

LIVARSKI VESTNIK

71/2024

2



DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE
SLOVENIAN FOUNDRYMEN SOCIETY



30
YEARS

**PESKALNI STROJI ZA
PESKANJE Z ROBOTOM**



Siapro d.o.o., Postaja 9, 5216 Most na Soči / info@siapro.si / www.siapro.eu / www.strojrem.hr

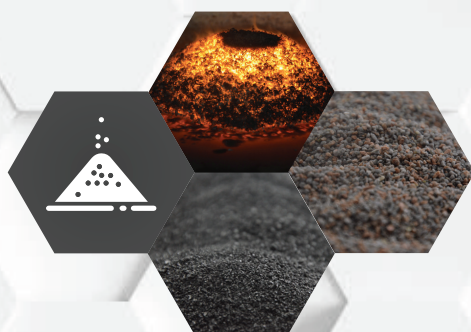
PRODUCTS FOR FOUNDRIES AND STEELWORKS



COATINGS FOR FOUNDRIES



THERMOINSULATION MATERIALS FOR STEELWORKS AND FOUNDRIES



OTHER PRODUCTS

*ferro alloys, inoculants,
nodulators, recarburisers*



REPRESENTATIVES

*Magma, Tribo - Chemie,
Henschke*

 **exoterm-it**

exoterm@exoterm.si

LIVARSKI VESTNIK

Izdajatelj / Publisher:

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

Glavni in odgovorni urednik / Chief and responsible editor:

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

Tehnično urejanje / Technical editing:

mag. Mirjam Jan-Blažič

Uredniški odbor / Editorial board:

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

Prevod v angleški jezik / Translation into English:

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: 35 EUR z DDV
Year subscription: 35 EUR (included PP)

Dano v tisk: junij 2024



SIAPRO d.o.o.
Postaja 9
SI-5216 MOST NA SOČI

Direktor: Damjan Burnik

T: +386 5 38 41 632
E: info@siapro.si
W: www.siapro.eu

VSEBINA / CONTENTS

Stran / Page:

- M. Pesci, L. Colombo: Novi vložki Chemex za zmanjšanje volumna napajalnikov / **New Chemex insert sleeves for the reduction of feeding volume** 62
- J. Medved, M. Vončina, T. Balaško, V. Nahtigal: Pomen kritičnih surovin za trajnostni razvoj metalurških podjetij / **The importance of critical raw materials for the sustainable development of metallurgical companies** 76
- G. Gyarmati, T. Mende: Interakcija udrobnilih sredstev in dvojnih oksidnih plasti v aluminijevi talini / **The Interactions of Grain Refiner Particles and Double Oxide Films in Liquid Aluminum Alloys** 88

AKTUALNO / CURRENT

- Pregled livarskih prireditev v letu 2024 75
- Prehod v trajnostno poslovanje 106
- Velika livarska konferenca treh držav v Salzburgu 108
- Prof. Dr. Gerhard Engels, Im Memoriam 112

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

Novi vložki Chemex za zmanjšanje volumna napajalnikov

New Chemex insert sleeves for the reduction of feeding volume

Povzetek

Sodobne livarne se zaradi povišanja stroškov surovin, do katerih prihaja zaradi trenutnih scenarijev na svetovni ravni, vse pogostejše soočajo z iskanjem načinov za zmanjšanje količine kovinskih ulitkov in posledično z optimizacijo napajalnih sistemov. Poleg tega bo v prihodnjih letih na področju tehnoloških raziskav prevladoval pomemben okoljski vidik uporabe manjše porabe energije, saj bodo livarne vse bolj usmerjene v iskanje drznih rešitev za zmanjšanje porabe virov, nenazadnje tudi z znatnim izboljšanjem izkoristka modelnih plošč.

S ciljem pomagati livarnam pri reševanju teh težav je družba CHEMEX razvila inovativne napajalne sisteme, ki lahko nadomestijo klasične napajalnike. Nova tehnologija napajalnikov tipa T je zdaj realnost, saj nova zasnova v kombinaciji z eksotermnimi mešanicami brez fluora družbe CHEMEX omogoča livarnam, da zmanjšajo količine taline, ki se dovaja, za določen termalni modul, hkrati pa zagotavlja vse prednosti brez vpliva grafita, maksimalno mehansko trdnost pri litju in dimenzijsko natančnost. Namen te študije je poudariti, kako lahko eksotermni vložki nove zasnove znatno zmanjšajo volumen napajalnikov, pri tem pa ohranijo enako vrednost termalnega modula, ki ga konstruktorji potrebujejo za zagotavljanje trdnosti ulitkov.

Zlasti je bilo mogoče preveriti povečanje učinkovitosti napajanja z ocenjevanjem rezultatov pri dejanski uporabi v delujočih livarnah, kjer so rezultati pokazali optimizacijo napajalnega sistema do te mere, da se je volumen taline zmanjšal za 60 %, kar posledično pomeni prihranek energije in stroškov celotnega postopka.

Ključne besede: optimizacija, napajalni sistem, vložek, eksotermni vložek, brez fluora

Abstract

Faced with rises in the cost of raw materials generated by current global scenarios, the modern foundry is increasingly having to look at ways of reducing the amount of metal cast optimizing feeding systems. In addition, the important environmental aspect of using less energy is set to dominate engineering research in the coming years, with foundries driven more and more into seeking bold solutions to minimize resource consumption, not least by significantly improving pattern plate yields.

To help foundries to address these issues, CHEMEX has developed innovative feeding systems that can provide a substitute for classic insert sleeve technologies. The new T-type insert sleeve technology is now a reality, since the latest design, in combination with CHEMEX fluorine-free exothermic compounds, allows the foundry to reduce quantities of feeding metal against a given thermal modulus while guaranteeing all the advantages of zero graphite degeneration, maximum mechanical strength in casting and dimensional accuracy. The purpose of this study is to highlight how exothermic insert sleeves of a new design can bring about a significant reduction in feeding volume while maintaining the

same value of thermal modulus needed by design engineers to guarantee the soundness of castings.

More particularly, it has been possible to verify the maximization of feeding efficiency by evaluating the outcomes of real-world applications in working foundries, where results have revealed an optimization of the feeding system to the point of obtaining a 60% reduction in metal volume, which in turns brings a saving on energy and the costs of the operation overall.

Keywords: optimization, feeding system, insert sleeve, exothermic sleeve, fluorine-free

1 Uvod

Zelo pogosto je dobičkonosnost livarne odvisna od zagotavljanja dobrega izkoristka modelnih plošč in nizke količino izmeta. Za doseg tega cilja je treba uporabiti dober program za načrtovanje in simulacijo, skratka program, ki lahko izračuna natančne vrednosti termalnega modula, tako da je mogoče pravilno načrtovati napajalni sistem. Z zanašanjem zgolj na pretekle izkušnje bi pogosto določili napajalnike z večjimi specifikacijami, kot je potrebno, posledica tega predimenzioniranja pa bi bil drastično zmanjšan izkoristek modelnih plošč ter povečanje s tem povezanih stroškov litja in predelave [1].

Povečanje izkoristka modelnih plošč je bil vedno pomemben vidik livarskega dela, vendar je v luči trenutnih scenarijev na svetovni ravni in njihovega vpliva na stroške energije in surovin postal še pomembnejši in ga ni več mogoče zanemariti.

O teh vidikih energije in surovin bomo zdaj na kratko razpravljali glede na trenutne razmere in njihov vpliv, ki sodobne livarne sili k iskanju ekstremnejših optimizacijskih rešitev.

1.1 Izbira napajalnikov ulitkov

Ko se ulitek ohladi in strdi, se volumen materiala zmanjša - skrči (slika 1). Padec

1 Introduction

Very often, the profitability of a foundry will depend on ensuring good pattern plate yield and low levels of waste. To achieve this objective, a good design and simulation program needs to be utilized, in short, one capable of calculating precise values of thermal modulus, so that the feeding system can be designed correctly. In effect, reliance only on past experience will often lead to the specification of feeders much larger than necessary, and the upshot of this oversizing is that pattern plate yield will be drastically reduced and the associated casting and reworking costs will increase [1].

The maximization of pattern plate yield has always been an important aspect of foundry work, however, in the light of current global scenarios and their repercussions on energy costs and raw materials, it has become even more crucial and can no longer be ignored.

These aspects of energy and raw materials will now be discussed briefly, in the light of the current situation and on their impact in forcing modern foundries to look for more extreme optimization solutions.

1.1 Selection of casting feeders

As the casting cools and solidifies, the material reduces in volume (Fig. 1). With the

temperature pri litju na temperaturo okolja povzroči tri različne vrste krčenja.

1. Krčenje v tekoči fazi: do njega pride, ko se tekoča kovina ohladi s temperature litja na temperaturo ob začetku strjevanja (T_L);
2. Strjevalno krčenje: do njega pride z ohlajanjem kovine od začetka strjevanja (T_L) do popolne strditve (T_S);
3. Krčenje v trdnem: nadaljevanje krčenja, ko se trdna snov ohladi s temperature T_S na temperaturo okolice (popolnoma linearno krčenje).

Krčenje v tekoči fazi in krčenje med strjevanjem je mogoče kompenzirati z napajalniki – rezervoarji tekočega materiala, ki so povezani z livno votlino, ki ob pravilnem razmerju v livno votlino dovajajo dodatno talino, da nadomesti krčenje, do katerega pride med postopkom strjevanja. Material v napajalniku mora ostati v tekočem stanju dlje časa, kot v ulitku, tako da se strdi po strjevanju ulitka.

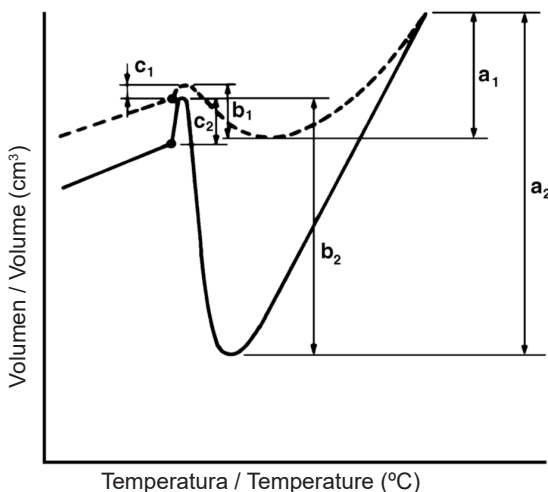
Jasno je, da je prvi korak pri doseganju dobrega učinka napajanja ohranjanje dobre kakovosti taline [1]: doseganje dobrega stanja nukleacije, pridobivanje želenih oblik

drop from casting temperature to ambient temperature, three different shrinkages occur.

1. Liquid shrinkage: occurs as the liquid metal cools from the casting temperature to the temperature at the start of solidification (T_L);
2. Solidification shrinkage: occurs as the metal cools from the start of solidification (T_L) to complete solidification (T_S);
3. Solid shrinkage: the continuation of shrinkage as the solid cools from T_S to ambient temperature (purely linear shrinkage).

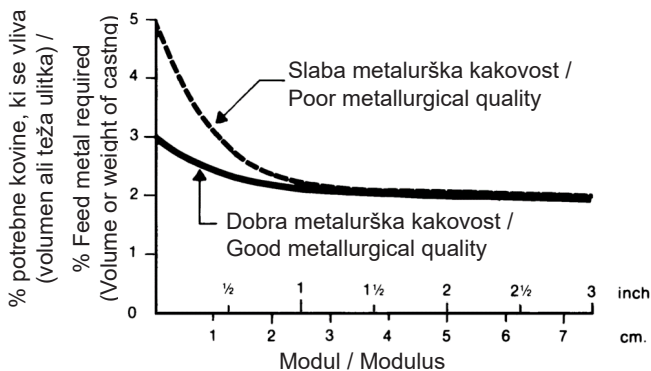
Liquid shrinkage and solidification shrinkage are compensated using risers—reservoirs of liquid material connected to the cavity which, if correctly proportioned, will supply extra liquid material to the cavity to make up for the shrinkage that occurs during the process of solidification. The material in the riser must remain in the liquid state for a duration longer than that of the casting so that it will cool after the casting has cooled.

The first step in obtaining a good feeding effect is that of maintaining a good quality of the metal [1]: achieving a good state of



Slika 1. S temperaturo povezana sprememba volumna dveh različnih litoželeznih izdelkov (1 in 2). Talina se v prvi fazi ohlajanja najprej skrči (a), nato pa se razširi zaradi rasti grafita (b). Proti koncu strjevanja pride do spremembe preostale količine taline v trdno snov s krčenjem (c) [2].

Fig. 1. Temperature-related variation in volume of two different cast iron products (1 and 2). The liquid contracts initially during the first stage of cooling (a), then expands due to graphite growth (b). Toward the end of solidification, the change of the last remaining liquid to solid occurs with contraction (c) [2].



Slika 2. Vpliv metalurške kakovosti na potrebo po napajanju ob upoštevanju kritičnega modula [2].

Fig. 2. influence of metallurgical quality on feeding requirement, taking into account the critical casting modulus [2].

grafita in preprečevanje nastajanja karbidov (slika 2).

Še en pomemben dejavnik za zagotavljanje najboljšega možnega polnjenja je dobra peščena mešanica za formo. Dobra trdnost forme bo pomagala zadržati tlak, ki nastane zaradi raztezanja grafita, kar pomeni, da je mogoče dimenzije napajalnika čim bolj zmanjšati [1].

Livna temperatura je na splošno nekoliko kritična, ne le zaradi zagotavljanja zapolnitve vseh delov kokile, temveč tudi zaradi nemotenega delovanja napajalnega sistema. Nižja kot je livna temperatura, manjši je obseg začetnega krčenja v tekoči fazi. Opozoriti je treba, da pri napajalnikih z velikim premerom, zlasti tistih z veliko zgornjo površino (npr. v obliki kupole), napajanje običajno ni popolno; morda ne zagotovijo dovolj taline, potrebne za nadomestitev krčenja med litjem in strjevanjem, ko temperatura pade pod kritično raven [1].

Na splošno opredelitev napajalnega sistema vključuje naslednje korake [2]:

1. Izračun kritičnega termalnega modula;
2. Določitev termalnega modula napajalnikov ($M_{feeder} = M_{casting} \cdot 1.2$);
3. Izračun izkoristka napajalnika (odvisno od učinkovitosti napajalnika);
4. Opredelitev števila napajalnikov;
5. Opredelitev vratu napajalnika.

nucleation, obtaining the desired forms of graphite, and avoiding the formation of carbides (Fig. 2).

Another essential factor to guarantee the best possible feed is a good mould strength material. In effect, good mould strength will help to contain the pressure generated by the expansion of the graphite, which means that the dimensions of the riser can be kept to a minimum [1].

The casting temperature is generally somewhat critical, not only in ensuring that all sections of the cavity are filled but also in favouring the smooth operation of the feeding system. The lower the casting temperature, the smaller the extent of initial liquid shrinkage will be. It should be noted that with feeders of large diameter, especially those having sizeable upper surfaces (e.g., in a dome shape), the release of metal tends to be less than perfect; they may not start releasing the liquid metal needed to make up for liquid contraction when the temperature drops below a critical level [1].

Generally speaking, the definition of the feeding system involves the following steps [2]:

1. Calculation of the critical thermal casting modulus;
2. Determination of the feeder thermal modulus ($M_{napajalnik} = M_{litje} \cdot 1.2$);

Na koncu je treba omeniti, da je mogoče z uporabo eksotermnih vložkov, ki zaradi večje toplotne učinkovitosti ohranjajo kovino v tekočem stanju dlje časa, doseči znatno izboljšanje izkoristka modelnih plošč, saj se sprostijo do 50% večja količina tekoče kovine.

1.2 Surovine in energija: nova gonilna sila za optimizacijo izkoristka modelnih plošč

Leta 2021 je svetovno gospodarstvo zaznamovalo hitro in pomembno okrevanje. Vendar se je okrevanje ustavilo zaradi nenadne rasti cen električne energije, plina in surovin, kot so kovine [3]. Povišanja cen v zadnjem obdobju so bila nenavadna in jih zaradi trenutnega spora med Rusijo in Ukrajino kratkoročno ne bo mogoče zlahka odpraviti.

Zato je še toliko bolj pomembno, da si na vse načine prizadevamo, tudi pri oblikovanju ulitkov, zmanjšati izgubo energije in porabo surovin.

1.2.1 Učinek surovin

Visoke cene surovin so še posebej škodljivo vplivale na stroške nabave na vseh področjih proizvodnje. Samo v letu 2021 so se cene grodlja (surovega železa) in odpadnega jekla povečale za približno +60%, različnih vrst ferozlitin pa za +50% do +110% [4].

Iz analize najnovejših podatkov, ki primerjajo cene surovin v letu 2020 in 2022, je razvidno, da nekatere razlike kažejo trimestne odstotne vrednosti (preglednica 1). To je imelo takojšen vpliv na proizvodnjo taline ter na poznejše predelovalne postopke in postopke udrobnjevanja.

3. Calculation of feed weight (dependent on the efficiency of the feeder);
4. Definition of the number of feeders;
5. Definition of the feeder neck.

Finally, it will be noted that by using exothermic sleeves, which keep metal in the liquid state for longer thanks to their higher thermal efficiency, a significant improvement in pattern plate yield can be achieved, with up to 50% higher volumes of liquid metal released.

1.2 Raw materials and energy: a new driver for optimizing pattern plate yields

In 2021, the global economy marked a quick, important recovery. However, the recovery was halted by the sudden increase in the price of electricity, gas, and raw materials such as metals [3]. The price rises in question were freakish and will not easily be reversed in the short term, given the current conflict between Russia and Ukraine.

It is therefore even more important that every possible effort be made, not least in the design of castings, to minimize the waste of energy and the consumption of raw materials.

1.2.1 Effect of raw materials

High raw material prices have had a particularly damaging effect on procurement costs in all areas of production. In 2021 alone, there were increases of around +60% for pig iron and steel scrap, and between +50% and +110% for ferroalloys of various types [4].

From an analysis of the most recent data, comparing prices of raw materials in 2020 and 2022, some of the variations will

Preglednica 1. % spremembe cen od leta 2022 do leta 2020 (januar–junij) za železove surovine in materiale, povezane s postopki (vir podatkov: ASSOFOOND – nacionalni sestanek 29.6.2022).

Tab. 1. % price variation 2022 to 2020 (Jan–June) for ferrous raw materials and process-related materials (data source: ASSOFOOND – National Assembly 29.06.2022).

Surovina / Raw Material	Razlika med letom 2022 in 2020 / Variation 2022 vs 2020
Odpadne kovine / Scrap metal	+88 %
Osnovni grodelj (surovo železo) / Basic Pig iron	+108 %
Nodularni grodelj (surovo železo) / Nodular Pig iron	+128 %
Livarski koks / Foundry coke	+124 %
FeSi	+238 %
FeMn	+95 %
FeCr	+93 %
FeMo	+120 %
Cu	+67 %
Sn	+157 %
Grafit / Graphite	+55 %
FeSiMg	+131 %

1.2.2 Učinek energije

V zadnjih mesecih se vse bolj ukvarjamo z energetskimi vprašanji zaradi močnih pritiskov na cene električne energije in plina – zaradi močnih dvigov, ki so številne livarne prisilili v prekinitev proizvodnje, pospešitev in/ali podaljšanje zaustavitve obratov [5].

To je scenarij, zaradi katerega je Evropa na splošno – in še posebej Italija – zaradi napetih geopolitičnih razmer v državah, ki so tradicionalne izvoznice zemeljskega plina, v globoki energetski krizi. Krizo še poslabšujejo špekulativne dejavnosti, ki

be seen to show three-digit percentages (Tab. 1). These had an immediate impact both on the production of liquid metal and on subsequent processing and refining treatments.

1.2.2 Effect of energy

There has been a growing preoccupation with energy issues in recent months, concerning the strong pressures generated on electricity and gas prices — sharp rises that have forced many foundries to suspend production, bringing forward and/or extending plant shutdowns [5].

It is a scenario which, in the context of a tense geo-political situation involving countries that are traditionally exporters of natural gas, sees Europe generally — and Italy in particular — in the grip of a deep energy crisis. It is a crisis made worse by speculative activities that have an influence, in a variety of ways, on increases in the price of electricity [5].

The general picture described above gives added importance to the subject of energy and its rationalization for foundries, which must do everything possible to keep energy consumption in check, considering, above all, that the most energy-intensive departments are those concerned with the melting and casting of metal: these account for some 80% of the consumption of all primary activities [5].

