabnost Al-zlitin.

Tudi 63. avstrijsko livarsko posvetovanje je izkazalo visoko raven livarske stroke in vseh ostalih raziskovalnih panog, ki so vključene v razvoj livarstva. Povezovanje univerz in raziskovalnih inštitutov ustvarja močne raziskovalne ekipe in centre, ki so osnova za razvoj same stroke in s tem livarske industrije. Ustvarjanje znanja in povezave raziskav različnih institucij so seveda osnova za uspešno gospodarsko panogo livarstva, ki kot tradicionalna grupacija še vedno ostaja v primarnem smislu osnova za kakovostne končne proizvode.

Pripravil:

Glavni in odgovorni urednik Livarskega vestnika,
zaslužni prof. dr. Alojz KRIŽMAN

AKTUALNO / CURRENT

PROGRAM / PROGRAMME
WFO-Technical Forum in 59. IFC Portorož 2019 /
WFO-Technical Forum and 59TH IFC Portoroz 2019

TOREK / TUESDAY, 17.09.2019

15.30-18.30:	Sprejem udeležencev posvetovanja in razstave na recepciji / Registration of participants at the Conference reception desk
18.00:	Pozdravno srečanje / Welcome party

SREDA / WEDNESDAY, 18.09.2019

8.00-17.00:	Ogledi livarn / Foundry Tours
15.00-19.30:	Sprejem udeležencev posvetovanja in razstave na recepciji Posvetovanja / Registration of participants at the Conference reception desk
17.30:	Avtobusni prevoz od Hotela Slovenija do Pirana / Bus transfer from Hotel Slovenija to Piran
18.00:	Sprejem na občini Piran / Reception at the Municipality of Piran

ČETRTEK / THURSDAY, 19.09.2019, Dvorana / Hall Cristoforo Colombo

9.00 -9.30	Otvoritveni nagovor / The Opening Address MARK FENYES, Predsednik / President, The World Foundry Organization in/and MIRJAM JAN –BLAŽIČ, Predsednica / President, Društvo livarjev Slovenije / Slovenian Foundrymen Society
------------	--

Dvorana / Hall Cristoforo Colombo
Plenarna predavanja / Plenary lectures

9.30-10.00:	P. MURELL, <i>Cast Metals Federation, West Bromwich (UK): Training and Pressional Development for the Future. Foundry industry – how can the WFO help?</i> / Usposabljanje in strokovni razvoj za prihodnost. Ljvarska industrija – kakšna je lahko pomoč foruma WFO?
10.00-10.30:	C. KUHLGATZ, <i>Hüttenes – Albertus Chemische Werke GmbH, Düsseldorf (D): How suppliers and foundries can advance technology together!</i> / Kako dobavitelji in livarne lahko skupaj pospešijo razvoj tehnologije!

10.30-11.00:	M. MANAPURAM, <i>North Eastern Regional Institute of Science and Technology, Nirjuli (IN): A Forecast of Casting Casts Casters Castfuture</i> / Napoved prihodnosti litja, ulitkov, livarjev in livarstva
11:00-11.45:	Odmor / Break
11.45-12.15:	N. SOBCZAK ^{1,2} , J. SOBCZAK ^{3,4} , L. DRENCHÉV ⁴ , R. PURGERT ⁵ , ¹ <i>Institute of Precision Mechanics, Warsaw (PL)</i> , ² <i>Foundry Research Institute, Krakow (PL)</i> , ³ <i>AGH University of Science and Technology, Krakow (PL)</i> , ⁴ <i>Institute of Metal Science, Equipment and Technologies with Hydro aerodynamic Centre, Sofia (BG)</i> , ⁵ <i>Energy industries of Ohio, Birmingham (USA): High Temperature Phenomena in Metalcasting</i> / Fenomeni visokih temperatur pri litju kovin
12.45-12.45:	P. SCHUMACHER ^{1,2} , J.H. LI ¹ , A. CZIEGLER ² , ¹ <i>Montanuniversität Leoben, Leoben (A)</i> , ² <i>Austrian Foundry Research Institute, Leoben (A): Aspects of extreme grain refinement during light metal casting</i> / Vidiki ekstremnega udrobnjevanja med litjem lahkih kovin
12.45-13.15:	A. KRIŽMAN ¹ , P. MRVAR ² , M. JAN-BLAŽIČ ³ , M. DEBELAK ⁴ , ¹ <i>University of Maribor, Maribor (SI)</i> , ² <i>University of Ljubljana, Ljubljana (SI)</i> , ³ <i>Slovenian Foundrymen Society, Ljubljana (SI)</i> , ⁴ <i>Chamber of Commerce and Industry of Slovenia, Ljubljana (SI): The orientation of Slovenian foundries: technically demanding - thermal, mechanical and surface treated castings, as integral and complex parts for direct use in final products</i> / Usmeritev slovenskih livarn: tehnično zahtevni ter toplotno, mehansko in površinsko obdelani ulitki kot sestavni in kompleksni deli za neposredno uporabo v končnih izdelkih.
13.15 -14.45:	Odmor za kosilo / Lunch break

