

# LIVARSKI VESTNIK

## Izdajatelj / Publisher:

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

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

prof. dr. Alojz Križman  
E-mail: [probatu@triera.net](mailto:probatu@triera.net)

## Tehnično urejanje / Technical editing:

mag. Mirjam Jan-Blažič

## Uredniški odbor / Editorial board:

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

## Prevod v angleški jezik / Translation into English:

marvelingua, Aljaž Seničar s.p.

## Lektorji / Lectors:

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

## Tisk / Print:

Fleks d.o.o.

## Naklada / Circulation:

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

Letna naročnina: 35 EUR z DDV

Year subscription: 35 EUR (included PP)

Dano v tisk: marec 2017



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

Direktor: Aleksander Ferjančič

T: +386 (0)5 33 33 810  
F: +386 (0)5 33 33 071  
E: [info@living.si](mailto:info@living.si)  
<http://www.living.si>

## VSEBINA / CONTENTS

Stran / Page:

Christian Wilhelm: <b>Prihodnje možnosti v livarski industriji Izzivi in priložnosti: Primeri s področja ulivanja motorjev / Future Prospects for Foundry Technology Challenges and Opportunities: Examples from the field of engine casting</b>	2
Badarinath Kalkunte, Vlastimil Kolda, Ole Köser, Jürgen Rückert, Peter Ubl: <b>Nov pristop k virtualnemu preizkušanju razkalupljanja ulitkov iz kokila / Novel Modelling Approach to Virtually Test the Part Ejection in Die Castings</b>	16
Franc Zupanič, Gorazd Lojen, Matej Steinacher, Tonica Bončina: <b>Vpliv skandija na mikrostrukturo in lastnosti aluminijeve livne zlitine A356 / Effect of scandium on the microstructure and properties of the aluminium casting alloy A356</b>	28
Boris Čuk: <b>Znižanje proizvodnih stroškov z regeneracijo bentonitnega peska (Študija primera) / Reduction of production costs via bentonite clay powder reclamation (Case study)</b>	40

## AKTUALNO / CURRENT

50. poročilo o svetovni livarski proizvodnji 2015	56
Seminar za železove livarne	59
Seminar o okoljevarstveni problematiki za livarne	60
Posvetovanje »Gießtechnik Im Motorenbau 2017« v Magdeburgu	61
Seje organov Društva livarjev Slovenije	62
Vodstvo in organi Društva livarjev Slovenije	64

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

## **Prihodnje možnosti v livarski industriji Izzivi in priložnosti: Primeri s področja ulivanja motorjev**

### **Future Prospects for Foundry Technology Challenges and Opportunities: Examples from the field of engine casting**

Če se želimo ozreti v prihodnost in opisati izzive ter priložnosti v livarski industriji (z vidika tehnologij), moramo najprej razmisliti o stanju v livarski industriji iz tridesetih let prejšnjega stoletja. Dnevni red so sestavljali predvsem temne proizvodne dvorane, dim in hlapi, odprt ogenj, brizganje staljene kovine, pretežno fizično delo - kljub obstoju mehanizacije - ter slabi delovni pogoji. V modernih industrijskih državah je takšna livarska proizvodnja že postala prazgodovina. V tem času pa se niso spremenile za industrijo značilne metode obdelave naravnih materialov ter obvladovanje zakonov narave.

#### **1 Rokovanje z naravnimi materiali in obvladovanje zakonov narave**

Če si ogledamo nastanek dendrita med strjevanjem, ki je značilno za vse zlitine trdnih raztopin, kot so Al-Si-zlitine ali litoželezne zlitine, bomo opazili, da se dendrit s stene forme širi na ostanek taline (Sl. 1).

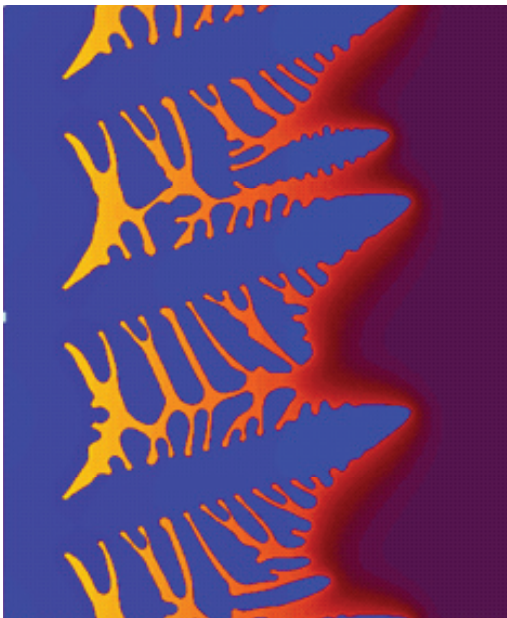
Po strjevanju nastane struktura, na podlagi katere je mogoče določiti razdaljo med dendritnimi vejami. Po eni strani to predstavlja korelacijo z mehanskimi lastnostmi materiala, po drugi pa s pričakovanim nastankom por v sestavnih delih (Sl. 2).

If we want to look ahead and describe the future challenges and opportunities for the foundry sector – from a technology point of view – it is worth contemplating the situation of the foundry industry in the Thirties of the last century first. Dark halls, smoke and exhaust fumes, glowing fires, liquid metal splashing everywhere, predominantly manual labour although mechanization already existed, and bad working and environmental conditions were all the order of the day. This archaic world of foundry production no longer exists in modern industrial nations. But what has not changed over the years are the industry-typical methods of processing natural materials and controlling the laws of nature.

#### **1. Handling Natural Materials and the Laws of Nature**

Looking at dendrite formation during solidification, which is typical for all solid-solution alloys such as Al-Si-alloys or cast irons, you can see how the dendrites grow from the mould wall to the residual melt (fig. 1).

After solidification, a structure is formed from which it is possible to deduce the dendrite arm spacing. On the one hand this correlates with the mechanical properties

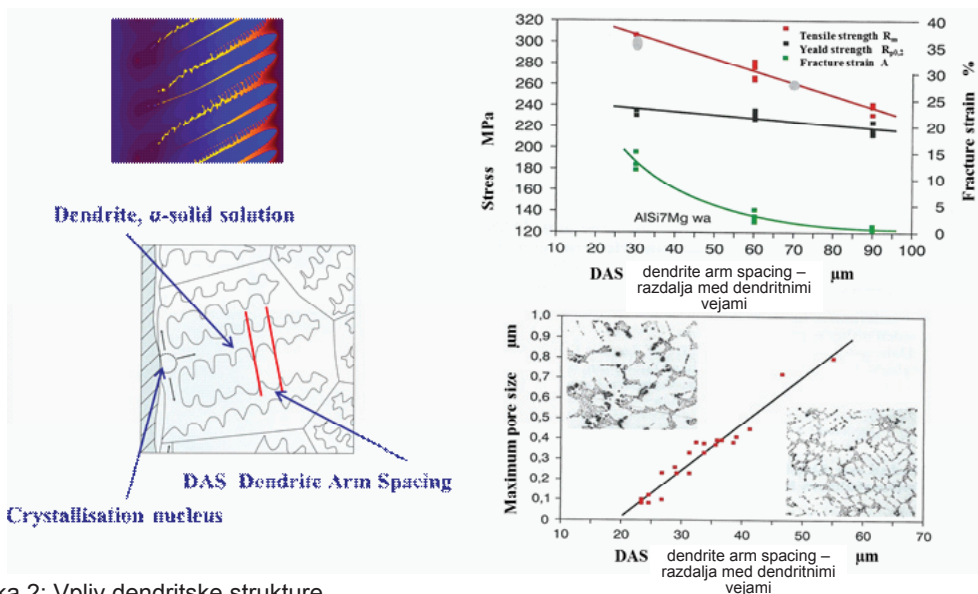


Slika 1: Nastanek dendrita med strjevanjem

Figure 1: Dendrite formation during solidification

of the material, and on the other, with the expected formation of pores in the component (fig. 2).

When using an Ishikawa diagram to look at the factors influencing the growth and formation of these dendrites (fig. 3) it is clear that the majority of the influencing parameters are not within our control, i.e. they cannot be influenced by manipulating production facilities or processes, but are to a much larger extent dependent on the natural materials used and the properties of these natural materials. In order to achieve process reliability within the production process and to ensure, for example, the appropriate mechanical properties of the material, a process-capable formation of these dendrites with accurate repeatability is required. As shown in fig. 4, this will only be successful if process control in the foundry is absolutely stable and if the properties of the natural materials used – including the preceding finishing process – have high



Slika 2: Vpliv dendritske strukture

Figure 2: Influence of dendrite structure

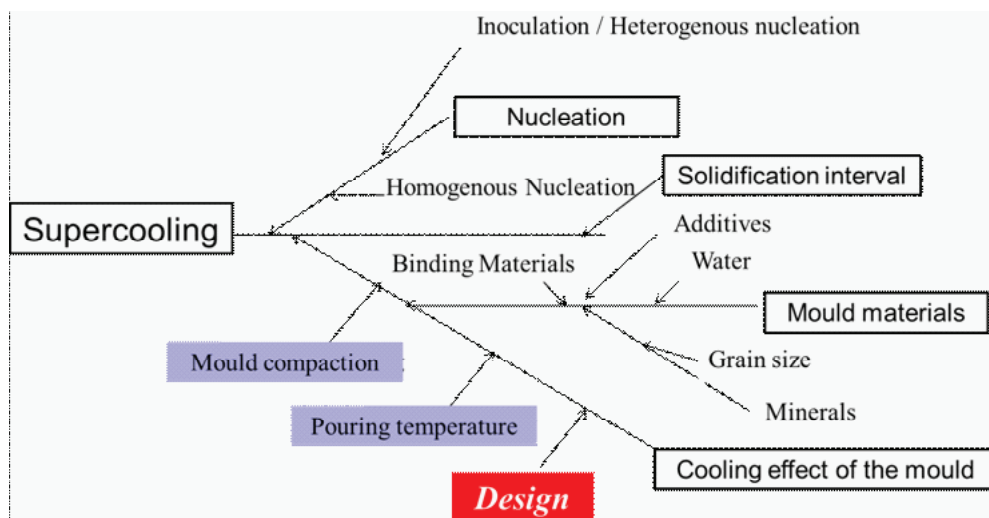
Če za proučevanje dejavnikov, ki vplivajo na rast in nastanek takšnih dendritov (Sl. 3), uporabimo diagram ribje kosti, postane jasno, da na večino parametrov, ki vplivajo na rast in nastanek dendritov, sploh ne moremo vplivati: na parametre namreč ni mogoče vplivati v proizvodnih obratih ali skozi procese, ampak so v večji meri odvisni od uporabljenih naravnih materialov ter od njihovih lastnosti. Za zanesljivost postopkov v proizvodnem procesu ter npr. ustreznih mehanskih lastnosti materiala je treba zagotoviti nastajanje takšnih dendritov v procesu z natančno ponovljivostjo. Skladno s Sl. 4 bo to mogoče zagotoviti samo, če je nadzor postopkov v livarni v celoti stabilen in če lastnosti uporabljenih naravnih materialov – med drugim tudi predhodna zaključna obdelava – zagotavljajo visoko zanesljivost. To posledično pomeni, da so za postopke v livarski industriji najpomembnejši stabilni in standardizirani postopki ter uporaba standardiziranih materialov.

process reliability. Consequently this means that stable, standardized processes and the use of standardized materials are the most important requirements for foundry processes.

## 2 Product Design

Component design today, particularly in the automotive industry, is driven by the demand for low-weight products – every gram or ounce counts. When high-strength materials are used, the wall thickness of the casts is reduced to a minimum. In cases where the inside wall thickness depends on the function of the component, the outer wall must be identical in shape and thickness (fig. 5).

This leads to highly complex component structures and dainty cast structures which can no longer be manufactured with the traditional moulding and casting methods used in the second half of the last century. Progress in component design and



Slika 3: Vpliv podhladitve in dendritske strukture

Figure 3: Influence of supercooling and dendrite structure

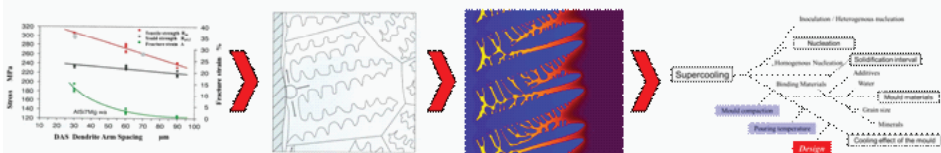
## 2 Zasnova izdelka

Dandanes zasnovo sestavnih delov, še posebej v avtomobilski industriji, poganja povpraševanje po izdelkih nizke teže – šteje namreč prav vsak gram. V primeru uporabe materialov z visoko trdnostjo se debelina stene ulitka zmanjša na minimum. Kadar je od debeline notranje stene ulitka odvisno delovanje sestavnega dela, mora biti identične oblike in debeline tudi zunanja stena (Sl. 5).

To pa vodi do izredno zapletenih struktur sestavnih delov in prefinjenih struktur ulitkov, ki jih ni več mogoče izdelati s tradicionalnimi livarskimi tehnikami, ki so bile v uporabi v drugi polovici prejšnjega stoletja. Napredek na področju dizajna sestavnih delov in razvoja materialov ter postopek ulivanja se dopolnjujeta. Kot je razvidno s Slike 5, je mogoče zanesljivost postopkov na področju kompleksnih sestavnih delov doseči izključno skozi uporabo popolnega paketa jeder, v katerem so vse konture izvedene z jedri, ki jih je mogoče sestaviti, ulivanja pa poteka v pokončnem položaju.

developments in casting materials and processes succeed each other. As you can see in figure 5, process reliability in the complex component areas can only be achieved by using a complete core package in which all contours are realized through cores that fit inside one another and have been cast in an upright position. Placing painted single cores in the mould is a thing of the past.

Modern castings, where the weight and local compound properties have been optimized in terms of their mechanical and thermal properties, require advanced casting techniques. A stationary and upright standing gravity cast process can not fulfill all the requirements for simultaneously preventing oxide formation and optimizing the feeding and local mechanical properties. Tilt pouring technologies, where the complete mould is tilted and cast by computer controlled systems, are state of the art. They allow customized mould filling and mould and core heating, and the hot spots can be selectively influenced (fig. 6). Die casting has the advantage of very high productivity



- Reliable material properties
- High Performance materials
- low factor of safety – full utilisation of material potential

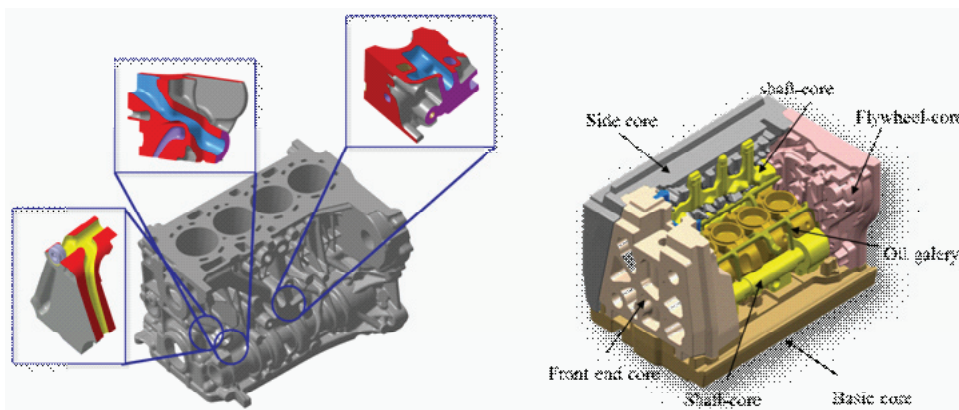
- Consistant / stable raw materials
- Stable metallic materials / scrap
- Stable production processes

### Conclusion:

- Stable Processes
- Standardised Processes

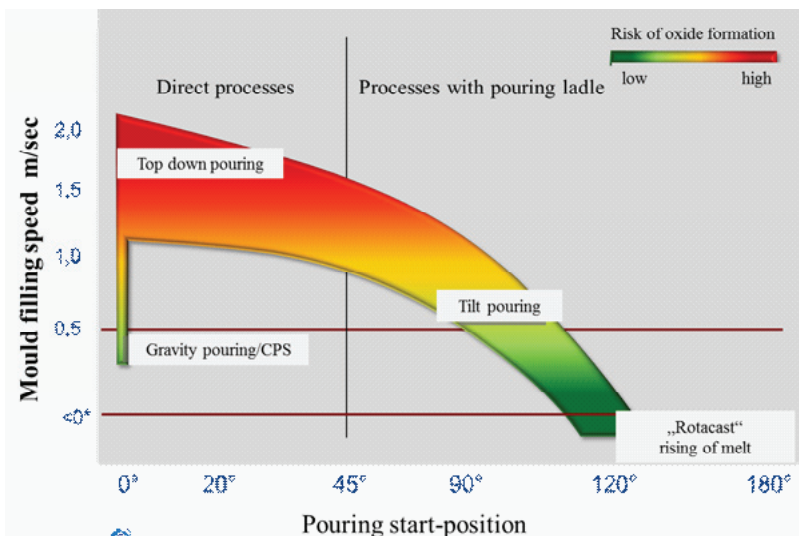
Slika 4: Vpliv dendritske strukture

Figure 4: Influence of dendrite structure



**Slika 5:** Optimalne tolerance jeder med njihovo izdelavo zagotavljajo ulitke optimalne teže

**Figure 5:** Optimal core-tolerances based on core-packing ensure weight-optimized castings



**Slika 6:** Moderne tehnologije litja zagotavljajo najboljšo kakovost ulitkov

**Figure 6:** Modern pouring technologies ensure best casting quality

Uporaba enega samega barvanega jedra je zgodovina.

Moderne ulitke, kjer so teža in lastnosti lokalnih zmesi sestavnih delov optimizirane z vidika mehanskih in termičnih značilnosti, zahtevajo uporabo naprednih livarskih tehnik. Postopki stacionarnega in pokončnega gravitacijskega litja ne morejo

and precision and is the preferred method for typical die cast components where high quantities are needed. This technology harbours design limitations, however: interior cavities, back drafts and pared-down components, such as the one shown in figure 5, cannot be produced per die casting because the necessary cores (lost

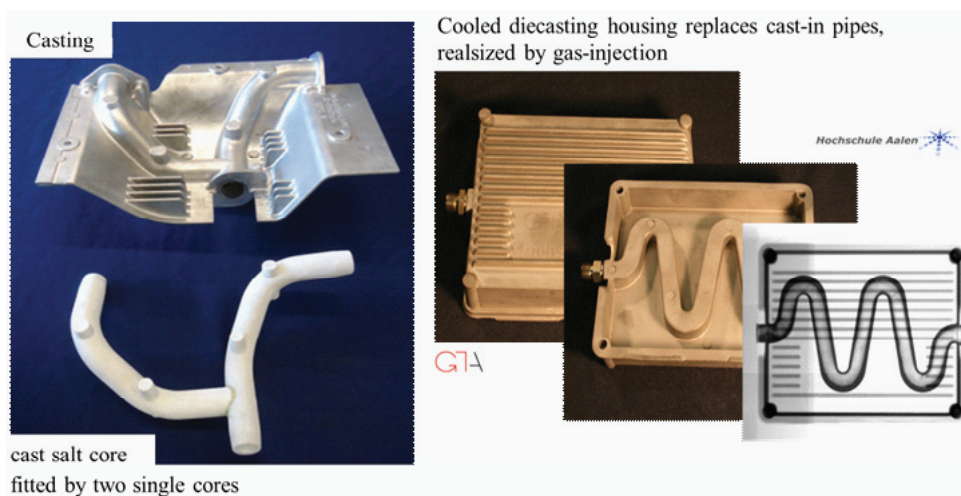
več izpolniti vseh zahtev za sočasno preprečevanje nastanka oksidacije ter optimizacijo napajanja in lokalnih mehanskih lastnosti. Tehnologije ulivanja pod naklonom, kjer je forma v celoti nagnjena, ulivanje pa izvaja računalniško nadzorovan sistem, predstavljajo najnovejši napredek na področju. Omogočajo prilagojeno ulivanje v forme ter segrevanje form in jeder, na vroče točke pa je mogoče vplivati posamezno (Sl. 6). Prednost tlačnega litja je izredno visoka storilnost ter natančnost. Je najbolj priljubljena metoda za tlačno litje sestavnih delov v velikih serijah. Vendar pa je ta tehnologija omejena z vidika zasnove ulitkov: utorov v notranjosti ulitkov, obratne koničnosti negativnih naklonov in prirezanih sestavnih delov, kot npr. tistih, prikazanih na Sliki 5, ni mogoče izdelati s tlačnim litjem, saj potrebna jedra (izguba form) ne prenesejo dinamičnih sil postopka tlačnega litja. Razvoj, npr. proizvodnja jeder iz soli (Sl. 7), je zelo obetaven. Pričakuje se, da bo tehnološki napredek še večji, ko bodo takšna jedra končno primerna za serijsko proizvodnjo.

moulds) can not withstand the dynamic forces of the die casting process. New developments such as salt core production (fig. 7) are very promising and are expected to create a considerable technology leap when they finally become suitable for mass production.

### 3 Environmental Aspects

The foundry industry is a very energy-intensive sector. As illustrated in figure 8, about 50% of the energy demand is needed for the melting process.

It is a typical feature of the casting process that the melting energy is needed for the liquefaction of the metallic parts. Technologies for recovering the waste heat from the melting process are state of the art. The Sankey diagram in figure 9 uses a mass production iron foundry as an example to illustrate the energy losses in melting caused by losses of materials alone. Classic casting process improvements to reduce the machining allowance as well as the



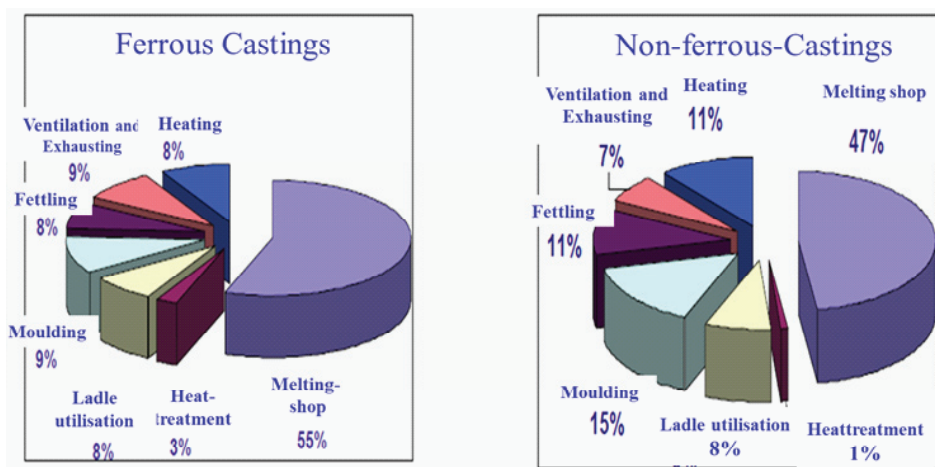
**Slika 7:** Jedra iz soli in polnjenje s plinom bosta omogočila dodatne možnosti v postopku kokilnega litja

**Figure 7:** Salt-cores and gas-injection will increase design-freedom in diecasting process

### 3 Okoljevarstveni vidiki

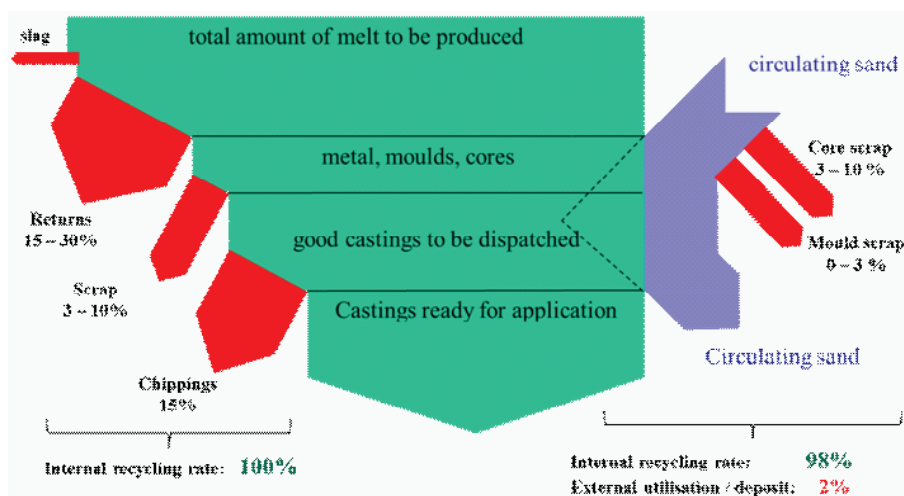
Livarska industrija je energetske izredno intenzivna panoga. Kot je prikazano na Sliki 8, se v postopku taljenja porabi približno 50 % vse energije.

amount of returns and scrap have always an impact on energy consumption! Modern simulation technologies provide plenty of possibilities for this, even in foundries working with very traditional methods.



