

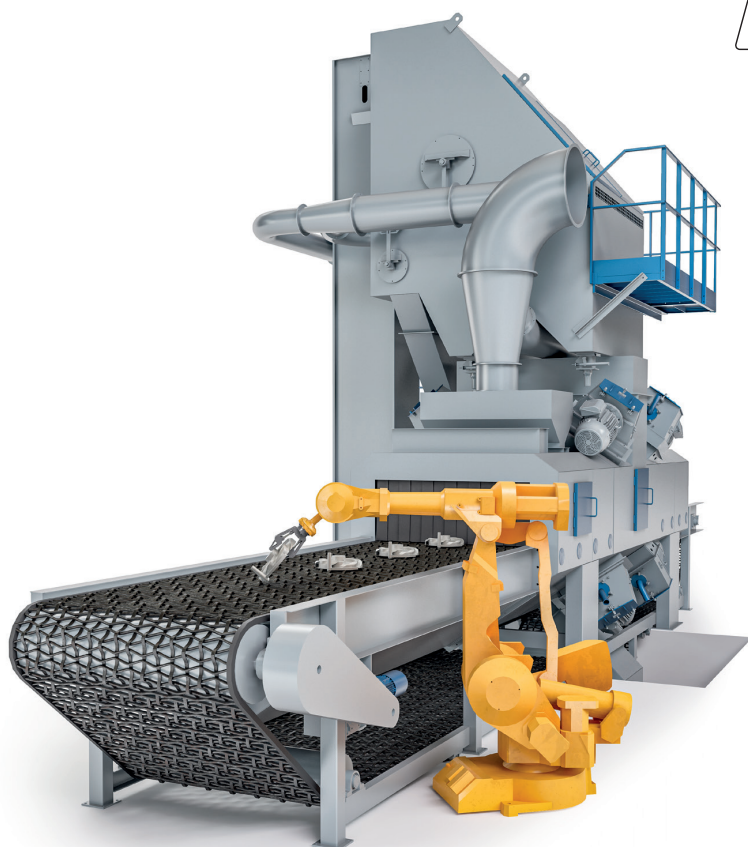
LIVARSKI VESTNIK

70/2023

4



DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE
SLOVENIAN FOUNDRYMEN SOCIETY

**STEM d.o.o.**

Vipavska cesta 67
5000 Nova Gorica
Slovenija

tel.: +386 5 33 52 100

e-mail: info@stem.siwww.stem.si

2022



Platinum Creditworthiness



STEM d.o.o.

Company ID: 5306779

Dun & Bradstreet d.o.o. / 2.2.2023



ISO 9001 Q-2312



PESKALNA TEHNIKA

PRODUCTS FOR FOUNDRIES AND STEELWORKS



**COATINGS FOR
FOUNDRIES**



**THERMOINSULATION
MATERIALS FOR
STEELWORKS AND
FOUNDRIES**



OTHER PRODUCTS
*ferro alloys, inoculants,
nodulators, recarburisers*



REPRESENTATIVES
*Magma, Tribo - Chemie,
Henschke*

 **exoterm-it**

exoterm@exoterm.si

LIVARSKI VESTNIK

Izdajatelj / Publisher:

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

Glavni in odgovorni urednik / Chief and responsible editor:

prof. dr. Alojz Križman
E-mail: alozj.krizman@um.si

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
prof. dr. Rebeka Rudolf, Univerza v Mariboru
prof. dr. Andreas Bührig-Polaczek, Giesserei Institut RWTH Aachen
prof. dr. Peter Schumacher, Montanuniversität Leoben
prof. dr. Rüdiger Bähr, Otto-von-Güricke-Universität Magdeburg
prof. dr. Reinhard Döpp, TU Clausthal
prof. dr. Jerzy Józef Sobczak, Foundry Research Institute, Krakow
prof. dr. Jaromir Roučka, Institut Brno
prof. dr. Branko Bauer, Univerza v Zagrebu

Prevod v angleški jezik /

Translation into English:
Marvelingua, Aljaž Seničar s.p.

Lektorji / Lectors:

Angleški jezik / English:
Yvonne Rosteck, Düsseldorf
Slovenski jezik / Slovene: Marvelingua,
Aljaž Seničar s.p.

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: december 2023



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

Direktor: Uroš Saksida
Vipavska cesta 67
5000 Nova gorica

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

VSEBINA / CONTENTS

Stran / Page:

- H. Polzin, T. Kooyers: Izkušnje s termičnim strjevanjem anorganskih veziv za forme / **Experiences with Thermosetting Inorganic Molding Binder System** 170
- M. Manapuram: Preoblikovanje livarskih postopkov glede na upravljanje vhoda- izhoda dobavne verige / **Recasting the Casting Operations vis- a- vis Casting Input-Output Supply Chain Management** 182
- I. Jandrič, F. Kozina, T. Brlič, L. Mrkobrača: Spremembe strukture in lastnosti bakrene žice med proizvodnjo in predelavo / **Changes in Structure and Properties of Copper Wire During the Production And Processing** 196
- M. Mencej: Časovno učinkovita analiza tehnične čistosti z mikroskopom / **Time Efficient Technical Cleanliness Analysis with a Microscope** 213

AKTUALNO / CURRENT

- Notice and Apology / Obvestilo in opravičilo 220
- Vsebinska predstavitev 63. IFC Portorož 2023 221
- Portorož 2024 239
- Seminar za železove livarne v ÖGI Leoben, Avstrija 240
- Pregled livarskih prireditev v letu 2024 242

Livarski vestnik je vpisan v razvid medijev Ministrstva za kulturo pod zaporedno številko 588
Izdajanje Livarskega vestnika sofinancira ARIS javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije.

Publishing of the Livarski vestnik is supported by Slovenian Researching Agency ARIS

Izkušnje s termičnim strjevanjem anorganskih veziv za forme

Experiences with thermosetting Inorganic Molding Binder System

Povzetek

Ta prispevek opisuje postopek izdelave jeder iz anorganskih veziv in sušenja z vročim zrakom, ki smo ga že predstavili na predhodnih dogodkih in v katerem uporaba aktivno ogrevanega orodja za izdelavo jedra ni potrebna. [1] S pomočjo tega sistema smo imeli v zadnjem času več pozitivnih izkušenj. Predstavljene so lastnosti spojin za forme, proizvedene z vezivom, na primer dosegljive trdnosti pri različnih pogojih strjevanja ali preostale napetosti po litju ulitkov. Čeprav je bil sistem razvit posebej za livarne, ki se ukvarjajo z litjem železa ali jekla, so prikazani primeri jeder tako iz sektorja železovih litin kot sektorja neželezovih kovin. Čeprav je bilo vezivo prvotno razvito za utrjevanje formatski materialov z vročim zrakom pri približno 160 °C, se lahko sistem brez tega uporablja tudi s katerim koli jedrovnikom z ogrevanim jeklenim jedrovnikom. Predstavljeno anorgansko vezivo na osnovi vodnega stekla predstavlja alternativo postopku PUR Coldbox, ki ga je mogoče uporabljati pri litju železa in jekla. V primerjavi s podobnimi vezivi se odmeri manjša količina enokomponentnega veziva; količine veziv, uporabljene do sedaj, merijo med 1,5 % in 2,5 %, vendar jih je mogoče po potrebi tudi povečati. Enokomponentni sistem poenostavi odmerjanje veziva v napravo za proizvodnjo jeder, želene trdnosti pa se zagotovijo skozi primerljivo večje specifične trdnosti. Sušenje proizvedenih jeder poteka s toplim zrakom za prepihovanje pri temperaturi 160 °C. Orodje za izdelavo jedra se med postopkom ne greje. Pri izbiri materiala za jedrovnik je treba zagotoviti uporabo plastike z ustrezno toplotno odpornostjo. Kovinski (aluminijasti ali jekleni) jedrovniki zagotavljajo prednosti v smislu krajšega časa cikla. V primeru uporabe izredno suhega zraka lahko utrjevanje poteka pri nižjih temperaturah. Vezivo se lahko seveda uporablja tako v postopkih Warmbox kot Hotbox. Dejstvo, da se nastanek razpok v jedroznici pojavi samo v izjemnih primerih pri jedrih z anorganskimi vezivi, je zagotovo dobrodošla prednost v komori za prepihovanje. Preostala trdnost ter obnašanje pri odstranjevanju jedra sta zelo podobna kot pri postopku PUR Coldbox. Poleg veziv, zasnovanih za železne in jeklene ulitke, so na voljo tudi različice za aluminijaste ali bakrene ulitke.

Abstract

We report on a hot-air curing inorganic core-making process already presented at previous events, which works without an actively heated core-making tool. [1] A number of positive experiences have been made with this system recently. The properties of molding compounds produced with the binder system are presented, for example, the achievable strengths under different solidification conditions or the residual tension after pouring of the castings. Although the system was developed in particular for customer foundries operating in the iron or steel casting sector, core examples from both the iron and non-ferrous casting

sectors are shown. Although the binder system was originally developed for curing the molding material with hot air at about 160°C, the system can also be used without further ado with any heated steel core boxes that may be present.

The presented inorganic binder system based on water glass represents an alternative to the PUR cold box process that can be used in iron and steel casting. The liquid one-component binder is metered at a lower rate than comparable binder systems; binder quantities used to date are between 1.5 and 2.5 %, but can also be increased if required. The single-component system facilitates binder metering on the core shooter, and the desired strengths are ensured via comparably higher specific strengths. The curing of the manufactured cores takes place via 160°C warm gassing air. The core making tool is not heated in the process. When selecting the core box material, care should be taken to use appropriately thermally resistant plastics. Core boxes made of metal (aluminum or steel) offer advantages in terms of shorter cycle times. When using particularly dry air, curing can be realized at lower temperatures. The binder system can, of course, also be used in the warm or hot box process. The fact that sheet veining only occurs in exceptional cases with the inorganically bonded cores is certainly a welcome advantage in the blowroom. The residual tension or decoring behavior is very similar to that of the PUR cold box process. In addition to the binders designed for iron and steel castings, variants for aluminum or copper castings are also available.

1 Uvod

Na sejmu GIFA 2003 so različni proizvajalci veziv prvič predstavili napredek na področju novih termoreaktivnih anorganskih veziv, napredek pa še vedno poteka. Podlaga za te razvoje je bilo splošno znano dejstvo, da je mogoče s segrevanjem izdelati forme z vezivom iz vodnega stekla znatno večje trdnosti kot npr. tradicionalnim prepihovanjem z ogljikovim dioksidom. Te visoke trdnosti predstavljajo ključno zahtevo za anorganska veziva, saj eden glavnih vzgibov za ta razvoj prihaja iz avtomobilske industrije oz. obsežne proizvodnje včasih izredno kompleksnih in filigranskih jeder za sestavne dele vozil. Glede na trenutno stanje tehnologije se vezivo na osnovi silikatov običajno zmeša z osnovnim materialom za formo. Nato se dovede v formo za izdelavo jedrovnika, segreto na 160–200 °C, v katerem nastane stabilna skorja. Kombiniranjem tega procesa z prepihovanjem z vročim zrakom je mogoče

1 Introduction

Starting with GIFA 2003, work on the development of new thermosetting inorganic binder systems was presented by various binder manufacturers and is still ongoing today. The basis for these developments was the well-known fact that tempered molds can bring water glass-bonded molding materials to significantly higher strengths than, for example, with classical carbon dioxide gassing. These high strengths were a fundamental requirement for inorganic binder systems, since one of the main impulses for this development came from the automotive industry and thus from the large-scale production of sometimes highly complex and filigree cores for vehicle components. The current state of the art is still that a silicate-based binder system is usually mixed with the mold base material and shot into a core-making mold tempered to 160 - 200°C, in which a stable shell is formed.

čas cikla spraviti do ustrezne ravni. Glavna pomanjkljivost teh postopkov je, da jih je mogoče zaradi visokih stroškov izdelave orodij in energije uporabljati samo v obsežni proizvodnji jeder (običajno pri izdelavi ulitkov za avtomobilsko industrijo). Poleg tega so postopki zaradi niza nezadostnih tehnoloških lastnosti (npr. preostala trdnost/vedenje ob razpadu) omejeni na proizvodnjo ulitkov iz aluminija. Pregled teh procesov, ki je v veliki meri še vedno aktualen, je podan na sl. [2].

Razvoj predstavljenega veziva naj bi livarnam železovih litin, ki so v številnih primerih *butične* proizvodnje, kjer se nabor izdelkov pogosto spreminja, omogočil uporabo jeder z anorganskimi vezivi. Tukaj je pomemben vidik odprava dragega segrevanega jeklenega orodja za izdelavo jedrovnika, ki je upravičeno izključno v obsežni proizvodnji. Uporabljeno je vezivo na osnovi alkalnega silikata ali vodnega stekla, modificiranega s celo vrsto oksidov in ki ne vsebuje organskih komponent [3]. Strjevanje materiala forme se doseže izključno z naplinjanjem z zrakom temperature pribl. 160 °C. Vezivo je enokomponentno. Enokomponentno vezivo je mogoče brez aditivov odmerjati v količini manj kot 2,5 %, pogosto celo manj kot 2 %.

2 Praktične izkušnje

2.1 Primerjava trdnosti formarskih materialov

Na sl. 1 in 2 je primerjava upogibne trdnosti veziv s tremi komercialno dostopnimi anorganskimi vezivi (imenovana B1 do B3). Prva opazna razlika je količina uporabljenega veziva, saj je treba pri teh vezivih uporabiti dejansko vezivno sredstvo kot tudi vsaj en aditiv. Primerjani so sistemi Warmbox. Procesni parametri

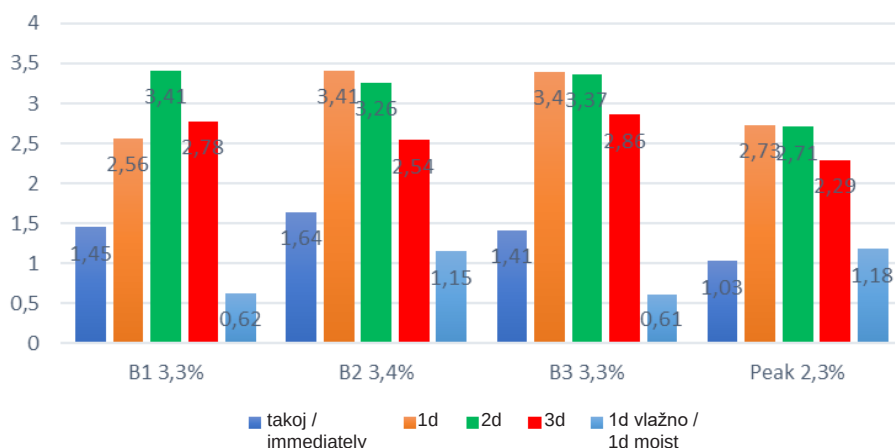
By combining this process with hot air fumigation, cycle times can be brought into reasonable ranges. The main disadvantage of these processes is that they can only be used in high-volume core production (usually automotive casting) due to the high tooling and energy costs. In addition, due to various insufficient technological properties (e.g. residual tension / collapsibility behavior), the application is limited to the production of aluminum castings. An overview of these processes, which is still largely valid, is given in [2].

The development of the binder system presented is intended to give iron foundries, which in many cases are customer foundries with frequently changing product ranges, an opportunity to use inorganically bonded cores. An important aspect of this is the elimination of an expensive heated core-making tool made of steel, which can only be justified in large-scale production. The binder system used is an alkali silicate or water glass based binder, which has been modified with a whole range of oxides and does not contain any organic components [3]. The solidification of the molding material is achieved exclusively by gassing with air at a temperature of approx. 160°C. The binder is a one-component binder. The binder is a one-component binder, which can be dosed without additional additives in ranges of less than 2.5 %, in many cases less than 2 %.

2 Practical Experiences

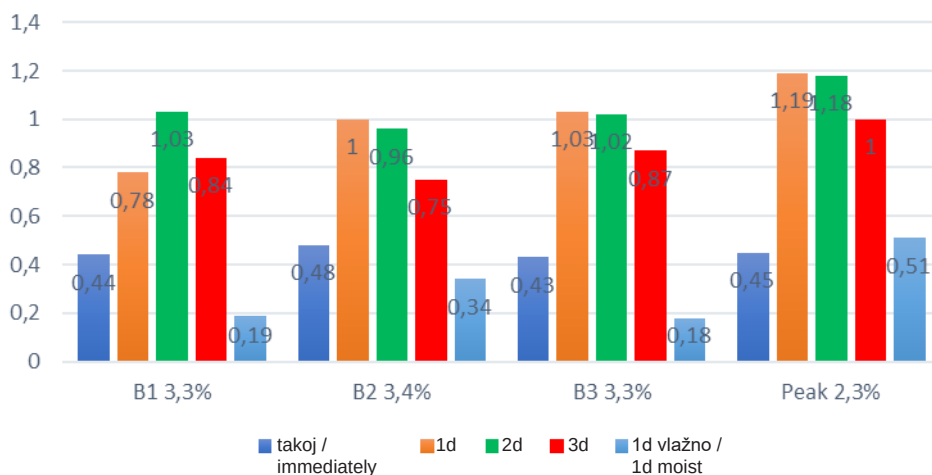
2.1 Molding Material Strengths in Comparison

In figs. 1 and 2, the bending strengths of the binder system are compared with those of three other commercially available inorganic binders (designated B1 to B3). A first



Slika 1. Upogibna trdnost veziva CC-VC v primerjavi z drugimi anorganskimi sistemi, temperatura sušenja 150 °C, kremenčev pesek H32

Figure 1. Bending strengths of binder system CC-VC compared with other inorganic systems, curing temperature 150 °C, silica sand H32

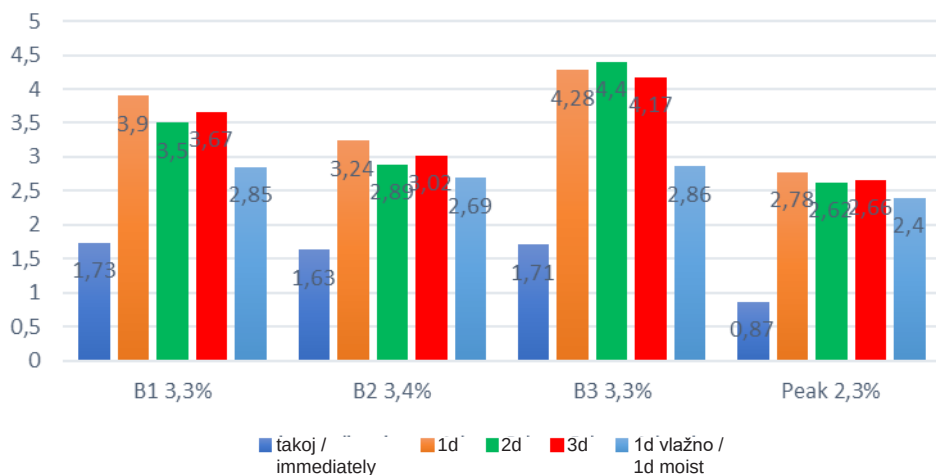


Slika 2. Specifična upogibna trdnost veziva CC-VC v primerjavi z drugimi anorganskimi sistemi, temperatura sušenja 150 °C, kremenčev pesek H32

Figure 2. Specific bending strengths of binder system CC-VC compared with other inorganic systems, curing temperature 150 °C, silica sand H32

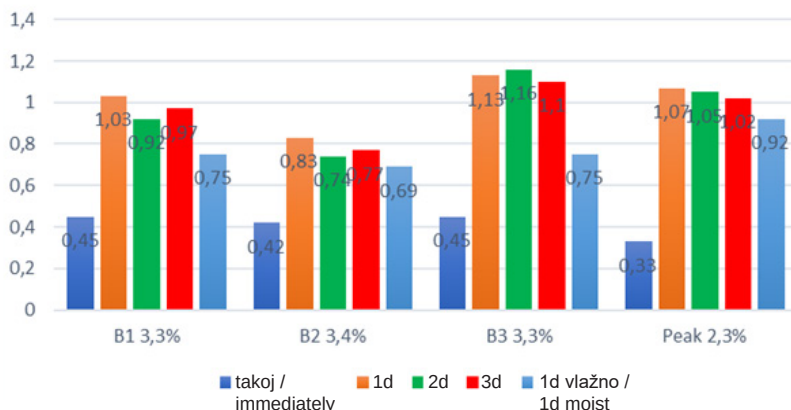
sistema Peak CC-VC so bili: Temperatura sušenja z zrakom 150 °C, čas sušenja 45 s, temperatura peska 23 °C, relativna vlažnost 45 %. Trdnosti smo določili nemudoma po postopku in po 1 do 3 dneh. Preskusni

difference becomes apparent in the binder contents used, since for these binders the binder itself and at least one additive have to be considered as total binder content. Furthermore, the systems compared are



Slika 3. Upogibna trdnost veziva CC-VC v primerjavi z drugimi anorganskimi sistemi, temperatura sušenja 200 °C, kremenčev pesek H32

Figure 3. Bending strengths of binder system CC-VC in comparison with other inorganic systems, curing temperature 200 °C, silica sand H32



Slika 4. Specifična upogibna trdnost veziva CC-VC v primerjavi z drugimi anorganskimi sistemi, temperatura sušenja 200 °C, kremenčev pesek H32

Figure 4. Specific bending strength of binder system CC-VC compared with other inorganic systems, curing temperature 200 °C, silica sand H32

pogoji za vrednosti »vlažno 1d« so bili 25 °C in 75-odstotna relativna vlažnost. Pri vezivih B1 do B3 se temperatura nanaša na temperaturo jedrovnika. Dosežene trdnosti povejo celotno zgodbo. Z vsemi vezivi se trdnost poveča v prvih dneh v normalnih

warm-box systems. The process parameters of the Peak system CC-VC were here: 150 °C curing air temperature, curing time 45s, sand temperature 23 °C, relative humidity 45 %. The strengths were determined immediately and after 1 to 3 days. The test

pogojih shranjevanja, povečanje pa je mogoče pripisati progresivnemu sušenju. Dva primerjalna sistema sta se močnejše odzvala na shranjevanje v vlažnem okolju. Trdnosti veziva Peak so nižje od drugih sistemov, kar je seveda posledica nižje vsebnosti veziva. Te vrednosti je mogoče po potrebi povečati z dodatkom večje količine veziva, vendar tukaj prikazane trdnosti zadostujejo za številne aplikacije. Potencial sistemov je jasno prikazan na sl. 2, ker so bile po enem dnevu opredeljene bistveno višje specifične trdnosti.

Predpostavlja se, da se trdnosti povečajo, kadar se uporabijo višje temperature. Na sl. 3 in sl. 4 je to povečanje prikazano za temperaturo 200 °C (znova jedrovnik in temperatura naplinjanja). Pravzaprav pa pride do povečanja trdnosti samo pri vezivih B1 in B3; pri sistemu Peak ostane trdnost skoraj nespremenjena. To je zanimiv vidik optimalne temperature naplinjanja v smislu stroškov in varovanja okolja. Vendar pa je pri shranjevanju jeder v vlažnem okolju prednost višjih temperatur strjevanja še očitnejša. Z vidika specifične trdnosti je vezivo B3 povezano z ugodnejšimi vrednostmi.

2.2 Vpliv temperature prepihovanja

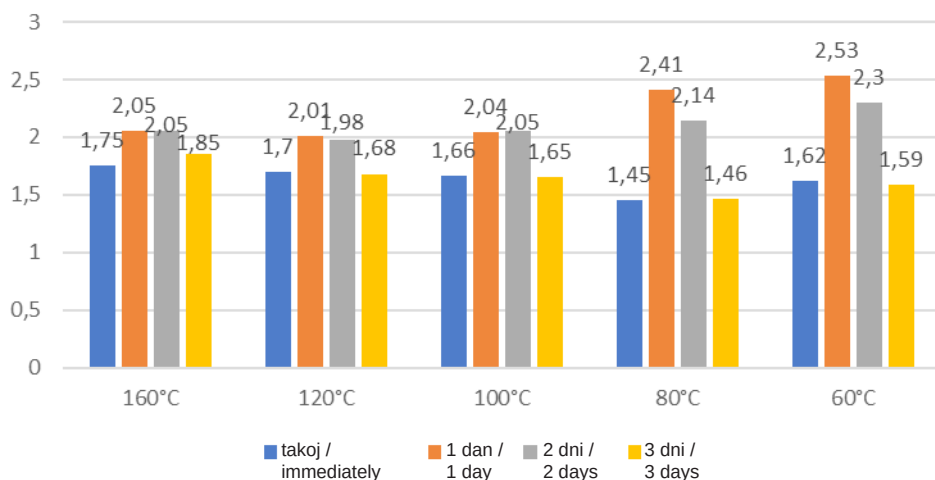
Ker je temperatura sušenja stroškovni dejavnik, smo izvedli preiskave, v katerih smo spreminjali zračno temperaturo med naplinjanjem ali sušenjem. Na slikah 5 do 7 so prikazani rezultati preskusov treh veziv. Vezivo, označeno z VC, je prvotni sistem, VC-HR in VC-CB pa sta vezivi, zasnovani za posebne uporabe. V tem nizu preskusov smo uporabili naslednje preskusne parametre: temperatura naplinjanja 160 °C do 60 °C v pet korakov, čas naplinjanja 60 s, temperatura peska 25 °C, kremenčev pesek QQ 26, relativna vlažnost 45 %. Na slikah

conditions for the "1d moist" values were 25 °C and 75 % relative humidity. For binders B1 to B3, the temperature refers to the core box temperature. The achieved strengths speak for themselves, all binders experience strength increases during the first days of storage under normal conditions, which can be attributed to progressive drying. Two of the comparative systems react more sensitively to storage in a humid environment. The strengths of the Peak binder system are lower than those of the other systems, which is of course due to the lower binder content. These values could be increased by higher binder additions if necessary, but the strengths shown here are sufficient for many applications. The potential of the system is clearly shown in fig. 2, where significantly higher specific strengths were determined after one day.

In principle, it is assumed that the strengths also increase when higher temperatures are used. In figs. 3 and 4, this is shown for a temperature of 200 °C (again, core box and gassing temperature). In fact, an increase in strength only occurs for the B1 and B3 binders; for Peak's system, the strengths remain about the same. This is interesting with regard to the optimum gassing temperature in terms of cost and environmental protection. However, when cores are stored in a humid environment, the advantage of a higher hardening temperature comes into its own. In terms of specific strengths, binder B3 has the better values here.

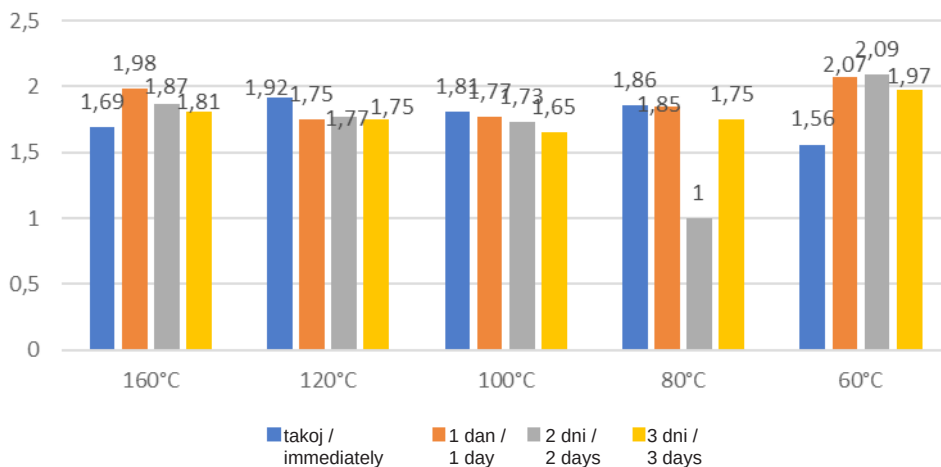
2.2 Influence of the Gassing Temperature

Since the temperature of the curing air is a cost factor, investigations were carried out to vary the air temperature for gassing or curing. Figures 5 to 7 show the results of



Slika 5. Upogibna trdnost veziva CC-VC pri različnih temperaturah utrjevanja, vsebnost veziva 1,75 %, kremenčev pesek QQs 26

Figure 5. Bending strength of CC-VC binder at different curing temperatures, binder content 1.75%, silica sand QQs 26

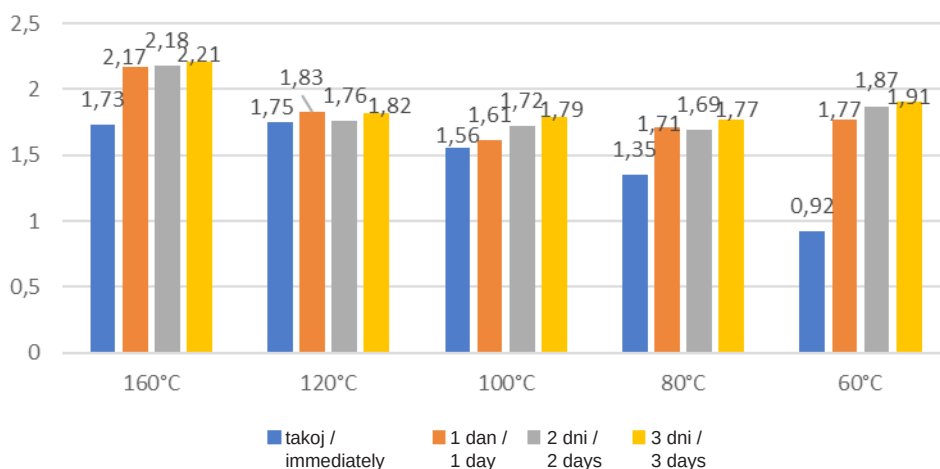


Slika 6. Upogibna trdnost veziva CC-VC-HR pri različnih temperaturah utrjevanja, vsebnost veziva 1,75 %, kremenčev pesek QQs 26

Figure 6. Bending strength of CC-VC-HR binder at different curing temperatures, binder content 1.75%, silica sand QQs 26

5 do 7 je opaziti, da se uporabni rezultati (z nekaj izjemami) pridobijo pri temperaturi naplinjanja 60 °C. Tukaj je zanimiva tudi izredno nizka vsebnost veziva, in sicer 1,75 %. Razlog za to opaženo vedenje

these tests for three binder systems. The binder labeled VC is the initial system, while VC-HR and VC-CB are binders designed for special applications. The following test parameters were used in this series of tests:



Slika 7. Upogibna trdnost veziva CC-VC-CB pri različnih temperaturah utrjevanja, vsebnost veziva 1,75 %, kremenčev pesek QQs 26

Figure 7. Bending strength of binder CC-VC-CB at different curing temperatures, binder content 1.75%, silica sand QQs 26

je uporaba izredno suhega zraka za naplinjanje preskusnih vzorcev. Tako je omogočeno zadovoljivo odvajanje vode in vodnih hlapov iz jedra med sušenjem tudi pri nizkih temperaturah. Ta razmerja bomo podrobneje proučili v bližnji prihodnosti.