Sekcija 1 / **Section 1** : Dvorana / **Hall Vasco da Gama**

Lito jeklo in lito železo / **Cast Steel and Iron, Dvorana / Hall:**

14.45-15.15:	J. CAMPBELL, <i>University of Birmingham, Birmingham (UK): Failures of Steels from Casting Defects</i> / Izmet jekel kot posledica napak med litjem
15.15-15.45:	F. IDEN ¹ , B. DUDZIK ² , I. BACANU ¹ , ¹ <i>Hüttenes Albertus Chemische Werke GmbH, Düsseldorf (D)</i> , ² <i>Brembo Poland Sp.Z.o.o., Dąbrowa Górnicza (PL): The application of the Cordis®</i> / Uporaba procesa Cordis® pri železnih ulitkih
15.45-16.15:	X. JINGPEI ¹ , W. AIQIN ¹ , W. WENYAN ¹ , M. DOUQIN ¹ , Y. BIN ¹ , W. ZHENGHUI ² , ¹ <i>Henan University of Science and Technology, Luoyang (CN)</i> , ² <i>Luoyang Luobei Heavy Industry Machinery Co., Ltd, Luoyang (CN): The computer simulation of solidification and modification on the inclusions in large-scale rudder hornsteel casting</i> / Računalniška simulacija strjevanja in modifikacije vključkov v velikih ulitkih krmil za navtiko
16.15-16.30:	Odmor / Break
16.30–17.00:	J. BAST, S. POLIAKOV, <i>Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg (D): Developing of castable steel components by castdesigner-software</i> / Razvoj jeklenih komponent, ki jih je mogoče liti, s programsko opremo Cast-Designer

17.00–17.30:	Y. YIN, Y. ZHANG, J. ZHOU, X. JI, X. SHEN, <i>Huazhong University of Science and Technology (CN)</i> : A shrinkage cavity model based on multi-force fields for cast steel gravity castings / Model skrčevalnega lunkeja za gravitacijsko lite jeklene ulitke, zasnovan na polju delovanja različnih sil
17.30–18.00:	J. JEZIERSKI ¹ , J.J. SZAJNAR ¹ , R. DOJKA ^{1,2} , ¹ <i>Silesian University of Technology, Departement of Foundry Engineering, Gliwice (PL)</i> , ² <i>Odlewnia RAFAMET Sp. z o.o., Kuźnia Raciborska (PL)</i> : Another attempt to gating system optimization for heavy castings / Nov poskus optimizacije napajalnega sistema za težke ulitke

Sekcija 2 / Section 2 : Dvorana / Hall Roald Amundsen
Neželezne zlitine / Non ferrous alloys

14.45-15-15:	S. SAIKAWA, <i>University of Toyama, Toyama (JP)</i> : Development of high strenght aluminium alloy for gravity casting / Razvoj visokotrnostnih aluminijastih zlitin za gravitacijsko litje
15.15-15.45:	F. ZUPANIČ, T. BONČINA, <i>University of Maribor, Maribor (SI)</i> : Development of heat resistant aluminium alloys / Razvoj žarootojnih aluminijevih zlitin
15.45-16.15:	Z.Z. BRODARAC, F. KOZINA, T. RUPČIČ, D. MAŠINOVIĆ, <i>University of Zagreb, Zagreb (CRO)</i> : Influence of the AISi12 alloy inoculation on the microstructure and mechanical properties development / Vpliv cepljenja zlitine AISi12 na razvoj mikrostrukture in na mehanske lastnosti
16.15-16.30:	Odmor / Break
16.30-17.00:	B. KALKUNTE ¹ , L. VALENTE ² , C. VISCARDI ² , V. KOLDA ³ , ¹ <i>Calcom ESI SA, Saint-Sulpice (CH)</i> , ² <i>Ecotre Valente SRL, Brescia (IT)</i> ³ <i>Mecas ESI SRO, Plzeň (CZ)</i> : Virtual dimensional control to predict and measure the final shape of the casting part / Virtualni nadzor dimenzij za napovedovanje in merjenje končne oblike litih delov
17.00-17.30:	S. MÜLLER, T. SCHUCHARDT, S. VODDE, K. DILGER, <i>Technische Universität Braunschweig, Braunschweig (D)</i> : In depth characterization of the local mechanical properties for the die casting alloy AISi9Mn considering solidification rates / Intenzivna karakterizacija lokalnih mehanskih lastnosti zlitin za tlačno litje AISi10MnMg in AISi9Mn ob upoštevanju hitrosti strjevanja
17.30-18.00:	J. PRISTAVEC ¹ , J. MEDVED ² , M. VONČINA ² , S. FALTER-NEVES ³ , ¹ <i>EXOTERM IT d.o.o., Kranj (SI)</i> , ² <i>Univerza v Ljubljani, Ljubljana (SI)</i> , ³ <i>MAGMA GmbH, Aachen (D)</i> : Optimisation of Boundry Conditions for Solidification Simulations of AISi10Mg Alloy / Optimizacija robnih pogojev pri simulacijah strjevanja zlitine AISi10Mg