Slika 8: Večina energije se porabi med taljenjem

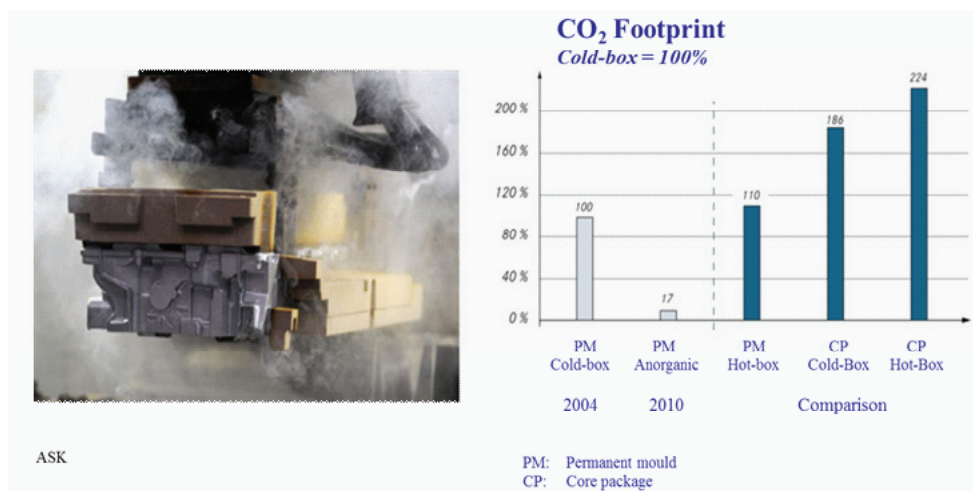
Figure 8: Most energy is expended in melting shop



Slika 9: Znatne izgube materiala in energije v postopkih ulivanja (ponazorjeno na primeru železolivarne z masovno proizvodnjo)

Figure 9: Substantial losses of material and energy during casting process (illustrated by mass production iron foundry)





**Slika 10:** Anorganska vezivna sredstva izboljšujejo delovne in okoljske pogoje

**Figure 10:** Anorganic binders improve working- and environmental conditions

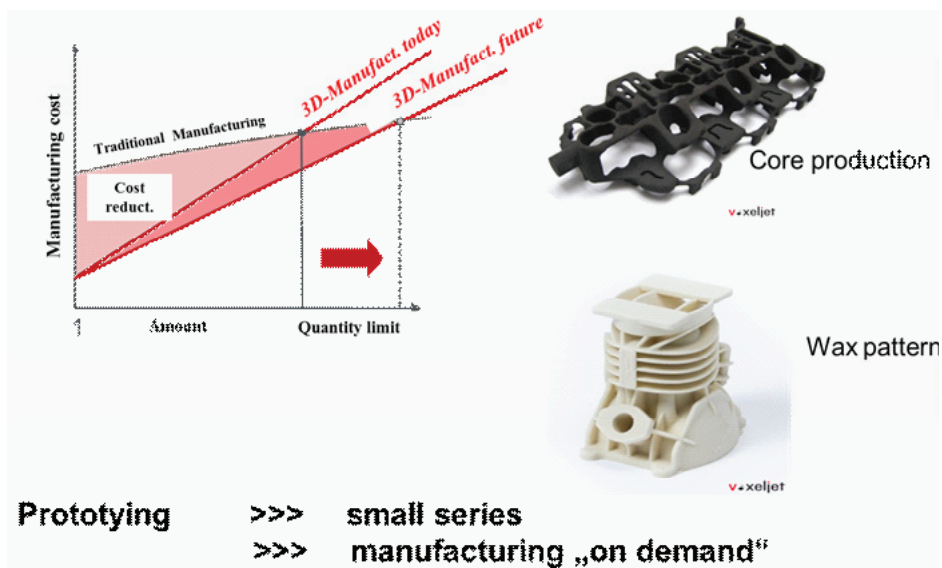
To je povsem običajna lastnost postopka ulivanja, kjer je energija potrebna za taljenje kovinskih delov. Najnovejši razvoj na področju predstavljajo tehnologije za rekuperacijo odpadne toplote. Sankeyjev diagram na Sliki 9 na primeru železolivarne s serijsko proizvodnjo prikazuje energetske izgube pri taljenju, ki so posledica izključno izgub materiala. Izboljšave tradicionalnih postopkov ulivanja z namenom zmanjševanja potrebe po mehanski obdelavi ter količine vračil krožne litine in odpadkov izmetnih ulitkov, vedno vplivajo tudi na porabo energije! Moderne simulacijske tehnologije ponujajo ogromno možnosti tudi livarnam, ki se zanašajo na precej tradicionalne metode.

Na Sliki 10 je prikazano, kako običajno nastaja dim pri ulivanju glav valjev v stalno formo s cold box jedrom. Glavne slabosti uporabe organskih vezivnih sredstev, potrebnih za delovanje sistema, so »koktejli«, ki so posledica različnih faz sežiga vezivnih sredstev med ulivanjem ter posledičnim nastankom kondenzata

Figure 10 illustrates the typical development of smoke when casting a cylinder head in a permanent mould using cold-box-cores. Major disadvantages of organic binders – which are inherent to the system – are the “cocktail” that ensues from the different combustion stages of the binders during casting and the subsequent condensate formation in the sand and in the pipes of the exhaust air purification systems. As a result, inorganic binders are gradually becoming more popular. These binders not only reduce the critical exhaust gases such as benzene, toluene and xylene and the amounts of condensate generated during casting, but also contribute to the reduction of greenhouse gases by considerably reducing the CO<sub>2</sub> footprint (fig. 10).

#### 4 Additive-generative Processes

Additive-generative manufacturing methods have been used in the field of rapid prototyping for around 15-20 years now.



Slika 11: Aditivni in generativni postopki so že na voljo

Figure 11: Additive-generative technologies are already established

v pesku ter v izpušnih ceveh sistema za čiščenje zraka. Tako postopoma postajajo anorganska vezivna sredstva vedno bolj priljubljena. Takšna vezivna sredstva zmanjšujejo nastajanje kritičnih izpušnih plinov, kot so benzen, toluen in ksilen, ter količino kondenzata, ki nastaja med ulivanjem, hkrati pa zaradi bistveno manjšega ogljičnega odtisa prispevajo tudi k zmanjšanju učinka toplogrednih plinov (Sl. 10).

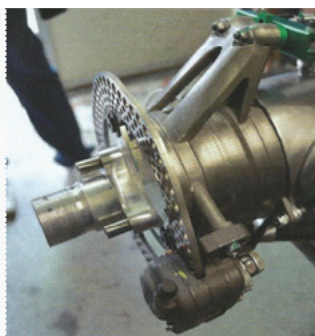
#### 4 Aditivni in generativni postopki

Aditivne in generativne proizvodne metode se na področju hitre izdelave prototipov uporabljajo že 15 –20 let. Ti postopki, ki so se sprva uporabljali za krajšanje časa, potrebnega za izdelavo prvega sestavnega dela, tako, da izdelava orodja ni bila potrebna, so se medtem dobro uveljavili in

These processes, originally used to reduce the time needed for manufacturing a first component by omitting tool manufacturing, have meanwhile established themselves and are now the method of choice for small series in core and mould production.

Figure 11 shows the expected shift of quantities when printed moulds can be produced more cost-effectively than castings. In this way, complex cores such as the water jacket core shown can be produced. Additive-generative processes have many advantages: economical production of very small quantities, facilitation of design changes at short notice, and greater freedom of design. Wax patterns created by generative processes prove that this technology will play out its strength in investment casting, too.

Additive-generative methods for metallic components are so far limited to single item (“on demand”) production and to cases where component weight is an issue, e.g. in



Wheel fixture: Formula Student



Connecting element: Airbus A 350

**Slika 12:** Trenutno se proizvajajo posamezni kovinski kosi (»na zahtevo«) nizke teže (letalska industrija)

**Figure 12:** Metallic components are so far limited to single item (on-demand) production and to lowest weight (aircraft prod.)

so postali priljubljena izbira za proizvodnjo majhnih serij jeder in form.

Slika 11 prikazuje pričakovano gibanje količin v trenutku, ko bo proizvodnja tiskanih form stroškovno učinkovitejša od ulitkov. Na takšen način bo mogoče proizvesti tudi bolj kompleksna jedra, kot npr. jedra za ulivanje blokov motorjev na sliki. Aditivni in generativni postopki prinašajo številke prednosti: gospodarnejšo proizvodnjo zelo majhnih količin, poenostavljajo spremembe zasnove v zadnjem trenutku, nudijo pa tudi več svobode pri dizajniranju. Voščeni modeli, ustvarjeni skozi generativne postopke, dokazujejo, da bo ta tehnologija zasedla pomembno mesto tudi v precizijskem litju.

Aditivne in generativne metode za kovinske sestavne dele so trenutno omejene na proizvodnjo posameznih delov (»na zahtevo«) ter na proizvodnjo lahkih sestavnih delov, npr. za letalsko industrijo. Na Sliki 12 je prikazan nosilec pnevmatike in vezni element, ki se uporablja v izdelavi letal. Ni prav verjetno, da se bodo kovinski sestavni deli, proizvedeni skozi aditivne in generativne postopke, kadar koli uporabljali za masovno ulivanje, kot npr. v proizvodnji blokov motorjev.

the aircraft industry. As an example, figure 12 shows a wheel carrier and a connecting element used in aircraft construction. It is unlikely that metallic components made with additive-generative processes will be used for mass castings, like those needed for engine crankcases.

## 5 Industry 4.0

Industry 4.0 or the “Internet of Things” are current issues with a high priority on many agendas. Even though the term is not used officially, Industry 4.0 has already arrived in modern foundries with robot-assisted production lines and cross-linked systems. Taking fully automated core production in mass production as an example (fig. 13), you can see how the relevant information is processed from one production stage to the next and how changes within the production flow, such as type changes, largely occur automatically.

Linking up production areas that are locally separated, e.g. in a national/international production network, networks between suppliers and the foundry, direct

## 5 Industrija 4.0

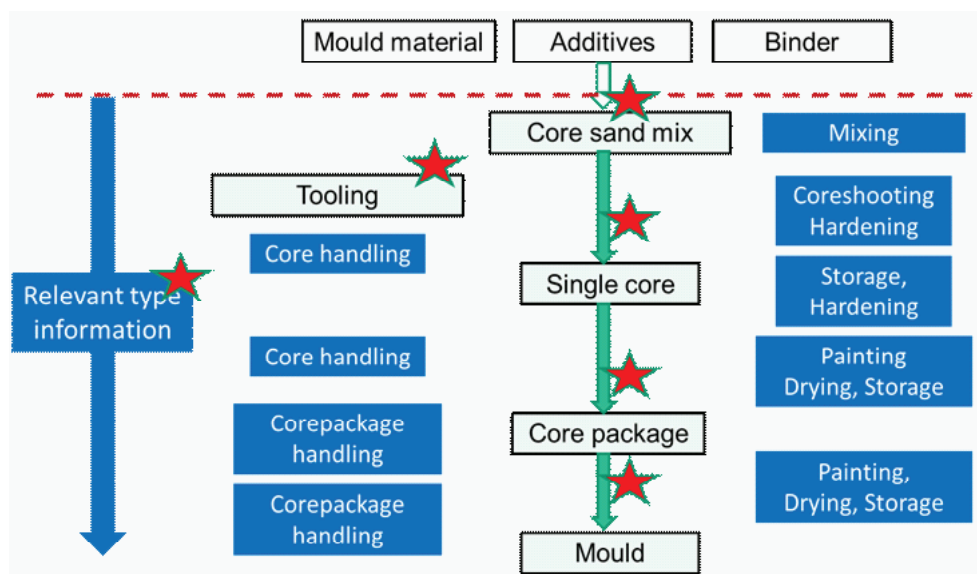
Industrija 4.0 oz. »internet stvari« predstavlja trenutne težave s poudarkom na različnih vidikih. Industrija 4.0, čeprav ta izraz še ni uradno priznan, je že postal del modernih livarn z robotskimi proizvodnimi linijami in med seboj povezanimi sistemi. Na primeru popolnoma avtomatizirane serijske proizvodnje jeder (Sl. 13) je prikazano, kako se v zaporednih fazah proizvodnje obdelajo pomembne informacije ter kako se spremembe poteka proizvodnje, npr. tipske spremembe, v večji meri izvedejo samodejno.

Povezovanje lokalno ločenih proizvodnih področij, npr. v nacionalnem oz. mednarodnem proizvodnem omrežju, omrežja med dobavitelji in livarnami, neposredne podatkovne povezave med modelnimi delavnicami, konstrukcijo ulitkov in oddelki za zagotavljanje kakovosti ter ustreznimi oddelki za stranke so že izvedeni

data connections between the pattern shop casting design and QA divisions and the respective customer departments have already been implemented or are in the pipeline. Whether the applications already implemented in the foundry industry actually correspond to the Industry 4.0. standards is a matter of personal opinion. The foundry industry has a relaxed attitude to this issue.

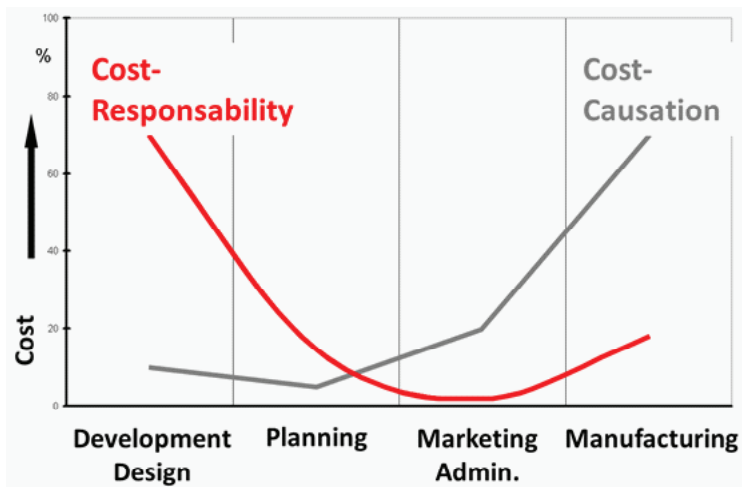
## 6 Cooperation between Foundrymen and Designers

Figure 14 compares cost responsibilities and cost causation at the individual stages of component development and production. It is evident that omissions or lapses in the component development stage have negative effects on the production costs in mass production and that corrections are complex and expensive. As such, foundrymen and designers need to cooperate closely during



Slika 13: Med seboj povezani proizvodni procesi

Figure 13: Production processes are cross-linked

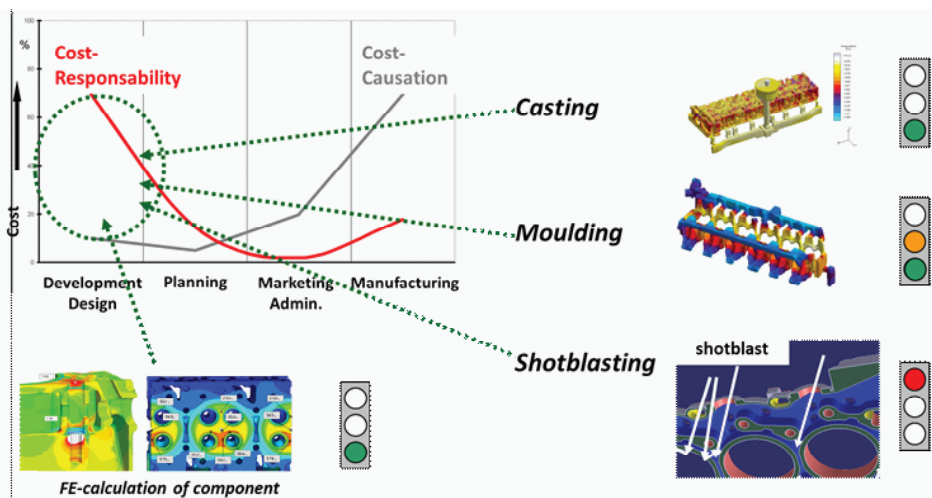


**Slika 14:** Pravočasno načrtovanje in razvoj pomagata pri manjšanju stroškov v začetnih fazah procesa

**Figure 14:** Frontloading at planning and development process helps avoid costs at initial stage of process

oziroma že predstavljajo pomembne elemente oskrbovalne linije. Ali že uvedene aplikacije v livarski industriji dejansko ustrezajo standardu Industrija 4.0, pa je subjektivno mnenje. Livarska industrija

the development and construction stages. The available simulation tools have to be optimally employed for recurring tasks in order to eliminate risks during production or



**Slika 15:** Orodja za načrtovanje in razvoj: sedanost in prihodnost

**Figure 15:** Planning and development tools: today and future

namreč glede tega vprašanja nima ravno strogega mnenja.

## 6 Sodelovanje med livarji in konstrukterji

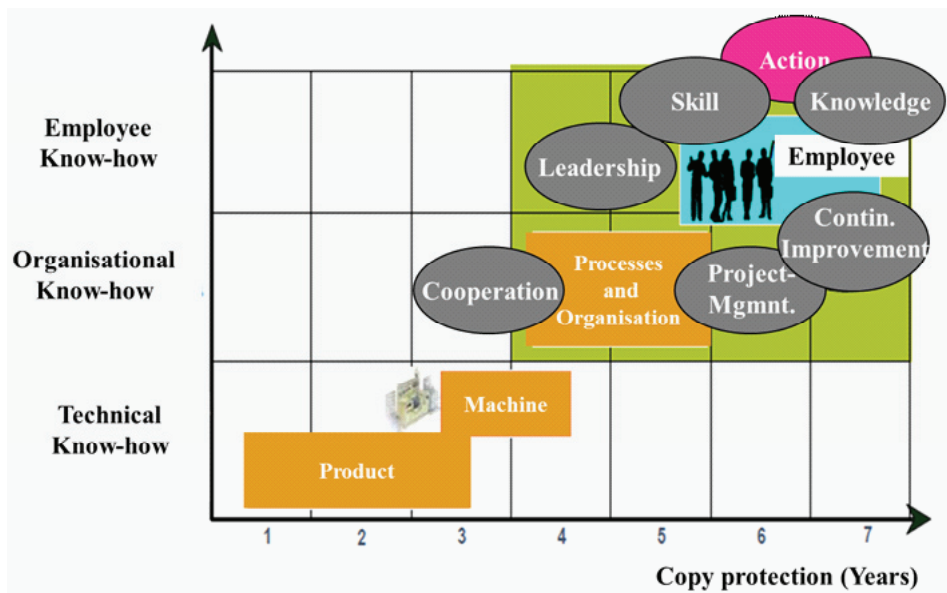
Na Sliki 14 je prikazana primerjava med odgovornostjo za kritje stroškov in njihovim izvorom v različnih fazah razvoja ter proizvodnje sestavnih delov. Očitno je, da opustitve in napake v fazi razvoja sestavnih delov negativno vplivajo na proizvodne stroške serijske proizvodnje, rešitve pa so zapletene in drage. Zato morajo livarji in konstrukterji v fazi razvoja in konstrukcije sodelovati tesneje. Razpoložljiva simulacijska orodja je treba optimalno izkoristiti za ponavljajoča opravila in odpraviti tveganja med proizvodnjo oziroma v življenjski dobi sestavnega dela (Sl. 15).

Energijo, čas in denar je učinkoviteje vložiti v razvojno in proizvodno fazo kot pa preiskovati zapletene postopke in odpravljati

during the operating life of the component (fig. 15).

It is more efficient to invest more energy, time and money in the development and construction stages than to go through complicated processes to correct mistakes – if this is at all possible. Although that seems like stating the obvious, it nevertheless often falls prey to stringent cost reduction programmes.

In this context the question arises on how to maintain a technological leading edge. To finish, figure 16 illustrates how long a copy protection may last. While technical know-how about products and machines can be copied within a very short period of time, organizational know-how in processes and organizations enjoy a higher copy protection and can temporarily lead to competitive advantages. The expertise, skills and knowledge of employees as well as their capabilities for successful



Slika 16: Veljavnost zaščite pred kopiranjem

Figure 16: Copy protection validity

napake – seveda, če je to mogoče. Čeprav je lahko zgoraj opisano popolnoma očitno, pogosto postane žrtev neizprosni programov zmanjševanja stroškov.

S tega vidika pa se poraja vprašanje, kako ohranjati tehnološko dovršenost. Za zaključek je na Sliki 16 prikazano obdobje veljavnosti zaščite pred kopiranjem. Tehnično znanje o izdelkih in strojih je dovoljeno kopirati že po zelo kratkem obdobju, organizacijsko znanje s področja postopkov in organizacij pa je deležno daljše zaščite ter lahko predstavlja začasno konkurenčno prednost. Znanje in veščine zaposlenih ter njihove zmožnosti uspešne interakcije in inteligentno vodstvo so deležni največje stopnje zaščite pred kopiranjem.

## 7 Sklep

Možnosti v livarski industriji ter priložnosti in izzivi so bili opisani na podlagi primerov s področja ulivanja motorjev. Čeprav je mogoče rezultate raziskav in razvoja, t.j. izdelke in zadevne proizvodne procese, preprosto kopirati, mora biti organizacija sposobna prilagoditi se novim izzivom, če želi ohraniti več kot pomembno tehnološko prednost. Rezultat uspešnega sodelovanja med delavci v livarnah ter njihovimi strankami v zgodnji fazi razvoja sestavnih delov je primeren izdelek. Moderne tehnologije na področju ulivanja in uporaba prefinjenih materialov omogočajo proizvodnjo inovativnih sestavnih delov, kar opravičuje slogan »napredek skozi tehnologijo«. Energetska učinkovitost in okoljska uspešnost proizvodnih procesov predstavljata glavna vidika prav vsake livarne v dobavni industriji. Industrija 4.0: v modernih livarnah po vsem svetu že uvajajo metode, čeprav se ta izraz še ne uporablja prav pogosto. Aditivni in generativni postopki so v nekaterih delih livarske industrije že uvedeni. Livarska industrija tako uspešno sledi izzivom.

interactions and intelligent leadership have the highest level of copy protection.

## 7 Conclusion

The future prospects of foundry technology and its opportunities and challenges were described on the basis of examples taken from the field of engine casting.

Whereas the results of research and development, i.e. products and their respective production processes, can easily be copied, it is vital that an organization is capable of adapting to new challenges if the all-important technological advantage is to last.

Successful cooperation between foundry workers and their customers at an early stage of component development ensures mature products as an outcome. Modern casting technologies and sophisticated materials enable the production of innovative components, which justify the “progress through technology” slogan.

Energy efficiency and the environmental performance of production processes are focal issues for each and every foundry and the supplier industry.

Industry 4.0: Methods are already being applied in modern foundries even though this term is not yet widely used.

Additive-generative processes have already been implemented in parts of the foundry industry. The industry is taking up this challenge.

## **Nov pristop k virtualnemu preizkušanju razkalupljanja ulitkov iz kokil**

### **Novel Modelling Approach to Virtually Test the Part Ejection in Die Castings**

#### **1 Uvod**

Pomemben korak v visokotlačnem litju (HPDC - High Pressure Die Casting) magnezija je izmet ulitka. Zaradi strjevanja in ohlajanja se ulitek nakrči na orodje. Za uspešno spopadanje s takšnimi močnimi silami in ločevanje dela ulitka od kokile se uporabljajo izmetači, s katerimi ulitek potisnemo iz kokile. Običajno je število izmetačev preveliko. To je posledica dejstva, da je brez preizkusa trenutno težko oceniti, ali je mogoče nek del razkalupiti tudi z zmanjšanim številom izmetačev. Zmanjšanje števila izmetačev bi znižalo proizvodne stroške ter proizvajalcem orodij omogočilo več svobode pri izdelavi hladilnih kanalov, saj ti zasedajo isti prostor kot izmetači.

V tem članku je predstavljen nov pristop modeliranja razkalupljanja delov izmeta ulitkov v virtualnem okolju. Ta pristop predstavlja simulacijska veriga, sestavljena iz dveh korakov. Prvi korak je izvedba večfizikalnega modela procesa litja, ki upošteva vidike pretoka ter termičnih in mehanskih lastnosti. Namen takšne simulacije je napovedati obremenitve v tistih delih ulitka, s katerimi je pritrjen na kokilo. Takšna porazdelitev obremenitve je začetno stanje drugega koraka, ki predstavlja modeliranje procesa razkalupljanja in upošteva vse učinke trenja. Rezultati modeliranja zagotavljajo informacije o tem,

#### **1 Introduction**

One important process step in Magnesium HPDC (High Pressure Die Casting) is the ejection of part from the mould. Due to solidification and cooling down the part shrinks onto the mould. To over-come the strong forces that hold the part on the mould, ejection pins are used that push the part out-side. Often the number of ejection pins is exaggerated since it is currently difficult to estimate if a reduced number could already be sufficient to eject the part without actually trying it. Reducing the number of ejection pins would decrease production costs and also give more flexibility to the mould maker to set cooling channels since these are occupying the same design space as the ejection pins.

This article presents a novel modelling approach to virtually test the part ejection. The approach is a simulation chain built of two steps. In the first step a multi-physic modelling of the casting process, taking into account flow, thermal and mechanical aspects, is performed. Target of this simulation is to predict the stresses in the part that fix the part to the mould. This stress distribution is used as the initial state for the second part which represents the modelling of the ejection process taking into account all friction effects. Outcome of the modelling provides information if the stresses in the part during ejection will remain in the elastic



ali obremenitve v ulitku med razkalupljanjem še vedno delujejo v elastičnem razponu oziroma ali obstajajo področja, kjer prihaja do plastične deformacije, kar bi pomenilo, da postopkovni parametri niso ustrezno nastavljeni. Uporaba takšnih metod omogoča virtualno preizkušanje različnih porazdelitev in nastavitvev izmetačev.

Ta članek je sestavljen, kot sledi: prvi del opisuje pristop k rešitvi vprašanja skozi modeliranje. Med drugim opisuje lastnosti materiala, robne pogoje in druge informacije, nujne za modeliranje. Ta okvir bo nato prenesen na konceptualni primer, na podlagi katerega nameravamo prikazati dosledno vedenje modela. Pridobljene rezultate bomo podrobno obrazložili. V zadnjem delu bo model uporabljen na dejanskem industrijskem primeru.

