

LIVARSKI VESTNIK

72/2025

2



DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE
SLOVENIAN FOUNDRYMEN SOCIETY



Chesterton



Tesnila



Livarski pribor



Ognjevarni izdelki



Transportna tehnika



Kompenzatorji



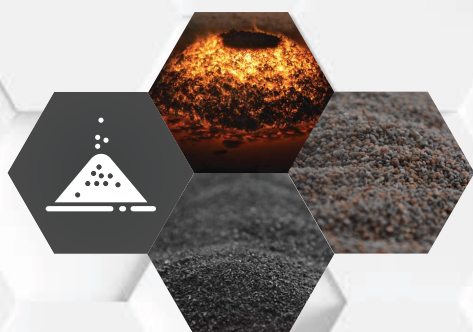
PRODUCTS FOR FOUNDRIES AND STEELWORKS



**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. Primož Mrvar, Univerza v Ljubljani
E-mail: primoz.mrvar@ntf.uni-lj.si

Tehnično urejanje / Technical editing:

mag. Mirjam Jan-Blažić

Uredniški odbor / Editorial board:

prof. dr. Jožef Medved, Univerza v Ljubljani
dr. Mitja Petrič, 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. R.Deike, Universität Duisburg-Essen
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:**

Leemeta d.o.o.

Lektorji / Lectors:

Angleški jezik / English:
Yvonne Rosteck, Düsseldorf
Slovenski jezik / Slovene: Leemeta d.o.o.

Tisk / Print:

Fleks d.o.o.

Naklada / Circulation:

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

Letna naročnina: 40 EUR z DDV

Year subscription: 40 EUR (included PP)

Dano v tisk: junij 2025

**Naslov / Address:**

KS KNEISSL &
SENN TECHNOLOGIE GmbH
Mühlgraben 43b
A-6343 Erl

Direktor: Mag. Franz Senn

T: +43(0)5373/76020-0
F: +43(0)5373/76020-20
E: info@ks-tech.at
www.ks-tech.at

VSEBINA / CONTENTS

Stran / Page:

I. Vasková, P. Delimanová, O. Kožej: Livarski pesek kot ključni dejavnik pri zagotavljanju končne kakovosti ulitka / Foundry Sand as the Main Factor in the Final Quality of The Casting	68
M. Petrič, J. Smole, L. Grahek, N. Nemeček, D. Muck, M. Blečić Kavur, B. Žužek, B. Šetina Batič, P. Fajfar: Izdelava lite replike Negovske čelade / Production of cast replica of Negova helmet	78
F. Zupanič, T. Haga, T. Bončina: Mikrostruktura mikrolegirane zlitine Al-Mn-Cu, ulite s hitrim asimetričnim dvovaljnim litjem / Microstructure of a Microalloyed Al-Mn-Cu alloy, Cast by Rapid Asymmetric Dual-Roll Casting	86
Z. Zovko Brodarac, F. Kozina, J. Burja, B. Šetina Batič, D. Stanić, M. Foltá: Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo reciklirane zlitine AlSi9Cu3(Fe) / Influence of Heat Treatment on Microstructure of Recycled AlSi9Cu3(Fe) Alloy	94

AKTUALNO / CURRENT

67. Avstrijska livarska konferenca	108
Seminar »Spodbujanje energetske učinkovitosti v praksi – "Energy Efficiency First"«	110
Seminar o okoljski problematiki za livarne	111
Indeks razpoložena evropske livarske industrije (FISI)	
naleti na prvo oviro aprila 2025	113
65. IFC PORTOROŽ 2025	114

Popravek: V 1. številki Livarskega vestnika 2025 je navedena napačna cena Livarskega vestnika, ki od leta 2025 dalje znaša 40 €, in ne 35 €.

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

Livarski Pesek kot ključni dejavnik pri zagotavljanju končne kakovosti ulitka

Foundry Sand as the Main Factor in the Final Quality of The Casting

Povzetek

Ta prispevek se osredotoča na analizo vpliva granulometrične sestave različnih mešanic za jedra, sestavljenih iz izbranih vrst livarskih peskov, z namenom odpravljanja napak, zlasti žil, na težko dostopnih mestih ulitkov iz litega železa. Spojine za brizganje jedra sestavljajo celotno prostornino jedra in so pripravljene iz novih, visokokakovostnih surovin. V smislu kakovosti so zahteve zanje višje (imeti morajo večjo odpornost proti vdoru kovin, dobro razgradnjo po ulivanju, daljši rok uporabnosti). Te boljše lastnosti je mogoče zagotoviti s kombinacijo kremenčevih livarskih peskov in livarskih peskov brez kremenca, vendar je treba poznati kamenino in določiti ustrezno količino. V okviru te raziskave je bilo spremljanih pet različnih mešanic za jedra, iz katerih je bilo po postopku cold box izdelanih 15 jeder, pod enakimi pogoji pa je bilo ulitih 10 ulitkov. Vsako zrno je bilo analizirano s sitom, iz katerega so bile pridobljene osnovne lastnosti, kot so vrednost povprečnega zrna d_{50} , stopnja pravilnosti zrn, število zrn, merilo pravilnosti razporeditve zrn, teoretična specifična površina, delež grobih, srednje finih, finih, zelo finih zrn in delež prahu. Nato so bili uliti preskusni ulitki, ki so bili vizualno ocenjeni, ob tem pa je bila spremljana tudi odvisnost med dobljenimi značilnostmi opornikov in kakovostjo površine ulitkov.

Ključne besede: pesek, ulitek, sitna analiza, žile

Abstract

This contribution is focused on the analysis of the influence of the granulometric composition of various core mixtures composed of selected types of foundry sands with the aim of eliminating defects, especially veinings, in hard-to-reach places of cast iron castings. Core molding compounds make up the entire volume of the core and are prepared from new, high-quality raw materials. In terms of quality, higher demands are placed on them (they should have higher resistance to metal penetration, good disintegration after casting, longer shelf life). These better properties can be ensured by a combination of quartz and non-quartz foundry sands, but it is important to know the stone and set the appropriate amount. As part of this research, a total of 5 different core mixtures were monitored, from which a total of 15 cores were produced using the cold-box method and 10 castings were cast under the same conditions. Each grain was subjected to sieve analysis, from which the basic characteristics such as the value of the average grain d_{50} , the degree of regularity of the grain, the number of the grain, the criterion of the regularity of the arrangement of the grains, the theoretical specific surface area, the proportion of coarse, medium, fine, very fine and dust proportions were obtained. Subsequently, test castings were cast, which were visually evaluated, and the dependence between the obtained characteristics of the bracing and the resulting surface quality of the castings was monitored.

Keywords: sand, casting, sieve analysis, veinings

1 Uvod

Glavni prostorninski in masni delež v peščeni mešanici predstavlja pesek. Pesek lahko opredelimo kot zrnati ognjevdržni material z velikostjo delcev nad 0,02 mm. Predstavlja osnovo form in jeder, zato med njegove najpomembnejše lastnosti, vključno z aktivnostjo površine zrn, spadata tudi oglatost in granulometrija delcev. Zadnji dve lastnosti vplivata na gostoto, poroznost in s tem tudi na zračnost in prepustnost mešanice, toplotno raztezanje in nastanek napetosti zaradi omejenega toplotnega raztezanja, toplotno prevodnost mešanice, ki do določene mere določajo trdnost form in jeder [1][2][3][4][5].

Vrednost 0,02 mm je kritična velikost peščenih delcev. Delci, manjši od te vrednosti, se uvrstijo v tako imenovani delež odpranih snovi [6].

Osnovne lastnosti livarskih peskov so zlasti velikost zrn, značilnosti površine zrn in njihova kemijska čistost. Zelo pomembna značilnost je pravilnost peska. Z večanjem vsebnosti nepravilnih zrn se povečuje stisljivost, prepustnost pa se zmanjšuje. Oblika, površina zrn in kemijska čistost bolj vplivajo na trdnost ali tehnološke lastnosti peščene mešanice [7][8].

Zrnavost označuje granulometrično strukturo zrna, tj. velikost delcev, ki sestavljajo zrno. Ta lastnost vpliva predvsem na kakovost površine ulitka. Bolj ko so zrna ostroroba, boljša je kakovost površine ulitka in manjša je hrapavost površine. Vendar se prepustnost zmanjšuje sorazmerno z drobnostjo školjkastih zrn [9][10].

Z večanjem oglatosti zrn se povečuje poraba veziva, saj je učinkovita površina (površina, ki jo navlaži vezivo) oglatih zrn večja od površine okroglih zrn. Na robovih zrn se ovoji veziva pretrgajo, zaradi česar se mehanske lastnosti zmesi zmanjšajo. Povečanje vrednosti mehanskih lastnosti

1 Introduction

The main volume and mass fraction in the molding mixture is the sand. We can define sand as a granular refractory material with a particle size above 0.02 mm. It forms the material skeleton of molds and cores, and therefore its most important properties, including grain surface activity, also include the angularity and granulometry of the particles. These last two characteristics influence bulk density, porosity and thus also on the breathability and permeability of the mixture, thermal expansion, and the generation of stresses from inhibited thermal expansion, thermal conductivity of the mixture, which to a certain extent determine the strength of molds and cores [1][2][3][4][5].

The value of 0.02 mm is the critical size of the sand particles. Particles smaller than this value are classified into the so-called leachable fraction [6].

The basic properties of foundry sands are, in particular, grain size, characteristics of the grain surface and its chemical purity. A very important feature is the regularity of the sand. With the increase in the content of irregular grains, the compactibility increases and the permeability decreases. The shape, surface of the grain and chemical purity rather affect the strength or technological properties of molding mixtures [7][8].

Granularity indicates the granulometric structure of the grain, i.e. the size of the particles that make up the grain. This property mainly affects the quality of the surface of the casting. The finer the sharpening, the higher the quality of the casting surface and the lower the surface roughness value. However, the permeability decreases proportionally with the fineness of the oyster grains [9][10].

As the angularity of the grains increases, the binder consumption

lahko ponovno dosežemo z dodajanjem več veziva, vendar to lahko povzroči več napak na ulitku. Zaradi tega oglatih abrazivov ni mogoče učinkovito kombinirati z organskimi vezivi. Po Jelínku se oglatost povečuje s finostjo peska [11, 12, 13]. Najbolj optimalne so okroglozrnate vrste peska, ki zagotavljajo najbolj optimalen sistem veziva [14].

2 Materiali in metode

Peski: kremenčev pesek z nahajališča Biała Góra, LK-PESEK, Cerabeads, Kerphalite KF, kromitni pesek. Cerabeads je idealen pesek za najzahtevnejše ulitke iz avstenitnih krom-nikljevih jekel ter drugih visoko legiranih jekel in železovih litin [15].

Veziva:

Komponenta I – GASHARZ 6747 – rumena sintetična smola v obliki tekočine z gostoto $1,07\text{--}1,08\text{ g/cm}^3$ po postopku cold-box. Odlikujejo ga visoka temperaturna stabilnost, dolgotrajna obdelovalnost peščene zmesi in nizka stopnja lepljivosti. Obdelano je z aktivatorjem v razmerju 1:1.

Komponenta II – aktivator 8196 je raztopina modificiranega izocianata v ustreznem topilu z gostoto $1,210\text{--}1,230\text{ g/cm}^3$.

Določanje deleža odpranih snovi

Odtehtajte 50 g posušenega in ohlajenega peska v čašo s prostornino 300 ml in dodajte 250 ml destilirane vode. Vsebina posode vre 3 do 4 minute, nato pa se 10 minut meša s propellerskim mešalnikom. Dodajanje natrijevega hidroksida preprečuje nastajanje grudic delcev žlindre. Mešalnik speremo in čašo napolnimo z močnim curkom vode, tako da je njena gladina 10 cm nad spodnjim robom sesalne odprtine šobe. Po 10 minutah – po usedanju se voda z delci, manjšimi od 0,02 mm, posesa s črpalko, visokim 0,1 mm, do oznake na črpalki. Ko se zmes

increases, because the effective surface (the surface that is wetted by the binder) of angular grains is larger than the surface of round grains. At the edges of the grains, the binder envelopes are broken, which leads to a decrease in the mechanical properties of the mixtures. An increase in the values of mechanical properties can be achieved again by adding more binder, but this can cause several casting defects. For these reasons, angular abrasives cannot be effectively combined with organic binders. According to Jelínek, angularity increases with fineness of the sand [11, 12, 13]. The most optimal are round-grained types of sand, which ensure the most optimal binder system [14].

2 Materials and methods

Sands: quartz sand from the Biała Góra locality, LK - SAND, Cerabeads, Kerphalite KF, chromite sand. Cerabeads is an ideal sand for the most demanding castings from austenitic chromium nickel steels and other highly alloyed steels and cast irons [15].

Binders:

Component I - GASHARZ 6747 – yellow synthetic resin in the form of a liquid with a density of $1.07\text{--}1.08\text{ g/cm}^3$ cold-box process. It is characterized by high temperature stability, long workability of the sand mixture and low stickiness. It is processed with an activator in a ratio of 1:1.

Component II - Activator 8196 is a solution of modified isocyanate in a suitable solvent with a density of $1.210\text{--}1.230\text{ g/cm}^3$.

Determination of flushable particles

Weigh 50 g of dried and cooled sand into a beaker with a volume of 300 ml, add 250 ml of distilled water. The contents of the beaker are boiled for 3 to 4 minutes and then mixed with a propeller stirrer for 10 minutes. The addition of sodium hydroxide

usede, se voda ponovno izsesa in postopek se ponovi, dokler voda nad usedlino ni čista. Preostanek čiste vode odlijemo in pesek v čaši posušimo pri temperaturi 100 °C. Na koncu se trdna snov stehta in izračuna količina odpranih snovi [16].

Sejalna analiza

Bistvo testa je določiti granulometrično sestavo zrn s sejanjem na kompletu sit, določiti srednjo velikost zrn d_{50} in stopnjo pravilnosti glede na krivuljo skupne velikosti zrn. Po določitvi odpranih snovi se vzorec posušenih izboklin prelije na predhodno preverjen komplet sit, zapre s pokrovom in za 15 minut se vključi sejalno napravo [16].

Določanje upogibne trdnosti

Ta preskus trdnosti se določi z uporabo upogibne obremenitve na normaliziran vzorec, utrjen na predpisan način, in se določi z upogibno obremenitvijo, pri kateri se preizkušane uniči. Upogibna trdnost je bila izmerjena takoj po utrjevanju upogibnega vzorca in po 24 urah [16].

Proizvodnja jedra

Jedra preskusnih ulitkov so bila izdelana po metodi cold-box-amine, tako da je bila peščena mešanica za jedra vpihana v napravo za izdelavo jeder LAEMPE LL20 pri tlaku 3 bare. Katalizator je DMPA, imenovan katalizator 704. Vsi potrebni materiali so se črpali neposredno iz vsipnih rezervoarjev avtomatskih strojev za izdelavo jeder.

3 Rezultati in razprava

Najnižjo vrednost d_{50} je imel Kerphalite KF, sledil mu je Cerabeads, približno enako vrednost sta imela kremenčev pesek in LK-pesek, najvišjo vrednost pa kromitni pesek. Vrednost srednje velikosti zrn d_{50} (srednje zrno) je osnova za oceno zrnatosti peska, odčitano iz diagrama zrnatosti za vrednost 50 % peska, ki se ujame na sita. Hkrati je odločilen dejavnik za doseganje zahtevane

prevents the clumping of the slag particles. The stirrer is rinsed and the beaker is filled with a strong stream of water so that the level is 10 cm above the lower edge of the suction opening of the nozzle. After 10 minutes - after settling, water with particles smaller than 0.02 mm is sucked off using a suction cup with a height of 0.1 mm, up to the scale on the suction cup. After settling, the water is sucked out again and the process is repeated until the water above the settlement is clean. The rest of the clean water is poured out and the sand in the beaker is dried at a temperature of 100 °C. Finally, the solid is weighed and the number of flushable substances is calculated [16].

Sieve analysis

The essence of the test is to determine the granulometric composition of the grain by sowing on a set of sieves, to determine the size of the medium grain d_{50} and the degree of regularity according to the total grain size curve. After the determination of leachable substances, the sample of the dried outcrop is poured onto a pre-checked set of sieves, closed with a lid and the seeding machine is switched on for 15 minutes [16].

Determination of bending strength

This strength test is determined by the application of a bending load to a normalized sample hardened in the prescribed manner and is determined by the bending stress at which the test specimen is destroyed. The bending strength was measured immediately after hardening of the bending sample and after 24 hours [16].

Core production

The cores of the test castings were produced by the cold-box-amine method by blowing the core mixture in a LAEMPE LL20 core machine at a shot pressure of 3 bars. The catalyst is DMPA called Catalyst 704. All the necessary materials were drawn

kakovosti površine ulitka. Gre za kompromis med zahtevano finostjo površine ulitka in potrebno prepustnostjo za pline peščene mešanice [17].

Razmerje med vrednostmi d_{75}/d_{25} označuje vrednost enakomernosti zrn. Z večanjem nepravilnosti velikosti zrn se povečuje stisljivost in zmanjšuje prepustnost peščene mešanice, hkrati pa se povečuje trdnost, vendar je take forme težje odstraniti od modela. Ko se stopnja pravilnosti zrn približuje vrednosti 1, je ostrost bolj enakomerna in obratno [17]. Za najbolj enakomeren pesek se lahko šteje pesek Cerabeads, ki mu sledijo pesek Kerphalite, kromitni pesek, kremenčev pesek in LK-pesek.

Osnovne značilnosti testiranih peskov, pridobljene po določitvi izluženih snovi na podlagi sejalne analize, so prikazane v preglednici 1.

Na sliki 1 so prikazane krivulje skupne velikosti zrn posameznih peskov. Krivulje skupne velikosti zrn peska Cerabeads in Kerphalite imajo podoben potek, vendar se hkrati razlikujejo od krivulj skupne velikosti zrn kremenovega peska, LK-peska in kromitnega peska zaradi večjih deležev drobnih, zelo drobnih in prašnih delcev.

Največ grobih zrn je bilo v kremenovem in kromitnem pesku, medtem ko sta imela

directly from the filling reservoirs of the automated machines producing the cores.

3 Results and Discussion

Kerphalite KF had the lowest d_{50} value, followed by Cerabeads, quartz sand and LK-Sand had about the same value, and chromite sand had the highest value. The value of the average grain size d_{50} (medium grain) is the basis for assessing the grain size of the sand, it is read from the grain size diagram for the value of 50% of the sand caught on the sieves. At the same time, it is a decisive factor for achieving the required surface casting quality. It is a compromise between the required smoothness of the casting and the necessary breathability of the molding mixture [17].

The ratio of d_{75}/d_{25} values indicates the value of grain uniformity. As the irregularity of the grain size increases, the compressibility increases and the permeability of the molding mixtures decreases, at the same time the strength of the molding mixture increases, but such molds are harder to punch out. When the degree of grain regularity approaches the value 1, the sharpness is more uniform and vice versa [17]. Cerabeads sand can be considered the most uniform sand, followed

Preglednica 1. Rezultati analize testiranih peskov s sitom

Table 1. Results of tested sands sieve analysis

	Kremenčev pesek / Quartz sand	LK-pesek / LK-Sand	Cerabeads	Kerphalite KF	Kromitni pesek / Chromit sand
S_{th} [cm ² /g]	79,51	56,1	107,51	115,95	74,06
AFS	45,3	45,1	61,3	66,1	42,2
d_{50} [mm]	0,316	0,319	0,216	0,207	0,327
d_{75} [mm]	0,240	0,233	0,178	0,163	0,260
d_{25} [mm]	0,419	0,415	0,261	0,249	0,424
d_{75}/d_{25}	57,4	56,1	68,2	65,7	61,4
log w [%]	64,9	60,3	53,4	54	60,1
Delež pod mm / Fraction under [%]	0,05	0,10	0,1	0,91	0,2

LK-pesek in Cerabeads enako, vendar manjšo količino grobih zrn. Kerphalite KF ne vsebuje grobih zrn. Kremenov pesek, LK-pesek in kromitni pesek imajo približno enako in razmeroma visoko vsebnost srednje velikih zrn. V primerjavi s prej omenjenimi peski sta imela Cerabeads in Kerphalite KF trikrat manj srednje velikih zrn, vendar dvakrat več drobnih zrn in 2,5- do 3-krat več zelo drobnih zrn. Ta dva peska sta bila tudi edina, ki sta vsebovala prašne delce (Slika 2).