Sekcija 3 / Section 3 : Dvorana / Hall Robert Scott
Tehnologije za livarsko industrijo / Technologies for foundry industry

14.45-15-15:	M. LEWIS, C. WILDING, <i>Omega Sinto Foundry Machinery Ltd, Peterborough (UK)</i> : Evolution through Innovation at Fonderia FAIL / Evolucija s pomočjo inovacij v livarni FAIL
--------------	--

15.15-15.45:	F. HÖHN, <i>Heinrich Wagner Sinto Maschinenfabrik GmbH, Bad Laasphe (D)</i> : Seiatsu process for complex moulds production with core sand reduction / Postopek Seiatsu za proizvodnjo kompleksnih form z zmanjšanjem peščenih jeder
15.45-16.15:	M. GOŠNJAK, N.R. BOBEK, <i>Weiler Abrasives d.o.o., Maribor (SI)</i> : Improved productivity of grinding in foundries with a new generation of superabrasive tools / Izboljšana produktivnost brušenja v livarstvu z novo generacijo superabrazivnih orodij
16.15-16.30:	Odmor / Break
16.30-17.00:	W. SOKOLOWSKI, <i>Oskar Frech GmbH+Co.KG, Schorndorf (D)</i> : FRECH Competence Center Additive Tooling / Aditivna proizvodnja orodij v kompetenčnem centru FRECH
17.00-17.30:	P.L. LARSEN, J. TROJAN, <i>DISA Industries A/S (DK)</i> : Green sand moulding for everyone / Izdelava form iz svežega peska za vse
17.30-18.00:	M. PETRIČ, R.C. KOROŠEC, M. VONČINA, P. MRVAR, S. KASTELIC, <i>Univerza v Ljubljani, Ljubljana (SI)</i> : Applications of 3D printed polymer patterns in casting technologies / Uporaba 3D tiskanih polimernih modelov v livarstvu

Sekcija 4 / **Section 4:** Dvorana / **Hall Cristoforo Colombo** Razvojni trendi / **Development trends**

14.45-15.15:	R. DEIKE, <i>Universität Duisburg-Essen, Duisburg (D)</i> : Circular Economy-What the EU wants for the Future, the Foundry Industry is doing it today / Krožno gospodarstvo – kar želi EU za prihodnost, livarska industrija počne že danes
15.15-15.45:	N. TALIJAN ^{1,2} , ¹ <i>Academy of Engineering Sciences of Serbia, Belgrade</i> , ² <i>University of Belgrade, Belgrade (RS)</i> : The quality of silver based electrical contacts in light of conventional and novel / Kakovost električnih kontaktov na osnovi srebra ob upoštevanju ustaljenih in novih alternativnih izdelovalnih metod
15.45-16.15:	R. RUDOLF ¹ , T. RAVLAN ² , I. ANŽEL ¹ , P. MAJERIČ ¹ , J. MELE ³ , E. HUDRAP ² , ¹ <i>Univerza v Mariboru</i> , ² <i>SIJ RavneSystems d.o.o. (SI)</i> , ³ <i>CPPE d.o.o. (SI)</i> : Development of an advanced steel tool for the most demanding applications in the industry / Razvoj naprednega orodnega jekla za najzahtevnejše aplikacije v industriji
16.15-16.30:	Odmor / Break
16.30-17.00:	J. J. SOBCZAK, <i>AGH University of Science and Technology, Krakow (PL)</i> : Advanced Engineering and Research of AeroGels for Environment and Life Sciences – a new European scientific –research initiative / Napredni inženiring in raziskava aerogelov za okoljske in bioznanosti – nova evropska znanstveno-raziskovalna iniciativa
17.00-17.30:	P. GROENING, <i>Hüttenes Albertus, Chemische Werke GmbH, Düsseldorf (D)</i> : Sustainable Cold –Box Systems / Trajnostni Cold-Box sistemi

17.30–18.00:	S. KUSSEROW, <i>Saveway GmbH & CO.KG, Ilmenau (D)</i> : Monitoring Technologies for Melting and Holding Systems / Tehnologije za nadzor sistemov taljenje in pridržanje
--------------	--