## 2 Opis glavnega pristopa k modeliranju

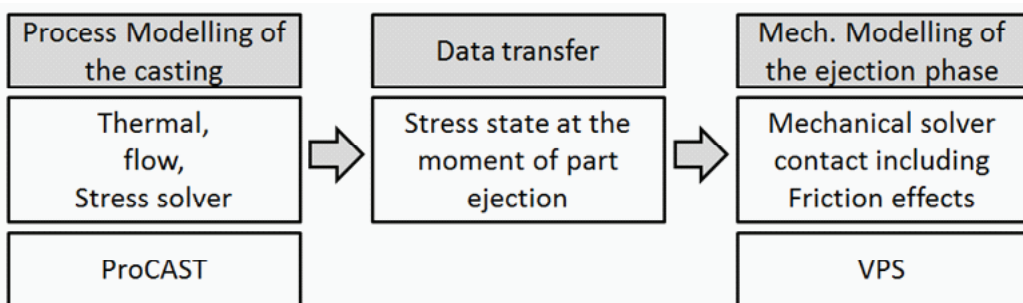
Modeliranje je razdeljeno na dva dela. Prvi del je simulacija procesa visokotlačnega litja (HPDC – High Pressure Die Casting). Modeliranje je sestavljeno iz polnjenja kokile s tekočim magnezijem, strjevanja, ohlajanja ter krčenja ulitka v kokili. Z vidika reševalnika to ustreza hkratnemu izračunu temperatur, pretoka in napetosti. Modeliranje je bilo izvedeno s svežnjem programske opreme za simuliranje industrijskega ulivanja ProCAST [1]. Simulacija poteka do trenutka razkalupljanja ulitka. Stanje obremenitve v tem trenutku se izvozi (Slika 1) ter uporabi za mehansko modeliranje faze razkalupljanja. Namen tega modeliranja je raziskati, kakšne obremenitve nastajajo (ob upoštevanju učinkov trenja), ko izmetači ulitek potiskajo iz kokile. Ta del modeliranja smo opravili z mehanskim reševalnikom programske opreme za modeliranje VPS [2].

range or if there are regions where plastic deformation occurs, which would indicate that the process parameters are not set well. Using this methodology will enable the virtual testing of different distribution and settings of ejections pins.

The article is structured in the following way. First the principle approach to solve the problem by modelling will be described. The details include material properties, boundary conditions and other information that are used by the modelling. This framework will then be applied on a conceptual case to show that the model is behaving in a consistent way. The obtained results of this case will be explained in detail. In the last section, the modelling will be applied on an industrial case.

## 2 Description of the Principle Modelling Approach

The modelling is divided in two parts. The first part is a process simulation of the HPDC (High-Pressure-Die-Casting) process. Content of the modelling is the filling of the liquid Magnesium in the metallic die, the solidification, cooling down and how the part is thereby shrinking onto the die. From the point of view of the solver this is corresponding to a coupled thermal, flow and stress calculation. The modelling is performed with the industrial casting simulation software package Pro-CAST [1]. The modelling is performed until the moment of part ejection. The stress state in this situation is exported (Figure 1) in order to initialize a mechanical modelling of the ejection phase. Content of this modelling is to investigate what kind of stresses will occur when the ejection pins are moving the part outside the die taking into account friction effects. This part of the modelling is performed with the mechanical solver from VPS [2].



Slika 1: Diagram modeliranja

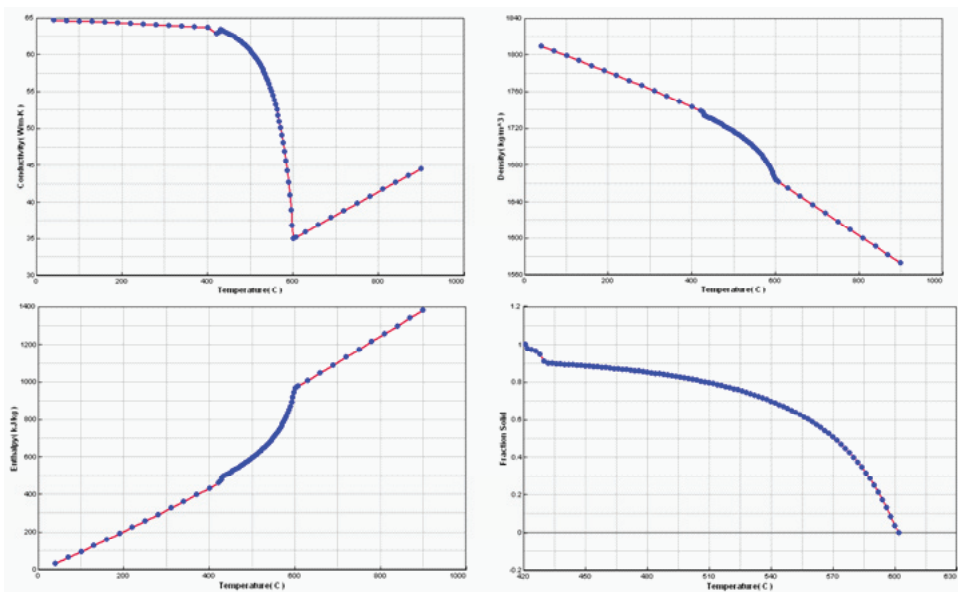
Figure 1: Modelling schema

### 3 Nastavitve modeliranja

Modeliranje je zajemalo določanje mehanskih lastnosti ter robnih in začetnih pogojev. Lastnosti materiala zajemajo toplotne in mehanske vidike. Na Sliki 2 so prikazane glavne toplotne lastnosti,

### 3 Modelling Setup

The modelling setup is consisting of setting the material properties, boundary conditions and initial conditions. The material properties are consisting of thermal and mechanical aspects. Figure 2 shows the main thermal



Slika 2: Toplotne lastnosti zlitine AZ91, zgoraj levo toplotna prevodnost, zgoraj desno gostota, spodaj levo entalpija, spodaj desno delež trdne faze

Figure 2: Thermal properties of AZ91, top left conductivity, top right density, bottom left enthalpy, bottom right fraction solid

na Sliki 3 pa glavne mehanske lastnosti, uporabljene za nastavitev modeliranja. Podatke smo pridobili iz podatkovne zbirke o materialih programa ProCAST [1]. Za opisovanje mehanskega vedenja smo uporabili model elasto-plastičnega materiala z linearnim strjevanjem [3]. Za kokilo smo uporabili termične lastnosti jekla H13, za namene modela obremenitve pa smo kokilo označili za togo. Koeficient temperaturne prevodnosti med zlitino in kokilo je bil nastavljen na vrednost 3000 W/(m<sup>2</sup> K). Za zlitine smo uporabili začetno temperaturo 625 °C, za material kokil pa 225 °C (industrijski primer) oz. 180 °C (študija primera).

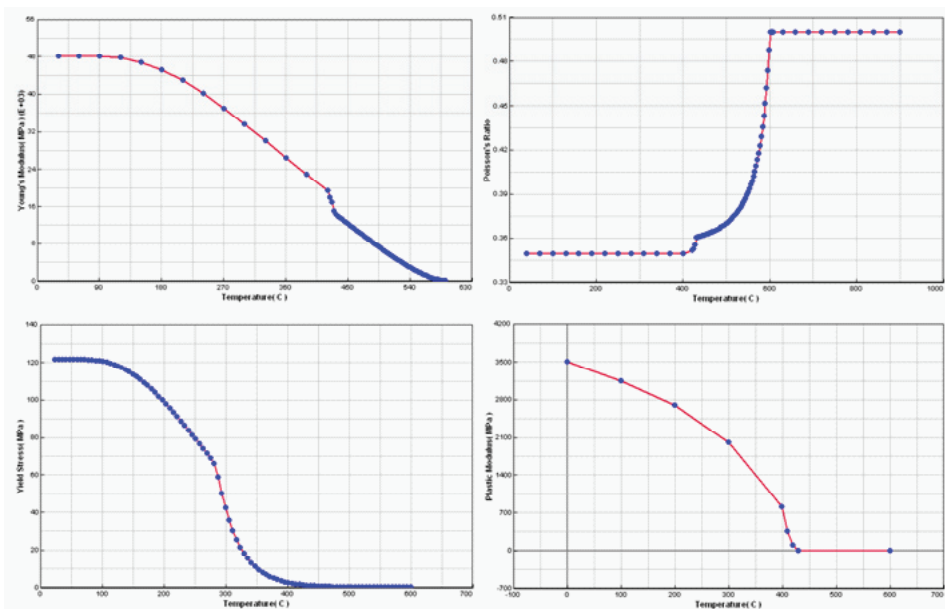
#### 4 Študija primera

Na Sliki 4 je prikazana oblika dela ulitka v tej študiji primera. Gre za votel valj na osnovni

properties while Figure 3 shows the mechanical properties that were used for the modelling setup. The data is taken from the ProCAST material database [1]. As a description for the mechanical behaviour an elasto-plastic material model with linear hardening was used [3]. For the die, the thermal properties of H13 were used and considered as rigid for the stress model. The interface heat coefficient between alloy and die was set to 3000 W/(m<sup>2</sup> K). An initial temperature of 625 °C was used for the alloys and 225 °C (industrial case) respectively 180 °C (conceptual case study) for the die material.

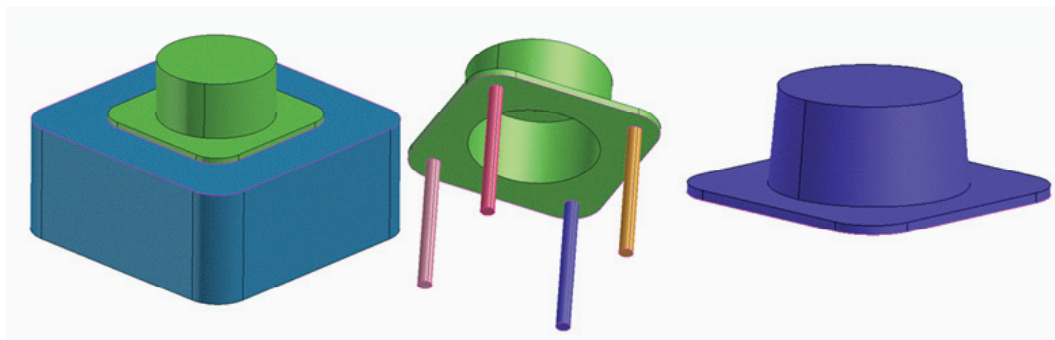
#### 4 Conceptual Case Study

Figure 4 shows the geometry that was used for the conceptual case study. The



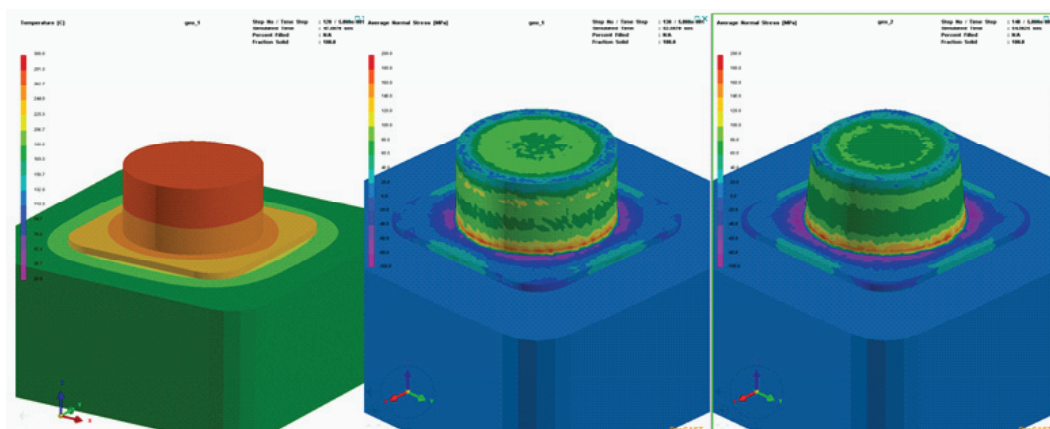
**Slika 3:** Mehanske lastnosti zlitine AZ91, zgoraj levo Youngov modul, zgoraj desno Poissonovo razmerje, spodaj levo napetost tečenja, spodaj desno modul plastičnosti

**Figure 3:** Mechanical properties of AZ91, top left Youngs Modulus, top right Poisson ratio, bottom left Yield stress, bottom right Plastic Modulus



**Slika 4:** Oblika ulitka v študiji primera

**Figure 4:** Geometry used for the conceptual case study



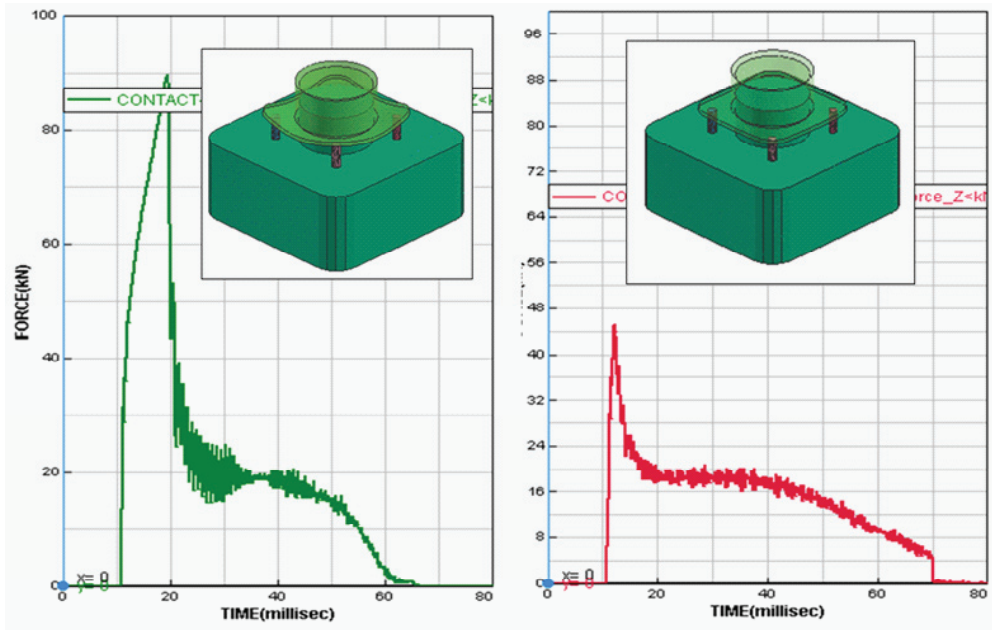
**Slika 5:** Rezultati termičnega in napetostnega preizkusa v študiji primera

**Figure 5:** Thermal and stress results conceptual case study

plošči. Izdelali smo ga z dvodelno kokilo (zgornji del ni prikazan), kot je običajno za visokotlačno litje. Osnovne mere dela so: debelina sten 6 mm, zunanji premer valja 120 mm in višina 66 mm (skupaj z osnovno ploščo). V prvem primeru smo zasnovali pokončni krožni valj (Slika 4 na sredini), v drugem pa prisekan stožec s stranicami pod 5-stopinjskim naklonom (Slika 4 na desni). Spodnji del kokile vsebuje štiri valje, ki delujejo kot izmetači.

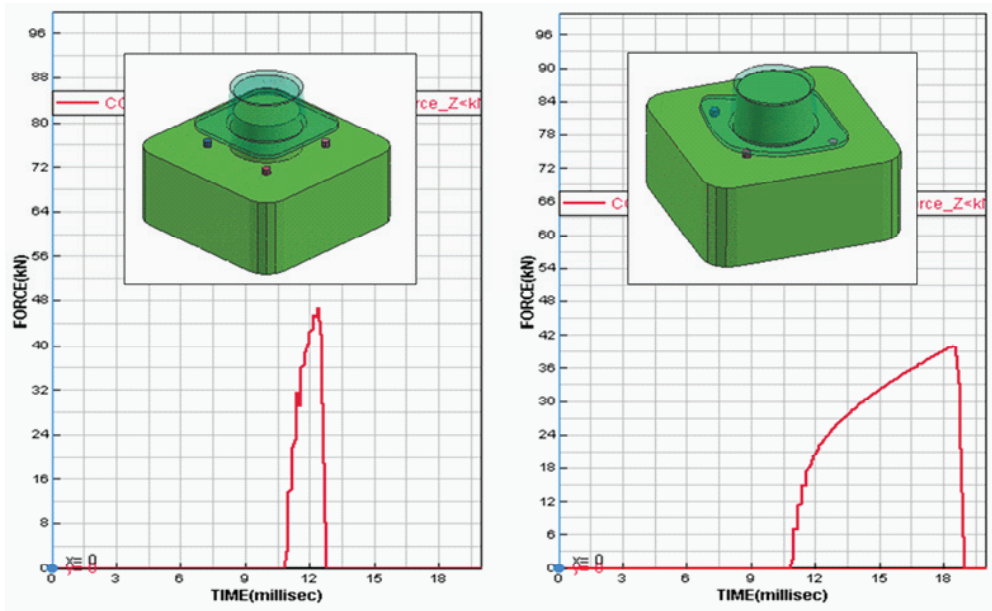
Na levi strani Slike 5 so prikazani temperaurni rezultati ob trenutku razkalupljanja. Ulitek se ohladi do

part is consisting of a hollow cylindrical set on a base plate. It is formed by two parts of a die (upper part of the die not shown) to represent a typical HPDC setup. Basic geometrical features of the part are a wall thickness of 6 mm, outer diameter of the cylinder 120 mm and a height of 66 mm (including the bottom plate). In one case the cylinder was straight (Figure 4 middle), in a second case the cylinder wall was inclined by 5 degrees (Figure 4 right side). The bottom die contains four cylinders that are representing the ejection pins.



Slika 6: Sile v fazi razkalupljanja za pokončni krožni valj (levo fc 0,2, desno fc 0,1 )

Figure 6: Forces during ejection phase straight cylinder (left side fc 0.2, right side fc 0.1 )



Slika 7: Sile v fazi razkalupljanja za presekan stožec (levo 4 vodila, desno 2 vodili)

Figure 7: Forces during ejection phase inclined cylinder (left side 4 pins, right side 2 pins)

temperature približno 260 oC. Zaradi vedno večje gostote v trdnem stanju (Slika 2 zgoraj desno) se ulitek krči na kokili, zaradi česar nastajajo notranje napetosti (Slika 5 na sredini in na desni strani). Na takšnem stanju obremenitve je bila nato izvedena mehanska analiza in raziskana faza razkalupljanja.

Na Sliki 6 in Sliki 7 so prikazani rezultati simulacije faze razkalupljanja. Vodoravna os prikazuje čas, navpična pa pridržalno silo. Vrednost 0 s predstavlja trenutek, ko se izmetači začnejo premikati s konstantno hitrostjo. Na Sliki 6 je prikazan primer pokončnega krožnega valja. V primeru s Slike 7 je bil koeficient trenja  $f_c$  spremenjen (leva stran 0,2, desna stran 0,1). Ko se izmetači začnejo premikati, morajo najprej premagati statično trenje, ki ga v grafih prikazuje prvi vrh. Ko je dosežena ta vrednost, se začnejo valji premikati, nanje pa deluje dinamično trenje. Linearno zmanjšanje pridržalne sile po doseženem vrhu lahko razumemo, če upoštevamo, da se stična površina (valja) zmanjšuje linearno s hitrostjo izmetavčev. Vrh je skladno s pričakovanji enak koeficientu trenja  $f_c$ . Z znižanjem koeficienta trenja  $f_c$  z 0,2 na 0,1 se tudi pridržalna sila s 95 kN zmanjša na 47 kN.

Na Sliki 7 je prikazan primer prisekanega stožca. Koeficient trenja  $f_c$  je bil v tem primeru nastavljen na vrednost 0,1. Vedenje z leve strani Slike 7 je na začetku v večji meri enako tistemu s Slike 6 na desni, saj je stanje v povezavi s statičnim trenjem precej podobno. V obeh primerih se začne valj premikati, ko je dosežena pridržalna sila 47 kN. Nato začne prisekan del izgubljati stik in sile padejo na vrednost 0, medtem ko stožčasti del s Slike 6 vzdržuje silo do zaključenega razkalupljanja. Na Sliki 7 na desni je prikazan primer aktivacije dveh vodil. Zaradi nesimetričnih sil pride do momenta, zaradi katerega se ulitek med

Figure 5 left side shows the thermal results at the moment of ejection. The part is cooled down to a temperature of around 260 oC. Due to the increasing density in the solid state (Figure 2 top right) the part is shrinking onto the die and develops internal stresses (Figure 5 middle and right side). This stress state was then transferred to the mechanical analysis and the ejection phase was investi-gated.

Figure 6 and Figure 7 show the results on ejection phase modelling. The horizontal axis is showing the time and the vertical axis the total holding force. The value of 0 s is the moment when the ejection pins begin to move with constant velocity. Figure 6 is referring to the case of straight cylinder. In the cases corresponding Figure 7 the  $f_c$  (friction coefficient) was changed (left side 0,2, right side 0,1). When the pins start to move they first have to overcome the static friction which is corresponding to the first peak of the graphs. Once this value is reached the cylinder starts to move in a dynamic friction mode. The linear decrease of the holding force after the peak can be understood by taking into account that the contact surface (of cylindrical shape) is decreased linearly with the velocity of the ejection pins. The peak value is proportional to the  $f_c$  as expected. By lowering the  $f_c$  value from 0.2 to 0.1 the holding force is reduced from 95 kN to 47 kN.

Figure 7 is corresponding to the inclined cylinder geometry (truncated cone). The  $f_c$  value was set to 0.1 in this case. The behaviour observed in Figure 7 left side corresponds in the beginning very much to the one in Figure 6 right side since the situation of the static friction is quite similar. In both cases the cylinder is starting to move once a holding force of 47 kN is reached. But then the inclined part is losing contact and the forces go to a 0 value while the cylindrical part in Figure 6 is still hold

razkalupljanjem nagne. V takšnem primeru se morajo vodila pred popolnim izmetom premakniti globlje, zaradi česar je pridržalna sila enaka nič.

## 5 Aplikacija na industrijskem primeru

V nadaljevanju so prikazani rezultati običajnega visokotlačnega litja magnezija na industrijskem primeru. Slika 8 prikazuje temperaturno polje pred izmetom, Slika 9 pa prikazuje ujemajočo porazdelitev obremenitve pred izmetom.

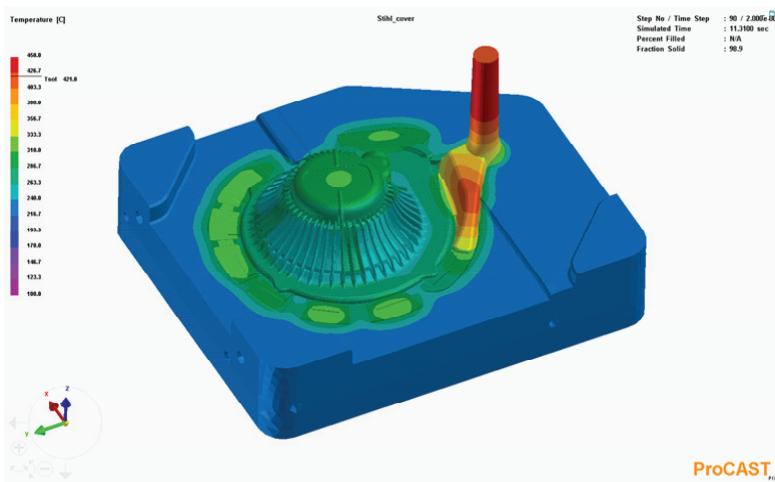
Mrežo ulitka, kokila (premični del) ter izmetače skupaj uvozimo v mehanski reševalnik VPS (Virtual Performance Solution) proizvajalca ESI. Na podlagi porazdelitve obremenitve v delu (Slika 9) se inicializira kontaktni algoritem, ki upošteva sile trenja, ki del zadržujejo v kokilu. Kokila je vedno zasnovana z naklonom; v nasprotnem primeru bi ulitek iz nje zdrsnil brez trenja. V prikazanih rezultatih modeliranja je bil določen koeficient trenja 0,2. Slika 10 prikazuje porazdelitev obremenitve, kot je bila uvožena v reševalnik VPS (enako kot na Sliki 9)

until complete ejection. Figure 7 right side shows the case where only two pins were activated. Because of the non-symmetric forces a momentum is created which cants the part during ejection. In this case the pins need to move further before the part is completely ejected and thus the holding force shows a zero value.

## 5 Application on an Industrial Case

In the following the results of a typical Mg HPDC industrial case is shown. Figure 8 shows the temperature distribution before ejection. Figure 9 shows the corresponding stress distribution before ejection.

The mesh of the casting part, the die (moving part) and the ejection pins together are imported in the mechanical VPS (Virtual Performance Solution) solver from ESI. Based on the stress distribution in the part (Figure 9), the contact algorithm is initialized, which is taking account the friction forces that hold the part inside the die. Since the die is always designed with a taper the part would otherwise slide out of the die without friction. In the displayed



**Slika 8:** Termična porazdelitev v trenutku pred razkalupljanjem

**Figure 8:** Temperature distribution at the moment before ejection

Po izmetu se obremenitev razporedi znova. Na podlagi primerjave Slike 10 in Slike 11 postane jasno, da so se obremenitve po razkalupljanju na splošno zmanjšale.

Proces razkalupljanja bi lahko alternativno proučili tudi tako, da bi analizirali stične sile med razkalupljanjem. Na Sliki 12 so prikazane sile ob trenju 0,2 in 0,5.

V primeru koeficienta trenja  $f_c$  0,5 meri maksimalna skupna sila pribl. 160 kN, v primeru koeficienta trenja  $f_c = 0,2$  pa smo zabeležili sile pribl. 50 kN. V sklopu modeliranja je očitno, da vedenje skupne sile ni popolnoma linearno. Sila v primeru

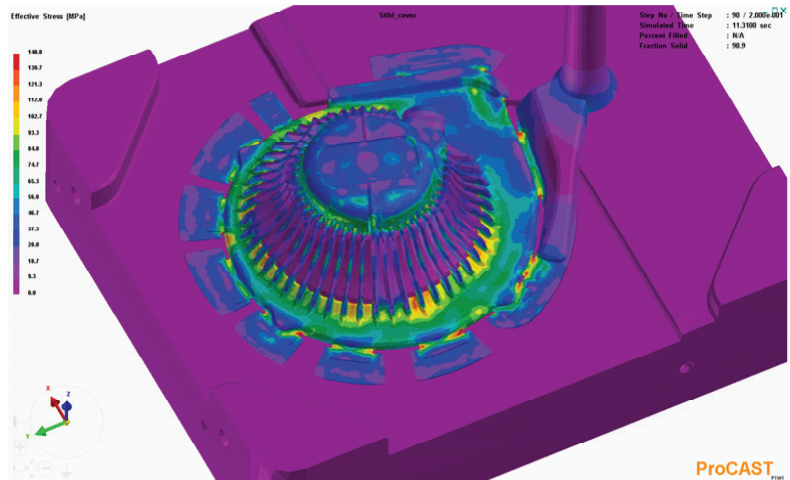
modelling result, a friction coefficient of 0.2 was assumed. Figure 10 shows the stress distribution as imported by the VPS solver (same as Figure 9)

Once the part is ejected the stress field takes a new equilibrium. Comparing Figure 10 and Figure 11 one can observe a general reduction of the stress values after ejection.