2.3 Vedenje pri odstranjevanju jedra in preostala trdnost

Ena od »klasičnih pomanjkljivosti« veziv iz vodnega stekla, znanih iz literature, je visoka preostala trdnost jeder ali form po litju, ki je povezana z velikimi napori pri odstranjevanju jeder. Nenazadnje je ta pomanjkljivost odločilno vplivala na močan upad deležev postopka od približno sedemdesetih let prejšnjega stoletja. Cilj razvoja sodobnih anorganskih veziv se mora med drugih osredotočati tudi na izboljšanje vedenja pri odstranjevanju jeder. Ker je bilo predstavljeno vezivo razvito zlasti za uporabo pri litju železa in jekla, je bilo treba temu vidiku posvetiti prav posebno

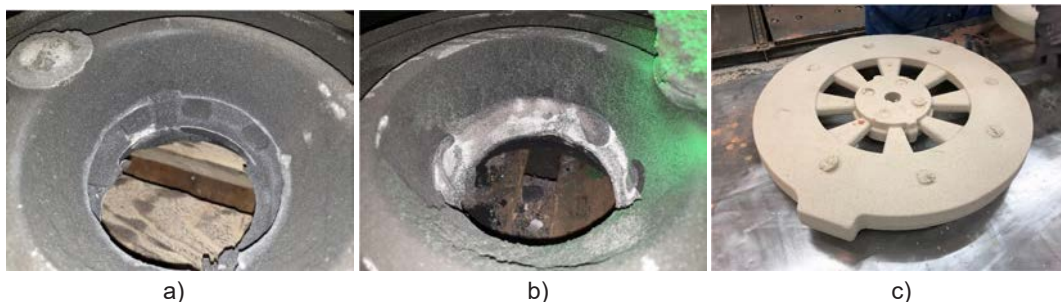
Gassing temperature 160°C to 60°C in five steps, gassing time 60s, sand temperature 25°C, silica sand QQs 26, relative humidity 45 %. From Figs. 5 to 7 it can be seen that useful results are obtained up to a gassing temperature of 60°C with some exceptions. Interesting at this point is also the very low binder content of 1.75 %. The reason for this observed behavior is the use of very dry air for the gassing of the test specimens. This apparently allows satisfactory water or water vapor removal from the core during curing even at lower temperatures. These relationships will be examined more intensively in the near future.

2.3 De-coring Behavior and Residual Tension

One of the "classic disadvantages" of water glass binder systems known from the literature is the high residual tension of cores or molds after casting, combined with a high de-coring effort. Last but not

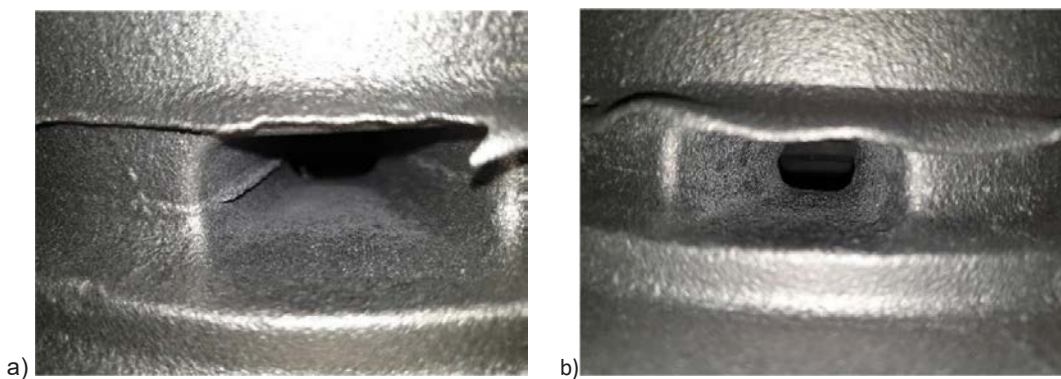
pozornost. V ta namen so bili v livarni železovih litin opravljeni preskusi litja. Jedro, ki se uporablja za hlajeni zavorni kolut (masa približno 15 kg), je prikazano na sliki 8a. Številna takšna jedra so bila nedokončno utrjena in dokončana z lamelnarnih grafitnim litim železom. Za primerjavo smo uporabili klasična jedra Coldbox PUR. Najprej je treba poudariti, da ni bilo jasnih razlik med premazanimi in nepremazanimi jedri. Vizualno opazovanje vedenja pri razpadu oz. odstranjevanju je razkrilo, da so bili pri

least, this disadvantage has decisively led to the strong decline of the process shares approximately from the 70s of the last century. The aim of developing modern inorganic binder systems must therefore be, in addition to other properties, to improve the de-coring behavior. Since the binder system presented was developed in particular for use in iron and steel casting, special attention had to be paid to this point. For this purpose, casting tests were carried out in an iron foundry. The core



Slika 8. Jedro za zavorni kolut, približno 15 kg (a), liti zavorni kolut, anorgansko jedro, sprijemanje peska (b), liti zavorni kolut, jedro PUR Coldbox (c)

Figure 8. Core for brake disc, approx. 15 kg (a), Cast brake disc, inorganic core, sand adhesion (b), Cast brake disc, PUR Cold Box core (c)



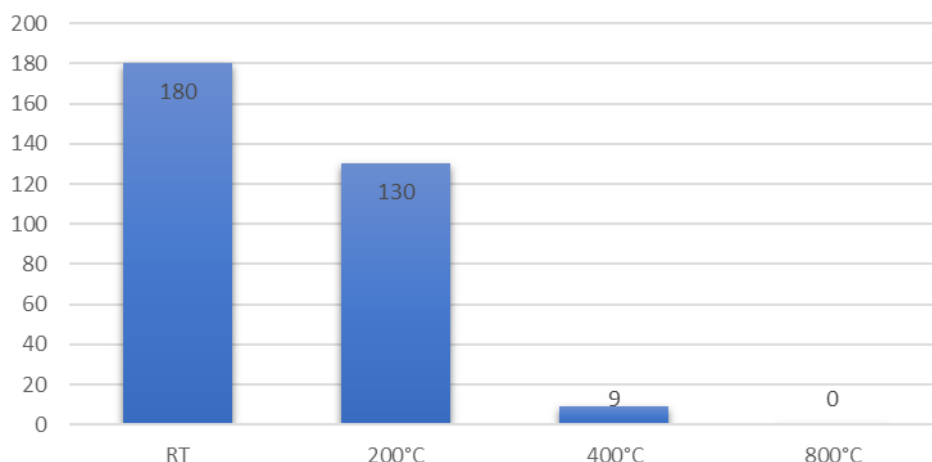
Slika 9. Ulitek s Slike 8 po peskanju, anorgansko jedro brez napak kot posledica razpok na jedru (a), jedro PUR Coldbox z razpokom kot posledica razpok na jedru (b)

Figure 9. Casting from Fig. 8 after shot blasting, inorganic core without veining (a), PUR cold box core with veining (b)

anorganskih jedrih kanali v ulitkih, izdelani s temi jedri, zapolnjeni, ki v primeru jeter Coldbox niso bili prisotni (sliki 8b in 8c). Po običajnem postopku peskanja so bili prilepki peščenega materiala popolnoma odstranjeni. Preostala jedra te serije so se v proizvodnji uporabljala brez težav in niso povezana s pritožbami. Pri ocenjevanju ulitkov se je pokazala prednost anorganskih veziv na osnovi vodnega stekla, ki je ne smemo podcenjevati: skoraj popolna odsotnost razpok na jedru. Ta napaka, ki nastane pri raztezanju materiala forme, je značilna zlasti za postopek PUR Coldbox, ki se pri vezivih na osnovi vodnega stekla zaradi prisotnosti termoplastične vezi in pri posebnih razredih ulitkov pojavlja zgolj v zelo majhnem obsegu. To je jasno prikazano na sliki 9.

Da bi to subjektivno pozitivno vedenje podprli s številkami, je bilo treba vedenje pri odstranjevanju jedra oceniti na podlagi preostale upogibne trdnosti. V ta namen so bile izdelane upogibne palice, ki so bile 24 ur po izdelavi 5 minut izpostavljene preskusni temperaturi in preskušane 2 uri po

used for a ventilated brake disc (mass approx. 15 kg) is shown in fig. 8a. A number of these cores were cast unfinished and finished with lamellar graphite cast iron. The standard PUR cold box cores served as a comparison. First of all, it should be noted that there were no clear differences between coated and uncoated cores. Visual observation of the disintegration or de-coring behavior revealed that in the inorganic cores, the channels of the castings were filled with mold material adhesions, which was not the case with the cold box cores (figs. 8b and 8c). After the normal sandblasting process, however, this sand adhesion was also completely removed. The other cores of this series were fed normally into production and did not give rise to any complaints. When evaluating the castings, one advantage of the inorganic binder system on water glass, which should not be underestimated, became apparent: the virtual absence of sheet veins. This molding material expansion defect, which is typical in particular for the PUR cold box process, only occurs to a very small extent



Slika 10. Preostala upogibna trdnost pri različnih temperaturah žarjenja, kremenčev pesek QCs 26 VC 2%

Figure 10. Residual bending tension at different annealing temperatures, silica sand QCs 26 VC 2%

odstranitvi iz peči. Preskusne temperature so bile 200 °C, 400 °C in 800 °C. Rezultati, prikazani na sliki 10, potrjujejo pozitivne lastnosti, ki so v to smer kazale že na podlagi preskusov litja. Preskusna temperatura 400 °C je namenjena predstavitvi tendence na področju aluminijevih ulitkov, temperatura 800 °C pa litega železa. Na tej podlagi lahko zaključimo, da je predstavljeno anorgansko vezivo značilen razpad in vedenje pri odstranjevanju jedra, ki je precej podobno vedenju pri postopku PUR Coldbox.

3 Primeri iz prakse

Jedra s predstavljenim sistemom anorganskih veziv so v številnih livarnah že

with water glass-based binder systems due to the thermoplastic bonding present there and with special casting grades. This is clearly demonstrated in Fig. 9.

In order to substantiate this subjectively positive behavior with figures, the de-coring behavior was to be evaluated on the basis of the residual bending tension. For this purpose, bending bars were produced which were exposed to the test temperature for 5 minutes 24 h after their production and tested 2 hours after removal from the oven. The test temperatures were 200°C, 400°C and 800°C. The results shown in Fig. 10 confirm the positive properties already evident from the casting tests in this direction. The test temperature of 400°C is intended to represent the tendency in the area of



Slika 11. Primeri uporabe anorgansko vezanih jeder za ulitke iz železovih litin

Figure 11. Application examples of inorganically bonded cores for iron castings



Slika 12. Primeri uporabe anorgansko vezanih jeder za neželezne ulitke

Figure 12. Application examples of inorganically bonded cores for non-ferrous castings

uspešno izdelali kot tudi uporabili. Jedra, prikazana na slikah 11a do 11c, so primeri ulitkov iz železovih litin. Razpon se razteza od zunanjih jeder za komplete jeder do že omenjenih jeder za kolutne zavore in filigranska jedra za ulitke ventilov. Področje neželeznih ulitkov, ki se jih v tem prispevku še nismo dotaknili, je slikovito ponazorjeno s primerom v sl. 12. Tudi tukaj obsega mogoč razpon enostavna jedra, npr. za sesalni kolektor, do izredno kompleksnega jedra glave valja. Prikazani primeri se uporabljajo za bakrene in aluminijeve ulitke.

aluminum casting, while the temperature of 800°C stands for iron casting. From this it can be concluded that the inorganic binder system presented exhibits decomposition and de-coring behavior quite similar to that of the PUR cold box process.

3 Examples from Practice

So far, cores with the inorganic binder system presented have been produced and successfully used in a whole series of foundries. The cores shown in figs. 11a to 11c are examples of iron castings. The range extends from outer cores for core packages to the aforementioned brake disc core and filigree cores for valve castings. The area of non-ferrous casting, which has not been the focus of this article so far, is impressively illustrated by the examples shown in fig. 12. Here, too, the feasible range extends from simple cores, e.g. for intake manifolds, to the highly complex core of a cylinder head. The examples shown are used in copper and aluminum castings.

Viri / Literature

- [1] Polzin, H., Kooyers, T.: Anorganisches Kernbindersystem für den Eisenguss – ein neuer Ansatz, GIESSEREI 105, 2018, št. 10, str. 70–75
- [2] Polzin, H.: Anorganische Binder zur Form- und Kernherstellung in der Gießerei Fachverlag Schiele & Schön Berlin, 2012
- [3] Europäisches Patent št. 2916976 – Verfahren zur Herstellung von verlorenen Kernen oder Formteilen zur Gussteilproduktion

Preoblikovanje livarskih postopkov glede na upravljanje vhoda- izhoda dobavne verige

Recasting the Casting Operations vis- a- vis Casting Input- Output Supply Chain Management

Izvleček

Svetovna populacija je glede na merilnik Worldometer v juniju 2022 narasla na 8 milijard. Po podatkih svetovnega popisa livarn iz leta 2021 je Indija drugi največji proizvajalec ulitkov (11,31 milijona ton v 4.500 livarnah) na svetu. Svetovna letna proizvodnja ulitkov je v letu 2021 znašala 105,5 milijona ton v več kot 46.500 livarnah v 34 državah. Livarne se glede na naravo dela na splošno razvrščajo na vezane livarne (sestavni deli organizacij, za katere izdelujejo ulitke), uslužnostne livarne (izdelujejo manjše število ulitkov za različne stranke), proizvodne livarne (gospodarna proizvodnja ulitkov v velikem obsegu) in polproizvodne livarne (kombinacija proizvodne in uslužnostne livarne). Livarstvo potrebuje velike količine vhodnih surovin in proizvaja ulitke za različne uporabniške panoge na kopnem, v morju in zraku, kot so avtomobilska industrija, strojna orodja, železnica, letalstvo in pomorska industrija. Vhodni-izhodni model ulitkov in upravljanje dobavne verige sta za livarsko industrijo bistvenega pomena. Nove tehnologije, npr. električna vozila, aditivna proizvodnja itd. predstavljajo nove težave za obstoječe livarje. Da bi zadostili spreminjajočim se razmeram, morajo livarji in lastniki livarn preoblikovati svoje postopke litja. Zato smo v tem prispevku opravili poskus preoblikovanja postopkov litja, primernih za hibridna električna vozila, 3-D tiskanje ulitkov itd. in sistemov za upravljanje dobavne verige, ki so potrebni za zahtevane vhodne surovine in izhodne proizvedene ulitke.

Gljučne besede: litje, upravljanje dobavne verige, svetovni popis livarn, Worldometer, 3-D tiskanje

Abstract

World population has reached 8.0 billion as of June 2022 as per estimates of worldometer. India is the second largest casting manufacturer (11.31 million tons in 4500 foundries) in the world as per world casting census 2021. Globally annual casting production of 105.5 million tons in more than 46,500 foundries in 34 nations 2021 AD. Foundries are broadly classified as captive foundry (integral part of an organization and it makes castings for the same), jobbing foundry (makes small number of castings for different customers), production foundry (produces castings on mass scale economically) and semi-production foundry (combination of production and jobbing foundry) based on their nature of work. Foundry needs large quantities of input raw material and produces output castings for different user industries like automobile, machine tools, railways, aircraft, marine industry on land, seas and air. Casting input-output model and supply chain management are vital for casting industry. New technologies pose fresh problems to the existing casters like electric vehicles, additive manufacturing etc. Metal casters as well as foundry owners need to recasting their casting operations suitable to the changing scenario. Hence in the present

work an attempt has been made to recast the casting operations suitable for changing technologies and supply chain management systems required for inputs raw materials required and output castings produced.

Keywords: casting, supply chain management, world casting census, worldometer, 3-dimensional printing

1 Uvod

Svetovna populacija je glede na merilnik Worldometer Organizacije združenih narodov v juniju 2022 narasla na 8 milijard. Svetovno prebivalstvo se je s 7 na 8 milijard povečalo v malo več kot desetletju (10,5 let). Skupno število ljudi, ki so kadar koli živeli na Zemlji, je bilo leta 2020 ocenjeno na približno 117 milijard. Ljudje zemljo naseljujemo že več kot 2,5 milijona let. Število ljudi je bilo med 70.000 pr. n. št. izredno majhno, tj. približno 1 milijon, leta 10.000 pr. n. št. pa je bilo na Zemlji približno 15 milijonov ljudi. Med 18. in 19. stoletjem se je svetovna populacija naglo povečala in do leta 1850 dosegla 1 milijardo, leta 1925 in 1960 pa se je že podvojila oz. potrojila. Demografi ZN (povzeto po BBC News) so 31.10.2011 v Indiji razglasili rojstvo 7-milijardnega otroka. Pričakuje se, da bo svetovna populacija do leta 2050 narasla na 10 milijard. Svetovna livarska industrija se neprekinjeno trudi zadostiti potrebam rastočega svetovnega prebivalstva, Zemlje, vesolja, osončja, Rimske ceste, univerzuma, multiverzuma in vsega, kar obstaja.

Družba se je razvila [1–3] v lovsko-nabiralniško (2,5 milijona do 12.000 let), kmetijsko (12.000 do 300 let), industrijsko (250 do 300 let) in na koncu pred približno desetletjem v družbo znanja. Revolucija znanja je postala gonilna sila globalizacije in svetovno integriranega gospodarstva. Gonilne sile globalizacije so tehnologija, potrebe trga, gospodarska integracija, vizija upravljanja in globalna strategija. Sile, ki nas zadržujejo, pa so kultura, tržne razlike, stroški, nacionalni nadzor, nacionalizem,

1 Introduction

World population has reached 8.0 billion as of June 2022 as per estimates of United Nations Worldometer. It had taken nearly a decade (10.5 years) to reach 7 billion to 8 billion population mark. Total number of humans ever lived on Earth has been estimated to be around 117 billions as of 2020 AD. People have inhabited the earth over 2.5 million years. The number of human beings had been very small during 70,000 B.C. approximately 1 million people and in 10000 BC around 15 million on Earth. World population had increased tremendously during the 18th and 19th centuries, reaching one billion by 1850 A.D., and by 1925 A.D. and 1960 A.D. it had doubled and tripled respectively. UN demographers (BBC news) declared the world's 7th billionth baby on 31st October 2011 in India. It is expected that the population will continue to grow up to 10 billions by the years 2050 A.D. World Foundry industry continually has been making efforts to cater the needs of growing population of the world, Earth, Space, Solar system, Milkyway, Universe, Omniverse and All-That-Is.

Societies have evolved [1-3] into hunter-gatherer societies (2.5 million to 12,000 years), agricultural societies (12,000 to 300 years), industrial societies (250 to 300 years) and knowledge societies since a decade or so. Knowledge revolution has become a driving force in globalisation and global integrated economy. The driving forces for globalisation are technology, market needs, economic integration,

vojna, kratkovidnost pri upravljanju, zgodovina organizacije in osredotočenost na domače tržišče. Med njimi je tehnologija univerzalni dejavnik, ki presega nacionalne in kulturne meje. Tehnologija je resnično brez države in brez meja. Ko je tehnologija enkrat razvita, postane kmalu na voljo povsod po svetu kljub etnocentričnim, policentričnim, regiocentričnim in geocentričnim usmeritvam.

Angleška beseda »foundry« (livarna) izvira [1] iz latinske besede »fundere«, ki pomeni »taliti in liti«. Livarstvo je matična industrija. Ulivanje kovin, tehnologija, stara 12.000 let, omogoča najrazličnejše načine za izdelavo ulitkov v najrazličnejših oblikah, velikostih, zlitinah, količinah in zahtevah v povezavi s kakovostjo. Najstarejša kovinska »mumija« (glava bakrene sekire) je bila ulita leta 3.300 pred našim štetjem, najstarejši ulitek pa je »bakrena žaba« iz leta 3.200 pred našim štetjem, izdelana v Mezopotamiji. Trenutno [2] je po vsem svetu približno 46.500 livarn, med drugim livarn železa, jekla in neželeznih zlitin, v letu 2020 pa so proizvedle približno 105,5 milijonov ton kovinskih ulitkov. Indija je drugi največji svetovni proizvajalec ulitkov (11,31 milijona ton). Na Zemlji se stalno povečujeta število prebivalstva kot tudi izčrpavanje naravnih virov. Zato so potrebne inovativne metode in rešitve, ki bodo neprekinjeno zadovoljevale potrebe naraščajočega prebivalstva po kovinskih ulitkih v dobi inovacij. Sedem inovacij na področju litja kovin vključuje inovacije izdelkov, procesov, tehnologije, organizacije, poslovanja, strategije in trženja. Glavne inovacije obsegajo parno energijo (Industrija 1.0), elektriko (Industrija 2.0), elektronski računalnik (Industrija 3.0) in internet (Industrija 4.0). Nekaj najnovejših inovacij vključuje aditivno proizvodnjo, 3-D tiskanje, proizvodnjo v oblaku, analitiko velepodatkov, digitalne dvojčke, kibernetiko-fizične sisteme, avtonomne robote, internet

management vision, and global strategy. The restraining forces are culture, market differences, costs, national controls, nationalism, war, management myopia, organization history and domestic focus. Out of these, technology is a universal factor that crosses national and cultural boundaries. Technology is truly stateless and borderless. Once a technology is developed, it soon becomes available everywhere in the world even though ethnocentric, polycentric, regiocentric and geocentric orientations exist.

The word 'foundry' is derived [1] from Latin word 'fundere' meaning 'melt and pour'. Foundry is the mother industry. Metal casting, a 12,000 years' young technology, offers the widest variety of routes to produce cast components in a wide range of shapes, sizes, alloys, quantities and quality requirements. The oldest metal casting 'mummy' (copper axe head) is casted in 3300 BC and oldest casting in existence is a 'copper frog' of 3200 BC in Mesopotamia. At present [2] there are around 46,500 numbers of foundries including Iron, Steel, and non-ferrous globally producing annually about 105.5 million metric tons of metal castings in 2020 AD. India is the second largest casting producer (11.31 million tons). There is a constant increase in population and depletion of natural resources on Earth. Hence there is a need for innovative methods and solutions to cater the needs metal castings of future growing population continually in the age of innovation. The seven innovations in metal casting include product, process, technology, organizational, business, strategy, and marketing innovations. Major innovations include steam power (Industry 1.0), electricity (industry 2.0), electronic computer (Industry 3.0) an internet (Industry 4.0). Some of the recent innovations include additive manufacturing, three dimensional

stvari in simulacije. Združitev teh tehnologij v livarskem okolju igra pomembno vlogo z vidika ohranjanja konkurenčnosti v livarski industriji. Zato morajo livarji kovin in lastniki livarn preoblikovati svoje delovanje.

2 Materiali za svetovno livarsko industrijo

Ulitki so tehnični kovinski izdelki [3–5], ki se izdelajo z zasnovo forme in litjem tekoče kovine v livno votlino, v kateri se tekoča kovina strdi. Skoraj vsako kovino, ki jo je mogoče staliti, je mogoče tudi uliti in ta prilagodljivost omogoča livarski industriji, da proizvaja neskončno raznolike komponente enostavnih ali kompleksnih oblik, ne glede na to, ali so izdelane zgolj enkrat kot prototipi ali pa tisočkrat za širšo uporabo. Litje kovin običajno obsega pet osnovnih korakov, in sicer izdelavo modelov, formanje, izdelavo jeder, taljenje in litje ter obrezovanje in končno obdelavo.

Na svetovni ravni se ulitki v livarski industriji bodisi neposredno bodisi posredno izdelujejo iz okoli 40.000 kovinskih zlitin in še 40.000 nekovinskih materialov. Podrobnosti proizvodnje ulitkov vseh livarn v tonah kovinskih in nekovinskih ulitkov ter razčlenitev (siva litina z lamelnim grafitom, siva litina s kroglastim grafitom, temprano železo, jeklo, aluminijeve zlitine, bakrove zlitine, magnezij, cink in drugi nekovinski ulitki) ter število livarn, ki takšne ulitke proizvaja, so vsako leto objavljeni v decembrski izdaji revije Modern Casting. Večina materialov, ki se uporabljajo v livarnah, se pridobiva iz zemeljske skorje, in sicer z rudarjenjem in dodatno obdelavo, primerno za livarsko industrijo. Zemeljska skorja je sestavljena iz 74 % kisika in silicija, 8,1 % aluminija, 5 % železa, 2,1 % magnezija in manj kot 1 % ostalih elementov.

printing, cloud manufacturing, dig data analytics, digital twins, cyber physical systems, autonomous robots, internet of things, and simulation. Fusion of these technologies with casting environments has an essential development to stay competitive in foundry industry. Hence foundries need to recast their casting operations suitably.

2 Materials for World Foundry Industry

Castings are engineered metal components [3-5] formed by designing a mould and introducing molten metal into the mould cavity where the molten metal solidifies. Almost any metal that can be melted can also be cast and this flexibility allows the metal casting industry to produce simple or complex shaped components of infinite variety, whether they are produced once as a prototype or thousands of times for use. Metal casting normally involves five basic steps i.e. pattern making, moulding, core making, melting and pouring, and fettling and finishing.

Globally, castings made of some 40,000 metallic alloys and 40,000 more non-metallic materials can be made directly or indirectly by foundry industry. The casting production details of all foundries in tons of ferrous castings and non-ferrous castings and their break up (gray iron, ductile iron, malleable iron, steel, aluminium base, copper base, magnesium, zinc and other non-ferrous castings) and the number of foundries producing these castings are published in December issue of Modern Casting Journal each year. Most of the materials used in foundries have been extracted from earth crust in the form of mining and further refining suitable to foundry. Earth crust has 74 % Oxygen and Silicon, 8.1 % Aluminium,

Večina teh elementov se v zemeljski skorji nahaja v obliki različnih oksidov.

Najdba zlata v surovi obliki (10.000 pr. n. š.); najstarejši kovinski predmet iz gnetenega bakra na Bližnjem vzhodu (9.000 pr. n. š.); svinčeni premaz na glinenih posodah (5.000 pr. n. š.); majhni ulitki, izdelani s postopkom precizijskega litja (3.000–2.500 pr. n. š.); gnetno železo na Bližnjem vzhodu (1.500 pr. n. š.); proizvedeno jeklo v Indiji (500), prvi železni plavž, izdelan v Falling Creeku v S. Ameriki (1619); koks prvič uporabljen kot gorivo v plavžu za proizvodnjo železa, inovacija Abrahama Darbya, Anglija (1700), temprano lito železo razvije AFD Reamer (1722), Benjamin Huntsman znova odkrije postopek izdelave jekla v loncu (1750), Anglež John Wilkinson izumi kupolko s parnim strojem, ki omogoča vpihovanje zraka (1794), aluminij, izdelan iz aluminijevega klorida na Danskem (1825); prva temprana črna litina, izdelal Seth Boyden (1830); metalografijo razvije HC Sorby, Sheffield, leto 1863, James Nasmyth razvije nagibni lonec z zobniki za litje, leto 1867.

Odkritje redukcije aluminija [6–9] skozi elektrolizo, C. M. Hall leta 1886; prva električna obločna peč, Francoz Paul Herolt leta 1899; (nameščena) prva nizkofrekvenčna indukcijska peč v podjetju Henry Diston & Co, Tacony, leto 1906; (nameščena) prva visokofrekvenčna brezjedrna električna indukcijska peč v podjetju Lebanon Steel Foundry, Libanon, leto 1930; raziskava razmerja med časom strjevanja in geometrijo ulitka, Chvorinov, leto 1943; odkritje nodularne litine leta 1943, Keith D. Milles, patent vložen 1949; podjetji Ford Mineral Co in BCIRA razvijeta litino z vermikularnim grafitom, podjetje General Motor predstavi austemprano duktilno litino za diferencial zadnje osi za avtomobile sredi 1980-ih; uporaba računalnikov za modeliranje pojavov med strjevanjem,

5 % Iron, 2.1 % Magnesium and others less than 1 %. Most of these are available in various oxides form.

Gold found in naïve form (10,000 BC); earliest metal objects of wrought naïve copper in Near East (9000 BC); lead coated on earthen pots (5000 BC); small objects cast via investment casting process (3000–2500 BC); wrought iron in Near East (1500 BC); steel produced in India (500 AD), first iron furnace built at Falling Creek in North America (1619 AD); first use of coke as furnace fuel for iron production developed by Abraham Darby, England (1700 AD), Malleable iron developed by AFD Reamer (1722 AD), Benjamin Huntsman reinvented cast crucible steel process: 1750 AD, Englishman John Wilkinson invented the first cupola furnace using steam engine to provide air blast (1794 AD), aluminium made from aluminium chloride in Denmark (1825 AD); first black heart malleable iron produced by Seth Boyden (1830 AD); metallography was developed by HC Sorby, Sheffield in 1863 AD and James Nasmyth developed a gear tilted ladle for pouring in 1867 AD.

Discovery of aluminium reduction [6–9] through electrolysis by C. M. Hall in 1886 AD; first electric arc furnace by France's Paul Herolt in 1899 AD; first low frequency induction furnace (installed) at Henry Diston & Co, Tacony in 1906 AD; first high frequency coreless electric induction furnace (installed) at Lebanon Steel Foundry, Lebanon in 1930 AD; a relationship between solidification time and casting geometry by Chvorinov in 1943 AD; discovery of ductile iron in 1943 by Keith D Milles and patented in 1949 AD; Ford Mineral Co and BCIRA developed compacted graphite iron, and General Motor introduced austempered ductile iron for rear differential in cars in mid 1980s; use of computer for modelling phenomena of solidification,

razvoj tehnik za 3-D vizualizacijo leta 1993; največji jekleni ulitek za ohišje valjarne za plošče iz taline 467 ton jekla, staljene v eni 90-tonski obločni peči leta 1999; namestitev prve neprekinjeno delujoče električne obločne peči za proizvodnjo litega železa, v kateri se pretopi 100 ton na uro, s strani podjetja American Cast Iron Pipe Co., Birmingham, 2001; in okrov motorja iz magnezijeve zlitine, razvit za štirikolesnike, leto 2002. Leta 2015 stroji za tridimenzionalno (3-D) tiskanje [10] jeder in form velikosti 4000mmx2000mmx1000mm razviti za izdelavo ulitkov.