ČETRTEK ZVEČER / THURSDAY EVENING, 19.09.2018

19.30:	Livarski večer / Foundrymen's night
--------	--

PETEK / FRIDAY, 14.09.2018

Sekcija 1 / **Section 1** : Dvorana / **Hall Vasco da Gama**

Lito jeklo in lito železo / **Cast Steel and Iron**

9.00-9.30:	I. RIPOSAN, S. STAN, M.CISAMERA, A. M.COJACARU, L. NEJASCU, E. STEFAN, I. STAN, <i>Politehnica University of Bucharest, Bucharest (RO)</i> : Connection of the shrinkage sensitiveness of iron castings with solidification expansion/contraction and cooling curves data / Povezava občutljivosti železnih ulitkov na krčenje s podatki o krčenju/raztezanju in krivuljah ohlajanja
9.30-10.00:	M.GRANT, <i>DataProphet, Cape Town (SA)</i> : Application of artificial intelligence to grey iron foundries :dimensionality study of castings / Uporaba umetne inteligence v livarnah sive litine: dimenzijska študija ulitkov
10.00-10.30:	J. KOVAČIČ ¹ , M. PETRIČ ² , M. TERČELJ ² , P. MRVAR ² , ¹ <i>Livar d.d., Ivančna Gorica (SI)</i> , ² <i>University of Ljubljana, Ljubljana (SI)</i> : Production and characterization of alloyed spheroidal graphite cast iron which have thermal fatigue resistance / Izdelava in karkterizacija legirane sive litine s kroglastim grafitom, ki je odporna na toplotno utrujanje
10.30-11.00:	Odmor / Break
11.00-11.30:	D. FRANZEN, P. MARTIN, B. PUSTAL, A. BÜHRIG-POLACZEK, <i>Foundry Institute RWTH Aachen, Aachen (D)</i> : Evaluation of static and dynamic mechanical properties under the influence of alloy design in ductil cast iron / Ocena statičnih in dinamičnih lastnosti pod vplivom načrtovanja legiranja pri duktilnem litem železu
11.30-12.00:	A. NOFAL ¹ , M. SOLIMAN ² , H. PALKOWSKI ² , ¹ <i>Central metallurgical R&D Institute, Helwan (EG)</i> , ² <i>Clausthal University of Technology, Clausthal-Zellerfeld (D)</i> : Dual- Matrix ADI by Thermomechanical Treatment of Ductile Iron / ADI z dvojno matrico s pomočjo termomehanske obdelave duktilne litine
12.00-12.30:	B. BAUER, I. M. POKOPEC, M. ŠABAN, <i>University of Zagreb, Zagreb (CRO)</i> , <i>Alu-Onto Ltd. (HU)</i> : Influence of cooling rate on the properties of ductile cast iron with higher silicon content / Vpliv hitrosti ohlajanja na lastnosti duktilne litine z večjo vsebnostjo silicija
12.30-14.00:	Odmor za kosilo / Lunch break

14.00-14.30:	R. DOJKA ^{1,2} , J. JEZIERSKI ² , M. SZUCKI ³ , B. SIODMOK ⁴ , ¹ <i>Odlewnia RAFAMET Sp. z o.o. (PL), Kuźnia Raciborska</i> , ² <i>Silesian University of Technology, Gliwice (PL)</i> , ³ <i>AGH University of Science and Technology Kraków (PL)</i> , ⁴ <i>Vesuvius Poland Sp. z o.o., Gliwice (PL)</i> : The sprue shape influence on the gating system efficiency and the defects of the castings / Vpliv oblike nalitka na učinkovitost napajanja in napake ulitkov
14.30-15.00:	R. LUMLEY, <i>AWbell Pty. Ltd, Dandenong (AU)</i> : An evaluation of mechanical properties and part quality in investment cast ductile irons / Ocena mehanskih lastnosti in kakovosti delov pri precizijskem litju duktilne litine
15.00-15.30:	M. VARGAS, <i>Hüttenes-Albertus France S.A.R.L, Point-Saint-Maxence (FR)</i> : PENTEX-Improving Performances / PENTEX-izboljšanje kakovosti proizvodov
15.30-16.00:	Odmor / Break
16.00-16.30:	C. BLEICHER, <i>Frauenhofer Institute for structural durability and system reliability LBF, Darmstadt (D)</i> : Evaluating the cyclic material behaviour of material imperfections in thick - walled nodular cast iron with the help of non-destructive testing / Ocena cikličnega ponašanja nepravilnosti v materialu pri debelostenski nodularni litini s pomočjo neporušnih raziskav
16.30-17.00:	I. ANDREWS, <i>Capital Refractories Ltd., Derbyshire (UK)</i> : MetCon G-A unique and new concept of concept filter for the cost effective and consistent flow modification and filtration of steel and havy iron castings / MetCon G – edinstven nov koncept filtra za stroškovno učinkovito in dosledno modifikacijo toka in filtracije jeklenih in težkih železnih ulitkov
17.00-17.30:	M. DROBNE, A. STERGAR, S.NOVAK,B.KOŠEC, U.KLANČNIK, <i>Valji d.o.o., Štore (SI)</i> : Ultrasonic investigation of metallurgical bonding in complex castings / Ultrazvočna preiskava metalurških spojev na kompleksnih ulitkih