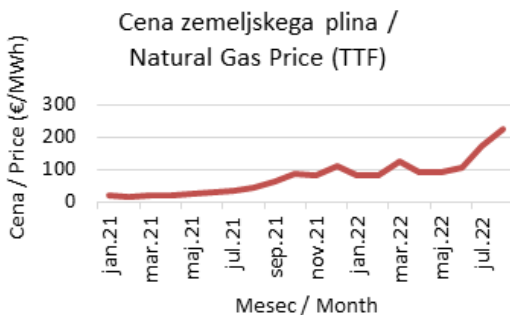
Analysing the trend of the single national price for electricity (PUN in Italy - Prezzo Unico Nazionale) it will be seen that since January 2021, and more so at the start of 2022, the price of electricity has risen to exceptionally high levels (Fig. 3). With the outbreak of hostilities between Russia and Ukraine (24 February 2022), prices again rise sharply [3]. After a first worrying peak had registered in March of 2022, there came

na različne načine vplivajo na rast cen električne energije [5].

Zgoraj opisano splošno stanje daje dodaten pomen energiji in njeni racionalizaciji za livarne, ki morajo storiti vse, kar je mogoče, da bi ohranile porabo energije pod nadzorom, zlasti glede na to, da so energetske najbolj potratni oddelki, ki se ukvarjajo s taljenjem in ulivanje kovin: ti predstavljajo približno 80% porabe vseh primarnih dejavnosti [5].

Pri analizi gibanja enotne nacionalne cene električne energije (PUN v Italiji – tj. Prezzo Unico Nazionale) je razvidno, da se je od januarja 2021, še bolj pa v začetku leta 2022, cena električne energije dvignila na izjemno visoko raven (slika 3). Po izbruhu sovražnosti med Rusijo in Ukrajino (24. februarja 2022) so se cene ponovno močno zvišale [3]. Po doseženi prvi najvišji ceni, ki je bila zabeležena marca 2022, je cena električne energije od maja naprej strmo naraščala, povprečna cena avgusta pa je znašala 543 EUR/MWh.

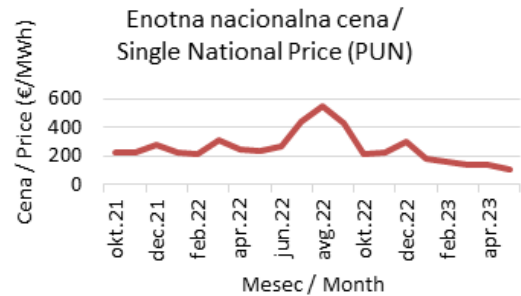
V primeru zemeljskega plina vsi tržni kazalniki kažejo na strmo naraščanje cen že konec leta 2021, ki se je v začetku leta 2022 še povečala in nato v poletnih mesecih dosegla nevzdržne ravni (slika 4).



Slika 4. Gibanje cen zemeljskega plina (vir podatkov: EEX – evropski indeks promptnih cen plina).

Fig. 4. Trend of natural gas price (data source: EEX – European Gas Spot Index).

a precipitous rise in the price of electricity from May onwards, and the average price in August was 543 €/MWh.



Slika 3. Gibanje cen električne energije (vir podatkov: ARERA – regulativni organ za energetiko, omrežja in okolje).

Fig. 3. Trend of electricity price (data source: ARERA – Regulatory Authority for Energy Networks and Environment).

In the case of natural gas, all the market indicators show a sharp rise in price as early as the back end of 2021, accentuated further at the beginning of 2022, and subsequently reaching unsustainable levels during the summer months (Fig. 4).

The result of this upsurge in energy prices has been that Italian foundries are faced with enormously increased costs which are probably destined to remain high over the coming years as well, but which in 2022 became unsustainable, threatening to eat away at the competitiveness of domestic operators and favour their international counterparts [3].

2 Experimental part

This project is based on the experimental evaluation of various case studies performed

Posledica tega skoka cen energije je, da se italijanske livarne soočajo z izjemno visokimi stroški, ki bodo verjetno ostali visoki tudi v prihodnjih letih, leta 2022 pa so postali nevzdržni in videti je bilo, da se bo zaradi njih zmanjšala konkurenčnost domačih proizvajalcev v primerjavi z njihovimi mednarodnimi partnerji [3].

2 Eksperimentalni del

Ta projekt temelji na poskusni oceni različnih študij primerov, ki so bile izvedene v proizvodnji v dveh italijanskih livarnah: Arizzi Fonderie S. Giorgio in Ironcastings.

Natančneje, inovativni vložki CHEMEX tipa T (slika 5), izdelani iz materiala brez fluora in okolju prijaznega postopka cold box, so bili primerjani z običajnimi vložki, ki jih ponujajo različni proizvajalci.

V vseh primerih je bilo pred začetkom dejanske priprave vzorca najprej preverjeno obnašanje postopkov litja in strjevanja s simulacijsko programsko opremo NovaFlow&Solid 6.5r4 (slika 6).

in production at two Italian foundries: Arizzi Fonderie S. Giorgio and Ironcasting.

More specifically, innovative CHEMEX T-type insert sleeves (Fig. 5), produced with fluorine-free material and eco-friendly cold-box binder, were compared with traditional insert sleeves offered by various producers.

In all cases, before proceeding with the actual sample production, the behaviour of the filling and solidification processes was first verified using the simulation software NovaFlow&Solid 6.5r4 (Fig. 6).



Slika 5. Vložek tipa T, ki ga je razvila družba CHEMEX z uporabo mešanic brez fluora in okolju prijaznega postopka cold box.

Fig. 5. T-type insert sleeve developed by CHEMEX using fluorine-free compounds and eco-friendly cold-box.

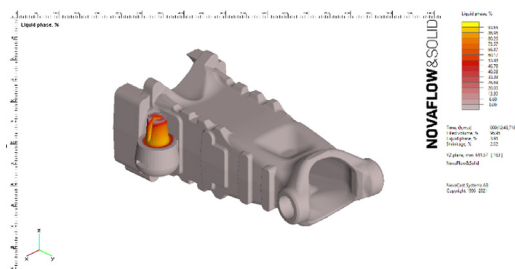


Fig. 6. initial verification with simulation of filling and solidification (NovaFlow&Solid 6.5r4) for the Iron castings case.

Slika 6. Začetno preverjanje s simulacijo čitja in strjevanja (NovaFlow&Solid 6.5r4) za primer Ironcastings.

Obe livarni sta svoj postopek taljenja spremljali s programsko opremo za termično

Both foundries monitored their melting process using thermal analysis software, and both likewise followed the process parameters specified in the production charts for each of the case studies.

All castings and feeding systems examined in the various experimental tests were cleaned and then sectioned.

2.1 Arizzi fonderie case study

Different solutions were evaluated in the present project. More exactly, the foundry studied two distinct cases using two different feeding solutions.

analizo in obe sta prav tako upoštevali parametre postopka, določene v diagramih proizvodnje za vsako študijo primera.

Vsi ulitki in napajalni sistemi, ki so bili pregledani v različnih eksperimentalnih preskusih, so bili očiščeni in nato prerezani.

2.1 Študija primera arizzi fonderie

V tem projektu so bile ocenjene različne rešitve. Natančneje, livarna je preučevala dva različna primera z dvema različnima rešitvama napajanja.

V prvi študiji primera je bilo na modelno ploščo nameščenih deset ulitkov, vsak par ulitkov pa je bil napajan z enim vložkom 6/9 (slika 7). Pri tehnološkem preskusu je bilo odločeno, da se vsak običajni vložek 6/9 zamenja z vložkom CHEMEX EK 50/80 T (preglednica 2).

V drugi študiji primera je bilo na modelno ploščo nameščenih deset ulitkov, z eksotermnimi napajalniki s štirimi vložki: dvema tipa 6/9 in dvema tipa 10/13. Pri tehnološkem preskusu je bilo odločeno, da se dva vložka 10/13 zamenjata z vložki CHEMEX EK 80/140 T (preglednica 2).

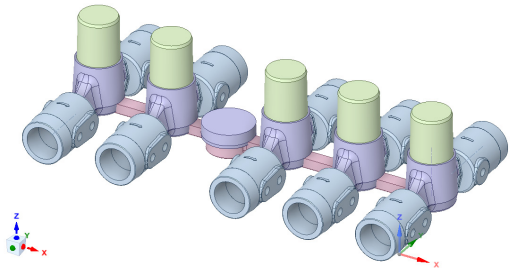
Vsi tehnični podatki iz različnih primerjav so na voljo v preglednici 2.

Preglednica 2. Vložki, ki se uporabljajo pri pripravi vzorcev v livarni Arizzi Fonderie S. Giorgio, za dve različni študiji primerov.

Tab. 2. insert sleeves used in sample production at the Arizzi Fonderie S. Giorgio foundry, for the two different case studies.

Vložek / Sleeve	M (cm)	V (cm ³)
EK 50/80 T	1,7	105
K_6/9	1,7	178
EK 80/140 T	2,8	377
K_10/13	2,8	783

In the first case study, ten castings were placed on the pattern plate, each pair of castings fed by one 6/9 insert sleeve (Fig. 7). For the technological test, it was decided to replace each traditional 6/9 sleeve with a CHEMEX EK 50/80 T sleeve (Tab. 2).



Slika 7. Konfiguracija prvega preskusa z vložkom CHEMEX EK 50/80 T.

Fig. 7. Configuration of first test with CHEMEX EK 50/80 T.

In the second case study, ten castings were placed on the pattern plate, fed with a set of exothermic feeders including four insert sleeves: two of 6/9 type and two of 10/13 type. For the technological test, it was decided to replace the two 10/13 sleeves with CHEMEX EK 80/140 T sleeves (Tab. 2).

All the technical data from the various comparisons can be seen in Tab. 2.

All tests were conducted following the process standards adopted by the foundry.

2.2 Ironcastings case study

In this case study, two castings were placed on the pattern plate, each fed with a set of exothermic feeders including three insert sleeves: two of 7/10 type and one of 6/9 type. For the technological test, it was decided to replace one of the two 7/10 sleeves with a CHEMEX EK 60/90 T sleeve (Tab. 3). The

Vsi preskusi so bili opravljeni v skladu s standardi predelave, ki jih je sprejela livarna.

2.2 Študija primera ironcastings

V tej študiji primera sta bila na modelno ploščo nameščena dva ulitka, vsakega od njih je napajal komplet eksotermnih napajalnikov, vključno s tremi vložki: dvema tipa 7/10 in enim tipa 6/9. Pri tehnološkem preskusu je bilo odločeno, da se eden izmed vložkov 7/10 zamenja z vložkom CHEMEX EK 60/90 T (preglednica 3). Pri drugem ulitku, ki je bil pripravljen vzporedno v isti formi, je bila ohranjena običajna konfiguracija, da je bila mogoča neposredna primerjava.

Vsi preskusi so bili opravljeni v skladu s standardi predelave, ki jih je sprejela livarna.

3 Rezultati

V spodnjih razdelkih so povzeti najpomembnejši rezultati različnih industrijskih primerjalnih preskusov med običajnimi vložki in vložki CHEMEX tipa T, izdelanimi iz materiala brez fluora in okolju prijaznega veziva cold box.

3.1 Študija primera arizzi fonderie

Ko so bili ulitki razrezani, ni bilo nobene poroznosti in napajanje je bilo pravilno. V prvem primeru je ob enaki celovitosti celotnega ulitka vložek CHEMEX EK 50/80 T omogočil prihranek 73 cm³ tekoče kovine za vsak zamenjani vložek (preglednica 4). Zato je bilo zabeleženo potencialno zmanjšanje za 2,65 kg za vsako formo (slika 8).

traditional configuration was retained for the other casting, made in parallel in the same flask, to enable a direct comparison.

Preglednica 3. Vložki, uporabljeni v okviru študije v livarni Ironcastings.

Tab. 3. Insert sleeves used for the study at the Ironcastings foundry.

Vložek / Sleeve	M (cm)	V (cm ³)
EK 60/90 T	1.9	117
K_7/10	2.0	296

All tests were conducted following the process standards adopted by the foundry.

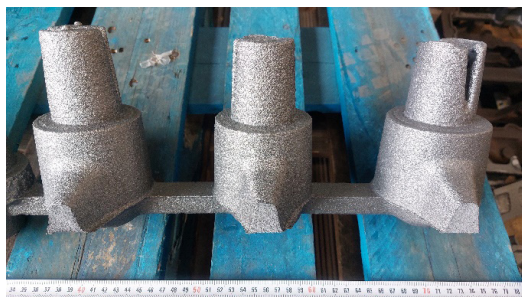
3 Results

The sections below summarize the salient results from the various industrial comparison tests between the traditional insert sleeves and the CHEMEX T-type insert sleeves made with fluorine-free material and an eco-friendly cold-box binder.

3.1 Arizzi fonderie case study

When the pieces were sectioned, there was no porosity in evidence and the feeding had been correct. In the first case, given the same integrity of casting overall, the CHEMEX EK 50/80 T sleeve was able to provide a saving of 73 cm³ in liquid metal for each sleeve substituted (Tab. 4). Hence, a potential reduction of 2.65 kg for each flask (Fig. 8).

In the case of the feeder with the larger modulus, the possible saving of liquid metal was 406 cm³ for each of the sleeves



Slika 8. Detajl napajalnikov po peskanju. Desno, ostanek materiala iz klasičnega vložka 6/9. Levo, ostanek materiala iz vložka CHEMEX EK 50/80 T.

Fig. 8. Detail of feeders after shot-blasting. Right, residual material from the classic 6/9 sleeve. Left, residual material from the CHEMEX EK 50/80 T sleeve.

V primeru napajalnika z večjim modulom je bil možen prihranek taline 406 cm³ za vsakega od zamenjanih vložkov (preglednica 4). Zato je bilo zabeleženo potencialno zmanjšanje za 5,84 kg za vsako formo.

Preglednica 4. Študija primera v livarni Arizzi Fonderie S. Giorgio: prihranek kovine, ki ga zagotavljajo vložki CHEMEX tipa T, izražen v volumnu, masi in volumskem odstotku.

Tab. 4. Case study at Arizzi Fonderie S. Giorgio foundry: metal saving provided by CHEMEX T-type insert sleeves, expressed in terms of volume, mass and percentage volume.

Vložek / Sleeve	Delta V (cm ³)	Delta (%)	Delta (kg)
EK 50/80 T	73	41	0,53
K_6/9			
EK 80/140 T	406	52	2,92
K_10/13			

3.2 Študija primera ironcastings

Ko so bili ulitki razrezani, ni bilo nobene poroznosti in napajanje je bilo pravilno (slika 9). Ob enaki celovitosti celotnega ulitka

substituted (Tab. 4). Hence, a potential reduction of 5.84 kg for each flask.

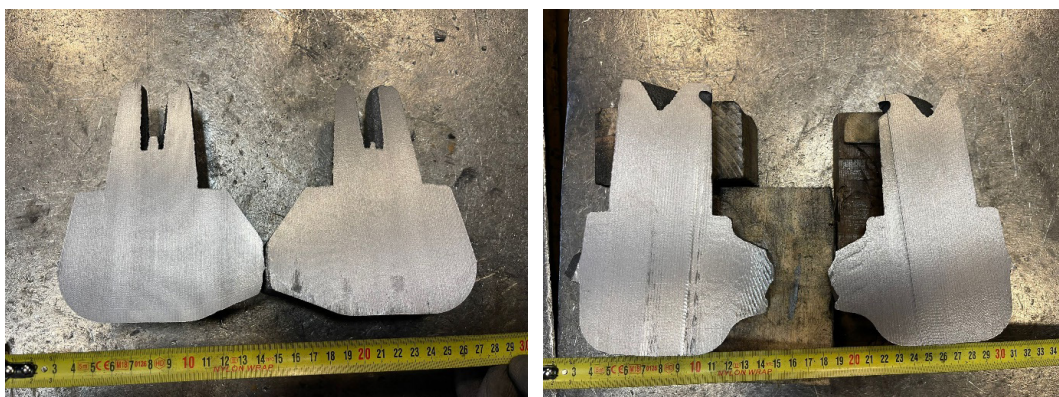
3.2 Ironcastings case study

When the pieces were sectioned, there was no porosity in evidence and the feeding had been correct (Fig. 9). Given the same integrity of casting overall, the CHEMEX EK 60/90 T sleeve was able to provide a saving of 179 cm³ in liquid metal for each 7/10 sleeve substituted (Tab. 5). Hence, a potential reduction of 5.16 kg for each flask (Tab. 5).

Preglednica 5. Študija primera v livarni Ironcastings: prihranek kovine, ki ga zagotavlja vložek CHEMEX tipa T, izražen v volumnu, masi in volumskem odstotku.

Tab. 5. Case study at Ironcastings foundry: metal saving provided by CHEMEX T-type insert sleeve, expressed in terms of volume, mass and percentage volume.

Vložek / Sleeve	Delta V (cm ³)	Delta (%)	Delta (kg)
EK 60/90 T	179	60	1.29
K_7/10			



Slika 9. Ostanek materiala iz prerezanih napajalnikov. Levo, ostanek iz vložka CHEMEX EK 60/90 T. Desno, ostanek iz klasičnega vložka 7/10.

Fig. 9. Residual material from the sectioned feeders. Left, residue from CHEMEX EK 60/90 T sleeve. Right, residue from classic 7/10 sleeve.

je vložek CHEMEX EK 60/90 T omogočil prihranek 179 cm³ tekoče kovine za vsak zamenjani vložek 7/10 (preglednica 5). Zato je bilo zabeleženo potencialno zmanjšanje za 5,16 kg za vsako formo (preglednica 5).

4 Sklepi in možnosti

Trenutne svetovne razmere, zaradi katerih so se z letom 2021 zvišale cene surovin, in strmo naraščanje stroškov energije, ki smo mu bili priča leta 2022, silijo sodobne livarne k bolj pozornemu zmanjševanju količine ulite taline in s tem k optimizaciji napajalnih sistemov. Poleg tega bo v prihodnjih letih na področju tehnoloških raziskav prevladoval pomemben okoljski vidik uporabe manjše porabe energije in nižjih izpustov CO₂, saj bodo livarne vse bolj usmerjene v iskanje drznih rešitev za zmanjšanje porabe virov, nenazadnje tudi z znatnim izboljšanjem izkoristka modelnih plošč.

V tej študiji je bilo poudarjeno, kako je mogoče z novo zasnovo eksotermnih vložkov CHEMEX tipa T znatno zmanjšati

4 Conclusions and prospects

The current global situation, which led to an increase in the prices of raw materials starting in 2021, as well as the steep increases in energy costs that we have seen in 2022, are pushing modern foundries to more attentively reduce poured metal, thereby optimizing feeding systems. In addition, the important environmental aspect of using less energy and emitting less CO₂ is set to dominate engineering research in the coming years, with foundries driven more and more into seeking bold solutions aimed at minimizing the consumption of resources, not least by significantly improving pattern plate yields.

In this study it has been highlighted how the new design of exothermic CHEMEX T-type insert sleeves make it possible to bring about a significant reduction in feed volume, while maintaining the same value of thermal modulus needed by design engineers to guarantee the soundness of castings.

volumen napajanja, hkrati pa ohraniti enako vrednost termalnega modula, ki ga inženirji konstruktorji potrebujejo za zagotavljanje trdnosti ulitkov.

Preskusi, opravljeni v obeh livarnah, so dali odločno pozitivne rezultate. Različne industrijske uporabe so dokazale visoko učinkovitost vložkov CHEMEX tipa T, izdelanih iz materiala brez fluora in okolju prijaznega postopka cold box. Pri uporabi vložkov tipa T je bil prihranek v talini od 41 % do 60 % v primerjavi z običajnimi vložki pri enakem termalnem modulu. Zato je to poskusno delo pokazalo maksimalno učinkovitost napajanja in neto prihranke pri litju taline, kar je privedlo do prihranka energije in zmanjšanja proizvodnih stroškov za vsak študijski primer.

5 Zahvala

Zahvaljujemo se za neprecenljivo sodelovanje in pomembno podporo, ki so jo v vseh fazah tega projekta nudile inženirske ekipe livarn, ki so bile ključnega pomena za njegovo uresničitev, in sicer Ironcastings in Arizzi Fonderie S. Giorgio. Posebej se zahvaljujemo g. Albertu Albertiniju za vzajemno spoštovanje in zaupanje ter g. Gennaro Esposito za pomoč in nadzor. Posebna zahvala gre tudi g. Paolu Salviju in g. Simonu Magliju za njuno vztrajnost pri stalnem prizadevanju pri iskanju nenehnih izboljšav.

