

LIVARSKI VESTNIK

67/2020

4



DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE
SLOVENIAN FOUNDRYMEN SOCIETY



Optimizacija procesov s plini na vseh področjih metalurgije

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

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

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



MESSER 

Messer Slovenija d.o.o.
Jugova 20
2342 Ruše
tel.: +386 2 669-03-00
faks: +386 2 661-60-41
info.si@messergroup.com
www.messer.si

Part of the **Messer World** 

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
Fax: + 386 1 426 99 34
E-mail: drustvo.livarjev@siol.net
Spletna stran: www.drustvo-livarjev.si

Glavni in odgovorni urednik / Chief and responsible editor:

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

Tehnično urejanje / Technical editing:

mag. Mirjam Jan-Blažič

Uredniški odbor / Editorial board:

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

Prevod v angleški jezik / Translation into English:

Marvelingua, Aljaž Seničar s.p.

Lektorji / Lectors:

Angleški jezik / English:
Yvonne Rostek, Düsseldorf
Slovenski jezik / Slovene: prof. Janina Šifer

Tisk / Print:

Fleks d.o.o.

Naklada / Circulation:

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

Letna naročnina: 35 EUR z DDV

Year subscription: 35 EUR (included PP)

Dano v tisk: december 2020



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

Direktor: Valentin Ilievski

T: +386 2 669 03 00
F: +386 2 661 60 41
E: info.si@messergroup.com

VSEBINA / CONTENTS

Stran / Page:

G. Fegyvernek, M. Bubenkó, D. Molnár: Učinek udrobnjevanja na primarno strjevanje / The Effect of Grain Refinement on Primary Solidification	180
R. Rudolf, T. Ravlan, G. Lojen, I. Anžel, A. Ivanič, J. Mele, E. Hudrap: Razvoj naprednega orodnega jekla za najzahtevnejše aplikacije v industriji / Development of an Advanced Steel Tool for the Most Demanding Applications in Industry	196
M. Aigner, M. Brandner, L. Elizondo, A. Paar, T. Trinkl, M. Krobath, P. Prevedel: Postavitev modela za toplotno obdelavo delovnih valjev za vroče valjana jekla / Set up a Model for Heat Treatment of Rolls For Hot Strip Mills	204

AKTUALNO / CURRENT

60. IFC Portorož 2020 s predstavitev vseh predavanj in galerijo slik vseh razstavljalcev na konferenci	216
Galerija slik vseh razstavljalcev na 60. IFC Portorož 2020	229
Pregled livarskih prireditev v letih 2021 in 2022	232
Portorož 2021	233

Izdajanje Livarskega vestnika sofinancira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije
Publishing supported by Slovenian Research Agency
Livarski vestnik je vpisan v razvid medijev Ministrstva za kulturo pod zaporedno številko 588

Učinek udrobnjevanja na primarno strjevanje

The Effect of Grain Refinement on Primary Solidification

Izvleček

V tej raziskavi smo izvedli termične analize različnih zlitin, ki se uporabljajo za izdelavo gravitacijsko litih glav cilindrov. Poskusi so bili izvedeni pod industrijskimi pogoji. Namen je bil proučiti učinek majhne količine dodatka predzlitine za udrobnjevanje na primarno kristalizacijo. Preizkusili in primerjali smo različne metode termične analize. Rezultati so pokazali, da je dodatek majhne količine zlitine za udrobnjevanje v livarski proizvodnji koristen.

Ključne besede: zlitina Al-Si, obdelava taline, udrobnjevanje, predzlitina

Abstract

In this research thermal analyses were carried out for different alloys, used for gravity die cast cylinder heads. The experiments were implemented in industrial conditions. The aim was to examine the effect of small amount of supplementary grain refining pre-alloy on primary crystallization. Different evaluating methods of thermal analysis were tested and compared. Results proved that dosing small amount of grain refining alloy is favourable in the foundry production practice.

Keywords: Al-Si alloy, Melt treatment, Grain Refinement, Master alloy

1 Uvod

V livarstvu je količina titana za udrobnjevanje predpisana, preverja pa se s spektrometrično analizo. Potrebno količino določi dobavitelj bloka zlitine in se naknadno ne povečuje. Cilj opravljenih poskusov je proučiti dosegljive spremembe z dodatkom majhne količine predzlitine za udrobnjevanje. Izvedena je bila termična analiza taline različnih livarskih zlitin za izdelavo ulitkov z gravitacijskim kokilnim litjem. Proučili smo vpliv dodane količine predzlitine za udrobnjevanje AlTi5B1 na primarno strjevanje. Nadalje smo uporabili in med seboj primerjali različne metode termične analize.