Po odstranitvi odpranih snovi in drobnih delcev pesek poveča trdnost mešanici z organskim vezivom, ne glede na vrsto kremenčevega peska [1], kar dokazuje tudi graf na sliki 3, kjer ima najvišje vrednosti upogibne trdnosti kromitni pesek, za katerega je značilen najmanjši delež drobnih in zelo drobnih zrn ter največja vsebnost srednjih zrn. Hkrati ima vpliv grobih delcev nad 0,4–0,5 mm negativen učinek na dobljeno trdnost [1], kar v tem

by Kerphalite sand, chromite sand, quartz sand and LK-Sand.

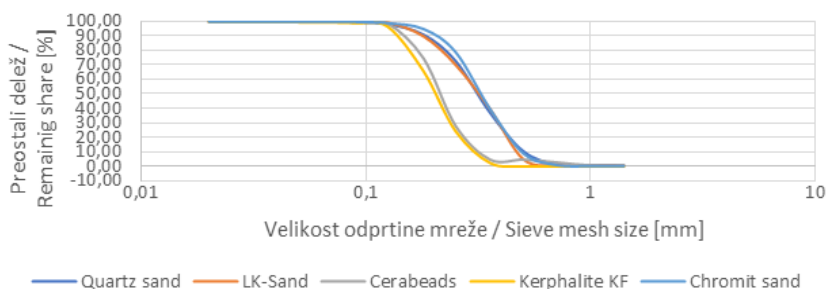
The basic characteristics of the tested sands obtained after the determination of leachable substances from sieve analysis are shown in Tab. 1.

Fig. 1 shows the total grain size curves of individual sands. The total grain size curves of the Cerabeads and Kerphalite sands have a similar course but at the same time different from the total curves of the quartz sand, LK-Sand and chromite sand due to higher proportions of fine, very fine and dust particles.

The highest amount of coarse grains was found in quartz and chromite sand, while LK-Sand and Cerabeads had the same but lower amount of coarse grains. Kerphalite KF doesn't contain any coarse grains. Quartz sand, LK-Sand, and chromite sand has approximately the same and relatively high content of medium-sized grains. Compared to the aforementioned

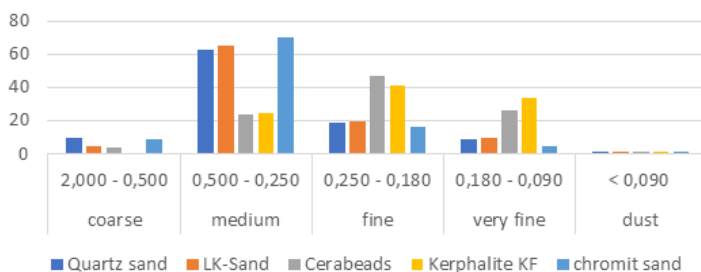
Slika 1. Krivulje kumulativne porazdelitve velikosti zrn testiranih peskov

Figure 1. Cumulative grain size distribution curves of tested sands



Slika 2. Analiza deleža frakcij testiranih peskov na sitih

Figure 2. Fraction proportion analysis tested sands on sieves



primeru ne velja zaradi majhne vsebnosti grobih delcev v testiranih peskih (do 10 %). Drobne frakcije imajo veliko površino in povečajo porabo veziva, zaradi česar se zmanjšata debelina zrnatega ovoja veziva in trdnost zmesi. Tako najbolj drobni deli v ovoju veziva delujejo kot notranje vdolbine [1]. Preizkušene palice, ki so vsebovale LK-pesek, so imele najnižje vrednosti upogibne trdnosti, vendar v tem primeru to ni povezano samo z vsebnostjo drobnih delcev in prašnih frakcij, saj je imel ta pesek približno enak delež vseh frakcij kot kremenčev pesek, temveč je to povezano tudi z ostrimi robovi in nepravilno obliko zrn.

Jedra testiranih ulitkov (Slika 4) so bila izdelana iz petih različnih mešanic, sestavljenih iz različnih peskov in enake količine veziva 1,6 %. Vsi potrebni materiali so se zajemali neposredno iz vsipnih lijakov avtomatiziranih strojev za izdelavo jedra.

Na površini večje luknje preskusnega ulitka iz peščene mešanice, ki je vsebovala kremenčev pesek, so bili izrastki veliki do 1 mm. V malih votlinah je bilo skupaj 6 izrastkov velikosti do 2,5 mm (Slika 5(1)).

Na površini lukenj testnih odlitkov, katerih jedra so bila izdelana iz otočka LK-peska (Slika 5(2)), so bili drobcji, hrapava površina, izrastki velikosti 3–4 mm in nič srhov povzročenih s pokanjem jeder.

Površina lukenj preskusnih ulitkov iz jeder iz peska Cerabeads (Slika 5(3)) je bila rahlo hrapava, brez srhov ali drugih napak.

Površina lukenj preskusnih ulitkov iz jeder peska Kerphalite (Slika 5(4)) je imela gladko površino z znaki nastajanja izjed, brez srhov in drugih napak.

Površina votlin testnih ulitkov iz jeder iz kromitnega peska (Slika 5(5)) je imela hrapavo površino brez srhov in drugih napak.

sands, Cerabeads and Kerphalite KF had three times less medium-sized grains but twice as many fine grains and 2.5 – 3 times more very fine grains. These two sands were also the only ones that contained dust particles (Figure 2).

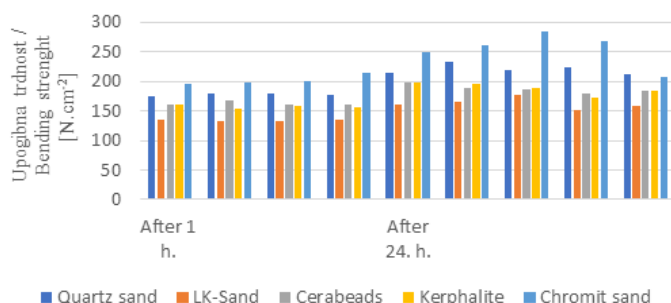
After the removal of leachable parts and fine particles, sand increases the strength of mixtures with an organic binder, regardless of the type of quartz sand [1], which is also proven by the graph in Fig. 3, where the highest values of the bending strength have the chromite sand, which is characterized by the lowest proportion of fine and very fine grains and the highest content of medium grains. At the same time, the effect of coarse particles above 0.4-0.5 mm has an adverse effect on the resulting strength [1], which is not the case in this case due to the small content of coarse particles in the tested sands (up to 10%). Fine fractions have a large surface and increase the consumption of the binder, as a result of which the thickness of the grain envelope of the binder and the strength of the mixtures are reduced. Thus, the finest parts in the envelope of the binder act as internal indentations [1]. The tested bars containing LK-Sand had the lowest bending strength values, but in this case it is not only related to the content of fine particles and dust fractions, because this sand had approximately the same proportion of all fractions as the quartz sand, but it is also related to sharp-edged and irregular grain shape.

The cores of the tested castings (Fig. 4) were made from 5 different core mixtures composed of different sand and the same amount of binder 1.6 %. All the necessary materials were drawn directly from the filling hoppers of the automated core-making machines.

On the surface of the larger hole of the test casting from the core mixture containing

Slika 3. Upogibna trdnost testiranih standardiziranih palic, izdelanih iz testiranih mešanic peščenega jedra

Figure 3. Bending strenght of tested standardized bars made from the tested sands core mixtures



Slika 4. Jedra, izdelana iz mešanic testiranih peskov

Figure 4. Cores made from core mixtures of testes sands



Slika 5. Reprezentativni posnetki površin testiranih ulitkov

Figure 5. Representative images of the tested casting surface

4 Zaključek

Ulitki iz peskov brez kremenca v nasprotju z ulitki iz kremenčevega peska niso vsebovali srhov zaradi nezveznega toplotnega raztezanja kremenčevega peska. Ulitek iz LK-peska brez kremenca je bil edini z vključki in izrastki, kar je povezano z najnižjimi vrednostmi upogibne trdnosti v primerjavi z drugimi peski, kar je povezano z oglato obliko zrn tega peska. Iz rezultatov poskusov izhajajo naslednje ugotovitve:

quartz sand there were outgrowths up to 1 mm in size. There was a total of 6 outgrowths up to 2.5 mm in size in the small cavities (Fig. 5(1)).

On the surface of the holes of the test castings, the cores of which were made from the LK-Sand mixture (Fig. 5(2)) there were crumbs, a rough surface, growths of 3-4 mm in size and no veinings.

The surface of the holes of the test castings from the cores from the Cerabeads

vrednost d_{50} ne vpliva na kakovost površine ulitkov, kromitni pesek je imel višjo srednjo velikost zrn v primerjavi s kremenčevim peskom, kljub temu pa je bila površina ulitkov kakovostna; stopnja pravilnosti zrn S pomembno vpliva na površino ulitkov; delež grobih in prašnih delcev v pesku je povezan z dobljeno kakovostjo ulitkov, vendar je za vsak pesek individualen, kromitni pesek je imel približno enako razmerje posameznih deležev kot kremenčev pesek in LK-pesek, kljub temu ni bilo poleg hrapave površine vidnih drugih napak; teoretična površina zrn S_{th} ima pomemben vpliv na hrapavost ulitka, najvišjo vrednost S_{th} je imel Kerphalite KF, ki je imel tudi najbolj gladko površino.

sand (Fig. 5(3)) it was slightly roughened with no veinings or other defects.

Surface of holes of test castings from cores from Kerphalite (Fig. 5(4)) they had a smooth surface with signs of small pitting without occurrence of veinings and other defects.

Surface of cavities of test castings from cores from chromite sand (Fig. 5(5)) they had a roughened surface with no veinings or other defects.

4 Conclusion

Castings from non-quartz sands, unlike casts from quartz sand, did not contain veinings due to non-continuous thermal expansion of the quartz sand. Casting from the non-quartz sand LK-Sand was the only one with inclusions and growths, which is related to the lowest values of bending strength compared to the other sands, which is related to the angular shape of the grains of this sand. The following conclusions emerge from the results of the experiments: the d_{50} value does not affect the surface quality of the castings, the chromite sand had a higher mean grain value compared to the quartz island, and yet the casting had a high-quality surface; the degree of grain regularity S has a significant effect on the resulting surface of the castings; the proportion of coarse and dusty parts in the sand is related to the resulting quality of the castings, but it is individual for each sand, the chromite sand had approximately the same proportion of individual shares as the quartz sand and the LK-sand, despite this, there were no in addition to the roughened surface, other defects are visible; the theoretical surface of the S_{th} grains has a significant influence on the roughness of the casting, the highest S_{th} value was the Kerphalite KF, which also had the smoothest surface.

Viri / References

- [1] Jelínek, P. Disperzní soustavy slévarenských formovacích směsí. Ostřiva. OFTIS Ostrava, Červen 2000, ISBN-80-238-6118-2
- [2] Rusín, K. Slévarenské formovací materiály: celostátní vysokoškolská učebnice pro skupinu studijních oborů strojírenství a ostatní kovodělná výroba. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1991, s. 386
- [3] Petržela, L. Slévarenské formovací látky, Praha, 1995, s. 636
- [4] Jelínek, K. Slévarenské formovací směsi I. část ostřiva, VŠB Ostrava, 1979, s. 5 až 26
- [5] Rusín, K. Teorie litejnych procesov, Leningrad, Mašinostrojenije, 1976
- [6] Jelínek, K. Slévarenské formovací směsi I. část ostřiva, VŠB Ostrava, 1979, s. 5 až 26
- [7] Cíbková, Z. Porovnanie vybraných vlastností zlievarenských ostrív Cerabead 750 a štandard a ich vplyv na kvalitu povrchu odliatku [online]. Trenčín. [citované 15.03.2017]. Dostupné na internete: http://www.mtf.stuba.sk/docs/internetovy_casopis/2007/1/cibikova.pdf
- [8] STN 01 5030 Stanovenie zrnitosti sitovým rozborom
- [9] Sedláčková, P. Ostřiva slévarenských formovacích směsí [online]. Brno 2014. [citované 15.03.2017]. Dostupné na internete: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=93742
- [10] Petržela, L. Slévarenské formovací látky, Praha, 1995, s. 636
- [11] Lipták R. Praktické overenie vplyvu rôznych druhov aditív na tvorbu výronkov z jadier vyrábaných metódou Cold-Box-Amín, diplomová práca 2005, Technická univerzita v Košiciach, Košice.
- [12] Strakošová, P. Interakce ostrívo - pojivo u fenolického uretanového systému (PUR COLD BOX), Doktorandská dizertační práce, VŠB Ostrava, 2005.
- [13] Delimanová, P. Vplyv ostrív na kvalitu odliatkov v zlievarni Eurocast Košice s.r.o., diplomová práca, Košice, 2017.
- [14] Mancuso Chemicals, Foundry Products: Technical Data Sheet, Phenolic – Urethane No – Bake Systems.
- [15] Beňo, J. a kol. Influence of Silica Sand on Surface Casting Quality, Archives of Foundry Engineering. IssN (2299-2944), Volume 19, Issue 2/2019, 5-8, DOI: 10.24425/afe.2019.127107
- [16] Vasková, I. Návod na cvičenia z predmetu "Formovacie zmesi", 2009, Košice, ISBN 978-80-553-0141-9
- [17] Pribulová, A., Vasková, I. Základy zlievarenstva, Košice, 2009, ISBN 978-80-8086-104-9

M. Petrič^{1,4}, J. Smole², L. Grahek³, N. Nemeček⁴, D. Muck¹, M. Blečić Kavur⁵, B. Žužek⁶,

B. Šetina Batič⁶, P. Fajfar¹

1 Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta (SI) / University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Slovenia, 2 Univerza v Ljubljani, Akademija za likovno umetnost in oblikovanje (SI) / University of Ljubljana, Academy of Fine Arts and Design, Slovenia, 3 ZRC SAZU, Institute of Archaeology (SI), Slovenia, 4 Narodni muzej Slovenije (SI) / National Museum of Slovenia, Slovenia, 5 Univerza na Primorskem, Fakulteta za humanistične študije (SI) / University of Primorska, Faculty of Humanities, Slovenia, 6 Inštitut za materiale in tehnologije (SI) / Institute of Metals and Technology, Slovenia

Izdelava lite replike Negovske čelade

Production of cast replica of Negova helmet

Povzetek

V sklopu dveh študentskih projektov je sodelovalo več institucij in študentov. Namen projektov je bila analiza Negovske čelade iz 4. stol. pr. n. št. najdene v Podzemlju v Beli Krajini, kjer nas je zanimala tehnološka pot izdelave čelade. Namen projekta je bil tudi izdelava lite kopije čelade. Najdena čelada je bila izdelana s kovanjem bronza z 9 do 10 mas. % kositra in spajkanjem s svincem.

Pri izdelavi lite kopije je bila uporabljena tehnologija precizijskega litja, kjer smo na osnovi originalne konservirane čelade s pomočjo 3D tehnologij posneli original in natisnili pramodni čelade, izdelali silikonsko formo, voščeni model, keramično školjko in nato lito kopijo. Lita kopija čelade je bila nato še patinirana, da smo dosegli čim bolj pristen izgled kopije.

Abstract

Several institutions and students participated in two student projects. The purpose of the projects was to analyze the Negova helmet from the 4th century BC, found in the Podzemlje in Bela Krajina, where we were interested in the technological path of helmet production. The purpose of the project was to produce a cast copy of the helmet and to manufacture a cast-reconstructed helmet. The found helmet was made by forging bronze with 9 to 10 wt. % tin and soldering with lead.

When creating the cast copy, the investment casting technology was used, where we recorded the original and printed the helmet prototype based on the original preserved helmet using 3D technologies, made a silicone mould, a wax pattern, a ceramic shell, and then a cast copy. The cast copy of the helmet was then patinated to achieve the most authentic appearance of the copy.

1 Uvod

Negovska čelada je tip čelade, ki se je pojavljal v našem prostoru razširjenem med Alpami, Donavo in Jadranskim morjem v pozni železni dobi, predvsem v 5. in 4. stol. pr. n. št.. Tip čelade je dobil svoje ime po kraju Negova, kjer so bile čelade podobnih oblik prvič najdene in sicer leta 1811 jih je Jurij Slaček pri oranju njive našel 26 [1]. Na slovenskem je bilo najdenih kar 49

1 Introduction

The Negova helmet is a type of helmet that appeared in our area, spread between the Alps, the Danube, and the Adriatic Sea in the late Iron Age, especially in the 5th and 4th centuries BC. The helmet type got its name from the place Negova, where helmets of similar shapes were first found, namely in 1811, Jurij Slaček found 26 of them while ploughing a field [1]. As many

čelad, največ na Dolenjskem iz dolenjske halštatske skupine [2], analiziran predmet pa je bil najden na Pezdirčevi njivi v Podzemlju [3].

Sprva je bilo mnenje, da so bile čelade narejene z livarsko tehniko, kot pa se je pokazalo pri analizi predmeta te raziskave, so bile negovske čelade izdelane s tehniko kovanja in delno tudi spajkanja. Analizirana čelada je iz brona z okoli 9 mas. % kositra 0,3 mas. % svinca in 0,1 mas. % mangana. Iz analiz mikrostruktur se vidi, da je mikrostruktura preoblikovana, saj je prisotna velika količina dvojčičnih mej, ki so posledica preoblikovanja. Iz analize oblike in velikosti kristalnih zrn ter vključkov je bila določena stopnja deformacije materiala [4]. S primerjanjem vzorcev, ki so bili liti z različnimi debelinami in preoblikovani pri različnih deformacijah, z vmesnimi žarjenji pri različnih temperaturah in časih, je bilo ugotovljeno, da je morala biti čelada izdelana iz surovca z obliko diska s premerom približno 200 mm in debelino najmanj 3,7 mm. Surovec je bil v čelado hladno skovan v več ciklih z vmesnimi žarjenji pri temperaturah okoli 650 °C vsaj 10 min [5],[6].

Cilj predstavljenega dela je bil narediti kopijo čelade. Ker pa je kovanje takih oblik zahteven in dolgotrajen proces, je bila uporabljena tehnologija precizijskega litja.

2 Eksperimentalno delo in rezultati

2.1 Izdelava 3D tiskanega modela

Analiziran predmet - negovska čelada je bil z namenom izdelave lite replike 3D skeniran. 3D geometrija je bila zajeta na dva načina in sicer s fotogrametrijo in s 3D skeniranjem. Za izdelavo digitalnega modela je bil pri fotogrametriji uporabljen program Agisoft Metashape. Digitalni

as 49 helmets were found in Slovenia, most of them in Dolenjska from the Dolenjska Hallstatt group [2], and the analysed object was found on the Pezdirc field in Podzemlje [3].