The tests conducted at both foundries gave decidedly positive results. The various industrial applications have provided evidence as to the high efficiency of CHEMEX T-type insert sleeves made using fluorine-free material and environment-friendly cold-box binder. With the application of T-type sleeves, the volume of savings in liquid metal ranged from 41% to 60% compared to the traditional insert sleeves for the same thermal modulus. Therefore, this experimental work showed a maximization of the feeding efficiency and net savings in poured liquid metal, with the resulting energy savings and reduction of production costs for each case study.

5 Acknowledgements

Our thanks for the invaluable collaboration and essential support given at all stages of this project by the engineering teams of the foundries that were instrumental in bringing it about, namely Ironcastings and Arizzi Fonderie S. Giorgio. In particular, a special thank you to Alberto Albertini for the mutual esteem and trust extended to us, and to Gennaro Esposito for his help and supervision. Special thanks also to Paolo Salvi and Simone Magli for their tenacity in the constant search for continual improvement.

6 Bibliografija / Bibliography

- [1] J. D. Mullins, "Using bottle type risers to improve casting yield," DIS Hot Topics #1, 2002.
- [2] S. I. Karsay et al., Ductile Iron – The essentials of gating and risering system design, Rio Tinto Iron & Titanium Inc., 2000.
- [3] O. Martinelli, "I costi delle materie prime energetiche continuano a salire senza freni," In Fonderia, no. 2, pp. 36-41, 2022.

- [4] M. Pisanu, "Rimbalzo del +19% nel 2021 per la produzione di getti ferrosi," In Fonderia, no. 3, pp. 18-30, 2022.
- [5] G. Corelli and M. Prando, "La struttura energetica delle fonderie: il quadro offerto dalle analisi delle diagnosi energetiche," In Fonderia, no. 1, pp. 12-22, 2022.

AKTUALNO / CURRENT

Pregled livarskih prireditev v letu 2024

Datum dogodka	Ime dogodka	Mesto in država
10.09 – 14.09. 2024	AMB -Internationale Ausstellung für Metallbearbeitung	Stuttgart , Nemčija
18.09. – 20.09. 2024	64. IFC Portorož 2024	Portorož, Slovenija
23.09 – 25.09. 2024	3 rd Carl Loper Conference	Brasov, Romunija
24.09 – 25.09. 2024	METAL EXPO 2024	Kielce, Poljska
26.09. – 27.09. 2024	13. Ranshofener Leichtmetalltage 2024	Saalfelden, Avstrija
08.10. – 10.10. 2024	Aluminium	Düsseldorf, Nemčija
25.10 – 30.10. 2024	The 75 th World Foundry Congress	Deyang, Kitajska

Pomen kritičnih surovin za trajnostni razvoj metalurških podjetij

The importance of critical raw materials for the sustainable development of metallurgical companies

Povzetek

Napredni materiali so temeljni gradniki naše družbe in gospodarstva in dobivajo vedno večji pomen. Prehoda v brezogljično družbo brez naprednih materialov ne bo. Zato moderna družba iz energetskega intenzivnega obdobja prehaja v obdobje materialov. Sistemsko je potrebno najti najboljše krožne rešitve materialnih tokov, kar je opredeljeno kot industrijska simbioza. Področje materialov se osredotoča na inovacije in izobraževanje povezano z industrijsko simbiozo, podaljšanjem življenjske dobe izdelkov, dizajnom za recikliranje ter recikliranjem izrabljenih sekundarnih surovin. Potrebni bodo revolucionarni tehnološki preboji naprednih materialov na petih velikih področjih: energetika, mobilnost, izdelovalne tehnologije, gradbeništvo in kmetijstvo. Bolj učinkovito reciklažo odpadnih kovin, zmanjšanje porabe energije, zmanjšanje ogljičnega odtisa in proizvodnjo brez odpadkov lahko zagotovimo z uporabo umetne inteligence v vrednostni verigi od zbiranja, razvrščanja in metalurške predelave odpadkov. Metalurška in kovinsko predelovalna podjetja v Sloveniji imajo pomembno vlogo saj proizvedejo za prib. 25 % bruto nacionalnega dohodka. Dejstvo je, da »ko gre dobro gospodarstvu, gre dobro vsem«, zato smatramo za nujno potrebno, da se država opredeli, kako bo zagotovila prihodnjo energetske oskrbo in s tem pogoje za konkurenčno delovanje. Industrija materialov ni le energetske intenzivna industrija, ampak tudi industrija reciklaže in krožnega gospodarstva ter zagotavlja materialne surovine za verige vrednosti za vse ostale industrijske panoge. Seveda pa proizvodnje materialov ni brez energije, s poudarkom na nizkoogljični energiji. Metalurška podjetja imajo odločilno vlogo pri prehodu v trajno in zeleno prihodnost. Niso onesnaževalci in veliki porabniki energije, ampak velika priložnost za razvoj in napredek. Zato je potrebno zagotoviti primarne in predvsem sekundarne surovine ter dovolj ustreznih virov energije. Da bi Evropa in Slovenija ostali ekonomsko uspešni in bolj odporni na zunanje ekonomske in geopolitične vplive, mora spodbujati odgovoren sektor zagotavljanja - proizvodnje materialov in energije ter vzpostaviti trajnostne vrednostne verige materialov ter vzpostaviti pogoje za krožno gospodarstvo.

Ključne besede: surovine, energija, proizvodnja kovin, krožno gospodarstvo

Abstract

Advanced materials are the foundation of our society and economy and are becoming increasingly important. Without advanced materials, there will be no transition to a carbon-free society. Therefore, modern society is moving from an energy-intensive age to an age of materials. From a systemic perspective, it is necessary to find the best circular solutions for material flows, which is defined as industrial symbiosis. The materials field focuses on

innovation and education related to industrial symbiosis, product life extension, design for recycling, and recycling of used secondary raw materials. Revolutionary technological breakthroughs in advanced materials are needed in five major areas: Energy, Mobility, Manufacturing Technologies, Construction and Agriculture. More efficient recycling of used metals, reduction of energy consumption, reduction of carbon footprint and waste-free production can be ensured by applying artificial intelligence in the value chain from waste collection to sorting and metallurgical processing. Metallurgical and metal processing companies in Slovenia play an important role, as they generate about 25% of the gross national income. The fact is that "when the economy does well, everyone does well", therefore we consider it necessary for the state to define how it will ensure future energy supply and thus the conditions for competitive operation. The materials industry is not only an energy-intensive industry but also a recycling and circular economy industry and supplies essential raw materials for the value chains of all other industries. Of course, the production of materials cannot do without energy, with a focus on low-carbon energy. Metallurgical companies play a critical role in the transition to a sustainable and green future. They are not polluters and large consumers of energy, but a great opportunity for development and progress. Therefore, it is necessary to provide primary and especially secondary raw materials and sufficient suitable energy sources. For Europe and Slovenia to remain economically successful and more resilient to external economic and geopolitical influences, it must promote a responsible supply sector - the production of materials and energy - build sustainable value chains of materials and create the conditions for a circular economy.

Keywords: raw materials, energy, metals production, circular economy

1 Uvod

Napredni materiali bodo igrali ključno vlogo pri radikalnih spremembah 21. stoletja.¹ Kritične surovine majo ključno vlogo v sodobnem svetu in so ključni materiali za gospodarski napredek. Njihov pomen presega zgolj industrijsko in tehnološko vrednost, saj vplivajo na geopolitične odnose, ekonomsko stabilnost in trajnostni razvoj. Te surovine so pogosto ključne za napredne tehnologije, obnovljive vire energije in druge visokotehnološke sektorje. Njihova „kritičnost“ izhaja iz tveganja glede oskrbe, saj so pogosto izpostavljene geopolitičnim tveganjem, okoljskim težavam ali omejitvam v dobavi. Njihova razpoložljivost in zanesljiva dobava sta bistveni za nadaljnji tehnološki napredek, gospodarsko rast ter prehod na bolj

1 Introduction

Advanced materials will play a decisive role in the radical changes of the 21st century.¹ Critical raw materials (CRMs) play a pivotal role in the modern world, serving as essential materials for economic advancement. Their significance extends beyond mere industrial and technological value, influencing geopolitical relations, economic stability, and sustainable development. These resources are often crucial for advanced technologies, renewable energy sources, and other high-tech sectors. Their "criticality" stems from supply risks, as they are frequently exposed to geopolitical hazards, environmental challenges, or supply constraints. Their availability and reliable supply are essential for continued technological progress,

trajnostne vire energije. Najpomembnejše kovinske kritične surovine so: redke zemlje, litij, kobalt, nikelj in v zadnjem času tudi aluminij.² Kritične surovine, so bistvene za proizvodnjo naprednih tehnologij, vključno z elektroniko, baterijami, magneti in obnovljivimi viri energije, kot so sončne celice in vetrne turbine. Zaradi omejenosti virov in okoljskih izzivov postaja reciklaža kritičnih surovin vse pomembnejša. Npr. reciklaža kovinskih odpadkov zmanjša izkoriščanje naravnih virov, prihrani energijo in zmanjša obremenitve okolja. Zaradi njihove vloge v ključnih industrijskih sektorjih imajo kritične surovine velik vpliv na nacionalno in globalno gospodarstvo. Potreba po kritičnih surovinah spodbuja raziskave in razvoj novih materialov in tehnologij, ki lahko zmanjšajo odvisnost od teh surovin ali izboljšajo učinkovitost njihove rabe.

Trajnostni razvoj metalurških podjetij je ključnega pomena za zmanjšanje okoljskega vpliva, izboljšanje gospodarske učinkovitosti in prispevanje k družbeni odgovornosti. Metalurška industrija je znana po svoji energetski intenzivnosti in vplivu na okolje, zato je prehod na trajnostne prakse nujen. Glavne ukrepe trajnostnega razvoja lahko strnemo v naslednje točke:

- Energetska učinkovitost (optimizacija proizvodnih procesov, zaključene proizvodne verige in reciklaža vseh odpadov);
- zmanjšanje emisij (uvredba bolj učinkovitih načinov čiščenja izpuštov, zmanjšanje ogljičnega odtisa in uvajanje zelenih tehnologij);
- trajnostno upravljanje virov (odgovorna izbira surovin, optimiziranje uporabe naravnih virov in zaščita okolja);
- družbena odgovornost (izboljšanje zdravstvenih pogojev in varnosti, sodelovanje z lokalnimi skupnostmi, izobraževanje in osveščanje);

economic growth, and the transition to more sustainable energy sources. Among the most important metallic CRMs are rare earths, lithium, cobalt, nickel, and, more recently, aluminium.² Critical raw materials are indispensable for producing advanced technologies, including electronics, batteries, magnets, and renewable energy sources like solar cells and wind turbines. Due to resource scarcity and environmental concerns, recycling critical raw materials is becoming increasingly important. For instance, recycling metal waste reduces natural resource depletion, saves energy, and lowers environmental burdens. Given their role in key industrial sectors, critical raw materials significantly impact national and global economies. The demand for CRMs drives research and development into new materials and technologies that can reduce reliance on these resources or improve their utilisation efficiency.

The sustainable development of metallurgical companies is paramount to mitigating their environmental footprint, enhancing economic performance, and fostering social responsibility. The metallurgical industry is renowned for its energy intensity and environmental impact, making the transition to sustainable practices imperative. Key measures for sustainable development can be summarized as follows:

- Energy efficiency (optimize production processes, implement closed-loop production chains, and recycle all waste materials).
- Emissions reduction (introduce more efficient emission control methods, minimize carbon footprint, and adopt green technologies).
- Sustainable resource management (make responsible raw material choices, optimize natural resource utilization, and protect the environment).

- vzpodbujanje razvoja tehnologij in inovacij (pospešene in učinkovite raziskave in razvoj – R&D ter uvedba digitalizacije).

Trajnostni razvoj metalurških podjetij zahteva celosten pristop, ki vključuje tehnološke inovacije, učinkovito rabo virov, zmanjšanje okoljskega vpliva in odgovorno upravljanje. S sprejetjem teh strategij lahko metalurška podjetja ne le zmanjšajo svoj negativni vpliv na okolje, temveč tudi izboljšajo svojo konkurenčnost in prispevajo k trajnostnemu razvoju širše družbe. Metalurška in podjetja za predelavo kovin v Sloveniji igrajo pomembno vlogo, saj ustvarijo približno 25 % bruto nacionalnega dohodka.³

2 Krožno gospodarstvo

Industrija materialov ni le energetska intenzivna, temveč je tudi industrija recikliranja in krožnega gospodarstva ter zagotavlja pomembne surovine za vrednostne verige vseh drugih industrij. Seveda proizvodnja materialov ni mogoča brez energije, pri čemer je poudarek na nizko-ogljikni energiji. Metalurška podjetja igrajo ključno vlogo pri prehodu v trajnostno in zeleno prihodnost. Metalurgija ni onesnaževalka in velik potrošnik energije, temveč velika priložnost za razvoj in napredek. S sistemskega vidika je treba najti najboljše krožne rešitve za pretoke materialov, kar se imenuje industrijska simbioza (Slika 1).

Povezave med materiali in metalurgijo v Sloveniji potekajo preko združevanja v okviru Strateškega sveta za metalurgijo (Slika 2) in SRIP MATPRO v okviru Strategije trajnostne pametne specializacije (Slika 3).

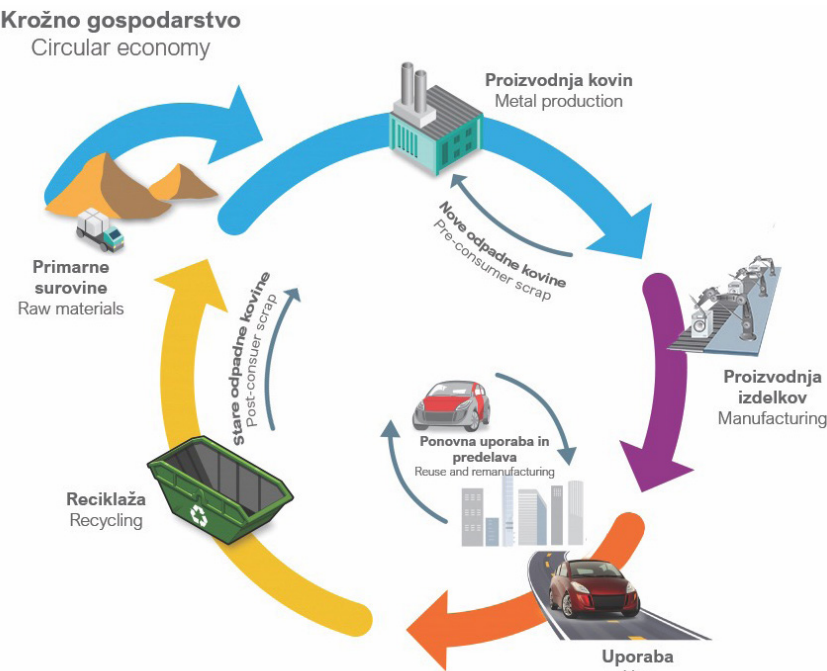
- Social responsibility (enhance health and safety conditions, engage with local communities, and promote education and awareness).
- Fostering technological advancement and innovation (accelerate research and development (R&D) efforts and embrace digitalization).

The sustainable development of metallurgical companies necessitates a comprehensive approach that encompasses technological innovation, efficient resource utilization, environmental impact mitigation, and responsible management practices. By adopting these strategies, metallurgical enterprises can not only reduce their negative environmental footprint but also enhance their competitiveness and contribute to the broader society's sustainable progress. Metallurgical and metal processing companies in Slovenia play a crucial role, generating approximately 25% of the gross national income.³

2 Circular economy

The materials industry is not only an energy-intensive industry, but also a recycling and circular economy industry and supplies important raw materials for the value chains of all other industries. Of course, the production of materials cannot do without energy, with a focus on low-carbon energy. Metallurgical companies play a crucial role in the transition to a sustainable and green future. Metallurgy is not a polluter and a large consumer of energy, but a great opportunity for development and progress. From a systemic perspective, it is necessary to find the best circular solutions for material flows, which is defined as industrial symbiosis (Fig. 1).

Associations connecting materials and metallurgy in Slovenia are Strategic



Slika 1. Krožno gospodarstvo metalurških podjetij
Fig. 1. Circular economy of metallurgical companies

Council for Metallurgy (Fig. 2) and SRIP MATPRO within the Framework of the Smart Specialization Strategy (Fig. 3).



Slika 2. Strategija razvoja metalurgije v Sloveniji3

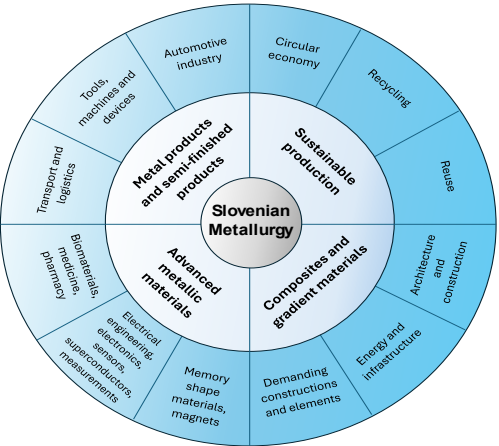
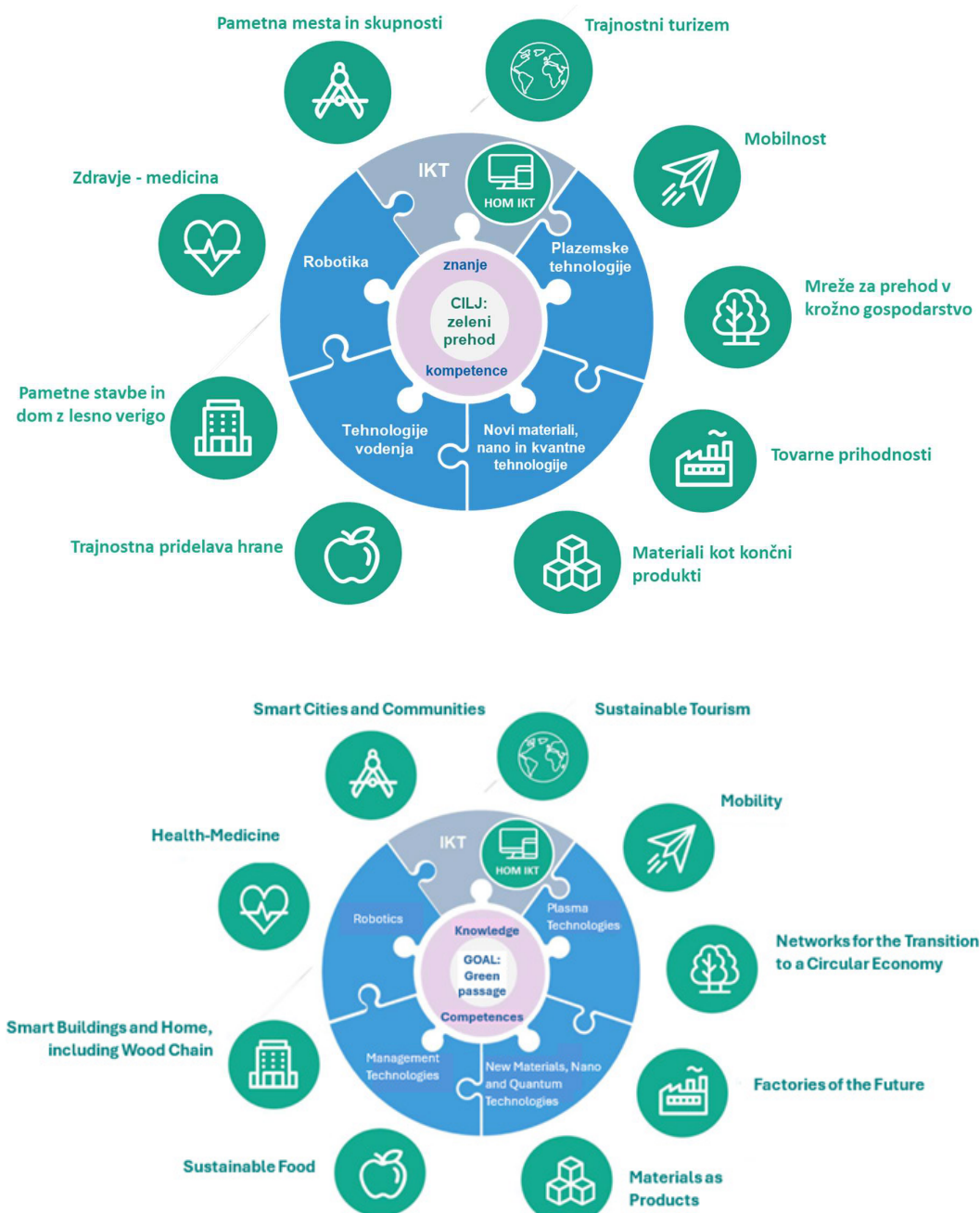


Fig. 2. Strategy for the development of metallurgy in Slovenia3



Slika 3. Strategija trajnostne pametne specializacije S5 RS⁴

Fig. 3. Slovenia's Sustainable Smart Specialisation Strategy S5⁴

V okviru obeh združenj potekajo aktivnosti za oblikovanje širokih trajnostnih verig. Sodelujejo podjetja različnih panog industrijske proizvodnje in raziskovalne institucije. Prav tako potekajo aktivnosti prijav in izvedbe aplikativnih projektov. V preteklosti smo uspešno dokončali projekte Martina, Čmrlj in Martin, v okviru katerih so bili razviti novi materiali na področju jekel in aluminijevih zlitin, tehnološke preiskovalne metode ter tehnologije predvsem na področju krožnega gospodarstva s povečanjem reciklaže in zmanjšanja porabe energije.