Another possibility to analyze the ejection process is to have a look at the contact force during ejection. Figure 12 shows this force for friction values of 0.2 and of 0.5.

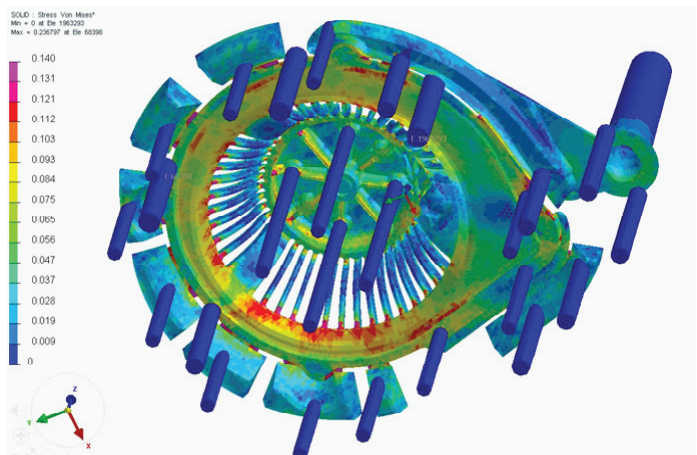
**Slika 9:** Porazdelitev obremenitve (v MPa) v trenutku pred razkalupljanjem

**Figure 9:** Stress (in MPa) distribution at the moment before ejection

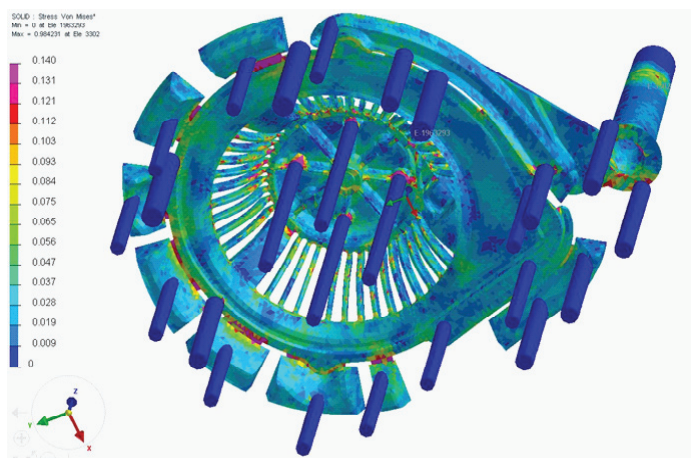


**Slika 10:** Porazdelitev obremenitve (v GPa), uvožena v reševalnik VPS

**Figure 10:** Stress (in GPa) distribution as imported in the VPS solver





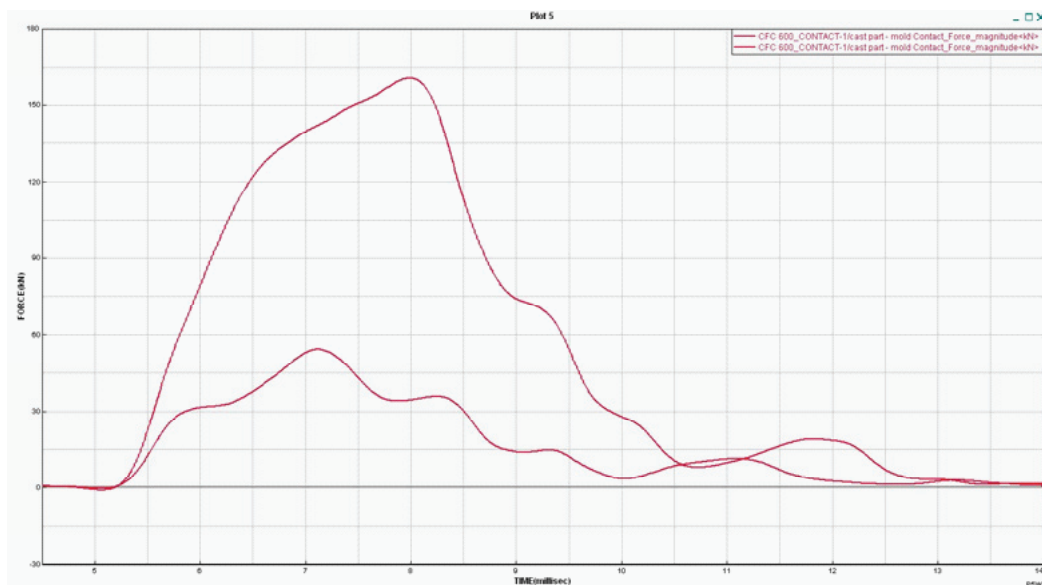


**Slika 11:** Porazdelitev obremenitve (v GPa) po razkalupljanju

**Figure 11:** Stress (in GPa) distribution after ejection

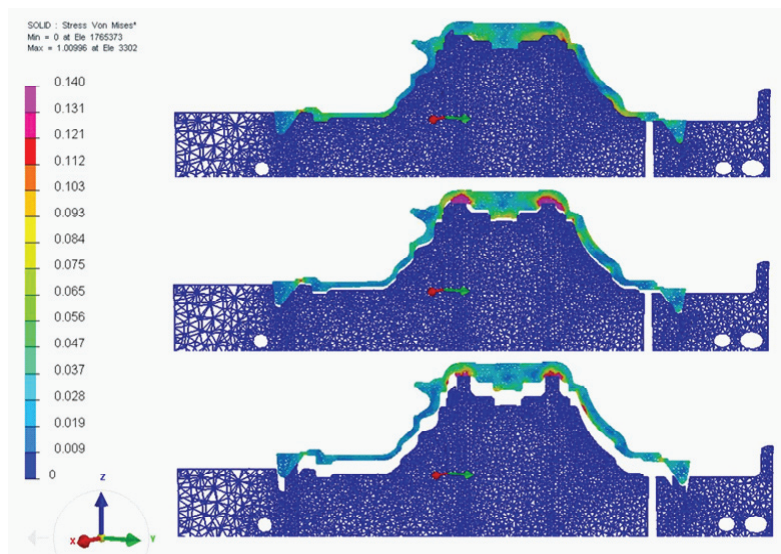
**Slika 12:** Skupna sila med razkalupljanjem; zgornja krivulja koeficient trenja  $f_c$  0,5, spodnja krivulja 0,2

**Figure 12:** Total force during ejection, upper curve  $f_c$  of 0.5, lower curve  $f_c$  of 0.2



trenja 0,5 je rahlo večja od pričakovanj v primerjavi s trenjem 0,2 (če bi pričakovali, da drži načelo sorazmernosti). Razlikuje se tudi oblika krivulj. Videti je, da se pri nižjem trenju razkalupljanje zgodi v dveh korakih (ulitek verjetno najprej izgubi stik z enim mestom in nato še z drugim), v drugem primeru pa izmetavanje sestavlja zgolj en korak.

In the case of a  $f_c$  (friction coefficient) of 0.5 the maximum total force is around 160 kN, while in the case of a  $f_c = 0.2$  an ejection force of around 50 kN can be observed. From the modelling, it appears that the total force shows not a complete linear behavior. The force in the case of 0.5 friction coefficient is slightly higher than expected comparing to the case of a friction coefficient of 0.2 (if one would expect a proportional law). Also, the



**Slika 13:** Obremenitev presečne ravnine med razkalupljanjem

**Figure 13:** Stress in a cutting plane during ejection

Naš pristop omogoča podrobno proučitev faze razkalupljanja. Slika 13 prikazuje obremenitve presečne ravnine med razkalupljanjem. Slika zgoraj prikazuje obremenitve pred razkalupljanjem. Pomniti je treba, da je kokila v trenutnem modelu toga, zato je vrednost obremenitev enaka nič. Ko izmetači izmečejo ulitek, pride na mestu stika do velikih obremenitev. Obremenitve so višje, kadar so mesta stika velika (srednji del Slike 13), oz. se zmanjšujejo z razkalupljanjem ulitka iz kokile (Slika 13 spodaj).

Čeprav so rezultati v industrijskih primerih dosledni s spremembami parametrov modela, jih je mogoče nadalje potrditi zgolj skozi primerjavo z rezultati drugih poskusov. S tem vprašanjem se nameravamo spopadati v prihodnosti.

## 6 Sklepi in nadaljnji koraki

V tem prispevku je predstavljen nov pristop k modeliranju faze razkalupljanja pri tlačnem litju. Na podlagi simulacije procesa

shape of the curves is different. It seems that in the case of lower friction the ejection is done in two steps (the part is probably losing contact first in one area and then in another) while in the second case the ejection is done at once.

The approach is enabling to look at the ejection phase in all details. Figure 13 shows in this context the stresses in a cutting plane during ejection. The top slide shows the stresses before ejection. To be noted that in the current modelling the die is regarded as rigid and therefore the stresses are zero. When the part is ejected by the pins high stresses can be observed in the contact area. The stresses are higher when the contact areas are still large (Figure 13 middle part) and decrease further when the part is more and more moved out (Figure 13 bottom).

While the results of the industrial case are consistent to parameter changes of the model, a further validation can only be achieved by a comparison to experimental results. This will be addressed in the future.

litja, vključno z vidiki termike, pretoka in obremenitev, je osnovan model obremenitve v trenutku razkalupljanja. Takšen model je nato obdelan v mehanski analizi, v sklopu katere napovemo mehanske sile v fazi razkalupljanja. Raziskave študije primera so pokazale, da so izsledki glede vpliva oblike, trenja in nastavitvev izmetačev dosledni. Aplikacija na industrijskem primeru dokazuje, da je mogoče z vidika kompleksnosti oblike takšen pristop uporabiti tudi v dejanskih industrijskih procesih.

Naslednji korak raziskav bo potrditev rezultatov poskusa z namenom umeritve koeficientov trenja, ki bi lahko ustrezali dejanskemu industrijskemu okolju. Po pridobitvi rezultatov se bo pristop uporabil za optimizacijo samega procesa, npr. skozi zmanjšanje števila izmetačev.

## 6 Conclusions and Next Steps

The article shows a new approach to model the ejection phase in HPDC. Based on process simulation of the casting process including thermal, flow and stress aspects the stress state at the moment of ejection is modelled. This state is further processed with a mechanical analysis in order to predict the mechanical forces during the ejection phase. Investigations of a conceptual case show that the results behave in a consistent manner concerning the influence of casting geometry, friction and ejection pin settings. The application on an industrial example shows that this approach can also be applied on a real industrial process in term of complexity of the geometry.

Next step of the investigations will be the validation by experimental results in order to further calibrate the friction coefficients valid in a real industrial environment. Once such results are available the approach will be used to optimize the process itself for example by reducing the number of ejection pins.

## Viri / References

- [1] <https://www.esi-group.com/software-services/virtual-manufacturing/casting/procast-quickcast>
- [2] [HTTP://WWW.ESI-GROUP.COM/SOFTWARE-SERVICES/VIRTUAL-PERFORMANCE/VIRTUAL-PERFORMANCE-SOLUTION](http://www.esi-group.com/software-services/virtual-performance/virtual-performance-solution)
- [3] UPORABNIŠKI PRIROČNIK, MODEL OBREMNITVE IN LASTNOSTI PROCAST

## Vpliv skandija na mikrostrukturo in lastnosti aluminijeve livne zlitine A356

### Effect of scandium on the microstructure and properties of the aluminium casting alloy A356

#### Povzetek

V članku je podan pregled stanja o vplivu skandija na lastnosti aluminijevih livnih zlitin. Prikazana je mikrostruktura predzlitine AlSc2 in mikrostrukture zlitine A356 (AlSi7Mg0,3) v litem stanju in po toplotni obdelavi T6. Predstavljeni so tudi prvi rezultati vpliva majhnega dodatka skandija na trdoto zlitine A356.

**Ključne besede:** aluminijeva zlitina, skandij, mikrostruktura, fazna analiza, trdota

#### Abstract

This article gives a short overview regarding the effects of scandium on the properties of aluminium casting alloy. The microstructure of the master alloy AlSc2 and the microstructures of the alloy A356 (AlSi7Mg0,3) in the as-cast condition and after T6 heat treatment are presented. Effects of small additions of Sc on the hardness of the alloy A356 were also evaluated.

**Keywords:** aluminium alloy, scandium, microstructure, phase analysis, hardness

#### 1 Uvod

Skandij je srebrno-bela prehodna kovina. Pogosto ga uvrščamo, skupaj z itrijem in petnajstimi lantanoidi, v skupino elementov redkih zemelj. Njegov ugodni učinek na aluminijeve zlitine je bil odkrit v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja. Zlitine Al-Sc se v glavnem uporabljajo v letalski in vesoljski industriji; uporabljene so bile v sovjetskih vojaških letalih in raketah [1]. Pred nekaj leti so razvili zlitino Al-Mg-Sc, ki se imenuje Scalmalloy. Izdeluje se z litjem na vrteče kolo (angl. melt spinning), pri katerem se doseže hitro strjevanje. Nato se trakovi toplo iztiskajo ter na koncu toplotno obdelajo. Zlitina ima odlične

#### 1 Introduction

Scandium is a silvery-white transition metal. It is often classified as a rare earth element (REE), together with yttrium and the fifteen lanthanides. The positive effects on aluminium alloys were discovered in the 1970's. The main application of scandium is in aluminium-scandium alloys for selected aerospace industry components. Initially, they were used in the Soviet military aircraft and missiles [1]. A few years ago, an Al-Mg-Sc alloy, called Scalmalloy, has been developed. It is produced by melt spinning, consolidated by warm extrusion and finally heat treated. It has excellent mechanical properties and corrosion resistance. The

trdnostne in korozijske lastnosti. V zadnjem času se deli iz te zlitine izdelujejo tudi z različnimi dodajalnimi tehnologijami, kot je med drugim tudi selektivno lasersko taljenje [2]. Toda ker je letna proizvodnja skandija le okoli deset ton, je težko pričakovati, da bi lahko izdelali velike količine te zlitine. Poleg tega je skandij tudi zelo drag [1].

Uporaba skandija v livnih aluminijevih zlitinah je zelo redka. Pri dosedanjih raziskavah so ugotovili, da več kot 0,4 mas. % Sc lahko močno udrobni kristalna zrna v zlitinah Al-Mg [3]. Muhammad in sodelavci [4] so poročali, da lahko dodatek do 0,4 mas. % Sc zlitini A357 zmanjša velikost kristalnih zrn za 80 %, medtem ko se natezna trdnost in trdota povečata za 28 % in 19 %. Hkrati se poveča tudi razteznost za kar 165 %. Xu in sodelavci [5] so odkrili, da 0,5 mas. % Sc bistveno udrobni mikrostrukturo in oplemeniti evtektični silicij. Pretvorba lamel v vlakna omogoči sferoidizacijo evtektičnega silicija pri toplotni obdelavi. Izboljšanje mehanskih lastnosti je izviralo iz oplemenitenja evtektičnega silicija in izločanja disperzoidov  $Al_3(Sc, Zr)$ .

V gnetnih aluminijevih zlitinah tvori skandij disperzoide, ki preprečijo rast kristalnih zrn med rekristalizacijo in zagotovijo drobna podzrna, kar prispeva k večji trdnosti tako pri sobni temperaturi kot tudi pri povišanih temperaturah. Omogoča tudi superplastičnost številnih aluminijevih zlitin [6]. V livnih zlitinah pa lahko skandij povzroči udrobnitev kristalnih zrn, oplemenitenje evtektičnega silicija ter tudi nastanek disperzoidov, ki lahko povečajo trdnost pri povišanih temperaturah. Toda zaradi interakcije skandija z zlitinskimi elementi, ki so v livnih zlitinah praviloma v večjih koncentracijah kot v gnetnih, se lahko pojavijo tudi nezaželeni stranski učinki, ki pa še niso temeljito raziskani. Cilj tega prispevka je raziskati vpliv skandija na mikrostrukturo Al-zlitine A356 pri litju

parts from this alloy have also been produced by additive manufacturing technologies [2]. Since the annual world production of scandium is not more than ten tonnes, it is hard to expect large quantities of this alloy. Also, scandium is very expensive [1].

The application of Sc in the cast Al-alloys is very rare. The addition of more than 0.4% (mass fraction) Sc can cause a remarkable grain refining effect in Al-Mg alloys [3]. Muhammad et al. [4] reported that the addition of up to 0.4% (mass fraction) Sc to A357 alloy decreased the grain size by 80% while ultimate tensile strength and hardness are increased by 28% and 19%, respectively. Moreover, along with the growth in strength, elongation to failure is also increased up to 165%. Xu et al. [5] found that 0.5% Sc addition could refine the microstructure significantly and modify the morphology of eutectic Si from platelike to fibrous, which promotes the spheroidization of eutectic Si during heat treatment. The improvement of mechanical properties was attributed to microstructural refinement, particularly the modification of eutectic Si and precipitation of nanoscale  $Al_3(Sc, Zr)$  dispersoids.

In the wrought alloys, scandium forms dispersoids that prevent grain growth during recrystallization and provide fine subgrain structure, which provides low-temperature and high-temperature strength. Scandium also allows the superplasticity of many aluminium alloys [6]. In the casting alloys, scandium can cause grain refinement, modification of the eutectic silicon, and also the formation of dispersoids, which can increase the high-temperature strength. However, due to the interaction of scandium with alloying elements, which are present at higher levels than in the wrought alloys, several undesired effects can occur, which have not yet been examined in detail. The main goal of this article is to study the

v bakreno kokilo, kjer se dosežejo večje ohlajevalne hitrosti.

## 2 Eksperimentalno delo

Raziskali smo osnovno zlitino A356 (AlSi7Mg0,3) in zlitino z dodatkom 0,4 % Sc (tabela 1). Skandij smo dodali s predzlitino AlSc<sub>2</sub>. Da bi zlitina s Sc vsebovala podoben delež silicija in magnezija kot osnovna zlitina, smo ji dodali ustrezni količini AlSi<sub>20</sub> in tehnično čistega magnezija.

**Tabela 1:** Kemijska sestava preiskanih zlitin

**Table 1:** The chemical compositions of the investigated alloys

Al	Si	Mg	Fe	Sc
92,11	7,25	0,47	0,17	-
91,71	7,46	0,31	0,11	0,40

Talino s temperaturo 750 °C smo ulili v bakreno kokilo pri sobni temperaturi. Livna votlina je imela takšno obliko, da smo dobili valjčke s premeri 2,5; 4; 6; 10 in 16 mm. Izvedli smo toplotno obdelavo T6 (topilno žarjenje 8 ur pri 536 °C, gašenje v vodi ter staranje 3 ure pri 156 °C).

Vzorci smo metalografsko pripravili in opazovali na svetlobnem mikroskopu (SM) Nikon Neophot 300, vrstičnem elektronskem mikroskopu Sirion 300 NC, FEI, kemično sestavo faz smo ugotavljali z energijskodisperzijsko (EDS) analizo rentgenskih žarkov (INCA 350, Oxford Analytical). Izmerili smo tudi trdoto vseh vzorcev (HV 1) na prečnem prerezu valjčkov s premerom 6 mm z merilnikom mikrotrdote Zwick 3212.

Rentgensko fazno analizo (XRD) smo izvedli v sinhrotronu Elettra (Sincrotrone Elettra, Trst, Italija). Poskuse smo izvajali na končni postaji XRD1, valovna dolžina

scandium effect on the microstructure of the aluminium alloy A356 during casting into a copper mould, where higher cooling rates can be achieved.

## 2 Experimental work

The basic A356 alloy A356 (AlSi7Mg0,3) and the alloy with 0.4% Sc were investigated, Table 1. Scandium has been added in the form of the AlSc<sub>2</sub> master alloy. Adequate amounts of AlSi<sub>20</sub> and technically pure Mg were also added in order to retain approximately the same amounts of Si and Mg in the modified alloy

The melt with a temperature of 750 °C was cast into a copper mould at room temperature. The shape of the mould enabled us to obtain cylinders with diameters of 2.5, 4, 6, 10 and 16 mm. The samples were heat treated by T6 treatment (solution annealing at 536 °C for 8 h, water quenching and artificial aging at 156 °C for 3 h).

The samples were metallographically prepared. They were investigated using a light microscope (LM) Nikon Neophot 300, scanning electron microscope Sirion 300 NC, FEI, the chemical composition of phases were determined using energy dispersive X-ray spectroscopy EDS (INCA 350, Oxford Analytical). The Vickers hardness HV 1 of the samples was tested on the lateral cross-sections of the cylinders with a diameter of 6 mm (microhardness tester Zwick 3212).

The X-ray phase analyses (XRD) were carried out at synchrotron Elettra (Sincrotrone Elettra, Trieste, Italy). The experiments were performed at the beamline XRD1. The wavelength of the X-rays was 0.1 nm. The X-rays were collected by a detector Dectris Pilatus 2M. Afterwards, the results were transformed from 2D images to X-ray patterns intensity vs. 2 $\theta$  using a

uporabljenih rentgenskih žarkov je bila 0,1 nm. Rentgenske žarke smo zajemali z detektorjem Dectris Pilatus 2M. Rezultate smo pretvorili iz 2D-posnetkov v diagrame intenziteta –  $2\theta$  s programom Fit2D. Na osnovi teh diagramov smo s pdf-karticami (pdf je kratica za powder diffraction file) identificirali faze v predzlitini  $\text{AlSc}_2$  ter v stanjih T6 obeh zlitin.

Ravnotežne faze in strjevanje skladno s Scheilovim modelom smo izračunali s programom Thermo-Calc. Pri tem smo uporabili banko podatkov TCAL4.

### 3 Rezultati in diskusija

Slika 1 prikazuje mikrostrukturo predzlitine  $\text{AlSc}_2$ . V predzlitini  $\text{AlSc}_2$  je skandij navzoč v obliki delcev  $\text{Al}_3\text{Sc}$ , ki imajo praviloma kockasto obliko, medtem ko so nekateri dendritne oblike. Z rentgensko fazno analizo smo ugotovili, da ima  $\alpha$ -Al mrežno konstanto  $a = 0,40479$  nm, ter  $\text{Al}_3\text{Sc}$   $a = 0,40980$  nm, kar je zelo blizu vrednostim za čisti Al (številka pdf-kartice 04-0787) in  $\text{Al}_3\text{Sc}$  (številka pdf-kartice: 000-17-0412). Mrežni konstanti obeh faz sta podobni, zato je lahko faza  $\text{Al}_3\text{Sc}$  koherenta z  $\alpha$ -Al, ko so delci majhni, pri večjih velikostih pa postane fazna meja nekoherentna [7].

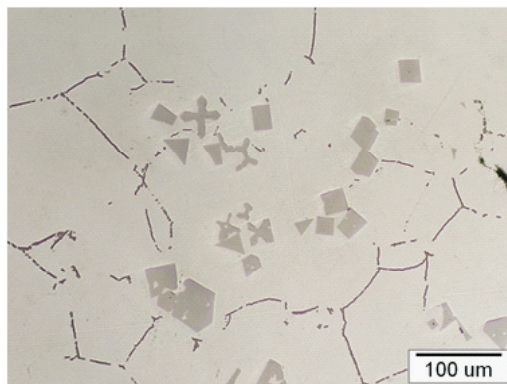
Slika 2 prikazuje mikrostrukturi zlitin v litem stanju, v valjčku s premerom 6 mm. V mikrostrukturi prevladujejo dendriti trdne raztopine  $\alpha$ -Al, v meddendritnem prostoru pa je eutektik ( $\alpha$ -Al +  $\beta$ -Si). V meddendritnem prostoru je bila tudi faza bogata z železom in silicijem, najverjetneje  $\text{Al}_3\text{FeSi}$ . Zaradi sorazmerno hitrega strjevanja sta tako  $\alpha$ -Al kot tudi eutektični silicij zelo drobna, pa tudi razlika med obema mikrostrukturama je zelo majhna.

software Fit2D. These X-ray patterns were used to identify phases in the  $\text{AlSc}_2$  master alloy, and both alloys in T6-state by using pdf cards (pdf is an acronym for powder diffraction file).

The equilibrium phases and solidification according to the Scheil model were calculated using software Thermo-Calc, and the thermodynamic database TCAL4.