Initially, it was believed that the helmets were made using the casting technique, but as the analysis of the object of this research showed, the Negova helmets were made using the forging technique and partly also soldering. The analysed helmet is made of bronze with about 9 wt. % tin 0.3 wt. % lead and 0.1 wt. % manganese. Microstructure analyses show that the microstructure is deformed, as many twin boundaries are present, which are a result of deformation. The degree of deformation of the material was determined from the analysis of the shape and size of the crystal grains and inclusions [4]. By comparing samples that were cast with different thicknesses and deformed at different deformations, with intermediate annealing at different temperatures and times, it was found that the helmet must have been made from a blank with a disk shape with a diameter of approximately 200 mm and a thickness of at least 3.7 mm. The blank was cold forged into a helmet in several cycles with intermediate annealing at temperatures of around 650 °C for at least 10 min [5],[6].

The presented work aimed to make a copy of the helmet. However, since forging such shapes is a demanding and time-consuming process, a precision casting technology was used.

2 Experimental Work and Results

2.1 Production of a 3D Printed Model

The analysed object - a Negova helmet was 3D scanned to produce a cast replica. The 3D geometry was captured in two ways, by

model je bil izdelan na osnovi zajema s kamero Nikon D780 in objektivom Nikkor 24-70mm, 2,8. Fotografije so bile zajete z največjo možno globinsko ostrino in s čemer je bil omogočen najkakovostnejši postopek fotogrametrije. Izdelana sta bila dva izhodna digitalna modela in sicer eden pri veliki in drugi pri mali ločljivosti in tako sta bila pridobljena kakovostna modela za različne izhodne aplikacije.

3D skeniranje je bilo izvedeno z ročnim hibridnim 3D skenerjem, Shining 3D Einscan HX, kjer je bila uporabljena strukturirana svetloba. Pridobljen digitalni model je bilo potrebno očistiti in pripraviti za tisk, na način, da je postal vodotesen. Slika 1 prikazuje arheološko najdbo, model posnet s fotogrametrijo in 3D model pripravljen za tisk.

Za tisk modela čelade je bil uporabljen digitalni model, pridobljen s skenerjem. Tisk je bil izveden z belim PLA termoplastičnim filamentom, ki ga 3D tiskalnik slojno nanaša. Uporabljen je bil tiskalnik je Artillery Sidewinder X2 3D Printer. Naveden tiskalnik ima delovni volumen 300 mm × 300 mm × 400 mm tako, da je bil model natisnjen v velikosti 1:1. Pri tisku je bila uporabljena debelina sloja filameta 200 mikronov in premer šobe na ekstrudirni tiskalni glavi 400 mikronov. Notranja zapolnitev je bila 50 %.

2.2 Izdelava silikonske forme

3D natisnjen model čelade se je s kitanjem zgladil, da so se skrile vidne plasti nastale pri 3D tisku. Na podlagi tega modela, imenovanega pramodel, se je izdelala silikonska guma za izdelavo voščenega modela čelade, ki je bil uporabljen pri precizijski tehnologiji litja. Uporabljena je bila silikonska guma Neukasil 1703 proizvajalca Altropol. Uporabljena je bila tudi komponenta

photogrammetry and by 3D scanning. The Agisoft Metashape program was used for photogrammetry to create a digital model. The digital model was created based on the capture with a Nikon D780 camera and a Nikkor 24-70mm, 2.8 lens. The photographs were captured with the maximum possible depth of field, which enabled the highest quality photogrammetry process. Two output digital models were created, one at high and the other at low resolution, thus obtaining high-quality models for various output applications.

3D scanning was performed with a handheld hybrid 3D scanner, Shining 3D Einscan HX, where structured light was used. The obtained digital model had to be cleaned and prepared for printing, in such a way that it became watertight. Figure 1 presents the discovery, model after photogrammetry, and model ready for 3D printing.

A digital model obtained with a scanner was used to print the helmet model. The printing was carried out with white PLA thermoplastic filament, which the 3D printer applies in layers. The printer used is the Artillery Sidewinder X2 3D Printer, with thermoplastic extrusion. The specified printer has a working volume of 300 mm × 300 mm × 400 mm, so that the model was printed in 1:1 size. The printing used a filament layer thickness of 200 microns and a nozzle diameter on the extrusion print head of 400 microns. The internal filling was 50%.

2.2 Making a Silicone Mould

The 3D printed helmet model was smoothed with putty to hide the visible layers created during 3D printing. Based on this model, called the master pattern, silicone rubber was produced to produce a wax pattern of



Slika 1. Arheološka najdba čelade (levo), model posnet s fotogrametrijo (sredina) in 3D model pripravljen za tisk (desno)

Figure 1. Archaeological find (left), model of photogrammetry (middle) and 3D model prepared for printing (right)



Slika 2. Natisnjena model čelade (levo), glajenje modela (sredina) in silikonska forma iz dveh delov (desno)

Figure 2. Printed helmet (left), smoothing of the 3D printed model (middle), and silicone rubber applied to the prototype (right)

za zagotavljanje tiksotropnih lastnosti silikona. Tako pripravljena silikonska guma je bila s čopičem, v debelin 5 mm, nanešena na pramodel. Zaradi velikosti in oblike pramodela je bil le ta s pomočjo gline razdeljen na dva dela, ki sta bila po sredini čelade – grebenu spojena. Silikonska guma je bila ojačana z mavčno kapo, ki je bila prav tako izdelana iz dveh delov, da je bilo omogočeno kasnejše odstranjevanje voščenega modela. Uporabljen je štukaturni

the helmet, which was used in investment casting technology. The silicone rubber Neukasil 1703 from Altropol was used. A component was also used to ensure the thixotropic properties of the silicone. The silicone rubber thus prepared was applied to the master pattern with a brush, in a thickness of 5 mm. Due to the size and shape of the master model, it was divided into two parts with the help of clay, which were joined in the middle of the helmet - the crest. The silicone rubber was reinforced

mavec Stuckgips proizvajalca Saint-Gobain Formula. Postopek prikazuje slika 2.

2.3 Izdelava voščenega modela in keramične školjke ter litje

S tako pripravljeno silikonsko gumo oz. silikonsko formo se je z nanašanjem voska izdelal voščen model. Ta je bil iz dveh različnih voskov. Prva plast je bila iz tršega voska, ki zagotavlja zelo kvalitetno površino modela, druga plast pa je bila iz mehkejšega voska, ki se tali pri nižjih temperaturah in tako prepreči pokanje keramičnih školjk pri iztaljevanju voščenega modela. Pred nadaljnjim postopkom izdelave keramične školjke smo na voščen model namestili ulivni sistem in odzračevalni sistem (slika 3).

Keramična školjka je bila izdelana s potapljanjem voščenega modela v suspenzijo Suspendaslurry® FS in s posipanjem s taljenim kremenom Rancosil različnih granulacij, proizvajalca Ransom & Randolph. Školjka je bila izdelana iz desetih slojev. Ko je bila keramična školjka zgrajena, je bil voščen model iztaljen v elektrouporovni peči pri 400 °C, školjka pa še nadalje žgana pri temperaturi 1050 °C, da se je ustvarila keramična vez. V indukcijski peči je bila pripravljena talina brona z 10 mas. % Sn. Pred litjem smo talino dezoksidirali s fosforjem, talina pa je bila ulita v vročo školjko pri 1250 °C. Ulitek je bil po ohlajanju odstranjen iz keramične školjke, ulivni sistem in zračniki odrezani, sledilo pa je še cizeliranje in priprava površine za patiniranje, kar prikazuje slika 4.

with a plaster cap, which was also made of two parts, to enable later removal of the wax pattern. The stucco plaster Stuckgips from Saint-Gobain Formula was used. Preparation process is shown in Figure 2.

2.3 Production of a Wax Pattern and Ceramic Shell, and Casting

With the silicone rubber or silicone mould thus prepared, a wax pattern was produced by applying wax. This was made of two different waxes. The first layer was made of harder wax, which ensures a very high-quality surface of the model, and the second layer was made of softer wax, which melts at lower temperatures and thus prevents cracking of ceramic shells when melting the wax pattern. Before the further process of manufacturing the ceramic shell, we installed a pouring system and a venting system on the wax pattern (Figure 3).

The ceramic shell was made by immersing the wax pattern in Suspendaslurry® FS suspension and stuccoing it with Rancosil fused silica of various granulations, manufactured by Ransom & Randolph. The shell was made of ten layers. Once the ceramic shell was built, the wax pattern was melted in an electric resistance furnace at 400 °C, and the shell was further fired at a temperature of 1050 °C to create a ceramic bond. A bronze melt with 10 wt. % Sn was prepared in an induction furnace. Before casting, the melt was deoxidized with phosphorus, and the melt was poured into a hot shell at 1250 °C. After cooling, the casting was removed from the ceramic shell, the casting system and vents were cut off, followed by chiselling and preparation of the surface for patination. The process is presented in Figure 4.



Slika 3. Silikonska forma (zgoraj levo), nanašanje slojev voska na silikonsko formo (zgoraj na sredini), izdelan ulivni sistem z zračniki (zgoraj desno), cizeliranje voska (spodaj levo), pomakanje in polivanje voščenega modela s keramično suspenzijo (spodaj na sredini) in posipanje s kremenčevim peskom (spodaj desno)

Figure 3. Silicone mould (top left), applying layers of wax to the silicone mould (top middle), constructed gating system with vents (top right), chiselling of wax (bottom left), immersion and pouring of the wax model with ceramic suspension (bottom middle) and sprinkling with quartz sand (bottom right)



Slika 4. Prelivanje ostanka taline po ulivanju čelade (levo), čelada po ulivanju (na sredini), patinirana čelada (desno)

Figure 4. Pouring the leftover melt after casting the helmet (left), the helmet after casting (middle), patinated helmet (right)

2.4 Patiniranje izdelka

Proces patiniranja je bil izveden na podlagi predhodnega eksperimenta. Za eksperiment so bile ulite ploščice debeline 4 mm iz enake zlitine kot je bila čelada in tudi lita replika. Na ploščicah se je izvajal eksperiment patiniranja z začetno vodno raztopino žvepljenih jeter (kalijev sulfid), nato pa so sledili nanosi vodne raztopine amonijevega klorida in bakrovega sulfata. Po različnih razmerjih, časih in ponovitvah nanašanja raztopin za patiniranje je bil ugotovljen proces, ki je rezultiral v barvi patine podobne na originalu.

Po cizeliranju je bila čelada razmaščena, da je lahko sprejela patino. Prvi nanos je bila podlaga - temna patina iz žvepljenih jeter (kalijevega sulfida), sledilo je 15 nanosov mešanice amonijevega klorida in bakrovega sulfata z vodo, ki so v rednih presledkih dale žlahtno malahitno patino. V treh tednih premazovanja se je patina stabilizirala in trdno vezala na čelado. Zaščito za patinirano čelado smo izdelali iz čebeljega voska, ki smo ga na površino patinirane čelade nanесли v 5 % raztopini bencina in ga nato spolirali. Končana patinirana čelada je prikazana na sliki 4.

3 Zaključki

Rezultat predstavljenega dela je replika negovske čelade iz 4. stol. pr. n. št., ki je bila narejena na podlagi najdene čelade v Beli Krajini. S postopkom 3D tehnologij je bila originalna restavrirana in konservirana čelada posneta, pripravljen 3D model in natisnjen pramod. Na podlagi tega je bila izdelana silikonska guma, voščeni model ter keramična školjka - forma. Ulita je bila zlitina, enaka kot pri originalu, in sicer bron z 10 mas. % kositra. Po litju, cizeliranju in pripravi površine je bilo izvedeno

2.4 Patination of the Product

The patination process was carried out based on a previous experiment. For the experiment, 4 mm-thick plates were cast from the same alloy as the helmet, and also a cast replica. A patination experiment was carried out on the plates with an initial aqueous solution of sulfuric liver (potassium sulphate), followed by applications of aqueous solutions of ammonium chloride and copper sulfate. After different proportions, times, and repetitions of applying patination solutions, a process was established that resulted in a patina colour similar to the original.

After chiselling, the helmet was degreased so that it could accept the patina. The first coat was a base coat - a dark patina of liver of sulphur (potassium sulphide), followed by 15 coats of a mixture of ammonium chloride and copper sulphate with water, which at regular intervals gave a noble malachite patina. Within three weeks of coating, the patina stabilized and firmly bonded to the helmet. The protection for the patinated helmet was made of beeswax, which was applied to the surface of the patinated helmet in a 5% solution of petrol and then polished. Finished helmet is presented in Figure 4.

3 Conclusions

The result of the presented work is a replica of the Negova helmet from the 4th century BC, which was made based on a helmet found in Bela Krajina. Using the 3D technology process, the original restored and preserved helmet was photographed, a 3D model was prepared, and a prototype was printed. Based on this, silicone rubber, a wax pattern, and a ceramic shell mould were made. The alloy was cast, the same

patiniranje, ki je dalo podobno barvo in strukturo patine. Tako izdelana replika je že bila in bo predstavljena na več razstavah, končno mesto pa bo našla v Belokranjskem muzeju v Metliki.

Iz predstavljenega je razvidno, da se lahko tehnika precizijkega litja lahko uporablja v različne namene, tako industrijske kot tudi v razvoju in znanosti ter tudi v umetnosti in zgodovini.

Zahvala

Delo je bilo izvedeno v sklopu Študentskih projektov za trajnostni razvoj. Avtorji se zahvaljujejo predanemu delu in prispevku študentov: Anže Pevc, Žiga Cvek, Matevž Nikolovski, Teja Medvešek, Nina Pavlin, Žiga Jevšnik, Klara Klančar, Lana Mihoci in Lan Mark Čerkez.

as on the original, namely bronze with 10 wt. % tin. After casting, chiselling, and surface preparation, patination was performed, which gave a similar colour and structure to the patina. The replica made in this way has already been and will be presented at several exhibitions and finally find its place in the Bela Krajina Museum in Metlika.

From what has been presented, the investment casting technique can be used for various purposes, both industrial and in development and science, as well as in art and history.

Acknowledgements

The work was performed as part of the Student Projects for Sustainable Development. The authors would like to thank the dedicated work and contributions of the students: Anže Pevc, Žiga Cvek, Matevž Nikolovski, Teja Medvešek, Nina Pavlin, Žiga Jevšnik, Klara Klančar, Lana Mihoci and Lan Mark Čerkez.

Literatura / References

- [1] Letos mineva natanko 210 let odkar so bile odkrite Negovske čelade. V: *Bakos* [dostopno na daljavo]. Obnovljeno 23.9.2021 [citirano 14.1.2025]. Dostopno na svetovnem spletu: <<https://www.bakos.si/zanimivosti/letos-mineva-natanko-210-let-odkar-so-bile-odkrite-negovske-celade/>>.
- [2] Negovska čelada. V: *NTF* [dostopno na daljavo]. Obnovljeno [citirano 14.1.2025]. Dostopno na svetovnem spletu: <<https://www.ntf.uni-lj.si/ntf/negovska-celada/>>.
- [3] Na Pezdirčevi njivi negovska čelada. V Obnovljeno [citirano 14.1.2025]. Dostopno na svetovnem spletu: <<https://belokranjski-muzej.si/post/504472/na-pezdircevi-njivi-negovska-celada>>.
- [4] Mödlinger, M. in Piccardo, P. Manufacture of Eastern European decorative tin-bronze discs from the twelfth century BC. *Archaeological and Anthropological Sciences*, Springer Science and Business Media LLC, 2013, let. 5, št. 4, str. 299–309.
- [5] Žerjav Jereb, B. Arheometalurška karakterizacija čelade iz pozne železne dobe : magistrsko delo. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, 2023,. Dostopno na svetovnem spletu: <<https://repozitorij.uni-lj.si/Dokument.php?id=175512&lang=slv>>.
- [6] Cvek, Ž. Rekonstrukcija tehnološke poti izdelave negovske čelade iz podzemlja : magistrsko delo. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, 2024,. Dostopno na svetovnem spletu: <<https://repozitorij.uni-lj.si/Dokument.php?id=194298&lang=slv>>.

Mikrostruktura mikrolegirane zlitine Al-Mn-Cu, ulite s hitrim asimetričnim dvovaljnim litjem

Microstructure of a Microalloyed Al-Mn-Cu alloy, Cast by Rapid Asymmetric Dual-Roll Casting

Povzetek

Dvovaljno litje se v industriji aluminija pogosto uporablja za izdelavo nekaj milimetrov debelih trakov. Hitrosti so le nekaj metrov na minuto. Dodatna pomanjkljivost je izcejanje v sredini trakov in bolj groba mikrostruktura zaradi razmeroma počasnega ohlajanja. Haga in njegovi sodelavci so razvili visokohitrostno litje z enim in dvema valjema, s katerim so dosegli vrednosti do 60 m min⁻¹. S tem postopkom je mogoče v laboratorijskih razmerah vlivati majhne količine livnih in gnetnih aluminijevih zlitin.

V tej raziskavi je bila z asimetričnim dvovaljnim postopkom litja ulita mikrolegirana zlitina Al-Mn-Cu, ki ima zaradi majhne vsebnosti skandija, cirkonija, kroma in vanadija veliko toplotno odpornost. Hitrosti litja so bile 25 m/min in 10 m/min, pri čemer so bili trakovi debeli približno 3 mm oziroma 6 mm. Uporabljeni hitrosti med strjevanjem nista ustvarili kvazikristalnega evtektika v meddendritnih prostorih, temveč heterogen zlog, sestavljen iz Q-Al₂Cu, Al₂Cu(Sc) in faze, bogate z Mn (Al₄Mn). Mikrostruktura je bila sestavljena iz stebričastih dendritnih zrn v stiku z valji in enakoosnih dendritnih zrn na sredini. Na sredini traku je bilo prisotnih nekaj poroznosti zaradi krčenja in velikih intermetalnih delcev.

Ključne besede: aluminij, litje, trak, mikrostruktura, trdota

Abstract

Twin-roll casting is often used in the aluminium industry to produce strips a few millimetres thick. The speeds are only a few meters per minute. An additional disadvantage is the segregation in the middle of the strips and a rougher microstructure due to relatively slow cooling. Haga and his colleagues have developed high-speed single-roll and dual-roll casting, achieving up to 60 m min⁻¹. They can cast small amounts of both cast and wrought aluminium alloys in the laboratory.

In this research, a micro-alloyed Al-Mn-Cu alloy was cast using the asymmetric dual-roll casting process, which has high thermal resistance due to the small content of scandium, zirconium, chromium, and vanadium. The casting speeds were 25 m/min and 10 m/min, producing strip thicknesses around 3 mm and 6 mm, respectively. The applied speeds did not create a quasi-crystalline eutectic in the interdendritic areas during solidification, but a heterogeneous structure consisting of Θ -Al₂Cu, Al₂Cu(Sc), and a Mn-rich phase (Al₄Mn). The microstructure consisted of columnar dendritic grains in contact with the rolls and equiaxed dendritic grains at the centre. Some shrinkage porosity and large intermetallic particles were present at the strip centre.

Keywords: aluminium, casting, strip, microstructure, hardness

1 Uvod

Pri konvencionalnem dvovaljnem litju lahko lijemo aluminijaste trakove neposredno iz tekočega stanja, kar omogoča manjšo porabo energije in s tem manjši ogljični odtis [1]. Strjevanje je sorazmerno hitro, kar vodi do udrobnitve kristalnih zrn in škodljivih intermetalnih faz [2]. Hitrost litja je sorazmerno nizka, navadno okoli 5 m/min, kar ima negativen vpliv na produktivnost. V Laboratoriju za procesiranje materialov na Inštitutu za tehnologijo v Osaki so raziskovali zvišanje hitrosti litja in produktivnosti z uporabo valjev z velikim premerom. Hitrost litja so povečevali tudi z izboljšanjem toplotne prevodnosti valjev in metalostatičnim tlakom tekoče kovine. Razvili so nova visokohitrostna enovaljna in dvovaljna ulivalnika [3], s katerima je mogoče doseči hitrosti litja vse do 60 m/min.