3 Raziskave na področju naprednih materialov

Napredni materiali imajo edinstvene lastnosti, ki omogočajo preboje v različnih industrijskih sektorjih, kot so: elektronika, energetika, medicina in transportna industrija. Raziskave naprednih materialov so ključne za razvoj novih tehnologij, izboljšanje učinkovitosti obstoječih izdelkov in reševanje globalnih izzivov, kot so energijska učinkovitost, trajnost in zdravje, kot to opredeljuje tudi Resolucija o Slovenski znanstvenoraziskovalni in inovacijski strategiji.⁵ Glavna področja razvoja naprednih materialov so: nanomateriali, pametni in kompozitni materiali, biomateriali in materiali za energetiko. Raziskave na tem področju vključujejo interdisciplinarne pristope, ki združujejo kemijo, fiziko, biologijo in metalurgijo za ustvarjanje novih materialov z edinstvenimi lastnostmi. Raziskave potekajo na več nivojih:

- testiranje materialov in korelacija lastnosti;
- modeliranje in simulacija;
- inovacije;
- napredne strategije toplotne obdelave in inženirstvo površin;

Within the framework of both associations, activities are underway to establish comprehensive sustainable value chains. Companies from various industrial manufacturing sectors and research institutions are actively collaborating. Additionally, efforts are being made to apply and execute practical projects. In the past, we have successfully completed the Martina, Čmrlj, and Martin projects, which led to the development of novel materials in the field of steels and aluminium alloys, technological investigative methods, and technologies, particularly in the area of the circular economy, with an emphasis on increasing recycling and reducing energy consumption.

3 Advanced materials research

Advanced materials possess unique properties that enable breakthroughs in various industrial sectors, including electronics, energy, medicine, and transportation. Research in advanced materials is crucial for developing novel technologies, enhancing the performance of existing products, and addressing global challenges such as energy efficiency, sustainability, and healthcare, as outlined in the Resolution on the Slovenian Scientific Research and Innovation Strategy.⁵ The primary areas of advanced materials development are nanomaterials, smart and composite materials, biomaterials, and energy materials. Research in this field encompasses interdisciplinary approaches that integrate chemistry, physics, biology, and metallurgy to create novel materials with exceptional properties. Research is conducted at multiple levels:

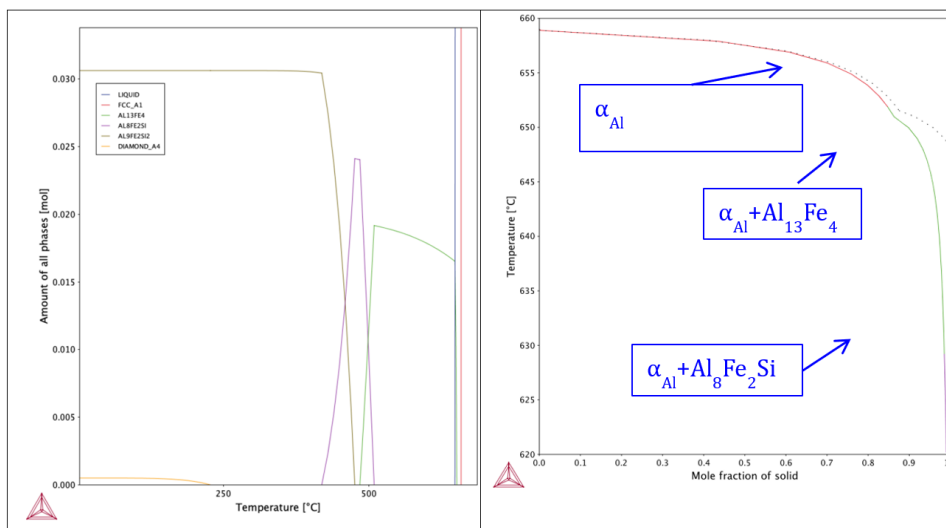
- Materials testing and correlation of properties.
- Modelling and simulation.
- Innovation.

- združljivost materialov.

Primer termodinamičnega modeliranja eksperimentalne karakterizacije aluminijeve zlitine je prikazan na spodnjih slikah (Slika 4 in 5).

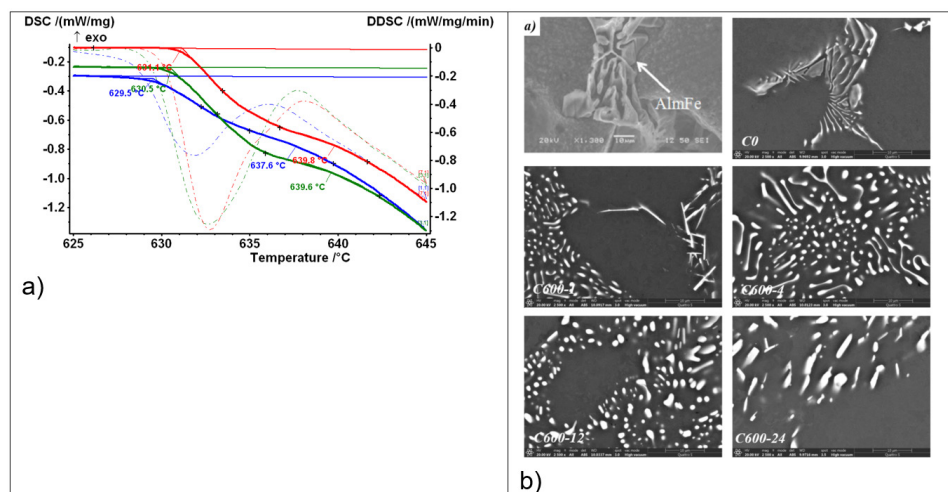
- Advanced heat treatment strategies and surface engineering.
- Compatibility of materials.

An example of thermodynamic modelling of experimental characterization



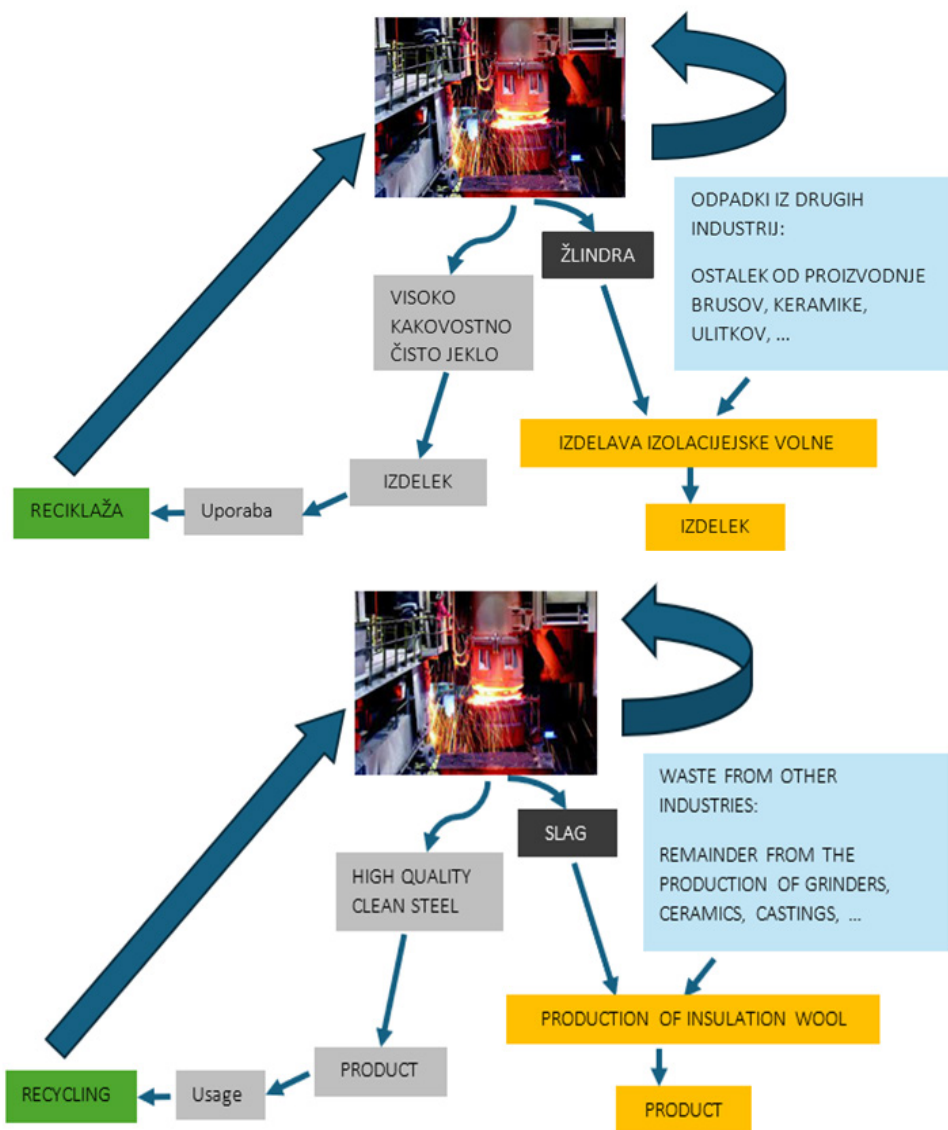
Slika 4. Termodinamično modeliranje aluminijeve zlitine⁶

Fig. 4. Thermodynamic modelling of an aluminium alloy⁶



Slika 5. Vpliv parametrov homogenizacije na toplotne lastnosti a) in mikrostrukturo zlitine b)⁵

Fig. 5. Influence of homogenization parameters on thermal properties a) and alloy microstructure b)⁵



Slika 6. Trajnostna veriga proizvodnje jekla

Fig. 6. Sustainable steel production chain

S kombinacijo termodinamičnega modeliranja aluminijeve zlitine in eksperimentalne karakterizacije dosežemo sestavo zlitine, ustreznimi pogoji strjevanja in toplotne obdelave, material z optimalnimi

of aluminium alloy is illustrated in Figures 4 and 5.

By combining thermodynamic modelling of aluminium alloy with experimental characterization, we can achieve a material with optimal properties and minimal energy

lastnostmi in minimalnim vložkom energije in primarnih surovin.⁷

4 Primer trajnostne verige v proizvodnji jekla

Na sliki 6 je prikazan primer široke trajnostne verige izdelkov in odpadkov v jeklarski industriji. S povezovanjem različnih deležnikov lahko uporabimo odpadke kot sekundarne materiale za proizvodnjo tako kovinskih, kot tudi nekovinskih materialov in izdelkov.

Iz primera je razvidno, da je s sodelovanjem podjetij različnih panog mogoče izdelati nove inovativne in tržno zanimive izdelke. Najprej lahko govorimo o trajnostni verigi znotraj proizvodnje, kjer lastne odpadke predelamo znotraj proizvodnega procesa. Kot je to razvidno iz slike 6, lasten jekleni odpadki vračamo v EOP za izdelavo novega jekla. Nato tvorimo verige s kupci polproizvodov, kjer nastane jekleni odpadki pri izdelavi novih izdelkov in podjetji, ki zbirajo izrabljene kovinske odpadke (staro železo). Takšne surovine nato uporabimo za izdelavo jekla. Poudariti je potrebno, da so jekla vrhunske kakovosti izdelana samo iz sekundarnih surovin. In končno za odpadke, ki jih ne moremo uporabiti znotraj lastnega proizvodnega procesa, lahko tvorimo trajnostno verigo z drugimi podjetji različnih panog. Tako iz več različnih odpadkov nastane nov visoko vreden proizvod, kot je primer žlindrina izolacijska volna.

5 Zaključek

V Sloveniji imamo močno tradicijo in znanja na področju različnih materialov, ki so pomembna za proizvodne tehnologije z ničelnimi emisijami. Kovine so osnovni

and primary raw material input by optimizing the alloy composition, solidification conditions, and heat treatment.⁷

4 Example of a sustainable supply chain in steel production

Figure 6 illustrates an example of a comprehensive sustainable product and waste chain in the steel industry. By connecting various stakeholders, waste can be utilized as secondary materials for the production of both metallic and non-metallic materials and products.

The example presented clearly demonstrates that collaboration among companies from diverse industries can lead to the development of innovative and marketable products. This collaboration can be realized at various levels, starting with a sustainable supply chain within a company's own production process. As illustrated in Figure 6, steel waste generated during production can be recycled within the same process and returned to EAF to produce new steel. Further collaboration can extend to customers of semi-finished products, where steel waste is generated during the manufacturing of new products. This waste can be collected and reintroduced into the steel production process. Additionally, partnerships with companies that collect discarded metal waste (scrap iron) can be established, utilizing this material as a valuable feedstock for steelmaking. It is noteworthy that high-quality steels can be produced solely from secondary raw materials. Finally, for waste that cannot be directly utilized within the company's own production process, sustainable supply chains can be established with companies from different industries. This collaborative approach transforms various types of waste into high-value products, such as slag-based insulation wool.

material za zeleni prehod in imajo neprecenljivo vlogo pri preobrazbi Evrope. Materiali, proizvedeni v EU, kot sta aluminij in jeklo, se proizvajajo z nižjimi emisijami toplogrednih plinov. Tam, kjer ta proizvodnja stagnira, jo nadomestijo materiali izven EU, ki imajo ne le večji ogljični odtis, temveč tudi večje ostale vplive na okolje. Uredba o strateških in kritičnih surovinah ne upošteva dovolj dejstva, da je za razvoj in širšo uporabo nizkoogljčnih tehnologij potrebna širša paleta surovin z nizkimi emisijami ogljika. Glede na izjemno načrtovano rast povpraševanja po aluminiju in jeklu za proizvodnjo in širitev tehnologij z ničelnimi emisijami je nujno potrebno ohraniti obstoječo proizvodnjo teh kovin v Evropi, saj je njihova proizvodnja izven Evrope povezana z mnogo večjimi emisijami toplogrednih plinov.

Slovenija se mora izogniti odvisnosti od uvoza MATERIALOV iz tretjih držav in se osredotočiti na spodbujanje varne in trajnostne dobave evropskih (slovenskih) surovin. Zagotoviti je treba primarne in še posebej sekundarne surovine ter dovolj primernih energetskih virov. Da bi Evropa in Slovenija ostali gospodarsko uspešni in bolj odporni na zunanje gospodarske in geopolitične vplive, morata spodbujati odgovoren dobavni sektor - proizvodnjo materialov in energije - graditi trajnostne verige vrednosti materialov ter ustvariti pogoje za krožno gospodarstvo.

5 Conclusions

In Slovenia, we have a strong tradition and know-how in various materials industries, that are important for the production of zero-emission technologies. Metals are the basic materials for the green transition and play an invaluable role in the transformation of Europe. Materials produced in the EU, such as aluminium and steel, are produced with lower greenhouse gas emissions. Where this production stagnates, it is replaced by materials from outside the EU, which have not only a larger carbon footprint but also greater other environmental impacts. The Strategic and Critical Raw Materials Regulation does not sufficiently take into account the fact that a wider range of low-carbon produced raw materials is needed for the development and wider application of low-carbon technologies. In view of the extraordinary planned increase in demand for aluminium and steel for the production and expansion of net-zero technologies, it is necessary to maintain the existing production of these metals in Europe, as their production outside Europe is associated with many times more GHG emissions.

Slovenia must avoid dependence on imports of MATERIALS from third countries and focus on promoting a secure and sustainable supply of European (Slovenian) raw materials. It is necessary to provide primary and especially secondary raw materials and sufficient suitable energy sources. For Europe and Slovenia to remain economically successful and more resilient to external economic and geopolitical influences, they must promote a responsible supply sector - the production of materials and energy - build sustainable materials value chains and create the conditions for a circular economy.

6 Literatura / Literature

1. MATERIALS2030MANIFESTO, <https://www.ami2030.eu/wp-content/uploads/2022/06/advanced-materials-2030-manifesto-Published-on-7-Feb-2022.pdf>, Feb. 2022.
2. M. Grohol, C. Veeh, European Commission, Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023, Final Report, Publications Office of European Union, 2023.
3. Strateški svet za metalurgijo, Strategija razvoja metalurgije v Sloveniji 2015-2025, https://www.gzs.si/zdruzenje_kovinskih_materialov_in_nekovin/vsebina/Strateški-svet, Ljubljana 2015.
4. Ministrstvo za kohezijo in regionalni razvoj, Slovenska strategija trajnostne pametne specializacije S5, <https://www.gov.si/zbirke/projekti-in-programi/izvajanje-slovenske-strategije-pametne-specializacije>.
5. Resolution on the Slovenian Scientific Research and Innovation Strategy, 2030 (ReZrIS30), <https://www.gov.si/assets/ministrstva/MIZS/Dokumenti/Zakonodaja/EN/2022/Resolution-on-the-Slovenian-Scientific-Research-and-Innovation-Strategy-2030.pdf>
6. Medved, Jože, Vončina, Maja, Arbeiter, Jože. Phase equilibria in Al-Fe alloys. V: BROEK, Stephan (ur.). Light metals 2023. Cham: Springer, cop. 2023. Str. 444-450. The minerals, metals & materials series (Print), The minerals, metals & materials series (Online).
7. Arbeiter, Jože, Vončina, Maja, Šetina, Barbara, Medved, Jože. Transformation of the metastable Al₆Fe intermetallic phase during homogenization of a binary Al-Fe alloy. Materials. 2021, vol. 14, iss. 23, str. 1-9.

Interakcija udrobnilnih sredstev in dvojnih oksidnih plasti v aluminijevi talini

The Interactions of Grain Refiner Particles and Double Oxide Films in Liquid Aluminum Alloys

Povzetek

Nedavne študije so pokazale, da lahko dodajanje različnih predzlitin za udrobnjevanje vpliva na sedimentacijo in s tem na prostorsko porazdelitev dvojnih oksidnih plasti v talini. V tem prispevku smo raziskali interakcije delcev TiB_2 in $(Al, Si)_3Ti$ z napakami kot posledice bifilmov v primeru tekoče zlitine Al-Si-Mg-Cu. Interakcije med udrobnilnimi sredstvi in bifilmi smo preučevali z optičnim in vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM), spremembe kakovosti taline pa smo analizirali z računalniško tomografsko (CT) analizo vzorcev za preskus z zmanjšanim tlakom (RPT - vakuum test). Ugotovljeno je bilo, da se delci TiB_2 običajno prilepijo na dvojne oksidne plasti, suspendirane v tekoči kovini, medtem ko se delci $(Al, Si)_3Ti$ prilepijo na bifilme zaradi heterogene nukleacije $(Al, Si)_3Ti$ na bifilmih in delne absorpcije segmentov oksidne plasti med rastjo delcev $(Al, Si)_3Ti$. Pritrditev delcev udrobnilnih sredstev na dvojne oksidne plasti vodi do pospešene sedimentacije bifilmov, zaradi česar se zmanjša poroznost v vzorcih za preskus z zmanjšanim tlakom.

Gljučne besede: Aluminijeva zlitina, vključki, udrobnjevanje, bifilm (dvojni film)

Abstract

Recent studies revealed that adding different grain refiner master alloys can affect the sedimentation, thus, the spatial distribution of double oxide films in the melt. In this work, the interactions of TiB_2 and $(Al, Si)_3Ti$ particles with bifilm defects were investigated in the case of a liquid Al-Si-Mg-Cu alloy. The interactions between refiner particles and bifilms were studied by optical and scanning electron microscopy (SEM). At the same time, the changes in melt quality were analyzed by the computed tomographic (CT) analysis of reduced pressure test (RPT) specimens. It was found that TiB_2 particles tend to adhere to double oxide films suspended in the liquid metal, while $(Al, Si)_3Ti$ particles became attached to bifilms due to the heterogeneous nucleation of $(Al, Si)_3Ti$ on bifilms, and the partial engulfment of oxide film segments during the growth of $(Al, Si)_3Ti$ particles. The attachment of grain refiner particles to double oxide films leads to the aided sedimentation of bifilms, which results in lowered porosity in RPT specimens.