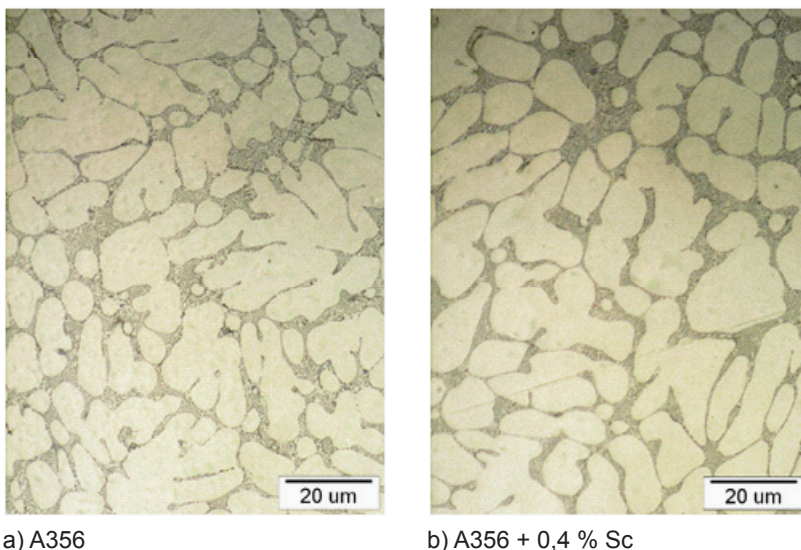
### 3 Results and Discussion

Figure 1 shows the microstructure of the master alloy  $\text{AlSc}_2$ . In the master alloy  $\text{AlSc}_2$ , scandium is mainly present in the form of  $\text{Al}_3\text{Sc}$ -particles, having a cuboidal shape predominantly, while some have a dendritic morphology. XRD showed that the lattice constant of  $\alpha$ -Al was  $a = 0.40479$  nm, and that of  $\text{Al}_3\text{Sc}$  was  $a = 0.40980$  nm. These values were close to values of pure Al (pdf 04-0787) and  $\text{Al}_3\text{Sc}$  (pdf 000-17-0412). The lattice constants of both phases are very similar. Thus, the interface between  $\text{Al}_3\text{Sc}$  and  $\alpha$ -Al can be coherent when the particles are small but can become incoherent when the size of  $\text{Al}_3\text{Sc}$  particles increases [7].



Slika 1: Mikrostruktura predzlitine  $\text{AlSc}_2$  (SM)

Figure 1: Microstructure of the master alloy  $\text{AlSc}_2$  (LM)



a) A356

b) A356 + 0,4 % Sc

**Slika 2:** Primerjava mikrostruktur a) osnovne zlitine in b) zlitine z dodatkom 0,4 % Sc v litem stanju v valjčku s premerom 6 mm (SM)

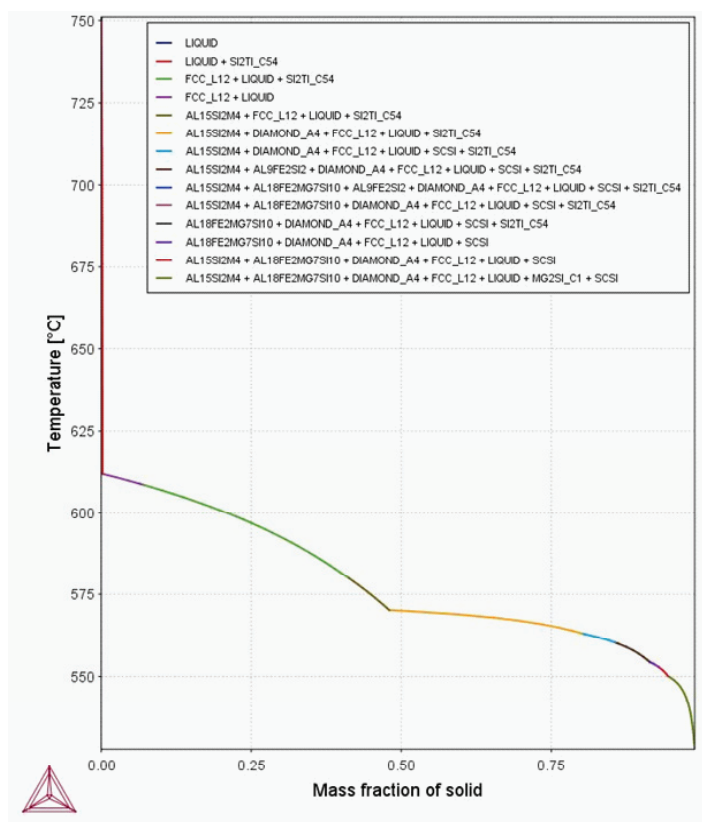
**Figure 2:** A comparison between micro-structures of the a) basic A356 alloy and b) the alloy with 0.4 % Sc in the as-cast condition, in the cylinder with a diameter of 6 mm (LM)

Obe zlitini sta večkomponentni, zato strjevanje poteka preko številnih reakcij. Na sliki 3 so rezultati izračuna strjevanja po Scheilovem modelu za zlitini A356 z 0,4 % Sc. Ta pokaže, da se strjevanje začne že pri 750 °C z izločanjem faze  $\text{Si}_2\text{Ti}$ . Te faze je sicer le 0,2 mas. %, tako da je v mikrostrukturi nismo odkrili. Faza  $\alpha\text{-Al}$  začne nastajati pri 612 °C. Pri približno 570 °C nastopi kvatrna evtektična reakcija  $L \rightarrow \alpha\text{-Al} + \beta\text{-Si} + \text{Si}_2\text{Ti} + \text{AlSiMnFe}$ . Deleža  $\text{Si}_2\text{Ti}$  in  $\text{AlSiMnFe}$  sta zelo majhna, tako da je mikrostruktura tega evtektika skoraj identična mikrostrukturi binarnega evtektika ( $\alpha\text{-Al} + \beta\text{-Si}$ ). Pri nižjih temperaturah se v okviru večfaznih zlogov izloča tudi faza  $\text{ScSi}$ . Strjevanje se konča pri približno 525 °C. Lu in Zhang [8] sta pri termodinamski raziskavi sistema Al-Si-Mg-Sc ugotovila, da se v zlitinah v aluminijevem kotu ne pojavlja faza  $\text{ScSi}$ , temveč ternarna vmesna spojina  $\text{AlSc}_2\text{Si}_2$ , ki pa je ni v banki podatkov TCAL4. Tako naši rezultati niso

Figure 2 shows the microstructure in the as-cast condition, in the cylinder with 6 mm in diameter. The dendrites of  $\alpha\text{-Al}$  prevail in the microstructure. In the interdendritic region is the eutectic ( $\alpha\text{-Al} + \beta\text{-Si}$ ). In the interdendritic spaces, also a phase rich in Fe was present, probably  $\text{Al}_3\text{FeSi}$ . The rather fast solidification resulted in very fine dendrites of  $\alpha\text{-Al}$  as well as fine eutectic silicon. In addition, the differences between both microstructures are rather small.

Both alloys were multicomponent. Therefore, solidification took place over several reactions. Figure 3 shows the crystallization sequence according to the Scheil model for the alloy A356 + 0.4 % Sc. The solidification starts at 750 °C with the formation of  $\text{Si}_2\text{Ti}$  phase, which forms when the alloy has a very small fraction of Ti. The fraction of this phase should be only 0.2%, and we were not able to find it in the microstructure. The  $\alpha\text{-Al}$  starts to form at





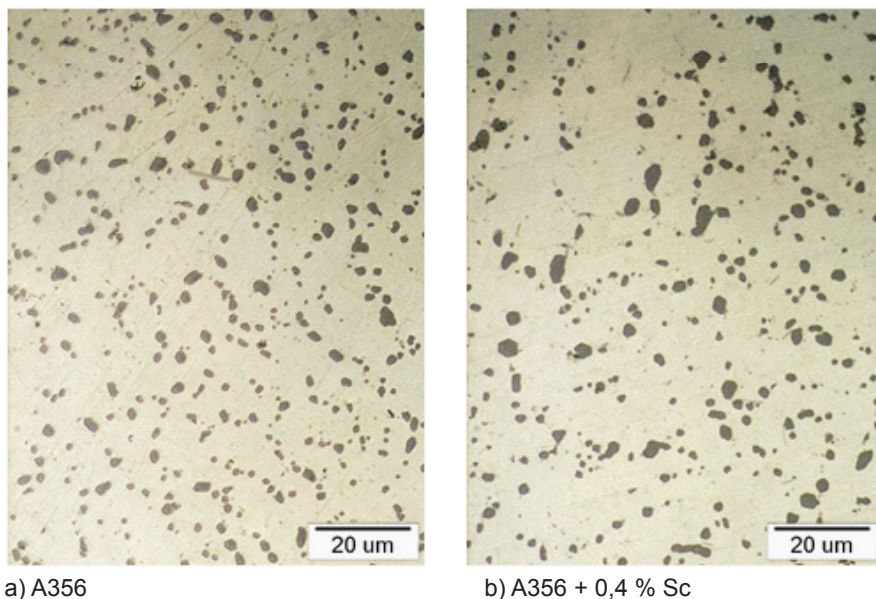
**Slika 3:** Reakcije pri strjevanju izračunane s Scheilovim modelom (program Thermo-Calc)

**Figure 3:** The reactions by solidification, calculated by the Scheil model (Thermo-Calc)

povsem pravilni, vendar pa je primerjava rezultati Luja in Zhanga [8] razkrila, da so razlike v temperaturah, pri katerih se pojavi s skandijem bogata faza, zelo majhne.

Slika 4 prikazuje mikrostrukturi po toplotni obdelavi T6. Osnova je  $\alpha$ -Al, v kateri so delci  $\beta$ -Si in še nekaterih drugih faz. Med osemurnim topilnim žarjenjem pri 536 °C se je močno spremenila oblika  $\beta$ -Si. Ta sedaj ni več navzoč v heterogenem zlogu z  $\alpha$ -Al, temveč so nastali kroglasti delci, ki imajo premer nekaj mikrometrov. Na posnetkih s svetlobnega mikroskopa so delci faze na osnovi AlFeSi komaj opazni (sivi paličasti delci na sliki 4), medtem ko so dobro vidni na elektronskih mikrosposnetkih (svetli delci na sliki 5).

612 °C. At approximately 570 °C, initiates the quaternary eutectic reaction  $L \rightarrow \alpha\text{-Al} + \beta\text{-Si} + \text{Si}_2\text{Ti} + \text{AlSiMnFe}$ . The fractions of  $\text{Si}_2\text{Ti}$  and AlSiMnFe are very small. Thus the formed microstructure closely resembles the microstructure of the binary eutectic ( $\alpha\text{-Al} + \beta\text{-Si}$ ). At lower temperatures, a scandium-rich phase should form. The Thermo-Calc calculations predict the phase ScSi, which is present as a part of multiphase microstructural constituents. The last melt solidifies at 525 °C. Recently, have Lu and Zhang [8] carried out a thermodynamic analysis of the quaternary system Al-Si-Mg-Sc. They found out that in the Al-corner a ternary compound  $\text{AlSc}_2\text{Si}_2$  forms and no ScSi. This phase is not included in the

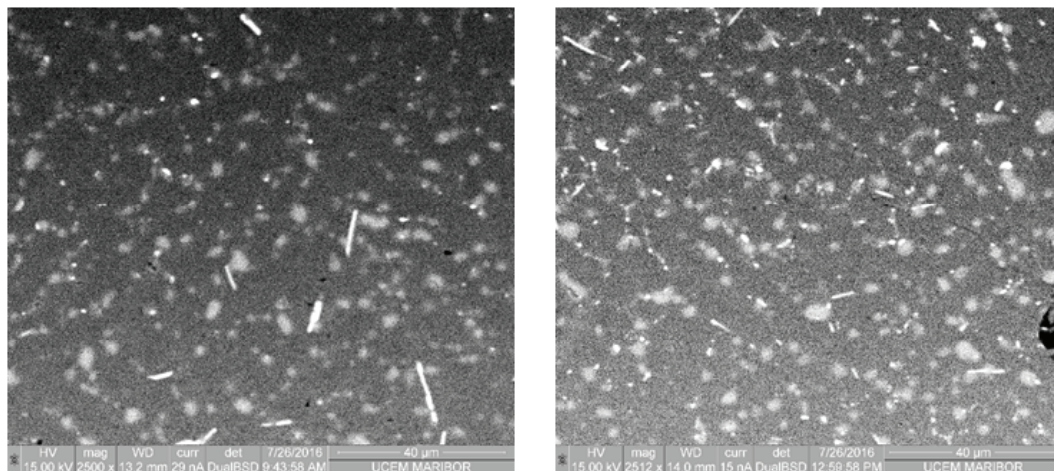


a) A356

b) A356 + 0,4 % Sc

**Slika 4:** Primerjava mikrostruktur a) osnovne zlitine in b) zlitine z dodatkom 0,4 % Sc v valjčkih s premerom 6 mm po toplotni obdelavi T6 (SM)

**Figure 4:** Microstructure comparison of a) the basic alloy and b) the alloy with 0,4% Sc in cylinders with a diameter of 6 mm, in the T6-condition (LM)

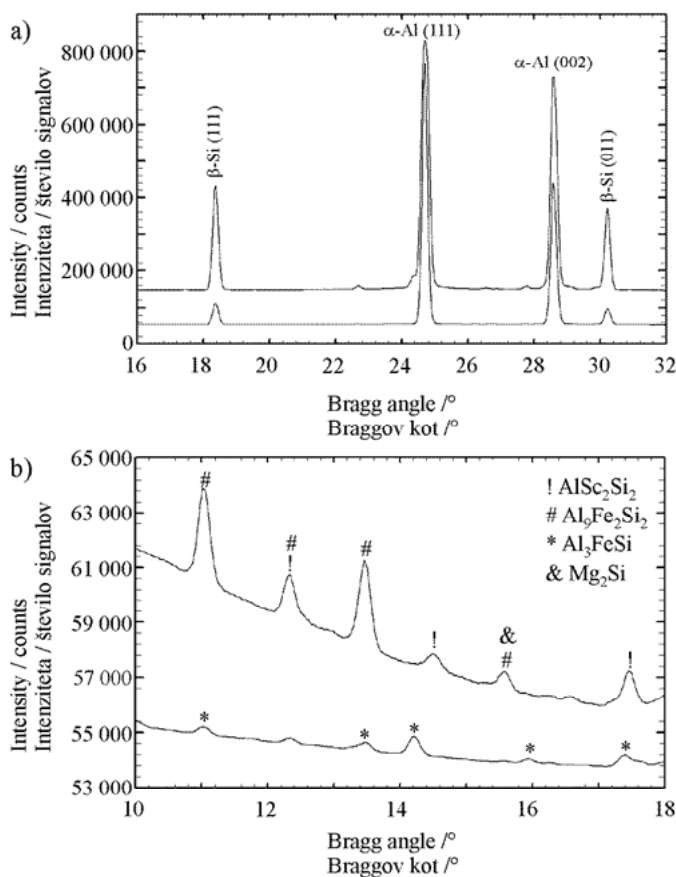


a) A356

b) A356 + 0,4 % Sc

**Slika 5:** Primerjava mikrostruktur a) osnovne zlitine in b) zlitine z dodatkom 0,4 % Sc v valjčkih s premerom 6 mm po toplotni obdelavi T6 (SEM, odbiti elektroni)

**Figure 5:** Microstructure comparison of a) the basic alloy and b) the alloy with 0,4% Sc in cylinders with a diameter of 6 mm, in the T6-condition (SEM, backscattered electrons)



**Slika 6:** Difraktograma zlitin A356 in A356 + 0,4 % Sc po toplotni obdelavi T6. a) Prikaz med kotoma  $2\theta$  od  $16^\circ$  do  $32^\circ$ , kjer lahko identificiramo  $\alpha$ -Al in  $\beta$ -Si, ter b) povečano območje med  $10^\circ$  in  $18^\circ$ , kjer lahko identificiramo fazo  $\text{Al}_3\text{FeSi}$  v zlitini A356, ter faze  $\text{AlSc}_2\text{Si}_2$ ,  $\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$  in  $\text{Mg}_2\text{Si}$  v zlitini A356, ki ima 0,4 % Sc.

**Figure 6:** X-ray diffraction patterns of the alloys A356 and A356 + 0.4 % Sc in the T6-condition. a) The range of  $2\theta$  between  $16^\circ$  and  $32^\circ$ , where  $\alpha$ -Al and  $\beta$ -Si can be identified, and b) the area between  $10^\circ$  and  $18^\circ$ , where  $\text{Al}_3\text{FeSi}$  in alloy A356, and  $\text{AlSc}_2\text{Si}_2$ ,  $\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$  and  $\text{Mg}_2\text{Si}$  in the alloy A356 + 0.4 % Sc can be identified.

Na sliki 6 sta difraktograma obeh zlitin. Slika 6a prikazuje območje med kotoma  $2\theta$   $16^\circ$  in  $32^\circ$ , kjer lahko identificiramo fazi  $\alpha$ -Al in  $\beta$ -Si. Opazni so tudi manjši vrhovi, ki pa ne omogočajo zanesljive identifikacije faz. S podrobno analizo ostalih območij difraktograma smo v stanju T6 zlitine A356 identificirali fazo  $\text{Al}_3\text{FeSi}$ . V zlitini A356, ki ima 0,4 % Sc, pa še faze  $\text{AlSc}_2\text{Si}_2$ ,  $\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$  in  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . Fazi  $\text{Al}_3\text{FeSi}$  in  $\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$  sta si zelo podobni, saj imata obe monoklinsko kristalno zgradbo. Kristalografski podatki o fazah so zbrani v tabeli 2.

Glede na sliki 4 in 5 in rezultate XRD dodatek Sc spremeni sestavo in mrežne

databank TCAL4. Thus, our results are not completely correct, at least at lower temperatures. However, the comparisons of the results have shown that the differences in the calculated temperatures in the temperature region, where a scandium-rich phase is present, are not significant.

Figure 4 depicts the microstructure after T6 heat treatment. The matrix is  $\alpha$ -Al, in which particles of  $\beta$ -Si and some other phases are present. The shape of  $\beta$ -Si particles has considerably changed during solution treatment at  $536^\circ\text{C}$  for 8h.  $\beta$ -Si is not present as a part of eutectic ( $\alpha$ -Al +  $\beta$ -Si) anymore but in the form of mainly spherical

**Tabela 2:** Rezultati rentgenske fazne analize zlitin v stanju T6**Table 2:** The results of the XRD of alloys in the condition T6

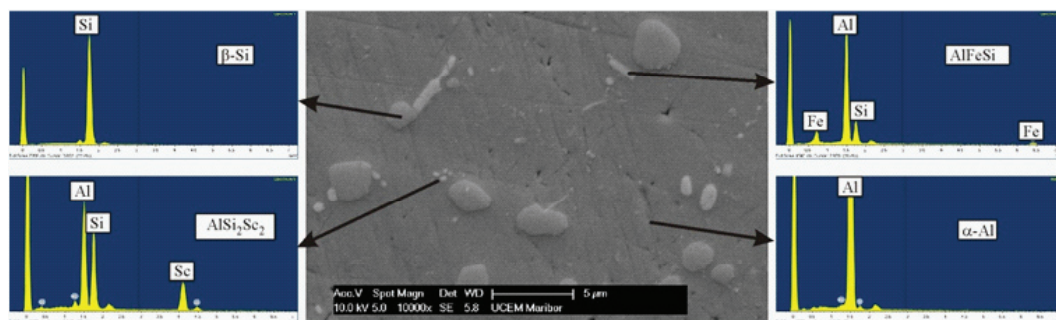
Vzorec	$\alpha$ -Al	$\beta$ -Si	$\text{AlSc}_2\text{Si}_2$	$\text{Al}_3\text{FeSi}$ ( $\alpha$ -AlFeSi)	$\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$ ( $\alpha$ -AlFeSi)
A356T6_2	$a = 0,40492$	$a = 0,54249$		$a = 1,78012$ $b = 1,02516$ $c = 0,88954$ $\beta = 132,03^\circ$	
A356Sc04T6_1	$a = 0,40486$	$a = 0,54233$	$a = 0,65977$ $b = 0,39742$		$a = 2,09031$ $b = 0,62781$ $c = 0,60632$ $\beta = 89,86^\circ$
Referenčni podatki	pdf 04-0787	27-1402	ref. [1]	pdf 20-0032	pdf 54-0376

parametre faze AlFeSi, hkrati pa se zmanjša njena velikost.

Podrobnejša analiza mikrostrukture zlitine A356 + 0,4 % Sc z vrstičnim elektronskim mikroskopom in energijsko-disperzijsko analizo je prikazana na sliki 7. Svetli, podolgovati delci vsebujejo Al, Si in Fe. V njih ni praktično nič Mn, saj je tudi v osnovni zlitini bil v zelo majhni količini. Torej je to gotovo faza  $\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$  ( $\alpha$ -AlSiFe), ki smo jo identificirali tudi z rentgensko fazno analizo. Faza  $\text{AlSc}_2\text{Si}_2$  je navzoča v obliki kroglastih delcev, ki so veliki od nekaj desetink mikrometra do enega mikrometra.

particles. Light and electron micrographs also reveal the presence of a phase based on AlFeSi (Figures 4, 5).

Figure 6 shows the X-ray diffraction patterns of both alloys in T6 condition. Figure 6a illustrates the area between  $16^\circ$  and  $32^\circ$ , where the phases  $\alpha$ -Al and  $\beta$ -Si can be identified. There are also smaller peaks present, but they do not allow reliable identification of phases. Careful analysis of other regions revealed the phases  $\text{Al}_3\text{FeSi}$  in A356, and  $\text{AlSc}_2\text{Si}_2$ ,  $\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$  and  $\text{Mg}_2\text{Si}$  in A356 + 0.4% Sc. Phases  $\text{Al}_3\text{FeSi}$  and  $\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$  are very similar since both exhibit

**Slika 7:** Analiza zlitin A356 + 0,4 Sc v stanju T6 (SEM + EDS)**Figure 7:** Analysis of the alloy A356 + 0.4 Sc in the T6-condition.

Izločkov faze  $Mg_2Si$  z vrstičnim elektronskim mikroskopom nismo mogli identificirati.

S programom Thermo-Calc smo izračunali tudi ravnotežne faze pri temperaturi topilnega žarjenja. To naj bi bile faze  $\alpha$ -Al (92 mol. %),  $\beta$ -Si (6 mol. %),  $Al_{15}Si_2(Fe,Mn)_4$  (1,2 mol. %), ter zelo malo faze ScSi. Glede na to, da v banki podatkov ni  $AlSc_2Si_2$ , njeno mesto nadomešča faza ScSi. V mikrostrukturi pa je zaradi majhne vsebnosti Mn namesto faze  $Al_{15}Si_2(Fe,Mn)_4$  navzoča faza  $Al_9Fe_2Si_2$ .

V tabeli 3 so trdote v litem stanju in po toplotnih obdelavah. Razlike med zlitinama pri premeru 6 mm niso velike. Največje so v stanju T6, morda zaradi nekoliko večje vsebnosti magnezija v osnovni zlitini. Večje razlike bi lahko pričakovali pri večjih premerih, kjer so hitrosti ohlajanja počasnejše. Vsekakor navzočnosti skandija povzroči, da je železova faza bolj drobna, kar bi lahko vplivalo na povečanje duktilnosti zlitine pri nateznem preskusu

Eden izmed ciljev dodajanja skandija je povečanje temperaturne stabilnosti zlitin. Zato je gotovo pomembnejše, kako se te zlitine obnašajo pri povišanih temperaturah. To pa je področje raziskav, na katerem bomo v prihodnje intenzivneje raziskovali tovrstne zlitine.

**Tabela 3:** Vrednosti trdot HV 1 valjčkov s premerom 6 mm v različnih stanjih

**Table 3:** Hardness HV 1 of the cylinders with a 6 mm diameter in different conditions

Zlitina / Alloy	lito / As-cast	Topilno žarjeno + gašeno / Solution annealed + quenched	T6
A356	84	86	106
A356 + 0,4 % Sc	84	77	90

a monoclinic structure. The crystallographic data are collected in Table 2. Thus the addition of Sc to A356 changes the nature of AlFeSi-phase, and also reduces its size (Figures 4, 5).

The detailed analyses of the microstructure of the alloy A356 + 0.4 % Sc using SEM and EDS is shown in Figure 7. The bright and elongated particles contain Al, Si and Fe. They do not contain any Mn since its amount in our alloy was minor. These particles should then belong to the phase  $Al_9Fe_2Si_2$  ( $\alpha$ -AlSiFe), which was identified by XRD. The  $AlSc_2Si_2$  is present in the form of spherical particles. Their sizes range between few tenths of micrometre and one micrometre. The  $Mg_2Si$  precipitates have not been identified using SEM.

The equilibrium phases at a temperature of the solution annealing were calculated using Thermo-Calc. These phases should be  $\alpha$ -Al (92 mol. %),  $\beta$ -Si (6 mol. %),  $Al_{15}Si_2(Fe,Mn)_4$  (1.2 mol. %), and a tiny amount of ScSi. Since the phase  $AlSc_2Si_2$  is not in TCAL4, its place is occupied by ScSi. Due to a tiny amount of Mn, the Mn-rich phase was not detected in the microstructure. Instead of it, the phase  $Al_9Fe_2Si_2$  appeared.

Table 3 illustrates the hardness in the as-cast and heat treated conditions. Differences in the samples having a diameter of 6 mm are not large. The greatest are in the condition T6. Higher differences could be expected by larger diameters when the cooling rates are much lower. The presence of Sc caused the formation of smaller particles of the Fe-rich phase, which should have a beneficial effect on the ductility of the alloy.

One of the goals by the addition of scandium is to increase temperature stability of the alloys. Therefore, it is more important how these alloys behave at higher

## 4 Sklepi

Po podatkih iz literature lahko majhen dodatek skandija lahko v aluminijevih zlitinah udrobni kristalna zrna, zmanjša razdalje med dendritnimi vejami, hkrati pa se oplemeniti evtektični silicij. Torej ima skandij večkratni pozitivni učinek, kar je izrazito pri majhnih ohlajevalnih hitrostih. Pri naših preskusih, ko smo zlitino lili v bakreno kokilo, razlike niso bile zelo velike. Trenutno je svetovno proizvodnja majhna in težavna, zato je sorazmerno drag. Pogosto se delno nadomešča z drugimi elementi, predvsem s cirkonijem in itrijem.

V tem delu so predstavljeni tudi začetni rezultati učinka na mikrostrukturo in trdoto zlitine A356, ki je bila ulita v bakreno kokilo. Pri sorazmerno velikih ohlajevalnih hitrostih je vpliv dodatka Sc sorazmerno majhen. Najbolj je bilo očitno zmanjšanje velikosti z železom bogate faze. V zlitini smo identificirali fazo  $\text{AlSc}_2\text{Si}_2$ , ki se pojavlja v zlitinah Al-Si namesto faze  $\text{Al}_3\text{Si}$ . Zato bo potrebno to fazo vključiti v banko termodinamskih podatkov, da bodo rezultati termodinamskih izračunov ustreznejši.