V Laboratoriju za materiale, UM FS, je bila razvita nova aluminijeva zlitina, ki vsebuje dvojne kvazikristalne izločke in izločke L_{1_2} - Al_3X , ki bi lahko občutno vplivali na toplotno obstojnost zlitine [4]. Eksperimentalno smo vlili zlitino Al-Mn-Cu, mikrolegirano z zlitinskimi elementi Be, Sc, Zr, Cr in V. Vsak od dodanih elementov naj bi imel točno določen učinek. Mangan omogoča nastanek kvazikristalnih izločkov [5], medtem ko berilij izrazito poveča njihovo številčnost [6]. Skandij in cirkonij se dodata, da nastanejo izločki tipa L_{1_2} [7], medtem ko dodatka Cr in V povečata toplotno obstojnost.

Cilj raziskave je ugotoviti mikrostrukturo mikrolegirane zlitine Al-Mn-Cu s hitrim asimetričnim dvovaljnim litjem z dvema različnima hitrostma.

1 Introduction

The conventional twin-roll caster can cast aluminium strips directly from molten metal, considerably reducing energy consumption and carbon footprint [1]. The solidification is relatively rapid, leading to refinement of grain sizes and harmful intermetallic phases [2]. However, the roll speed is very low, typically lower than 5 m/min, implying low productivity. The Material Processing Laboratory at the Osaka Institute of Technology has investigated the increase in casting speed and productivity using a large-diameter roll, a thin gauge, and a lengthy setback. They have also increased casting speed by increasing the rolls' thermal conductivity and metalostatic pressure of the molten metal. They have developed new high-speed single-roll and twin-roll casters [3]. It is possible to achieve casting speeds up to 60 m/min.

A new alloy with quasicrystalline and L_{1_2} - Al_3X precipitates was developed in the Laboratory of Materials, UM FS, having promising room and elevated temperature properties [4]. A microalloyed Al-Mn-Cu alloy was cast experimentally. It contains several elements with dedicated tasks, Be, Sc, Zr, Cr, and V. It contains Mn to form quasicrystalline precipitates [5] and Be to increase their number density enormously [6]. Sc and Zr are added to form L_{1_2} -precipitates [7], and Cr and V increase the thermal stability.

This research aims to determine the microstructure of a microalloyed Al-Mn-Cu alloy by rapid asymmetric dual-roll casting with two speeds.

2 Experimental work

The composition of the investigated Al-alloy was 2.18% Mn, 2.73% Cu, 0.18% Sc,

2 Eksperimentalno delo

Sestava raziskane Al-zlitine je bila 2,18 % Mn, 2,73 % Cu, 0,18 % Sc, 0,08 % Be, 0,16 % Zr, 0,08 % Cr, 0,16 % Fe, 0,0003 % Mg, 0,009 % Ti and 0,07 % V (masni deleži v odstotkih; izmerjena je bila z masno spektroskopijo v induktivno sklopljeni plazmi ICP-MS). Zlitina je bila pripravljena iz tehnično čistega aluminija Al 99,8 ter legirana s predzlitinami AlBe5,5, AlCr20, AlV10, AlZr10, AlSc2, AlCu50 in AlMn10. Zlitina je bila staljena v vakuumski indukcijski talilni peči in ulita v ingote s premerom 20 mm. Zlitina je bila nato pretaljena in ulita z asimetričnim dvovaljnim litjem v Osaki (Slika 1). Livna temperatura je bila 700 °C, obremenitev valjev pa je bila 20 N/mm. Lili smo z dvema hitrostma litja: 10 m/min in 25 m/min. Pri prvi hitrosti je bila debelina trakov 5,5–6,5 mm, pri drugi pa 3,5–4 mm.

Odliti trakovi so bili razrezani na manjše vzorce ter metalografsko pripravljeni z brušenjem in poliranjem. Nekateri vzorci so bili analizirani v poliranem stanju, drugi so bili dodatno jedkani. Uporabljene so bile analizne metode svetlobne mikroskopije SM (svetlobni mikroskop NIKON Epiphot 300), visokoločljive elektronske mikroskopije (Jeol JSM IT-800SHL). Kemična sestava v mikroobmočju je bila izmerjena z energijskodisperzijsko spektroskopijo rentgenskih žarkov (EDS detektor Oxford AZtec Live AUTO UltimMax 100). Trdoto smo izmerili z metodo po Vickersu HV (DuraScan 50, EmcoTest).

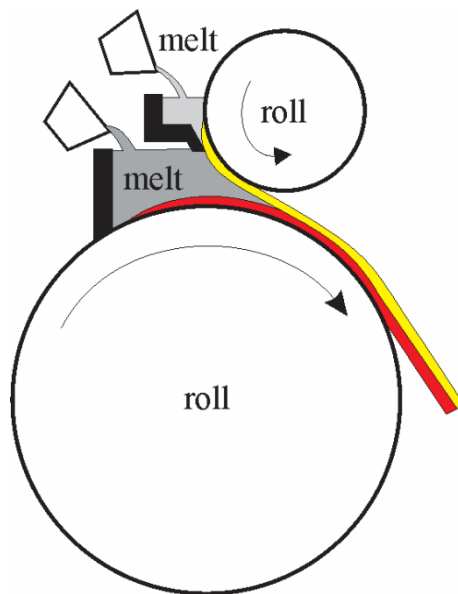
3 Rezultati in diskusija

3.1 Napake

Slika 2 prikazuje prerez tanjšega traku. Usmerjeno strjevanje kristalnih zrn aluminija

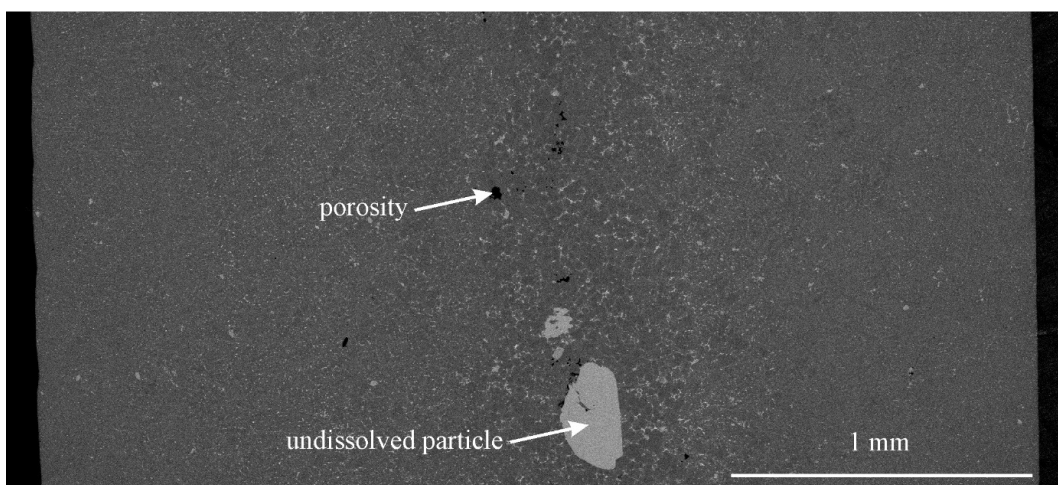
0.08% Be, 0.16% Zr, 0.08% Cr, 0.16% Fe, 0.0003% Mg, 0.009% Ti and 0.07% V (the content is in wt.% and was determined using Inductively Coupled Plasma, Mass Spectroscopy). The alloy was prepared using Al 99.8 alloyed by AlBe5.5, AlCr20, AlV10, AlZr10, AlSc2, AlCu50, and AlMn10 master alloys. The alloy was melted under vacuum in a vacuum induction furnace and cast into ingots with a diameter of 50 mm.

The alloy was cast by asymmetric dual-roll casting in Osaka (Figure 1). The casting temperature was 700 °C, and the roll load was 20 N/mm. Two casting speeds were selected: 10 m/min and 25 m/min. The first casting speed produced strips of a 5.5–6.5 mm thickness, and the second 3.5–4 mm.



Slika 1. Shematični prikaz asimetričnega dvovaljnega litja

Figure 1. Schematic presentation of an asymmetric dual-roll caster

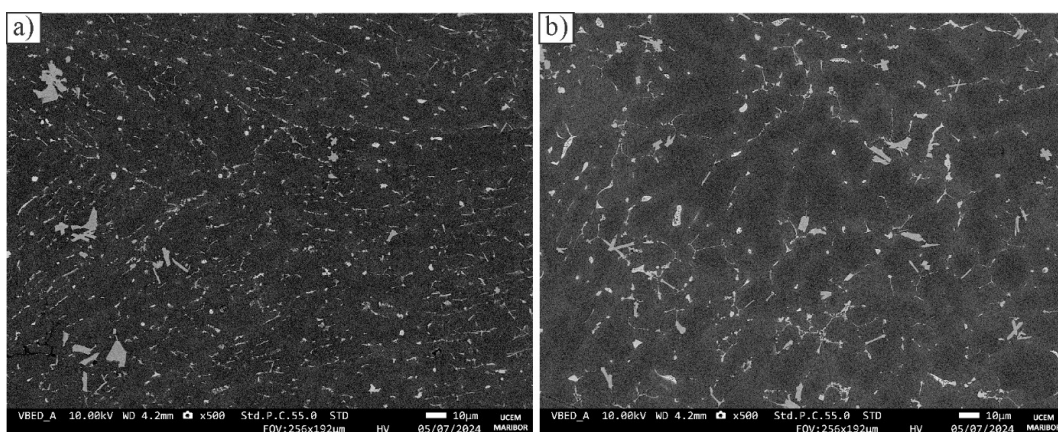


Slika 2. Prečni prerez tanjšega traku, hitrost litja 25 m/min (SEM, odbiti elektroni)

Figure 2. Cross-section of the thinner strip, casting speed 25 m/min (SEM, BSE (Back-scattered Electron micrograph))

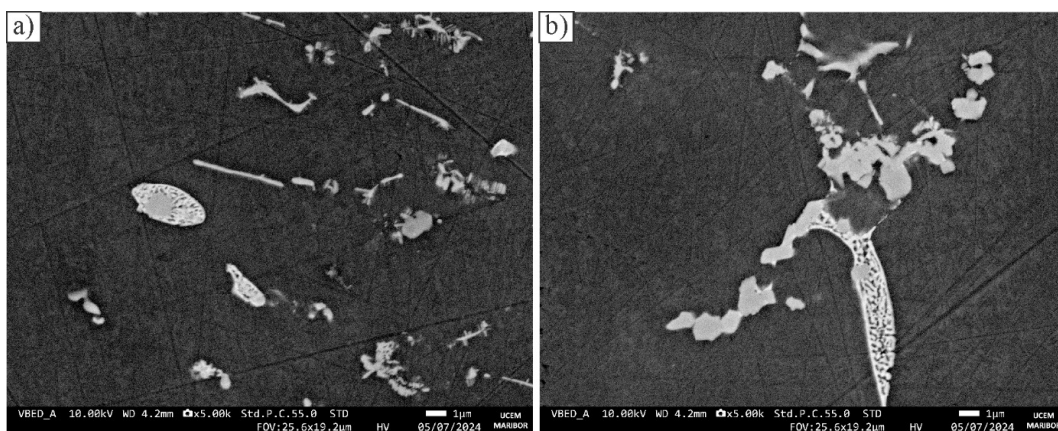
je potekalo od valjev proti sredini. Debelina te plasti je bila približno 1 mm. Na sredini traku so bila zrna enakoosna. Tam je bila pogosto opazna poroznost, ki je posledica krčenja pri strjevanju. Veliki neraztopljeni delci so nastali pri strjevanju ingota pri vakuumskem indukcijskem taljenju.

The cast strips were cut and prepared by metallography, ground, polished, and etched. Some samples were analysed after polishing, and others were additionally etched. They were investigated by light microscopy LM (light microscope NIKON Epiphot 300) and high-resolution scanning



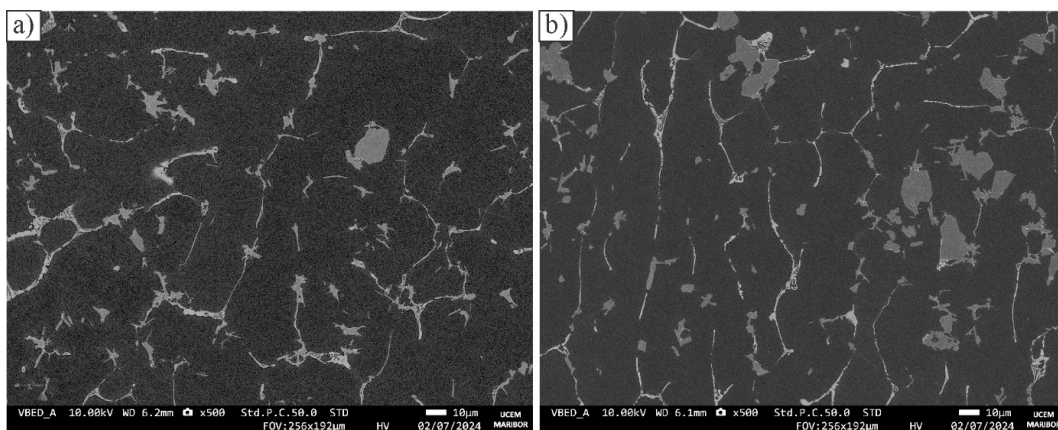
Slika 3. Mikrostruktura tanjšega traku pri manjši povečavi, hitrost litja 25 m/min. a) Blizu površine, b) v središču traku (SEM, odbiti elektroni)

Figure 3. Microstructure of the thinner strip at a smaller magnification. a) Close to the surface, b) at the strip centre (SEM, BSE)



Slika 4. Mikrostruktura tanjšega traku pri večji povečavi, hitrost litja 25 m/min. a) Blizu površine, b) v središču traku (SEM, odbiti elektroni)

Figure 4. Microstructure of the thinner strip at a higher magnification, casting speed 25 m/min. a) Close to the surface, b) at the strip centre (SEM, BSE)



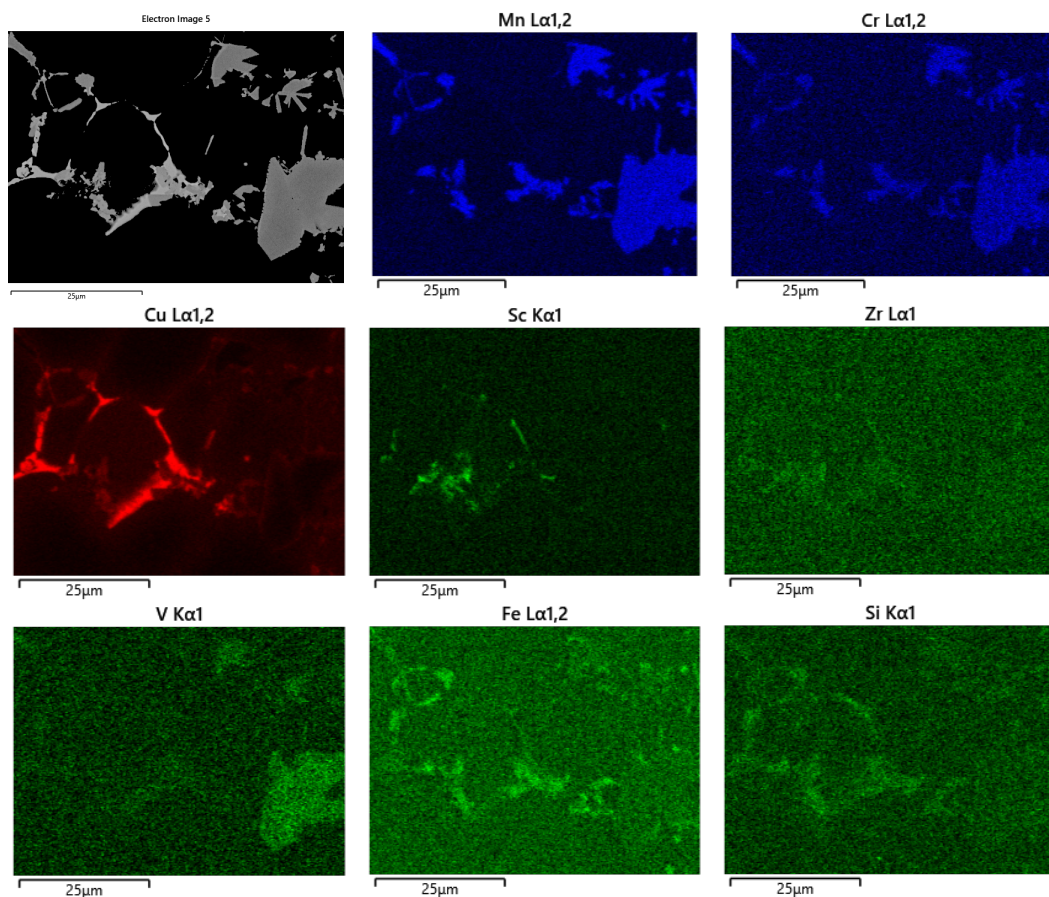
Slika 5. Mikrostruktura debelejšega traku, hitrost litja 10 m/min, a) blizu površine, b) v središču traku (SEM, odbiti elektroni)

Figure 5. Microstructure of the thicker strip, casting speed 10 m/min. a) Close to the surface, b) at the strip centre (SEM, BSE)

Sliki 3 in 4 prikazujeta mikrostrukture tanjšega traku pri dveh različnih povečavah. Slika 3 prikazuje drobnejša dendritna zrna blizu površine, medtem ko Slika 4 prikazuje območja z manjšimi meddendritnimi prostori blizu površine.

Makro- in mikrostruktura debelejšega traku je bila kvalitativno podobna kot pri

electron microscopy SEM (Jeol JSM IT-800SHL). Chemical compositions in the micro area were determined using energy dispersive spectroscopy (EDS detector Oxford AZtec Live AUTO UltimMax 100). Hardness was measured using the Vickers method HV (DuraScan 50, EmcoTest).



Slika 6. Porazdelitev elementov v tanjšem traku, hitrost litja 25 m/min. Na zgornji levi sliki je analizirano območje (SEM, odbiti elektroni). Druge slike prikazujejo porazdelitev označenih elementov.

Figure 6. Elemental mapping of an area in the thinner strip, casting speed 25 m/min. The top left is the SEM BSE micrograph; the other images show the distribution of the indicated elements.

tanjšem traku (Slika 5). Posledično je bila tudi trdota zelo podobna. Znašala je 110 ± 7 HV 0,1 (112 meritev) pri tanjšem traku in 110 ± 12 HV 0.1 (203 meritve) pri debelejšem traku.

Slika 6 prikazuje porazdelitev elementov v meddendritnem prostoru. Analiza EDS je odkrila fazo, bogato z Mn, ki vsebuje tudi Cr. Večji delci te intermetalne faze so vsebovali tudi vanadij. Sestava te faze je bila približno Al_4Mn . Baker je bil pretežno v meddendritnih prostorih, kjer je tvoril

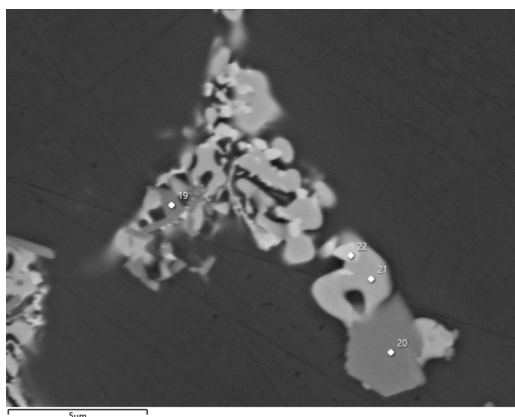
3 Results and discussion

3.1 Defects

Figure 2 shows the cross-section of the thinner strip. Directional solidification of aluminium crystal grains took place from the rolls toward the centre. The thickness of this layer was about 1 mm. There were equiaxed grains at the strip centre. Porosity, resulting from the solidification shrinkage, was often observed at the centre. Large

značilen heterogen zlog (α -Al + Θ -Al₂Cu). Slika 6 nakazuje, da je Sc bolj koncentriran Sc v meddendritnih prostorih.