Svetovna proizvodnja ulitkov in deset držav, ki proizvedejo največ ulitkov, so predstavljeni v Preglednici 1. Kitajska je največja proizvajalka, sledita ji Indija in ZDA. Analiza proizvodnje zlitin je predstavljena v Preglednici 2. Največja je proizvodnja železnih ulitkov, sledijo pa ji ulitki iz aluminijeve zlitine in jekla. Proizvodnja zlitin v Indiji je predstavljena v Preglednici

development of 3D visualization techniques in 1993 AD; largest steel casting for plate mill housing with 467 tons of steel melted by a single 90 ton per heat arc furnace in 1999 A.D.; installation of first continuously operated electric arc furnace for cast iron production which smelted and melted 100 tons per hour by American Cast Iron Pipe Co., Birmingham in 2001 A.D.; and magnesium alloy cylinder block casting was developed for four wheelers in 2002 A.D. In the year 2015 AD three dimensional (3-D) printing [10] core and moulds machines 4000 mm x 2000 mm x 1000 mm size have been developed for making castings.

World casting production and top ten casting producing nations is presented in Table 1. China is the largest producer followed by India and US. Alloywise casting production analysis is presented in Table 2. Iron castings production is the highest followed by aluminium alloys and steel. Alloywise casting production in India is

Preglednica 1. Svetovna proizvodnja ulitkov in deset držav, ki proizvedejo največ ulitkov, april 2020 do marec 2021

Table 1. World Casting Production and Top Ten casting producing nations in April 2020 to March 2021

Država / Nation	Proizvodnja v milijonih / Production in million ⁽²⁾ [tone / tons]	Odstotek skupne svetovne proizvodnje / Percentage of total world production [(2)/105,5]×100 [%]
Kitajska / China	51,95	49,24
Indija / India	11,31	10,72
Združene države Amerike / United States	9,75	9,28
Rusija / Russia	4,20	3,98
Nemčija / Germany	3,48	3,30
Japonska / Japan	3,45	3,27
Mehika / Mexico	2,86	2,71
Koreja / Korea	2,38	2,26
Turčija / Turkey	2,17	2,06
Brazilija / Brazil	2,07	1,96
Prvih deset skupaj / Total top-ten	93,62	88,74
Ves svet / World	105,5	100

3. Indijska livarna dobavlja kovinske ulitke za avtomobile (32 %), traktorje in železnice (6 %), stroje in orodja (8 %), sanitarne armature in pribor za cevi (16 %), pogonski stroji in železnica (11 %), drugo (27 %), kot so vojska, vesoljska industrija, zemeljska dela, tekstil, cement, elektrika, črpalke/ventili, generatorji za vetrne turbine itd. Podatki so predstavljeni v Preglednici 4. Analiza svetovnega livarskega grozda je predstavljena v Preglednici 5. APFC

presented in Table 3. The Indian foundry supplies metal cast components for Automobile (32 %), Tractor and Railways (6 %), Machines and tools (8 %), Sanitary and Pipe Fittings (16 %), Power machinery and Railways (11 %), others (27 %) like Defence, Aerospace, Earth Moving, Textile, Cement, Electrical, Pumps / Valves, Wind turbines generators etc. It is presented in Table 4. World foundry industry cluster analysis is presented in Table 5. APFC

Preglednica 2. Svetovna proizvodnja ulitkov in njihovi odstotki v letu 2020

Table 2. Alloywise World Casting production and their percentage in 2020

Zlitina / Alloy castings	Proizvodnja v milijonih / Production in million [tone /tons]	Odstotek skupne proizvodnje / Percentage of total production [%]
Ulitki iz lamelne sive litine / Gray Iron castings	49,53	46,95
Ulitki iz sive litine s kroglastim grafitom / Malleable Iron castings	23,59	22,37
Ulitki iz tempranega litega železa / S.G.Iron castings	0,79	0,75
Jekleni ulitki / Steel castings	10,31	9,78
Aluminijevi ulitki / Al castings	16,02	15,19
Bakreni ulitki / Copper castings	1,90	1,8
Cinkovi ulitki / Zinc castings	0,35	0,33
Magnezijevi ulitki / Mg castings	0,13	0,13
Drugi neželezni ulitki / Other non-ferrous	0,84	0,79
Skupaj / Total	105,50	100

Preglednica 3. Proizvodnja ulitkov v Indiji in njihovi odstotki v letu 2020

Table 3. Alloywise Casting production in India and their percentage in 2020

Zlitina / Alloy castings	Proizvodnja v milijonih / Production in million [tone /tons]	Odstotek skupne uporabe ulitkov / Percentage of total castings usage [%]
Ulitki iz sive litine / Gray Iron castings	7,91	69,93
Ulitki iz nodularne litine / S.G.Iron castings	1,09	9,69
Ulitki iz tempranega litega železa / Malleable Iron castings	0,05	0,44
Jekleni ulitki / Steel castings	0,91	8,06
Aluminijevi ulitki / Al castings	1,34	11,88
Skupaj / Total	11,31	100

Preglednica 4. Uporaba ulitkov v Indiji in njihovi odstotki v letu 2020**Table 4.** Casting usage in India and their percentage in 2020

Porabnik industrija / User industry	Proizvodnja v milijonih / Production in million [tone /tons]	Odstotek skupne proizvodnje / Percentage of total production [%]
Avtomobili / Automobiles	3,62	32 %
Traktorji in kmetijska mehanizacija / Tractor and Farm machinery	0,68	6%
Strojno orodje / Machine tools	0,9	8%
Sanitarne armature in pribor za cevi / Sanitary and pipe fittings	1,81	16 %
Pogonski stroji in železnica / Power machinery and Railways	1,24	11 %
Obramba, zemeljska dela, tekstil, cement, črpalke in ventili / Defence, earth moving, textile, cement, pumps and valves	3,06	27 %
Skupaj / Total	11,31	100 %

Preglednica 5. Analiza svetovnega livarskega grozda v letu 2020**Table 5.** World Foundry Industry Clusters Analysis in 2020

Metrika / Metric	APFC	AFC	EUFC	ECEFC	LAFC	MEFC	NAFTAFC	Skupaj / Total
Št. držav / No of countris	7	1	18	2	1	1	3	33
Št. livarn / No. of foundries	36711	135	3422	1980	859	952	2636	46695
Proizvodnja v milijonih ton / Production in million tons	71,26	0,44	10,57	5,76	2,07	2,17	13,25	105,51
Odstotek svetovne proizvodnje / Percent of world production	67,6	0,4	10,0	5,4	2,0	2,0	12,6	100
Odstotek svetovnih livarn / Percent of world foundries	78,6	0,3	7,3	4,3	1,8	2,0	5,7	100

APFC: Azijsko-pacifiški livarski grozd: Kitajska, Indija, Japonska, Koreja, Indonezija, Pakistan, Tajvan / Asia Pacific Foundry Cluster: China, India, Japan, Korea, Indonesia, Pakistan, Taiwan

AFC: Afriški livarski grozd: Južna Afrika / African Foundry Cluster: South Africa

EUFC: Livarski grozd Evropske unije: Nemčija, Francija, Italija, Španija, Poljska, Češka, Avstrija, Švedska, Belgija, Portugalska, Norveška, Danska, Slovenija, Hrvaška, Madžarska, Romunija, Švica, Združeno kraljestvo / European Union Foundry Cluster: Germany, France, Italy, Spain, Poland, Czech republic, Austria, Sweden, Belgium, Portugal, Norway, Denmark, Slovenia, Croatia, Hungary, Romania, Switzerland, United Kingdom

ECEFC: Vzhodnoevropski livarski grozd: Rusija, Ukrajina / Eastern Central Europe Foundry Cluster: Russia, Ukraine

LAFC: Livarski grozd Latinske Amerike: Brazilija / Middle East Foundry Cluster: Turkey

MEFC: Livarski grozd Bližnjega vzhoda: Turčija

NAFTAFC: Livarski grozd severnoameriškega območja prostega trga: Združene države Amerike, Kanada, Mehika / North America Free Trade Area Foundry Cluster: United States, Canada, Mexico

Preglednica 6. Letni vhodni/izhodni model materiala za svetovno proizvodnjo ulitkov v letu 2020**Table 6.** Annual Input-Output Material Model for World Casting Production in 2020

Vhodni materiali / Input materials	Količina v milijonih / Quantity in million [tone / tons]	Izhod v milijonih / Output in million [tone / tons]	Količina recikliranih materialov v milijonih / Quantity of recycled materials in million [tone / tons]
Osnovni pesek (1:3) / Base sands (1:3)	315	333,9 livarski pesek / moulding sand	300 reciklirani pesek / recycled sand
Veziva, aditivi (6 % BWS)/ Binders, additives (6 % BWS) /	18,9	-	-
Livarski pesek / Moulding sand	333,9	333,9 forme in jedra / moulds and cores	33 odpadni pesek / waste sand
Kovine – železov izmet in zavrtnjeni izdelki / Metallics- ferrous Iron PI, Scrap & FR	113,74	73,93 železni ulitki / iron castings	28,08 zavrtnjeni izdelki / foundry returns, 3,7 žindra / slag, 2,22 plini / gases, 3,7 okvarjeni zavrtnjeni izdelki / defective FRs
Kovine – železov-jekleni izmet in zavrtnjeni izdelki / Metallics- ferrous-steel scrap and FRs	18,76	10,32 jekleni ulitki / steel castings	5,63 zavrtnjeni izdelki / foundry returns 0,52 žindra / slag, 0,52 okvarjeni zavrtnjeni izdelki / defective FRs 0,31 plini, moder prah / gases, blue dust
Kovine – grodelj NF / Metallics-NF-pigs	25,68	19,26 neželezni ulitki / non-ferrous castings	3,56 zavrtnjeni izdelki / foundry returns 0,96 žindra / slag
Ognjevdzdržni materiali – kislina, baza, ognjevdzdržni prah / Refractories – acid, basic, ref. powder	10.5	-	10.5 odpadni ognjevdzdržni materiali za obloge / waste refractory lining materials
Dies, machines, tooling / Matrice, stroji, orodje	lot / šarža	-	-
Skupaj / Grand total	836.48	771.31	393.27

proizvede največje število ton ulitkov, v njem pa je tudi največje število livarn, sledita NAFTAFC in EUFC.

produces largest tonnage as well as large number of foundries followed by NAFTAFC and EUFC.

3 Vhodni-izhodni model za livarske materiale

Leta 2020 je svetovna proizvodnja ulitkov štela približno 105,5 milijonov ton. Letne

3 Total Input-Output Foundry Materials Model

World casting production was around 105.5 million tons in 2020. Annual raw materials,

surovine, dokončani ulitki in reciklirani materiali so opredeljeni in predstavljeni v Preglednici 6. Za proizvodnjo 105 milijonov ton ulitkov je bilo skupaj potrebnih pribl. 2.001 milijonov materiala, med drugim 837 milijonov ton surovin, 771,3 milijonov ton dokončanih form in ulitkov ter 393,3 milijonov ton recikliranega materiala. Vhodni-izhodni model materiala indijskih livarn je predstavljen v Preglednici 7. Indijska livarska industrija letno obdelava okoli 216 milijonov ton materialov. Z materiali in končnimi ulitki se ukvarjajo različni prodajalci, skladišča surovin, proizvodni obrati, skladišča končanih izdelkov in tržnice. Upravljanje dobavne verige in logistika igrata pomembno vlogo pri tej izredno obsežni nalogi ravnanja z razsutim materialom in ulitki v približno 200 državah sveta. Pri nakupu različnih zalog se livarne običajno zanašajo na metodo zunanjega in notranjega izvajanja. Različne vrste livarn (na svetu jih je skupaj 46.695), kot so uslužnostne livarne, vezane livarne, proizvodne livarne in polproizvodne livarne, prav tako dobavljajo takšne ulitke.

Uslužnostne livarne običajno proizvajajo majhno število ulitkov določene vrste za različne naročnike. Vezane livarne so tiste livarne, ki predstavljajo ključni del proizvodne organizacije, v kateri je proizvodna livarna mehanizirana v veliki meri in lahko na gospodaren način proizvaja ulitke. Polproizvodna livarna je kombinacija uslužnostne in proizvodne livarne. Potrebne surovine, tako kovinske kot nekovinske, in zaključeni ulitki za različne naročnike, reciklirani materiali tako v podjetju kot izven njega, kupci in prodajalci ulitkov – vsi sledijo različnim sistemom zunanjega in notranjega izvajanja.

Obsegajo naslednje:

Zunanje izvajanje (outsourcing):

Poslovna praksa, kjer livarna/tovarna za izvedbo naloge, opravila ali storitve

finished casting and recycled materials are quantified and presented in Table 6. Total raw materials handled for producing 105 million tons of castings are approximately around 2001 million tons which include raw materials 837 million tons, finished moulds and castings 771.3 million tons and recycled materials are 393.3 million tons. Indian foundry materials input- output model is presented Table 7. Indian foundry industry handles around 216 million tons of materials annually. The materials and finished castings are to be handled by various vendors, raw material warehouses, production shops, finished warehouses and markets. Supply chain management and logistics play an important role in this gigantic task of bulk material and castings handling in around 200 nations of the world. Foundries normally use outsourcing and insourcing methods for procurement of various supplies. Foundries also supply these castings produced in different types foundries like jobbing foundries, captive foundries, production foundries and semi-production foundries of 46,695 numbers all over the world.

Jobbing foundries normally produce small number of castings of a given type for different customers. Captive foundries are those which are integral part of some manufacturing organization where a production foundry is a highly mechanized and can produce castings economically. A semi-production foundry is a combination of jobbing foundry and a production foundry. Raw materials both metallic and non-metallics required and finished castings for different customers, recycled materials inside as well as outside, casting buyers and sellers follow different outsourcing and insourcing systems.

These include the following:

Outsourcing: It is a business practice in which a foundry/factory hires a

Preglednica 7. Letni vhodni/izhodni model materiala za proizvodnjo ulitkov v Indiji v letu 2020**Table 7.** Annual Input-Output Materials model for Casting production for India in 2020

Vhodni materiali / Input materials	Količina v milijonih / Quantity in million tons [tone / tons]	Izhod v milijonih / Output in million [tone / tons]	Količina recikliranih materialov v milijonih / Quantity of recycled materials in million [tone / tons]
Osnovni pesek (1:3) / Base sands (1:3)	33,94	35,98 livarski pesek / moulding sand	32,38 reciklirani pesek / recycled sand
Veziva, aditivi (6 % BWS) / Binders, additives (6% bws)	2,04	-	-
Livarski pesek / Moulding sand	35,98	35,98 forme in jedra /moulds and cores	3,59 odpadni pesek / waste sand
Kovine – železov izmet in zavrtnjeni izdelki / Metallics- ferrous Iron PI,Scrap & FR	13,93	9,06 železni ulitki / iron castings	3,48 zavrtnjeni izdelki / foundry returns, 0,45 žlindra / slag, 0,27 plini / gases, 0,45 okvarjeni zavrtnjeni izdelki / defective FRs
Kovine – železov- jekleni izmet in zavrtnjeni izdelki / Metallics- ferrous- steel scrap and FRs	1,66	0,912 jekleni ulitki / steel castings	0,05 zavrtnjeni izdelki / foundry returns, 0,05 žlindra / slag, 0,05 okvarjeni zavrtnjeni izdelki / defective FRs, 0,03 plini / gases
Kovine – grodelj, izmet in zavrtnjeni izdelki / Metallics- NF- pigs, scrap and FRs	1,79	1,34	0,07 zavrtnjeni izdelki / foundry returns, 0,07 žlindra / slag, 0,07 okvarjeni zavrtnjeni izdelki / defective FRs, 0,04 plini / gases
Ognjevdružni materiali – kislina, baza, ognjevdružni prah / Refractories - acid,basic, ref. powder	1,13	-	1,13 izmet / scrap
Matrice, stroji, orodje / Dies, machines, tooling	šarža / lot	-	-
Skupaj / Grand total	90,47	83,27	42,21

za livarno najame tretjo osebo.

Notranje izvajanje (insourcing): Poslovna praksa, kjer livarna storitev/opravilo izvede v livarni/tovarni.

En odjemalec (single sourcing): Nalogi za dobavo enemu samemu podjetju.

En dobavitelj (sole sourcing): Nalogi za

third party to perform tasks, handle operations or provide services for the foundry.

Insourcing: It is business practice in which a foundry has services/ operations within the foundry/ factory.

Single sourcing: Orders for supply from a

dobavo enega samega dobavitelja.

Več dobaviteljev (multiple sourcing):

Nalogi za dobavo več dobaviteljem.

Hibridna dobava (hybrid sourcing):

Strategija s ciljem zagotovitve popolne mešanice različnih dobaviteljev.

Selitev proizvodnje (offshoring):

Ko livarna izvajanje potreb, ki bi jih lahko uresničila v obratu, preseli v tujo državo.

Proizvodnja v matični državi (onshoring):

Potreba ali dejavnost livarne se izvede v matični državi.

Selitev v sosednjo državo (near shoring):

Zunanje izvajanje v sosednji državi ali v državi v regiji s časovno razliko, ki ni večja od dveh ur.

Selitev na podeželje (farm shoring):

Nanaša se konkretno na selitev izvajanja iz urbanega v podeželsko okolje.

Selitev na dom (home shoring):

Zaposleni delajo od doma in ne v poslovnih prostorih podjetja ali obrata, kot npr. med Covid-19.

Ustanovitev v tujini (captive shoring):

Obsega ustanovitev in obratovanje subjekta, ki je delno ali v celoti v lasti drugega lastnika.

Vračanje dejavnosti (reshoring):

Postopek vračila proizvodnega blaga v izvorno proizvodno državo. Uporablja se tudi izraz »backshoring«.

Logistika (logistics):

Postopek premikanja surovin, osebja, materialov, inventarja in opreme z ene lokacije na drugo.

Nabavna logistika (procurement

logistics): Nabava surovin in delov.

Proizvodna logistika (production

logistics): Obsega upravljanje materialov, distribucijo v tovarnah, upravljanje produktov in pošiljanje.

Prodajna logistika (sales logistics):

Obsega dobavo iz skladišč do veletrgovcev, trgovcev na drobno in porabnikov.

single firm.

Sole sourcing: Orders for supply are placed on a sole supplier.

Multiple sourcing: Orders for supply are placed with two or more suppliers.

Hybrid sourcing: It is strategy aiming to source along the perfect mixture of a service delivery alternatives.

Offshoring: When a foundry procures in-house requirements from a country abroad.

Onshoring: A foundry requirement or activity takes place within the home country.

Near shoring: It is an out sourcing to neighboring country or within the same region with the time difference not more than two hours.

Farm shoring: It refers to specific variety of outsourcing shifting from urban to rural locations.

Home shoring: It is the practice of people to work from their homes rather than in a company's or factory premises like in Covid-19.

Captive shoring: It involves establishing and operating some form of a partly or wholly owned entity overseas.

Reshoring: It is a process of returning production or manufacturing goods back to the Factory's original country. It is also termed as backshoring.

Logistics: It is the process of moving resources of people, materials, inventory, equipment from one location to the other.

Procurement logistics: It is the procuring of raw materials and parts.

Production logistics: It includes materials management, distribution in factories, product management and shipping.

Sales logistics: It is the delivery from warehouses to wholesalers, retailers and consumers.

Supply Chain Management: It covers all

Upravljanje dobavne verige (supply chain management): Obsega vso usklajevanje med partnerji, ki igrajo vlogo v omrežju, vključno z dobavo, proizvodnjo, transportom, shranjevanjem in prodajo.

the coordination between partners that have a role in the network including sourcing, manufacturing, transporting, storing and selling.

4 Sklepi

Svetovna livarska industrija nenehno skrbi za naraščajoče potrebe rastočega prebivalstva od leta 70.000 pred našim štetjem do danes in pričakuje se, da bo potrebno podporo v prihodnosti še razširila. Kvantificirali smo materiale, potrebne za svetovno in indijsko livarsko industrijo. Izvedli smo analizo zlitin za svetovno livarsko industrijo in imenovali deset največjih proizvajalcev ulitkov za leto 2020. Izvedene so bile analize tako z vidika svetovnega livarskega grozda kot različnih livarn. Kvantificirali smo uporabo ulitkov v uporabniški industriji in model celotnega materiala za indijsko livarsko industrijo. Poudarili smo različna orodja in tehnike, ki se uporabljajo za upravljanje dobavne verige ter zunanje in notranje izvajanje. Da bi ostale konkurenčne v livarskem sektorju, bodo livarne sprejele nove inovativne tehnologije.

5 Zahvala

Avtor se iskreno zahvaljuje univerzi North Eastern Regional Institute of Science and Technology (velja za univerzo), Itanagar, Arunachal Pradesh, Indija, za zagotovljeno pomoč pri tem delu. Avtor se za spodbudo in pomoč prav tako zahvaljuje mag. Mirjam Jan-Blažić, predsednici Društva livarjev Slovenije, za sprejem tega prispevka na 62. mednarodno livarsko konferenco v Portorožu v Sloveniji.

4 Concluding Remarks

World foundry industry has been continually catering to the growing needs of growing population since 70,000 BC onwards till date and expected to extend the required support in future also. Materials required for world foundry industry and Indian foundry industry was quantified. Alloywise analysis for world foundry industry and top ten casting producers for 2020 AD was done. Clusterwise world foundry industry production and number of foundries has been done. User industry usage of castings and total material model for Indian foundry industry was quantified. Various tools and techniques used for supply chain management and outsourcing and insourcing has been highlighted. New innovative technologies are to be adopted by the foundries to stay competitive in casting world.

5 Acknowledgement

The author sincerely thanks North Eastern Regional Institute of Science and Technology (Deemed to be University), Itanagar, Arunachal Pradesh, India for the necessary help rendered in the present work. Author also gratefully acknowledge the encouragement and help provided by MSc. Mirjam Jan-Blazic, President Slovenian Foundrymen Society, Slovenia for accepting this paper for 62nd International Foundry Conference, Portoroz, Slovenia.

Viri / References

- [1] Muralidhar M, Status of Global Foundry Industry and Development of a Framework for a Holonic Casting Manufacturing System, doktorska disertacija, 2007, IIT, Kharagpur, Indija.
- [2] Popist svetovne livarske proizvodnje, 2020, Int. Jr. Modern Casting, december 2021.
- [3] Muralidhar M, and Datta GL, Productivity Analysis of Melting Section of an Automobile Grey Iron Foundry: A Case Study, predstavljeno in objavljeno na 51. mednarodni livarski konferenci, Portorož, Slovenija, 14.–16. 9. 2011.
- [4] Muralidhar M, World Casting Value Analysis and Casting Value Indices: A Study, predstavljeno in objavljeno na 56. mednarodni livarski konferenci, 14.–16. 9. 2016, Portorož, Slovenija.
- [5] R.Ozah, and M.Muralidhar, (2019), Razvoj konceptualnega okvira za industrijo 4.0 in njene podsisteme za ulitke batov za avtomobilsko industrijo, 59. mednarodna livarska konferenca in tehnični forum WFO, Slovenija. ISBN- 978-961-93723-9-5., sept. 2019, Portorož, Slovenija.
- [6] M. Muralidhar, (2019), A Forecast of Casting Casts Casters Castfuture«, Livarski vestnik, sept. 2019, Slovenija, str. 221 v ISSN- 0024-5135.
- [7] M.Muralidhar, World Casting Production: Past, Present and Future, 60. mednarodna livarska konferenca, Portorož, Slovenija, sept. 2020.
- [8] M.Muralidhar, Innovations in melting technology for foundries: A study, 61. mednarodna livarska konferenca, Portorož, Slovenija, str. 100, sept. 2021.
- [9] Pregled svetovne livarske proizvodnje v letu 2022, Livarski Vestnik, 69/2022, str. 60–61, jan. , 2022, Slovenija.
- [10] R. Ozah, M. Manapuram, Razvoj konceptualnega okvira za industrijo 4.0 in njene podsisteme za ulitke batov za avtomobilsko industrijo, Livarski Vestnik, 68/2021, št. 4, str. 229–240, oktober, 2021, Slovenija.

I. Jandrić¹, F. Kozina¹, T. Bričič¹, L. Mrkobrada²

¹Univerza v Zagrebu, Fakulteta za metalurgijo, Hrvatska / ²University of Zagreb Faculty of Metallurgy, Croatia

Spremembe strukture in lastnosti bakrene žice med proizvodnjo in predelavo

Changes in Structure and Properties of Copper Wire During the Production And Processing

Povzetek

Kot prevodnik električne energije je baker še vedno nenadomestljiv, zato je dandanes še vedno najpomembnejša barvna kovina v uporabi. Najpogostejše uporabljene metode za proizvodnjo bakrenih vodnikov vključujejo kontinuimo litje bakrene žice, naknadno deformacijo s hladnim vlečenjem in postopke toplotne obdelave za izboljšanje mehanskih in električnih lastnosti bakra. V tem prispevku je bila opravljena raziskava bakrene žice, proizvedene z kontinuirnim litjem. Med proizvodnjo pride do različnih strukturnih sprememb kot tudi sprememb mehanskih lastnosti. Da bi raziskali te spremembe in pojasnili njihov vpliv na končni izdelek, smo v vseh fazah proizvodnje beležili in merili strukturo in trdoto bakrene žice. Makrostrukturo in mikrostrukturo smo opazovali s svetlobnim mikroskopom, trdoto pa smo izmerili z Vickersovo metodo za merjenje trdote. Rezultati kažejo, da se začetna grobozrnata struktura v litem stanju med redukcijo razgradi v drobnozrnato strukturo. Ta drobna zrna so med plastično deformacijo usmerjena v smeri hladnega vleka. Trdota se poveča. Namen toplotne obdelave je zagotoviti boljšo prevodnost in hkrati ohraniti dobre mehanske lastnosti. Rezultati analize mikrostrukture kažejo na prisotnost dvojčkov kristalov v strukturi končnega izdelka.

Ključne besede: bakrena žica, hladno vlečenje, dvojlični kristali, struktura, trdota

Abstract

Irreplaceability of copper, as an electrical conductor, makes it the most important non-ferrous metal in application. The most frequently used methods of producing the copper conductors involves continuous casting of the copper wire, subsequent cold drawing deformation and heat treatment processes to improve copper mechanical and electrical properties. In this paper the research was performed on copper wire produced by continuous casting. During production various structural changes and changes in mechanical properties occur. To investigate those changes and to clarify their influence on final product, structure and hardness were recorded and measured in all stages of production. While macrostructure and microstructure were observed by light microscopy, the hardness was measured using Vickers hardness testing method. The results indicate that the initial coarse-grained structure in as-cast condition, breaks down into a fine-grained structure during reduction. Those fine grains are orientated in the direction of cold drawing during plastic deformation. There is an increase in the hardness. The purpose of heat treatment is to achieve better conductivity while maintaining good mechanical properties. The results of microstructure analysis indicate the presence of twin crystals in the structure of the final product.

Key words: copper wire, cold drawing, twin crystals, structure, hardness

1 Uvod

Poleg jekla in aluminija je baker najpogostejše uporabljena tehnična kovina. Kot kovina je čisti baker zelo mehak in se zato poredko uporablja za strojne dele. Zaradi dobre toplotne in električne prevodnosti (takoj za srebrom), zmernih stroškov materiala in enostavne plastične predelave kot tudi dobre odpornosti proti koroziji je baker še danes nenadomestljiv kot prevodnik električne energije v elektrotehniki in v toplotnih izmenjevalnikih manjših hladilnikov.

Ta prispevek se osredotoča na bakreno žico, njeno proizvodnjo in predelavo. Sama proizvodnja bakrene žice je zelo zapleten postopek, ki obsega različne proizvodne faze. Kakovost izdelane žice je odvisna od številnih parametrov. Za proizvodnjo bakrene žice se najpogostejše uporablja tehnologija hladnega vlečenja žice do želene dimenzije. Ulita žica, pridobljena z nekaterimi postopki kontinuirnega litja, se uporablja kot vložek za vlečenje žice.

Med obdelavo žice se mehanske lastnosti in struktura vlečene žice močno spremenijo. Med postopkom vlečenja je zelo pomembno razumeti vedenje materiala, ki je odvisno od več dejavnikov, kot so: začetne lastnosti materiala, hitrost vlečenja, uporaba maziv itd., kot tudi medsebojno delovanje vseh navedenih dejavnikov za doseganje najvišje kakovosti izdelka [1,2].

1.1 Proizvodnja bakrene žice

Na sam proizvodni postopek in končne lastnosti bakrene žice vpliva predvsem izbira surovine. Kot surovina za proizvodnjo bakrene žice se najpogostejše uporabljajo bakrene elektrode, izdelane z elektrolitsko rafinacijo bakra, proizvedenega s pirometalurškimi ali hidrometalurškimi postopki. Za nadaljnjo obdelavo je v

1 Introduction

In addition to steel and aluminum, the most frequently used technical metal is copper. As a metal, pure copper is very soft and as such is rarely used for machine parts. Due to its high thermal and electrical conductivity (right behind silver), moderate cost of materials and easy plastic processing as well as good corrosion resistance, today copper still remains irreplaceable in electrical engineering as a conductor of electricity and in heat exchangers of smaller refrigerators.

This work is focused on copper wire, its production and processing. The production of copper wire itself is a very complex process that includes various stages of production. The quality of the produced wire will ultimately depend on numerous parameters. The most used technology to produce copper wire is certainly the cold drawing of the wire to the desired dimension. Cast wire obtained by some of the direct casting processes is used as an insert for drawing wire.

During wire processing, significant changes occur in the mechanical properties and structure of the drawn wire. During the drawing process, it is very important to understand the behavior of the material, which depends on several factors such as: initial properties of the material, drawing speed, use of lubricants, etc., as well as the interactions of all the mentioned factors to achieve the highest product quality [1,2].