Keywords: Aluminium alloy, Inclusions, Grain refinement, Bifilm

1 Uvod

Ustrezen nadzor kakovosti tekoče kovine in mikrostrukture strjevanja sta bistvena

1 Introduction

Suitable control of the quality of liquid metal and solidification microstructure are

pogoja za proizvodnjo visokokakovostnih aluminijevih ulitkov [1, 2]. Aditivi udrobnilnih sredstev se pogosto uporabljajo v livarski industriji med predelavo tekočih aluminijevih zlitin za spodbujanje nastanka drobne enakoosne strukture zrn α -Al med strjevanjem, kar ima pogosto za posledico boljše mehanske lastnosti in zanesljivost [3–5]. Pri uporabi predzlitin za udrobnjevanje se v talino vnese veliko število delcev nukleanta, ki lahko delujejo kot heterogena nukleacijska mesta za α -Al dendrite. V industrijski praksi imajo prednost predzlitine na osnovi Ti in B in ki lahko vsebujejo faze TiB_2 , Al_3Ti , AlB_2 in/ali AlB_{12} [6–8]. Med pojavi, ki lahko vplivajo na prostorsko porazdelitev teh delcev nukleanta in s tem na učinkovitost udrobnjevanja, sedimentacijo, aglomeracijo in raztapljanje, so bili obsežno raziskani v literaturi [9–12]. Po drugi strani pa je bilo veliko manj pozornosti posvečene možnim interakcijam oksidnih vključkov in delcev udrobnilnih sredstev.

Zaradi visoke reaktivnosti aluminija se v aluminijevih zlitinah pogosto pojavljajo oksidni vključki. Naravno prisotni oksidi v tekočih aluminijevih zlitinah so v obliki dvoslojnih oksidnih plasti, na katere so pritrjeni oksidni mikro- in nanodelci [13]. Na splošno velja, da lahko vsaka motnja na površini taline privede do zajemanja površinske oksidne plasti, zaradi česar nastanejo napake, kot so zračni mehurčki in dvojne oksidne plasti (bifilmi) [14, 15]. Bifilmi naj bi iz več razlogov imeli izjemen vpliv na sedimentacijo in aglomeracijo delcev udrobnilnih sredstev. Podatki, pridobljeni pri preskusih, kažejo, da je lahko v talinah aluminijevih zlitin, pripravljenih v povprečnih livarnah, zelo visoka gostota dvojnih oksidnih plasti [16–18]. Po Campbellovi oceni [19] lahko velja, da populacija bifilma 10^6 do 10^9 m^{-3} lahko v povprečni talini aluminijeve zlitine velja za surovo. Oksidne

essential prerequisites for the production of high-quality aluminum castings [1, 2]. Grain refiner additives are widely used in the foundry industry during the processing of liquid aluminum alloys to induce the formation of fine equiaxed α -Al grain structure during solidification, which often results in higher mechanical properties and reliability [3–5]. When grain refiner master alloys are applied, a high number of nuclear particles are introduced into the melt that can act as heterogeneous nucleation sites for the α -Al dendrites. In industrial practice, Ti- and B-containing master alloys are preferred, which can contain TiB_2 , Al_3Ti , AlB_2 or AlB_{12} phases [6–8]. Among the phenomena that can influence the spatial distribution of these nuclear particles, and in this way, grain refining efficiency, sedimentation, agglomeration and dissolution have been widely studied in the literature [9–12]. On the other hand, the possible interactions of oxide inclusions and grain refiner particles gained much less attention.

Due to the high reactivity of aluminum, oxide inclusions are common in aluminum alloys. Naturally occurring oxides in liquid aluminum alloys are in the form of double-layered oxide films with oxide micro- and nanoparticles being attached to the films [13]. It is generally understood that any disturbance of the melt surface can lead to the entrainment of the surface oxide layer, which results in the formation of entrainment defects like air bubbles and double oxide films (bifilms) [14, 15]. Bifilms should be considered to have a remarkable effect on the sedimentation and agglomeration behavior of grain refiner particles for several reasons. Experimental evidence suggests that the number density of double oxide films can be extremely high in melts of aluminum alloys prepared by average foundries [16–18]. According to the estimation of Campbell

plasti teh napak so lahko zelo tanke (od nekaj nm do več μm , odvisno od časa oksidacije). Po drugi strani pa je lahko njihova površina (in specifična površina) izjemno velika, od enega μm^2 do več cm^2 ali celo dm^2 [1]. Po Campbellovem [20] mnenju lahko med običajnim prenosom z vlivanjem ali litjem tekoče kovine talina zajame od 0,1 do 2,0 m^2 površine oksidne plasti na vsakih 10 kg kovine, ki se vlija. Ob upoštevanju njihove visoke gostote in površine, bifilmi zagotavljajo izjemno veliko površino, na kateri lahko prihaja do interakcije z delci udrobnilnih sredstev.

Pionirsko delo Mountforda in Calverta [21] ter Caoja in Campbella [22] je pokazalo, da sedimentacija intermetalnih delcev, ki imajo večjo gostoto od tekoče zlitine, povzroči pospešeno sedimentacijo napak bifilma. Na podlagi tega smo v prejšnjih delih [23–25] izbrali $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Ti}$ kot možno fazo, ki lahko pomaga pri sedimentaciji bifilmov, saj se predzlitine, ki vsebujejo Ti, v industriji pogosto uporabljajo kot sredstva za udrobnjevanje. Ugotovili smo, da so primarni delci $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Ti}$ heterogeno nukleirani na oksidnih plasteh, med rastjo teh intermetalnih delcev pa nekatere segmente oksidne plasti pogoltnje napredujočo sprednjo stran rasti intermetalnih delcev. Za kristalizacijo $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Ti}$ je bilo treba skrbno izbrati in nadzorovati temperaturo taline in koncentracijo Ti. Ker so bili delci pritrjeni na bifilme, se je lahko izvajala pospešena sedimentacija. V eni od študij [25] so ugotovili, da se s povečanjem vsebnosti Ti na 0,5 % pri 690 °C z uporabo glavne zlitine Al-10 % vneseni delci Al_3Ti niso raztopili, zato $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Ti}$ ni mogel heterogeno nukleirati na površini oksidnih plasti. Delci Al_3Ti so se usedli v 10 minutah po dodajanju, ne da bi se kakovost taline bistveno izboljšala.

Dandanes so glavne zlitine Al-Ti-B najpogostejše uporabljeni dodatki za udrobnjevanje, ki običajno poleg delcev

[19], a bifilm population of 10^6 to 10^9 m^{-3} can be considered ferrial in an average aluminum alloy melt. The oxide layers of these defects can be extremely thin (from a few nm to several μm , depending on the oxidation time). On the other hand, their surface area (and specific surface area) can be exceptionally high, ranging from a μm^2 to several cm^2 or even dm^2 [1]. According to Campbell [20], during a common pouring transfer or casting of liquid metal, 0.1 to 2.0 m^2 of oxide film surface can be entrained into the melt for every 10 kg of metal being poured. Taking into account their high number density and surface area, bifilms provide a remarkably large surface area that can interact with grain refiner particles.

The pioneering work of Mountford and Calvert [21] as well as Cao and Campbell [22] revealed that the sedimentation of intermetallic particles with a higher density than the liquid alloy induces the aided sedimentation of bifilm defects. Based on this, during our previous works [23–25], we chose $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Ti}$ as a possible phase that can aid in the sedimentation of bifilms, as Ti-containing master alloys are commonly used as grain refiners in the industry. We found that primary $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Ti}$ particles heterogeneously nucleated on oxide films, and during the growth of these intermetallic particles, some oxide film segments became engulfed by the advancing growth front of the intermetallic. To bring forth the crystallization of $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Ti}$, the melt temperature and Ti-concentration needed to be carefully chosen and controlled. As the particles were attached to the bifilms, aided sedimentation could be realized. In one of the studies [25], it was revealed that by increasing the Ti-content to 0.5 % at 690 °C with the application of Al-10% master alloy, the introduced Al_3Ti particles were not dissolved, and in this way, $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Ti}$ could not heterogeneously nucleate on the

Al_3Ti vsebujejo tudi veliko število delcev TiB_2 . Hitrost raztapljanja teh delcev TiB_2 je v tekočih aluminijevih zlitinah pri običajnih temperaturah taline in času zadrževanja zanemarljiva [3]. Na ta način med običajnimi livarskimi postopki ne more priti do heterogene nukleacije TiB_2 na oksidnih plasteh in do zajetja segmentov oksidne plasti s TiB_2 . Po drugi strani pa je iz literature razvidno, da lahko med oksidnimi plastmi in delci TiB_2 še vedno prihaja do nekaterih vrst interakcij, ki lahko vplivajo na populacijo bifilma tekočih kovin. Yang in drugi [26, 27] so raziskovali interakcije med oksidnimi plastmi in delci TiB_2 v talinah aluminijevih zlitin. Ugotovili so, da se delci TiB_2 lepijo na oksidne plasti, kar lahko prepreči usedanje delcev TiB_2 . Trenutno še ni jasno, ali je ta pojav mogoče uporabiti za pospešitev sedimentacije bifilmov. Zato je bil cilj naše raziskave preučiti interakcije med vključki v dvojni oksidni plasti, delci TiB_2 in $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Ti}$ v primeru litja aluminijeve zlitine ter raziskati vpliv usedanja delcev na kakovost taline.

2 Preskusni postopek

Cilj našega preskusa je bil povzročiti kristalizacijo delcev $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Ti}$ na površini bifilmov, prisotnih v talini aluminijeve zlitine za litje z uporabo glavne zlitine $\text{Al-5\%Ti-1\%B}$, ki v tekočo zlitino vnese tudi veliko število delcev TiB_2 , pri čemer se z ustrezno metodo stalno preverja razvoj kakovosti taline. 3 kg zlitine AlSi7MgCu (ENAC45500) smo stalili v električni uporovni lončni peči pri temperaturi 690 ± 10 °C. Sestavo zlitine smo skozi celoten preskus analizirali z optično emisijsko spektroskopijo (OES). Začetna kemijska sestava je prikazana v prvi vrstici **preglednice 1**. Ker je bilo zaradi cilja raziskave treba raziskati dvojne oksidne plasti, prisotne v zlitini, je zlitina z visoko stopnjo oksidacije omogočila, da se v

surface of oxide films. The Al_3Ti particles settled within 10 minutes after addition without significant improvements in melt quality.

Nowadays, Al-Ti-B master alloys are the most frequently used grain refining additives that usually contain a high number of TiB_2 besides Al_3Ti particles. The rate of dissolution of these TiB_2 particles is negligible in liquid aluminum alloys at common melt temperatures and holding times [3]. In this way, the heterogeneous nucleation of TiB_2 on oxide films, and the engulfment of oxide film segments by TiB_2 cannot take place during common foundry practices. On the other hand, the literature suggests that some type of interactions can still occur between oxide films and TiB_2 particles that can affect the bifilm population of liquid metals. Yang et al. [26, 27] investigated the interactions between oxide films and TiB_2 particles in aluminum alloy melts. It was found that TiB_2 particles adhere to oxide films, which can prevent the settling of TiB_2 particles. It is currently unclear whether this phenomenon can be utilized for the aided sedimentation of bifilms. For this reason, our research aimed to study the interactions between the double oxide film inclusions, TiB_2 and $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Ti}$ particles in the case of a casting aluminum alloy, and to investigate the effect of particle settling on the melt quality.

2 Experimental Procedure

Our experimental goal was to bring forth the crystallization of $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Ti}$ particles on the surface of bifilms present in a casting aluminum alloy melt by the application of Al-5%Ti-1%B master alloy, which also introduces a high number of TiB_2 particles into the liquid alloy, while the evolution of melt quality is continuously inspected

mikrostrukturi zlahka najdejo in prepoznajo bifilmi. Zato je bil Mg dodan v obliki komercialno čistega Mg, ki je bil potopljen v tekočo kovino, da se je koncentracija Mg povečala na 0,7 % (druga vrstica **preglednice 1**). Po postopku legiranja z Mg sta bila s potopitvijo posodic za preskus RPT v tekočo zlitino odvzeta dva vzorca za preskus z zmanjšanim tlakom (RPT). Vzorci za preskus z zmanjšanim tlakom (RPT) so se strdili pri tlaku 80 mbar, čas zadrževanja pa je bil 6 minut. Da bi povečali raven dvojne oksidne plasti taline, smo 1 minuto ročno mešali z jekleno palico (z ustreznim ognjevarnim premazom). Po mešanju je bilo v 6-minutnih časovnih intervalih odvzetih 5 vzorcev za preskus RPT, da bi preučili vpliv zadrževanja tekoče kovine na bifilmu in vsebnost plina v talini.

Naš cilj je bil doseči 0,5-odstotno vsebnost Ti z dodajanjem palice iz glavne zlitine Al-5%Ti-1%B. Za morebitno povečanje učinkovitosti sedimentacije smo kristalizacijo delcev $(\text{Al}, \text{Si})_3\text{Ti}$ sprožili tako, da smo najprej s povišanjem temperature taline na 800 ± 10 °C raztopili delce Al_3Ti osnovne zlitine, nato pa smo po 10 minutah zadrževanja temperaturo znižali na 690 ± 10 °C. Ti temperaturi smo izbrali na podlagi faznega diagrama Al-Ti (**slika 1**). Če predpostavimo, da je bor v osnovni zlitini prisoten samo v obliki TiB_2 in da je topnost TiB_2 pri uporabljenih temperaturah in časih

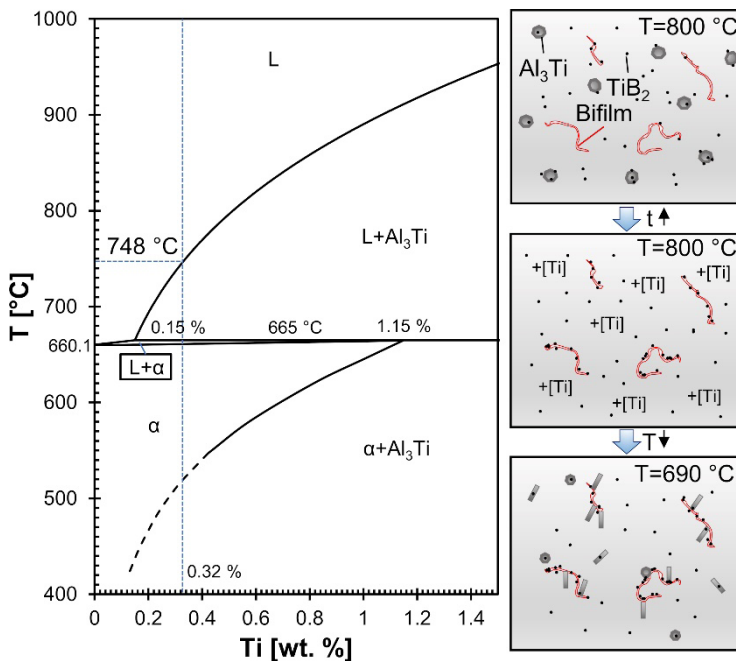
with a suitable method. We melted 3 kg of AlSi7MgCu (EN AC45500) alloy in a resistance-heated crucible furnace at 690 ± 10 °C. The alloy composition was analyzed by optical emission spectroscopy (OES) throughout the experiment. The starting chemical composition is shown in the first row of **Table 1**. As the aim of the research made it necessary to investigate the double oxide films present in the alloy, an alloy with a high oxidation rate made it possible to easily find and identify bifilms in the microstructure. For this reason, Mg additions were made in the form of commercial purity Mg plunged into the liquid metal to increase the Mg-concentration to 0.7 % (second row of **Table 1**). After the Mg-alloying step, two reduced pressure test (RPT) samples were taken by immersing the RPT cups into the liquid alloy. The RPT specimens solidified at 80 mbar pressure with 6 minutes long residence time. To increase the double oxide film level of the melt, manual stirring was applied with a steel rod (with adequate refractory coating) for 1 minute. After mixing, 5 RPT samples were taken at 6-minute time intervals to study the effect of holding the liquid metal on the bifilm and gas content of the melt.

Our goal was to reach 0.5 % Ti content with the addition of Al-5%Ti-1%B master alloy rod. To potentially increase the sedimentation efficiency, the crystallization

Preglednica 1. Kemična sestava preučevane zlitine v različnih fazah preskusa

Table 1. Chemical composition of the studied alloy at different stages of the experiment

	Si [mas. %] / [wt. %]	Fe [mas. %] / [wt. %]	Cu [mas. %] / [wt. %]	Mn [mas. %] / [wt. %]	Mg [mas. %] / [wt. %]	Ti [mas. %] / [wt. %]	B [mas. %] / [wt. %]	Sr [mas. %] / [wt. %]
1	7,06	0,135	0,374	0,045	0,258	0,128	0,0004	0,0018
2	7,11	0,137	0,380	0,045	0,681	0,128	0,0004	0,0016
3	6,70	0,141	0,361	0,043	0,558	0,458	0,0061	0,0014



Slika 1. Aluminijev kot faznega diagrama Al-Ti [28], shematski prikaz pritrdjevanja delcev (Al,Si)₃Ti in TiB₂ na površino dvojnih oksidnih plasti

Fig. 1. Al-rich section of the Al-Ti phase diagram [28], schematic illustration of the attachment of (Al,Si)₃Ti and TiB₂ particles to the surface of double oxide films

zadrževanja zanemarljiva, je mogoče raztopiti 0,32 % Ti od skupno 0,5 %. Na podlagi binarnega faznega diagrama Al-Ti se pri 0,32-% koncentraciji Ti iz taline pri 748 °C kristalizira stabilni Al₃Ti.

Temperatura 800 ± 10 °C je bila dosežena v 10 minutah, nato je bilo v talino dodanih 188,56 g Al5%Ti-1%B, po dodatku pa smo talino mešali 1 minuto. Pri temperaturi pregrevanja smo 10 minut po legiranju s Ti-zlitino odlili vzorec za analizo z optično emisijsko spektroskopijo (rezultate si oglejte v 3. vrstici **preglednice 1**). Nato smo temperaturo nastavili na 690 ± 10 °C, ki smo jo dosegli v približno 10 minutah. Za analizo vpliva sedimentacije delcev na kakovost taline je bilo v 6-minutnih časovnih intervalih odvzetih 8 vzorcev za preskus RPT. Po vzorčenju smo pustili, da se je talina v lončku v peči strdila s povprečno hitrostjo ohlajanja 1,1 °C/min.

Rezultati raziskav v literaturi [29–32] kažejo, da je preskus RPT učinkovita metoda, ki jo lahko uporabljamo za

of (Al,Si)₃Ti particles was initiated by first dissolving the Al₃Ti particles of the master alloy by increasing the melt temperature to 800 ± 10 °C, then after a 10 minutes-long holding period, the temperature was lowered to 690 °C ± 10 °C. These temperatures were selected based on the Al-Ti phase diagram (**Figure 1**). If we assume that boron is present in the master alloy only in the form of TiB₂ and that the solubility of TiB₂ is negligible at the applied temperatures and holding times, 0.32 % Ti can be dissolved from the total of 0.5 %. Based on the Al-Ti binary phase diagram, at 0.32 % Ti-concentration, stable Al₃Ti crystallizes from the melt at 748 °C.

800 ± 10 °C was reached under 10 minutes, then 188.56 g Al5%Ti-1%B was added to the melt, which was stirred for a minute after addition. At the superheating temperature, 10 minutes after Ti-alloying a sample was cast for OES analysis (see the 3rd row of **Table 1** for the results). Then the temperature was set to 690 ±

ocenjevanje vsebnosti bifilma, kar je bil glavni razlog za izbiro preskusa RPT za ocenjevanje kakovosti taline v tej raziskavi. Zmanjšani tlak pomaga pri tvorbi por, saj širi pline v dvojnih oksidnih plasteh in jih na ta način vpahuje v pore. Ker bifilmi delujejo kot mesta, kjer nastanejo pore, število por kaže na količino bifilma, velikost por pa se lahko uporabi za oceno vsebnosti plina (raztopljenega vodika in zajetega zraka) v kovini [29-32]. Za odkrivanje poroznosti znotraj vzorcev za preskus RPT smo uporabili aparat za računalniško tomografijo (CT) GE Seifert XCube Compact 225 kV s tokom v cevi 0,8 mA in pospeševalno napetostjo 135 kV. Število projekcij je bilo 900 za vsako vrtenje vzorca. Rekonstrukcija slike, segmentacija in analiza por so bili izvedeni s programsko opremo VGSTUDIO MAX. Gostota števila, volumski delež in specifična površina por (površina por v 1 mm³ vzorca) so bili izračunani na podlagi podatkov tomografske analize poroznosti z napravo CT.