Podrobnejši mikroposnetek meddendritnega prostora na Sliki 7 nakazuje, da so v njem vsaj tri faze. Najtemnejša faza (številka 20) je bogata z manganom, kar ustreza Al₄Mn. Delec, označen z 21, ima sestavo, ki se ujema s Θ -Al₂Cu. Najsvetlejša faza, označena z 22, ima sestavo podobno Θ -Al₂Cu, vendar vsebuje še 3–4 at.% Sc.



Slika 7. Mikrostruktura na območju meddendritnega prostora v debelejšem traku, hitrost litja 10 m/min (SEM, odbiti elektroni). Točkovna analiza EDS je bila izvedena v točkah, označenih 19–22.

Figure 7. Microstructure in the interdendritic region in the thicker strip, casting speed 10 m/min (SEM, BSE). Point EDS was carried out at sites labelled 19–22.

V mikrostrukturi so bile ugotovljene mikroizceje. Dendritna središča so vsebovala več V, Zr in Mn, medtem ko so dendritni robovi (izognili smo se delcem v meddendritnem prostoru) vsebovali več Si, Sc, Fe in Cu. Vendar stopnja izcejanja ni bila zelo visoka zaradi majhne razdalje med dendritnimi vejami.

undissolved particles formed during the ingot solidification after vacuum induction melting.

Figures 3 and 4 show the microstructure of the thinner strip at two different magnifications. Figure 3 indicates finer dendritic grains near the surface, while Figure 4 shows smaller interdendritic spaces near the surface.

The macro- and microstructure of the thicker ribbon was qualitatively similar to that of the thinner strip (Figure 5). As a result, hardness was also very similar. It was 110 ± 7 HV 0.1 (112 measurements) for the thinner strip and 110 ± 12 HV 0.1 (203 measurements) for the thicker strip.

Figure 6 shows the typical elemental distribution in the interdendritic space. The EDS analysis revealed a Mn-rich phase containing Cr, while V was in larger particles. This phase has an approximate composition of Al₄Mn. Copper was mainly present in the interdendritic areas, forming a typical heterogeneous structure (α -Al + Θ -Al₂Cu). Figure 6 also shows the presence of Sc in the interdendritic regions.

A detailed image of an interdendritic region (Figure 7) showed the presence of at least three phases. The darkest phase (number 20) is Mn-rich (Al₄Mn). The particle labelled by 21 has a composition close to Θ -Al₂Cu. The brightest phase, labelled by 22, has a composition like Θ -Al₂Cu but contains 3–4 at.% Sc.

There was microsegregation in the dendritic grains. Dendrite centres contained more V, Zr, and Mn, while dendrite rims (we avoided particles in the interdendritic region) contained more Si, Sc, Fe, and Cu. However, the segregation rate was not very high due to the small dendrite arm spacing.

4 Zaključki

Trakovi so bili sestavljeni iz stebričastih zrn, ki so rasla od površine proti sredini.

Na sredini je bilo območje z enakoosnimi zrn.

Na sredini traku je bilo opaziti tudi krčilno poroznost in neraztopljene delce.

V meddendritnih prostorih so bile tri faze: z manganom bogata faza s približno sestavo Al_4Mn , s Cu bogata faza $\Theta\text{-Al}_2\text{Cu}$ in s Cu bogata faza, ki vsebuje 3–4 at.-% Sc.

V mikrostrukturi tanjšega in debejšega traku ni bilo veliko razlik. Zato je bila trdota statistično praktično enaka.

Raziskava navaja osnovno obnašanje mikrolegirane zlitine Al-Mn-Cu. Vendar so potrebne dodatne raziskave za optimizacijo postopka litja.

4 Conclusions

The strips consisted of columnar grains growing from the surface towards the centre.

There was a region with equiaxed grains at the centre.

There was also solidification shrinkage and undissolved particles at the strip centre.

There were three phases in the interdendritic regions: a manganese-rich phase with an approximate composition of Al_4Mn , a Cu-rich phase $\Theta\text{-Al}_2\text{Cu}$ and a Cu-rich phase containing 3–4 at.-% Sc.

There were not many differences in the microstructure of the thinner and the thicker ribbon. Thus, the hardness was statistically indistinguishable.

The research gives the basic behaviour of the microalloyed Al-Mn-Cu alloy. However, additional research is required to optimise the casting process.

Reference / References

- [1] J.W. Jin, Z.J. Zhang, R.H. Li, Y. Li, B.S. Gong, J.P. Hou, H.W. Wang, X.H. Zhou, G. Purcek, Z.F. Zhang, Mechanical properties of three typical aluminum alloy strips prepared by twin-roll casting, *Journal of Materials Research and Technology*, 28 (2024) 500-511.
- [2] S. Li, C. He, J. Fu, J. Xu, G. Xu, Z. Wang, Evolution of microstructure and properties of novel aluminum-lithium alloy with different roll casting process parameters during twin-roll casting, *Materials Characterization*, 161 (2020) 110145.
- [3] T. Haga, High Speed Roll Caster for Aluminum Alloy, *Metals*, 11 (2021) 520-520.
- [4] F. Zupanič, T. Bončina, Manufacturing of high strength and heat resistant aluminium alloys strengthened by dual precipitates in: E.P. Office (Ed.), 2020.
- [5] F. Zupanič, D. Wang, C. Gspan, T. Bončina, Precipitates in a quasicrystal-strengthened Al-Mn-Be-Cu alloy, *Mater. Charact.*, 106 (2015) 93-99.
- [6] T. Bončina, M. Albu, F. Zupanič, Ageing of Al-Mn-Cu-Be Alloys for Stimulating Precipitation of Icosahedral Quasicrystals, *Metals*, 10 (2020) 937.
- [7] F. Zupanič, C. Gspan, J. Burja, T. Bončina, Quasicrystalline and L12 precipitates in a microalloyed Al-Mn-Cu alloy, *Materials Today Communications*, 22 (2020) 100809.

Z. Zovko Brodarac¹, F. Kozina¹, J. Burja^{2,3}, B. Šetina Batič³, D. Stanić⁴, M. Folta⁵

¹Univerza v Zagrebu, Fakulteta za metalurgijo, Sisak (HR) / University of Zagreb Faculty of Metallurgy, Sisak (HR), ²Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Ljubljana (SI) / University of Ljubljana Faculty of Natural Sciences and Engineering, Ljubljana (SI), ³Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana (SI) / Institute of Metals and Technology, Ljubljana (SI), ⁴Istrska univerza uporabnih znanosti, Pula (HR) / Istrian University of Applied Sciences, Pula (HR), ⁵Škoda Auto Vysoká Škola o.p.s., Mladá Boleslav (CZ) / Škoda Auto Vysoká Škola o.p.s., Mladá Boleslav (CZ)

Vpliv toplotne obdelave na mikrostrukturo reciklirane zlitine AlSi9Cu3(Fe)

Influence of Heat Treatment on Microstructure of Recycled AlSi9Cu3(Fe) Alloy

Izvleček

Surovine veljajo za najpomembnejši korak pri določanju ogljičnega odtisa proizvodnje. Proizvajalci ulitkov se zaradi pravnih, gospodarskih in političnih razmer v Evropski uniji ter pomanjkanja kakovostnih surovin soočajo s številnimi težavami. Večina vsakodnevno proizvedenih komponent, kot so aluminij in njegove zlitine, spada med kritične surovine (CRM) in strateške surovine (SRM). Te surovine so bistvenega pomena za različne strateške sektorje, kot so obnovljivi viri energije, digitalna industrija, letalski in obrambni sektor ter zdravstveni sektor, ki so vsi tesno povezani s kovinsko industrijo. Standardna aluminijeva zlitina AlSi9Cu3(Fe) (EN AC 46000) se pogosto uporablja v avtomobilski industriji in sektorju prevoza. Zaradi visokih zahtev proizvajalcev avtomobilov glede varnosti in mehanskih lastnosti, kot so trdnost, trdota in raztezek, ter nizke mase in odpornosti proti koroziji je zlitina AlSi₉Cu₃(Fe) prednostna surovina za proizvodnjo varnostno pomembnih komponent. Večina teh lastnosti je posledica razvoja mikrostrukture. Funkcionalne in uporabne lastnosti aluminijevih zlitin so odvisne od kemijske sestave, načina taljenja, hitrosti strjevanja, postopka litja in morebitne toplotne obdelave. Zaradi krize surovin se posebna pozornost namenja uporabi sekundarnih, tj. recikliranih surovin ter njihovi funkcionalnosti in trajnosti ob koncu življenjske dobe.

Za nadaljnje izboljšanje kakovosti popolnoma reciklirane zlitine AlSi9Cu3(Fe) je bila izvedena toplotna obdelava. Termodinamični izračuni in metalografske analize recikliranih zlitin AlSi9Cu3(Fe) kažejo naslednje zaporedje strjevanja: primarni aluminij α_{Al} , eutektik ($\alpha_{Al} + \beta_{Si}$), intermetalni fazi na osnovi železa v igličasti morfologiji Al₅FeSi in Al₁₅Si₂Mg₄ »kitajske pisave«, intermetalni fazi na osnovi magnezija in bakra, kot sta Mg₂Si in Al₂Cu, ter kompleksni intermetalni fazi, kot sta Al₈Mg₃FeSi₂ in Al₅Mg₈Si₂Cu₂. Toplotna obdelava je pomembno vplivala na izboljšanje mikrostrukture in spremembo morfologije nekaterih mikrostrukturnih komponent. Nov vpogled v razvoj mikrostrukture smo pridobili s konfokalno lasersko mikroskopijo, ki omogoča kartiranje mikrostrukturne topografije in določanje višinskih odstopanj mikrostrukturnih komponent.

Ključne besede: CRM, recikliranje, zlitina AlSi9Cu3(Fe), mikrostruktura, toplotna obdelava

Abstract

Raw materials are considered the most important step in determining the carbon footprint of production. Manufacturers of castings face a number of difficulties due to the legal, economic, and political situation in the European Union and the shortage of high-quality

raw materials. Most of the components produced on a daily basis, such as aluminium and its alloys, belong to the critical raw materials (CRMs) and strategic raw materials (SRMs). These raw materials are essential for a variety of strategic sectors such as renewable energy, the digital industry, the aerospace and defence sector, and the healthcare sector, all of which are closely linked to the metals industry. The standard aluminium alloy AISi9Cu3(Fe) (EN AC 46000) is widely used in the automotive and transport industries. The high requirements of automotive manufacturers in terms of safety and mechanical properties, such as strength, hardness, and elongation, as well as low mass and corrosion resistance, make the AISi9Cu3(Fe) alloy the preferred raw material to produce safety-critical components. Most of these properties are due to the development of the microstructure. The functional and useful properties of cast aluminium alloys depend on the chemical composition, the melting treatment, the solidification rate, the casting process, and the possible heat treatment. Given the raw materials crisis, particular attention is being paid to the use of secondary, i.e., recycled, raw materials and their functionality and sustainability at the end of their service life.

To further improve the quality of the fully recycled AISi9Cu3(Fe) alloy, a heat treatment was carried out. Thermodynamic calculations and metallographic analyses of recycled AISi9Cu3(Fe) alloys show the following solidification sequence: primary aluminium α_{Al} , eutectic phase ($\alpha_{Al} + \beta_{Si}$), iron-based intermetallic phase in needle-like Al_5FeSi and $Al_{15}Si_{12}M_4$ "Chinese script" morphology, magnesium- and copper-based intermetallic phase such as Mg_2Si and Al_2Cu , and complex intermetallic such as $Al_8Mg_3FeSi_2$ and $Al_5Mg_8Si_2Cu_2$ phases. The heat treatment had a significant influence on the refinement of the microstructure and the change in morphology of certain microstructural components. New insights into the evolution of the microstructure were gained using confocal laser microscopy, which allows mapping of the microstructural topography and determination of the height deviation of the microstructural components.

Keywords: CRM, recycling, AISi9Cu3(Fe) alloy, microstructure, heat treatment

1 Uvod

Surovine so ključnega pomena za vsak proizvodni proces, ko gre za določanje ogljičnega odtisa proizvodnje, zlasti če veljajo za kritične surovine (CRM) in/ali strateške surovine (SRM) [1–4]. Kartiranje potenciala za recikliranje aluminijevih zlitin razkriva težave, probleme, pa tudi rešitve za boljšo kakovost izdelkov [5,6].

Funkcionalne in uporabne lastnosti zlitine Al-Si za litje so močno odvisne od kakovosti surovine, zlasti če gre za recikliran material. V avtomobilski industriji so zlitine Al-Si-Cu prepoznane kot kakovostni izdelki za različne varnostno pomembne

1 Introduction

Raw materials are crucial for any production process when it comes to defining the carbon footprint of production, especially when they are considered as critical (CRM) and/or strategic raw materials (SRM) [1-4]. Mapping the recycling potential of aluminium alloys reveals difficulties, problems, but also solutions for better quality products [5,6].

The functional and useful properties of a casting Al-Si alloy depend strongly on the quality of the raw material, especially if it is a recycled material. The automotive industry has recognised Al-Si-Cu alloys as quality products for various safety-critical parts,

dele, za katere je značilna visoka trdnost pri sobnih in povišanih temperaturah [7–9]. Izhodiščna točka vsake industrijske proizvodne verige je kemijska sestava, ki zaradi vrste interakcij med elementi in uporabljenih tehnoloških proizvodnih parametrov ne omogoča vedno podvajanje mikrostrukture in s tem razvoja mehanskih lastnosti [10,11]. Uporabljena tehnologija, tj. hitrost hlajenja in s tem strjevanja, vpliva na številne interakcije med postopkom strjevanja. Medsebojno delovanje silicija, bakra, železa in magnezija je bilo raziskano drugje [12–16]. Ocena kemijske sestave se začne z modeliranjem ravnotežnega faznega diagrama in napovedjo poteka strjevanja, kar zaradi uporabe sekundarnih surovin postaja vse bolj zapleteno. Sinergija modeliranja in izvedene termodinamične in mikrostrukturne analize zlitine AlSi9Cu3(Fe) kaže na prisotnost širokega spektra legirnih elementov zlitin AlSi9Cu3(Fe) in razvoj $\alpha\text{-Al}_{15}\text{Si}_2\text{M}_4$ ($\text{M} = \text{Cr, Fe, Mn, Mo}$), $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$, Al_2Cu in še bolj kompleksnih, kot je $\text{Al}_3\text{Cu}_2\text{Mg}_9\text{Si}_7$, z uporabo teoretičnega modeliranja. Kompleksna pot strjevanja kaže primarni aluminij α_{Al} , evtektik ($\alpha_{\text{Al}} + \beta_{\text{Si}}$), intermetalno fazo na osnovi železa v morfologiji Al_5FeSi in »kitajske pisave«, intermetalni fazi na osnovi magnezija in bakra, kot sta Mg_2Si in Al_2Cu , ter kompleksni intermetalni fazo, kot sta $\text{Al}_8\text{Mg}_3\text{FeSi}_2$ in $\text{Al}_5\text{Mg}_8\text{Si}_2\text{Cu}_2$. Termodinamični učinki medsebojnega delovanja elementov med postopkom strjevanja pomembno vplivajo na potek in način strjevanja [17]. Druge študije so se osredotočile na uporabo popolnoma sekundarnih surovin [18–20]. Pri ponovnem taljenju vložka se kemijska sestava nekoliko poslabša, kar se odraža v termodinamičnih učinkih in razvoju mikrostrukture, visoka natezna trdnost in raztezek pa se ohranita. Ugotovili smo, da vpliv različnih postopkov toplotne obdelave

characterised by high strength at room and elevated temperatures [7-9]. The starting point of any industrial production chain is the chemical composition, which, due to a series of element interactions and applied technological production parameters, does not always allow replication of the microstructure and thus the development of the mechanical properties [10,11]. The applied technology, i.e., the cooling and thus the solidification rate, has an influence on numerous interactions during the solidification process. The interaction of silicon, copper, iron, and magnesium has been investigated elsewhere [12-16]. The evaluation of the chemical composition begins with the modelling of the equilibrium phase diagram and the prediction of the solidification sequence, which is becoming increasingly complex due to the use of secondary raw materials. The synergy of modelling and performed thermodynamic and microstructural analysis of AlSi9Cu3(Fe) alloy shows the presence of a wide range of alloying elements. AlSi9Cu3(Fe) alloys show the evolution of $\alpha\text{-Al}_{15}\text{Si}_2\text{M}_4$ ($\text{M} = \text{Cr, Fe, Mn, Mo}$), $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$, Al_2Cu and even more complex ones such as $\text{Al}_3\text{Cu}_2\text{Mg}_9\text{Si}_7$, using theoretical modelling. The complex solidification pathway shows primary aluminium α_{Al} , eutectic ($\alpha_{\text{Al}} + \beta_{\text{Si}}$), iron-based intermetallic phase in Al_5FeSi , and "Chinese script" morphology, magnesium, and copper-based intermetallic phase such as Mg_2Si and Al_2Cu , and complex intermetallic such as $\text{Al}_8\text{Mg}_3\text{FeSi}_2$ and $\text{Al}_5\text{Mg}_8\text{Si}_2\text{Cu}_2$ phases. The thermodynamic effects of the interaction of the elements during the solidification sequence have a significant influence on the solidification pathway and the mode of solidification [17]. Other studies have focused on the use of fully secondary raw material [18-20]. The remelting of charge material shows a slight deterioration of the chemical composition, which is

pozitivno vpliva na mikrostrukturo in mehanske lastnosti [7, 9, 21–26].

Za nadaljnje izboljšanje kakovosti popolnoma reciklirane zlitine AlSi9Cu3(Fe) je bila izvedena toplotna obdelava. Pri proizvodnji visokotlačnih ulitkov (HPDC) je treba skrbno določiti režim toplotne obdelave, da bi preprečili nastanek mehurjev zaradi ujetja zraka med postopkom litja [23]. V literaturi se priporočajo zelo nizke temperature taljenja $< 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ in poznejše staranje pri temperaturi $160\text{ }^{\circ}\text{C}$, da bi zagotovili izvedljivost industrijske uporabe [23]. Na splošno toplotna obdelava vpliva na izboljšanje mikrostrukture z razdrobljenostjo in sferoidizacijo evtektskega Si [24–26]. Drugi učinki vključujejo razpad zadnjih strjenih faz na osnovi Cu in/ali Mg in njihovo delno raztapljanje v trdni raztopini α_{Al} ter interakcijo z drugimi elementi, kot je Fe [24–26].

Namen te študije je uporabiti optimalni režim toplotne obdelave (vrsta, temperatura in čas) za zlitino za tlačno litje AlSi9Cu3(Fe) iz popolnoma sekundarne surovine in določiti vpliv na možne mikrostrukturne spremembe.

2 Materiali in metode

V tem delu je bil vložek za preučitev taljenja in naknadne toplotne obdelave vzorcev pripravljen iz 100-odstotnega, tj. popolnoma ponovno pridobljenega materiala.