Sekcija 2 / Section 2 : Dvorana / Hall Roald Amundsen

Neželezne zlitine / Non ferrous alloys

9.00-9.30:	R. BÄHR, C. MICHAELIS, <i>Otto von Guericke Universität Magdeburg, Magdeburg (D)</i> : Aluminium casting: Process, Application, Quality / Aluminijevi ulitki: proces, uporaba, kakovost
9.30-10.00:	P. MILANESE, M. TANGHETI, <i>IDRA Srl, Travagliato (IT)</i> : Die casting excellence / Odličnost v tlačnem litju
10.00-10.30:	M.PURG, <i>Talum d.d., Kidričevo (SI)</i> : An effective business model for innovative development and sustainable growth of aluminium castings production at Talum d.d. / Učinkovit poslovni model za inovativni razvoj in trajnostno rast na področju proizvodnje aluminijevih ulitkov v podjetju Talum d.d.
10.30-11.00:	Odmor / Break
11.00-11.30:	F. FEIKUS ¹ , B. STAUDER ² , ¹ <i>Nemak Europe GmbH, Frankfurt (D)</i> , ² <i>Nemak Linz GmbH, Linz (A)</i> : Development trends,challenges and chances with casting of electric mobility and structural components / Trendi v razvoju, izzivi in priložnosti na področju ulitkov za električne avtomobile in strukturne komponente

11.30-12.00:	J. BOBST, <i>Fondarex SA, Saint-Légier-La Chiésaz (CH)</i> : Integration of vacuum systems in HPDC processes / Integracija vakuumskih sistemov v procese visokotlačnega litja
12.00-12.30:	L. HAFNER, G. VIDIC, B. TOLAR, <i>LTH Castings d.o.o., Škofja Loka (SI)</i> : Process optimization by introduction of virtual engineering methodology / Optimizacija livarskega procesa po metodi virtualnega inženirstva
12.30-14.00:	Odmor za kosilo / Lunch break
14.00-14.30:	D. MOLNAR, M. BUBENKO, I. BUDAVARI, <i>University of Miskolc, Miskolc (HU)</i> : Development of an Aluminium tilt casting pouring method / Razvoj metode nagibnega litja aluminija
14.30-15.00:	V. KOLDA, <i>Mecas ESI, Pilsen (CZ)</i> : Benefits of big Data analysis for die casting / Koristi analize velikih podatkov za kokilno litje
15.00-15.30:	J. MEDVED ¹ , M. GODEC ² , I. PAULIN ² , S. KORES ³ , M. VONČINA ¹ , ¹ <i>University of Ljubljana, Ljubljana (SI)</i> ² <i>Institut of Metals and Technology, Ljubljana(SI)</i> , ³ <i>Talum d. d., Kidričevo (SI)</i> : Chemical , mechanical and heat wear of tools in contact with casting aluminium alloy melts / Kemijska, mehanska in toplotna obraba orodij v livarskih aluminijevih zlitinah
15.30-16.00:	Odmor / Break
16.00-16.30:	J.LI, <i>University of Leoben, Leoben (A)</i> : Determining casting defects in semi-solid Al and Mg casting parts by computed tomography / Določanje livarskih napak pri izdelavi ulitkov iz v testastem stanju, s pomočjo računalniške tomografije
16.30-17.00:	J.TRČEK, T.HOHNJEC, <i>Hidria d.o.o., Ljubljana (SI)</i> : First phase optimization of high pressure die casting / Optimizacija 1. faze visokotlačnega litja
17.00-17.30:	A.GUSEL ¹ , J.PRISTAVEC ² , <i>Mariborska livarna Maribor d.d., Maribor (SI)</i> , ² <i>Exoterm -IT d.o.o., Kranj (SI)</i> : Prediction and preventive correction of distortions of high-pressure die-cast aluminium parts for automotive industry / Določanje in preventivna korekcija deformacij tlačno ulitih aluminijastih izdelkov za avtomobilsko industrijo

Sekcija 3 / **Section 3: Dvorana / Hall Robert Scott**

Tehnologije za livarsko industrijo / **Technologies for foundry industry**

9.00-9.30:	M. BODENBURG, J.C. STURM, <i>Magma Gießereitechnologie GmbH, Aachen (D)</i> : Improving competitiveness by integrating virtual optimization into casting component development / Izboljšanje konkurenčnosti z vključevanjem virtualne optimizacije pri razvoju litih komponent
9.30-10.00:	P. BUNDSCHUH, S. MICHELIC, R. PIERER, <i>qoncept dx GmbH, Leoben (A)</i> : Digital Transformation in Foundries: challenges and solutions / Digitalna transformacija v livarnah: izzivi in rešitve
10.00-10.30:	M.PASKIEWICZ, <i>Krakodlew S.A., Krakow (PL)</i> : Technology of VR/AR/MR in foundry industry / Tehnologija VR/AR/MR v livarski industriji
10.30-11.00:	Odmor / Break
11.00-11.30:	K.WEIß, <i>RWP GmbH, Roetgen (D)</i> : Integrated function realized by modified casting technology / Z modificirano tehnologijo litja realizirana integralna funkcija