Da bi raziskali vpliv usedanja delcev udrobnilih sredstev na homogenost kemične sestave taline, so bile opravljene kemične analize z instrumentom Horiba Jobin GD-Profiler 2TM za razelektritveno optično emisijsko spektrometrijo (GDOES) na 6 različnih merilnih točkah na prečni površini vzorca, ki se je strdil v lončku. Po standardni metalografski pripravi smo mikrostrukturo vzorca preučevali z optičnim in vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM). Preiskave z vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM) smo opravili z napravo Zeiss EVO MA10 SEM, opremljeno z energijsko disperzijskim rentgenskim spektroskopskim detektorjem (EDS) EDAX.

Ker na poroznost močno vpliva velikost zrn α -Al, smo za 1., 3., 5. in 8. vzorec za preskus RPT, ki smo ga ulili po dodatku Al-5%Ti-1%B, določili povprečno velikost zrn. V ta namen so bili vzorci za preskus RPT

10 °C, which was reached under about 10 minutes. For the analysis of the effect of particle sedimentation on the melt quality, 8 RPT samples were taken at 6-minute-long time intervals. After sampling, the melt in the crucible was allowed to solidify in the furnace at an average cooling rate of 1.1 °C/min.

The research results available in the literature [29-32] indicate that RPT is a powerful tool that can be used for the evaluation of bifilm content, and this was the main reason behind choosing RPT for melt quality evaluation in this research. Reduced pressure aids pore formation by expanding gases inside double oxide layers and, in this way, inflating them into pores. As bifilms work as pore initiation sites, pore number is indicative of bifilm quantity, while pore size can be used for the evaluation of the gas content (solute hydrogen and entrained air) of the metal [29-32]. For the detection of porosity inside RPT samples, we used a GE Seifert XCube Compact 225 kV computed tomography (CT) apparatus with 0.8 mA tube current and 135 kV acceleration voltage. The number of projections was 900 for each rotation of the sample. The image reconstruction, segmentation, and analysis of pores were implemented with VGSTUDIO MAX software. Pore number density, pore volume fraction, and specific pore surface area (the surface area of pores present in 1 mm³ of the sample) were calculated based on the CT porosity analysis data.

To investigate the effect of settling grain refiner particles on the homogeneity of the chemical composition of the melt, chemical analyses were performed with a Horiba Jobin GD-Profiler 2TM glow discharge optical emission spectrometry (GDOES) instrument at 6 different measurement points at the cross-sectional surface of the sample solidified in the crucible. The microstructure of the sample was studied with optical and

odrezani na višini 1 cm in po standardni metalografski pripravi je bil za barvno jedkanje uporabljen Barkerjev reagent (aparati Struers LectroPol-5, 5 g HBF₄ + 200 ml destilirane vode, 25 V DC in pri času jedkanja 40 s). Za oceno povprečne velikosti zrn smo uporabili metodo linearnega odseka.

3 Rezultati in razprava

Optične mikrofotografije mikrostrukture vzorca, ki je bil strjen v lončku, so prikazane na **slikah 2 (a)** in **(c)**, koncentracije Ti in B, ki smo jih merili na različnih višinah vzorca, pa so prikazane na **sliki 2 (b)**. Kot je razvidno iz **slike 2 (a)**, se je oblikovala razmeroma debela plast sedimenta, bogata z delci, s povprečno višino 9873 μm (na podlagi 50 meritev). To plast lahko razdelimo na dve ločeni območji: prvo (območje 1) je bogato z delci TiB₂ in ima zato višjo koncentracijo B in Ti, drugo (območje 2) pa ima veliko število lamelarnih delcev TiAlSi. Območje 3 na **sliki 2 (a)** predstavlja del vzorca brez delcev, ki ima relativno nizko koncentracijo Ti in B. Prisotnost dveh različnih plasti sedimentov je mogoče pojasniti z zaporedjem sedimentacije delcev. Z dodatkom glavne zlitine Al-5%Ti-1%B je bilo v tekočo zlitino vneseno veliko število delcev TiB₂ in Al₃Ti. Delci Al₃Ti so se raztopili, delci TiB₂ pa so se začeli usedati med 10-minutnim obdobjem zadrževanja po legiranju. To potrjujejo rezultati kemične sestave, prikazani v **preglednici 1**. Na podlagi količine glavne zlitine bi bilo treba koncentracijo B povečati na 0,08 %, vendar je bilo mogoče izmeriti samo 0,0061 % B. To je posledica razmeroma hitrega usedanja delcev TiB₂, ki lahko pri manjših višinah taline (6–10 cm) poteka samo tri do pet minut. Ker so delci TiB₂ aglomerirani v palicah iz glavne zlitine, k procesu sedimentacije prispeva večja

scanning electron microscopy (SEM) after standard metallographic preparation. The SEM investigations were conducted with a Zeiss EVO MA10 SEM equipped with EDAX energy-dispersive X-ray spectroscopic (EDS) detector.

As porosity is heavily affected by α -Al grain size, the average grain size was determined for the 1st, 3rd, 5th, and 8th RPT samples cast after the Al-5%Ti-1%B addition. For this, the RPT samples were cut at 1 cm height and after standard metallographic preparation, Barker's reagent (Struers LectroPol-5 apparatus, 5 g HBF₄ + 200 mL distilled water, 25 V dc, and 40 s etching time) was applied for color etching. The linear intercept method was used for the evaluation of average grain size.

3 Results and discussion

The optical micrographs of the microstructure of the sample solidified in the crucible are shown in **Figure 2 (a)** and **(c)**, while the Ti- and B-concentrations measured at different sample heights are presented in **Figure 2 (b)**. As can be seen in **Figure 2 (a)**, a relatively thick, particle-rich sediment layer formed with an average height of 9873 μm (based on 50 measurements). This layer can be divided into two distinct zones: the first one (Zone 1) is rich in TiB₂ particles and for this reason, has a higher B- and Ti-concentration, while the second one (Zone 2) has a high number of lamellar TiAlSi particles. Zone 3 in **Figure 2 (a)** represents the particle-free section of the sample, which has a relatively low Ti- and B-concentration. The presence of two distinct sediment layers can be explained by the sequence of particle sedimentation. With the addition of the Al-5%Ti-1%B master alloy, a high number of TiB₂ and

hitrost usedanja skupkov delcev [9, 33]. Lamelarni delci TiAlSi so se lahko začeli usedati šele, ko se je temperatura taline znižala in je kristalizirala faza $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Ti}$.

Opozoriti moramo, da so evtektski delci Si znotraj območja 1 izjemno udobnjeni (**Slika 2 (c)**). To se ujema z rezultati, ki so jih dobili Schaffer in drugi [34] ter Grab in Arnberg [35] in je to mogoče pripisati učinku omejevanja rasti trdnih delcev.

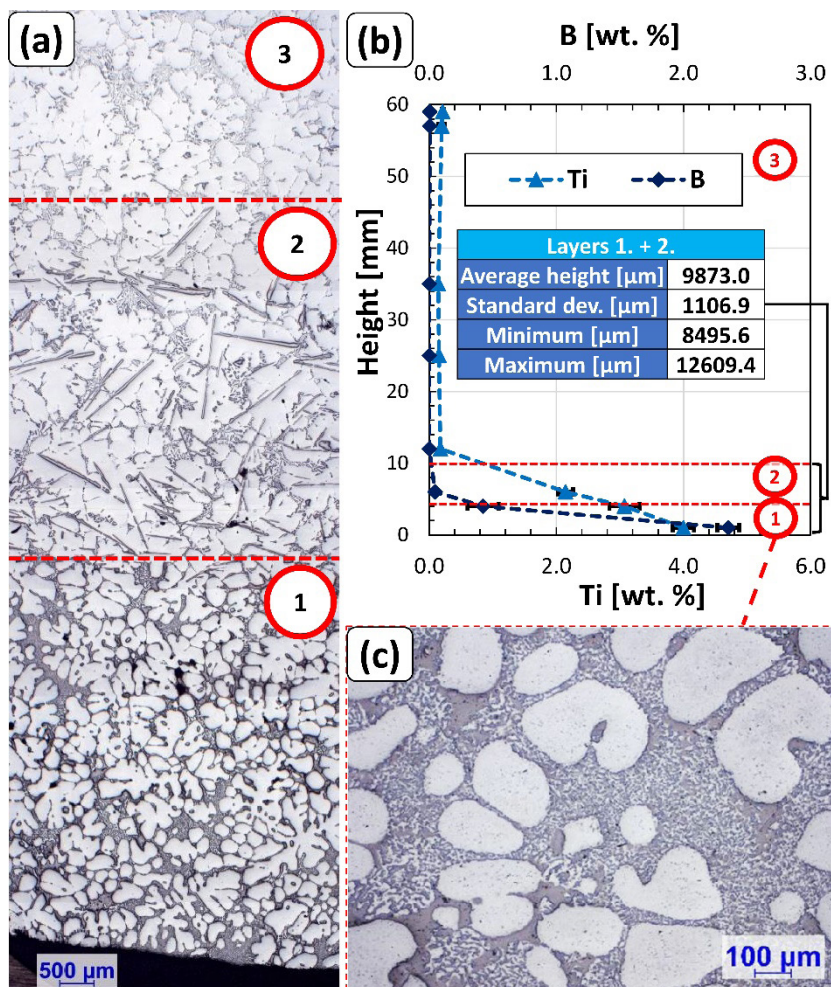
Med mikrostrukturno analizo je bilo v spodnjem delu (območje 1 in 2) vzorca, strjenega v lončku, ugotovljeno veliko število razpokam podobnih dvojnih oksidnih plasti (**Slika 3**). Nekaj podobnih napak je bilo ugotovljenih tudi v bližini vrhnje površine. Ta razpokan videz je značilen za dvojne oksidne plasti, ko jih opazujemo na mikroposnetkih [20]. V večini primerov so bili ti bifilmi povezani z delci TiAlSi, v bližini vrhnje površine pa so bili aglomerati majhnih delcev TiB_2 pogosto v stiku z oksidnimi plastmi. Prisotnost delcev TiAlSi in TiB_2 blizu vrhnje površine je povzročila rahlo povečanje lokalne koncentracije Ti (0,21 %, merjeno neposredno na vrhnji površini vzorca, medtem ko je znašala povprečna vsebnost Ti v srednjem delu 0,15 %). Zanimivo je, da se ti delci med poskusom niso mogli usedati. Razlog za to je, da so bili povezani s površinsko oksidno plastjo taline ali pa so bili v stiku z razmeroma velikimi bifilmi. Sveže nastali bifilmi so običajno pod vrhno površino tekoče kovine, saj vsebujejo ujet zrak, zaradi česar lebdiijo, dokler z oksidacijo in poznejšim procesom nitridacije ne izgubijo O_2 in N_2 iz notranje atmosfere. Prav tako so lahko povezani s površinskimi oksidnimi plastmi, kar lahko prepreči sedimentacijo [23].

Sliki 4 (a) in (c) prikazujeta slike vrstičnega elektronskega mikroskopa (SEM) razmeroma velikega, prepletenega bifilma, ki je bil najden ob vrhnji površini vzorca. **Slika 4 (b)** prikazuje rezultate

Al_3Ti particles were introduced to the liquid alloy. The Al_3Ti particles were dissolved, while the TiB_2 particles could start settling during the 10-minute-long holding period after alloying. This is supported by the chemical composition results shown in **Table 1**. Based on the master alloy quantity, the B-concentration should have been raised to 0.08 %, but only 0.0061 % B could be measured. This is the consequence of the relatively fast settling of TiB_2 particles, which can take place under 3-5 minutes in the case of smaller melt heights (6-10 cm). As TiB_2 particles are agglomerated in master alloy rods, the sedimentation process is redounded by the higher settling rate of particle clusters [9, 33]. The lamellar TiAlSi particles could only start settling when the melt temperature was lowered and $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Ti}$ phase crystallized.

It is worth noting that the eutectic Si particles inside Zone 1 were remarkably refined (**Figure 2 (c)**). This is in agreement with the results of Schaffer et al. [34], as well as Grab and Arnberg [35], and can be attributed to the growth restriction effect of the solid particles.

During the microstructural analysis, a high number of crack-like double oxide films were found at the bottom region (Zone 1 and 2) of the sample solidified in the crucible (**Figure 3**). Also, some similar defects were found near the top surface. This crack-like appearance is a typical characteristic of double oxide films when they are observed on micrographs [20]. In most cases, these bifilms were connected to TiAlSi particles, and near the top surface, it was common that agglomerates of small-sized TiB_2 particles were in contact with the oxide films. The presence of TiAlSi and TiB_2 particles near the top surface caused a slight increase in the local Ti-concentration (0.21 % if measured directly on the top surface of the sample, while the middle section had an



Slika 2. (a) odsek, bogat z usedenimi delci, ki je nastal med poskusom, (b) koncentracije Ti in B pri različnih višinah vzorca, (c) optični mikrosposnetek območja, bogatega s TiB₂ (območje 1)

Fig. 2. (a) Settled particle-rich section created during the experiment (b) Ti- and B-concentrations at different sample heights, (c) optical micrograph of the TiB₂-rich region (Zone 1)

analize EDS, opravljene na območjih, označenih na **Sliki 4 (a)**. Jasno je razvidno, da so se sprijeli številni delci TiB₂ (**Slika 4 (a)**, točka 1), na obravnavani bifilm pa so se sprijele tudi nekatere intermetalne spojine TiAlSi (**Slika 4 (a)**, točka 3) in AlFeSi. Delci TiAlSi so večinoma sestavljeni iz (Al,Si)₃Ti z nekaj lamelami τ₂, ki so svetlejšje barve in so nastali zaradi počasnega ohlajanja vzorca

average Ti content of 0.15 %). Interestingly, these particles could not settle during the experiment. The reason for this is that they were connected to the surface oxide layer of the melt or were in contact with relatively large bifilms. Freshly created bifilms are usually present under the top surface of the liquid metal as they contain entrapped air, which causes them to float until they lose

[23]. V točki 2 na **Sliki 4 (a)** je koncentracija kisika (O) precej visoka (23,9 %) zaradi razmeroma debelih oksidnih plasti dvojnega oksidnega filma. Glede na koncentracijo Mg je glavna sestavina oksidnih filmov MgAl_2O_4 .

Sliki 3 in **4** kažeta, da se je kristalizacija delcev $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Ti}$ začela s heterogeno nukleacijo na dvojnih oksidnih plasteh in površinski oksidni plasti taline ter da je med rastjo delcev nekatere segmente oksidne plasti zajel napredujoč sprednji del. Po drugi strani pa veliko število delcev TiB_2 v stiku z bifilmi kaže na to, da med delci TiB_2 in oksidnimi plastmi obstaja neka vrsta interakcije, ki povzroča precej močno sprijemanje med temi fazami. Natančen mehanizem, ki povzroča to sprijemanje, trenutno ni znan, vendar je mogoče domnevati, da se delci TiB_2 prestrežejo in mehansko ujamejo v gube ter pregibe in razpoke oksidnih plasti.

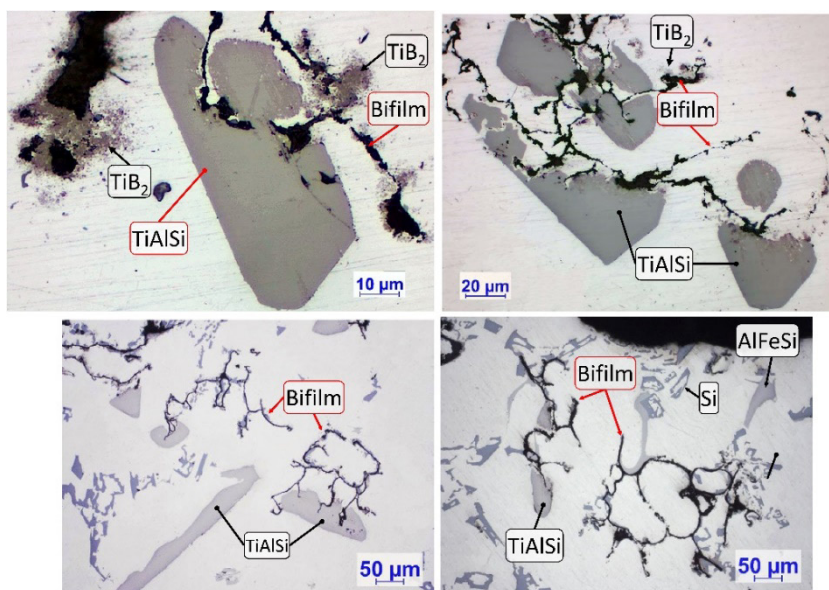
Na **Sliki 5** so povzeti rezultati analize poroznosti vzorcev za preskus RPT, ulitih na različnih točkah preskusa, s pomočjo računalniške tomografije, z reprezentativnimi rekonstruiranimi slikami poroznosti v zadnjem vzorcu za preskus RPT, ki je bil predhodno odvzet (**Slika 5 (b)**), in 6. vzorcu, ulitemu po legiranju (**Slika 5 (c)**). Po ulitju dveh kontrolnih vzorcev so se zaradi mešanja tekoče kovine povečali vsi trije parametri poroznosti, kar je posledica zajemanja zraka in tvorbe dvojne oksidne plasti, ki nastane zaradi mešanja. Pred dodajanjem predzlitine Al-5%Ti-1%B se parametri poroznosti s časom niso bistveno spremenili. Vendar je bilo po legiranju mogoče opaziti izjemne spremembe: gostota števila por se je močno povečala, medtem ko sta se volumenski delež por in specifična površina por močno zmanjšala. Nato so se vrednosti vseh treh parametrov stalno zmanjševale, dokler ni bil pri 6.

O_2 and N_2 from the inner atmosphere by the oxidation and subsequent nitridation process. Also, they could be connected to the surface oxide films, which could prevent sedimentation [23].

Figure 4 (a) and **(c)** presents the SEM images of a relatively large, tangled bifilm, which was found near the top surface of the sample. **Figure 4 (b)** shows the results of the EDS analysis conducted on the areas indicated in **Figure 4 (a)**. It can be seen that numerous TiB_2 particles (**Figure 4 (a)** point 1) have adhered and, some TiAlSi (**Figure 4 (a)** point 3) and AlFeSi intermetallics are also connected to the investigated bifilm. The TiAlSi particles consist mostly of $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Ti}$ with some τ_2 lamellae, which have a lighter color and were created due to the slow cooling of the sample [23]. At point 2 of **Figure 4 (a)**, the O-concentration is rather high (23.9 at. %) due to the relatively thick oxide layers of the double oxide film. Based on the Mg-concentration, the main constituent of the oxide films is MgAl_2O_4 .

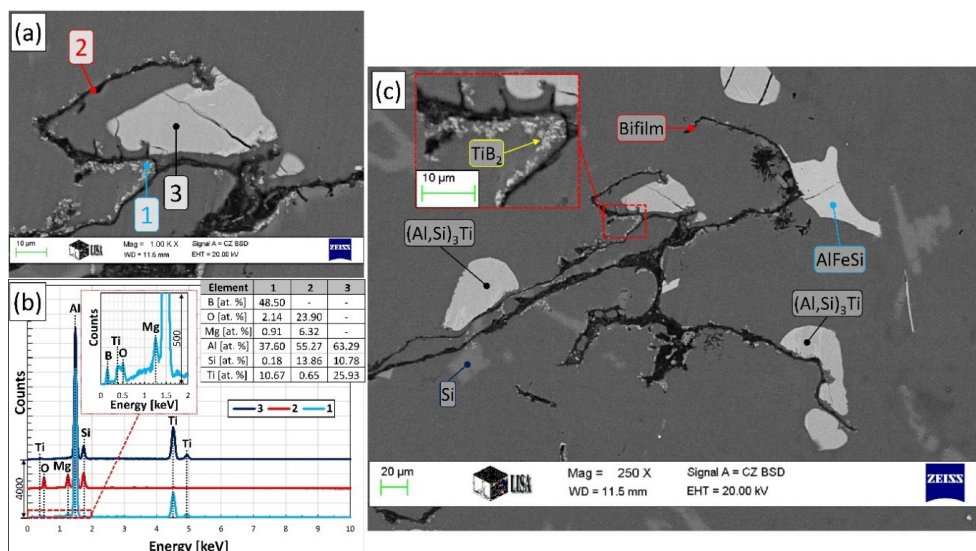
Figure 3 and **4** (I would, in general, delete the full stop after the figure) suggest that the crystallization of $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Ti}$ particles started by heterogeneous nucleation on double oxide films and the surface oxide film of the melt, as well as during the growth of the particles, some oxide film segments were engulfed by the advancing front. On the other hand, the high number of TiB_2 particles in contact with bifilms indicates that there is some type of interaction between the TiB_2 particles and oxide films, which causes a rather strong adherence between these phases. The exact mechanism that causes this adherence is currently not known, but it is reasonable to think that TiB_2 particles get caught up and become mechanically stuck in the wrinkles and folds, as well as cracks of the oxide films.