Kemijska sestava je bila analizirana z optičnim emisijskim spektrometrom ARL-3460 in spektrometrom LECO GDS 900 s tlilno razelektivitvijo. Termodinamični izračuni ravnotežnega in neravnovežnega faznega diagrama po postopku Scheil-Gulliver za zlitino AlSi9Cu3(Fe) so bili opravljeni s programsko opremo Thermo-Calc TCW 5.0 s podatkovno bazo TTAL7 [17, 19–20]. Opravljena je bila primerjava

reflected in the thermodynamic effects and the development of the microstructure, while the high tensile strength and elongation are maintained. It has been found that the influence of different heat treatment processes has a positive effect on the microstructure and mechanical properties [7, 9, 21–26].

To further improve the quality of the fully recycled AlSi9Cu3(Fe) alloy, a heat treatment was carried out. In the production of high-pressure die castings (HPDC), the heat treatment regime should be carefully defined to avoid possible blistering occurrence due to air entrapment during the casting process [23]. Very low solution temperatures $< 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ and subsequent ageing at $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ are recommended in the literature to ensure the feasibility of industrial application [23]. In general, heat treatment influences the refinement of the microstructure by fragmentation and spheroidisation of the eutectic Si [24–26]. Other effects include the decomposition of the last solidifying stage phases based on Cu and/or Mg and its partial dissolution in the α_{Al} solid solution, as well as the interaction with other elements such as Fe [24–26].

The aim of this study is to apply the optimal heat treatment regime (type, temperature, and time) for the HPDC AlSi9Cu3(Fe) alloy from completely secondary raw material and to determine the influence on possible microstructural changes.

2 Materials and Methods

In this work, the charge material for melting and afterward heat treatment samples investigation was prepared from 100%, i.e., completely returned material.

The chemical composition was analysed using the ARL-3460 optical emission

dobljenih rezultatov z rezultati simultane termične analize, opravljene na analizatorju STA 449 Jupiter. Simultana termična analiza omogoča določanje značilnih temperatur in toplotnih učinkov določenih dogodkov med taljenjem in/ali strjevanjem [18,19].

Režim toplotne obdelave je sestavljen iz raztopnega žarjenja pri temperaturi 430 °C, ki mu sledi staranje pri 160 °C, kot je prikazano na sliki 1.

Mikrostrukturo smo pregledali z optičnim mikroskopom (OM) Olympus BX51 in konfokalnim laserskim mikroskopom (CLM) Olympus Lext OLS5100 ter vrstičnim elektronskim mikroskopom, opremljenim z energijsko disperzijskim spektrometrom JEOL5610 in Zeiss CrossBeam 550.

3 Rezultati in razprava

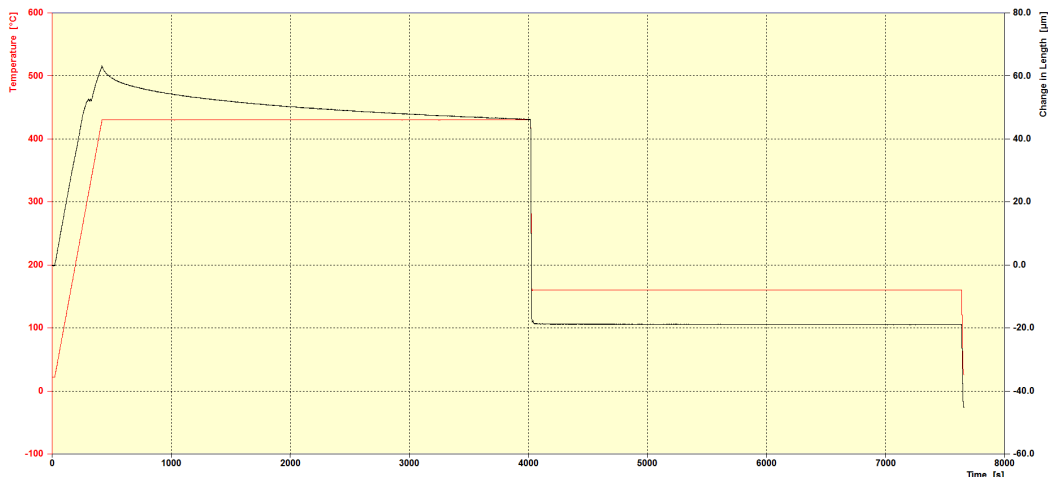
3.1 Rezultati kemijske sestave

Kemijska sestava zlitine AlSi9Cu3(Fe) je navedena v preglednici 1. Primerjava kemijske sestave preskusnih vzorcev s

spektrometer and the LECO GDS 900 glow discharge spectrometer. Thermodynamic calculations of the equilibrium and Scheil–Gulliver non-equilibrium phase diagrams of the AlSi9Cu3(Fe) alloy were carried out using the Thermo-Calc software TCW 5.0 with the TTAL7 database [17, 19-20]. The results obtained were compared with those of the simultaneous thermal analysis performed with STA 449 Jupiter. STA allows the determination of the characteristic temperatures and the thermal effect of certain events during melting and/or solidification [18,19].

The heat treatment regime consists of solution heat treatment at 430 °C followed by ageing at 160 °C, as shown in Figure 1.

The microstructure was examined using optical microscopes (OM) Olympus BX51 and confocal laser microscope (CLM) Olympus Lext OLS5100, and scanning electron microscopes (SEM) equipped with energy dispersive spectrometer JEOL5610 and Zeiss CrossBeam 550.



Slika 1. Režim toplotne obdelave vzorcev sekundarne zlitine AlSi9Cu3(Fe), proizvedenih s tlačnim litjem

Figure 1. Heat treatment regime for secondary AlSi9Cu3(Fe) alloy samples produced using HPDC

certificiranimi podatki ni pokazala nobenih odstopanj od vrednosti, ki jih zahteva standard EN 1706:2010.

Primerjava zahtev in preskušanih vzorcev iz običajnega vložka (CCM 50 %) ter ponovno pridobljenega vložka (RCM 100 %) je pokazala, da so vse dobljene vrednosti pomembnih elementov skladne s standardi, vendar nižje pri ponovno pridobljenem vložku. Zaradi visokih vrednosti bakra in nizke vsebnosti magnezija se pričakuje nastanek intermetalnih faz Al_2Cu in $\text{Al}_5\text{Mg}_8\text{Si}_2\text{Cu}_2$. Glede na ustrezno vsebnost železa in mangana v preskušani zlitini RCM in zaradi uporabljene tehnologije HPDC se pričakuje nastanek $\text{Al}_{15}(\text{Mn},\text{Fe})_3\text{Si}_2$ in Al_5FeSi zaradi neugodnega razmerja med Fe in Mn. Poleg tega lahko interakcija z magnezijem povzroči nastanek faze $\text{Al}_8\text{Mg}_3\text{FeSi}_2$ [17]. Vsebnost drugih nečistoč, kot so svinec, krom in kositer so višje, vendar še zmeraj v mejah, ki jih predpisuje norma.

3.2 Rezultati preučitve mikrostrukture

Razvoj mikrostrukture pred toplotno obdelavo ni bistveno odstopal od zaporedja strjevanja, ki smo ga raziskali že prej [17–19, 21]. Ploskovna porazdelitev kemijskih elementov v značilnem interesnem območju v kovinski matrici, opravljena z vrstičnim

3 Results and Discussion

3.1 Chemical Composition Results

The chemical composition of the AlSi9Cu3(Fe) alloy is given in Table 1. The comparison of the chemical composition of the tested samples with certified data did not show any deviation from the values required by the EN 1706:2010 standard.

The comparison between the requirement and the tested samples in common charge material (CCM 50%) and recycled – return charge material (RCM 100%) showed that all obtained values for important elements are consistent with the norm, but lower in return charge material. Due to the high copper values and low magnesium content, the formation of Al_2Cu and $\text{Al}_5\text{Mg}_8\text{Si}_2\text{Cu}_2$ intermetallic phases is expected. Concerning the corresponding content of iron and manganese in the tested RCM alloy, and due to the applied HPDC technology, the formation of $\text{Al}_{15}(\text{Mn},\text{Fe})_3\text{Si}_2$ and Al_5FeSi is expected regarding unfavourable Fe/Mn ratio. In addition, interaction with magnesium can lead to the formation of the $\text{Al}_8\text{Mg}_3\text{FeSi}_2$ phase [17]. Other impurities, such as lead, chromium and tin are higher, but still within the limits prescribed by norm.

Preglednica 1. Primerjava kemijske sestave vložka EN AB AlSi9Cu3 po standardu EN 1706:2010, običajni vložek (CCM) je sestavljen iz 50 %, sekundarni vložek pa iz 100 % povratnega vložka (RCM)

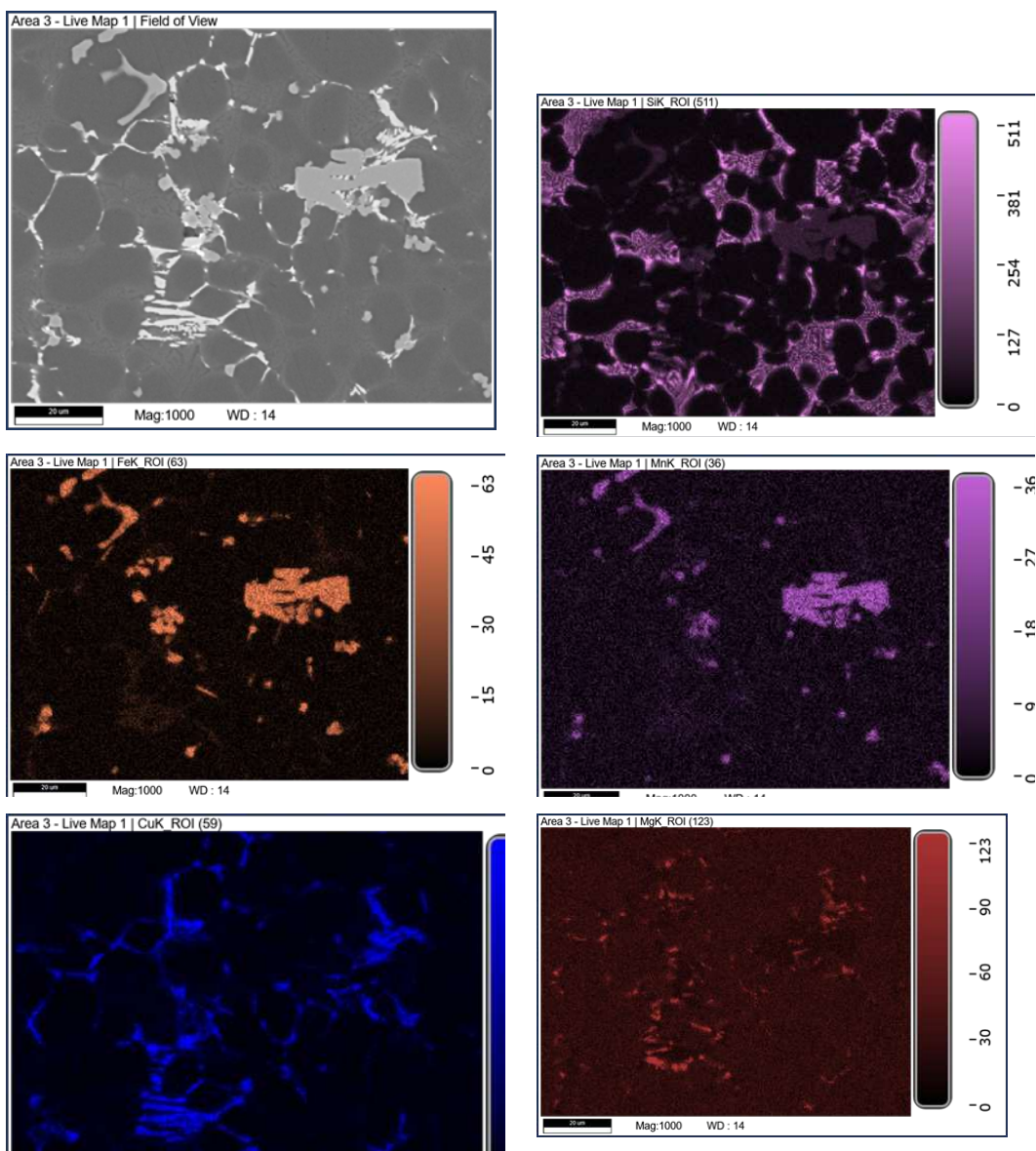
Table 1. Comparison of chemical composition of charge material EN AB AlSi9Cu3 by norm EN 1706:2010, conventional charge material (CCM) consisted of 50%, and secondary charge material consisted form 100% of return charge material (RCM)

ELEMENT w/wt %	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Pb	Sn
EN 1706:2010	8,0–11,0	1,0	2,0–4,0	0,55	0,05–0,55	0,15	1,2	0,35	0,25
CCM (50 %)	9,75	0,89	3,26	0,24	0,12	0,04	0,99	0,06	0,012
RCM (100 %) – ARL	8,75	0,66	2,91	0,20	0,17	0,04	0,82	0,04	0,004
RCM (100 %) – LECO	9,36	0,80	2,65	0,21	0,17	0,03	0,78	0,05	0,024

elektronskim mikroskopom (SEM), opremljenim z energijsko disperzijskim spektrometrom (EDS), je prikazana na sliki 2.

3.2 Microstructure Investigation Results

The microstructure development prior heat treatment showed no significant deviation

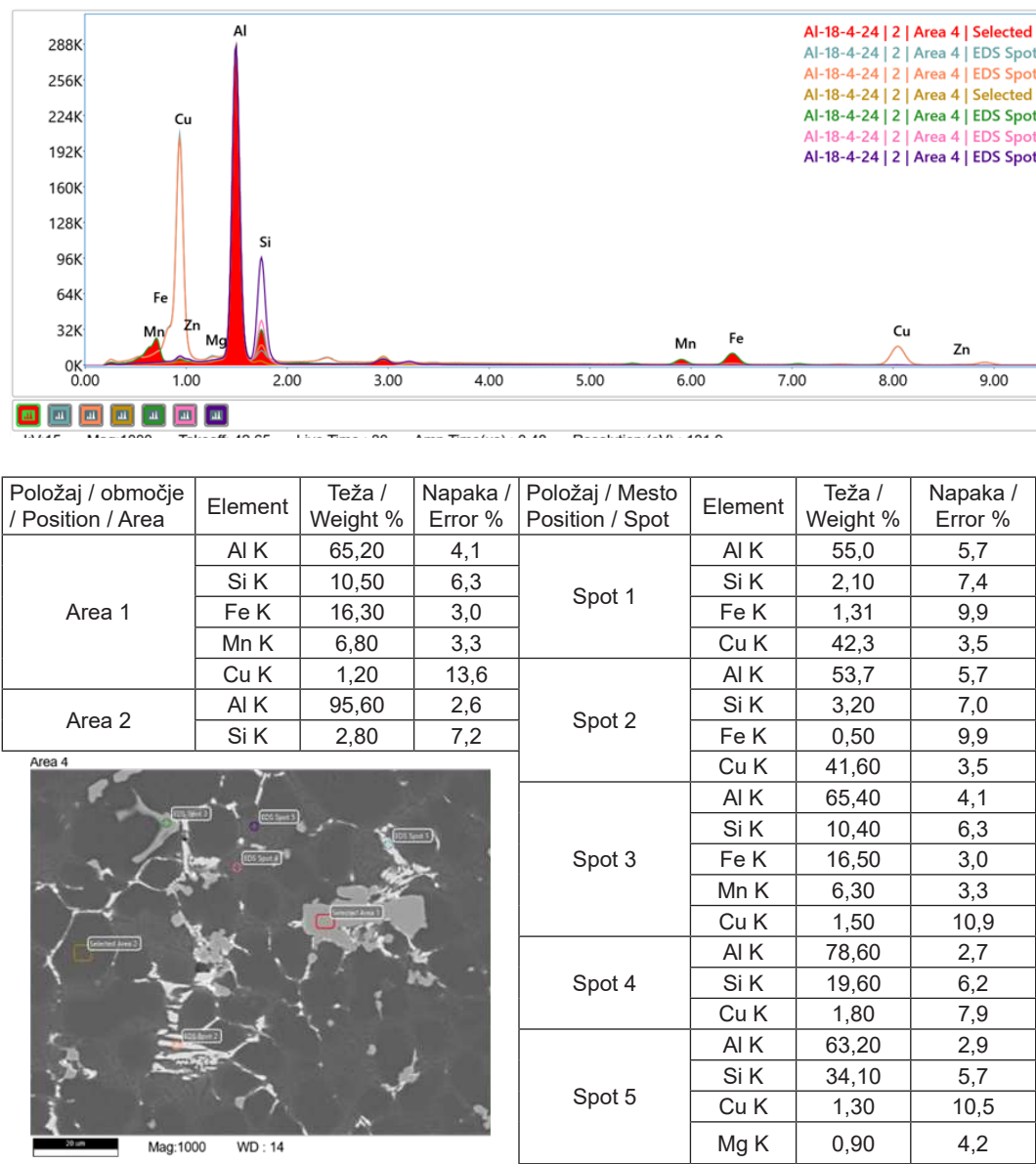


Slika 2. Ploskovna porazdelitev elementov značilnega interesnega območja zlitine AlSi9Cu3(Fe) pred toplotno obdelavo.

Figure 2. Mapping of the characteristic area of interest of AlSi9Cu3(Fe) alloy prior to heat treatment.

Identifikacija posameznih komponent mikrostrukture v interesnem območju v kovinski matrici, pridobljena z vrstičnim elektronskim mikroskopom in energijsko

from the solidification sequence investigated previously [17-19, 21]. Distribution of chemical elements in the characteristic area of interest in metal matrix, performed



Slika 3. Preučitev kemijske sestave posameznih mikrostrukturnih komponent pred toplotno obdelavo
Figure 3. Investigation of the chemical composition of particular microstructural components prior to heat treatment

disperzijskim spektrometrom, je prikazana na sliki 3.

Pred toplotno obdelavo: Rezultati optične mikroskopije (OM) in vrstične elektronske mikroskopije (SEM) kažejo značilno mikrostrukturo zlitine AlSi9Cu3(Fe), izdelane s HPDC. Mikrostruktura je sestavljena iz matrice iz primarnega aluminija α_{Al} , evtektika ($\alpha_{Al} + \beta_{Si}$), intermetalne faze na osnovi železa v pretežno igličasti morfologiji – Al_5FeSi in tudi v morfologiji »kitajske pisave« $Al_{15}(Fe,Mn,Cu)_3Si_2$, ponekod črnega razvejanega Mg_2Si , intermetalne faze $Al_8Mg_3FeSi_2$ ter faz Al_2Cu in $Al_5Mg_8Si_2Cu_2$ na osnovi bakra. Bakrovi skupki se strjujejo na mejah zrn, medtem ko se razvejana bakrova faza nahaja v interdendritnih prostorih.

Primerjava mikrostrukture treh značilnih vzorcev je prikazana na sliki 4.

Po toplotni obdelavi: Rezultati optične mikroskopije (OM) in konfokalne laserske mikroskopije (CLM) kažejo na splošno izboljšano mikrostrukturo zlitine AlSi9Cu3(Fe) zaradi toplotne obdelave, sestavljene iz raztopnega žarjenja pri temperaturi 430 °C in naknadnega staranja pri temperaturi 160 °C. Mikrostruktura je pokazala razdrobljenost in sferoidizacijo finega evtektskega β_{Si} . Večja povečava je pokazala železovo fazo bistveno finejšo in bolj razdrobljeno v igličasti morfologiji – Al_5FeSi in morfologije kitajske pisave v obliki ploščic ali razdrobljeni obliki – $Al_{15}(Mn,Fe,Cu)_3Si_2$, ki so trše od matrice in zasedajo višje mesto v topografiji mikrostrukture. Bakrova in magnezijeva faza se med raztopnim žarjenjem večinoma raztopita v trdno raztopino α_{Al} . Nekaj razdrobljenih ostankov pa je bilo mogoče zaznati na mejah zrn.