1.1. Production of Copper Wire

The production process itself, as well as the final properties of the copper wire, is primarily influenced by the choice of the raw material. The copper electrodes obtained by electrolytical refining of copper produced by

prvi vrsti pomembno, da imajo bakrene elektrode visoko čistost brez prisotnosti nečistoč v bakru ter preostale vlage ali elektrolitov iz postopka rafiniranja [3,4]. V okviru proizvodnje je treba z določenimi postopki izdelati začetno žico. Danes se najpogosteje uporabljajo postopki litja Contirod, Dip Forming in UPCAST.

V zadnjih nekaj desetletjih so se postopki proizvodnje bakrene žice močno izboljšali, največja prednost pa je, da se je z razvojem neprekinjenih postopkov zmanjšala poraba energije. Nekateri postopki predvidevajo toplotno obdelavo, npr. Contirod, Dip Forming idr., medtem ko se pri postopku, kot je UPCAST, toplotna obdelava preskoči, kar pomeni, da se žice vlečejo v hladnem stanju [5].

Za vse postopke je značilno, da kot vložek uporabljajo katodni baker, ki se stali v talilni peči določene vrste in nato neprekinjeno lije v bakreno žico. Postopek Contirod za proizvodnjo žice iz palic so razvili v podjetju Metallurgy Hoboken Overplet SA [6]. S pomočjo samodejnega dovajanja kovine in nadzora ravni taline se bakrena palica lije neprekinjeno, sledi valjanje na valjih, po čiščenju pa navijanje na kolute [5,6].

Postopek Dip Forming obsega taljenje bakrenih elektrod; nato skozi talino potuje bakrena žica manjšega premera (premer 9–12 mm), pri čemer se talina sprime na palico, izhodni premer žice pa je do 20 mm. Dobljeno žico vroče valjamo v nadzorovani atmosferi in nato navijamo na kolute [5,6]. Postopek Southwire je bil razvit v ZDA, kjer se tudi najpogosteje uporablja. Pri tem postopku se katodni baker stali v jaškasti peči, nato pa dovede v zadrževalno peč, od koder se kontinuirno ulije v žico. Sistem za litje je sestavljen iz navpično nameščenega jeklenega kolesa, ki ima na obodu utor. Na drugi strani je jekleni jermen, ki zapira režo in tvori votlino za oblikovanje žice [7,8].

the pyrometallurgical or hydrometallurgical processes are primarily used as raw material to produce copper wire. It is primarily important for further processing that copper electrodes have high purity, without the presence of impurity elements in the copper, as well as residual moisture or electrolytes from the refining process [3,4]. For production, it is necessary to obtain the initial wire through some of the procedures. Today, the most frequently used casting processes are Contirod, Dip Forming and UPCAST.

Over the past few decades, copper wire production processes have improved considerably, and the biggest advantage is that the development of continuous processes has reduced energy consumption. Some processes require heat treatment such as Contirod, Dip Forming and others, while in a process such as UPCAST, heat treatment is skipped, i.e. the wires are drawn in a cold state [5].

It is specific for all of them that they use cathode copper as an insert, which is then melted in some type of melting furnace, and subsequently continuously cast in Cu wire. The Contirod process for the production of wires from rods was developed at Metallurgie Hoboken Overplet SA [6]. With the help of automatic metal supply and control of the melt level, the copper rod is cast continuously, followed by rolling on rollers, and after cleaning the winding on reels [5,6].

The Dip Forming procedure implies melting of copper electrodes, then the smaller diameter copper wire (9 - 12 mm diameter) is passed through the melt, whereby the melt sticks to the rod and the output diameter of the wire is up to 20 mm. The obtained wire is hot-rolled in a controlled atmosphere and then wind on reels [5,6]. The Southwire procedure was developed in the USA, and there is the most widely used.



Slika 1. Postopek UPGAST

Figure 1. UPGAST process

Litje poteka, ko se kolo vrti, bakrena žica se ohladi z vodo, nato se kemično očisti in nanese se vosek, preden se žica navije na kolute. Takšna žica se nato obdelava s hladnim vlečenjem ali podobno tehnologijo. V Evropi na Finskem so v 60. letih prejšnjega stoletja izumili tako imenovani postopek UPGAST (slika 1).

Pri postopku UPGAST se tako kot pri vseh zgornjih postopkih uporablja katodni baker, ki se tali v indukcijski peči. Hkrati se na vrh taline položi grafitni prah, zaradi katerega se zmanjša vsebnost kisika v talini in prepreči absorpcija kisika iz atmosfere v talino. Kos bakra, pritrjen na palico, se v talino potopi skozi posebne matrice za vlečenje žice. Kristalizacija bakra se začne na vstavljenem kosu, ki se s palico izvleče skozi vodno hlajeno matrico. V tem primeru se vlečenje izvaja navpično navzgor glede na talino. Ko je bakrena žica oblikovana, se z električnimi motorji uvede v sistem, ki samodejno potegne žico čez škripce oz. škripčevje in jo pripelje do navijala (slika 2).

Medtem se žica ohlaja na zraku, dokler ne prispe do navijala, kjer se navije na kolute. Glede na vrsto sistema je mogoče hkrati uliti več žic. Po ohlaiditvi se žica z nadaljnjimi postopki plastičnega oblikovanja obdelava do



Slika 2. Vlečenje žice proti navijalu

Figure 2. Pulling the wire towards the winder

In this process the cathode copper is melted in a shaft furnace and then brought to a holding furnace, from where continuously casted into the wire. The casting system consists of a vertically placed steel wheel that has a groove on the periphery. On the other side is a steel belt, which closes the slot and forms a cavity for forming the wire [7,8]. While the wheel is spinning, casting is done, and the copper wire is cooled with water, after which it is chemically cleaned and wax is applied before winding onto the reels. Such wire is subsequently processed by cold drawing or similar technology. In Finland, Europe, in the 60s, the so-called UPGAST procedure was invented, fig. 1.

The UPGAST process, like all the above, uses cathode copper that is melted in an induction furnace. At the same time, graphite powder is placed on the top of the melt in order to reduce the oxygen in the melt and prevent absorption of oxygen from atmosphere into the melt. Piece of copper mounted on rode is immersed in the melt through special dies. The crystallization of copper starts on the inserted piece, and it is withdrawn with the rode through the die cooled by water. In this case, pulling is

želenih dimenzij. Najpogosteje uporabljena metoda je hladno vlečenje [7, 10].

1.2 Vpliv plastične obdelave na strukturo in lastnosti bakra

G. E. Dieter je ugotovil, da spremembe, do katerih pride v kovinah med postopkom hladne deformacije med vlečenjem, vplivajo na mehanske in električne lastnosti materiala. Spremembe strukture kovine med postopkom hladnega vlečenja so posledica utrjevanja materiala [11]. Raziskave deformacije bakrene žice so pokazale, da deformirana struktura vsebuje večjo gostoto dislokacij in majhnih skupkov praznin, ki nastanejo pri deformaciji, medtem ko so rezultati nateznih preskusov pokazali, da se po deformaciji povečata meja plastičnosti in natezna trdnost [12–14].

Študije v zadnjih nekaj letih so pokazale, da vodi majhno velikost kristalov na submikrometrski in nanometrski skali na mestih, kjer so kristalne meje gostejše, k bistveni utrditvi. Te kristalne meje ustvarjajo ovire za gibanje dislokacij. Vendar se zaradi večje gostote kristalnih mej v kovinah prevodnost [15] zmanjša. Znatno zmanjšana električna prevodnost kovin, čeprav z izboljšano mehansko trdnostjo, preprečuje njihovo tehnološko uporabo za prevodnike.

Raziskave bakra s koherentnimi kristalnimi mejami nakazujejo, da je gibanje dislokacij ovirano tudi v prisotnosti dvojčičnih kristalov. Po drugi strani pa takšna utrditev z dvojčičenjem ne povzroči zmanjšanja prevodnosti bakra [15,16].

Raziskave različnih postopkov obnavljanja in procesov rekristalizacije pojasnjujejo njihov vpliv na razvoj mikrostrukture in teksture. V primeru bakra se je izkazalo, da imajo ne glede na količino redukcije vsa zrna vseh orientacij enako

carried out vertically upwards in relation to the melt. When the copper wire is formed, it is introduced into the system with electric motors, which automatically pulls the wire over the pulleys, and is brought to the winder, fig. 2.

In doing so, the wire is cooled in the air until it reaches the winder, where it is wound up onto a reel. Depending on the type of system, it is possible to simultaneously cast several wires at the same time. After cooling, the wire is processed by some of the subsequent plastic forming procedures to the desired dimensions. Cold drawing is the most commonly used [7,10].

1.2. Influence of plastic processing on the structure and properties of copper

G. E. Dieter established that the modifications that occur in metals during the cold deformation process during drawing affect the mechanical and electrical properties of the material. Changes in the metal structure, during cold drawing process, are caused by the material hardening [11]. Research on the deformation of Cu-wires showed that the deformed structure contains a higher density of dislocations as well as small clusters of vacancies that are created by deformation, while the results of tensile tests showed that after deformation there was an increase in the yield strength and tensile strength [12-14].

In the last few years, studies have shown that where grain boundaries are denser, grain smoothness on submicrometer and nanometer sizes leads to significant strengthening. Those grain boundaries create barriers to dislocation movement. However, the presence of denser grain boundaries in metals results in a decrease in conductivity [15]. Significantly reduced

sposobnost rasti zrn, struktura pa postane izotropna, ker se mehanizem dvojčičenja pojavi ob nastanku novih orientacij zrn [17,18].

Da bi razumeli vedenje rekristalizacije med toplotno obdelavo, so bile izvedene študije za določitev teksture in razvoja mikrostrukture v čistem bakru. Ugotovljeno je bilo, da je razvoj mikrostrukture med procesom rekristalizacije ključnega pomena za končne lastnosti, kot so odpornost na utrujanje, korozijska odpornost in mehanske lastnosti [19].

Na tej podlagi lahko trdimo, da je treba za zagotovitev vodnika z zadovoljivimi lastnostmi upoštevati več dejavnikov. Po eni strani je Cu kot prevodnik najbolj optimalen, vendar se med obdelavo s hladnim vlečenjem pojavijo določene strukturne spremembe, ki zmanjšajo njegovo prevodnost. Pričakovati je, da bo prišlo v primeru bakra do udrobnjevanja in povečanja gostote dislokacij, kar vodi do zmanjšanja prevodnosti.

Namen te raziskave je opredeliti strukturne spremembe, ki se pojavijo med proizvodnjo bakrene žice za vodnike s postopkom hladnega vlečenja.

2 Eksperiment

Vzorci bakrene žice so bili odvzeti v različnih fazah proizvodnje. Žica se proizvaja z neprekinjenim litjem po postopku UPGAST, slika 1. Postopek taljenja je bil predhodno opisan v proizvodnem postopku UPGAST. V konkretnem primeru proizvodnje bakrene žice se hkrati ulije 12 žic s premerom 8 mm. Po strjevanju v kristalizatorju se vsaka žica s pomočjo sistema škrpcev prenese na navijalni kolut, kjer se žica ohladi na zraku (slika 3).

Da bi določili začetno stanje, smo iz žice v litem stanju po ohladitvi odvzeli več

electrical conductivity of metals, although with improved mechanical strength, prevents their technological applications for conductors.

Research on copper with coherent grain boundaries shows that dislocation movements are also hindered in the presence of twinned grains. But on the other hand, such strengthening by twinning does not lead to a decrease in copper conductivity [15,16].

Investigations of different recovery procedures and recrystallization processes clarify their influence on microstructure and texture development. In the case of copper, it was shown that regardless of the amount of reduction, all grains of all orientations have the same ability for grain growth, and structure becomes isotropic because the mechanism of twinning occurs with the formation of new grain orientations [17,18].

In the aim of understanding the recrystallization behavior during heat treatment, studies were carried out to determine the texture and microstructure development in pure copper. It was concluded that the microstructural evolution during the recrystallization process is crucial for the final properties such as fatigue resistance, corrosion resistance and mechanical properties [19].

From all this, one can say that in order to achieve a conductor with satisfactory properties, it is necessary to take several factors into account. On one hand, Cu as a conductor is the most optimal, but during processing by cold drawing, certain structural changes occur that reduce its conductivity. It is to be expected that in the case of copper, there will be grain refinement and an increase in dislocations density, which leads to decrease in conductivity.

The aim of this research is to determine the structural changes that occur during the



Slika 3. Bakrena žica na kolutu

Figure 3. Copper wire in a coil

vzorcev. Po ohlادitvi se žica odvijne in poda v stroj za hladno vlečenje. Glede na željeni premer končne žice ima stroj več zaporedno postavljenih matric, slika 4.

V postopku vlečenja žice se za zmanjšanje obremenitve matric pri vlečenju uporablja stroj s predobremenitvijo. Pred vsako fazo vlečenja se žica pred vlečenjem posebej namaže. Po zadnjem prehodu

production of copper wire for conductors by the cold drawing process.

2 Experimental

Copper wire samples were taken at different stages of production. The wire is produced by continuous casting using the UPCAST process, fig. 1. The melting process was previously described in the UPCAST production process. In the observed example of copper wire production, 12 wires with a diameter of 8 mm are cast simultaneously. After solidification in the crystallizer, each individual wire is transferred via a pulley system to a reel winder, where the wire is cooled in air, fig. 3.

In order to determine the initial state, samples were taken several times from the as cast wire after cooling. After cooling, the wire is unwound and fed into a cold drawing machine. Depending on the target diameter of the final wire, the machine has multiple dies placed in line, fig. 4.

In the wire drawing process, a machine with preload is used to reduce the load on dies when pulling the wire. Before each drawing stage, the wire is specially



Slika 4. Stroji za neprekinjeno vlečenje žice

Figure 4. Machines for continuous wire drawing

se žica navije na zadnji kolut. Vzorci za preskušanje so bili odvzeti na vseh stopnjah redukcije, tj. po 24, 46 in 67,5-odstotni redukciji.

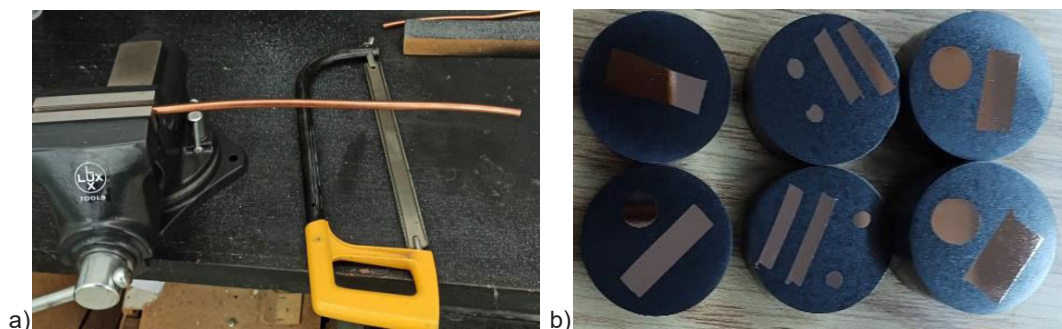
Med postopkom vlečenja se žica močno strdi in ni primerna za proizvodnjo električnih vodnikov. Zato se v proizvodnem procesu žari, da se zmehča. Žarjenje žice v neprekinjenem proizvodnem procesu poteka tako, da žica poteka skozi komoro, v kateri so kolesa, priključena na visoko napetost. Žica s prehodom prek teh koles sklene tokokrog, pri čemer se zaradi toka, ki teče skozi njo, žica segreje na približno 600 °C, nato pa se naglo ohladi z vodno paro, posuši s stisnjenim zrakom in vzame iz komore. Da bi ugotovili strukturne spremembe, do katerih pride v tej fazi proizvodnje, je bilo opravljeno vzorčenje žice po 67,5-odstotnem zmanjšanju in normalizaciji. Na vseh stopnjah so bili odvzeti vzorci žice za strukturne preskuse in merjenje trdote po Vickersovi metodi (slika 5).

Vzorci za preskušanje strukture so bili vstavljeni v prevodno maso (slika 5b) s postopkom vročega stiskanja pri visoki temperaturi in tlaku z napravo za vdelavo BuehlerSimplimet1000. Brušenje in loščenje je 2 minuti potekalo na Buehlerjevem stroju

lubricated before drawing. After the last pass, the wire is wound on the final reel. Samples for testing at all stages of reduction were taken, i.e. after reductions of 24%, 46 % and 67.5 %.

During drawing process, the wire hardens significantly, and is not applicable for the production of electrical conductors. Therefore, in the production process, it is subjected to annealing in order to soften it. Annealing of the wire is carried out in a continuous production process, in such a way that the wire is passed through a chamber in which there are wheels connected to a high voltage. By passing over them, the wire closes the circuit, whereby due to the current passing through it, the wire itself is heated to approx. 600 °C, after which it is suddenly cooled by water vapor, dried with compressed air and taken out of the chamber. In order to establish the structural changes that occur during this stage of production, wire sampling was carried out after 67.5% reduction and normalization. From all stages, wire samples were taken for structural tests and hardness measurement using the Vickers method, fig. 5.

Samples for structural tests were embedded in the conductive mass, fig. 5b),



Slika 5. Vzorčenje za preskušanje strukture in trdote; a) Vzorčenje žice / b) Vzorci v prevodni masi

Figure 5. Sampling for structural tests and hardness testing; Wire sampling / Samples in conductive mass

»Phoenix Beta« z brusnim papirjem različnih granulacij (120x, 400x, 800x, 1200x) ob stalnem hlajenju z vodo in obremenitvi 10 N. Po brušenju je sledilo loščenje ob stalni prisotnosti vodne suspenzije aluminijevega oksida Al_2O_3 . Jedkanje vzorcev je potekalo tako, da smo površino vzorca potopili v raztopino BERAHA. Strukturo smo posneli z metalografskim mikroskopom Olympus GX 51. Po evidentiranju strukture smo na istih vzorcih izmerili vrednosti trdote po Vickersovi metodi na stroju za merjenje trdote Mitutoyo. Preskusni pogoji so bili obremenitev vtisa 1 kg, čas vtiskovanja 25 s, slika 6.

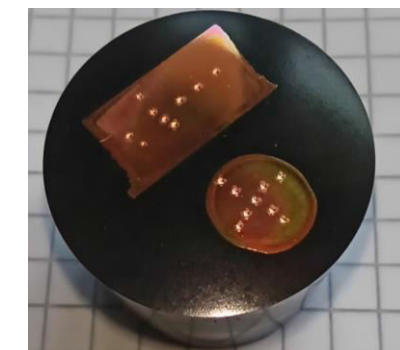
3 Rezultati in razprava

V proizvodnem postopku se kakovost žice redno nadzoruje, po proizvodnji pa je bila z litjem pridobljena žica premera 8 mm z naslednjimi lastnostmi: gostota 8,9 kg/dm³, natezna trdnost (R_m): 170 N/mm² in raztezek pri pretrgu po ASTM E 8M: 45 %.

by means of a hot-pressing process under high temperature and pressure using the Buehler Simplimet1000 embedding device. Grinding and polishing was carried out on the Buehler »Phoenix Beta« with different grits of sandpaper (120x, 400x, 800x, 1200x) with constant water cooling and 10 N load, for 2 minutes. After grinding, polishing was performed with the constant presence of an aqueous suspension of Al_2O_3 alumina. Etching of the samples was carried out by immersing the surface of the sample in the BERAHA solution. The structure was recorded with a metallographic microscope Olympus GX 51. After recording the structure, hardness values were measured on the same samples using the Vickers method on a Mitutoyo Hardness Testing Machine. Test conditions were indentation load 1 kg, indentation time 25 sec, fig. 6.

3 Results and Discussion

In the production process, the quality of the wire is regularly controlled, and after the production process, by casting a wire with a diameter of 8 mm was obtained with the following characteristics, density 8.9 kg/



Slika 6. Merjenje trdote bakrene žice

Figure 6. Measuring the hardness of copper wire

Vzorci z odtisi preskusa trdote /
Samples with hardness test impressions

Stroj za preskušanje trdote Mitutoyo /
Mitutoyo Hardness Testing Machine

3.1 Rezultati analize mikrostrukture

Najprej smo analizirali mikrostrukturo na vzorcih žice v stanju, v kakršnem je bila ulita. Analiza mikrostrukture je bila izvedena v smeri litja in pravokotno na smer litja, slika 7.

Makrostruktura kaže, da ima žica v litem stanju grobozrnato strukturo, ki je značilna za litje v trajno formo. Za podrobnejše opazovanje smo posneli mikrostrukturo prečnega prereza žice v litem stanju, slika 8.

Iz posnetih struktur žic je razvidno, da je na zunanjem robu tanka cona zamrznjenih kristalov, slika 8 a). To je posledica hitrega ohlajanja ob stiku z matrico med

dm3, tensile strength (R_m): 170 N/mm² and elongation at break according to ASTM E 8M 45%.

3.1. The results of microstructure analysis

Initially, the microstructure was analyzed on the wire samples in the as-cast condition. The microstructure analysis was performed in the casting direction and perpendicular to the casting direction, fig. 7.

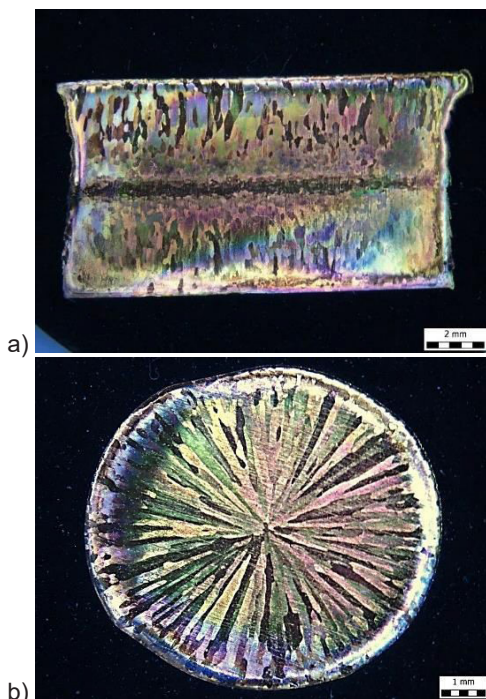
The macrostructure shows that in the as-cast state the wire has a coarse-grained structure typical for the permanent mold casting. In order to observe in more detail, the microstructure of the wires cross-section in the as cast state was recorded, fig. 8.

From recorded structures on wires, it can be seen that there is a thin zone of frozen crystals in the outer edge, fig. 8 a). This is the result of rapid cooling in contact with the die during solidification. From that peripheral part towards the middle of the wire, large columnar crystals are clearly visible, which is typical for this type of solidification. Small equiaxed crystals can be observed in the center of wire, fig. 8 b), which are found in very small numbers.

At individual reductions of 24 %, 46 % and 67.5 %, macrostructures were recorded, shown respectively on fig. 9.

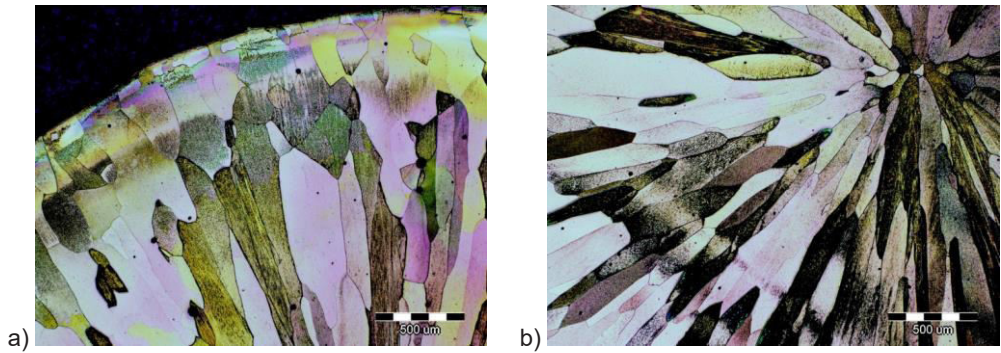
Recorded macrostructures show that by increasing the reduction degree of wires cross-section, coarse grains obtained by solidification during casting are gradually reduced. In order to more clearly determine what changes occurring in the structure, microstructure was recorded at the same degrees of reduction, fig. 10. The microstructures were recorded on samples taken perpendicular to the drawing direction.

From the recorded microstructures it can be observed that the initial columnar



Slika 7. Makrostruktura lite žice; a) v smeri litja, b) pravokotno na smer litja

Figure 7. Cast wire macrostructure; a) in the casting direction; a) perpendicular to the casting direction



Slika 8. Prečni prerez mikrostrukture žice; a) površinski rob lite žice, b) sredina lite žice

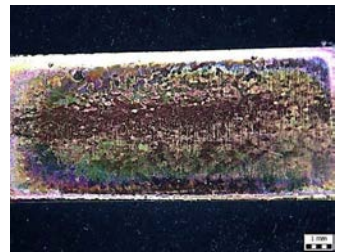
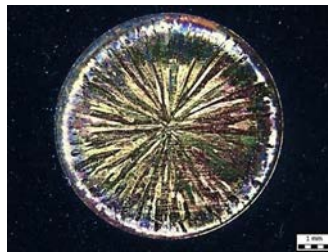
Figure 8. Wire microstructure in cross-section a) surface edge of cast wire, b) the middle of the cast wire

Zmanjšanje s hladnim
vlečenjem / Reduction
by cold drawing

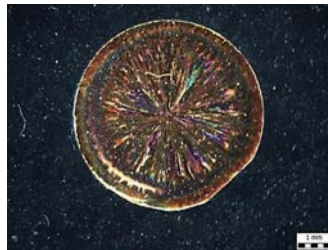
Pravokotno na smer vlečenja /
Perpendicular to the drawing direction

V smeri vlečenja /
In the drawing direction

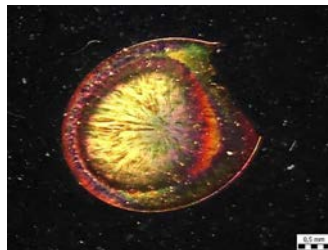
24 %



46 %

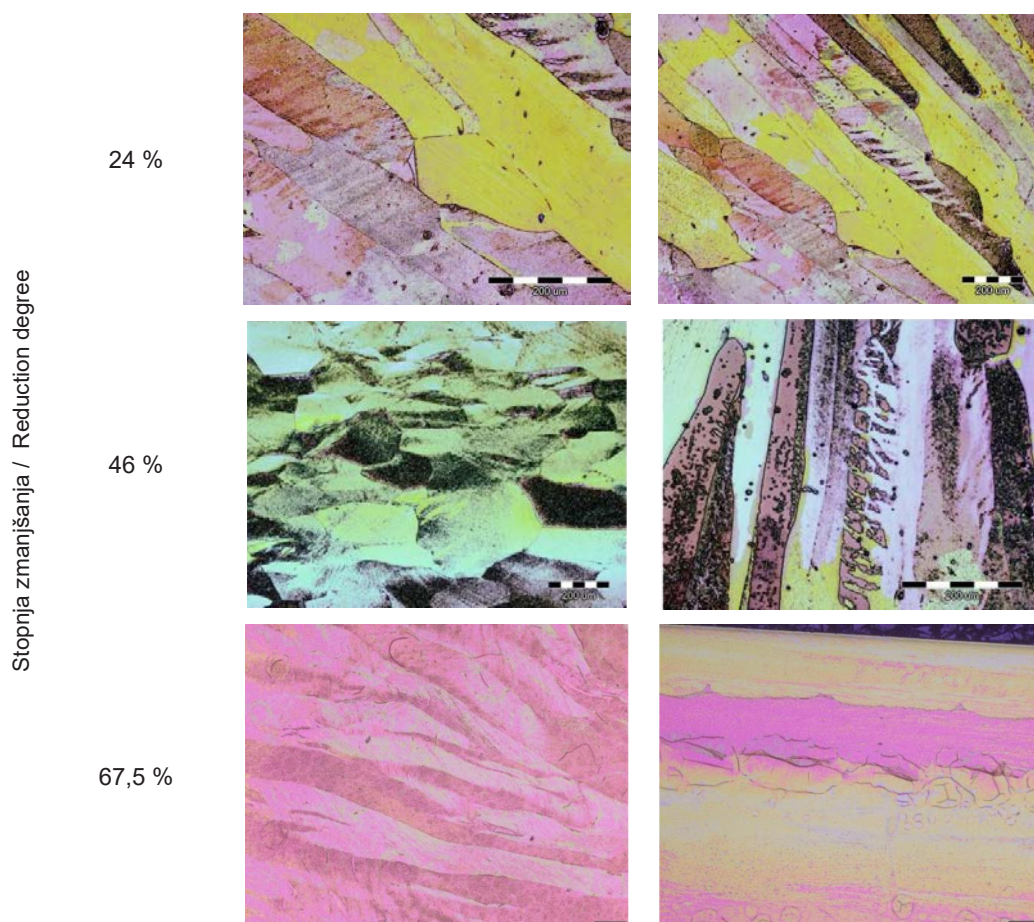


67,5 %



Slika 9. Makrostruktura bakrene žice pri izbranih redukcijah

Figure 9. Macrostructure of the cooper wire at the selected reductions



Slika 10. Mikrostruktura bakrene žice pri izbranih redukcijah

Figure 10. Microstructure of the cooper wire at the selected reductions

strjevanjem. Od tega obrobnege dela proti sredini žice so jasno vidni veliki stebričasti kristali, kar je značilno za to vrsto strjevanja. V sredini žice je mogoče opaziti majhno število majhnih enakoosnih kristalov, slika 8 b).

Pri posameznih zmanjšanjih za 24 %, 46 % in 67,5 % so bile zabeležene makrostrukture, prikazane na sliki 9.

Zabeležene makrostrukture kažejo, da se s povečevanjem stopnje redukcije preseka žic postopoma zmanjšuje število

crystals in the cast structure brake as the result of cross section reduction. It is observed that their breakage at low reductions occurs only in the marginal surface zones. This shows how in the initial passes the deformation takes place in the edge parts of the wire closer to the contact with the drawing die. As the degree of cross-section reduction increases, the wire is gradually deformed throughout the whole cross-section.

grobih kristalov, ki nastanejo pri strjevanju med litjem. Da bi natančneje ugotovili, kakšne spremembe se pojavljajo v strukturi, smo mikrostrukturo posneli pri enakih stopnjah redukcije (slika 10). Evidentirane so bile mikrostrukture vzorcev, odvzetih pravokotno na smer vlečenja.