Sprememba vložnega materiala, visoko razmerje zlitine/recikliranih odpadkov ali

1 Introduction

In the foundry practice the amount of titanium grain refinement is prescribed, which is checked by spectrometric analysis. The necessary amount of titanium is set by the supplier of the alloy-block and there is no additional dosing. The aim of the performed tests is to investigate the achievable changes by adding a small amount of grain refining master alloy. The thermal analysis of the melt was examined from various foundry casting alloys by gravity mold casting. The effect of the auxiliary small amount of added AlTi5B1 grain refining master alloy on primary solidification was investigated. Moreover, various evaluating methods of thermal analysis were applied and compared.

nalaganje odpadnih ulitkov bodo privedli do spremembe v stanju zrn med primarnim strjevanjem taline zaradi rasti delcev, ki tvorijo zrna in vsebujejo titan. Te vplive na primarno kristalizacijo je mogoče zaznati samo s termično analizo. Ocena in primerjava lastnosti sta bili izvedeni na podlagi pregleda literature. Izvedeni preskusi potrjujejo, da je kvalifikacija udrobnjevanja na podlagi več parametrov zanesljiva.

2 Uporaba termične analize za kvalifikacijo udrobnjevanja

Pri termični analizi (TA) se meri in analizira temperatura zlitine, ki se ohlaja, v odvisnosti od časa. V praksi je najpreprostejša metoda, kjer se določi ohlajevalna krivulja taline med ohlajanjem v kokili ali preskusnem talilnem loncu. Postopek ocenjevanja temelji na dejstvu, da oblika krivulje hlajenja vpliva na vse procese, ki potekajo med kristalizacijo. Pri litih aluminijevih zlitinah je mogoče proučiti udrobnjevanje in evtektično modifikacijo. Obliko krivulje hlajenja določa količina latentne toplote med strjevanjem, kot tudi toplota, ki se odda okolju. Temperatura litja in količina lite taline sta odločilnega pomena [1, 2].

Termična analiza je edina zanesljiva metoda, s katero je mogoče učinkovito karakterizirati nukleacijski potencial za neko zlitino, tj. učinkovitost udrobnjevanja. Pomembno je poudariti, da parametri, določeni s termično analizo, veljajo izključno pri hitrosti ohlajanja v preizkusu. Pri danem ulitku se lahko okoliščine ohlajanja, po volumnu močno razlikujejo, zato se lahko velikost nastalih delcev/zrn močno lokalno razlikuje v nasprotju s pričakovanji na podlagi rezultatov termične analize. Vendar je mogoče trditi, da večji kot je nukleacijski potencial v termični analizi, bolj verjetno

The changing of the charge material, the high ratio alloy/recycled waste, or the charging of scrap castings will result a change in the state of the grain at the primary solidification of the melt on account of the coarsening of titanium containing grain-forming particles. These effects on primary crystallization can be only detected by thermal analysis. The evaluation and comparison of the characteristics were done, based on literature survey. The performed tests justify that the qualification of the grain refinement with several parameters together give a reliable result.

2 The application of thermal analysis to qualify grain refining

In thermal analysis (TA) the temperature of the cooling alloy is detected and analyzed vs. the time. In practice the simplest method is when we take the cooling curve of a melt which is cooling down in a mold or in a test cup. The evaluation process is based on the fact that all processes occurring during crystallization are influencing the shape of the cooling curve. In case of cast aluminium alloys the efficiency of grain refinement and the modification of the eutectic can be examined. The shape of the cooling curve is determined by the amount of the latent heat released during solidification and the heat which is given to the environment. Also, the pouring temperature and the amount of the cast melt are determinative [1, 2].

Thermal analysis is the only well known melt rating method that can effectively characterize the potential of the nucleation of a given alloy, thus the efficiency of grain refinement. It is important to emphasize that the parameters determined by thermal analysis are strictly valid only at the cooling rate characteristic of the test. For a given casting, the cooling conditions may differ

je, da bo udrobnjevanje v vseh delih ulitka uspešno [3].