Podoben učinek skandija na zlitino A356 kot je bil ugotovljen v tej raziskavi, lahko pričakujemo tudi v primeru tlačnega litja. Ta na mikrostrukturo in lastnosti ne vpliva v zelo veliki meri, vendar pa bo bolj bistveno ugotoviti, kako Sc vpliva na povečanje temperaturne stabilnosti zlitin.

## 5 Zahvala

Raziskava je bila izvedena v okviru raziskovalnega programa P2-0120, ki ga sofinancira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna.

Izvedba XRD analiz je bila omogočena z odprtim dostopom do sinhrotrona Elettra,

temperatures. This is the area, where we intend to continue research in the future.

## 4 Conclusions

A small addition of scandium can refine the grain sizes, decrease the distances between the secondary dendrite arms, and modify the eutectic silicon in aluminium alloys. Thus, scandium can have multiple effects. At the moment, the world production of scandium is very small, and consequently, its price is very high. Zirconium and yttrium frequently replaced it.

In this work, we present our initial results regarding the effect of scandium on the microstructure and hardness of the alloy A356, which has been cast into a copper mould. At higher cooling rates, the effect of scandium is rather small. It mainly decreases the size of iron-rich phase in all conditions. In the investigated alloy, we identify the phase  $\text{AlSc}_2\text{Si}_2$ , which is present in Al-Si alloy instead of  $\text{Al}_3\text{Si}$ . Therefore,  $\text{AlSc}_2\text{Si}_2$  should be incorporated into thermodynamic databases, in order to improve the reliability of thermodynamic modelling in Al-Si alloys.

A similar effect of scandium as it was detected in this investigation can be expected by high-pressure die casting. Its effect on microstructure and properties is not very large. However, it will be more important to determine the effect of Sc on increase of the temperature stability of Al-Si alloys.

## 5 Acknowledgements

The authors acknowledge the financial support from the Slovenian Research Agency (research core funding No. P2-0120).

The XRD-investigations were supported by the open access at Elettra, Sincrotrone

Sincrotrone Trieste, Italy in sodelovanjem Istituto di Cristallografia - C.N.R, sedež Secondaria di Trieste, Elettra. Posebej pa bi se radi zahvalili Luisi Barba za pomoč pri izvedbi analiz.

Trieste, Italy and Instituto di Cristallografia - C.N.R. Sede Secondaria di Trieste, Elettra. We are thankful to Luisa Barba who greatly assisted with the research.

### Reference / References:

- [1] S. Riva, K.V. Yusenko, N.P. Lavery, D.J. Jarvis, S.G.R. Brown, The scandium effect in multicomponent alloys, *International Materials Reviews*, 61 (2016) 203-228.
- [2] A.B. Spierings, K. Dawson, M. Voegtlin, F. Palm, P.J. Uggowitzer, Microstructure and mechanical properties of as-processed scandium-modified aluminium using selective laser melting, *CIRP Ann-Manuf. Technol.*, 65 (2016) 213-216.
- [3] S.A. Zhou, Z. Zhang, M. Li, D.J. Pan, H.L. Su, X.D. Du, P. Li, Y.C. Wu, Effect of Sc on microstructure and mechanical properties of as-cast Al-Mg alloys, *Materials & Design*, 90 (2016) 1077-1084.
- [4] A. Muhammad, C. Xu, W. Xuejiao, S. Hanada, H. Yamagata, L.R. Hao, M. Chaoli, High strength aluminum cast alloy: A Sc modification of a standard Al-Si-Mg cast alloy, *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 604 (2014) 122-126.
- [5] C. Xu, W.L. Xiao, R.X. Zheng, S. Hanada, H. Yamagata, C.L. Ma, The synergic effects of Sc and Zr on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloy, *Materials & Design*, 88 (2015) 485-492.
- [6] A. Smolej, B. Markoli, A. Nagode, D. Klobčar, Influence of minor scandium and zirconium additions on the microstructure of Al and Al-5Mg alloy, *RMZ – M&G*, 62 (2015) 73–80.
- [7] A.K. Lohar, B. Mondal, D. Rafaja, V. Klemm, S.C. Panigrahi, Microstructural investigations on as-cast and annealed Al-Sc and Al-Sc-Zr alloys, *Materials Characterization*, 60 (2009) 1387-1394.
- [8] Z. Lu, L. Zhang, Thermodynamic description of the quaternary Al-Si-Mg-Sc system and its application to the design of novel Sc-additional A356 alloys, *Materials & Design*, 116 (2017) 427-437.

## Znižanje proizvodnih stroškov z regeneracijo bentonitnega peska (Študija primera)

### Reduction of production costs via bentonite clay powder<sup>1</sup> reclamation (Case study)

#### Povzetek

Livarne, ki uporabljajo bentonitne peske, se srečujejo s težavami, kot je prekomerna količina peska v obtoku, kot tudi neprimerna granulacijska sestava peska, ki vsebuje prevelik delež finih frakcij in inertnih snovi. Obstaja visoka povezanost med finimi frakcijami in inertnimi snovi v pesku ter napakami na ulitkih, še posebej v obliki vključkov peska. Vzdrževanje ustrezne peščene mešanice je možno z ustrezno večjim osveževanjem, kar posledično pomeni, da količina peska v sistemu naraste preko skladiščnih zmogljivosti in ga je potrebno izločati iz sistema ter odvažati na deponijo. Alternativa takemu načinu pa je uvedba naprave za regeneracijo peska.

V raziskavi smo prikazali, da s primerno regeneracijo povratnega peska lahko inertne snovi in fine frakcije vzdržujemo na želeni ravni, pri manjši porabi peska. Poraba kremenčevega peska se je zmanjšala za slabih 40 %, temu primerno pa se je zmanjšala tudi poraba bentonita in črnine. Investicija v regeneracijo se povrne v manj kot 2 letih.

**Ključne besede: regeneracija, bentonitni pesek, fine frakcije, odprane snovi, stroški, t-test**

#### Summary

Foundries which utilize bentonite clay powders often face problems such as excessive sand quantities in circulation along with inadequate granular sand composition, i.e. sand that contains excessive fine fractions and inert substance proportions. There is a high correlation between fine fractions, inert substances in the sand and faulty castings, particularly in the form of sand inclusions. Maintaining a suitable sand mixture is possible via suitable refreshing. In turn, the quantity of system sand will surpass the available storage space and will need to be eliminated from the system and discarded at a landfill. An alternative to this is the introduction of a sand reclamation system.

In the study, we have shown that via suitable return sand reclamation, inert substance and fine fraction levels can be maintained and the sand consumption reduced. Silica sand consumption was decreased by just under 40%, and also resulted in the reduced consumption of bentonite clay and blacking. The reclamation investment should return within less than 2 years.

**Keywords: reclamation, bentonite clay powder, fine fractions, leached substances, costs, t-test**

---

1 Proizvajalec opreme loči med reclamation, kar obravnavamo in regeneration. Ker v slo. nismo našli ustrežnejšega izraza, uporabljamo termin regeneracija.

The equipment manufacturer differentiates between the terms reclamation, dealt with in this article, and regeneration. Since no equivalent exists in Slovene, the expression »regeneracija« has been used throughout.



## 1 Uvod

Formarska linija v obravnavani livarni ima zmogljivost 150 form/h. Velikost okvirjev 900 x 900 x 300/300 mm, s horizontalno delilno ravnino. Količina peska v skopljeni formi je cca. 700 kg, povprečna masa litine pa 25 kg, kar kaže na visoko razmerje pesek : litina (p/l).

Visoko razmerje p/l povečuje delež finih frakcij v pesku, kar posledično pomeni majhen delež izgub in zato manjšo možno osvežitev peska pri konstantni količini peska v sistemu. Drugače povedano, če bi pesek osveževali z deležem, s katerim bi zagotavljali primerno kakovost ulitkov, bi količina v sistemu naraščala in bi kmalu preseгла zmogljivost zalogovnikov. Težava finih frakcij v pesku je v tem, da povečujejo potrebo po vlagi - in to lahko do take mere, da se je zaradi oteženega formanja in posledično oteženega razpada na rešetki ne moremo privoščiti. Ugotovili smo, da na delež izmeta najbolj vplivata dve, v raziskavi [1] zajeti spremenljivki. Zelo visoka pozitivna linearna povezanost je med izmetom in deležem odpranih snovi v pesku. Med vsemi korelacijami ima ta najvišjo vrednost, katere faktor (R) je enak 0,804. Med drobnimi frakcijami peska in izmetom je visoka linearna povezanost. Vrednost faktorja (R) med deležem peska z granulacijo < 0,09 mm in izmetom je enaka 0,737, med deležem peska z granulacijo < 0,125 mm in izmetom pa je enaka 0,626.

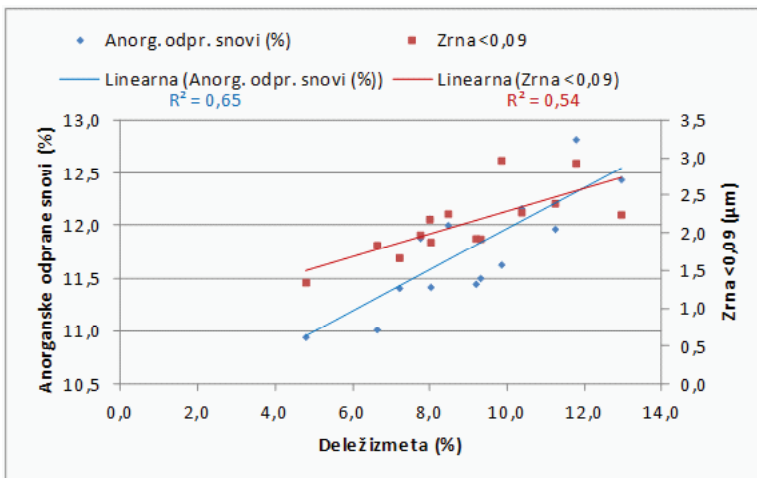
Delež odpranih snovi in finih frakcij (< 0,09 mm) se povečuje s kroženjem peska v sistemu. Če je razmerje p/l visoko, 20:1 in več, se delež odpranih snovi in finih frakcij stabilizira na zelo visoki ravni. Pri osveževanju sistema z 0,5 % dodatkom, se pesek v sistemu zamenja v cca. 1000 obratih, kar pomeni, da se dolgo zadržuje v sistemu in zdrobi do stopnje, ko se fine frakcije stabilizirajo na visoki ravni. Krajši

## 1 Introduction

The moulding line at the subject foundry has a capacity of 150 moulds/h. Moulds are sized 900x900x300/300 mm and have a horizontal joint face. A packed mould is composed of ca. 700kg sand while the mass of the average alloy totals to 25 kg, which is indicative of a high sand vs. alloy ratio (S/A).

A high S/A ratio increases the fine fraction proportions in sand. In turn, this leads to minimal losses as well as smaller refreshing sand volumes at constant sand system levels. To reiterate, if sand was refreshed via the proportion of sand which would guarantee the required casting quality, the system sand volume would soon grow out of control and exceed available storage capacities. The problem with fine sand fractions is that they in turn increase moisture requirements to the extent that mould production and subsequent breaking of moulds becomes extremely difficult. We have established that the rejection rate is most prominently affected by the two variables included in the study [1]. There exists an extremely high positive linear correlation between the rejection rate and the proportion of leached substances in the sand. Among all correlations, the highest values have been calculated for those with the factor (R) equalling 0.804. There also exists a high linear correlation between fine sand fractions and the rejection rate. The value of factor (R) between the proportion of sand sized <0.09 mm and rejection equals 0.737, while in case of sand grains <0.125 mm and rejections it totals to 0.626.

The proportion of leached substances and fine fractions (<0.09 mm) increases with the circulation of sand within the system. In case of a high S/A ratio (20:1 or higher), the proportion of leached substances and fine fractions is stable at a very high level. When



**Slika 1:** Povezanost odpranih snovi in finih frakcij kremenčevega peska z izmetom

**Figure 1:** Correlation between leached substances and fine silica sand fractions vs. rejection rate

čas zadrževanja peska v sistemu oziroma manjše število obratov peska pa posledično predstavlja nižji delež finih frakcij in odpranih snovi.

Vpliv finih frakcij na delež izmeta je viden na sliki 1. Determinacijski koeficient  $R^2$  je srednje visok, tako da s spremenljivko »Zrna < 0,09« lahko pojasnimo 54 % variabilnosti izmeta.

Vpliv odpranih snovi na višino izmeta je prav tako prikazan na sliki 1. Determinacijski koeficient  $R^2$  je visok, tako da s spremenljivko »Anorganske odprane snovi« pojasnimo 65 % variabilnosti izmeta.

## 2 Opis težave

Dejstvo je, da je nizek delež odpranih snovi in finih frakcij v pesku težko obvladovati. Deleži se spreminjajo v odvisnosti od spreminjanja razmerja p/l. Velja, da večje razmerje p/l povzroča nastajanje večjega deleža odpranih snovi ter finih frakcij in obratno. Za vzdrževanje želenega deleža odpranih snovi in finih frakcij moramo peščen sistem primerno osveževati. Pri visokem razmerju p/l (> 20:1), je to skoraj

refreshing the system with approx. 0.5% material, the sand within the system will be replaced in ca. 1000 cycles. This means that the sand will remain within the system for extended periods and become crushed to the extent where high levels of fine fractions become prevalent. In turn, shorter system sand times and reduced number of cycles will lead to a smaller proportion of fine fractions and leached substances.

The impact of fine fractions on rejection rates is shown in Figure 1. The  $R^2$  coefficient of determination is medium high, which means that the »Grain<0.09« variable should explain the 54% rejection variability.

The impact of leached substances vs. rejection rate is shown in Figure 1. The  $R^2$  coefficient of determination is high, which means that the »Inorganic leached substances« variable should explain the 65% reject variability.

## 2 Problem description

It is well known that maintaining a low rate of leached substances and fine fractions in sand is notoriously difficult. The proportions

nemogoče, ne da bi izločali določeno količino peska iz sistema, ker bi sicer količina peska v obtoku preseгла razpoložljive skladiščne zmogljivosti. Rešitev je možno iskati tudi v primernem odpraševanju povratnega peska, vendar le ob primerno nizki vlagi (< 2%), kar pa je pri visokem razmerju p/l spet težko doseči.

Konkretno rešitev za zmanjšanje deleža odpranih snovi in finih frakcij, ki so povezane z investicijami, bomo prikazali v nadaljevanju.

## 2.1 Cilj projekta

Izbrati primerno opremo za regeneracijo peska, s katero bi zagotavljali osveževanje v takem obsegu, da bi pokrivali samo izgube peska po naravni poti, kar pomeni samo izgube s peskanjem ulitkov.

### 2.1.1 Primarni cilj

Peščeni sistem bi osveževali samo toliko, da bi pokrivali izgube, kar pomeni, da bi bil dodatek novega peska 5 kg, namesto sedanjih 8 kg/mešalec. Manjši porabi kremenčevega peska bi sledila tudi manjša poraba črnine in bentonita.

### 2.1.2 Sekundarni cilji

Delež odpranih snovi bi moral ostati na enaki ravni ali biti celo nižji. Delež drobnih frakcij kremenovih zrn bi prav tako moral ostati vsaj na enaki ravni, če ne še nižji. Delež ulitkov z napakami se ne bi smel povečati, ostati mora vsaj na enaki ravni, kot pred uvedbo regeneracije.

## 2.2 Izbor in testiranje opreme

Zastavljene cilje smo poskušali doseči z investicijo v mehansko regeneracijo peska.

change based on the S/A ratio. Namely, a higher S/A ratio will generate a higher proportion of leached substances and fine fractions, and vice versa. In order to maintain the leached substances and fine fraction proportions, the foundry sand system must be suitably maintained. With a high S/A ratio (>20:1), this could prove virtually impossible without first removing part of the sand from the system. Otherwise, the total quantity of sand used in the foundry would soon exceed the available storage capacity. Another solution would be the suitable dedusting of return sand at low moisture levels (<2%), which could prove quite difficult with a high S/A ratio.

The concrete solution which would reduce the proportion of leached substances and fine fractions connected to the investments is described below.

## 2.1 Project objectives

Selection of suitable sand reclamation equipment which would ensure the recovery of sand to the extent that would only necessitate the refreshing of sand lost naturally, i.e. via casting sand blasting.

### 2.1.1 Primary objective

The sand system would only be refreshed to the extent of covering losses. This means that only 5kg of new sand would need to be added instead of the current 8kg/mixer. The decreased silica sand consumption would also result in a decrease in blacking and bentonite clay use.

### 2.1.2 Secondary objective

Maintain or reduce the level of leached substances. The proportion of fine silica

**Tabela 1:** Rezultati testiranja peska [3]**Table 1:** Sand testing results [3]

Batch number / Številka šarže	A-1		A-2	
Nozzle gap setting / Nastavitev šob	6		6	
Scrub rate (kg/hr/cell) / Storilnost regene.	900		1125	
Plenum negative (mm) / Presipi nastavitev	38		38	
Total material (kg) / Celotna količina	135	100,00%	134	100,00%
DMaterial Charged in Reclaim. / Dejansko	135	100,00%	134	100,00%
Total reclaimed (kg) / Regenerirano	101	75,25%	108	80,87%
Total losses (kg) / Celotne izgube	33	24,75%	26	19,13%
Reclaimer yield / Izkoristek		75,25%		80,87%
LOI reduction / Znižanje žaroizgub		60,22%		42,92%
AFS clay reduction / Znižanje odpranega		55,25%		43,05%
M.B. clay reduction / Znižanje bentonita		55,07%		40,58%

Izbrali smo opremo SIMPSON ProClaim, ki ga zastopa Siapro [2], z zmogljivostjo do 5 t/h, kar je najmanjša, ki jo ponujajo, in bi bila za naše potrebe povsem primerna. Poslan je bil vzorec 1000 kg peska na testiranje v SIMSON, kjer so po opravljeni regeneraciji izdelali poročilo (tabela 1), ki je ustrezalo zahtevam.

Začeli smo s časi obratovanja, kot so navedeni spodaj, in pri takem obratovanju zbirali podatke za analizo učinkovitosti delovanja regeneracije.

Čas obratovanja regeneracije	7 h/dan
Čas doziranje peska v napravo	4 h/dan
Čas regeneriranja	3 h/dan
Vstopna količina peska	7000 kg (340 kg/h)
Izstopna količina	6685 kg
Odpadek	315 kg oz. 5%

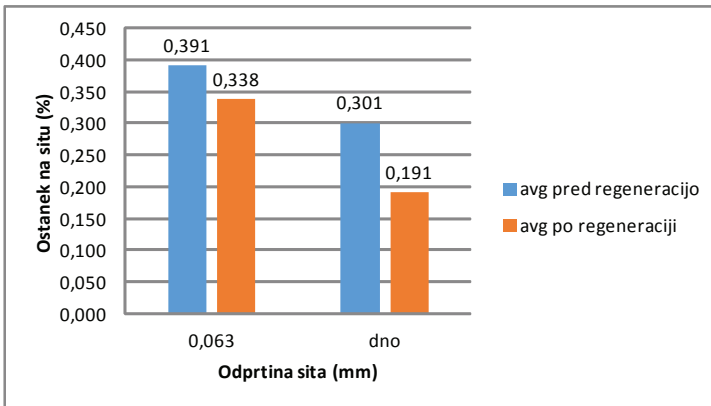
Preverjali smo zmanjšanje deleža drobnih frakcij kremenčevega peska, žaro izgube in odprane snovi, na izstopu iz regeneracije. Na sliki 2 vidimo, da se je delež ostanka na situ 0,063 mm zmanjšal

sand fractions should be maintained or even reduced. The proportion of faulty castings should not increase. Instead, it should at a minimum correspond to the levels before the introduction of reclamation.

## 2.2 Equipment selection and testing

The means to achieve the defined objectives is an investment into a mechanical sand reclamation system. Selected was equipment by SIMPSON ProClaim represented by Siapro [2] with a capacity of up to 5t/h, that is the lowest capacity available, which is perfectly suitable in light of our requirements. 1000 kg sand was despatched to SIMPSON for testing where a report in line with the requirements was drawn up following reclamation.

Initially, operation times as set out below were used. Based on such operations, data was collected in order to carry out a reclamation efficiency analysis.



**Slika 2:** Delež podzrna v povratnem pesku pred in po regeneraciji

**Figure 2:** Undersized grains in return sand before and after regeneration

za dobrih 13 %, medtem ko se je delež na dnu zmanjšal za dobrih 36 %.

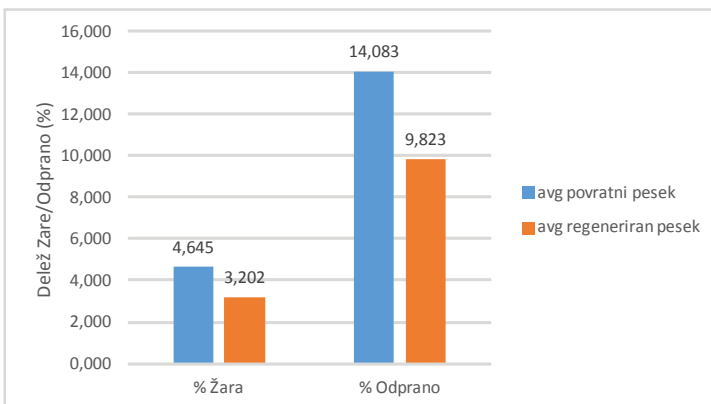
Na sliki 3 je vidna sprememba žaro izgub, ki so se znižale za dobrih 30 %, za enak delež pa so se znižale tudi odparane snovi. Tako prečiščen pesek se vrača v obtok in znižuje vrednosti obravnavanih parametrov v peščenem sistemu na zeleno raven.

Odvosno od naših potreb lahko z regeneracijo očistimo pesek do različne stopnje. Na sliki 4 vidimo bentonitni pesek po razbitju forme na povratni liniji. Nekatera zrna so v obliki aglomeratov, ki pa se z

Reclamation operation time	7 h/daily
Time required to add sand into equipment	4 h/day
Reclamation time	3 h/daily
Entry sand quantity	7000 kg (340 kg/h)
Exit sand quantity	6685 kg
Scrap	315 kg or 5 %

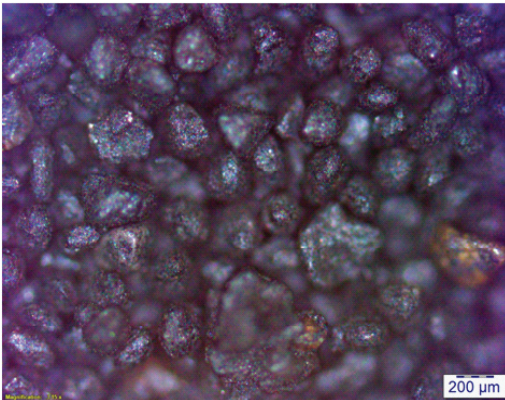
Investigated was the decrease of fine silica sand proportions, LOI and leached substances after reclamation. Figure 2 shows that the 0.063 mm sieve residue was reduced by more than 13 % while passing residue collected at the bottom was reduced by more than 36 %.

Figure 3 illustrates the change in LOI, which was reduced by more than 30%,



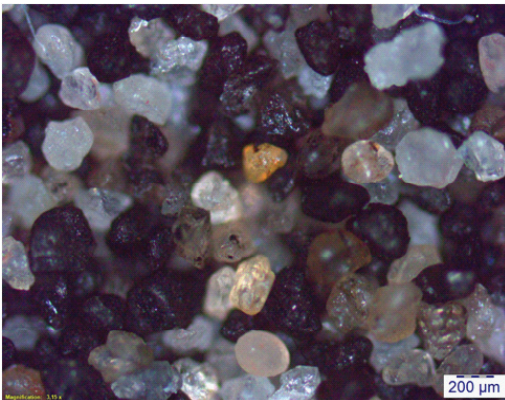
**Slika 3:** Sprememba žaro izgub in odpranih snovi na povratnem pesku

**Figure 3:** Change in LOI and leached substances in return sand



**Slika 4:** Bentonitni pesek ki vstopa v regeneracijo

**Figure 4:** Bentonite clay powder entering reclamation



**Slika 5:** Očiščen pesek iz regeneracije, ki se vrača v obtok

**Figure 5:** Purified reclaimed sand returning to circulation

regeneracijo razbijejo in ponovno dobimo posamezna zrna peska.

Iz regeneracije prihaja pesek, ki je v veliki meri očiščen bentonitnih oblog, kot tudi prašnih frakcij. Na sliki 5 je videti velik delež kremenovih zrn, ki so popolnoma očiščena bentonitnih (lahko tudi oolitiziranih) oblog. Kremenova zrna so po regeneraciji manj oglata, nekatera so tudi zaobljena, kar je

that is the same proportion as leached substances. The purified sand is then returned into circulation and reduces the subject parameters of the sand system to the desired levels.

In light of requirements, the reclamation process can be used to purify sand to varying degrees. Figure 4 illustrates bentonite clay powder in the return line after mould breaking. Some grains will take on the shape of agglomerates which, via reclamation, will break and again form individual grains of sand.

Reclaimed is sand which has been to a large extent purified of bentonite clay particles as well as powder fractions. Figure 5 shows a large proportion of silica sand grains completely purged of bentonite clay particles. Following reclamation, silica sand grains lose its angular shape and some even become round. The latter is the most suitable shape of silica sand grains since their surface area is smaller than that of angular grains.

### 3 Methodology

The hypotheses will be tested while observing the fact that the addition of silica sand was decreased from a total of 8 kg/mixer to 5 kg/mixer. In turn, this saw a proportional reduction in the added bentonite clay and blacking as shown in Figure 6.