Iz posnetih mikrostruktur je razvidno, da se začetni kristali stebričaste oblike v strukturi ulitka prelomijo zaradi zmanjšanja prečnega prereza. Opaziti je, da se pri majhnih redukcijah prelomijo samo na robnih površinskih območjih. To nakazuje, da se pri začetnih prehodih deformacija zgodi na robnih delih žice, ki so bližje stiku z matrico za vlečenje. Z večjo stopnjo zmanjšanja preseka se žica postopoma deformira po celotnem preseku.

Posnete makro- in mikrostrukture kažejo, da se med visokimi stopnjami redukcije zrna močno usmerijo v smeri vlečenja žice. To je še posebej vidno na posnetkih makrostrukture, slika 9. Poleg tega je razvidno, da zrna s povečevanjem stopnje zmanjšanja močno fragmentirajo, prav tako pa se kopiči veliko število dislokacij. Zaradi navedenih postopkov se žica utrdi in ni primerna za nadaljnjo obdelavo. Pri proizvodnji žice se po močni deformaciji izvede žarjenje na že opisani način. Sliki 11 in 12 prikazujeta makro- in mikrostrukture po žarjenju.

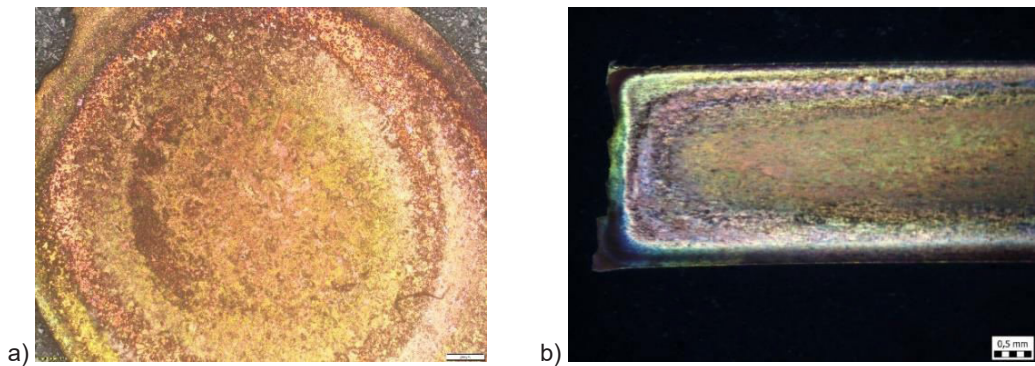
Iz po žarjenju posnetih struktur je razvidno, da so deformirana zrna rekristalizirala. Pri tem se zrna reorganizirajo in struktura postane enotna po celotnem preseku žice. Rekristalizirana zrna so v primerjavi z začetnimi zrni v litem stanju bistveno manjša, struktura pa je po celotnem prerezu bolj homogena. Zaradi rekristalizacije so bile odpravljene tudi dislokacije, saj jih v žarjenem stanju v prerezu ni opaziti. V rekristalizirani mikrostrukturi lahko opazimo dvojčke kristalov. To jasno kaže, da rekristalizacija

Recorded macro and micro structures indicate that during high reductions there is a strong orientation of grains in the drawing direction of wire. This is particularly visible in the images of the macrostructure, fig. 9. Furthermore, it can be seen that there is a strong fragmentation of the grains with increasing reduction, and the accumulation of a large number of dislocations. As a result of the mentioned processes, the wire is strengthened, and it is not suitable for further processing. In wire production, after grate degree of deformation, the annealing is carried out in the manner described earlier. Figs. 11 and 12, show the macro and micro structures after the annealing.

From the recorded structures after annealing, it can be seen that the deformed grains recrystallized. In doing so, the grains are reorganized and there is an equalization of the structure over the entire cross section of the wire. The recrystallized grains are significantly smaller compared to the initial ones in the as-cast state, and the structure is more homogeneous throughout the cross-section. Also, as a result of recrystallization the dislocations were canceled, as they are not observed in the annealed state in the cross-section. In the recrystallized microstructure twin crystals can be observed. So this is clear indication that the recrystallization in copper takes place through the formation of twin crystals, fig. 12 b).

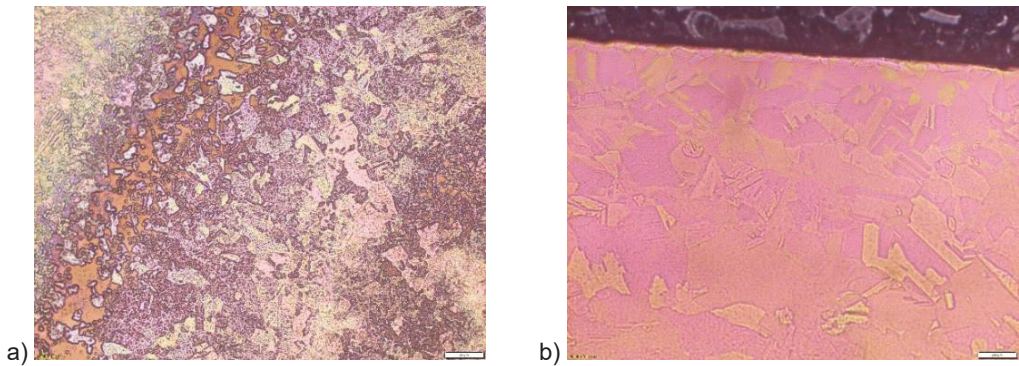
3.2 The results of the hardness test

Hardness testing was performed on as cast wire, at each reduction (24 %, 46 %, 67.5 %), and after subsequent annealing. Mean values were calculated from the measured values, which were used to construct the diagram, fig. 13.



Slika 11. Makrostruktura žice po 67,5-odstotni redukciji in žarjenju; a) pravokotno na smer vlečenja, b) vzporedno s smerjo vlečenja

Figure 11. Macrostructure of the wire after 67.5 % of reduction and annealing; a) perpendicular to the drawing direction, b) In drawing direction



Slika 12. Mikrostruktura žarjene bakrene žice; a) 200-kratna povečana, b) 500-kratna povečana

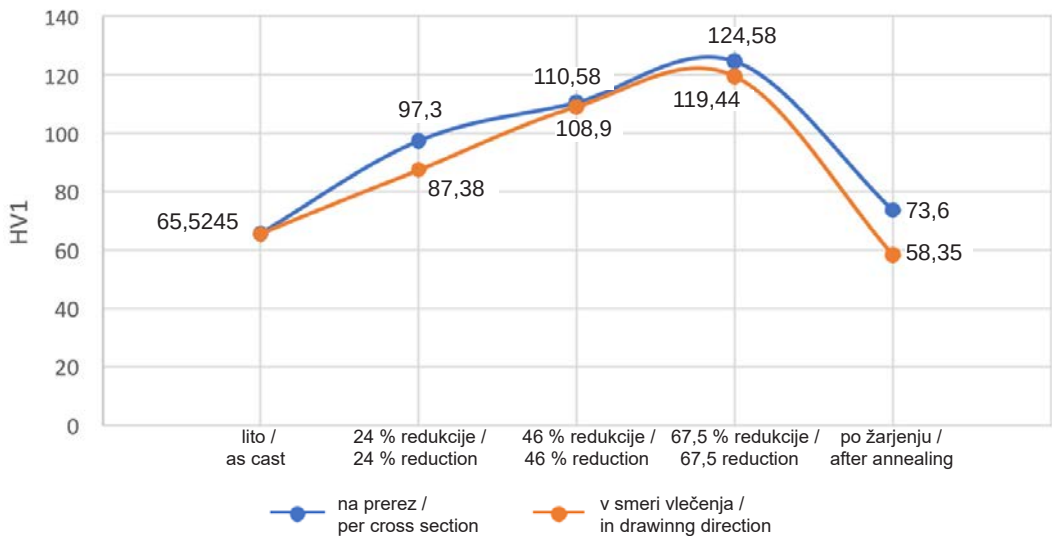
Figure 12. Microstructure of the annealed copper wire; a) enlargement 200x, b) enlargement 500x

v bakru poteka z nastajanjem dvojčičnih kristalov, slika 12 b).

3.2 Rezultati preskusa trdote

Preskus trdote je bil opravljen na žici v litem stanju, pri vsakem zmanjšanju (24 %, 46 %, 67,5 %) in po naknadnem žarjenju. Iz izmerjenih vrednosti smo izračunali povprečne vrednosti, ki smo jih uporabili za pripravo diagrama, slika 13.

From obtained diagram it is clearly visible that by increasing the reduction degree leads to an increase in the measured hardness values. This is attributed to the cold strain hardening effected during wire drawing. The annealing drops the hardness values to the beginning values in as cast state. This is a clear indication that the process of recrystallization and recovery was carried out during annealing. Since in this state the wire has the same mechanical properties as in the as-cast state, in order



Slika 13. Izmerjene spremembe trdote med vlečenjem in žarjenjem

Figure 13. Measured changes in hardness during drawing and annealing

Iz pripravljenega diagrama je jasno razvidno, da se s povečanjem stopnje redukcije povečajo izmerjene vrednosti trdote. To je posledica utrjevanja med hladnim preoblikovanjem med vlečenjem žice. Pri žarjenju se vrednosti trdote znižajo na začetne vrednosti v litem stanju. To je jasen znak, da je med žarjenjem potekal proces rekristalizacije in obnavljanja. Ker ima žica v tem stanju enake mehanske lastnosti kot v litem stanju, se za povečanje trdnosti in po nekaterih raziskavah tudi prevodnosti žica po žarjenju premika skozi drugačno vrsto matric. Predstavljene raziskave niso pokrivala tega dela proizvodnje.

4 Sklepi

Potrditi je mogoče naslednje sklepe:

- med proizvodnjo bakrene žice po postopku UPCAST se zaradi hitrega strjevanja v matrici v prečnem prerezu bakrene žice oblikuje neenakomerna

to increase its strength and, according to some research conductivity, after annealing the wire is passed through another set of dies. The presented researches did not cover that part of production.

4 Conclusions

The following conclusions can be drawn:

- During the production of copper wire by the UPCAST process, as a result of rapid solidification in the die, a non-uniform structure is formed in cross-section of the copper wire, which was confirmed by structural analysis. In the outer peripheral parts of the wire, the frozen fine-grained crystals form. Further during solidification, the large columnar crystals are formed directed towards the center of the cast wire, and finally in the middle we have a small amount of equiaxed crystals.
- At low levels of reduction, large

struktura, kar potrjuje tudi strukturna analiza. V zunanjih mejnih delih žice nastanejo zamrznjeni drobnozrnati kristali. Nadalje se med strjevanjem oblikujejo veliki stebričasti kristali, usmerjeni proti sredini ulite žice, na sredini pa je majhna količina enakoosnih kristalov,

- pri nizkih stopnjah redukcije se veliki stebričasti kristali postopoma lomijo. To je bolj izrazito na obrobem delu žice neposredno ob površini, ki je v stiku z matrico za vlečenje,
- v deformiranem stanju je iz strukture razvidno, da se deformirani kristali prerazporedijo v smeri vlečenja žice,
- s povečevanjem stopnje deformacije se enakoosni kristali postopoma lomijo po celotnem preseku žice. Z večanjem stopnje deformacije se v strukturi povečuje gostota dislokacij,
- izmerjene vrednosti trdote kažejo, da se trdota žice z večanjem redukcije znatno povečuje, pri 67,5 % pa je skoraj dvakrat večja kot v začetnem litem stanju,
- po žarjenju opazovana struktura kaže, da je rekristalizacija potekla v celoti, kar potrjujejo tudi izmerjene vrednosti trdote,
- rekristalizirana zrna so bistveno manjša v primerjavi s strukturo ulitka in opaziti je, da med rekristalizacijo nastajajo dvojlični kristali kristalov.

5 Zahvala

Raziskave so bile opravljene v okviru raziskovalnega projekta IP-124 Univerze v Zagrebu, Metalurške fakultete, Center za livarsko tehnologijo–SIMET, KK.01.1.1.02.0020, in VIRTULAB–Integrirani laboratorij za primarne in sekundarne surovine, KK.01.1.1.02.0022.

columnar crystals gradually break. This is more pronounced in the peripheral part of the wire immediately next to the surface that is in contact with the drawing die.

- In deformed state, from structure it can be seen that deformed crystals rearrange in direction of drawing wire.
- With an increase in the degree of deformation, the entire equiaxed grains gradually break across all cross-section of wire. With an increase in deformation degree, there is an increase in dislocations density in the structure.
- The measured hardness values show that the hardness of the wire increases significantly with the increase in reduction, and at 67.5% it is almost twice as high as in the initial cast state.
- After annealing observed structure indicate that the recrystallization was carried out completely, which is also confirmed by the measured hardness values.
- The recrystallized grains are significantly smaller compared to the cast structure, and it is observed that during recrystallization twin crystals are formed.

5 Acknowledgments:

Investigations were performed within research project IP-124 University of Zagreb Faculty of Metallurgy, Centre for Foundry Technology–SIMET, KK.01.1.1.02.0020 and VIRTULAB–Integrated laboratory for primary and secondary raw materials, KK.01.1.1.02.0022.

6 Viri / Literature

- [1] R. F. Mehl, M. B. Bever, Metallurgy and metallurgical engineering series, McGraw-Hill, New York, 1961.
- [2] N. R. Wright Wright, Wire Technology: Process Engineering and Metallurgy, 2 izdanje, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2016.
- [3] <https://www.electricalworksflorida.com/basic-steps-involved-in-the-manufacturing-of-copper-wires/> [nazadnje dostopano 8. 6. 2020.]
- [4] <https://upcast.com/upcast-continuous-casting-technology/> [posljednji pristup, 10. lipanj 2020.]
- [5] Zbornik radova, Naučno-stručni skup Ekoist, Univerzitet u Beogradu – Tehnički fakultet u Boru, 2009
- [6] <https://energy-utilities.com/contirod-continuous-casting-plant-prod1240803.html> [nazadnje dostopano 14. 6. 2020.]
- [7] V. Stoiljkovic, M. Arsenovic, L. Stoiljkovic, N. Stojanovic, Determination of the Optimal Parameters of Castin a Copper Wire by the Application of Neural Networks. In: Kuljanic E. (eds) Advanced Manufacturing Systems and Technology, International Centre for Mechanical Sciences (Courses and Lectures), vol 372. Springer, Dunaj, 1996.
- [8] Savez ljevača Hrvatske: Ljevački priručnik, Zagreb, 1985
- [9] G. E. Dieter. Mechanical Metallurgy. 3rd ed., Mc Graw-Hill Book Co., New York 1986.
- [10] S. Rešković, Teorija oblikovanja deformiranjem, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2014.
- [11] A. Akbari, G. H. Hasani, M. Jamshidi Jami, An experimental investigation on the effect of annealing treatment on strain inhomogeneity in the cross-section of drawn copper wires, Department of Material Science and Engineering, Department of Metallurgical and Material Engineering, Iran, Roznov pod Radhostem, Czech Republic, EU, 2010.
- [12] M. Zidani, M. D. Hadid, S. Messaoudi, F. Dendouga, L. Bessais, F. Baira, M. Bayarassou, A. L. Helbert, M. H. Mathon, T. Baudin, The drawing process of the wires of copper and aluminum: Evolution of the microstructure and (mechanical/electrical) properties, Brno, Czech Republic, EU, 2014.
- [13] S. Messaoudi, M. Zidani, T. Baudin, C. E. Derfouf, A. Boulagroun, M. H. Mathon, Temperature and deformation effects on the recrystallization microstructure of wire drawn copper, Department of Metallurgy, University of Biskra - Laboratory of Physico-chemistry of Solid State - University Paris - South, Léon Brillouin Laboratory – France, Brno, Czech Republic, EU, 2011.
- [14] M. Čaušević, Teorija plastične prerade metala, Svjetlost, 1979, Sarajevo, 329-366
- [15] M. Nožić Proizvodne tehnologije, Univerzitet “Džemal Bijedić”, Mašinski fakultet, 2007.
- [16] Theory of wiredrawing, <https://antaac.org.mx/assets/10.-theory-ofwiredrawing.pdf>
- [17] Understanding Copper & Copper Alloy Heat Treatment, Industrial Heating <https://www.industrialheating.com>
- [18] L.H. Qian, Q.H. Lu, W.J. Kong, K. Lu, Electrical resistivity of fully-relaxed grain boundaries in nanocrystalline Cu, Scripta Materialia 50(2004)11, 1407-1411, DOI: 10.1016/j.scriptamat.2004.02.026.
- [19] X. H. Chen, L. Lu, K. Lu, Electrical resistivity of ultrafine-grained copper with nanoscale growth twins, Journal of Applied Physics, 102(2007), DOI: 10.1063/1.2799087.

Časovno učinkovita analiza tehnične čistosti z mikroskopom

Time Efficient Technical Cleanliness Analysis with a Microscope

Povzetek

Analiza tehnične čistosti postaja vse pomembnejša v industrijski proizvodnji. Tako sami proizvajalci komponent, kot tudi kupci komponent zahtevajo podrobne analize preostalih nečistosti na površini proizvodov. Osnovna standarda, ki se pojavljata pri analizah komponent sta VDA 19.1 in ISO 16232. Za področje medicinske opreme in olja pa so na voljo še drugi standardi.

Osnovne analize lahko opravljamo s svetlobnimi mikroskopi. Le ti omogočajo klasifikacijo po velikosti in obliki, ter razločevanje med reflektirajočimi in nereflktirajočimi nečistočami. Za podrobno analizo kemijske sestave nečistoč pa potrebujemo elektronski mikroskop.

ZEISS nudi rešitve tako na področju svetlobne, kakor tudi elektronske mikroskopije. Prav tako imamo tudi rešitve na področju korelativne mikroskopije, ki povezuje svetlobne z elektronskimi mikroskopi.

Ključne besede: analiza tehnične čistosti, svetlobna mikroskopija, elektronska mikroskopija, vgrajena polarizacija, standardi VDA 19.1 in ISO 16232.

Summary

Technical Cleanliness Analysis is becoming more and more important in the industrial production. The producers of the components as well as the buyers of components are demanding detailed analysis of impurities on the surface of products. The basic standards for technical cleanliness analysis are VDA 19.1 and ISO 16232. For the area of medical equipment and oil analysis other standards are available.

The basic analysis can be performed with a light microscope. This enables the classification by size and shape, and differentiation between reflecting and non-reflecting particles. For a more detailed analysis of the chemical composition of the impurities we need an electron microscope.

ZEISS offers solutions in both light and electron microscopy. We also offer solutions in the field of correlative microscopy, which links the light microscopes with the electron microscopes.

Key words: technical cleanliness analysis, light microscopy, raster electron microscopy, built in polarisation, standards VDA 19.1 and ISO 16232.

1 Osnovna metodologija

Najprej nekaj besed o uporabi svetlobnih mikroskopov. Standard predpisuje, da celotno površino filtra premera 47 mm ali 50 mm zajamemo v dveh tehnikah mikroskopiranja in sicer svetlo polje in polarizacija. Pred kratkim smo razvili posebno kamero, ki omogoča zajem slik v tehnikah svetlega polja in polarizacije hkrati. To pomeni 50 % prihranka časa pri zajemu slike.

Celoten proces analize tehnične čistosti je sestavljen iz naslednjih korakov:

1. Priprava filtra:
 - Tehtanje praznega filtra
 - Pranje komponente v posebni komori
 - Filtriranje pralne tekočine skozi filter
 - Sušenje filtra
 - Tehtanje polnega filtra
2. Analiza filtra na mikroskopu
 - Filter vstavimo v ustrezno držalo – nepokrit
 - Držalo postavimo na predvideno mesto na mikroskopu
 - Vnesemo podatke o filtru/filtrih
 - Izberemo željeni standard za analizo
 - Mikroskopski sistem zajame celotno področje filtra v obeh tehnikah mikroskopiranja hkrati
 - Programska oprema ZEISS ZEN Core segmentira sliko in klasificira prepoznane nečistoče
 - Uporabnik lahko pregleda galerijo slik in odpravi nepravilnosti pri klasifikaciji
 - Programska oprema izdela poročilo v skladu s standardom in nastavitvami uporabnika.

2 Sistemi na osnovi svetlobnih mikroskopov

ZEISS nudi 4 različne sisteme (Slika 1) za analizo čistosti s svetlobnim mikroskopom.

1 Basic Methodology

First some words regarding the use of light microscopes. The standard states that the whole area of the filter with a diameter of 47 mm or 50 mm can be scanned using two microscopy techniques, namely bright field and polarisation. ZEISS recently developed a special camera, ZEISS Axiocam 705 pol, which enables the acquisition of images in bright field and polarised light at the same time. This means a 50 % time savings when scanning the images.

The whole process of technical cleanliness analysis is divided into the following steps:

1. Filter preparation:
 - Weighing of the empty filter
 - Washing of the components in a dedicated chamber
 - Filtering of the washing fluid through the filter
 - Drying of the filter
 - Weighing of the populated filter
2. Analysis of the filter on a microscope
 - Filter is inserted onto a dedicated holder - uncovered
 - The holder is placed onto the microscope stage.
 - We enter the data about the filter/filters
 - We choose the desired standard for analysis
 - The microscope system scans the entire area of the filter in both microscopy techniques simultaneously
 - The software ZEISS ZEN Core segments the image and classifies the recognised impurities
 - The user can check the particle picture gallery and corrects the classification if necessary
 - The software produces a report according to the chosen standard and user settings.

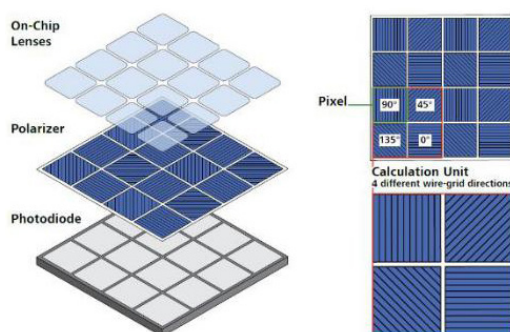
Za določeni sistem se odločimo glede na najmanjše delce, ki jih želimo detektirati. Slika 1 prikazuje sisteme in velikostne razrede, ki jih lahko detektirajo.

ZEISS je za potrebe analize tehnične čistosti razvil posebno kamero, ki omogoča zajem slike v svetlem polju in polarizacijo pod tremi koti hkrati. Kamera je črno bela in ima vgrajen poseben filter, kjer so piksli razdeljeni na skupine po 4.

Pred piksli so polarizatorji z različnimi koti polarizacije. (Slika 2)

Tak način zajema slike omogoča, da lahko površino filtra zajamemo v enem samem prehodu, kar razpolovi čas zajema slike filtra. Prav tako je s tem zagotovljena absolutno natančna poravnava slike v svetlem polju s sliko v polarizirani svetlobi.

Poleg navedenega je ZEISS razvil tudi postopek, ki poleg enostavnega segmentiranja slike pri analizi uporablja elemente umetne inteligence. Razločevanje kovinskih od nekovinskih delcev je težavno pri kovinskih delcih, ki so temni, oksidirani ali izdelani s tehnologijo sintranja. Z

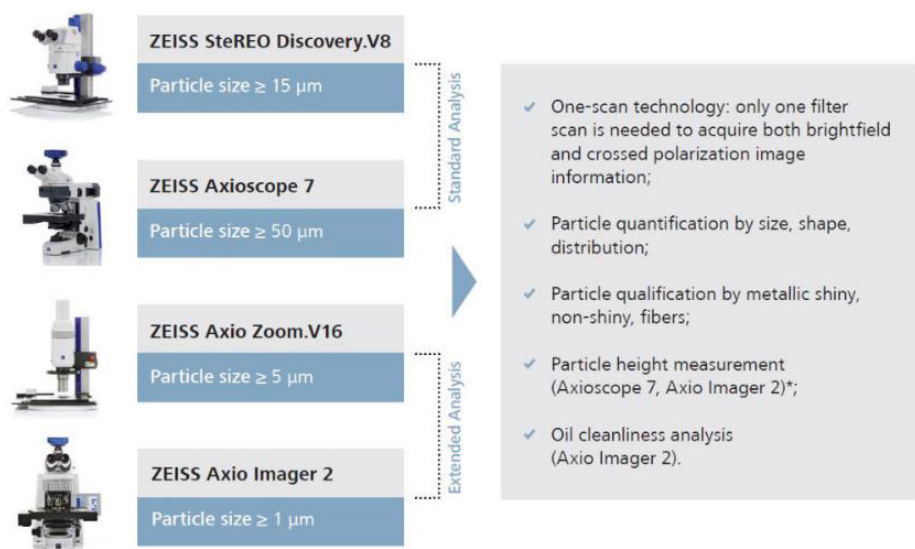


Slika 1. Sistemi za analizo tehnične čistosti

Figure 1. Available systems for technical cleanliness analysis

2 Systems Based on on Light Microscopes

ZEISS offers four different systems (Figure 1) for technical cleanliness analysis with a light microscope. The choice of the adequate system depends on the chosen minimum size of the particles we want to



Slika 2. Princip delovanja posebne kamere

Figure 2. Principle of the special camera

uporabo modelov umetne inteligence se izboljša klasifikacija prepoznanih delcev, saj lahko uporabimo dodatne kriterije oblike. Predvsem pri majhnih kovinskih delcih je ta metodologija bolj učinkovita. Ta tehnologija je osnovana na učečih se modelih, ki nam omogočajo upoštevanje vrste parametrov pri prepoznavi določenega tipa delca. Pravilno razločevanje kovinskih od nekovinskih delcev je na ta način bistveno izboljšano.

Programska oprema ZEN Core z ustreznim modulom za analizo tehnične čistosti omogoča uporabniku prijazno ponovljivo analizo filtrov. Sistem nas vodi skozi vse potrebne korake, potrebne za analizo. Standarde, ki so na razpolago, je mogoče enostavno prilagoditi glede na zahteve po posameznih velikostnih razredih. Kriterije lahko postavimo tako za skupno število delcev v posameznem razredu, kakor tudi ločeno za kovinske in nekovinske delce. Vlakna, ki so tretja kategorija, navadno pri tem zanemarimo. Pomembna prednost te rešitve je galerija delcev (Slika 3).

Na tem koraku lahko pregledamo delce, ki nas zanimajo in po potrebi korigiramo nepravilno kategorizirane delce. Poleg tega lahko tudi ločimo prekrivajoče se delce.

Na ta način izboljšamo natančnost kategorizacije delcev.

Končni rezultat je poročilo, ki vsebuje vse pomembne podatke o analiziranem filtru. Vsebuje tabelo števila delcev po posameznih razredih, slike največjih delcev vsake kategorije, sliko analiziranega filtra in podrobne podatke o parametrih analize. Poročilo je v Microsoft Word formatu. Vse podatke lahko shranimo v ZEN Core arhivu, kjer si lahko ogledamo podatke, ki niso v poročilu. Na primer Excel datoteko z vsemi detektiranimi delci in njihovimi karakteristikami.

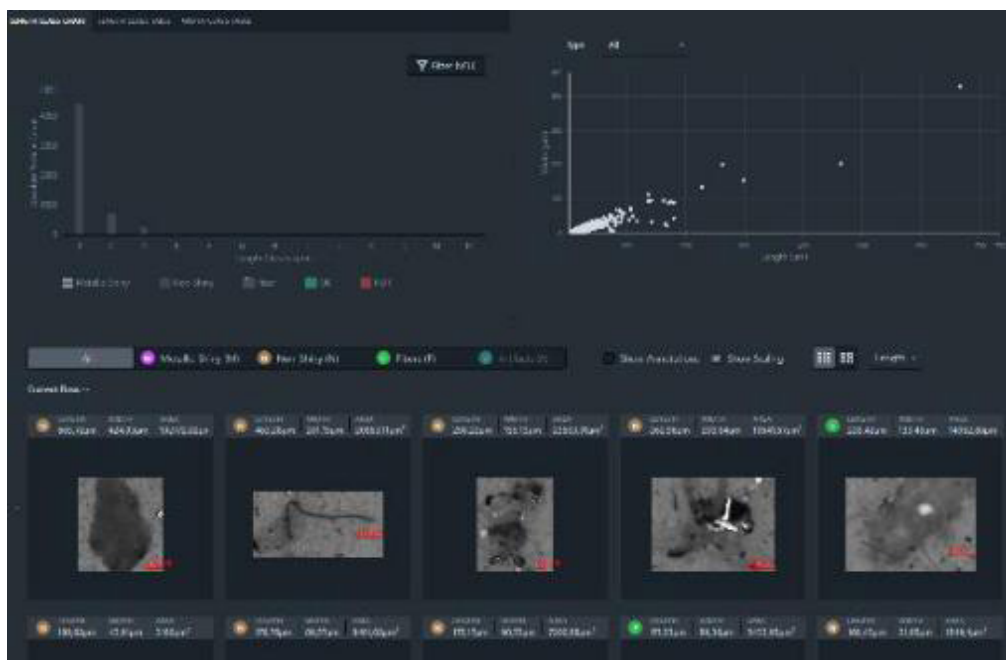
detect. The picture shows the four systems and sizes they can each detect.

Additionally, ZEISS developed a workflow which apart from simple segmentation also uses the methods of artificial intelligence to determine the particle types. The distinction between metallic and non-metallic particles is problematic when the metal parts are dark, corroded, or sintered. Using the learning models of artificial intelligence, the classification is significantly improved, since additional criteria such as shape are used. Especially in small metallic particles this methodology is very efficient. The digital camera acquires a black and white image. There is a filter in front of the C-MOS which divides the image into four channels. One channel is for bright field, the others are polarised at different angles. We use two of these channels to acquire an image in bright field and polarised light at the same time. This enables us to distinguish between metallic – shiny, and non-metallic – non shiny particles.

3 Determination of the Chemical Composition of Impurities

This methodology is based on learning models, which enable consideration of a much larger number of parameters for classification. Correct classification between metallic and non-metallic particles is greatly improved in this way.