Figure 5 summarizes the results of the CT-aided porosity analysis of the



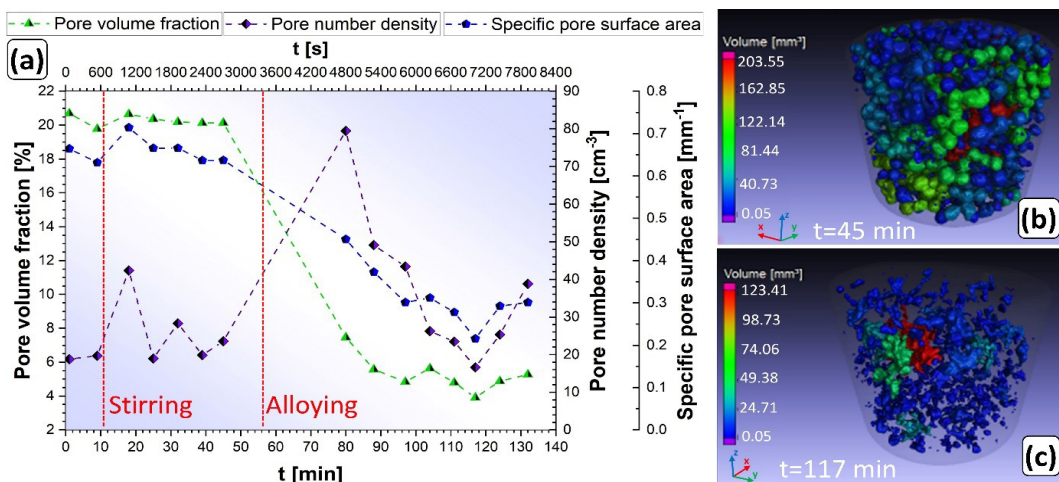
Slika 3. Optične mikrofotografije dvojnih oksidnih plasti v stiku z delci TiAlSi in TiB₂

Fig. 3. Optical micrographs of double oxide films in contact with TiAlSi and TiB₂ particles



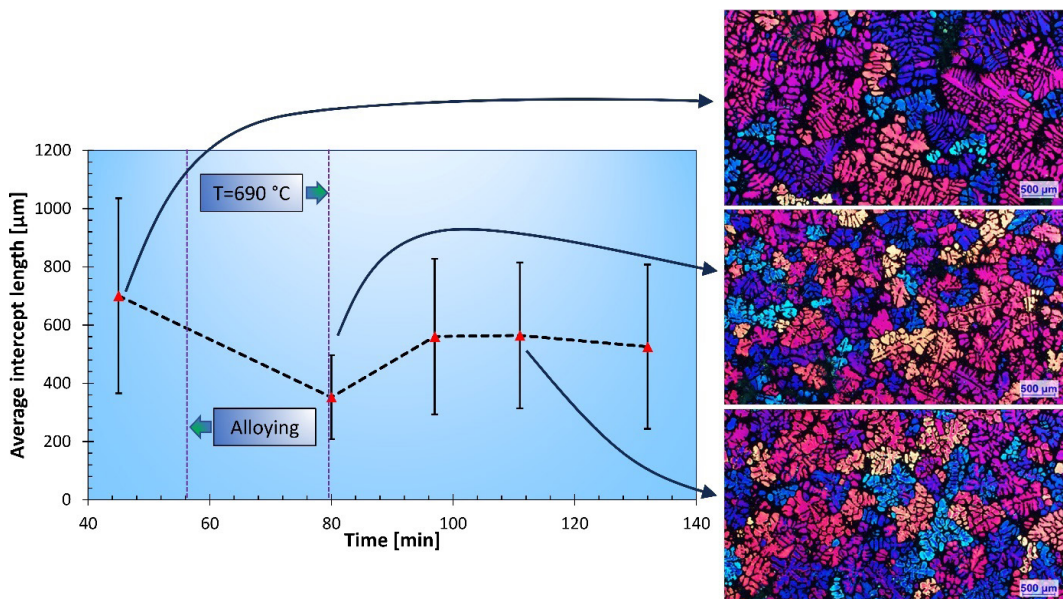
Slika 4 (a) in (c) mikroposnetki vrstičnega elektronskega mikroskopa (SEM) prepletenega bifilma s spojino TiAlSi in številnimi delci TiB₂, povezanimi z njegovo površino, (b) rezultati analize EDS, opravljene na označenih območjih

Fig. 4. (a) and (c) SEM images of a tangled bifilm with TiAlSi and numerous TiB₂ particles connected to its surface, (b) the results of the EDS analysis made at the indicated areas



Slika 5 (a) Razvoj obravnavanih parametrov poroznosti s časom (b) rekonstruiran volumetrični pogled na pore znotraj vzorcev za preskus RPT, ulitih pri $t = 45$ min in (c) $t = 117$ min

Fig. 5. (a) Evolution of the investigated porosity parameters with time (b) reconstructed volumetric view of the pores inside the RPT samples cast at $t=45$ min and (c) $t=117$ min



Slika 6. Razvoj velikosti zrn α -Al vzorcev za preskus RPT med izvajanjem preskusov

Fig. 6. Evolution of the α -Al grain sizes of the RPT samples during the experiments

vzorcu dosežen lokalni minimum, čemur je sledilo rahlo povečanje vseh parametrov.

RPT samples cast at different points of the experiment with representative

Močno povečanje gostote por po legiranju je skupni učinek udrobnjevanja zrn, ki ga povzroči glavna zlitina in povečana vsebnost bifilma, ki je posledica mešanja med legiranjem. Učinek udrobnjevanja zrn je jasno viden na **Sliki 6**; srednja presečna razdalja (velikost zrn) se je zmanjšala s približno 700 μm na 350 μm . Po drugi strani so bile velikosti zrn 3., 5. in 8. vzorca za preskus RPT podobne, s srednjo presečno razdaljo 530–560 μm . To povečanje velikosti zrn je najverjetneje posledica sedimentacije delcev $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Ti}$, ki so kristalizirali v talini, ko smo temperaturo znižali z 800 $^{\circ}\text{C}$ na 690 $^{\circ}\text{C}$. Stalno zmanjševanje gostote števila por po nastavitvi temperature taline na 690 $^{\circ}\text{C}$ je posledica skupnega učinka povečanja velikosti zrn zaradi usedanja udrobnilnih sredstev in zmanjšanja vsebnosti bifilma, ki je prav tako posledica sedimentacije delcev. Po ulivanju 6. vzorca za preskus RPT ta postopek ni več mogel preprečiti delovanja novih dvojnih oksidnih filmov, ki so nastali s ponavljajočim se vzorčenjem, parametri poroznosti pa so se začeli povečevati.

Ker sta se volumenski delež in specifična površina por zaradi postopka legiranja močno zmanjšala, prav tako pa je bilo v območju 1 na **Sliki 2** ugotovljeno veliko število bifilmov, lahko domnevamo, da je med 10-minutnim zadrževanjem pri 800 $^{\circ}\text{C}$ do neke mere prišlo do pospešene sedimentacije. V tem obdobju bi lahko delci TiB_2 povzročili usedanje bifilmov, kar potrjujejo rezultati kemijske analize v **Preglednici 1**; koncentracija B je bila 10 minut po legiranju veliko nižja, kot bi morala biti glede na količino predzlitine, vnesene v talino.

Glede na predhodno objavljene rezultate [23–25] kombinacija kristalizacijskih delcev $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Ti}$ z dodatnimi delci TiB_2 , ki se sprijemajo na oksidne plasti, povzroča izrazitejši sedimentacijski učinek kot samo kristalizacijski učinek $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Ti}$.

reconstructed images of the porosity inside the last RPT sample taken before (**Figure 5 (b)**), and the 6th specimen cast after alloying (**Figure 5. (c)**). After the 2 control samples were cast, the stirring of the liquid metal increased all three porosity parameters, which is the result of the air entrainment and double oxide film formation caused by the stirring action. Before the addition of the Al-5%Ti-1%B master alloy, the porosity parameters did not change significantly with time. However, after the alloying step, remarkable changes could be observed: the number density of the pores showed a sharp increase, while pore volume fraction and specific pore surface area were greatly reduced. Following that, all three parameters showed a continuous reduction in their values, until a local minimum was reached at the 6th sample, which was followed by a slight increase in every parameter.

The sharp increase in the number density of pores after alloying is the combined effect of the grain refinement caused by the master alloy and the increased bifilm content, which is the result of the stirring applied during alloying. The grain refining effect can clearly be seen in **Figure 6**; the average intercept length was reduced from about 700 μm to 350 μm . On the other hand, the grain sizes of the 3rd, 5th, and 8th RPT specimens were similar with average intercept lengths of 530–560 μm . This increase in the grain size is most likely the result of the sedimentation of the $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Ti}$ particles crystallized in the melt when the temperature was reduced from 800 $^{\circ}\text{C}$ to 690 $^{\circ}\text{C}$. The continuous reduction in pore number density after the melt temperature was set to 690 $^{\circ}\text{C}$ is due to the combined effect of increasing grain size caused by grain refiner settling and the reduction in bifilm content, which is also the result of particle sedimentation. After casting the 6th RPT sample, this process

Dodatne meritve gostote na vzorcih za preskus RPT so pokazale, da se je zaradi postopka legiranja (z ustreznimi temperaturnimi spremembami) gostota povečala z $2,21 \text{ g/cm}^3$ na $2,62 \text{ g/cm}^3$, kar je izjemno izboljšanje, če upoštevamo, da razplinjevanje ni bilo uporabljeno v nobeni obliki.

4 Sklepne ugotovitve

Na podlagi rezultatov te študije je mogoče sklepati, da

- se delci TiB_2 , ki se v talino vnesejo z dodatkom Al-5%Ti-1%B, sprijemajo in aglomerirajo vzdolž dvojnih oksidnih plasti, ki so porazdeljene v tekoči kovini, in površinskimi oksidnimi plastmi taline.
- se delci $(\text{Al,Si})_3\text{Ti}$, ki so kristalizirali iz taline, sprimejo z bifilmi in površinsko oksidno plastjo zaradi heterogene nukleacije $(\text{Al,Si})_3\text{Ti}$ na oksidnih fazah in pride do delnega zajetja segmentov oksidne plasti med rastjo delcev $(\text{Al,Si})_3\text{Ti}$.
- Večina delcev TiB_2 iz uporabljene palice iz glavne zlitine se je v 10 minutah po dodajanju usedla na dno lončka, kar je povzročilo nastanek plasti usedline, bogate s TiB_2 . Na vrhu prve plasti, bogate s TiB_2 , je bila nastala plast usedline, bogate z $(\text{Al,Si})_3\text{Ti}$.
- Na podlagi mikrostrukturnih preiskav in računalniške tomografske analize poroznosti vzorcev za preskus RPT je usedanje delcev TiB_2 in $(\text{Al,Si})_3\text{Ti}$ pospešila sedimentacijo dvojnih oksidnih plasti. Zmanjšanje koncentracije bifilma v vrhnjem delu tekoče kovine je prispevalo k zmanjšanju volumskega deleža, gostote števila in specifične površine por v vzorcih za preskus RPT.
- Potrebne so nadaljnje raziskave, ki bodo

could no longer counterweight the effect of new double oxide films created by repeated sampling, and the porosity parameters started to increase.

As the pore volume fraction and specific pore surface area were greatly reduced by the alloying process, as well as a high number of bifilms found in Zone 1 of **Figure 2**, it can be assumed that to some extent, aided sedimentation could take place during the 10 minute-long holding period at 800°C . During this period, TiB_2 particles could cause the settling of bifilms, which is supported by the chemical analysis results in **Table 1**; the B-concentration was much lower 10 minutes after alloying than it should be based on the amount of master alloy introduced to the melt.

Considering the results published previously [23-25], the combination of crystallizing $(\text{Al,Si})_3\text{Ti}$ particles with additional TiB_2 particles being attached to oxide films causes a more prominent sedimentation effect than only crystallizing $(\text{Al,Si})_3\text{Ti}$. Additional density measurements on RPT samples showed that the alloying process (with adequate temperature changes) caused the density to increase from 2.21 g/cm^3 to 2.62 g/cm^3 , which is an outstanding improvement taking into account that degassing was not applied in any form.

4 Conclusions

From the results of the present study, it can be concluded that

- TiB_2 particles introduced to the melt by the addition of Al-5%Ti-1%B tend to adhere to and agglomerate along the double oxide films suspended in the liquid metal, and surface oxide film of the melt.
- $(\text{Al,Si})_3\text{Ti}$ particles crystallized from

pokazale, kako je mogoče raziskane pojave uporabiti v industrijskih procesih in kako je mogoče izboljšati zdajšnje tehnologije obdelave taline z upoštevanjem možnih interakcij delcev udrobnilnih sredstev in dvojnih oksidnih plasti.

the melt became attached to bifilms and the surface oxide layer due to the heterogeneous nucleation of $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Ti}$ on oxide phases, and the partial engulfment of oxide film segments during the growth of $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Ti}$ particles.

- Most of the TiB_2 particles of the applied master alloy rod settled to the bottom of the crucible within 10 minutes after addition, which caused the formation of a TiB_2 -rich sediment layer. $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Ti}$ -rich sediment layer was created on top of this TiB_2 -rich first layer.
- Based on the microstructural investigations and computed tomographic porosity analysis of RPT samples, the aided sedimentation of double oxide films was realized by the settling TiB_2 and $(\text{Al},\text{Si})_3\text{Ti}$ particles. The reduction of the bifilm concentration in the upper region of the liquid metal contributed to the reduction of pore volume fraction, pore number density, and specific pore surface area inside the RPT specimens.
- More research is needed, that can explore how the investigated phenomena can be utilized in industrial processes and how our current melt treatment technologies can be improved by taking into account the possible interactions of grain refiner particles and double oxide films.

Viri / References

1. J. Campbell: Complete Casting Handbook 2nd Ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-63509-9.00002-9>
2. J. Campbell: The Pre-Existing Microcrack Population in Metals: A Personal Overview. *Procedia Structural Integrity*, Vol. 43. 2023. pp. 234-239. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.12.264>
3. G. K. Sigworth, T. A. Kuhn: Grain Refinement of Aluminum Casting Alloys. *International Journal of Metalcasting*, Vol. 1. 2007. pp 31–40. <https://doi.org/10.1007/BF03355416>.
4. G. Timelli et al.: Effects of Grain Refinement on the Microstructure, Mechanical Properties and Reliability of AlSi7Cu3Mg Gravity Die Cast Cylinder Heads. *Metals and Materials International*, Vol. 20. 2014. pp. 677–686. <https://doi.org/10.1007/s12540-014-4013-2>.

5. F. Aydogan et al.: Analysis Evaluation of Ti, B, Nb and MTS Grain Refined Al11Si Alloy. *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 287. 2022. Art. No. 126264. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126264>.
6. J. Fjellstedt, A.E.W. Jarfors, L. Svendsen: Experimental Analysis of the Intermediary Phases AIB₂, AIB₁₂ and TiB₂ in the Al-B and Al-Ti-B Systems. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 283. 1999. pp. 192–197. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(98\)00892-5](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(98)00892-5).
7. M. M. Guzowski, G. K. Sigworth, D. A. Sentner: The Role of Boron in the Grain Rrefinement of Aluminum with Titanium. *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 18. 1987. pp. 603–619. <https://doi.org/10.1007/BF02649476>.
8. Z. Fan et al.: Grain Refining Mechanism in the Al/Al-Ti-B System. *Acta Materialia*, Vol. 84. 2015. pp. 292–304. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.10.055>.
9. G. S. V. Kumar, B. S. Murty, M. Chakraborty: Settling Behaviour of TiAl₃, TiB₂, TiC and AIB₂ Particles in Liquid Al During Grain Refinement. *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 23(4). 2010. pp. 193–204. <https://doi.org/10.1179/136404610X12665088537491>.
10. I. G. Watson et al.: Investigation of the Clustering Behaviour of Titanium Diboride Particles in Aluminium. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 36(9). 2005. pp. 1177–1187. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.02.003>.
11. L. Arnberg, L. Bäckerud, H. Klang: Intermetallic Particles in Al–Ti–B–type Master Alloys for Grain Refinement of Aluminium. *Metals Technology* Vol. 9. 1982. pp. 7–13. <https://doi.org/10.1179/030716982803286368>
12. F. Gao, Z. Fan: Effect of Nucleant Particle Agglomeration on Grain Size. *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 53. 2021. pp. 810–822. <https://doi.org/10.1007/s11661-021-06549-2>.
13. Y. Wang, H.T. Li, Z. Fan: Oxidation of Aluminium Alloy Melts and Inoculation by Oxide Particles. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 65. 2012. pp. 653–661. <https://doi.org/10.1007/s12666-012-0194-x>
14. J. Campbell: „Stop Pouring, Start Casting”. *International Journal of Metalcasting*, Vol. 6. No. 3. 2012. pp. 7–18. <https://doi.org/10.1007/BF03355529>
15. J. Campbell: A Personal View of Microstructure and Properties of Al Alloys. *Materials*, Vol. 14., 2021. 1297. <https://doi.org/10.3390/ma14051297>
16. S. Fox, J. Campbell: Liquid Metal Quality. *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 14. 2002. pp. 335–340. <https://doi.org/10.1080/13640461.2002.11819451>.
17. G. Gyarmati et al.: Analysis of the Quality of Incoming AlSi9Mn Alloy Ingots. *International Journal of Metalcasting*, 2023. <https://doi.org/10.1007/s40962-023-01146-y>
18. M.L. Hu et al.: Bifilm Defects in AlSi10MgMn Alloy Castings. *International Journal of Metalcasting*, 2023. <https://doi.org/10.1007/s40962-023-01207-2>
19. J. Campbell: The Origin of Griffith Cracks. *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 42. 2011. pp. 1091–1097. <https://doi.org/10.1007/s11663-011-9575-5>.
20. J. Campbell: *The Mechanisms of Metallurgical Failure - The Origin of Fracture*. Elsevier Ltd. 2020. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822411-3.00001-0>
21. N. D. G. Mountford, R. Calvert: Precipitation Effects in Liquid Aluminum Alloys Experiments with A Pulsed Ultrasonic Technique. *Journal of the Institute of Metals*, Vol. 88. 1959. pp. 121–127.