11.30-12.00:	S. RAMRATTAN ¹ , H. MAKINO ² , ¹ <i>Western Michigan University, Kalamazoo (USA)</i> , ² <i>Sintokogio, Ltd., Nagoya (JP)</i> : Non-standard dynamic testing for green sand control / Nestandardno dinamično testiranje za nadzor svežega peska
12.00-12.30:	A.KLIMM, <i>Simpson technology (Deutschland) GmbH, Euskirchen (D)</i> : New developments in high efficiency continuous mixing in green sand systems / Nov razvoj visokoučinkovitega kontinuiranega mešanja pri sistemih s svežim peskom
12.30-14.00:	Odmor za kosilo / Lunch break
14.00-14.30:	P.MAGALDI, A.PIRRO, <i>Magaldi Power S.p.a., Salerno (IT)</i> : A customized snake-shape efficient and environmental friendly Magaldi casting cooler-MCC at Kovis plant Štore / S kačasto obliko prilagojen in učinkovit ter okolju prijazen Magaldi hladilni sistem ulitkov -MCC v obratu Kovis v Štorah
14.30-15.00:	D.TESIĆ, Z.TESIĆ, TCT Tesic GmbH (D): Investing in second hand foundry plants: how can you earn and save money with used foundry plants / Investiranje v rabljene livarske naprave: kako zaslužiti in prihraniti z rabljenimi livarskimi napravami
15.00-15.30:	P. WAN, J. ZHOU, Y. LI, Y. YIN, X. PENG, X. JI, X. SHEN, <i>Huazong University of Science and Technology, Wuhan City (JP)</i> : Study on thermal decomposition process of resin adhesives in foundry industry based on TG-DTA / Raziskava procesa toplotne dekompozicije smolnatih veziv v livarski industriji
15.30-16.00:	Odmor / Break
16.00-16.30:	D.HOLLAND, <i>Calderys Deutschland GmbH, Büro Austria, Wiener Neudorf (D)</i> : Boron free SILICA MIX Solutions for high powered Coreles Induction Furnaces – more than just environmentally friendly / Rešitve s silikatnimi mešanici brez bora za visokozmogljive lončne indukcijske peči – več kot samo okolju prijazne
16.30-17.00:	J.TITZE, <i>Krämer + Grebe, Biedenkopf (D)</i> : With sensors and actuators to autonomous foundry tools / Do avtonomnih livarskih orodij s senzorji in stikali
17.00-17.30:	C. GAWERT, E. RIEDEL, R. BÄHR, S. SCHARF, <i>Otto von Guericke Universität Magdeburg, Magdeburg (D)</i> : Potential of numerical supported ultrasonic treatment for the production of aluminium matrix composites / Potencial številko podprte ultrazvočne obdelave za proizvodnjo kompozitov z aluminijevo osnovo

Sekcija 4 / **Section 4** : Dvorana / **Hall Cristoforo Colombo** Razvojni trendi / **Development trends**

9.00-9.30:	S. DUWE ¹ , B. TONN ¹ , M. LIEPE ² , R. BÄHR ² , M. SCHRUMPF ³ , ¹ <i>Clausthal University of Technology, Clausthal (D)</i> , ² <i>Otto von Guericke University Magdeburg, Magdeburg (D)</i> , ³ <i>Walzengießerei und Hartgußwerk Quedlinburg GmbH, Quedlinburg (D)</i> : Development of wear-resistance ductile iron by simulation based process characterisation and methods of material testing / Razvoj na obrabo odporne duktilne litine s simulacijo karakterizacije osnovnega procesa in metod za preizkušanje materiala
------------	---

9.30-10.00:	T.MARUYAMA, <i>Kansai University, Osaka (JP)</i> : Potential of ductile High-entropie alloys as casting materials / Potencial duktilnih zlitin z visoko entropijo kot materialov za litje
10.00-10.30:	E. POTATURINA, K. SEEGER, <i>Hüttenes – Albertus Chemishe Werke GmbH, Düsseldorf (D)</i> : Coatings for additive manufactured moulds / Premazi za forme izdelane z aditivno tehnologijo
10.30-11.00:	Odmor / Break
11.00-11.30:	M. HOGG, <i>Mike Hogg Ltd., Cheshire (UK)</i> : The future of energy & how to survive it -& thrive / Prihodnost energije in kako jo preživeti ter v njej uspeti
11.30-12.00:	S.DOLAMIČ, EHSiS, industrial solutions d.o.o. (SI): Solutions for lighting in the heavy industry / Rešitev na področju razsvetljave v težki industriji
12.00-12.30:	G. MÄURER, <i>Yxlon International GmbH, Hamburg (D)</i> : Additive Manufacturing for the development of Formula 1 sports car components / Tehnologija kot vodilo razvoja motornih športov – kontrola kakovosti z aditivno tehnologijo proizvedenih komponent za Formulo 1
12.30-14.00:	Odmor za kosilo / Lunch break
14.00-14.30:	K. ASANO, <i>Kindai University, Osaka (JP)</i> : Microstructure and properties of cast metal matrix composites / Mikrostruktura in lastnosti litih kompozitov s kovinsko osnovo
14.30-15.00:	M. AIGNER, M. BRANDNER, L. ELIZONDO, A. PAAR, T. TRICKL, <i>ESW-Eisenwerk Sulzau Werfen R & E, Weinberger AG, Werfen (D)</i> : Set up of a model for heat treatment of rolls for hotstrip mills / Razvoj modela za toplotno obdelavo delovnih valjev za vroče valjanje jekla
15.00-15.30:	A. NARDELO, R. ROANA, <i>F.lli Mazzon S.p.A, Schio (IT)</i> : Colour-changing coating / Premazi, ki spreminjajo barve
15.30-16.00:	Odmor / Break
16.00-16.30:	B. WU, J. ZHOU, X. JI, Y. YIN, X. SHEN, <i>Huazhong University of Science and Technology, Hubei (CN)</i> : Automatic detection of casting defects in X-ray images with feature engineering and machine learning / Samodejno zaznavanje napak ulitkov na rentgenskih posnetkih s slikovnim inženiringom in obvladovanje strojne opreme
16.30-17.00:	M.FASSINA, <i>Italtipresse Gauss, Capriano del Colle (IT)</i> : Advantages of toggle free high pressure die casting machines in the modern industry / Prednosti strojev za visokotlačno litje brez kolenaste preklapne ročice v sodobni industriji
17.00-17.30:	A.SLÁDEK, M.BRUNA, R.PASTIRČAK, <i>University of Žilina, Žilina (SK)</i> : New trends for technological preparation of investment casting production / Novi trendi za tehnološko pripravo proizvodnje precizijskega litja