To be able to determine the exact source of impurities it is often of crucial importance to determine the chemical composition of the particles. Most often an electron microscope ZEISS EVO 10 with an EDX detector is used for this purpose (Figure 3). ZEISS Smart PI software in combination with an electron microscope with an EDX detector allows the analysis of



Slika 3. Galerija detektiranih delcev

Figure 3. Gallery of detected particles

Summary SmartPI



- A powerful, integrated all-in-one particle analysis solution for EM
- Versatile and configurable for many industrial applications
- 3 fundamentals to the workflow
- Setup custom specific applications, tailored for your needs
- A complete turnkey solution for non-EM users
- Extensive Data Mining, with reporting, exploring, reprocessing and lots more



Slika 4. Shematski prikaz analize z uporabo elektronskega mikroskopa

Figure 4. Schematic presentation of the system for technical cleanliness analysis using a scanning electron microscope

3 Določanje kemijske sestave nečistoč

Da bi lahko določili natančen izvor nečistoč je pogosto ključnega pomena, da ugotovimo kemično sestavo nečistoč. ZEISS na tem področju ponuja rešitev ob uporabi elektronskega mikroskopa. Najpogosteje v ta namen uporabljamo mikroskop ZEISS EVO 10 z EDX detektorjem enega od proizvajalcev (Slika 4). Programska oprema ZEISS Smart PI v kombinaciji z elektronskim mikroskopom z ustreznimi detektorji omogoča analizo filtrov po vseh dosegljivih standardih analize tehnične čistosti. Velika dodana vrednost elektronskega mikroskopa pred svetlobnim mikroskopom je možnost določitve kemijske sestave nečistoč. Na ta način je zelo olajšano iskanje vzroka ali izvora nečistoč.

Postopki so avtomatizirani in zasnovani tako, da jih lahko uporablja tudi neizkušen uporabnik elektronskih mikroskopov. Po analizi filtra lahko uporabimo orodja za analizo, ki omogočajo pridobivanje dodatnih informacij o odkritih nečistočah. Poročila so zasnovana tako, da jih vsak uporabnik prilagodi svojim potrebam ali zahtevam kupcev. Priloženo je že veliko število pred pripravljenih oblik poročil.

4 Korelativna analiza tehnične čistosti

Tretji način analize pa je kombinacija prvih dveh. Izkoristimo hitrost svetlobnih mikroskopov za odkrivanje nečistoč in osnovno kategorizacijo. Nato filter prenesemo na elektronski mikroskop in izkoristimo možnost kemične analize zanimivih delcev. V ta namen je ZEISS razvil korelativni postopek (Slika 5). Posebno držalo filtra, ki ga je mogoče kalibrirati glede pozicije na mikroskopski mizici, nam omogoča, da delce odkrite na svetlobnem

filters according to all common standards for technical cleanliness. A major advantage of an electron microscope over a light microscope is the possibility to determine the chemical composition of the particles. In this way the search for the cause or the source of impurities is greatly facilitated.

The procedures are automated and designed in a way, that even an unexperienced user of an electron microscope can do the analysis. After the analysis of the filter, we can use various tools enabling us to acquire additional information about the discovered impurities. Reports are designed in a way that the user can easily adapt them to their needs or demands of their customers. There are many already prepared report templates included with the software.

4 Correlative Analysis of Technical Impurity

The third method of analysis is a combination of the first two (Figure 4). We can use the speed of light microscopes to detect the impurities and for basic classification. Then we transfer the filter onto an electron microscope and use the possibility of the chemical analysis of interesting particles. ZEISS developed a correlative workflow CAPA for this purpose. A special holder for the filter, which can be calibrated for position on microscopes, makes it possible to find the detected particles on a light microscope very easily on an electron microscope subsequently. In this way we save a lot of time, since we do not have to detect and find the chosen particles, we want to run additional analysis on, on an electron microscope again. Correlative analysis is possible on all microscope systems in combination with an electron microscope.

mikroskopu enostavno ponovno najdemo na elektronskem mikroskopu. Na ta način prihranimo čas, saj nam na elektronskem mikroskopu ni potrebno ponovno iskati delcev, ki nas zanimajo in za katere želimo opraviti dodatne analize. Korelativna analiza je mogoča z vsemi sistemi za tehnično analizo v kombinaciji z elektronskim mikroskopom.



Slika 5. Korelativna analiza tehnične čistosti

Figure 5. Correlative analysis of technical cleanliness

5 Zaključek

Če povzamem nam ZEISS tehnologija omogoča hitro in natančno analizo tehnične čistosti. Naše sodelovanje s proizvajalcem ekstrakcijskih komor omogoča direkten prenos parametrov izpiranja v poročilo o analizi.

Pri svetlobnih mikroskopih je prihranek pri času zajema slike 50 %, kar nam prinese 30 % prihranek časa pri celotnem postopku analize skupaj z izdelavo poročila.

5 Conclusion

To summarise, ZEISS technology enables fast and accurate technical cleanliness analysis. Our cooperation with a producer of extraction chambers makes it possible to transfer the crucial data about the extraction process directly into our software and hence into the report.

With light microscopes the time saving when scanning is 50 % compared to the conventional method, which results in a 30 % time savings in the whole process of analysis including the report formation.

Viri / References

1. VDA, „Inspection of Technical Cleanliness“ (March 2015)
2. Carl ZEISS, „ZEN Core user Manual“. (2020)
3. Carl ZEISS, „Identify the Root Cause, Brochure“. (2020)
4. Carl ZEISS, „ZEISS Particle Analyzer, Product Information“.

Notice and Apology / Obvestilo in opravičilo

V Livarskem vestniku št.3 /2023 je bil objavljen članek avtorjev Edo Meyer and Ashley Stone, MAXImolding! Technology GmbH, Germany pod naslovom: Vertikalne šobe za hkratno in efektivno dovajanje delno strjene taline v kovinska orodja – nov giga press za strukturne elemente iz lahkih zlitin, pomotoma brez poglavja Viri/Referenc.

Zato manjkajoče objavljamo v nadaljevanju:

An article by the authors Edo Meyer and Ashley Stone, MAXImolding! Technology GmbH, Germany pod naslovom: The Future of Lightweight Metal Parts: The MAXImolding® Process, the MAXImolding® Machine, Multi-Shot-Multi-Injectors-Press (TERApress™ at small size) in Smart Digital Foundries, was published in Livarski vestnik no. 3/2023, mistakenly without specifying Viri/References

That is why we publish the missing ones below:

Viri/ References

- [1] Frank Czerwinski, "Magnesium Injection Molding", Springer, ISBN-13: 978-0-387-72399-0
- [2] Frank Czerwinski, "An Application of Injection Molding to Semisolid Processing of Metallic Alloys: A Role of SIMA in Feedstock Transformation", ISSN: 1662-9779, Vol. 348, pp 69-74
- [3] E. Meyer and A. Stone, "MAXImolding: Vertical Semi-Solid Magnesium Alloy Injection Molding Machine for Mega Volume Production," in Magnesium 2021: Proceedings of the 12th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications, The Minerals, Metals & Materials Series (MMMS), 2021, pp. 99-108.
- [4] Ashley Stone, "Device for casting", US Patent 10,046,386 B2, Aug. 14, 2018
- [5] Ashley Stone, "Method and device for particulate scrubbing and conditioning", US Patent 8,119,073 B2, Feb. 21, 2012
- [6] Ashley Stone, "Self-learning production systems with good and/or bad part variables inspection feedback", US Patent 10,528,024 B2, Jan. 7, 2020
- [7] E. Meyer und A. Stone, "Neue Maschine ersetzt komplette Gießanlage", 08.08.2023, <https://www.euroguss.de/de-de/euroguss-365/2023/basic-knowledge/neue-maschine-ersetzt-komplette-giessanlage>
- [8] E. Meyer und A. Stone, "Das Zusammenspiel von Gieß- und Röntgenmaschine", 28.09.2023, <https://www.euroguss.de/de-de/euroguss-365/2023/basic-knowledge/das-zusammenspiel-von-giess-und-roentgenmaschine>

AKTUALNO / CURRENT

Vsebinska predstavitev 63. IFC Portorož 2023

Kot smo že v zadnji številki Livarskega vestnika najavili, vam v tej številki predstavljamo kratke povzetke vseh predstavljenih predavanj na 63. IFC Portorož 2023. V nadaljevanju vam najprej predstavljamo osem še nepredstavljenih plenarnih predavanj.

1. M. BOSSE, BDG-Service GmbH, Federal Association of the German Foundry Industry (DE): **Razogljichevalne poti v livarstvu**



Manuel Bosse, BDG-Service GmbH (DE) – plenarni predavatelj

Zvezno združenje nemške livarske industrije (BDG) je nosilec projekta zniževanja izpustov CO₂ v livarski industriji. Pri tem izhajajo iz ukrepov zmanjšanja porabe po energiji glede na obseg proizvodnje in zagotavljanja izboljšanja učinkovitosti rabe virov in energije. Zato so v okviru projekta »Inno Guss« z uporabo modelnih livarn orisali potenciale biomase, biometana in vodika ter elektrifikacije kot tudi zajemanja, transporta in kasnejšega podzemnega skladiščenja ali porabe ogljika. V Nemčiji je 550 livarn in te so ena od najbolj intenzivnih industrij in so kot gospodarske dejavnosti razdeljene v štiri sektorje: livarne železa, jeklarne, livarne lahkih kovin in livarne barvnih kovin. Največji vpliv na emisije CO₂ imajo livarne železa, saj proizvajajo 55% vseh izpustov. Sledijo jim livarne lahkih kovin s približno 35%. Manj kot 10% izpustov imajo livarne jekla, livarne barvnih kovin pa proizvedejo manj kot 5% vseh izpustov. Glavni viri energije v livarnah so elektrika, zemeljski plin in koks. V obdobju med 2015 in 2020 je skupna potreba po energiji

v nemških livarnah znašala 12,3 teravatnih ur. Električna predstavlja 47 % potreb po energiji, zemeljski plin 33%, livarski koks pa 18%. Delež CO₂ na kWh se z leti zmanjšuje in se je iz več kot 750 g/kWh v letu 1990 zmanjšal na manj kot 400 g CO₂ na kWh v letu 2020. Tudi povpraševanje po zemeljskem plinu se je povečalo za 1TWh.

2. D. HOWE, G. GEIER, Siempelkamp Giesserei GmbH (DE): **Preobrazba železove livarne v Evropi: ključ do tehnološkega in ekonomskega uspeha**



Manuel Bosse, BDG-Service GmbH (DE) – plenarni predavatelj

V energetsko intenzivnem sektorju kot je livarstvo je nujno zagotoviti zmanjšanje energetske porabe. Omejevanje stroškov je eno ključnih vprašanj v livarstvu. Ob pomanjkanju strokovno usposobljene delovne sile je reševanje tega problema še toliko težje. Zahteve na evropski ravni so vse večje, kar ni možno reševati brez strokovno usposobljenega kadra, kar še posebej velja za manjša in srednje velika podjetja. Aktivno preoblikovanje je najnujnejša naloga vodstva vsake livarne v Evropi. Pri tem je vodilno načelo usklajevanje nasprotujočih si ciljev s področja gospodarstva, ekologije in družbe. Predstavljen je bil primer podjetja Siempelkamp Krefeld v Nemčiji relativno velike livarne nodularne litine, kjer se ukvarjajo s formanjem in litjem komponent, ki tehtajo med 3 in 300 tonami. Prikazani so bili konkretni primeri formanja

in litja ter tehnični in tehnološki primeri ukrepov preobrazbe v livarno, ki izpolnjuje vse pogoje, ki zagotavljajo ekološko visoko raven proizvodnje zahtevnih ulitkov.



Primož Mrvar, Univerza v Ljubljani (SI) – plenarni predavatelj in plenarni predsedujoči

3. P. MRVAR¹, M. PETRIČ¹, S. KASTEIC¹, A. KRIŽMAN², H. PALKOWSKI³, ¹Univerza v Ljubljani: Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo (SI), ²Univerza v Mariboru (SI), ³TU Clausthal (DE): **Izdelava in karakterizacija sestavljenih ulitih pen iz biorazgradljive zlitine zn-mg ter soli**

V okviru raziskav biorazgradljivih materialov so bili izdelani sestavljeni ulitki iz cinkove zlitine z 1,5% Mg, pri čemer je bila kompleksna notranja struktura izoblikovana s pomočjo soli. Uporabljena je bila sol iz NaCl z natančno granulacijsko sestavo z visoko stopnjo enakomernosti. Za litje je bil uporabljen vakuumski način polnjenja livne votline in gravitacijsko litje na vibracijski mizi. V prvi fazi so za posamezne granulacijske soli izvedli sintranje le-te v naprej pripravljene kvarčne celice. Sledilo je instrumentiranje livne votline s termočlenom ter priprava fleksibilne cevi od kvarčne cevi (celice) na željeno temperaturo, pri kateri je bilo izvedeno litje. Na ta način je bila uspešno izvedena izdelava preiskovanih sestavljenih ulitih pen. Aplikacija, ki je mogoča v medicini, je povezana z izdelavo kompleksnih struktur z veliko specifično površino. Po vgradnji in korozijskem procesu v telesu nastanejo koristni reakcijski produkti za celice. Nakazuje se uporaba travmatološke povezave porušeni kosti. V okviru podobnih sistemov se predvideva, da bi bilo navedeno znanje koristno za zmanjšanje časa okrevanja po operaciji. Tudi v primeru odstranitve povezovalnih elementov dodaten poseg ne bi bil potreben. Pridobljeni vzorci so bili metalografsko preiskani s pomočjo optične in elektronske mikroskopije. Izvedena je bila tudi računalniška tomografija in simulacija polnjenja livne votline.



Konrad Weiss, RWP GmbH (DE) – plenarni predavatelj

4. K. WEISS, C. BAITANG, RWP GmbH (DE): **Digitalizacija kot osnova za proaktivno upravljanje livarn**

Da proizvodnja ne uide izpod nadzora, je potrebno pravočasno uvesti korektivne ukrepe in preprečiti prekoračitev mejnih vrednosti proizvodnih parametrov. V dobi industrije 4.0 bo zbiranje podatkov o procesih in kakovosti naslednji korak povsod, kjer je možno izvajanje meritev. To pomeni, da je možno v livarni izmeriti večino procesov. Vendar samo merjenje še ni dovolj, informacije je potrebno shraniti tako, da je mogoče v livarni izmeriti večino procesov in informacije je potrebno shraniti tako, da jih je mogoče uporabiti. Digitalizacija in obdelava z metodami umetne inteligence bosta privedli do naslednjega koraka. Prvi potreben element je obdelava podatkov na način, da si bo mogoče izmerjene vrednosti ogledati na spletu. S pomočjo specializiranega algoritma je mogoče izračunati zanesljive predvidene vrednosti. S temi vrednostmi trendov je mogoče opredeliti in usmerjati vplivajoče parametre. S poznavanjem strukture podatkov in z uporabo analize podatkov lahko ustvarimo in izvedemo »digitalni« dvojček. S tem modelom lahko preizkušamo in testiramo spremembe v proizvodnji, dodajamo nove izdelke in preverjamo vpliv različnih parametrov. Tako je mogoče preizkusiti nov scenarij in sprejeti pravo odločitev za prihodnost. Pri takojšnji uporabi si je mogoče s pomočjo umetne inteligence ogledati napoved parametra in umetni inteligenci določiti, da izvede popravke vplivajočega parametra.



Peter Hofer-Hauser, ÖGI Leoben (AT) – plenarni predavatelj

5. P. HOFER-HAUSER, R. GSCHWANDTNER, Austrian Foundry Research Institute (AT): **Odpornost konformno hlajenih zatičev jeder za tlačno litje na toplotni šok**

V zadnjih letih sta gonili procesne tehnike v tlačnem litju predvsem dve metodi – mikro nanašanje in uporaba komponent kokil izdelanih s 3D tiskanjem. Ti tehnologiji po eni strani omogočata zmanjšanje toplotnih obremenitev na površino orodij zaradi hitrega hlajenja s pršenjem vode, po drugi strani pa zagotavljata stabilno temperaturno polje na opredeljeni ravni. Vzorec napak površinskih mrež razpok, ki je značilno za orodja za tlačno litje, je mogoče tako torej zmanjšati na kar najnižjo raven. Razen tega je možno toploto ciljno odvajati s konformnim hlajenjem in tako izboljšati kakovost litih sestavnih delov, še posebej na kritičnih predelih. Še posebej začnejo razpoke nastajati pri izvrtini za hlajenje in se širijo do površine forme, kar pa lahko vodi do uničenja kokile ali kokilnih komponent. V ÖGI so razvili koncept preizkušanja,

ki omogoča oceno interno hlajenih jeder za uporabo v tlačnem litju ob upoštevanju materiala kokile, stanja toplotne obdelave in hlajenja. Preizkusili so jeklene zatiče jeder, izdelane na konvencionalni način ter tudi z aditivno proizvodnjo. Med preizkusom so simulirali toplotni šok taline s potapljanjem ohlajenih jeder v Al-zlitino, s čimer so zagotovili toplotno vedenje, ki je zelo podobno dejanskim pogojem. Termično utrujanje jeder so določili s porušitvenim preizkušanjem po 20.000 ciklih potopitev. Predstavljeni so bili rezultati preizkusov in simulacij.



Jožef Medved, Univerza v Ljubljani (SI) – predavatelj in predsedujoči sekcije

6. J. MEDVED¹, M. VONČINA¹, T. BALAŠKO¹, V. NAHTIGAL², ¹Univerza v Ljubljani: Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za materiale in metalurgijo, ²Gospodarska zbornica Slovenije: **Pomen kritičnih surovin za trajnostni razvoj metalurških podjetij**

Sodobna družba iz energetskega intenzivnega obdobja prehaja v obdobje materialov. Zaradi tega je sistemsko potrebno najti najboljše krožne rešitve materialnih tokov, kar je opredeljeno kot industrijska simbioza. Področje materialov se osredotoča na inovacije in izobraževanje povezano z industrijsko simbiozo, podaljšanjem dobe izdelkov, dizajnom za recikliranje ter recikliranjem izrabljenih sekundarnih surovin. Potrebni bodo tehnološki preboji naprednih materialov na petih velikih področjih: energetika, mobilnost, izdelovalne tehnologije, gradbeništvo in kmetijstvo. Bolj učinkovito reciklažo odpadnih kovin, zmanjšanje porabe energije, zmanjšanje energijskega odtisa in proizvodnjo brez odpadkov lahko zagotovimo z uporabo umetne inteligence v vrednostni verigi od

zbiranja, razvrščanja in metalurške predelave odpadkov. Metalurška in kovinsko predelovalna podjetja v Sloveniji imajo veliko vlogo saj proizvedejo za cca. 25% bruto nacionalnega dohodka. Nujno je, da se država opredeli, kako bo zagotovila prihodnjo energetske oskrbo in s tem pogoje za konkurenčno delovanje. Industrija materialov ni le energetska kot intenzivna industrija, ampak tudi industrija reciklaže in krožnega gospodarstva ter zagotavlja materialne surovine za verige vrednosti za vse ostale industrijske panoge. Metalurška podjetja imajo odločilno vlogo pri prehodu v trajno in zeleno prihodnost, Niso torej onesnaževalci in veliki porabniki energije, ampak velika priložnost za razvoj in napredek. Zato je potrebno zagotoviti primarne in predvsem sekundarne surovine ter dovolj ustreznih virov energije. Zagotoviti je potrebno trajnostne vrednostne verige materialov ter vzpostaviti pogoje za krožno gospodarstvo.



Mahan Firoozbakht, RWTH Aachen University Foundry Institute (DE) – plenarni predavatelj

7. M. FIROOZBAKHT, A. BÜHRIG-POLACZEK, Aachen University (DE): **Proaktiven, inovativen in prilagodljiv livarski inštitut**

Uporaba laboratorija za litje, v povezavi s sodobnimi tehnikami litja je livarskemu inštitutu Univerze Aachen RWTH omogočila, da je postal eno najzanesljivejših raziskovalnih središč na področju ulitkov iz superzlitin. Ker je mogoče učinkovitost turbin močno izboljšati z uporabo monokristalnih komponent, se nadaljnje raziskave osredotočajo na litje in strjevanje monokristalnih superzlitin. Zaradi kompleksnih geometrijskih lastnosti lopatic turbin je proizvodnja monokristalnih komponent brez mikrostrukturnih napak zahtevna. Primer so napake na vertikalnih površinah lopatic, ki so jih v livarskem inštitutu podrobno preiskali, da bi bolje razumeli njihov nastanek. Napaka omejuje obratovalno temperaturo motorjev turbin. Raziskovalna skupina, ki se ukvarja z litjem je razvila inovativno tehniko litja, s katero je mogoče premestiti nekatere pomanjkljivosti običajnih tehnik usmerjenega strjevanja. S temi novimi postopki je mogoče zagotoviti izredno visok termični gradient pred trdno/tekočo fronto, ki izboljša mikrostrukturo v neobdelanem stanju, zmanjšuje segregacijo legirnih elementov ter zmanjšuje napake med litjem. Preiskali so učinke spremenljivk med litjem in napake lopatic turbin. Z namenom optimizacije učinkovitosti lezenja so raziskali začetne bloke in spiralna zrna različnih geometrij, da bi zagotovili željeno kristalografsko orientacijo v celotnem ulitku. Inštitut je pionir na področju litja superzlitin. Inštitut je proaktivno, inovativno in prilagodljivo raziskovalno središče, ki je dejavno po vsem svetu.



Zdenka Zovko-Brodarac, University of Zagreb (CRO) – plenarna predavateljica in predsedujoča sekcije

8. Z. ZOVKO BRODAC¹, F. KOZINA¹, J. MEDVED², J. BURJA³, ¹University of Zagreb: Faculty of Metallurgy, Sisak (HR), ²University of Ljubljana: Faculty of Natural Sciences and Engineering, Ljubljana (SI), ³Institute of Metals and Technology, Ljubljana (SI): **Preiskava reciklirane zlitine AlSi9Cu3(Fe)**

Surovine predstavljajo začetek vseh industrijskih vrednostnih verig. Aluminij in aluminijeve zlitine so pomembne kritične in strateške surovine. Standardna Al zlitina AlSi9Cu3(Fe) (EN AC 46000) se pogosto uporablja v avtomobilski in transportni industriji. Glavne prednosti te zlitine so dobre mehanske lastnosti, kot so trdnost, trdota, raztezek in korozijska odpornost. Raziskan je bil potencial recikliranja te zlitine z uporabo lastnega povratnega materiala brez vseh dodatkov in popolnoma povratnega materiala brez dodatkov ali prečiščevanja. Število legirnih elementov omogoča nastanek faz kot so: α -Al₁₅Si₂M₄ (M= Cr, Fe, Mn, Mo), β -Al₅FeSi, Al₂Cu, kot tudi bolj kompleksnih faz, npr. Al₃Cu₂Mg₅Si₇, in sicer na podlagi teoretičnega modeliranja. Kompleksen potek strjevanja označuje primarni aluminij α_{Al} evtektično fazo $\alpha+\beta_{AlSi}$, intermetalno fazo na osnovi železa v Al₅FeSi, intermetalno fazo na osnovi magnezija in bakra, kot sta Mg₂Si in Al₂Cu, ter kompleksne intermetalne faze, kot so faze Al₈Mg₃FeSi₂ in Al₅Mg₈Si₂Cu₂. Termodinamični učinki medsebojnega delovanja elementov med zaporedjem strjevanja pomembno vplivajo na potek in način strjevanja. Termodinamična učinka pomembno vplivata na razvoj mikrostrukture. Kljub poslabšanju kemijske sestave je bila pridobljena mikrostruktura pravilna in je upravičeno dosegla visoke mehanske lastnosti. Zato je mogoče trditi, da je predmetna surovina kakovosten šaržni material z ugodnim potencialom za uporabo in recikliranje.



Mateo Pesci, HAItalia (IT) – predavatelj

9. M. PESCI, HA ITALIA S.p.A. (IT): **Novi vložni tulec Chemex za zmanjšanje dovajane količine**

Zaradi rasti stroškov surovin, morajo sodobne livarne iskati načine za zmanjšanje količine lite kovine ter posledično optimizacijo napajalnih sistemov. Manjša poraba energije bo v prihodnje prevladovala pri inženirskih raziskavah. Pri tem je pomembno tudi izboljšanje izkoristka modelnih plošč. Podjetje CHEMEX je razvilo inovativne napajalne sisteme, ki lahko nadomestijo klasične tehnologije. Novi dizajn v kombinaciji z eksotermnimi materiali brez fluora omogoča zmanjšanje količine dovajane kovine ob določenem termičnem modulu, hkrati pa zagotavlja vse prednosti s popolno odsotnostjo degeneracije grafita, najvišjo mehansko trdnostjo ulitka in dimenzijsko natančnostjo. Novi zasnovani vložni tulci omogočajo močno zmanjšanje dovedene količine ter hkrati ohranijo vrednosti termičnega modula, ki jih konstrukterji potrebujejo za zagotavljanje primernosti ulitka. Povečanje učinkovitosti napajanja so ocenili na podlagi izvidov v praksi. Rezultati so pokazali, da je z optimizacijo napajalnega sistema mogoče zmanjšati volumen kovine za 60%, kar vodi v energetski kot tudi skupni prihranek obratovalnih stroškov.



Andres Harboth, Volume Graphics GmbH (DE) – predavatelj

10. A. HARBOTH, V. AFANESEV, Volume Graphics GmbH (DE): **Industrijska računalniška tomografija – zagotavljanje kakovosti in postopka litja s pomočjo neporušitvenih preiskav (NDE)**

Zaradi vse večjega deleža ulitkov kompleksnih oblik, visoke stopnje funkcionalne integracije in razvoja ter funkcionalne integracije se livarne nenehno srečujejo z novimi izzivi. Z industrijsko računalniško tomografijo (iCT) tako v fazi priprave vzorcev, kot med serijsko proizvodnjo lahko poskrbimo za dejansko kakovost ulitkov ter hkrati za optimizacijo procesa in proizvoda. V livarni se iCT uporablja za zagotavljanje kakovosti v povezavi s poroznostjo ulitkov. Dokumenta BDG P202 in P203 sta podlaga za dobavne specifikacije v livarni in standarde podjetja za ugotavljanje poroznosti v ulitkih iz lahkih kovin. Ob uveljavljeni analizi poroznosti, iCT prav tako omogoča številne druge možnosti pregledovanja kot so: analiza debeline stene, metrologija dimenzij, nazivna/dejanska primerjava, korekcija proizvodnih geometrij form, povratni inženiring za rekonstrukcijo uporabe pripravljenih podatkovnih modelov CAD in simulacija strukture ulitkov, ki vsebujejo nepopolnosti. Z intenzivno rabo CT je mogoče lokalizirati težave s kakovostjo in optimizirati postopek litja. Optimizacija opredeljenih geometrij za oblikovanje form vodi v hitrejšo dimenzijsko stabilnost ulitka. Zmanjšati je mogoče število postopkov vzorčenja na livarskih in obdelovalnih ter koordinatnih merilnih strojih s čimer se močno zmanjša količina izmeta med litjem in po strojni obdelavi. Na osnovi primerov je bil pojasnjen širok razpon možnosti preizkušanja ulitkov z iCT. Na izračunu vzorca izdelanega iz zlitine AISi10MnMg je bilo prikazano kako visok je lahko prihranek pri stroških in kako hitro je mogoče amortizirati sistem Atline-CT.

11. D. MOLNAR, Univerza v Miskolcu (HU): **Razvoj metode duplexnega litja**

Proizvodnja večplastnih aluminijastih plošč obsega mnogo tehnoloških izzivov v povezavi s tehnologijo litja. Tehnološki podatki postopka so naslednji: plasti pločevine-jedro in obloga- so izdelane iz različnih Al-zlitin, ki kristalizirajo s tehnologijo polkontinuirnega litja gredic. Gredice



Daniel Molnar, University of Miskolc (HU) – predavatelj in predsedujoči sekcije

se strojno obdelajo in večplastni paketi se pripravijo za toplo valjanje. Na začetku postopka toplega valjanja se plasti paketov premaknejo, zamaknejo in razcepijo, kar povzroči omejeno uporabnost končnega izdelka. Za odpravo teh pojavov je mogoče večplastno strukturo kot novo tehnologijo izdelati z litjem. V tem primeru je jedrna plast izdelana s polkontinuirnim litjem gredic, medtem ko so plasti obloge na njeno površino ulite z gravitacijskim litjem z usmerjenim strjevanjem. Razvoj nove tehnologije temelji na tehnikah računalniške simulacije, nova tehnologija pa je potrjena z laboratorijskimi preizkusi. Da bi zagotovili kakovost končnega izdelka, se preveri več geometrij materialov in tehnoloških parametrov.

12. C. ABT, F. WOHLGEMUTH, Heitec PTS GmbH (DE): **Hitro in prilagodljivo rentgensko preizkušanje na liniji v livarnah na podlagi modularnih konceptov**

Z rentgenskim preskušanjem (2D in 3D) je mogoče zaznati običajne napake pri litju, kot so pore, vključki in izmet – dandanes celo v času cikla s pomočjo samodejnega prepoznavanja napak (ADR-Automated Defect Recognition). Prilagojena avtomatizacija, npr. z uporabo robotov, omogoča delovanje 24 ur na dan in 7 dni na teden brez človeških upravljalcev, kot tudi popolno integracijo v proizvodno linijo. Zasnova in izgradnja po meri nameščenega sistema za preizkušanje, optimiziranega za potrebe in okolje specifične proizvodne linije, pa še vedno zahteva čas, v katerem preizkušanje med proizvodnjo še ni mogoče. Rešitev ima še dodatne prednosti:

- Modularna zasnova omogoča enostavno spreminjanje, kar omogoča prilagajanje za izpolnjevanje spreminjajočih se potreb.
- Zaradi modularne zasnove lahko proizvajalci omogočijo zakup sistemov za rentgensko, preizkušanje ali pa jih ponudijo kot posamezne komponente, ki jih je mogoče vrniti v času njihove življenjske dobe.
- Posamezne komponente je mogoče enostavno nadomestiti z novimi, boljšimi komponentami.
- Zaradi modularne zasnove rentgenskih sistemov za preizkušanje je rentgensko preizkušanje v livarnah dostopnejše, bolj prilagodljivo in dostopno v krajšem času.