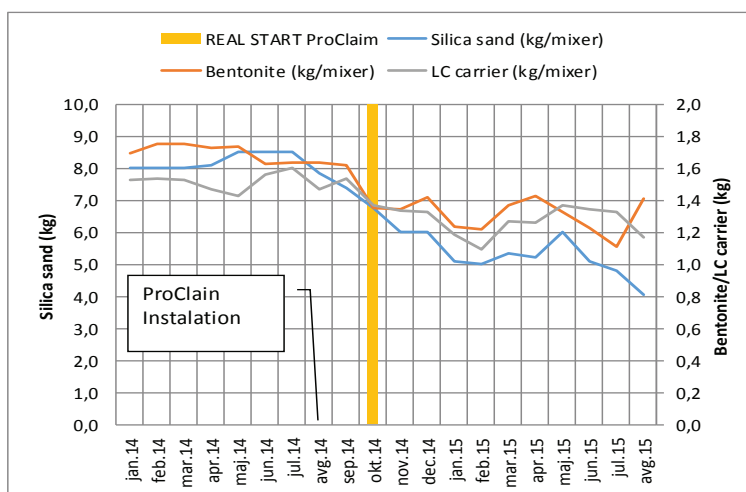
Based on the defined objectives, the following hypotheses have been set:

The proportion of leached substances<sup>2</sup> after reclamation ( $\mu_{1,2}$ ) is equal to the proportion ( $\mu_{1,1}$ ) before the introduction of sand reclamation.

Proportion of grains size below 90µm reclamation ( $\mu_{2,2}$ ) is equal to the proportion of grains ( $\mu_{2,1}$ ) before the introduction of reclamation.

**Slika 6:** Gibanje dodatkov/mešalec pred in po uvedbi regeneracije

**Figure 6:** Flow of additives/mixer before and after the introduction of reclamation



najprimernejša oblika kremenovih zrn, ker imajo manjšo površino od oglatih.

### 3 Metodologija

Hipoteze bomo preverili ob dejstvu, da smo dodatek kremenčevega peska zmanjšali z 8 na 5 kg/mešalec. Proporcionalno se je znižal tudi dodatek bentonita in črnine (nosilca svetlečega C), kar je prikazano na sliki 6.

Iz zastavljenih ciljev bomo postavili naslednje hipoteze:

Delež odpranih snovi po regeneraciji ( $\mu_{1,2}$ ) je enak deležu ( $\mu_{1,1}$ ) pred uvedbo regeneracije.

$$H_0^{(1)}: \mu_{1,1} - \mu_{1,2} = 0$$

$$H_1^{(1)}: \mu_{1,1} - \mu_{1,2} \neq 0$$

Delež zrn pod 90  $\mu\text{m}$  po regeneraciji ( $\mu_{2,2}$ ) je enak deležu zrn ( $\mu_{2,1}$ ) pred uvedbo regeneracije.

$$H_0^{(2)}: \mu_{2,1} - \mu_{2,2} = 0$$

$$H_1^{(2)}: \mu_{2,1} - \mu_{2,2} \neq 0$$

- 2 Obravnavali bomo celokupne in mineralne (anorganske) odprane snovi. Analysis of total and mineral (inorganic) leached substances.

Rejection rate after reclamation ( $\mu_{3,2}$ ) is equal to the rejection rate ( $\mu_{3,1}$ ) before the introduction of reclamation.

The hypotheses will be subjected to a t-test used to compare sample arithmetic means.

The t-test is a statistical method common in every type of research. There exist three variations of the t-test: the one-sample t-test, independent two-sample t-test and the dependent t-test (for paired samples). Most commonly employed is the independent two-sample t-test, which is used to establish whether statistically significant differences between two independent samples exist. [4]

#### 3.1 Data analysis

The subject data represent the average monthly bentonite clay powder variables and examined parameters.

Delež izmeta po regeneraciji ( $\mu_{3,2}$ ) je enak deležu izmeta ( $\mu_{3,1}$ ) pred uvedbo regeneracije.

$$H_0^{(3)}: \mu_{3,1} - \mu_{3,2} = 0$$

$$H_1^{(3)}: \mu_{3,1} - \mu_{3,2} \neq 0$$

Hipoteze bomo preverili s t – testom, ki se uporablja za primerjavo aritmetičnih sredin vzorcev. T-test je zelo pogosto uporabljena statistična metoda v vseh vrstah raziskav. Poznamo tri vrste tega testa, t-test za en vzorec, za neodvisne vzorce in pa za odvisne vzorce (parni t-test). Najpogosteje se uporablja test za neodvisne vzorce, kjer ugotavljamo, ali obstajajo statistično pomembne razlike med dvema neodvisnima skupinama.[4]

### 3.1 Analiza podatkov

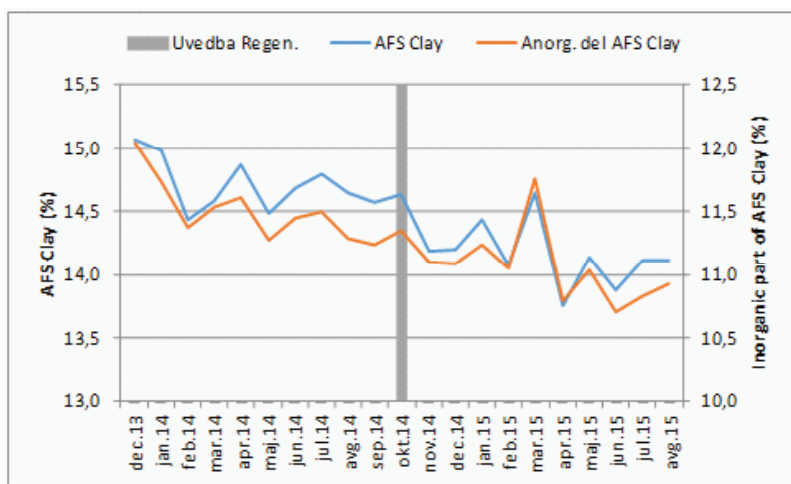
Vsi obravnavani podatki predstavljajo mesečne povprečne vrednosti spremenljivk oziroma opazovanih parametrov bentonitnega peska.

Na sliki 7 je prikazano gibanje deleža odpranih snovi za obdobje pred in po uvedbi regeneracije. Stolpec predstavlja termin začetka delovanja regeneracije.

Figure 7 depicts the movement of leached substance proportions before and after the introduction of reclamation. The column represents the date of start of the reclamation process. The total proportion of leached substances along with mineral substances has decreased with the introduction of reclamation, and will be tested via the t-test.

Figure 8 illustrates the movement of silica sand grain proportions which have passed through the 90 $\mu$ m sieve during the sieve analysis. We can establish that after the introduction of reclamation, the proportion of fine fractions is more uniform. Before the introduction of reclamation, sample variance was calculated at 0.0599, while after its introduction it significantly decreased to 0.0061.

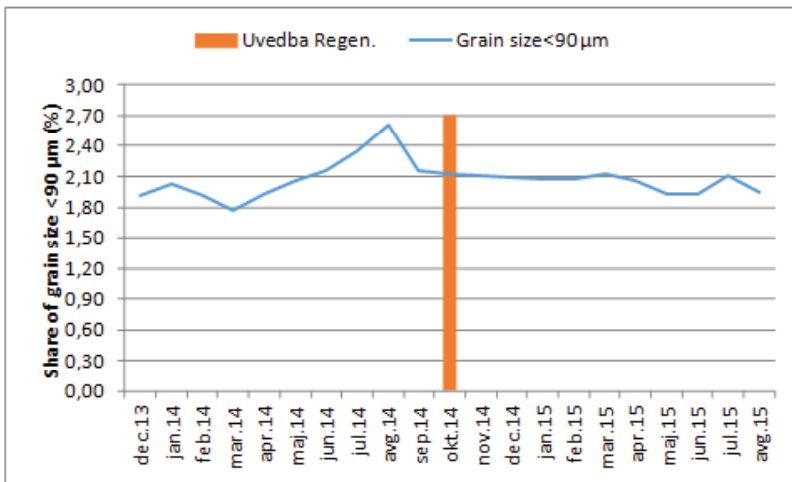
The rejection movement is depicted in Figure 9, where »izm« stands for the total rejection and »nln« the proportion following machining. Any faults apparent following machining can be attributed primarily to sand inclusions. However, a smaller approx. 5 % part is constituted by so-called »pinholes«, surface irregularities resulting from the expansion of the sand mould and slag inclusions. Following the



**Slika 7:** Gibanje deležev odpranih snovi v bentonitnem pesku

**Figure 7:** Movement of leached substance proportions in bentonite clay powder





**Slika 8:** Gibanje deleža zrn kremenčevega peska < 90 μm

**Figure 8:** Silica sand grains <90 μm proportions movement

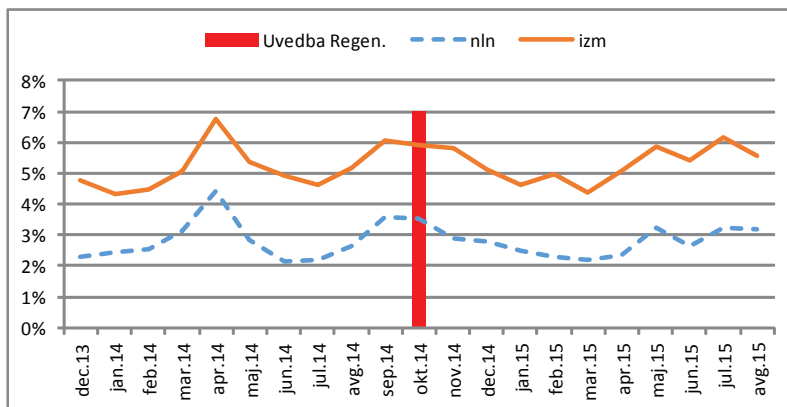
Delež celokupnih odpranih snovi kot tudi anorganskega dela je po uvedbi regeneracije manjši, kar bomo preverili s t-testom.

Na sliki 8 vidimo gibanje deležev zrn kremenčevega peska, ki so pri sejalni analizi padla skozi sito z odprtino 90 μm. Ugotovimo lahko, da je delež finih frakcij po uvedbi regeneracije bolj konstanten. Varianca vzorca pred uvedbo regeneracije je 0,0599, po uvedbi pa se je močno zmanjšala na 0,0061.

introduction of reclamation, the rejection variability was reduced substantially. Before the introduction of reclamation, sample variance was calculated at 0.554, while after its introduction it was reduced to 0.318.

Alongside the variables contained in the hypotheses, we have also completed the analysis of two further variables, namely sand moisture content and active clay.

Figure 10 shows that the content of active clay in sand trend is nearly parallel to the abscissa while the required moisture



**Slika 9:** Gibanje deleža in izmetnih ulitkov

**Figure 9:** Proportions and rejected castings movements

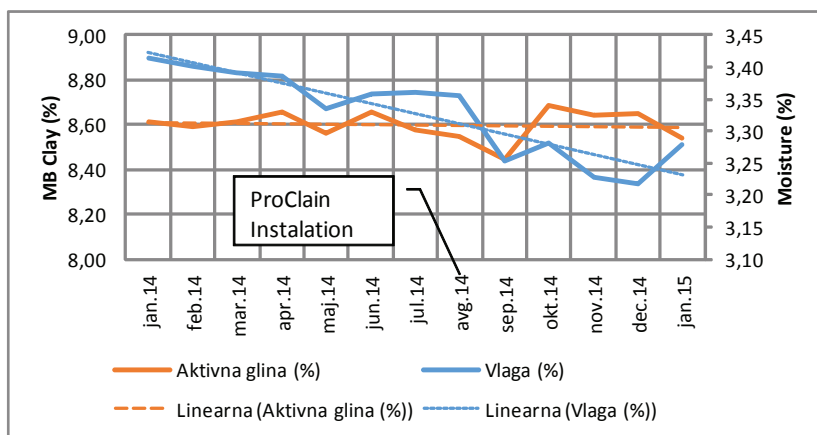
Gibanje izmeta je vidno na sliki 9, kjer »izm« predstavlja celokupni izmet, »nl« pa delež po mehanski obdelavi. Napake, vidne po mehanski obdelavi, so v glavnem vključki peska, le manjši delež, približno 5 %, predstavljajo »pinhole«, sledi površinskih napak zaradi ekspanzije peščene forme in vključki žindre. Po uvedbi regeneracije se je variabilnost izmeta zmanjšala. Varianca vzorca pred uvedbo regeneracije je 0,554, po uvedbi pa se je zmanjšala na 0,318.

Poleg spremenljivk, ki so bile zajete v hipotezah, smo s časovno vrsto analizirali

trend is on the decline. The levels of active clay have therefore been maintained while the required moisture levels have decreased. This should be attributed to the leached substances proportion and verified via the t-test.

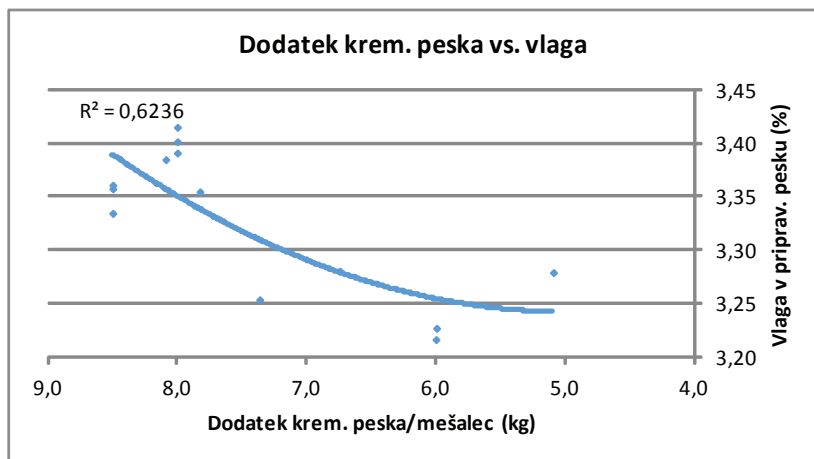
The regression analysis yielded two variables, moisture and added silica sand. A moderate correlation with the coefficient of determination  $R^2 = 0.624$  was established as shown in Figure 11.

Caution must be exercised in the interpretation of the moisture – added silica sand connection. Namely, it would



**Slika 10:** Gibanje vlage in aktivne glin

**Figure 10:** Moisture and active clay movements



**Slika 11:**

Povezanost med dodatkom novega peska in potrebno vlago v pesku pri obratovanju regeneracije.

**Figure 11:** Correlation between added sand and required sand moisture in the reclamation process.

še spremenljivki, vlago v pesku in aktivno glino.

Na sliki 10 vidimo, da je trend deleža aktivne glin v pesku skoraj vzporeden z absciso, medtem ko je trend potrebne vlage v padanju. Aktivna glina je torej ostala na enaki ravni, potreba po vlagi pa se je zmanjšala, kar lahko pripišemo zmanjšanju deleža odpranih snovi, kar bomo preverili s t-testom.

Z regresijsko analizo smo obdelali spremenljivki: vlaga in dodatek kremenčevega peska. Pokazala se je srednje visoka povezanost z determinacijskim koeficientom  $R^2 = 0,624$ , kar je prikazano na sliki 11.

Pazljivi moramo biti pri interpretaciji odnosa vlaga – dodatek kremenčevega peska. Napačna bi bila splošna trditev, da se s povečevanjem dodatka kremenčevega peska povečuje potreba po vlagi v pesku. Poudariti moramo, da ta odnos velja samo takrat, kadar pesek regeneriramo, in tako zmanjšujemo frakcije, ki vežejo veliko vode. Z grafom (slika 11) lahko pokažemo na dejansko zmanjšanje potrebe po vlagi pri istočasnem manjšem dodatku kremenčevega peska, ki je vzdržan, zato ker z regeneracijo lahko obvladujemo snovi v pesku, ki vežejo velike količine vode.

### 3.2 Testiranje hipotez

Hipoteze smo preverili z analitičnim orodjem v Excelu. V tabeli 2 so podani rezultati t – testov odpranih snovi, tako celokupnih, kot anorganskega dela in finih frakcij kremenčevega peska. Za vsako od spremenljivk so podani izračuni pred in po uvedbi regeneracije - in sicer aritmetične sredine (Mean), varianca (Variance), numerus (Observations) in ostale statistike. Za vse pare vzorcev smo zastavili hipoteze,

be erroneous to claim that in general, the addition of silica sand increases sand moisture requirements. It should be pointed out that this correlation is only valid when sand is reclaimed and in turn proportions of fractions which absorb plenty of water are reduced. A chart (Figure 11) is used to demonstrate the actual reduction of moisture requirements simultaneously with reduced quantities of added silica sand, making it sustainable since the reclamation process can be used to control the substances in the sand that absorb high quantities of water.

### 3.2 Hypotheses testing

The hypotheses were verified using MS Excel analytical tools. Table 2 contains leached substances t-test results, totals as well as inorganic proportions as well as fine silica sand fractions. For each of the variables, calculations before and after the introduction of reclamation are indicated, i.e. arithmetic mean (Mean), variance (Variance), number of measurements (Observations) and other statistical values. For each of the sample pairs, the mean difference was hypothesized.

In terms of leached substances (AFS Clay), when comparing t-Stat to t Critical two tail, it can be established that it is true in both cases, that t-Stat > t critical two tail and the P two tail < 0.5, meaning that the hypothesis can be rejected. The same is true for the inorganic portion of leached substances. Differences between the arithmetic means of samples before and after the introduction of reclamation do exist, as was already inferred based on the chart in Figure 7.

Similarly, sand fractions <90µm values from Table 1 can also be compared. In this case, the t-stat < t critical two tail, and P two tail >0.5, meaning the hypothesis

da med aritmetičnima sredinama ni razlik (Hypothesized Mean Difference).

Če pri odpranih snoveh (AFS Clay) primerjamo  $t$  Stat z  $t$  Critical two tail, ugotovimo, da je v obeh primerih  $t$  Stat  $>$   $t$  Critical two tail in je  $P$  two tail  $<$  0,5, kar pomeni da hipotezo zavrnemo. Enako velja za anorganski del odpranih snovi. Med aritmetičnimi sredinama srebrov pred in po uvedbi regeneracije so razlike, kar smo domnevali že iz grafa na sliki 7.

Podobno lahko primerjamo vrednosti iz tabele 2 za frakcije peska  $<$  90  $\mu\text{m}$ . V tem primeru pa je  $t$  Stat  $<$   $t$  Critical two tail in je  $P$  two tail  $>$  0,5, kar pomeni, da hipotezo sprejmemo. Med aritmetičnima sredinama vzorcev pred in po uvedbi regeneracije ni razlik, kar bi lahko sklepali iz grafa na sliki 8.

is confirmed. Differences between the arithmetic means of samples before and after the introduction are null, as already could have been inferred based on chart in Figure 8.

In terms of the total rejection rate, the absolute  $t$ -stat  $<$   $t$  Critical two tail, and  $P$  two tail  $>$  0.5, meaning the hypothesis can be confirmed. There are no differences between the total rejection rate arithmetic means before and after the introduction of reclamation. The same can be inferred for the rejection rate following machining. Even though no statistically significant differences have been established, minor changes remain apparent. The total rejection was adjusted by the 101.9 index, and rejection following machining by the index 96.4.

**Tabela 2:** Rezultati  $t$  - testov za odprane snovi in fine frakcije kremenčevega peska

**Table 2:** T-test results for leached substances and fine silica sand fractions

t-Test: Two-Sample Assuming Unequal Variances						
	AFS Clay Before Reclaim	AFS Clay After Reclaim	Inorg. part AFS Clay Before Reclaim	Inorg. part AFS Clay After Reclaim	Grain<90 $\mu\text{m}$ Before Reclaim	Grain<90 $\mu\text{m}$ After Reclaim
Mean	14,712525	14,1566467	11,5046667	11,0535609	2,08735833	2,04171516
Variance	0,04358271	0,06285378	0,05991536	0,08675772	0,06061343	0,00586115
Observations	10	10	10	10	10	10
Hypothesized Mean Difference	0		0		0	
df	17		17		17	
t Stat	5,38808548		3,72480155		0,55981954	
P(T<=t) one-tail	0,000025		0,00084231		0,29341067	
t Critical one-tail	1,73960672		1,73960672		1,79588481	
P(T<=t) two-tail	0,000049		0,00168462		0,58682135	
t Critical two-tail	2,10981556		2,10981556		2,20098516	

**Tabela 3:** Rezultati t - testa za celokupni izmet in izmet po mehanski obdelavi**Table 3:** Total rejection rate and rejection rate following machining t-test

t-Test: Two-Sample Assuming Unequal Variances				
	izm_before	izm_after	nln_before	nln_after
Mean	5,2%	5,2%	2,8%	2,7%
Variance	5,537E-05	3,181E-05	5,1382E-05	1,59351E-05
Observations	10	10	10	10
Hypothesized Mean Difference	0		0	
df	17		17	
t Stat	-0,4896546		0,33071411	
P(T<=t) one-tail	0,3153184		0,37287897	
t Critical one-tail	1,7396067		1,76131012	
P(T<=t) two-tail	0,6306369		0,74575794	
t Critical two-tail	2,1098156		2,14478668	

V tabeli 3 so prikazani rezultati t – testa za celotni izmet »izm« in delež izmeta, ki je viden po mehanski obdelavi »nln«.

#### 4 Investment eligibility

The investment into reclamation will generally return in a relatively short period.

**Tabela 4:** Ekonomsko ovrednotenje investicije v regeneracijo bentonitnega peska**Table 4:** Economic valuation of bentonite clay powder reclamation investment

Investicija / Investment	255.000,00 €
Poraba komponent za livarski pesek pred investicijo / Consumption of foundry sand components before investment	395.614,29 €
Poraba komponent za livarski pesek po investiciji / Consumption of foundry sand components after investment	286.571,43 €
Letni prihranek komponent za livarski pesek / Foundry sand components savings	109.042,86 €
Prihranek pri odpadnem pesku / Scrap sand savings	21.857,14 €
Zmanjšanje deleža izmeta / Reduction in rejection rates	12.142,86 €
Skupni prihranek / Total savings	143.042,86 €
Skupni stroški delovanja regeneracije / Total reclamation operating costs	8.500,00 €
Dejanski prihranek / Actual savings	134.542,86 €
ROI (leta) / (years)	1,9

Pri celokupnem izmetu je  $t$  Stat absolutno  $< t$  Critical two tail in je  $P$  two tail  $> 0,5$ , kar pomeni, da hipotezo sprejmemo. Med aritmetičnima sredinama celokupnega izmeta pred in po uvedbi regeneracije ni razlik. Enako lahko ugotovimo za izmet, viden po mehanski obdelavi. Čeprav ne moremo ugotoviti statistično značilnih razlik, vseeno vidimo manjše spremembe. Celokupni izmet se je spremenil za indeks 101,9, izmet po mehanski obdelavi pa za indeks 96,4.

#### 4 Upravičenost investicije

Stroški investicije v regeneracijo se običajno povrnejo v dokaj kratkem času. Prihranki so pri materialih za pripravo peska, stroških priprave peska in odvozu na deponijo za odpadni pesek. V tabeli 4 so navedena vrednotenja stroškov in prihrankov uvedbe regeneracije bentonitnega peska.

#### 5 Zaključek

Dodatek kremenčevega peska se je z uvedbo regeneracije zmanjšal za približno 40 %, proporcionalno sta se zmanjšala tudi dodatek bentonita in črnine.

Delež odpranih snovi se je zmanjšal, kar pozitivno vpliva na bentonitni pesek. Celokupne odprane snovi so se zmanjšale za slabe 3,7 %, anorganski del pa za 3,9 %. Na splošno lahko ugotovimo, da so se odprane snovi zmanjšale za slabe 4 %, kar pozitivno učinkuje na bentonitni pesek.

Delež drobnih frakcij kremenčevega peska  $< 90 \mu\text{m}$ , je ostal enak. Izračunane aritmetične sredine kažejo na rahlo zmanjšanje, za 2,2 %, kar pa ni statistično značilno. Kot pozitivno lahko vzamemo dejstvo, da se delež drobnih frakcij ni povečal. Pomembna razlika pred in po

Savings come from sand preparation materials and processes as well as transport of waste sand to landfills. Table 4 contains the valuation of costs and savings following the introduction of bentonite clay powder reclamation.

#### 5 Conclusion

With the introduction of reclamation, the addition of silica sand was reduced by approx. 40%. In turn, bentonite clay and blacking proportions were also reduced.

The proportion of leached substances has decreased, which has a positive impact on bentonite clay powder. Total leached substances have decreased by just under 3.7% and inorganic substances by 3.9%. In general, it can be inferred that the total leached substances have decreased by 4%, which should beneficially affect bentonite clay sand.

The  $<90\mu\text{m}$  fine silica sand fractions proportions were unaltered. Arithmetic mean calculations are indicative of a minor non-statistically significant 2.2% decrease. Also positive is the fact that the proportion of fine fractions has not increased. Another important difference before and after the introduction of sand reclamation is also the variability in the fine fraction proportions. Namely, after its introduction, the proportions were much more uniform (Figure 8) as a result of a 10-times small variance.

The rejection rate has remained unaltered, i.e. has remained as statistically significant as before the introduction of reclamation. Regardless, the arithmetic mean calculations have indicated minor changes. Meanwhile, the total rejection rate has increased from 5.2% to 5.3%, that is by 1.9%, the rejection rate following machining has decreased from 2.8% to 2.7%, which constitutes a 3.6% reduction which can

uvedbi regeneracije je tudi variabilnost deleža drobnih frakcij. Po uvedbi je ta delež mnogo bolj enakomeren (slika 8), saj je varianca približno desetkrat manjša.

Delež izmeta se ni spremenil, torej je ostal statistično značilno enak, kot pred uvedbo regeneracije. Kljub temu pa izračunane vrednosti aritmetičnih sredin kažejo na rahle spremembe. Med tem, ko se je delež celokupnega izmeta povečal s 5,2 % na 5,3% oziroma za 1,9 %, se je izmet po mehanski obdelavi zmanjšal z 2,8 % na 2,7 % oziroma za 3,6 %, kar lahko pripišemo učinku regeneracije. Po uvedbi regeneracije je nihanje deleža izmeta manjše, saj se je varianca zmanjšala z 0,55 na 0,32.