Merjenje topografije s konfokalnim laserskim mikroskopom omogoča oceno razvoja komponent mikrostrukture v osi Z in s tem primerjavo trdote posameznih

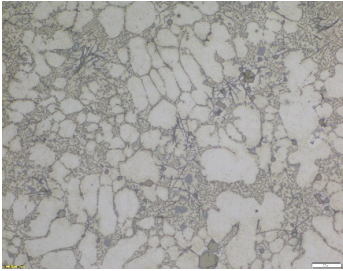
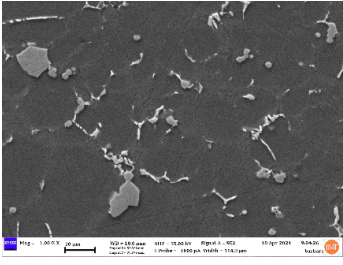
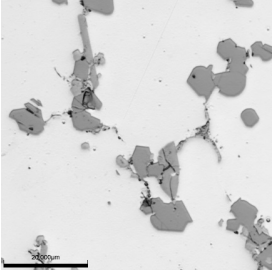
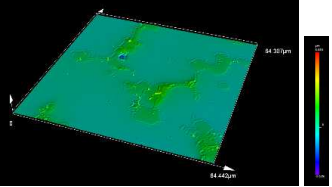
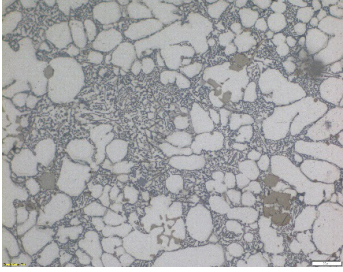
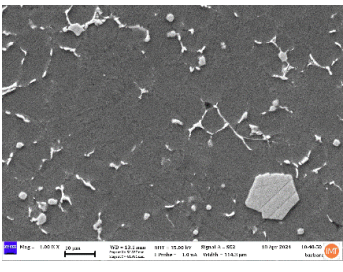
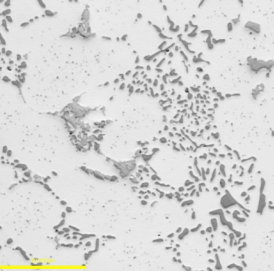
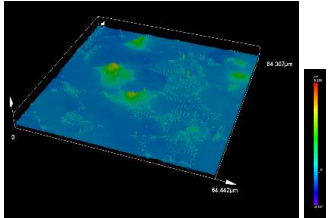
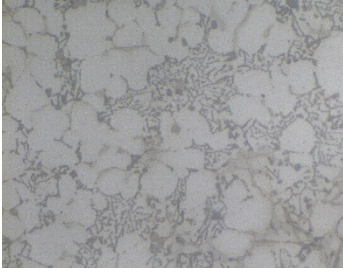
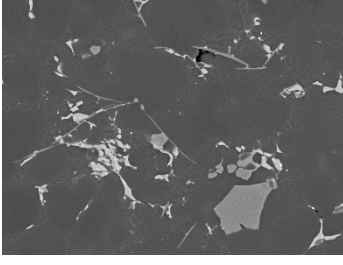
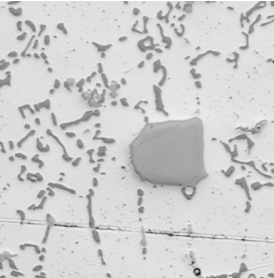
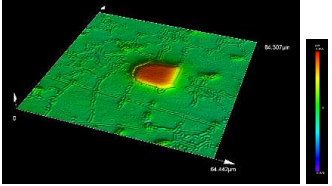
by mapping using SEM equipped with EDS, is shown in Figure 2.

Identification of particular microstructure components at the area of interest in metal matrix, obtained by SEM and EDS is shown in Figure 3.

Prior heat treatment: Results of optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM) show the typical microstructure of AlSi9Cu3(Fe) alloy produced by HPDC. Microstructure investigation consists of a matrix of primary aluminium α_{Al} , a eutectic ($\alpha_{Al} + \beta_{Si}$), an intermetallic phase on the iron base in predominantly needle-like morphology – Al_5FeSi and also in $Al_{15}(Fe,Mn,Cu)_3Si_2$ "Chinese script" morphology, somewhere black branched Mg_2Si , an intermetallic $Al_8Mg_3FeSi_2$ phase, and Al_2Cu and $Al_5Mg_8Si_2Cu_2$ phases on the copper base. Copper clusters are precipitated on the grain boundaries, while the ramified copper phase is located in interdendritic spaces.

Comparison of the microstructure for three characteristic samples is presented in Figure 4.

After heat treatment: The results of optical microscopy (OM) and confocal laser microscopy (CLM) show generally refined microstructure of the AlSi9Cu3(Fe) alloy due to heat treatment consisting of solution heat treatment at 430 °C and subsequent ageing at 160 °C. Microstructure revealed fragmentation and spheroidisation of fine eutectic β_{Si} . A higher magnification revealed significantly finer and fragmented iron base phase in small needle-like – Al_5FeSi and platelet or fragmented Chinese script morphology – $Al_{15}(Mn,Fe,Cu)_3Si_2$, which are harder than the matrix and occupy a higher position in microstructure topography. The copper and magnesium phases largely dissolve in the α_{Al} solid solution during solution heat treatment. However, some of the fragmented residues could be detected at the grain boundaries.

PRED TOPLOTNO OBDELAVO / PRIOR HEAT TREATMENT		PO TOPLOTNI OBDELAVI / AFTER HEAT TREATMENT	
OM – Olympus BX51	SEM – JEOL5610, Zeiss CrossBeam 550	CLM – Olympus Lext OLS5100 – 2D	CLM – Olympus Lext OLS5100 – 3D
			
			
			

Slika 4. Razvoj mikrostrukture zlitine AlSi9Cu3(Fe) pred toplotno obdelavo in po njej

Figure 4. Microstructure development of AlSi9Cu3(Fe) alloy prior and after heat treatment

komponent na podlagi njihove višine po metalografskipripravi. Z laserskimi meritvami smo ugotovili, da je faza $\text{Al}_{15}(\text{Mn,Fe,Cu})_3\text{Si}_2$ v obliki ploščic in razdrobljena (zeleno-rumeno-rdeča) najvišja in najtrša faza v mikrostrukturi. Ničelna raven je večinoma namenjena aluminijasti kovinski matrici. Najnižje intermetalne faze (zeleno-modre) so verjetno najmehkejše faze na osnovi bakra in/ali magnezija, ki po toplotni obdelavi ostanejo na mejah zrn.

4 Sklepne ugotovitve

Kot varnostno pomembni material se standardna aluminijeva zlitina AlSi9Cu3(Fe) (EN AC 46000) pogosto uporablja v avtomobilski in transportni industriji ter zanjo veljajo visoke zahteve glede funkcionalnih in mehanskih lastnosti. Nanje vplivajo predvsem lastnosti surovin, obdelava taline in tehnologija litja. Zaradi velike uporabe sekundarnih, tj. recikliranih surovin in tudi kritičnih surovin (CRM), je treba posebno pozornost nameniti kemijski sestavi zaradi možnega poslabšanja zaradi večkratnega ponovnega taljenja, ki lahko povzroči poslabšanje mehanskih in drugih lastnosti uporabe. Ustrezna toplotna obdelava je vedno veljala za režim homogenizacije mikrostrukture in s tem izboljšanja mehanskih lastnosti. V tej preučitvi smo z različnimi mikroskopi analizirali mikrostrukturo ponovno taljene zlitine za tlačno litje AlSi9Cu3(Fe) v različnih stanjih pred toplotno obdelavo in po njej.

Pred toplotno obdelavo zlitino AlSi9Cu3(Fe) sestavljajo α_{Al} , evtektk ($\alpha_{\text{Al}} + \beta_{\text{Si}}$), intermetalne faze Al_5FeSi , $\text{Al}_{15}(\text{Fe,Mn,Cu})_3\text{Si}_2$, Mg_2Si , $\text{Al}_8\text{Mg}_3\text{FeSi}_2$, Al_2Cu , $\text{Al}_5\text{Mg}_8\text{Si}_2\text{Cu}_2$. Po natančno določenem režimu toplotne obdelave (raztopno žarjenje pri temperaturi 430 °C, ki mu sledi staranje pri temperaturi 160 °C), da bi preprečili nastanek mehurjev, je bila

Measurement of the topography using a confocal laser microscope enables evaluation of microstructure components development in Z axes and thus to compare the hardness of particular components based on their height after metallographic preparation. The laser measurement reveals that the platelet-shaped and fragmented $\text{Al}_{15}(\text{Mn,Fe,Cu})_3\text{Si}_2$ phase (green-yellow-red) is the highest and hardest phase in the microstructure. Zero level is mostly dedicated to the aluminium metal matrix. The lowest intermetallic phases (green-blue) are probably the softest phases, on the base of copper and/or magnesium, remaining at the grain boundaries after heat treatment.

4 Conclusions

As a safety-critical material, the standard aluminium alloy AlSi9Cu3(Fe) (EN AC 46000) is widely used in the automotive and transport industries and exposed to high requirements in terms of its functional and mechanical properties. These are mainly influenced by the raw material properties, melt treatment, and casting technology. The significant use of secondary, i.e., recycled raw material and also CRM, requires special attention to the chemical composition due to potential degradation as a result of repeated remelting, which can lead to deterioration in mechanical and other usage properties. Appropriate heat treatment has always been considered a regime for homogenisation of microstructure and thus improvement of mechanical properties. In this investigation, the microstructure of the remelted HPDC AlSi9Cu3(Fe) alloy was analysed using different microscopes, in different states prior and after the heat treatment.

Prior heat treatment HPDC AlSi9Cu3(Fe) alloy microstructure consists

mikrostruktura bistveno finejša. Opazovanje mikrostrukture kaže:

- homogeno in popolnoma izboljšano mikrostrukturo;
- razdrobljen in fino sferičen evtektski β_{Si} ;
- razdrobljeno igličasto morfologijo Al_5FeSi in morfologijo kitajske pisave v obliki ploščic ali razdrobljeni obliki – $\text{Al}_{15}(\text{Mn,Fe,Cu})_3\text{Si}_2$, ki je na podlagi laserske meritve topografije bistveno trša od vseh drugih sestavin;
- na mejah zrn je bilo mogoče zaznati nekaj razdrobljenih ostankov bakrove in magnezijeve faze.

of α_{Al} , eutectic ($\alpha_{\text{Al}} + \beta_{\text{Si}}$), intermetallic phases' Al_5FeSi , $\text{Al}_{15}(\text{Fe,Mn,Cu})_3\text{Si}_2$, Mg_2Si , $\text{Al}_8\text{Mg}_3\text{FeSi}_2$, Al_2Cu , $\text{Al}_5\text{Mg}_8\text{Si}_2\text{Cu}_2$. After a carefully defined heat treatment regime (solution heat treatment at 430 °C followed by ageing at 160 °C) to avoid blistering, the microstructure was significantly finer. Observation of microstructure shows:

- homogeneous and completely refined microstructure;
- fragmented and spherical fine eutectic β_{Si} ;
- fragmented needle-like Al_5FeSi and platelet-shaped or fragmented Chinese script morphology - $\text{Al}_{15}(\text{Mn,Fe,Cu})_3\text{Si}_2$, which is significantly harder than all other components, based on laser topography measurement;
- Some of the fragmented residues of copper and magnesium phases could be detected at the grain boundaries.

Viri / References

1. European Aluminium, <https://european-aluminium.eu/projets/a-low-carbon-footprint/>
2. European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Grohol, M., Veeh, C., Study on the critical raw materials for the EU 2023: final report, Publications Office of the European Union, 2023, <https://data.europa.eu/doi/10.2873/725585>
3. European Comission, EU principles for sustainable raw materials, Publications Office of the European Union, 2021, <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/47815>
4. Z. Zovko Brodarac, F. Kozina, J. Medved, J. Burja, Investigation of recycled AlSi9Cu3(Fe) alloy, 63rd International Foundry Conference, Ljubljana: Slovenian Foundrymen Society, Portorož, 2023, 10, 1-9
5. Metallurgical Innovation and Materials for Industrial Technology Improvement, Mapping Study on Aluminium Melt Purification from Consumer Scrap, 2023, file:///C:/Users/Admin/Downloads/Mapping-Study_Full-Report_Final.pdf
6. IRT M2P, Technical report: Market Development for secondary Casting Alloys beyond Motor Blocks - Study on casting alloy market and recycling, 2023, file:///C:/Users/Admin/Downloads/IRT_M2P_Market-Development-for-2ary-Casting-Alloys-beyond-Motor-Blocks_final.pdf
7. A. Fabrizi, S. Capuzzi, A. De Mori, G. Timelli, Effect of T6 Heat Treatment on the Microstructure and Hardness of Secondary AlSi9Cu3(Fe) Alloys Produced by Semi-Solid SEED Process, *Metals*, 8 (2018)10, 750, doi:10.3390/met8100750
8. J. Kasińska, D. Bolibruchová, M. Matejka, The Influence of Remelting on the Properties

- of AlSi9Cu3 Alloy with Higher Iron Content, *Materials* 13 (2020)3, 575, doi:10.3390/ma13030575
9. Z. Zovko Brodarac, D. Stanić, M. Folta, F. Kozina, Influence of remelting on mechanical properties of AlSi9Cu3(Fe) alloy, *74th_WFC_E-Abstract_Book*, (ed. Park, Eun Soo), Busan: The World Foundry Organization, Korea Foundry Society, Busan, South Korea, 2022, 1-0437
 10. A. Bjurenstedt, On the influence of imperfections on microstructure and properties of recycled Al-Si casting alloys, *Jönköping University School of Engineering*, 2017, Dissertation Series No. 28
 11. L. Hurtalová, E. Tillová, M. Chalupová, The structure analysis of secondary (recycled) AlSi9Cu3 cast alloy with and without heat treatment, *Engng. Trans.* 61 (2013)3, 197–218
 12. Z. Zovko Brodarac, T. Holjevac Grgurić, M. Vončina, D. Stanić, Thermodynamic and microstructural characterization of AlSi8Cu3 alloy, *Livarski vestnik*, 61 (2014)4, 193-209
 13. Z. Zovko Brodarac, N. Dolić, F. Unkić, Influence of chemical composition on microstructure development of EN AB AlSi9Cu3 alloy, *IOC 2011 Proceedings* (ed. D. Marković, D. Živković, S. Nestorović), Bor: Tehnički fakultet u Boru Univerziteta u Beogradu, Bor, Srbija, 2011, 683-686
 14. Z. Zovko Brodarac, D. Stanić, F. Unkić, Microstructural evaluation of AlSi9Cu3 alloy, *Conference proceedings of 51st International Foundry Conference Portorož 2011*, (ed. M. Debelak), Ljubljana: Društvo livarjev Slovenije, Portorož, Slovenija, 2011, 74-75
 15. Z. Zovko Brodarac, M. Trbižan, F. Unkić, Study of shrinkage cavity occurrence in AlSi9Cu3 high pressure die casting, *Livarski vestnik* 50 (2003)3
 16. C.H. Cacers, M.B. Djurdjevic, T.J. Stockwell, J.H. Sokolowski, The Effect of Cu Content on the Level of Microporosity in Al–Si–Cu–Mg Casting Alloys, *Scr. Mater.*, 40 (1999)5, 631–637
 17. Z. Zovko Brodarac, F. Kozina, D. Stanić, M. Folta, Quality assessment of the AlSi9Cu3(Fe) alloy with regard to recycling ratio, *Congress Proceedings - MME SEE 2023 5th Metallurgical & Materials Engineering Congress of South-East Europe* (ed. M. Sokić, B. Marković, V. Manojlović), Beograd: Association of Metallurgical Engineers of Serbia (AMES), Trebinje, Bosnia and Herzegovina, 2023, 251-256
 18. Z. Zovko Brodarac, F. Kozina, J. Medved, J. Burja, Investigation of recycled AlSi9Cu3(Fe) alloy, *Conference Proceedings 63rd International Foundry Conference (IFC)*, (ed. A. Križman, P. Mrvar, J. Medved, Jožef et al.), Ljubljana: Slovenian Foundrymen Society, Portorož, Slovenia, 2023, 10, 1-9
 19. Z. Zovko Brodarac, F. Kozina, D. Stanić, M. Folta, Solidification of remelted AlSi9Cu3(Fe) alloy, *Book of abstracts of the 7th Central and Eastern European Conference on Thermal Analysis and Calorimetry (CEEC-TAC7)*, Brno: SITECH, Brno Czech Republic, 2023, 134-134
 20. Z. Zovko Brodarac, D. Stanić, M. Folta, F. Kozina, Recycling potential of AlSi9Cu3(Fe) alloy, *Conference proceedings 61st International Foundry Conference (IFC)*, (ed. A. Križman, P. Mrvar, J. Medved, Jožef et al.), Ljubljana: Slovenian Foundrymen Society, Ljubljana: Slovenian Foundrymen Society, Portorož, Slovenia, 2021, 1-8
 21. Z. Zovko Brodarac, D. Stanić, K. Terzić, Utjecaj toplinske obrade žarenjem na svojstva mikrostrukturnih konstituenta AlSi8Cu3 legure, *Conference Proceedings MATRIB*

- 2013 (ed. Ž. Alar, S. Jakovljević, S. Šolić), Zagreb: Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju (HDMT), Vela Luka, Croatia, 2013, 76-83
22. D. Stanić, Z. Zovko Brodarac, K. Terzić, , Utjecaj žarenja radi odstranjivanja jezgri na mehanička i mikrostrukturna svojstva AlSi8Cu3 legure, Proceedings book of 13th International Foundrymen Conference – IFC (ed. Z. Glavaš, Z. Zovko Brodarac, N. Dolić), Sisak: Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Opatija, Croatia, 2013, 376-385
23. S. Cecchel, A. Panvini, G. Cornacchia, Low Solution Temperature Heat Treatment of AlSi9Cu3(Fe) High-Pressure Die-Casting Actual Automotive Components, JMEPEG 27(2018), 3791–3802, doi:10.1007/s11665-018-3478-4
24. E. Sjölander, S. Seifeddine, Optimisation of solution treatment of cast Al-Si-Cu alloys. Mater. Des. 31(2010), 44-49
25. D.L. Zhang, L.H. Zheng, D.H. StJohn, Effect of a short solution treatment time on microstructure and mechanical properties of modified Al-7wt.%Si-0.3wt.%Mg alloy, J. Light Met. 2(2002), 27–36.
26. Y. Han, A.M. Samuel, H.W. Doty, S. Valtierra, F.H. Samuel, Optimizing the tensile properties of Al-Si-Cu-Mg 319-type alloys: Role of solution heat treatment, Mater. Des. 58(2014), 426–438.