Christian Abr, HEITEC PTS GmbH (DE) – predavatelj

13. K. VAN NIEKERK, Lauds Foundry Equipment GmbH (DE), Siapro d.o.o. (SI), namesto njega predstavljal N. Rutar: **Stroji za cold box jedra**

Podjetje Laus Foundry je predstavilo svojo osnovno in tehnološko različico svojega sistema za proizvodnjo form in jeder. V podrobnostih je bila predstavljena tehnologija in stroji za izdelavo jeder, ki omogočajo uporabo jedrovnikov iz lesa, smole, aluminija in jekla v skladu s konfiguracijo jedra. Sistem omogoča vertikalno ali horizontalno proizvodnjo jeder in omogoča velikosti od 1 do 150 l. Sisteme je mogoče nastaviti na vertikalno ali horizontalno proizvodnjo in omogočajo pritrditev s stranskimi vpenjali, namiznimi držali ter ročno uporabo. Vsi sistemi imajo integrirane lastne sisteme za naplinjanje in ogrevanje, ki delujejo na celovitih operacijskih sistemih Siemens. Sisteme proizvajajo v podjetju Siapro d.o.o. v Sloveniji, kjer v enem obratu poteka celoten



Necj Rutar (namesto Kevina van Niekerka), SIAPRO d.o.o. (SI) – predavatelj

proces od zasnove, do proizvodnje in preizkusov končnih izdelkov za dobavo. Podjetje ponuja vodenje projektov, vzdrževanje livarn, nadomestne dele in celovito pripravo ter podporno načrtovanje celovite nadgradnje sistema in obnove opreme.



Elmar Offenbacher, LHS
CLEAN AIR SYSTEMS (AT)
– predavatelj

14. E. OFFENBACHER, LHS Clean Air Systems (AT): **Zelena livarna – napredno odpraševanje v kombinaciji z rekuperacijo toplote**

Zaradi vedno strožjih okoljskih standardov kot tudi cen energentov so napredni izpušni sistemi vse pomembnejši. Ni pomembno samo odstranjevanje prašnih delcev, temveč tudi strupenih snovi, kot so dioksini in furani. Z izkoriščanjem rekuperacije toplote lahko izboljšamo trajnost tako z gospodarskega, kot okoljskega vidika. Strupeni plini iz različnih področij livarne se ujamejo in dovajajo v filtrirno enoto, ki vključuje tudi odmerjanje aditivov navzdol v liniji za separacijo dioksina in furana, ki izvirata pretežno iz Croning postopka. Očiščeni odpadni zrak, ki ima še vedno visoko temperaturo, preide skozi vrtljivi toplotni izmenjevalnik, ki latentno toploto prenese in dovod svežega zraka, ki se uporablja za klimatizacijo delavnice. Tako se zmanjšajo obratovalni stroški, povezani z uporabo zunanje grelnice enote. Kombinacija obrata za odpraševanje in rekuperacijo toplote v sodobnih livarnah rešuje vprašanje aminov v postopku cold-box, ki pogosto razpadajo v majhnih jedrih ter hlapijo v velikih jedrih. Nastali ogljikovodiki in fenoli prispevajo h količini prašnih delcev in jih moramo ločiti z visoko učinkovitimi filtri. Na področju formarskega peska sta glavni težavi visoka vsebnost vlage in nastajanje hlapov. S pomočjo visoko inteligentnih prezračevalnih rešitev je v obratu pomembno zagotoviti najmanjšo količino izpustov ter visoko energetske učinkovitost. Iz različnih področij v livarni se odvede cca. 120.000 m³/h zraka ter dovede v učinkovit filter s ploščato vrečo, ki količino izpustov prahu zmanjša na vrednost pod 3mg/m³. Vrtljivi toplotni izmenjevalnik prenese latentno toploto iz izpušnih plinov na sveži zrak z visoko učinkovitostjo 70%.



Luka Kranjc, PRO LABOR
d.o.o. (SI) – predavatelj

15. L. KRAJNC¹, M. BOJINOVIČ¹, G. KLANČNIK¹, A. RESNIK², ¹Pro Labor d.o.o., ²OMCO METALS Slovenia d.o.o., (SI): **Študija primera integracije digitalnega in krožnega prehoda v livarnah**

Predstavljena študija primera združevanja digitalnega in krožnega prehoda je digitalna rešitev za povečanje dodajanja krožnega materiala (DigitKroM) in stremi k viziji razvoja in podpori slovenske livarske ter druge proizvodno-predelovalne industrije, kot ustvarjalne, pametne, tehnološko suverene industrije, ki spodbuja tehnološko konkurenčnost, odličnost in dviguje kompetence zaposlenih, omogoča dvig inovativnosti in umešča digitalno rešitev v področje zelenega prehoda ter je v skladu s strateško razvojnimi cilji RS in Evropske unije. DigitKroM se umešča v preobrazbo družbe z gospodarnim upravljanjem z viri, s podanimi aktivnostmi in stremi k podnebni nevtralnosti ob intenzivnem zmanjševanju obstoječega okoljskega odtisa ter zmanjševanju uporabe energetske, emisijske in stroškovno manj učinkovitih primarnih surovin (BF grodelj, FeMo, FeSi, FeV) in njihovo nadomestitev s sekundarnim materialom. Z izdelkom DigitKroM se povečuje učinkovitost izdelave končnih produktov v livarni in omogoča nadomeščanje surovine z zahtevnimi sekundarnimi surovinami. Uporaba zahtevnejšega sekundarnega materiala ima direkten vpliv na končni produkt in dodatno na doseženo ugodnejšo lastno ceno in s tem

povečanja dodane vrednosti izdelka. Predstavljena študija je prikaz prehoda na dolgoročni sistem učinkovitejše rabe surovin in omogoča hitro in ponovljivo vračanje materiala v proces izdelave novih produktov.



Ida Adhiwiguna, University Duisburg-Essen (DE) – predavatelj

16. I. ADHIWIGUNA, R. DEIKE, Univerza Duisburg-Essen (DE): **Ponovno vrednotenje vloge magnezija in iskanje trajnostne alternative v proizvodnji litega železa**

Magnezij že leta izdatno pomaga pri zagotavljanju željenih lastnosti v proizvodnji litega železa z vermikularnim (CGI) in nodularnim grafitom (SGI). Ključnega pomena je ponovna proučitev vloge magnezija kot tudi temeljita raziskava tehnoloških alternativ, ki lahko brez dvoma zagotavljajo trajnost tako z gospodarskega kot okoljevarstvenega vidika. Proučili so dve različici litega železa in sicer z visoko in nizko vsebnostjo žvepla, da bi lahko opisali postopek razžveplanja in nodulizacije. Reakcijske plasti so nato opazovali z metalografskimi analizami s pomočjo SEM/EDS in AES. Na podlagi rezultatov so nato določili termodinamični opis, da bi razumeli pojav, ki bi na koncu lahko postal temelj za razvoj alternative. Že v postopku razžveplanja so preizkusili apno za zagotavljanje enake funkcije kot magnezij in sicer za vezavo raztopljenega žvepla v litem železu. Rezultati dokazujejo, da je mogoče vsebnost žvepla v litem železu zmanjšati na manj kot 100 ppm. Na podlagi razumevanja nodulizacije iz začetne stopnje eksperimenta, še posebej vedenja preostanka žvepla in vsebnosti kisika, je mogoče iz razžveplanega litega železa na osnovi apna uspešno proizvesti CGI in SGI. Razžveplanje z apnom zagotavlja zmanjšanje CO_2_{eq} za kar 85% ter velike prihranke pri stroških. Ta raziskava prispeva k napredku v industriji litega železa skozi predstavitev uporabe apna v prahu kot alternative magneziju. Rezultati prikazujejo zanesljiv in okolju prijazen pristop ter hkrati širijo obseg razpoložljivih možnosti za trajnostno proizvodnjo litega železa.



Ladislav Lazić, University of Zagreb (CRO) – predavatelj in predsedujoči sekcije

17. L. LAZIĆ, M. POKRIVAC, I. JANDRLIĆ, University in Zagreb: Faculty of metallurgy (CRO): **Tehnološka in strukturna kalkulacija rekuperatorja za segrevanje zraka pri kupolni peči**

Pri pripravi taline za proizvodnjo večjih količin se v obratih za litje železa uporabljajo predvsem kupolke. Glavne prednosti kupolk v primerjavi z električnimi pečmi so: manjša občutljivost na nizkokakovostne materiale šarže in onesnaževalce, oksidacijake in redukcijske reakcije med taljenjem v kupolki potekajo znotraj talilne cone in nad njo, kar omogoča uporabo visoko oksidiranega in nizkokakovostnega odpadnega materiala, cenejših zlitin in nekovinskih dodatkov. Metalurški proces v kupolki je mogoče pospešiti s predgrevanjem zraka. Ob povečani storilnosti agregata se dosežejo tudi manjša poraba koksa kot tudi višje temperature taline. V ta namen se običajno uporabljajo cevni rekuperatorji, ki izkoriščajo entalpijo izhodnih plinov iz kupolke, v nekaterih primerih pa tudi entalpijo plinov zaradi zgorevanja zemeljskega plina. Za kupolke z zmogljivostjo 3 t/h je bil opravljen tehnološki in konstrukcijski izračun sekcij rekuperatorja. Sestavljen je iz izračuna zgorevanja naravnih plinov in plinov iz kupolke ter izračuna konstrukcije treh sekcij rekuperatorja. V območju najvišjih temperatur zgorevalnih plinov, se doseže končno segrevanje zraka pred vstopom v kupolko. V drugem delu se plini iz kupolke pred zgorevanjem segrejejo, v tretjem delu pa se zrak segreje

iz začetne temperature okolja. Sprejeta je bila zasnova cevastega toplotnega izmenjevalnika z nasprotnim tokom dimovodnih plinov in zraka, sestavljenega iz jeklenih U-cevi.



Juraj Trojan, DISA NORICAN
CZECH S.V.O. (CZ) –
predavatelj

18. J. TROJAN, L. SØNDERGARD, DISA Industries A/S (DK):
DISA-trajnostno formanje bentonitnih peščenih mešanic

Družba DISA je bila v industriji oblikovanja svežega peska vedno poznana po inovativni tehnologiji in odgovornem pristopu. Proizvajalci ulitkov bi se lahko po družbi DISA zgledovali, da bi dosegli trajnostni model obratovanja z vsemi osnovami in splošno sprejetim okvirom. S tem dokumentom družba DISA želi zagotoviti celosten pogled na to, kako se oblikuje in določa trajnostni model podjetja na splošno, kaj dejansko pomeni, če pogledamo pod površje in kako tehnologije družbe DISA v resničnem življenju podpirajo uporabnike livarn pri njihovih prizadevanjih za sočasno zagotavljanje učinkovitosti in trajnosti. Mednarodna skupnost se je leta 2015 v Parizu dogovorila, da bo takojšnje obsežno zmanjšanje izpustov pomagalo omejiti dvig temperature na največ 1,5°C. Posledično bodo v EU obvezni spremljanje, merjenje in zmanjševanje izpustov toplogrednih plinov (TGP). Za poročanje se bo uporabljala direktiva EU o trajnosti (CSRD). Poročanje o trajnosti bo tako postalo ključen del poslovanja. Družba DISA se je zavezala znanstveno utemeljenim ciljem za zmanjšanje emisij. SBT opredeljuje najboljšo prakso pri zmanjšanju emisij in ničelnih ciljev v skladu s podnebno znanostjo z namenom uresničitve cilje Pariškega sporazuma. Na osnovi kakovostno opredeljenih ciljev, ki temeljijo na SBT si bo družba DISA toplogrednih plinov lahko dolgoročno prizadevala za zmanjšanje izpustov in ob tem pomagala tudi svojim strankam tako na področju trajnosti, kot tudi na področju izboljšav procesov.



Ladislav Lazić, University of
Zagreb (CRO) – predavatelj
in predsedujoči sekcije

19. R. RUDOLF^{1,2}, P. MAJERIČ^{1,2}, T. ŠVARC¹, Ž. JELEN¹,
¹Univerza v Mariboru, ²Zlatarna Celje: **Ovrednotenje temperature
tališča nanodelcev zlata**

Za praktično uporabo suhih nanodelcev zlata je potrebno poznati njihove temeljne lastnosti, med katerimi je ključna temperatura tališča, saj so od nje odvisni nekateri osnovni procesi kot npr. toplotne obdelave, sintranje, žarjenje idr. Večina materialov v razsutem stanju ima dobro definirana oziroma celo standardizirana tališča. Temperature tališč sipkega materiala načeloma niso odvisne od dimenzij materiala. Ko pa se velikost materiala zmanjšuje proti nanometrski skali in se približuje atomski lestvici, postane odvisnost temperature tališča od dimenzij materiala odločilna. Nano delci zlata nimajo enakih fizikalno-kemijskih lastnosti kot običajno zlato; na osnovi literaturnih podatkov pa je njihovo tališče za več deset ali celo sto stopinj nižje v primerjavi z zlatom na makro nivoju. Ta pojav je imenovan kot depresija tališča in je bil prvič eksperimentalno potrjen pri kovinskih tanko slojnih površinah z debelino med 1nm do 100 nm. Cilj prispevka je predstaviti nanodelce zlata, ki so bili sintetizirani z metodo ultrazvočne razpršilne pirolize in liofilizacijo, s čimer je bilo doseženo njihovo suho stanje. Za ovrednotenje temperature tališča nanodelcev zlata je bila uporabljena diferenčna dinamična kalorimetrija, s čimer je bila eksperimentalno določena vrednost njihovega tališča in izvedena primerjava s čistim zlatom, ki ima tališče 1064, 2°C. Uporabljene so bile različne karakterizacijske tehnike, pri interpretaciji znanstvenih rezultatov pa je bil uporabljen multidisciplinarni pristop. Namen raziskave je bil pridobiti

pomembne informacije, ki bodo omogočile določitev vplivnih parametrov različnih obravnav nanodelcev v prihodnosti in s tem prenos nanodelcev v različne nove aplikacije.



Dominik Boos, TUM LCC
(DE) – predavatelj

20. D. BOOS, K. DREICHSLER, Tehniška univerza München (DE):
Z vlakni ojačena slana jedra za visokotlačno litje

Visokotlačno litje (HPDC) omogoča gospodarno proizvodnjo lahkih kovinskih delov. Potrebe po kompleksnejših oblikah naraščajo, še posebej zaradi preusmeritve industrije od motorjev z notranjim izgorevanjem k sestavnim delom električnih pogonskih sistemov. Zahteve prav tako narekujejo izdelavo delov z zajedami ter votlih delov. Nekateri deli morajo omogočati pretok medija, npr. za upravljanje toplote baterij ali za ohranjanje učinkovitosti elektronskih naprav. Votli deli morajo prav tako biti tudi lahki, da bi omogočali prihranek energije med uporabo elektronskih naprav. Izdelke takšnih kompleksnih geometrij je mogoče izdelati z jedri za enkratno uporabo. Vendar pa predstavlja visokotlačno litje neugodno okolje za uporabo jeder za enkratno uporabo, ki se po uporabi uničijo. Priporoča se uporaba različnih vodotopnih soli na osnovi natrijevega klorida (NaCl). Čeprav jih odlikuje dobra termična stabilnost in zmožnost recikliranja, je njihova slabost krhkost in občutljivost na upogibanje ter na udarne obremenitve, kar povzroča napake med litjem. Da bi izboljšali trpežnost slanih jeder, je bil uveden koncept kompozitov s keramičnim jedrom z dodatkom vlaken, ki krhkost slanih jeder pretvori v psevdo duktilnost. Raziskali so ojačitve iz kratkih in neprekinjenih jeder, izdelanih iz ogljika, stekla kot tudi naravnih materialov. Tritočkovni upogibni testi in poskusi s postopkom HPDC s hitrostjo v dovodnem kanalu do 60 m/s dokazujejo, da so novi z vlakni ojačeni materiali primernejši kot komercialno dostopna sintrana slana jedra. Izkazalo se je, da so z vlakni ojačana slana jedra do 2,4-krat močnejša in da absorbirajo 32-krat več energije. Zaradi netopnih vlaken se z vlakni ojačeni vzorci slanih jeder v vodi raztopijo hitreje kot sama sol. Vlakna v prostem stanju se iz demonstratorja izperejo skupaj z v vodi raztopljeno soljo. Oba materiala je mogoče reciklirati in izdelati novo jedro. Trpežna z vlakni ojačena slana jedra predstavljajo tehnološki napredek za livarne. Potencialnih konceptov zasnove tako ne bo več omejeval postopek visokotlačnega litja, ki predvideva zasnovo delov iz več delov ter njihovo naknadno združevanje.



Erih Arko, Yaskawa Slovenija
d.o.o. (SI) – predavatelj

21. E. ARKO, YASKAWA Slovenija d.o.o. (SI): **Avtomatizirana robotska rešitev za razizgljevanje in čiščenja robotskih ulitkov z uporabo 3D strojnega vida**

Predstavljena je bila avtomatizirana robotska celica za razizgljevanje robotskih ulitkov. Celica je opremljena z robotom YASKAWA GP25, ki se odlikuje po svoji zmogljivosti in fleksibilnosti in ima integrirano vreteno z nastavljivimi obrati do 25.000/min. Sama os vretena ima brezstopenjsko nastavljivo kompenzacijo in možnost avtomatske menjave obdelovalnih orodij ter omogoča natančno in učinkovito razizgljevanje ulitkov. Ključna prednost celotnega robotskega sistema je njegova kreacija v digitalnem dvojčku s pomočjo programskih orodij. Robotski sistem je popolnoma avtomatiziran in je povezan v FMS sistem za avtomatsko sprego CNC strojev in skladiščenje materialov. Ta povezava omogoča hitro dostavo vpenjalnih orodij z vpetimi ulitki v pozicijo razizgljevanja in optimizacijo celotnega proizvodnega procesa. Končno obdelavo ulitkov predstavlja čiščenje ulitkov in robotsko izpihanje ter odsesavanje preostale tekočine, kjer s pomočjo 3D strojnega vida

lahko pošljemo koordinate pozicije ulitka in pozicijo vseh točk na ulitkih, ki so predmet obdelave. Ključne prednosti robotskega razigljavanja so: konstantna kvaliteta opravljenega razigljavanja, delo robota, izločitev subjektivnega faktorja, visoka produktivnost, visoka fleksibilnost, saj robot lahko dela avtonomno 24 ur/dan ter visoka fleksibilnost. Z implementacijo celic za robotsko razigljavanje pripomoremo k še večji ekologiji in skrbi za čisto mikroklimo ter zmanjšanju hrupa, ki nastaja pri procesu razigljavanja. Proces je varen za operaterja, saj le iz daljave preko monitorja spremlja delovni proces.



Steffen Link, Geiger + Co.
Schmierstoff-Chemie GmbH
(DE) – predavatelj

22. S. LINK, C. GEIGER, Geiger + Co. Schmierstoff-Chemie GmbH (DE): **Optimizirano sredstvo za razkalupljanje za nove strukturne komponente, izdelane iz naravno trdnih zlitin**

Prehod na električno mobilnost pomeni potrebo po še večjih in kompleksnejših sestavnih delih, po drugi strani pa morajo livarne zaradi energetske krize varčevati, da bi lahko še naprej bile konkurenčne. Razen tega mora celotna dobavna veriga izpolnjevati vedno strožja merila v povezavi s trajnostjo. Rešitev za te izzive je prehod s kaljivih zlitin na naravno trdne ali samokaljive zlitine. Tako je mogoče velike aluminijске strukturne dele proizvesti z bistveno nižjimi stroški energije in v manj korakih procesa. Z odpravo energetske obremenjenega raztopnega žarjenja se ostanki delovnih materialov, ob uporabi naravno trdnih zlitin med toplotno obdelavo več ne odstranijo iz litih delov. Zato je potrebno več pozornosti nameniti primernemu in za postopek ustreznemu čiščenju in predelavi strukturnih ulitkov kot pri uporabi kaljivih zlitin. V nasprotnem primeru obstaja nevarnost uničujočih učinkov na elektroforetski premaz ter posledično neučinkovito zaščito komponent pred korozijo. Zaradi tega smo razvili nova sredstva za razkalupljanje, ki izpolnjujejo vedno strožje tehnične zahteve. Te zahteve so naslednje: Uporaba zlitin z nizko vsebnostjo železa in visokimi skrčki, kot tudi močno narebrenih form z majhnim snemalnim kotom; zelo dobro mazanje z dolgo potjo toka, brez popačenja delov; zelo dobra pralna sredstva za razkalupljanje z okolju prijaznimi čistilnimi sredstvi; brez negativnih učinkov na odpornost, na korozijo in elektroforetske premaze.



Andreas Mertz, FONDAREX
SA (CH) – predavatelj

23. A. MERTZ, T. USNER, Fondarex-Europe (DE): **Soočanje z novimi izzivi v tlačnem litju s pomočjo inovativne periferne opreme**

V zadnjih letih se pojavljajo nova področja uporabe delov izdelanih s tlačnim litjem, ki so posledica prehoda z motorjev z notranjim izgorevanjem na električno mobilnost. Podjetja se sedaj soočajo z izzivom stroškovne učinkovite in zanesljive proizvodnje takšnih delov. Obstaja tudi potreba po dokumentiranju in sledljivosti proizvodnih parametrov. Samo celovito in pregledno zagotavljanje proizvodnih podatkov predstavlja osnovo za uporabo sistemov AI za optimizacijo procesov. V povezavi z mega/giga ulitki se poraja tudi vprašanje dodatne povečave sile stiskanja strojev za tlačno litje ali pa mogoče zahtevam po kakovosti zadostiti na primer tudi pri nizkih tlakih in zmanjšanih najvišjih tlakih. Ker je tehnologija že dodobra razvita v naslednjih letih ni pričakovati drastičnega tehnološkega napredka. Obetaven pristop je optimizacija perifernih enot celice za tlačno litje, kot tudi njihova popolna integracija v smislu podatkovne tehnologije. To še posebej velja za poboljšanje forme, vakuumski sistem in lokalno stiskanje taline med strjevanjem. Predstavljenih je bilo nekaj inovativnih rešitev podjetja FONDAREX, ki

seveda niso omejene na velike ulitke, temveč jih je mogoče izvesti tudi na manjših strojih za tlačno litje.



Bernd Prillhofer, AMAG CASTING GmbH (AT) – predavatelj

24. B. PRILLHOFER¹, W. FRAGNER², J. KNACK¹, G. GABARDI¹,
¹AMAG Casting GmbH, ²AMAG Austria Metall AG, (AT): **Recikliranje toplotno utrjevalne zlitine z majhnim ogljičnim odtisom za komponente povezane z varnostjo**

Aluminij ima na področju avtomobilske tehnologije veliko tradicijo, njegova uporaba pa bo naraščala tudi v prihodnje. Vendar pa zahteva izdelava ozračju prijaznih izdelkov iz Al visoko raven poznavanja materialov in recikliranja, še posebej ob upoštevanju strogih zahtev za z varnostjo povezane sestavne dele za šasije in platišča. V sodelovanju z družbo AUDI je podjetje AMAG Casting GmbH uspešno razvilo reciklirano zlitino za litje AlSi7.REC, tj. zlitino AlSi, ki tako kot primarna zlitina izpolnjuje vse tehnične zahteve, sočasno pa je mogoče zaradi povečanega razpona dovoljenega odstopanja zlitine močno povečati delež recikliranih materialov in izkoristiti Al odpadke, ki jih v preteklosti ni bilo mogoče uporabiti. To vključuje tudi reciklirane odpadke. Na podlagi subtilne in premišljene zasnove zlitine je lahko podjetje AMAG Casting GmbH premostilo škodljive učinke različnih elementov in izpolnilo stroge specifikacije za komponente, hkrati pa je povečalo delež recikliranega materiala na več kot 70 %, skladno s standardom EN ISO 14021:2016. Povečani razpon dovoljenega odstopanja zlitine močno poveča delež recikliranih materialov in izkoristi Al odpadke, ki jih v preteklosti ni bilo mogoče uporabiti. Rezultati prikazujejo razvoj reciklirane zlitine za litje, ki izpolnjuje stroge zahteve za z varnostjo povezane sestavne dele v okviru serijske proizvodnje, ki je vidna končnemu uporabniku, hkrati pa tudi zahteve, na podlagi katerih je mogoče izdelek označiti kot okolju prijazen (majhen ogljični odtis).



Jiehua Li, Montanuniversität Leoben (AT) – predavatelj

25. J. LI, Montanuniversität Leoben (AT): **Ugotovitve na podlagi atomske DFT in eksperimentalne TEM APT o porazdelitvi modifikacijskih toplencev znotraj evtektičnega Si v zlitinah na osnovi Al-Si**

Sprememba evtektičnega Si iz kosmičaste v vlaknasto obliko pri zlitinah na osnovi Al-Si je ključnega pomena za izboljšanje lastnosti zlitin Al-Si. Trije dobro poznani mehanizmi modifikacije (mehanizem dvojčenja zaradi nečistoč, mehanizem povratnega roba dvojčične ploskve, kot tudi zastropitev mehanizma) so pod določenimi pogoji na splošno sprejemljivi. Vendar pa ITT, TPPE, ali zastropitev mehanizma TPPE: ni mogoče uporabiti za interpretacijo vseh procesov, ki spremljajo modifikacijo, kar pomeni, da lahko vplivajo tudi drugi dejavniki. Zato so predlagali prehajanje topljenja [1]. Predstavljena je bila simulacija atomske teorije gostotnega funkcionala (DFT) in eksperimentalna transmisijaska elektronska mikroskopija (TEM), vključno z visokokotnim obročastim detektorjem za opazovanje vzorca v temnem polju (HAADF) in spektroskopijo z izgubo energije elektronov (EELS) v transmisijski elektronski mikroskopiji (STEM) skupaj z atomsko tomografijo (APT) za pojasnjevanje porazdelitve modifikacijskih elementov (Sr, Na, in Eu) znotraj evtektičnega Si. Tako simulacija atomske DFT kot eksperimentalna TEM APT sta razkrili, da imajo modifikacijski elementi tri različne vloge: (i) adsorbcija na presečišču faset Si, ki sproža mehanizem tvorbe IIT, (ii) adsorbcija na povratnem robu dvojčične ploskve, ki sproža mehanizem rasti TPPE,

(iii) adsorpcija pred rastjo dvojčkov Si, ki sproža prehajanje topljenca znotraj evtektičnega Si. Ta predstavitev ne predstavlja zgolj neposrednih eksperimentalnih dokazov o priznanem zastupljanju TPPE in mehanizmih rasti IIT, ampak omogoča tudi celovit vpogled v vedenje modifikacijskih topljenec, vključno s prehajanjem topljenca znotraj evtektičnega Si.



Marco Giegold (namesto
Maurro Fassina),
ITALPRESSEGAUSS s.p.a.
(IT) – predavatelj

26. M. FASSINA, ItalPresseGauss (IT), namesto njega predstavljal M. Giegold: **Tehnični pomisleki za zmanjševanje izmeta pri visokotlačnem litju Toggle Free**

Zmanjšanje izmeta vodi v zmanjšanje stroškov v povezavi s surovinami, za ponovno litje novih delov se porabi manj energije. Prav tako se zmanjša količina izpustov CO_2 . Pri proizvodnji 50.000 ton letno zmanjšanje izmeta za zgolj 2% pomeni skoraj 605 ton prihranka CO_2 . Ker je visokotlačno litje Toggle Free dandanes zaradi hitro spreminjajočih zahtev v povezavi s tlačnim litjem prepoznano kot najboljša možnost v industriji, je vprašanje kako specifične značilnosti zasnove strojev za visokotlačno litje Toggle Free vplivajo na stopnje izmeta. Prav tako je vprašanje, katera kombinacija značilnosti zagotavlja najboljše rezultate glede na konkretne cilje litja. Posebna pozornost je namenjena naslednjim vidikom: zaprta zasnova enote – kako konstrukcijski materiali, gibanje plošče, zaklepni mehanizem povezovalnega droga, sile stiskanja in drugi

ključni vidiki pomagajo zmanjševati tveganje v povezavi s popačenjem forme ali toplotnim raztezanjem-pomembnima vzrokoma za nastanek izmeta, nadzor enote za brizganje – kako analiza podatkov o toku taline v realnem času v kombinaciji s samodejnim prilagajanjem hitrosti bata vpliva na natančnost litja, digitalna orodja – kako digitalne rešitve dopolnijo zasnovo opreme za visokotlačno litje Toggle Free v povezavi z zmanjšanjem izmeta. Umetno inteligenco lahko tlačne livarne uporabijo za pozorno spremljanje ključnih kazalnikov učinkovitosti skladno s proizvodnimi cilji, opredelitev vzrokov za izmet in avtomatizacijo prilagajanja postopka/nadzora ter tako zagotovijo optimalno učinkovitost.



Robert Kleinhans, Fraunhofer
IGCV (DE) – predavatelj

27. R. KLEINHANS, M. PINTORE, S. KLAN, S. JUGERT, W. VOLK, Inštitut za livarsko, kompozitno in obdelovalno tehnologijo Fraunhofer (DE): **Možnosti neposredne uporabe odpadkov v livarnah aluminija**

Ponovna uporaba odpadkov v livarnah lahkih kovin je neizogibna zaradi potrebe po učinkovitosti surovin in zmanjšanju izpustov plinov z velikim potencialom globalnega segrevanja. Splošno znano je, da znaša potreba po energiji za ponovno taljenje aluminija samo 7-8 % energije, potrebne za proizvodnjo sekundarnega Al. Izrabljeni izdelki imajo nični ogljikov odtis. Zato je mogoče pričakovati skoraj linearno korelacijo med količino odpadkov in zmanjšanjem izpustov. Poleg zmanjšanja izpustov CO_2 je mogoče močno zmanjšati tudi stroške. En del tega pristopa se osredotoča na natančnejše razvrščanje za pridobitev večjih količin različnih razredov zlitin. Ob konvencionalnih metodah, kot so spektrometrija lasersko vzbujene plazme, rentgenske metode in

razvrščanje z optično emisijsko spektrometrijo, bi lahko ena rešitev temeljila na fotometričnem postopku, ki je povezan z zbirko podatkov o materialu. Drugi del se osredotoča na uresničljive lastnosti materiala med ponovnim taljenjem in litjem. Če vzamemo primer ponovnega taljenja Al platišč, glav valjev in pločevine različnih kakovostnih razredov, lahko dokažemo, da visoka stopnja učinkovitosti ni v nasprotju z neposredno uporabo odpadnega materiala v livarnah.