Izračun vračanja investicije nam pokaže, da se sredstva, vložena v regeneracijo, povrnejo v roku, krajšem od 2 let, kar je dokaj kratka doba vračanja.

Na splošno lahko sklenemo, da je z regeneracijo možno močno zmanjšati porabo peska, vplivati na parametre bentonitnega peska, ki povečujejo delež izmeta in zmanjšati variabilnost parametrov proizvodnega procesa.

Pomemben je tudi ekološki vidik, ki se mu tukaj nismo posebej posvetili, so pa zmanjšani odpadki vključeni v izračun ekonomske upravičenosti.

be attributed to the effects of reclamation. Following the introduction of reclamation, the rejection rate variation is smaller resulting in the decrease in variance from 0.55 to 0.32.

ROI calculations show that the reclamation investment should be recovered within the relatively short period of less than 2 years.

In general, it can be inferred that foundry sand consumption could be decreased significantly via the introduction of reclamation, and that the latter also impacts bentonite clay powder parameters that increase the rejection rates and reduce the variability of production process parameters.

Also important is the environmental aspect which is not the focus of this article. However, a reduction in waste has also been incorporated into economic feasibility calculations.

## Literatura / References

- [1] Čuk B., Identifikacija napak pod površino na tankostenih ulitkih iz sive litine, Livarski vestnik 3, 58/2011.
- [2] <http://www.siapro.eu/livarska-oprema/sekundarna-regeneracija-bentonitnega-peska/>
- [3] SIMPSON, Laboratory reclamation test report, Test No. 0108141, Aurora Illinois, jan.2014
- [4] <http://www.statistik.si/storitve/statisticne-analize-testi/t-test/>

## AKTUALNO / CURRENT

### 50. poročilo o svetovni livarski proizvodnji 2015

Pod zgornjim naslovom je revija ameriškega livarskega društva (AFS), Modern Casting (Vol. 106, Nr. 12, Dec. 2016, str. 25-29: 50th Census of World Casting Production) objavila članek, katerega delno povzemamo v nadaljevanju.

V skladu z letošnjim popisom Modern Casting Census of World Casting Production je svetovna livarska proizvodnja v letu 2015 dosegla 104.1 mio ton, kar je za spoznanje več kot v letu 2014, ko je proizvodnja znašala 103,7 mio ton. Livarska rast je od leta 2013 do leta 2014 znašala 3,4 % ter od leta 2014 do leta 2015 2,38 %. To je že šesto leto zapored, ko je prišlo do rasti tega trga po svetovni recesiji v letih 2008-2009.

Letošnji popis vključuje 37 držav s štirih celin. Od 30 držav s podatki za zadnji dve leti jih je manj kot polovica (14) poročalo o rasti proizvodnje. Od 10 najpomembnejših držav po livarski proizvodnji pa so štiri poročale o povečanju proizvodnje. Mehika je poročala o 55-odstotni rasti, iz česar lahko sklepamo, da v zadnjih letih verjetno niso poročali o dejansko doseženi livarski proizvodnji.

Le dve državi iz skupine najpomembnejših po proizvodnji sta v letu 2014 poročali o manjšem padcu proizvodnje. Na Kitajskem se je le-ta skupno znižala za 1,3 %, z 46.2 mio na 45.6 mio ton, medtem ko je v ZDA proizvodnja padla za 0,8 % na 10.39 mio ton z 10.47 mio ton. Inštitut livarjev Indije je poročal o 7,5-odstotnem povečanju proizvodnje v Indiji, in sicer na 10.77 mio ton.

Iz popisa izhaja, da proizvodnja Kitajske predstavlja 44 % svetovne livarske proizvodnje, ZDA in Indija pa skupaj dosegata 20 %. Brazilija, ki je v zadnjih letih sedma največja država po livarski proizvodnji, je doživela v dveh zaporednih letih dvomestni odstotni padec proizvodnje. Zdaj zaseda deveto mesto med svetovnih najpomembnejših 10.

Preostale države znotraj prej omenjene deseterice po tonaži v letu 2015 so Japonska s 5.4 mio, Nemčija s 5.3 mio, Rusija s 4.2 mio (podatki iz 2014), Republika Koreja z 2.6 mio, Mehika z 2.56 mio, Brazilija z 2.32 mio in Italija z 2.03 mio ton.

Od držav, ki so poročale o rasti proizvodnje, sta Indija in Mehika dosegli največjo rast tonaže. Več manjših držav pa je poročalo o dvomestni odstotni rasti, vključno z Bosno in Hercegovino, Portugalsko, Romunijo, Južno Afriko in Švedsko.

Skupna svetovna proizvodnja									
Siva litina	Nodularna litina	Temprana litina	Jeklo litina	Baker	Aluminij	Magnezij	Cink	Druge neželezne	Skupno
46.738.654	25.575.894	884.581	10.887.948	1.761.182	16.053.014	198.121	675.022	1.354.841	104.129.257

Amerika										
Država	Siva litina	Nodularna litina	Temprana litina	Jeklo litina	Baker	Aluminij	Magnezij	Cink	Druge neželezne	Skupno
Brazilija	1.342.103	548.829	-	243.085	21.749	153.949	4.916	1.266	-	2.315.897
Kanada*	330.841	-	-	90.091	14.237	216.189	-	-	-	651.358
Mehika	815.500	375.800	-	330.790	217.200	735.300	-	85.600	-	2.560.190
ZDA	3.328.124	3.115.418	51.374	1.493.743	255.354	1.622.999	146.456	324.174	50.630	10.388.272

\*podatki iz 2014



Evropa										
Država	Siva litina	Nodularna litina	Temprana litina	Jeklo litina	Baker	Aluminij	Magnezij	Cink	Druge neželezne	Skupno
Avstrija	40.600	95.500	-	9.500	-	140.700A	-	-	-	286.300
Belgija	28.700	6.900	-	36.000	-	878A	-	-	-	72.478
BIH	20.950	11.510	-	3.700	-	12.265A	-	-	-	48.425
Češka	170.000	55.000	4.000	60.000	21.000	95.000	-	-	-	405.000
Danska	30.800	47.100	-	-	1.055	3.086	-	-	207	82.248
Finska	14.500	32.100	-	12.500	3.903	2.240	-	86	-	65.329
Francija	504.400	761.200	-	62.800	18.344	316.931	-	18.083	2.533	1.684.291
Hrvaška*	33.400	10.000	100	100	183	22.075	-	30	20	65.908
Italija	694.100	374.600	-	62.000	63.752	760.521	7.294	68.254	630	2.031.151
Madžarska	23.400	63.000	10	5.700	1.796	106.495	378	3.543	169	204.491
Nemčija	2.337.600	1.520.600	30.400	196.800	79.403	1.071.975	15.235	54.661	2	5.306.676
Norveška	11.300	21.200	-	1.200	-	7.221A	-	-	-	40.921
Poljska	485.300	162.200	11.700	49.900	6.950	334.600	-	7.540	3.860	1.062.050
Portugalska	39.800	90.000	-	8.100	14.152	29.150	-	2.135	-	183.337
Romunija	24.186	3.925	690	12.012	2.600	80.470	5.000	100	70	129.053
Slovaška***	2.700	18.200	-	4.100	-	46.000B	-	-	-	71.000
Slovenija*	80.496	34.234	6.107	32.188	754	37.244	441	6.889	-	198.353
Srbija*	24.368	10.140	-	8.991	2.092	9.760	1	96	9	55.457
Španija	348.200	637.400	7.500	72.600	10.876	125.652	-	8.771	711	1.211.710
Švedska	242.000	-	-	19.200	-	62.600A	-	-	-	323.800
Švica	12.200	24.700	-	1.200	2.068	14.922	-	1.094	-	56.184
Ukrajina**	400.000	120.000	30.000	580.000	60.000	280.000	15.000	25.000	50.000	1.560.000
Velika Britanija	139.800	198.500	1.100	48.000	8.832	110.000	3.400	7.800	1.000	518.432

\*podatki iz 2014 \*\*podatki iz 2013 \*\*\*podatki iz 2011 A) vključuje vse neželezne zlitine B) vključuje tlačno litje (Diecasting)

\* Slovenija ni dala podatkov za leto 2015, zaradi spremenjenih pogojev zajemanja podatkov, ki Društvo livarjev Slovenije in Gospodarski zbornici Slovenije niso omogočali zanesljive ocene livarskega obsega

Azija										
Država	Siva litina	Nodularna litina	Temprana litina	Jeklo litina	Baker	Aluminij	Magnezij	Cink	Druge neželezne	Skupno
Kitajska	20.200.000	12.600.000	600.000	5.100.000	750.000	6.100.000	-	-	250.000	45.600.000
Indija	7.410.000	1.180.000	50.000	880.000	-	1.250.000A	-	-	-	10.770.000
Japonska	2.022.900	1.703.800	43.100	157.000	78.000	418.500	-	-	981.600B	5.404.900
Koreja	1.082.900	708.300	4.000	164.000	26.800	623.600	-	-	13.400	2.623.000
Pakistan	100.000	10.300	-	30.700	10.200	10.300	-	-	-	161.500
Rusija*	2.982.000	-	-	756.000	-	462.000A	-	-	-	4.200.000
Tajvan	523.086	213.438	-	85.548	36.782	335.992	-	-	-	1.194.846
Tajska**	72.400	28.800	29.500	29.800	26.100	105.400	-	24.400	-	316.400
Turčija	675.000	630.000	15.000	150.000	20.000	325.000	-	35.000	-	1.850.000

\*podatki iz 2014 \*\*podatki iz 2013 A) vključuje vse neželezne zlitine B) vključuje tlačno litje (Diecasting)

Afrika										
Država	Siva litina	Nodularna litina	Temprana litina	Jeklo litina	Baker	Aluminij	Magnezij	Cink	Druge neželezne	Skupno
Južna Afrika	145.000	163.200	-	90.600	7.000	24.000	-	500	-	430.300

Število livam po državah						
Država	Siva litina	Jeklo litina	Neželezne	Skupno 2015	Skupno 2010	Skupno 2005
Avstrija	23	4	35	62	46	45
Belgija	11	5	6	22	29	36
Bosna in Hercegovina	6	4	4	14	13	-
Brazilija	449	169	549	1.167	1.354	1.264
Češka	63	27	41	131	184	194
Danska	8	-	7	15	17	21
Finska	12	7	14	33	36	37
Francija	86	35	292	413	454	505
Hrvaška*	27	5	27	59	42	44
Indija	-	-	-	4.600	4.500	4.500
Italija	149	25	911	1.085	1.100	1.077
Japonska	817	75	1.193	2.085	1.612	1.708
Južna Afrika	41	44	85	170	199	256
Kanada*	42	30	111	183	175	150
Kitajska	14.000	4.000	8.000	26.000	26.000	26.000
Koreja	525	144	239	908	881	847
Mehika	-	-	-	798	681	640
Madžarska	16	11	87	114	133	211
Nemčija	199	49	340	588	614	630
Norveška	5	3	6	14	19	21
Pakistan	1.400	30	100	1.530	2.050	-
Poljska	180	36	240	456	461	454
Portugalska	23	8	57	88	81	98
Romunija	38	31	60	120	157	168
Rusija	-	-	-	1.200	1.350	1.900
Srbija*	12	8	18	38	42	-
Slovaška**	12	7	32	51	-	51
Slovenija*	11	3	50	64	58	53
Španija	45	30	53	128	139	159
Švedska	30	10	60	100	117	135
Švica	14	2	29	45	72	51
Tajvan*	-	-	-	0	848	915
Tajska*	280	40	260	580	-	476
Turčija	481	66	350	897	1.126	1.291
Ukrajina*	270	280	290	840	1.070	1.070
Velika Britanija	217	-	205	422	444	480
ZDA	634	355	989	1.978	2.060	2.380
SKUPNO	20.126	5.543	14.740	46.986	48.164	47.867

\*podatki iz 2014, \*\*podatki iz 2011

Iz revije Modern Casting (Vol. 106, Nr. 12, Dec. 2016, str. 25-29: 50<sup>th</sup> Census of World Casting Production) povzela mag. Mirjam Jan-Blažič

## AKTUALNO / CURRENT



## Seminar za železove livarne

Kar nekaj časa smo potrebovali, da smo za izbrane, dokaj zahtevne teme, ki jih je določila strokovna komisija za železove livarne za seminar za železove livarne, našli kompetentnega predavatelja oziroma strokovnjaka, ki bi nam vsebini:

**Konstruiranja ulivnih in napajalnih sistemov pri sivih litinah ter problematika sive litine z vermikularnim grafitom s titanom ali brez titana**, predstavil ne samo s teoretičnega vidika, ampak tudi z nazornimi primeri iz prakse. To nam je končno uspelo s predavateljem in izkušenim livarskim strokovnjakom, dr. Konradom Weissom iz podjetja RWP GmbH iz Nemčije, ki se ukvarja s širokim področjem livarskih tehnologij (kokino litje, litje v pesek, centrifugalno litje, visoko tlačno litje, nizko tlačno litje in precizijsko litje ter simulacijami s softverjem WinCast).

Na intenzivnem enodnevem seminarju, ki smo ga organizirali konec januarja letos v prostorih Gospodarske zbornice Slovenije v Ljubljani, so udeleženci seminarja utrdili in obnovili svoja teoretična znanja ter pridobili vrsto praktičnih napotkov. Ker na kakovost ulitka in izkoristek litja neposredno vpliva konstrukcija ulivnega in napajalnega sistema, so bili udeleženci poučeni o osnovnih funkcijah ulivnega in napajalnega sistema, od katerih je odvisna kakovost ulitkov. Uvajanje v osnove tokov fluida in strjevanja je usmerjalo udeležence do ključnih zasnov različnih funkcijskih elementov pri konstruiranju oziroma določanju ulivnega in napajalnega sistema. Slušatelji so dobili napotke o aktivnostih, animacijah in simulacijah, s ciljem, da se izboljša razumevanje procesov zapolnjevanja forme in strjevanja. Poglobili so tudi vedenja o vplivih različnih elementov na lastnosti in sposobnosti napajanja. Predavatelj se je osredotočil na primere iz prakse za litine GJL (siva litina z lamelnim grafitom) in GJS (siva litina s kroglastim grafitom) ter litine GJV (siva litina z vermikularnim grafitom s titanom in brez titana).

Ocenjujemo, da je seminar uspel vpeljati udeležence v osnove konstruiranja ulivnega in napajalnega sistema, ki zadovoljujejo industrijske standarde in zagotavljajo

odpravo težav. Seminarja za železove livarne se je udeležilo 23 strokovnjakov iz naslednjih podjetij - članic Društva livarjev Slovenije: Cimos d.d., Exoterm-it d.o.o., ETA Cerkno d.o.o., Kovis Livarna d.o.o., Litostroj Jeklo d.o.o., Livar d.d., Livarna Gorica d.o.o., OMCO Feniks Slovenija d.o.o.



Udeleženci seminarja

*Poročala:*  
*mag. Mirjam Jan-Blažič*

## AKTUALNO / CURRENT



## Seminar o okoljevarstveni problematiki za livarne



Zadnji seminar v programskem obdobju Društva livarjev Slovenije za leto 2016 se je nanašal na okoljevarstveno problematiko za livarne. Društvo je tudi letos v zadnjem tednu februarja v prostorih Gospodarske zbornice Slovenije (GZS) v Ljubljani organiziralo seminar skupaj z GZS. Seminar je potekal pod naslovom »Novosti in veljavna zakonodaja na področju okoljevarstvene problematike za livarne«.

Prvi del seminarja je potekal pod taktirko Janje Leban, vodje Službe za varstvo okolja pri GZS, ki se je tematsko osredotočila na okoljsko zakonodajo z aktualnimi novostmi v letu 2016 in napovedanimi za leto 2017. Predstavljene so bile naslednje vsebine: pošiljke odpadkov preko meja; ocene (nevarnih) odpadkov; oprema, ki vsebuje fluorirane toplogredne pline; kakovost tal - degradirana območja; zakon o varstvu okolja; nov zakonodajni sveženj EU za prehod v krožno gospodarstvo; uredba IED, obratovalni monitoring stanja tal in podzemne vode.



Udeleženci seminarja

V drugem delu seminarja je predavateljica Antonija Božič Cerar (tudi iz Službe za varstvo okolja pri GZS) predstavila standarde, pristope in druga orodja za prehod v krožno gospodarstvo. V tem delu so se udeleženci seminarja seznanili z naslednjimi vsebinami: primerna okoljska zasnova proizvoda in izbor okoljskih ciljev, industrijska simbioza; novi standardi in spletna orodja, vloga BREF.

Na seminarju je sodelovalo 14 predstavnikov članic Društva livarjev, in sicer iz naslednjih podjetij: Abrasiv Muta d.o.o., Cimos d.d., Exoterm-it d.o.o., Hidria Rotomatika d.o.o., Iskra ISD – Livarna d.o.o., Livarna Gorica d.o.o., LTH Castings d.o.o., Mahle Letrika Komen d.o.o. in Termit d.d. Velikost skupine je omogočala, da so slušatelji na seminarju lahko aktivno sodelovali ter predavanja obeh predavateljic obogatili s svojimi komentarji in konkretnimi vprašanji iz svojih podjetij.

*Poročala:*  
mag. Mirjam Jan-Blažič

## AKTUALNO / CURRENT



## Posvetovanje »Gießtechnik Im Motorenbau 2017« v Magdeburgu

VDI – strokovno posvetovanje »Gießtechnik im Motorenbau 2017« je potekalo v Magdeburgu 1. in 2. februarja letos. Posvetovanje zadnjih šestnajst let – in sicer vsako drugo leto - obravnava potenciale naslednjih generacij pogonov vozil. Posvetovanje je v nemškem prostoru postalo eno najbolj pomembnih znanstvenih forumov livarjev in proizvajalcev motorjev. Skoraj 400 tehničnih strokovnjakov je na visoki strokovni ravni obravnavalo in razpravljalo o inovacijah in smernicah ter izkušnjah na trgu in novih idejah.

Tehniški in znanstveni strokovnjaki ter vodilni iz industrije, ki so se udeležili tega posvetovanja, so predstavili in odprli vrsto zanimivih vprašanj. Osrednje teme, vezane za prisotnost livarskih komponent v proizvodnji motorjev, so bile naslednje:

- aktualne spremembe klasičnih motorjev, in s tem tudi livarskih komponent, v luči novih zahtev glede livarskih materialov, postopkov izdelave orodij in modelov jeder ter konceptov zagotavljanja kakovosti;
- katere lastnosti odlitkov zahteva razvoj motorjev, katere lastnosti lahko livar doseže skozi inovativne materiale, variante postopkov ali postopkov toplotne obdelave;
- kako daleč je livnotehniška simulacija, kako je integrirana z FE izračunom in izračunom

življenjske dobe, kaj nalaga virtualni prototip;

- »Industrija 4.0 – scenariji in področja spopadov med razvojem motorjev in livarsko proizvodnjo;
- katere inovacijska vedenja so na razpolago s strani visokih šol, univerz, ter katere inovacije prinašajo spremembe na področju cen, stroškov in časovnih pritiskov.

Razmišljanja o poti v brezogljeno družbo danes še ne dajejo nobenih zanesljivih odgovorov v smislu, kaj se bo dogajalo leta 2025 ali 2030 z motorjem z notranjim zgorevanjem, jasno pa je, da v vozilu hibridu ostane cca 70 % Al-odlitkov, kar znaša cca. 17 kg (v sedanjem vozilu 23 kg). Ulitki



Organizatorja konference: ga. A. Bieler-Bultmann M.A in prof. dr. R. Bähr s mag. M. Jan-Blažič

cilindričnih glav iz Al-zlitin ostanejo pri visokih 98 %. Pri električnih avtomobilih pa bi v veliki večini bili samo Al- ulitki.

Večina predavanj je zbrana v zborniku oziroma poročilu VDI – Poročilo 2304 pod naslovom »**Gießtechnik im Motorenbau 2017, Potenziale für die nächste Generation von Fahrzeugantrieben**«.

Kopijo kazala zbornika smo že poslali po e-pošti vsem članicam Društva. Če vas katero od predavanj še posebej zanima, nas obvestite. Takoj vam bomo poslali kopijo izbranega predavanja po elektronski ali redni pošti.

V zborniku so zanimivi članki za livarske tehnologije LPDC (nizkotlačno litje), HPDC (visokotlačno litje) in CPS (litje v pesek). V kratkem pa bo na voljo tudi elektronska verzija, ki bo vključevala tudi tista predavanja, ki v zborniku niso objavljena.

*Poročala:  
mag. Mirjam Jan-Blažič*

## AKTUALNO / CURRENT

### Seje organov Društva livarjev Slovenije

Letos so vse seje organov Društva livarjev Slovenije (v nadaljevanju Društva) potekale pri članici Društva – podjetju Kovis Livarna d.o.o. v Štorah. Najprej je zasedal Nadzorni odbor, ki je obravnaval Poročilo o delu in finančnem poslovanju Društva za leto 2016. Ob upoštevanju usmeritev in pojasnil računovodstva ter predsednice Društva je Nadzorni odbor potrdil finančno poslovanje Društva za leto 2016.

Po končani seji Nadzornega odbora se je nadaljevala 28. seja Izvršnega odbora Društva in po njej še volilni Občni zbor Društva. Tako Izvršni odbor kot Občni zbor sta imela na dnevnem redu naslednje osrednje točke: poročilo o delu in finančnem poslovanju Društva za leto 2016 ter program dela Društva za leto 2017.

Poročilo predsednice o delu Društva v letu 2016 - z glavnimi poudarki dosežkov v zadnjem štiriletnem mandatu - so vsi člani prejeli s sklicem obeh organov v pisni obliki. Na kratko je bilo poročilo predstavljeno tudi na obeh sejah organov. Enako je bilo storjeno tudi pri programu dela za leto 2017. Vsa poročila za leto 2016 in program Društva za leto 2017 so bila na obeh organih sprejeta z malenkostnimi dopolnitvami, ki se nanašajo na širitev seminarских programov - tudi na seminarje, vezane na različno opremo za livarsko industrijo.

Ker se je vodstvu in organom iztekel mandat, so bili na obeh organih obravnavani tudi kadrovske predloge za novo vodstvo Društva, Izvršni in Nadzorni odbor. Predlog kandidatov je bil pripravljen na podlagi prispelih predlogov članic v kandidacijskem postopku, ki je potekal v času od 28.12.2016 do 03.02.2017. V skladu s predpisanimi statutarnimi postopki so bile na Občnem zboru opravljene volitve vodstva in organov Društva. Seznam izvoljenih za mandatno obdobje 2017-2021 objavljamo na zadnji strani te številke Livarskega vestnika.



Na obeh organih je bil obravnavan in sprejet predlog sklepa o imenovanju prof. dr. Reinharda Döppa za častnega člana Društva livarjev Slovenije.



Pred sejo Občnega zbora, ki je bil letos še posebej dobro obiskan, je vse delegate pozdravila direktorica Kovis Livarne, ga. Jerica Vranc, ki je v nadaljevanju predstavila to uspešno livarsko podjetje. Podjetje je v lanskem letu uresničilo pomembno naložbo v razširitev proizvodnih prostorov za mehansko obdelavo, skladišča orodij in modelarno. Ogljed celotnega podjetja, ki so se ga lahko udeležili vsi delegati Občnega zbora, je potrdil, da so v tem podjetju v zadnjih letih na področju svojega razvoja naredili kar nekaj pomembnih korakov, s katerimi so si zagotovili, da so danes lahko prvi igralci v segmentu svoje tržne livarske niše. Iskrene čestitke podjetju za doseženo in uspešno še naprej, vam želimo vsi stanovski kolegi! Gostitelju se tudi na ta način še enkrat zahvaljujemo za odlično organizacijo našega delovnega srečanja v Štorah.

*Poročala: mag. Mirjam Jan-Blažič*

**AKTUALNO / CURRENT****VODSTVO IN ORGANI DRUŠTVA LjVARJEV SLOVENIJE  
ZA MANDATNO OBDOBJE 2017 - 2021**

Predsednica:	mag. Mirjam JAN-BLAŽIČ
Podpredsednik:	prof. dr. Primož MRVAR, Univerza v Ljubljani
Podpredsednik:	Janko ČEVKA, Exoterm d.d.
Strokovni tajnik:	mag. Martin DEBELAK, GZS Združenje za kovinske materiale
Člani Izvršnega odbora:	mag. Drago BRENCI, Livarna Titan d.o.o. Borut DREMELJ, Livar d.d. mag. Andrej MIKLOŽIČ, Mariborska livarna Maribor d.d. Jasmin NIKOLAŠ, Cimos d.d. Koper Aljoša OPAKA, Litostroj jeklo d.o.o. Brane RUS, LTH Castings d.o.o. Anton SERIANZ, Termit d.d. Borut TRIPLAT, OMCO Feniks Slovenija d.o.o. Jerica VRANC, Kovis Livarna d.o.o. prof. dr. Ivan ANŽEL, Univerza v Mariboru
Člani nadzornega odbora:	Andrej KOVAČIČ, Hidria Rotomatika d.o.o. Simona STEGNE CERAJ, Livarna Gorica d.o.o. Avgust ŠIBILA, Talum ulitki d.o.o.

**ČASTNA IMENOVANJA**

Častni predsednik:	† prof. dr. Ciril PELHAN, Ljubljana
Častni predsednik:	† prof. dr. Milan TRBIŽAN, Ljubljana
Častni člani:	† Borut MARINČEK, Zürich † Franz SIGUT, Dunaj † Eberhard SCHÜRMAN, Clausthal prof. dr. Gerhard ENGELS, Düsseldorf Erich NECHTELBERGER, Dunaj prof. dr. Karel RUSIN, Brno prof. dr. Friedrich KLEIN, Aalen prof. dr. Alojz KRIŽMAN, Maribor prof. dr. Reinhard Doepp, Clausthal