AKTUALNO / CURRENT

Livarske prireditve 2025/26

Datum dogodka	Ime dogodka	Mesto in država
16. - 18. 07. 2025	China Diecasting & China Nonferrous Expo	Shanghai, Kitajska
17. - 19. 09. 2025	65. IFC Portorož 2025	Portorož, Slovenija
2. - 3. 10. 2025	World Foundry Summit	Pariz, Francija
24. - 25. 10. 2025	Ledebur-Kolloquium	Freiberg, Nemčija
25. - 28. 10. 2025	The 17th Asian Foundry Congress	Xi'an, Kitajska
12. - 13. 11. 2025	Parts Finishing	Karlsruhe, Nemčija
12. 12. 2025	Polish Foundry Day	Krakov, Poljska
13. - 15. 01. 2026	Euroguss 2026	Nürnberg, Nemčija
09. - 11. 06. 2026	CastForge 2026	Stuttgart, Nemčija

AKTUALNO / CURRENT**67. Avstrijska livarska konferenca**

Na povabilo organizatorja, Avstrijskega livarskega inštituta (ÖGI), smo se 24. in 25. aprila 2025 udeležili 67. Avstrijske livarske konference v Leobnu. Ker ta konferenca tradicionalno poteka izključno v nemškem jeziku, se je dogodka udeležilo nekaj več kot 200 udeležencev, večinoma iz nemško govorečih držav — Avstrije, Nemčije in Švice. Namen takšnih dogodkov je krepitev povezovanja med livarskimi strokovnjaki ter razvoj novih inovativnih idej, usmerjenih v prihodnost livarske industrije. To je še posebej pomembno danes, ko se evropska industrija — zlasti energetska in delovno intenzivne panoge — sooča z velikimi pritiski.

Povezovanje in osebna izmenjava mnenj sta bila med osrednjimi cilji dogodka. Edinstvena kombinacija bogate industrijske tradicije, z Leobnom kot pomembnim industrijskim središčem, ter tesna povezanost znanosti in industrije so dogodku dali poseben pomen.

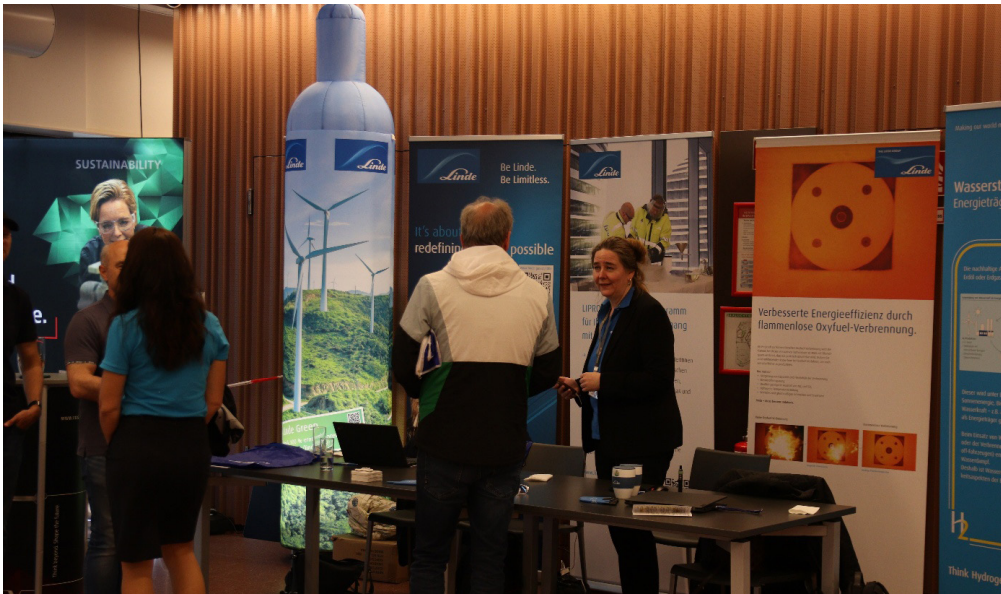


Pogled na plenarno dvorano

Program konference je obsegal vrhunska strokovna predavanja, predvsem predavateljev iz Avstrije in Nemčije. Obravnavali so teme s področja litja železa in jekla ter litja aluminijevih zlitin. Ključni poudarki so bili uspešni praktični primeri digitalizacije v livarski proizvodnji, najnovejše inovacije v raziskavah in tehnologiji ter razvoj novih izdelkov za livarsko industrijo.

Na konferenci smo slišali, da je Avstrija že tretje leto zapored v recesiji. V tem obdobju je država izgubila 10 odstotnih točk konkurenčnosti stroškov dela v primerjavi z Nemčijo. Negativni trendi so prizadeli tudi avstrijsko livarsko industrijo, ki je vrsto let ustvarjala letne

prihodke v višini 1,8 milijarde evrov z okoli 7.500 zaposlenimi. Danes sektor zaposluje približno 6.000 ljudi, ustvarjeni promet pa znaša približno 1,4 milijarde evrov. Položaj ocenjujejo kot zelo resen, zato so vsi deležniki — od politike do interesnih združenj in podjetij — pozvani k hitremu in odločnemu ukrepanju za preprečitev nadaljnega padca tega dela industrije.



Pogled na livarsko razstavo

Kljub trenutnim globalnim gospodarskim težavam in posledični šibkosti livarskega sektorja je letošnja Avstrijska livarska konferenca pustila pozitiven vtis. Organizatorju, Avstrijskemu livarskemu inštitutu, je tudi tokrat uspelo v Leobnu zbrati vrhunske strokovnjake iz avstrijske in mednarodne livarske stroke. S tem ÖGI še naprej ohranja sloves enega največjih izvenuniverzitetnih raziskovalnih inštitutov v Avstriji in širše v Evropi. Poseben pomen ima tudi dolgoletno tesno sodelovanje s Katedro za livarstvo na Montanuniversität Leoben ter s ProGuss Austria.

Organizatorju in soorganiza-torjem izrekamo iskrene čestitke za strokovno izjemno kakovosten in odlično organiziran livarski dogodek.

V QR kodi so dostopna vsa gradiva, predstavljena na konferenci, skupaj s podatki o predavateljih in udeležencih.

Poročala: mag. Mirjam Jan-Blažič



QR koda z gradivom 67. Avstrijske livarske konference

AKTUALNO / CURRENT

Seminar »Spodbujanje energetske učinkovitosti v praksi – Energy Efficiency First«

V maju 2025 je na Gospodarski zbornici Slovenije potekal seminar z naslovom »Spodbujanje energetske učinkovitosti v praksi – (Energy efficiency first)«, ki ga je organiziralo Društvo livarjev Slovenije. Seminar je bil namenjen vsem članicam društva, tako livarnam železovih in jeklenih litin kot tudi livarnam neželezovih litin. Seminarja so se udeležili predstavniki podjetij LTH Casting d.o.o., Eta d.o.o. Cerklje, Omco metals Slovenia d.o.o., Hidria d.o.o. ter Livarne Gorica d.o.o.. Glavni predavatelj na seminarju je bil mag. Bogomil Kandus z Inštituta za spodbujanje energetskih prihrankov Savena d.o.o. Glavni predavatelj je eden izmed vodilnih strokovnjakov na področju upravljanja z energijo; z dolgoletnimi izkušnjami iz prakse ter eden izmed pionirjev pri izvajanju energetskih pregledov v podjetjih. Osrednja tema seminarja je bila uvajanje oz. izvajanje sistema upravljanja z energijo v livarnah. Ker livarstvo samo po sebi spada v energetske intenzivne gospodarske panoge, je za podjetja zakonsko obvezno in tudi s finančnega vidika precej smotno, da spremljajo ter dosledno izvajajo nadzor nad porabo energije v svojih proizvodnjah. V okviru seminarja so bile predstavljene tudi dobre prakse podjetji, ki imajo uveden sistem upravljanja z energijo. Ker je bil seminar namenjen livarnam, je predavatelj posebej izpostavil primer dobre prakse Livarne Gorica d.o.o., ki je lansko leto certificirala sistem upravljanja z energijo ISO 50001:2018. Udeleženci smo imeli tekom seminarja veliko možnosti za izmenjavo koristnih informacij iz prakse ter možnost odprtega dialoga s predavateljem mag. Kandusom, ki je sam po sebi zakladnica znanja s področja upravljanja z energijo. Vsebinska predavanja je bila prilagojena tako tistim podjetjem, ki se uvajanja sistema upravljanja z energijo šele lotevajo, kot tudi tistim, ki imajo sistem že uveden in so želeli svoje znanje s tega področja še malo razširiti in poglobiti. Nenazadnje se roki za prilagoditev in usklajitev z novimi zaključki o BAT za kovaško in livarsko industrijo hitro iztekajo in ena izmed ključnih tehnik je tudi učinkovit sistem upravljanja z energijo v livarnah. Seminar smo zaključili s kosilom



Pogled na udeležence seminarja

na Gospodarski zbornici Slovenije, ki smo ga udeleženci izkoristili za mreženje in deljenje svojih izkušenj in dobrih praks, kar samo po sebi še dodatno prispeva k kvaliteti seminarja. V zaključku bi se rada še enkrat iskreno zahvalila za organizacijo seminarja Društvu livarjev Slovenije in predsednici mag. Mirijam Jan Blažič. Prav tako bi se rada zahvalila predavatelju mag. Bogomilu Kandusu za vsebinsko izvedbo predavanja, kot tudi za vso strokovno pomoč, ki nam jo je nudil v času uvajanja sistema upravljanja z energijo v našem podjetju.

Poročala: *Manca V. Hrvatin*,
Livarna Gorica d.o.o.

AKTUALNO / CURRENT

Seminar o okoljski problematiki za livarne

V organizaciji Društva livarjev Slovenije, Združenja kovinskih materialov in nemetalov pri Gospodarski zbornici Slovenije ter z izvajalci MARBO okolje d.o.o. in Služba za okolje GZS, je 21.05.2025 na Gospodarski zbornici Slovenije potekal vsakoletni seminar na temo Okoljska problematika za livarne, ki je bil v veliki meri posvečen aktualni temi, to je novim Zaključkom o BAT (Best Available Techniques) za kovačnice in livarne barvnih kovin.

Seminarja se je udeležilo 13 podjetij Livarna Gorica d.o.o., KOVIS-LIVARNA d.o.o., KOLEKTOR EVT-sistemi d.o.o., Croning livarna d.o.o., Winoa Abrasiv Muta d.o.o., Valji d.o.o., Hidria d.o.o., ETA d.o.o., OMCO Metals Slovenia d.o.o., Cimos d.d., Talum d.d., Livarna Titan d.o.o. in LTH Castings d.o.o.

Predstavitev ključnih novosti je podala ga. Alenka Markun iz podjetja Marbo Okolje d. o. o. Novi Zaključki o BAT, ki jih je Evropska komisija uradno objavila konec novembra 2024, uvajajo strožje okoljske standarde na področjih emisij v zrak, porabe energije, ravnanja z odpadki in odpadnimi vodami ter celovitega okoljskega vedenja.

Zaključki o BAT za emisije v zrak in vodo so pravno zavezujoči za vse naprave, ki povzročajo industrijske emisije (IED naprave) v roku štirih let od objave – torej najkasneje do konca novembra 2028.

Za številne slovenske livarne in kovačnice to pomeni potrebo po dodatnih investicijah v filtracijo, rekuperacijo toplote in optimizacijo obratovanja.



Pogled na udeležence seminarja

Po krajšem odmoru je ga. Eva Markun, prav tako iz Marbo Okolje, predstavila možnosti sofinanciranja iz evropskih sredstev ter nujne pogoje za upravičenost do financiranja, kot sta skladnost z načelom DNSH (Do No Significant Harm) in dokazovanje odpornosti na podnebne spremembe (climate proofing). Ti kriteriji postajajo obvezna sestavina skoraj vseh razvojnih in investicijskih projektov.

V zadnjem delu dogodka se je ga. Alenka Markun ponovno posvetila načrtovanju novih gradenj in projektov, ki morajo biti že v začetnih fazah skladni z okoljsko zakonodajo. Udeleženci so prejeli konkretna priporočila za pripravo dokumentacije in vodenje projektov v skladu z zakonodajnimi zahtevami.

Seminar se je zaključil s predstavitvijo ga. Antonije Božič Cerar, direktorica Strokovne službe za varstvo okolja pri Gospodarski zbornici Slovenije, ki je predstavila novosti v okoljevarstveni zakonodaji, predvsem spremembe in ključne poudarke novega predloga Zakona o varstvu okolja (ZVO-3). Posebno pozornost je namenila vplivu zakonodajnih sprememb na industrijske obrate in postopkom pridobivanja okoljevarstvenih dovoljenj v prihodnje.

Ob zaključku seminarja so udeleženci soglasno ugotovili, da bodo nadaljnji razvoj in celo obstoj slovenskih livarskih podjetij ter livarstva kot celote resno ogroženi zaradi novih zahtev v zakonodaji. Vse slovenske livarne so se strinjale, da je potrebna enotna in usklajena predstavitev vseh slovenskih livarn pred zakonodajnimi organi. Predlagali so, da Gospodarska zbornica Slovenije preko Združenja za kovinske materiale in nekovine, ter ločeno tudi Društvo livarjev Slovenije, pripravi opozorilni dokument z utemeljenimi predlogi in zahtevami. Ta dokument bo izpostavil neizvedljivost nekaterih konkretnih določil in zahtev, ki so tik pred sprejemom ali že sprejete v slovenski zakonodaji.

Poročala: *Nada Turk*
LTH Castings d. o. o.

AKTUALNO / CURRENT

Indeks razpoloženja evropske livarske industrije (FISI) naleti na prvo oviro aprila 2025

EFF- Evropsko Livarsko združenje je dne 26.maja posredovalo naslednje poročilo:

Po treh mesecih počasnega zaporednega naraščanja je aprila 2025 Indeks razpoloženja evropske livarske industrije (FISI), ki ga mesečno izvaja Evropsko livarsko združenje, naletel na prvo oviro. V primerjavi s podatki iz marca 2025 se je FISI znižal s 94,6 na 94,0.

Čeprav je trenutna situacija v železovi in neželezovi livarski industriji nekoliko boljša kot pred mesecem dni, so k temu nivoju kazalnika prispevala negativna pričakovanja za drugo polovico leta 2025.

Aprila 2025 je bil Indeks poslovnega razpoloženja (BCI), kazalnik, ki ga objavlja Evropska komisija, na ravni -0,67, medtem ko je bil marca 2025 na -0,73.

PMI proizvodnje v evroobmočju se je maja 2025 dvignil na 49,4, z 49,0 v aprilu, kar je bilo nekoliko nad tržnimi pričakovanji 49,3, glede na preliminarne ocene. Indeks nabavnih menedžerjev (PMI) za evroobmočje je kazalnik gospodarskega zdravja proizvodnega sektorja. Temelji na kazalnikih, kot so: nova naročila, stanje zalog, proizvodnja, dobave dobaviteljev in zaposlitveno okolje.

Trenutno leto je prineslo številne izzive: geopolitične dogodke, državne volitve ter nenehno in nujno potrebo po industrijski preobrazbi. Vsak od teh dejavnikov ima takojšen odmev v vseh vejah evropske industrije. Evropska livarsko združenje upa, da je bil april 2025 zgolj enkratna ovira, zato pozorno spremlja trenutno situacijo in prihajajoče izzive, s katerimi se bo soočila evropska livarska industrija.

FISI – Indeks razpoloženja evropske livarske industrije – je najzgodnejši sestavljeni kazalnik, ki zagotavlja informacije o uspešnosti evropske livarske industrije. EFF ga mesečno objavlja in temelji na anketnih odgovorih evropske livarske industrije. Članice EFF podajajo oceno trenutne poslovne situacije v livarskem sektorju in svoja pričakovanja za naslednjih šest mesecev.

BCI – Indeks poslovnega razpoloženja – je kazalnik, ki ga objavlja Evropska komisija. BCI mesečno ocenjuje pogoje razvoja proizvodnega sektorja v evroobmočju in temelji na petih ravnotežjih mnenj iz industrijskih anket: trendi proizvodnje, naročila, izvozne knjige naročil, zaloge in pričakovanja glede proizvodnje.

Graf in dodatne informacije so na voljo na eff-eu.org/ in LinkedIn EFF

Kontakt EFF, e-pošta: info@eff-eu.org

Predstavitve povzela iz informacije EFF:
mag. Mirjam Jan-Blažič.



**DRUŠTVO LIVARJEV
SLOVENIJE**

Vabilo za

65. IFC PORTOROŽ 2025

z livarsko razstavo

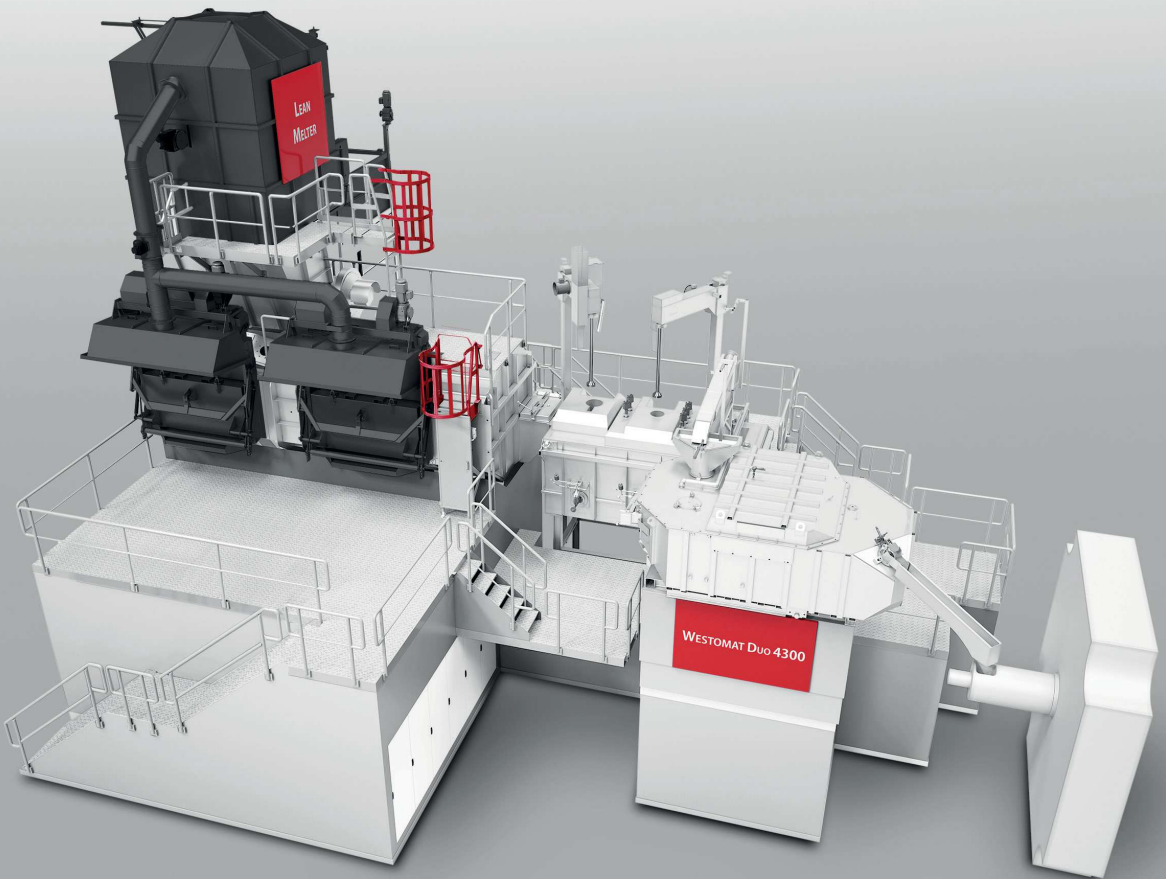
17. - 19. SEPTEMBER 2025

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

StrikoWestofen[®]
A Norican Technology

Meet our Giants designed for Giant Casting.

Flexible. Modular. Individual.



strikowestofen.com



TERMIT

Družba TERMIT je rudarsko podjetje
za pridobivanje kremenovih peskov



NAŠ PROGRAM:

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

www.termit.si