Sekcija 5 / Section 5:

Študenti in mladi raziskovalci / Students and young researchers

9.00-9.15:	R.OZAH, M. MANAPURAM, <i>North Eastern Regional Institute of Science and Technology, Nirjuli (IN)</i> : Development of coceptual framework on industry 4.0 and its subsystems for automotive piston castings
------------	---

9.15-9.30:	A. REMIŠOVÁ, A. SLÁDEK, M. BRUNA, <i>University of Žilina (SK)</i> : The possibilities for reducing reoxydation in gating system
9.30-9.45:	I. MIHALIC POKOPEC ¹ , M. PETRIČ ² , P. MRVAR ² , B. BAUER ¹ , ¹ University of Zagreb, Zagreb (CRO), ² University of Ljubljana, Ljubljana (SI): Microstructure and mechanical properties of heavy section ductile iron castings
9.45-10.00:	T. OKUNO ¹ , K. SOMIYA ¹ , Y. TAKAGI ¹ , K. YANO ¹ , S. BABA ² , ¹ Mie University, Mie (JP), ² Flow Science Japan, Inc., Shizuoka (JP): Optimum design of branch pattern considering product shape for die-casting design
10.00-10.20:	Break
10.20-10.35:	J.ŠPORIN, P. MRVAR, Ž.VUKELIĆ, <i>University of Ljubljana, Ljubljana (SI)</i> : Roller cone wear mechanism
10.35-10.50:	M. AHMED ¹ , A. NOFAL ² , R. BÄHR ¹ , A. VOLOCHKO ³ , ¹ Otto von University of Magdeburg, Magdeburg (D) ² Central Metallurgical R&D Institute (CMRDI), Cairo (EG), ³ The Physico Technical Institute, Minsk (BY): New insights towards developing a new high strenght high ductility austempered ductile iron
10.50-11.05:	P. MARTIN, D. FRANZEN, B. PUSTAL, A. BÜHRIG-POLACZEK, <i>Foundry Institut RWTH Aachen, Aachen (D)</i> : Modification of mechanical properties of high silicon ductile iron by influencing silicon microsegregation via aluminium and nickel
11.05-11.20:	S.K. SUBBARAYADU, M.MANAPURAM, <i>North Eastern Regional Institute of Science and Technology, Nirjuli (IN)</i> : Research issues and solutions in an automobile foundry: a study
11.20-11.40:	Break
11.40-12.40	Okrogla miza: Vključevanje mladih v podjetništvo / Round table: Inclusion of young people into entrepreneurship
12.40-14.00	Lunch break
14.00-14.15	R. MARKEŽIČ, N. MOLE, I. NAGLIČ, B. MARKOLI, R. ŠTURM, University of Ljubljana, Ljubljana (SI): Tool hardness change prediction during high pressure die casting process
14.15-14.30	A. CZIGLER, P. SCUMACHER, <i>Montanuniversität Leoben, Leoben (A)</i> : Aspects of grain refinement of copper alloys
14.30-14.45	A. JUG, I. ANŽEL, <i>University of Maribor, Maribor (SI)</i> : The influence of solidification conditions on the microstructure of Ag-La alloy
14.45-15.05	Break
15.05-15.20	G.GYARMATI, G.T. MENDE, M. TOKAR, <i>University of Miskolc, Miskolc (HU)</i> : Liquid metall quality assessment with X-ray computed tomography
15.20-15.35	F. KOZINA ¹ , Z. ZOVKO BRODARAC ¹ , M. PETRIČ ² , A. PENKO ² , ¹ University of Zagreb, Zagreb (CRO), ² University of Ljubljana, Ljubljana (SI): The influence of solution hardening on microstructure and mechanical properties of Al Mg₂,₂ Li₂,₁ alloy
15.35-15.50	B. ZEKA, M. PETRIČ, P. MRVAR, A. KRIŽMAN, B.MARKOLI, <i>University of Ljubljana, Ljubljana (SI)</i> : Development of Al-cast alloy with Li additions
15.50-16.10	Break