22. X. Cao, J. Campbell: Effect of Precipitation and Sedimentation of Primary α -Fe Phase on Liquid Metal Quality of Cast Al-11.1Si-0.4Mg Alloy. *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 17. 2004. pp. 1–11. <https://doi.org/10.1179/136404604225014792>.
23. G. Gyarmati et al.: Controlled Precipitation of Intermetallic (Al,Si)₃Ti Compound Particles on Double Oxide Films in Liquid Aluminum Alloys. *Materials Characterization*, Vol. 181., 2021. Art. No.111467. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111467>
24. G. Gyarmati et al.: Interactions of Primary Intermetallic Compound Particles and Double Oxide Films in Liquid Aluminum Alloys. *Intermetallics*, Vol. 149. 2022. Art. No. 107681. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2022.107681>
25. Gábor Gyarmati et al.: Grain Refiner Settling and Its Effect on the Melt Quality of Aluminum Casting Alloys. *Materials*, Vol. 15. Issue 21. 2022. 7679. <https://doi.org/10.3390/ma15217679>
26. J. Yang et al.: Influence of Grain Refiners on the Wettability of Al₂O₃ Substrate by Aluminum Melt. *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 52(1). 2020. pp. 382–392. <https://doi.org/10.1007/s11663-020-01989-4>.
27. J. Yang et al.: The Interactions Between Oxide Film Inclusions and Inoculation Particles TiB₂ in Aluminum Melt. *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 52. 2021. pp. 2497–2508. <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02160-3>.
28. G.K. Sigworth: The Grain Refining of Aluminum and Phase Relationships in the Al-Ti-B System. *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 15. 1984. pp. 277–282. <https://doi.org/10.1007/BF02645112>
29. D. Dispinar, J. Campbell: Critical Assessment of Reduced Pressure Test. Part 1: Porosity Phenomena. *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 17. 2004. pp. 280–286. <https://doi.org/10.1179/136404604225020704>.
30. S. Fox, J. Campbell: Visualisation of Oxide Film Defects During Solidification of Aluminium Alloys. *Scripta Materialia*, Vol. 43. 2000. pp. 881–886. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(00\)00506-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(00)00506-6)
31. G. Gyarmati et al.: Characterization of the Double Oxide Film Content of Liquid Aluminum Alloys by Computed Tomography. *Materials Characterization*, Vol. 157. 2019. Art. No. 109925, <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.109925>
32. M. Uludağ et al.: On the Interpretation of Melt Quality Assessment of A356 Aluminum Alloy by the Reduced Pressure Test: The Bifilm Index and Its Physical Meaning. *International Journal of Metalcasting*. Vol. 12. 2018. pp. 853–860. <https://doi.org/10.1007/s40962-018-0217-4>
33. P. L. Schaffer, A. K. Dahle: Settling Behaviour of Different Grain Refiners in Aluminium. *Materials Science and Engineering A*, Vol. 413–414. 2005. pp. 373–378. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.202>.
34. P.L. Schaffer, L. Arnberg, A.K. Dahle: Segregation of Particles and Its Influence on the Morphology of the Eutectic Silicon Phase in Al-7 wt.% Si Alloys. *Scripta Materialia*, Vol. 54. 2006. pp. 677–682. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.10.016>.
35. T. Grab, L. Arnberg: Influence of TiB₂ Particles on Growth of Eutectic Silicon in Aluminium-Silicon Alloys. *International Journal of Cast Metals Research*, Vol. 19. 2006. pp. 201–209. <https://doi.org/10.1179/136404606225023426>.

AKTUALNO / CURRENT

Prehod v trajnostno poslovanje

Po sprejetem programu seminarjev Društva livarjev Slovenije za leto 2024 je Društvo dne 17. aprila 2024 organiziralo seminar/delavnico, ki je bila v okviru letošnje okoljevarstvene problematike za livarne osredotočena na tematiko prehoda v trajnostno poslovanje. Izvajalec seminarja v obliki delavnice je bila Služba za okolje Gospodarske zbornice Slovenije (GZS), ki je 4. junija letos organizirala tudi 23. Okoljevarstveni dan gospodarstva na Bledu, prav tako s poudarkom na isti problematiki.

Na seminarju/delavnici Društva, ki je potekala na lokaciji GZS, so predavatelji Antonija Božič Cerar, vodja Službe za varstvo okolja (GZS), dr. Marko Homšek, zunanji strokovni sodelavec Službe za varstvo okolja, in Romana Benčina, strokovna sodelavka Službe za varstvo okolja, predstavili naslednje tematske vsebine: EU-taksonomijo (katere gospodarske dejavnosti se lahko štejejo za okoljsko trajnostne), trajnostno poročanje in EU standarde trajnostnega poročanja.

V nadaljevanju povzemamo pozdravni nagovor generalne direktorice GZS Vesne Nahtigal na 23. Okoljevarstvenem dnevu gospodarstva: „Trajnostno poslovanje ni več izbira, temveč nuja za vsa podjetja in organizacije, ki načrtujejo poslovanje z mislijo na prihodnje generacije. Slovenska podjetja, ki kotirajo na borzi, so poročanju o svojem trajnostnem delovanju že zavezana, ostala podjetja pa ta naloga še čaka. Opaža se, da

se vse več podjetij odloča, da svoje trajnostne politike in aktivnosti dodajajo v svoja letna poročila, čeprav jih zakonodaja še ne zavezuje. Nekatere s tem gradijo svoj ugled, druge k temu motivirajo njihovi kupci. Dejstvo je, da so podjetja dejansko vse bolj vpeta v verige trajnosti in se morajo, bodisi v vlogi ponudnika bodisi v vlogi naročnika, obnašati trajnostno, da bi ohranila ali pridobila nove posle. V nekaterih panogah so že korak naprej, ker jih v to sili trg.

Pojasnila je, da je trajnostni razvoj besedna zveza, ki se je že dodobra udomačila v naš vsakodnevni besednjak. Danes sicer pogosteje naletimo na kratico ESG, ki ponazarja tri osnovne stebre trajnosti delovanja vsake organizacije - to je njen vpliv na okolje, ljudi (družbena odgovornost) in korporativno upravljanje organizacije. Ko se je pojavila besedna zveza 'trajnostni razvoj' (sustainable development) sredi 80-ih let, ni bilo jasno, kaj vse zajema. Prvi koraki so se začeli na področju okoljske zakonodaje. Ta je bila usmerjena predvsem v gospodarstvo oz. industrijo. Eden od največjih izzivov pri vstopu Slovenije v EU



Slika 1. Vesna Nahtigal

je bila prav direktiva o emisijah iz industrije z uvedbo celostnih okoljevarstvenih dovoljenj. Trgovanje s toplogrednimi plini pa je prineslo popolnoma nov koncept razmišljanja in delovanja podjetij, ki so tako postala primerljiva z drugimi podjetji po Evropi po energetski učinkovitosti na proizvod po panogi.



Slika 2. Pogled na seminarsko dvorano

Ne glede na postulate trajnosti je okolje že zaradi obsežnosti zakonodaje, ki se sprejema na ravni EU, ter zahtev zelenega prehoda, kjer je ponovno poudarjen okoljski del, najzahtevnejši in najobsežnejši del trajnostnega poslovanja in tudi trajnostnega poročanja velikih družb. Tu se z izjemnimi izzivi soočajo energetska intenzivna podjetja (predvsem proizvodnja materialov). Evropska industrijska politika se zaveda, da Evropa ne more brez energetska intenzivnih panog, saj te oskrbujejo več ključnih vrednostnih verig. Razogljičenje in modernizacija tega sektorja sta bistvenega pomena za samozadostnost Evropske unije, ki je danes vse preveč odvisna od uvoza strateških surovin in strateških materialov iz tretjih držav.“

Poročala: mag. Mirjam Jan-Blažič

AKTUALNO / CURRENT

Velika livarska konferenca treh držav v Salzburgu

Od 25. do 26. aprila 2024 je v Kongresnem centru v Salzburgu potekala velika livarska konferenca treh držav: Avstrije, Nemčije in Švice. Konferenca je potekala v organizaciji nemškega BDG - Bundesverband der Deutschen Giesserei-Industrie skupaj z VDG ter avstrijskimi in švicarskimi livarskimi združenji pod sloganom:

PRIHODNOST LITJA: PREOBRAZBA, NOVI KADRI, TEHNOLOGIJA

Gre za livarski dogodek, ki je v preteklosti bil organiziran v tej organizaciji vsaka štiri leta. Zadnjikrat je to bilo leta 2018, ko se je zbralo več kot 800 udeležencev. Od takrat pa se je veliko tega zgodilo oziroma spremenilo. Prehod v podnebno nevtralnost se vse bolj pospešuje in pred velike izzive postavlja ne le livarsko industrijo. Poleg tega pandemija koronavirusa, vojna v Ukrajini ter krize surovin in energije kažeta, da je med livarskimi strokovnjaki bolj kot kdaj koli potrebna izmenjava, da bi se v tem zelo kompliciranem svetu lahko združno iskale rešitve in koncepti za prihodnost livarske industrije, njenega razvoja v časih preobrazbe, ki prihaja tudi v luči pomanjkanja strokovnih kadrov. Livarska združenja omenjenih treh držav so pripravila program predavanj, ki odraža megatrende v tehnologiji litja in livarski industriji. Prikazuje dosedanje livarske prakse in raziskave na področjih litega železa, jekla in neželezovih kovin ter proizvodne tehnologije, razvoj materialov in postopkov. V ospredju so bile predstavljene tudi rešitve na področju energetske učinkovitosti, okoljske tehnologije, digitalizacija in načini privabljanja strokovnega kadra.

V nadaljevanju predstavljamo vse teme predavanj z avtorji po sekcijah v slovenskem prevodu in v nemščini. V pisarni Društva so članom Društva na voljo Power Point predstavitve, žal samo nekaterih predavanj v nemškem jeziku. Po predhodni najavi vam predstavitev, ki so na voljo, lahko pošljemo po emailu.

SEKCIJA ŽELEZO IN JEKLO LITINA

1. Izboljšanje kakovosti pri litju sive litine s celostno analizo procesnih podatkov /
Qualitätsverbesserungen im Eisenguss durch ganzheitliche Analyse von Prozessdaten
Frenk Brehm- Daimler Truck AG
2. Zamenjava kupolne peči z indukcijsko pečjo /
Ersatz eines Kupolofens durch Induktionsofen-Technologie
Dr. Marco Rische- ABP Induction Systems GmbH
3. Čisti jekleni ulitki pri izjemno nizkih temperaturah litja za visokozmogljive aplikacije z inovativno Rotoclone-metodo /
Saubere Stahlgussteile bei extrem niedrigen Gießtemperaturen für Hochleistungsanwendungen mit dem innovativen Rotoclone-Verfahren
Andreas Baier und David Hrabina- FOSECO

SEKCIJA TRANSFORMACIJA

4. FRED – PCF kalkulator za livarsko industrijo /
FRED – Der PCF Calculator für die Gießerei-Industrie
Elke Radke- BGD Bundesverband der Deutschen Giesserei-Industrie e. V. und Tobias Hain- Industrieverband Massivumformung e. V.
5. Transformacija v železolivarni v Evropi: ključ do tehničnega in gospodarskega uspeha/
Transformation in der Eisengießerei in Europa: Schlüssel zum technischen und wirtschaftlichen Erfolg
Dr. mont Georg Geier - Simpelkamp Giesserei GmbH
6. Transformacija v jeklarski industriji in posledice za vrednostno verigo žlindre /
Transformation in the steel industry and implications for the slag value chain
Thomae Reiche , DR. Andreas Ehrenberg - FEhS Institut fuer Bauxtof-Forschung e.V.

SEKCIJA NE-ŽELEZNE ZLITINE

7. Zahteve kupcev do livarske industrije in rešitve AMAGA /
Anforderungen der Kunden an die Gießereiindustrie und Lösungsansätze der AMAG
Dr. mont. Philip Pucher – Amag Casting GmbH
8. Orodna jekla za najboljše na svetu – Böhlerjeve inovacije za livarsko industrijo /
Formenstähle für die Besten der Welt – Böhlers Innovationen für die Gießerei-Industrie
Dr. mont. Christoph Turck- voestalpine Boehler Edelstahl GmbH &Co. KG
9. Visokokakovostni ulitki pri nizkotlačnem litju magnezija za maloserijsko proizvodnjo/
Hochqualitative Gussteile im Magnesium-Niederdruckguss für die Kleinserienproduktion
Peter Rauch- Rauch Furnace Technokigy und Peter Clark- Magellan Aerospace

SEKCIJA DIGITALIZACIJA

10. Hibridna in digitalna izdelava jeder prihodnosti /
Die hybride und digitale Kernmacherei der Zukunft
Rudolf Wintergens- Laempe Moessner Sinto GmbH
11. Optimizirana izdelava jeder: dimenzijsko natančni ulitki /
Optimierte Kernherstellung: maßhaltige Gussteil
Joerg Zimmermann- Magma Giessereitechnologie GmbH
12. Proof of Concept za uporabo obratovalnih podatkov pri napovedovanju napak pri litju
Proof of Concept für die Verwendung von Laufzeitdaten zur Prognose von Gussfehlern
Prof. Marcus C. Krack – FH Nordwestschweiz
13. Raziskovalni projekt ReGAIN – prilagodljive avtomobilске livarne z uporabo AI-podprtih asistentov za trajnostne procese /
Forschungsprojekt ReGAIN – Resiliente Automotive-Gießereien durch Einsatz AI-gestützter Assistenten für nachhaltige Prozesse
Dr. Kai Kerber – Oskar Frech GmbH Co. KG
14. Prihodnji zavorni sistemi v avtomobilski industriji /
Zukünftige Bremssysteme in der Automobilindustrie
Mustata ATA – Continental Automotive Technologies GmbH
15. Ukrepi za povečanje energetske in materialne učinkovitosti v srednje veliki livarni ročnega formanja /
Maßnahmen zur Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz in einer mittelständischen Handformgießerei
Prof. Dierk Harmann – Hochschule Kempten
16. Analiza poroznosti v računalniški tomografiji – od P202 do P203 /
Porositätsanalyse in der Computertomographie – von P202 zu P203
Florian Roeper und Christa Zengerer – OEG Österreichisches Giesserei-Institut und Georg Haaser, Harald Steinlechner, Stefan Maierhofer- Aardworx GmbH

PREDAVANJA MLADIH ZNANSTVENIKOV

17. Eksperimentalno podprto modeliranje korelacije med metalurškim procesom, razvojem mikrostrukture in mehanskimi lastnostmi perlitnega nodularnega železa /
Experimentell gestützte Modellierung der Korrelation zwischen metallurgischer Prozessführung, Gefügeentwicklung und mechanischen Eigenschaften von perlitischem GJS
Lutz Hortbach – institut fuer Werkstoffanwendungen im Maschinenbau IWM der RWTH Aachen.
18. Nastajanje plinov v anorgansko vezanih formarskih materialih /
Gasentstehung anorganisch gebundener Formstoffe
M.Sc. Simon Kammerloher – Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen utg, TU München

19. Razvoj večplastnih peščenih jeder za tlačno litje /
Entwicklung mehrschichtiger Sandkerne für den Druckguss
MSc. Max Schuetze – Giesserei Technologie Aal – GTA, HS Aalenen
20. Inovativna ocena mikrostrukture v velikih ulitkih: Z virtualnim mikroskopom in vibracijskim testom do lokalne trdnosti /
Innovative Gefügebewertung im Großguss: Mit virtuellem Mikroskop und Schwingversuch zur lokalen Festigkeit
M.Sc. Felix Weber – Institut für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau IWM der RWTH Aachen
21. Regeneracija zelenega peska in priprava regeneracijskih prahov /
Grünsandregenerierung und Aufbereitung von Regenerierstäuben
M.Sc. Gerhrd Pentz – Giesserei – Institut der TU Bergakademie **Freiberg**

SEKCIJA KROŽNO GOSPODARSTVO IN TRANSFORMACIJA

23. Hydro-Road načrt za aluminij brez CO₂ in vplivi dodatkov recikliranih odpadkov na lastnosti primarnih aluminijevih litin /
Hydro's Roadmap zu CO₂-freiem Aluminium und Auswirkungen von Post-Consumer-Scrap-Zusätzen auf die Eigenschaften von primären Aluminium-Gusslegierungen
Friederike Feikus, - Hydro Aluminium GmbH
24. Elektrifikacija reciklažne poti za aluminij /
Elektrifizierung der Recyclingroute für Aluminium
Dr. Tobias Mertens – Otto Junker Solutzion GmbH
25. Razvoj induktivne vroče plinske bakle za dekarbonizacijo metalurških procesov /
Entwicklung einer induktiven Heißgasfackel zur Dekarbonisierung metallurgischer Prozesse
Prof. Dr. Ing. Gotthard Wolf – Giesserei- Institut der TU Bergakademie Freiberg
26. Zmanjševanje CO₂ in energetske prihranki skozi rekuperacijo toplote in sodobnim upravljanjem zraka na primeru STIHL /
CO₂-Minderung und Energiekostenvorteile durch Wärmerückgewinnung und modernes Luftmanagement am Beispiel STIHL
Dr. Holger Wagner – KWA Umwelttechnik GmbH

Ta konferenca se je tudi to pot izkazala kot pomemben forum za livarske strokovnjake, uporabnike livarskih izdelkov in dobaviteljev za livarsko industrijo. Tokrat je bila celotna konferenca v znamenju trenutnih političnih, gospodarskih in tehničnih izzivov v Evropski uniji. Po uradnih seznamih, ki smo jih prejel udeleženci konference je na konferenci bilo prisotno nekaj manj kot 600 udeležencev.

Poročala: mag. Mirjam Jan-Blažić

AKTUALNO / CURRENT**Prof. Dr. Gerhard Engels, Im Memoriam**

V starosti 95 let nas je 14. aprila letos zapustil častni član Društva livarjev Slovenije, naš dolgoletni livarski kolega in prijatelj ter vrsto let zvesti udeleženec naše tradicionalne livarske konference v Portorožu, prof. dr. Gerhard Engels. V Nemčiji je bil posebno znan kot nekdanji izvršni direktor VDG. Po študiju v Aachnu se je leta 1953 kot inženir livarstva zaposlil v podjetju KSB v Frankenthalu. Že leta 1955 je prevzel tehnično vodstvo luksemburške hčerinske družbe FAM Fonderies et Ateliers de Mersch, ki je bila pod njegovim vodstvom temeljito modernizirana. Koncem leta 1959 je prišel v VDG, kjer je od leta 1966 bil najprej namestnik izvršnega direktorja ob boku prof. dr.-ing. Philippa Schneiderja, po njegovem odhodu pa je leta 1975 prevzel vodenje VDG. Bil je dejaven v mnogih, tudi mednarodnih odborih. Bil je eden od ključnih pobudnikov sejma GIFA, kjer je bil član predsedstva že od leta 1962. Do konca je ostal aktivno obveščen o dogajanjih in

novostih na GIFU. Leta 1963 je prevzel mesto predavatelja za področje livarstva na TU Clausthal. Leta 1972 je postal ustanovni predsednik Mednarodne komisije za varstvo okolja pri CIATF. V naslednjih letih so pod njegovim vodstvom ustanovili strokovne skupine VDG, zagotovil redne delavnice o strategijah za prihodnost in tesnejše povezovanje IfG in VDG. Izobraževalne aktivnosti in informiranje o literaturi ter podpora raziskavam in študijam so se pod njegovim vodstvom močno okrepile. Kot predavatelj in avtor številnih objav je dr. Engels uspešno zagovarjal temeljna vprašanja vezana na položaj livarstva v primerjavi med materiali in proizvodnimi postopki. Bil je znan tudi v tujini, kjer so mu njegove strokovne kompetence, skupaj z vedno vpludnim nastopom, prinesle priznanja in simpatije. Kot upokojenec je z velikim zanimanjem spremljal zgodovino livarske tehnike. Skupaj s posebnim timom je nadaljeval proučevanje livarske zgodovine in z veliko vnemo ustvaril široko mrežo strokovnjakov, zainteresiranih za proučevanje livarske zgodovine. TU Clausthal je dr. Engelsa leta 1986 imenovala za honorarnega profesorja, leta 1989 pa ga je VDG počastil z najvišjim priznanjem, Adolf-Ledeburjevo spominsko medaljo. Leta 1993 mu je Univerza Otto-von-Guericke v Magdeburgu podelila častni doktorat. Od leta 1999 je bil Gerhard Engels častni član VDG.

Prof. dr. Gerhard Engels je tekom svoje dolgoletne poslovne kariere pokazal izjemno predanost in vztrajnost v livarski stroki. Nikoli mu ni manjkalo inovativnosti in sposobnosti za izboljšave. Z izjemnimi vodstvenimi sposobnostmi, strokovnimi kompetencami in posebno karizmo je doma in v tujini užival velik ugled ter pomembno prispeval k razvoju livarstva s svojim delom in strateškimi pristopi. Zato se ga bomo radi spominjali kot človeka, strokovnjaka in prijatelja.

mag. Mirjam Jan-Blažič



DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE

Vabilo za

64. IFC PORTOROŽ 2024

z livarsko razstavo

18. - 20. SEPTEMBER 2024

Kontakt: DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE,
Lepi pot 6, p.p. 424, 1001 Ljubljana
T: +386 1 2522 488
drustvo.livarjev@siol.net, www.drustvo-livarjev.si



The 75th WORLD FOUNDRY CONGRESS

2024.10.25-30

DEYANG · CHINA

DEVELOPING FOUNDRY

www.75wfc.com



The World
Foundry
Organization





VSE ZA LIVARSKO INDUSTRIJO

KS KNEISSL & SENN TECHNOLOGIE GMBH

 Chesterton |
  Teshila |
  Vse za livarstvo |
  Ognjeodporni materiali |
  Verige |
  Kompezatorji

Mühlgraben 43b, 6343 Erl, Avstrija
 +43 5373/76020 | info@ks-tech.at | <https://ks-tech.at>



TERMIT

Družba TERMIT je rudarsko podjetje
za pridobivanje kremenovih peskov



NAŠ PROGRAM:

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

www.termit.si