Soočiti se je treba z več težavami, npr. obdelavo premazov in nečistoč, kot sta olje in premog. Obdelava talin se izvaja v skladu z industrijskimi standardi. To pomeni, da postopek vključuje razplinjanje z mešalom, udrobnjevanje in modifikacijo Al-Si zlitin. Obdelavi s soljo se zaradi velikih količin žlindre izogibajo. Posebej razvita rešitev programske opreme podpira shranjevanje odpadne kovine in vodi skozi postopek taljenja za talitev določene zlitine z ustreznimi količinami vhodnih materialov. Upoštevali so vedenje in učinek legirnih elementov na lastnosti, kot tudi inženirske standarde za zlitine lahkih kovin. Močan pozitiven učinek odpadnega materiala je mogoče končno potrditi z analizo življenjskega cikla v skladu s standardom DIN EN ISO 14040.



Ivan Jandrić, University of Zagreb (CRO) – predavatelj

28. JANDRLIĆ¹, L. MRKOBRADA¹, M. MIKULIĆ², L. GRUBIŠIĆ¹,
¹University of Zagreb: Faculty of Metallurgy, ²DEPOS d.o.o., (CRO):
Krožno gospodarstvo in odpoklic aluminijastih pločevink

Zaradi osnovne pestre ponudbe hrane in pijač, nastajajo velike količine odpadkov. Za zagotavljanje trajnosti je Evropska komisija v marcu 2020 vložila nov predlog akcijskega načrta za krožno gospodarstvo. Glavni cilj tega načrta je preprečevanje nastajanja odpadkov in uvajanje boljšega ravnanja z odpadki. Poleg embalaže iz stekla in PET se za hrano in pijačo najpogosteje uporabljajo embalaže iz Al, ki predstavljajo velik delež odpadkov. Ker je Al več kot primeren za recikliranje, se v proizvodnji embalaže iz Al vlagajo precejšnji napor za povečanje deleža recikliranega Al. Prikazan je postopek recikliranja Al pločevink. V prvem delu je podan pregled dela in uspehov na področju recikliranja embalaže iz Al. Prav tako je v prvem delu podan pregled učinkov recikliranja na zmanjšanje toplogrednih plinov, kot tudi na zmanjšanje porabe energije v primerjavi s primarno proizvodnjo Al. V drugem delu so predstavljene posamezne stopnje priprave in obdelave odpadnega Al vse do končnega izdelka. Kemijske in mehanske lastnosti proizvedenih polizdelkov so bile preizkušene v različnih korakih obdelave. Navedene preiskave so bile izvedene z namenom določitve osnovnih lastnosti pridobljenega sekundarnega aluminija, na podlagi katerih bi lahko njegovo uporabo razširili tudi v druge industrije.



Tilen Švarc, Univerza v Mariboru (SI) – mladi doktorant

29. T. ŠVARC¹, Ž. JELEN¹, B. MAJERIČ^{1,2}, M. ZADRAVEC¹,
 T. GOMBOC¹, R. RUDOLF^{1,2}, ¹Univerza v Mariboru: Fakulteta za
 strojništvo, ²Zlatarna Celje d.o.o. (SI): **Recikliranje hitrih antigenskih
 testov: ekstrakcija nanozlata**

V času večje okoljske ozaveščenosti in vse pogostejših praks krožnega gospodarstva, se vse bolj izogibamo izdelkom za enkratno uporabo. Kljub temu pa so tovrstni izdelki v nekaterih panogah, kot na primer v medicini, nenadomestljivi. Izrazit primer so hitri antigeni testi za virus SARS-CoV-2, ki temeljijo na imunokromatografskih testih s stranskim tokom. Hitrejši antigeni testi so sestavljeni iz plastičnega ohišja in testnih lističev, ki vsebujejo nanozlato. Ohišja so zgrajena iz polistirena z visoko udarno žilavostjo ali akrilonitril butadien stiren kopolimera, zato njihova reciklaža ni zapletena. Po drugi strani pa je reciklaža testnih lističev z nanozlatom bistveno kompleksnejša in v postopku reciklaže plastičnega ohišja predstavlja oviro. Testne lističe je v postopku reciklaže potrebno ločiti od ohišij, saj lahko v nasprotnem primeru negativno vplivajo na lastnosti končnega materiala. Nanozlato na testnih lističih pa predstavlja povsem novo priložnost za znanstveno študijo, kjer bi z reciklažo sintetizirali nove nanodelce zlata. Klasična

reciklaža zlata iz elektronskih odpadkov vključuje uporabo močnih kislin kot je zlatotopka. Vendar je nanozlato možno raztopiti z manj agresivnimi topili zaradi njihovih edinstvenih lastnosti, kot je visoko razmerje med površino in prostornino. Predstavljen je bil potencial reciklaže hitrih antigenskih testov skupaj z osnovnimi izhodišči in dosedanjimi spoznanji, ki omogočajo realizacijo ponovne uporabe hitrih antigenskih testov za sekundarne surovine. Z razvojem postopka recikliranja, ki loči testne lističe od ohišij, lahko zmanjšamo končni delež medicinskih odpadkov. Prizadevanje za bolj trajnostno prihodnost je ključnega pomena iskanja inovativnih rešitev, ki bodo spodbujale ponovno uporabo virov in zmanjševale količino odpadkov. Prikazana je ideja pridobivanja nanodelcev zlata iz hitrih testov s hidrometalurškimi postopki in možnost ponovne sinteze nanodelcev zlata z ultrazvočno razpršilno pirolizo.



Gabor Gyarmati, University of Miskolc (HU) – mladi doktorant

30. G. GYARMATI, T. MENDE, University of Miskolc (HU): **Interakcija med delci udrobnjevalca in oksidnimi bifilmi v tekočih aluminijevih zlitinah**

Raziskave so pokazale, da lahko dodatek različnih predzlitin udrobnjevalcev vpliva na sedimentacijo in posledično na prostorsko porazdelitev oksidnih bifilmov v talini. Raziskana je bila interakcija delcev TiB_2 in $(Al, Si)_3Ti$ z napakami bifilmov v tekoči zlitini Al-Si-Mg-Cu. Delci TiB_2 in Al_3Ti so bili dodani v tekočo zlitino v obliki predzlitine $AlTi5B1$, kristalizacijo $(Al, Si)_3Ti$ pa so sprožili z raztopitvijo faze Al_3Ti , ki ji je sledilo znižanje temperature taline. Interakcijo med delci udrobnjevalca in bifilmi so proučili z optičnim in vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM), spremembe kakovosti taline pa so analizirali z računalniško tomografijo (CT) vzorcev pri zmanjšanem tlaku (RPT). Odkrili so, da se delci TiB_2 sprimejo na oksidne bifilme, ulete v tekoči kovini, delci $(Al, Si)_3Ti$ pa se na bifilme pritrdijo zaradi heterogene nukleacije $(Al, Si)_3Ti$ na

bifilmih in delnega zajema segmentov oksidnega filma med rastjo delcev $(Al, Si)_3Ti$. Teženje različnih oksidnih faz k heterogeni nukleaciji $(Al, Si)_3Ti$ je bilo ocenjeno z modelom E2EM, s katerim so ugotovili, da lahko tako $MgAl_2O_4$ kot MgO tvorita energetsko ugodne in koherentne fronte z $(Al, Si)_3Ti$. Pritrditev delcev udrobnjevalca na oksidne bifilme pripomore k sedimentaciji bifilmov, kar vodi v manjšo poroznost vzorcev RPT.



Lorena Mrkobrada, University of Zagreb (CRO) – mlada doktorantka

31. I. MRKOBRAĐA, I. JANDRLIĆ, F. KOZINA, T. BRILIĆ, University of Zagreb: Faculty of Metallurgy (CRO): **Plastične nestabilnosti med obdelavo zlitine AlMg**

Med plastično deformacijo večine kovinskih materialov v nekaterih delih materiala, ki jih imenujejo cone deformacije, poteče normalen tok materiala. Izjeme so nekatere zlitine, kjer je proces plastične deformacije nestabilen in prihaja do nehomogenega plastičnega toka pri določenih parametrih plastične obdelave. Primeri takšnih nestabilnosti so nehomogene plastične deformacije, kot so Lüdersove črte in učinek Portevin-Le Chatelier, ki se pojavljajo v nekaterih delih cone deformacije v obliki deformacijskih črt. Takšne nestabilnosti povzročajo težave med obdelavo kovine v končni izdelek. Raziskava se je osredotočila na določanje vrste nestabilnosti v zlitini AlMg. Z uporabo metode DIC so bili izvedeni vizualizacija toka materiala, odklona in meritve deformacije

med statičnim nateznim preizkusom. V rezultati nateznih preizkusov so zaznali večkratno zobčanje krivulje obremenitev-deformacija med plastično deformacijo. Analiza DIC je razkrila

nehomogeno deformacijo v celotnem času preizkusa, na podlagi česar so razumno sklepali, da je bila zaznana nestabilnost učinek Portevin-Le Chatelier. Da bi preiskali mehanizem deformacije, so mikrostrukture na vzorcu opisali pred širjenjem črte PLC, med njo in po njej. Strukturna analiza je pokazala, da deformacija poteka preko gibanja dislokacij, kar dokazuje njihova povečana gostota na mestu nastale črte.



Tilen Balaško, Univerza v Ljubljani (SI) – predsedujoči sekcije

32. T. BALAŠKO, M. VONČINA, J. MEDVED, Univerza v Ljubljani: Naravoslovnotehniška fakulteta (SI): **Vpliv dodatka lantana na strjevanje zlitine EN AW-7175**

Zlitine iz sistema Al-Zn-Mg-Cu se uporabljajo za različne aplikacije predvsem zaradi visokega razmerja trdnost/masa in je njihova uporaba razširjena predvsem v sektorju prometa. Zaradi nižje mase in odličnih mehanskih lastnosti v nekaterih primerih že nadomeščajo jekla. To je s stališča zmanjšanja CO₂ odtisa in toplogrednih plinov zelo pomembno. 20% vseh toplogrednih plinov na območju EU proizvede prometni sektor, od tega 72% cestni promet. Zlitine iz sistema Al-Zn-Mg-Cu imajo nizko gostoto v kombinaciji s povišanimi mehanskimi lastnostmi v primerjavi z jekli, ki se uporabljajo za nosilne komponente. Za doseganje zahtevanih mehanskih lastnosti se te zlitine tudi toplotno obdelujejo. V sistemu Al-Zn-Mg-Cu je pomembno predvsem razmerje Zn/Mg, saj od tega zavisijo katere faze bodo prevladovali in vplivale na utrjevanje zlitin. Obravnavana je bila zlitina EN AW-7175, ki ima razmerje Zn/Mg 2,4-2,5 kar pomeni, da je glavna utrjevalna faza η oz. Mg(MgZn₂). Zlitine v litem stanju nimajo zahtevanih mehanskih lastnosti. To lahko odpravimo med strjevanjem in sicer z zmanjšanjem sekundarnih dendritnih vej α-Al. Namen dodatka La je bil prav zmanjšanje velikosti kristalnih zrn α-Al. V raziskavi je bil obravnavan vpliv dodatka La na strjevanje (likvidus, solidus interval strjevanja in temperaturo izločanja faz med strjevanjem) obravnavanih zlitin. Izvedeni so bili termodinamični izračuni po Scheilovem modelu strjevanja, ki temelji na metodi CALPAD, ETA (enostavna termična analiza) in kristalizacija velikosti kristalnih zrn.



Maja Vončina, Univerza v Ljubljani (SI) – plakatna predavateljica

33. M. VONČINA¹, A. PAVŠIČ¹, I. PAULIN², J. MEDVED¹, M. PETRIČ¹, ¹Univerza v Ljubljani: Naravoslovnotehniška fakulteta, ²Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, (SI): **Ocena kakovosti udrobnilnih sredstev**

Osnovni cilj udrobnjevanja v Al-zlitinah je v zmanjšanju velikosti strjenih kristalnih zrn, s čimer se odpravi prisotnost velikih stebrastih zrn. Proces udrobnjevanja je ključen za izboljšanje mehanskih lastnosti in splošne učinkovitosti zlitine. Za odlične rezultate udrobnjevanja zrn, je bistvenega pomena uporaba visokokakovostnega udrobnilnega sredstva. To vključuje upoštevanje različnih dejavnikov, kot so število delcev Al₃Ti in TiB₂, primerna oblika in velikostna porazdelitev delcev ter optimalno razmerje Ti/B. Za oceno kakovosti udrobnilnih sredstev je bila izvedena raziskava z uporabo električne upornosti in izvedene analize diferenčne vrstične kalorimetrije in mikrostrukture za potrditev in podporo pridobljenih rezultatov. Med udrobnilnimi sredstvi je najnižjo električno upornost izkazalo sredstvo B(Al-3Ti-1B), ki je imelo nizko vsebnost nečistoč, kar kaže na visoko stopnjo čistosti in kakovosti. Nečistoče, kot sta Fe in Si, lahko negativno vplivajo na učinkovitost udrobnjevanja in prispevajo k večji elektropornosti. Razen tega je sredstvo

B pokazalo ustrezno število in velikostno porazdelitev delcev TiB_2 in Al_3Ti , kar vzpodbuja učinkovito nukleacijo, ki je bistvena za udrobnjevanje. Velikostna porazdelitev delcev ima tudi ključno vlogo pri zagotavljanju enakomerne disperzije po zlitini, kar vodi do doslednega in učinkovitega udrobnjevanja zrn. Udrobnilno sredstvo B ima tudi optimalno razmerje Ti/B 3,6, kar vpliva na nastanek in porazdelitev nukleirajočih delcev. Nasprotno pa so druga udrobnilna sredstva pokazala večjo električno upornost, kar lahko pripišemo dejavnikom kot sta količina in velikost delcev TiB_2 in Al_3Ti ter prisotnost nečistoč, kot sta Fe in Si. Razen tega lahko prisotnost vključkov v zlitini prispeva k večji električni upornosti.



Iveta Vaskova, Technical university of Košice (SK) – predsedujoča sekcije

34. I. VASKOVA¹, P. DELIMANOVA¹, M. HRUBOVČAKOVA¹, L. JANKOVČIN², ¹Technical University of Kosice, ²Handtmann Slovakia, (SK): **Poznavanje razvoja in uporabe mešanic za forme in jedra v livarski industriji**

Predstavljena sta razvoj in uporaba mešanic za forme in jedra v livarski industriji. Mešanice za forme in jedra so materiali, ki se uporabljajo za izdelavo form in jeder za litje različnih predmetov. Ustrezna izbira in uporaba teh mešanic sta ključnega pomena za izdelavo kakovostnih ulitkov. Na področju mešanic za forme in jedra je bil narejen velik napredek, ki vodi do izboljšanja postopkov litja. Izdelane so bile nove mešanice z izboljšanimi lastnostmi, npr. visoko trdnostjo, toplotno stabilnostjo ter odpornostjo na obrabo in erozijo. Ti napredki omogočajo proizvodnjo kompleksnih in zapletenih ulitkov z visoko dimenzijsko natančnostjo in kakovostjo površine. V livarski industriji prav tako postajajo vse pomembnejše trajnostne prakse. Raziskovalci proučujejo uporabo okolju prijaznih veziv in aditivov v mešanicah za forme in jedra. Te okolju prijazne alternative zmanjšujejo vpliv na okolje ter hkrati izboljšujejo varnost in zdravje zaposlenih delavcev. Na področju razvoja in uporabe mešanic za forme in jedra v livarski industriji, je bil narejen velik napredek. Uvedba novih materialov in optimizacija sestav mešanic vodita v višjo kakovost ulitkov, dimenzijsko natančnost in trajnost. Z nadaljevanjem raziskav na tem področju se bosta učinkovitost ter ekološki problem livarske proizvodnje še dodatno izboljšala.

35. L. SZYMANSKI¹, A. BIGOS², M. PIESZCZEK^{1,3}, K. ŽAK¹, F. WOZNIAC¹, N. SOBCZAK², J. SOBCZAK¹, S. SOBULA¹, E. OLEJNIK^{1,3}, P. KURTYKA³, ¹AGH University of Science and Technology, Cracow, Faculty of Foundry Engineering, ²Polish Academy of Sciences: Institute of Metallurgy and Materials Science, Cracow, ³Innerco sp. z.o.o., Cracow, (PL): **Mikrostruktura, mehanske lastnosti in obraba kompozitnega ulitka, ojačanega z oksidno keramiko**

Statistični podatki pravijo, da približno 80% vseh okvar strojev in naprav povzroči površinska obraba zaradi medsebojnega drgnjenja delov ali degradacije vodika. Abrazivna obraba je draga in resna težava v številnih industrijah, kot so: rudarstvo, cementna industrija in industrija agregatov. Posledično je treba zasnovati materiale, ki jih odlikuje kombinacija cene in industrijske proizvodnje. Kovinski kompoziti (MMC-Metal Matrix Composite), osnovani na izbranih vrstah jekla in železa se zaradi odlične odpornosti proti obrabi obširno uporabljajo v proizvodnji »obrabnih delov«. Prav tako so železove zlitine v MMC zaradi nizkih stroškov in dobrih mehanskih lastnosti pogosto uporabljajo za osnovno matrico. Zaradi ugodne cene in izvrstnih mehanskih lastnosti (visoka trdnost) je v fazi ojačitve še posebej privlačna uporaba oksidne keramike. Predstavljena je metoda za ojačitev Fe zlitine s prostorsko keramično strukturo. Keramični predoblikovanci so izdelani iz oksidne keramike v obliki ZrO_2 in Al_2O_3 . Predstavljen je bil postopek optimizacije proizvodnje keramičnih predoblikovancev, namen



Sebastian Kastelic, Univerza v Ljubljani (SI) – predsedujoči sekcije



Urška Klančnik, Valji d.o.o. (SI) – predsedujoča sekcije



Mitja Petrič, Univerza v Ljubljani (SI) – predsedujoči sekcije

katerega je bil izboljšanje mehanskih in obrabnih lastnosti kompozitnih ulitkov. Vzorci, zajeti iz lokalnega območja ojačitve kompozita, so bili analizirani z vidika mikrostrukture, kemijske sestave, mehanskih lastnosti in odpornosti na obrabo. Potrjena je bila infiltracija keramičnih struktur s staljeno kovino (lito jeklo in belo lito železo s kromom). Območje prehajanja med keramično fazo in kovinsko matrico zlitine je bilo v obeh primerih brez kontinuitete. V kompozitni coni s predoblikovancem ZrO_2 je bila zaznana kompleksna faza znotraj območij prehajanja, zaznana pa je bila tudi na fronti matrica/ojačitev. Ta območja vsebujejo Zr, Al, Mg, Mn, Fe in Cr, ki verjetno nastajajo zaradi kemijske reakcije med ZrO_2 in belim litim železom s kromom. Mehanski preizkusi so pokazali skoraj dvakratno povečanje trdote znotraj območja kompozitnih con. Obrabne lastnosti con MMC so preučili z dvema različnima metodama. Abrazivna metoda v Miller testu je pokazala manj kot polovično izgubo teže v primerjavi s karbonskim litim jeklom in belim litim železom s kromom. Indeks obrabe MMC, določen z metodo krogle na disku, je bil skoraj 50% manjši v primerjavi z monolitno matrico kompozitnih ulitkov.

36. L.SZYMANSKI¹, JERZY J. SOBCZAK¹, N. SOBCZAK², A. BiGOS², T. TOKARSKI⁴, W. MAZIARZ², E.OLEJNIK^{1,3}, R. CHULIST², K.ZAK¹, G.BRUZDA⁵, ¹AGH University of Science and Technology: Faculty of Foundry Engineering (PL), ²Polish Academy of Sciences: Institute of Metallurgy and Materials Science (PL), ³AGH University of Science and Technology: Academic Centre of Materials and Nanotechnology (PL), ⁴INNERCO sp. z. o. o, (PL), ⁵Lukasiewicz Research Network-Krakov Institute of Technology (PL): **Pomen visoko temperaturne omočljivosti z vidika izdelave kompozita s kovinsko osnovo ojačenega s keramičnimi fazami**

Lokalno ojačani kovinski kompoziti (MMC – Metal Matrix Composite) so eni izmed najobetavnejših materialov, ki so primerni za izdelavo kovinskih delov z visoko odpornostjo na obrabo. Kovinski kompoziti, ojačeni s keramičnimi delci, so ena izmed najpogostejših skupin materialov na področju obrabnih delov. Trenutno je mogoče MMC proizvesti z metodami ex-situ kot tudi in-situ. V obeh primerih predstavljajo interfazne reakcije ključni vidik že na ravni zasnove kompozita. Zagotavljanje dobrega spoja med ojačitvijo faze in matrico omogoča zanesljivo strojno obdelavo. Pri tehnikah s pomočjo tekočine sta glavna pojava, ki določata strukturo in lastnosti MMC, omočljivost in reaktivnost. Avtorji so predstavili rezultate visokotemperaturne omočljivosti različnih ojačitev. Dobljeni rezultati razkrivajo znatne razlike pri proizvodnji MMC z metodami ex-situ in in-situ. Interakcijo med taljenimi zlitinami na osnovi železa (sive litine) in izbranimi reaktivnimi keramičnimi substrati (grafit + titan) pri visoki temperaturi (1.350°C, argonska

atmosfera) so preučili s pomočjo kapljice parov. Med visokotemperaturnim preizkušanjem so posneli slike parov z visokohitrostno kamero CDD z visoko ločljivostjo in jih uporabili za oceno stičnih kotov v odvisnosti od časa. Ti preizkusi dokazujejo dobro omočljivost in hitro infiltracijo staljene zlitine Fe v grafitne substrate, ki vsebujejo Ti. Nato so določili podrobne strukturne lastnosti strjene kapljice/parov substratov in sicer s svetlobnim mikroskopom in elektronskim vrstičnim mikroskopom v povezavi z energijsko-disperzno rentgensko spektrometrijo. Na podlagi pridobljenih rezultatov so lahko prikazali potek sinteze titanovega karbida ob upoštevanju vmesnih kemijskih reakcij v ternarnem sistemu Fe-Ti-C. Struktura parov strjenih kapljic z uporabo različnih rentgenskih difrakcij, SEM, TEM in analize EDS, je potrdila prisotnost faz TiC , Fe_2Ti in FeTi , ki so nastale reaktivno, v substratih, ki so se infiltrirali v tekočo kovino. Za primerjavo so enake preizkuse pod enakimi preizkusnimi pogoji izvedli s substrati na osnovi oksidov (Al_2O_3 , ZrO_2). Dobljene rezultate so proučili z vidika specifičnih in glavnih razlik med metodami ex-situ in in-situ, ki so jih uporabili za sintezo kompozitov s kovinskimi matricami na osnovi Fe s postopkom z uporabo tekočine. Potrdili so pomanjkanje omočljivosti med oksidnimi keramikami in zlitinami na osnovi železa.

Izvillečke pripravil:

Zasl. prof. Alojz Križman



DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE

Vabilo za

64. IFC PORTOROŽ 2024

z livarsko razstavo

18. - 20. SEPTEMBER 2024

Kontakt: DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE,

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

T: +386 1 2522 488

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

AKTUALNO / CURRENT

Seminar za železove livarne v ÖGI Leoben, Avstrija

Društvo livarjev je organiziralo dvodnevni seminar za železove livarne 8.- 9. 11. 2023 v izvedbi ÖGI (Avstrijski livarski inštitut) v Leobnu na temo Livarskih in jedrnih peskov.

Namen seminarja je bil obnoviti in razširiti znanje ter razumevanje lastnosti in meritev ter seveda preizkusiti in izboljšati praktične sposobnosti strokovnjakov na tem področju. Predavali so Mirnes Berbić, Hubert Kerber in Eduard Koppensteiner. V laboratoriju sta strokovno pomoč nudila tudi Elenor Schwartz in Jakob Koller.

Seminarja se je udeležilo 11 slušateljev iz šestih slovenskih livarn: CIMOS d.d., ETA Cerkljevo d.o.o., KOVIS livarna d.o.o., Livarna TITAN d.o.o., OMCO Metals d.o.o. in VALJI d.o.o.

Oba dneva sta bila sestavljena iz treh sklopov predavanj in praktičnega dela v laboratoriju, kar je v nadaljevanju na kratko povzeto.

Za uvod nam je Mirnes Berbić ponovil osnovne zahteve sestave, priprave ter testiranja livarskega peska. Katere so osnovne komponente in njihove lastnosti ter posledično pričakovane lastnosti livarskega in jedrnega peska. Omenili je tudi mešanje, ki je pomemben del procesa pri proizvodnji ulitkov. Dotaknili smo se zahtev testiranja livarskega peska in analogije odražanja na procesu formiranja in ulivanja. Prav tako nam je podal primerjavo med prvimi napravami, napravami vmesnega obdobja ter sodobnejšimi napravami za meritve lastnosti livarskih peskov.

Hubert Kerber nam je predstavil delovanje sodobne naprave Zwick Allround Z 005 ProLine, ki omogoča razširjene možnosti analiz meritev livarskega ter jedrnega peska, kar posledično vodi do boljšega razumevanja celotnega procesa v livarni. Poučili smo se tudi o vplivu deleža vode na različne trdnosti in plastičnosti livarskega peska. Za zagotovitev primernih pomerjenih rezultatov smo prešli na tretji sklop, kjer nas je Hubert Kerber spomnil na pomembnost vzdrževanja in kalibriranja merilne naprave, ter da je livarski pesek zelo občutljiv in zahteva zelo precizen način priprave ter pravilno ravnanje z vzorci. Vzorci morajo ustrezati zahtevam in biti brez napak. Pri vzorcih za jedra so pomembni tudi faktorji kalupa, časa, vlage, temperature in tudi drugi parametri.

V nadaljevanju smo se spoznali z laboratorijem, ki omogoča meritve spreminjanja lastnosti pri želeni povišani temperaturi za določen čas. Preostanek dneva smo v laboratoriju izvajali poizkuse na pesku livarskega inštituta, analizirali pa smo lahko tudi lastne vzorce peska. Poizkuse smo izvajali na različnih napravah (GF, Jung, Zwick). Merili smo stisljivost, tlačno trdnost, strižno trdnost, razkolno trdnost, vlažnost peska, propustnost, trdnost kondenzacijske cone, itd. Opazili smo, da ne glede na starost naprave, seveda v kolikor je priprava ter rokovanje z vzorcem pravilna in vzdrževanje naprave primerno, so tudi rezultati primerljivi. Največje razlike smo zabeležili pri Zwick napravi, ki ne poda samo maksimalne pomerjene vrednosti lastnosti livarskega peska, ampak graf spremembe lastnosti s deformacijo. Tako imamo drugačen vpogled v pomerjene lastnosti ter bolje razumemo možnosti doseganja želenih vrednosti livarskega peska.

Drugi dan seminarja smo otvorili s predavanjem Mirnesa Berbića o osnovah jedrnih peskov. Obrazložil je običajne metode proizvodnje organskih in anorganskih jeder kot so: No bake, Hot-Box, Warm-Box, Croning, Water glass in Oil bonded. Pri vsaki metodi nam je razložil tudi proces in čas sušenja ter prednosti in slabosti metode. Predstavil nam je tudi 3D tiskanje, ki se je izkazalo kot zelo uporabno za proizvodnjo jeder kot tudi form, zagotavlja pa tudi možnost izdelave kompleksnih oblik in sestavljanja več delov v eno formo. Ta sklop je zaključil še z premazi za jedra.



V predzadnjem sklopu nam je Eduard Koppensteiner obrazložil razloge in vzroke za pogoste livarske napake kot posledico neprimerne kakovosti, predvsem kako identificirati in interpretirati napake ter kakšne so možnosti odprave pogostih livarskih napak.

Teoretični del je zaključil Hubert Kerber s trendnimi diagrami za optimalne lastnosti livarskega peska, kar zajema odvisnost spremembe tlačne trdnosti, strižne trdnosti, razkolne trdnosti, ter plastičnosti v odvisnosti od vlažnosti livarskega peska.

Preostanek drugega dneva so nam v laboratoriju predstavili delovanje njihovega 3D tiskalnika ter z nami delili nekaj svojih praktičnih izkušenj z njim: prednosti in slabosti natisnjenih jeder in form ter možnosti izkoristka komponent. Ročno smo izdelali vzorce fenolnih jeder na lesenem in kovinskem kalupu, jih testirali in primerjali s tiskanimi s 3D tiskalnikom v različnih smereh.

Seminar smo zaključili z ovrednotenjem in primerjavo laboratorijskih meritev ter individualnimi ugotovitvami, kje imamo še možnosti za izboljšave. Vsi udeleženci seminarja smo od OGI kot izvajalca seminarja prejeli certifikate o udeležbi na seminarju.

Poročal:
Denis Kogoj, Eta Cerkno d.o.o.

AKTUALNO / CURRENT**Pregled livarskih prireditev v letu 2024**

Datum dogodka	Ime dogodka	Mesto in država
16.–18. 01. 2024	EUROGUSS 2024	Nürnberg, Nemčija
16.–18. 01. 2024	23. Druckgusstag	Nürnberg, Nemčija
20.–21. 02. 2024	14. Fachtagung für neue Fahrzeug- und Werk-stoffkonzepte	Stuttgart, Nemčija
29. 02.– 01. 03. 2024	Proizvodni procesi in utjecaj na kvaliteto ljevanih proizvoda	Varaždin, Hrvaška
14.–15. 03. 2024	48. Aachener Gießereikolloquium 2024	Aachen, Nemčija
25.–26. 04. 2024	Große Gießereitechnische Tagung 2024 / 66. Österreichische Gießereitagung	Salzburg, Avstrija
04.–06. 06. 2024	CastForge 2024	Stuttgart, Nemčija
10.–11. 06. 2024	Industrijski forum inovacij, razvoja in tehnologij	Portorož, Slovenija
26.–27. 09. 2024	13. Ranshofener Leichtmetalltage 2024	Saalfelden, Avstrija
08.–10. 10. 2024	Aluminium	Düsseldorf, Nemčija





**Weiler. Foundry solutions
that can handle the heat.**



TERMIT

Družba TERMIT je rudarsko podjetje
za pridobivanje kremenovih peskov



NAŠ PROGRAM:

- Proizvodnja kremenovega peska za: livarstvo, gradbeništvo, športna in otroška igriška, travnate površine, vrtnarstvo
- Proizvodnja keramičnih in kremenovih oplášenih peskov
- Proizvodnja jeder po Croning in Cold box postopku
- Proizvodnja pomožnih livarskih sredstev za: vse vrste aluminijevih, bakrovih, železovih ter jeklenih zlitin

www.termit.si