16.10-16.25	M. KURIŠ, D. BOLIBRUCHOVA, M. MATEJKA, University of Žilina, Žilina (SK): Effect of different additions of Zr on mechanical properties of aluminium alloy AISi9CU1Mg used for production of precision castings created by investment casting
16.25-16.40	G. FEGYVERNEKI, M. BUBENKO, D.MOLNAR, University of Miskolc, Miskolc (HU): The effect of grain refinement on primary solidification
16.40-16.55	J. ARBEITER, M. VONČINA, J. MEDVED, University of Ljubljana, Ljubljana (SI): Microstructural Evolution of As-cast and homogenized Al-Mn-Fe-Si Aluminium Alloy

PETEK POPOLDAN / FRIDAY AFTERNOON, 20.09.2019

18.00:	Zaključna slovesnost / Closing Ceremony
--------	---

Posterske predstavitve / Poster presentations

1.	K. TANAKA, S. SAIKAWA, <i>University of Toyama, Toyama (JP)</i> : Modification of castability in high strength Al Alloy castings / Modifikacija livnosti v visoko trdnih aluminijevih ulitkih
2.	Y. ZHAO, S. SAIKAWA, <i>University of Toyama, Toyama (JP)</i> : The behavior of solidification in Al-10%Si-Mg casting alloy / Vedenje strjevanja v zlitini Al-10% Si-Mg
3.	A. OSUGI, S. SAIKAWA, <i>University of Toyama, Toyama (JP)</i> : Influence of Sr content on hot tearing in Al-Mg-Si alloy / Vpliv Sr vsebnosti na vroče trganje v Al-Mg-Si zlitini
4.	M. IJIMA, S. SAIKAWA, <i>University of Toyama, Toyama (JP)</i> : Effect of P content on age hardening behavior of Al-10%Si-0.3%Mg alloy / Vpliv vsebnosti P na starostno kaljenje Al-10% Si-0,3% Mg zlitine
5.	A. NIIDA, Y. MAEDA, <i>Daido University, Nagoya (JP)</i> : Observation of Air Entrapment during Mold Filling of Die Casting Using Water Model Experiment / Opazovanje ujetje zraka med polnjenjem plesni na tlačno litje z vodnim modelom
6.	S. TANIGUCHI, Y. MAEDA, <i>Daido University, Nagoya (JP)</i> : Inlet Condition for Mold Filling Simulation in Gravity Casting of Aluminum Alloy / Dovodni pogoj za simulacijo polnjenja plesni v gravitacijskem litju aluminijeve zlitine
7.	M. VONČINA ¹ , P. CVAHTE ² , A. KRAČUN ² , T. BALÁŠKO ¹ , J. MEDVED ¹ : <i>¹University of Ljubljana, Ljubljana (SI), ²Impol Group, Slovenska Bistrica (SI)</i> : Analysis of chemical composition homogeneity through the intersection of the slice of the drug from group 6xxx / Analiza homogenosti kemijske sestave po preseku rezine litega droga iz skupine zlitin 6xxx
8.	M. DOJKA, A. STUDNICKI, <i>Silesian University of Technology, Gliwice (PL)</i> : Surface-active inoculation – New potential for high chromium cast iron / Površinsko aktivna inokulacija - Nova možnost za visoko kromovo lito železo
9.	J. ANŽIČ, D. METLJAK, <i>PSM d.o.o., Ljubljana (SI)</i> : Mechanical marking in casting / Mehansko označevanje v livarstvu
10.	U.A. ESER, M. RAGIP MUHAFFEL, <i>Ferro Döküm Sanayi ve Dış Ticaret A.Ş., Kocaeli (TR)</i> : Grain Refinement of A256 Alloy with Boron / Zmanjševanje zrn zlitine A256 z borom



The WORLD
FOUNDRY ORGANIZATION
TECHNICAL FORUM
and
59th IFC PORTOROZ 2019

18-20 September
Portoroz, SLOVENIA



WFO-Technical Forum in / and 59. IFC PORTOROŽ 2019

z livarsko razstavo /
with accompanying foundry exhibition

18.-20. SEPTEMBER 2019

Kontakt / Contact: SLOVENIAN FOUNDRYMEN SOCIETY

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

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

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



Optimizacija procesov s plini na vseh področjih metalurgije

Messer Slovenija Vam nudi več kot samo pline. Naše znanje in izkušnje na področju aplikativne tehnologije so obsežne in s tem ključ za optimiranje procesov v kakovostnem, ekonomičnem in inovativnem pogledu.

Naši plini in storitve tako optimizirajo tudi procese s plini na vseh področjih metalurgije, med drugim visokotemperaturne procese, procese toplotne obdelave in procese rafinacije.

Dovolite, da tudi na področju metalurgije postanemo Vaš partner za tehnične pline.



MESSER 

Messer Slovenija d.o.o.
Jugova 20
2342 Ruše

tel.: +386 2 669-03-00
faks: +386 2 661-60-41
info.si@messergroup.com
www.messer.si

Part of the **Messer World** 