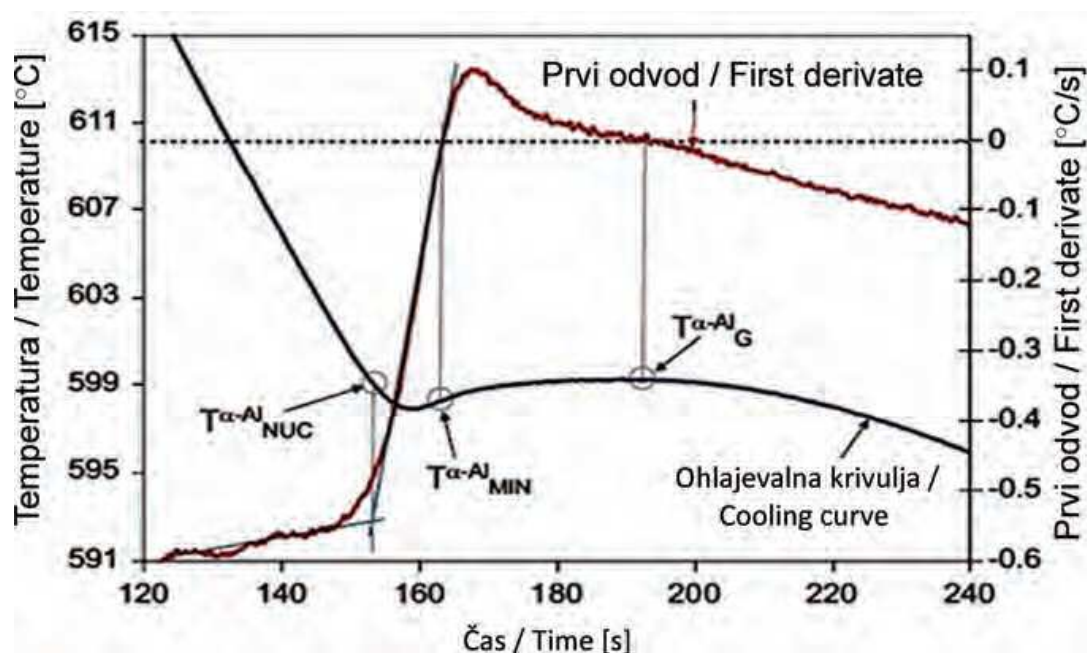
Učinkovitost kemijskega udrobnjevanja je mogoče ugotoviti v bližini temperature likvidusa na krivulji hlajenja. Na podlagi krivulje ohlajanja in njenega prvega odvoda po času je mogoče določiti karakteristično temperaturo in povezane časovne vrednosti primarne kristalizacije (Sl. 1). $T_{\frac{\alpha-Al}{NUC}}$ je temperatura nukleacije, pri kateri poteče nukleacija primarnih delcev α -Al. Pri temperaturi $T_{\frac{\alpha-Al}{MIN}}$ se izenači toplota, ki se sprosti med primarno kristalizacijo in toplota, ki jo sprejme kokila, zato je hitrosti ohlajanja v tej točki (torej prvi odvod) enaka $0\text{ }^{\circ}\text{C/s}$. $T_{\frac{\alpha-Al}{G}}$ je temperatura, povezana z maksimumom ponovnega segrevanja, ki ga povzroči sproščena latentna toplota med kristalizacijo (v literaturi je poimenovana temperatura rasti), za njo pa vrednost

significantly throughout the part, so the size of the particles/grains may be different locally than we would expected from the results of the thermal analysis. However, it can be said that the greater potential of the nucleation in thermal analysis results, the more likely it is that the grain refinement is successful in all parts of the casting [3].

The efficiency of chemical grain refinement can be investigated near the range of liquidus temperature on the cooling curve. Based on the cooling curve and it's first time derivative, the characteristic temperature and the connected time values of the primary α -Al crystallization can be determined (Fig. 1.). $T_{\frac{\alpha-Al}{NUC}}$ is

the nucleation temperature at which the nucleation of primary α -Al particles begin.

At temperature $T_{\frac{\alpha-Al}{MIN}}$, the latent heat released during primary crystallization and the heat which is received by the mold come to balance so the measured



Sl. 1. Določitev značilne temperature primarne kristalizacije α -Al

Fig. 1. Determining the characteristic temperature of the primary α -Al crystallization

prvega odvoda postane znova negativna [4].

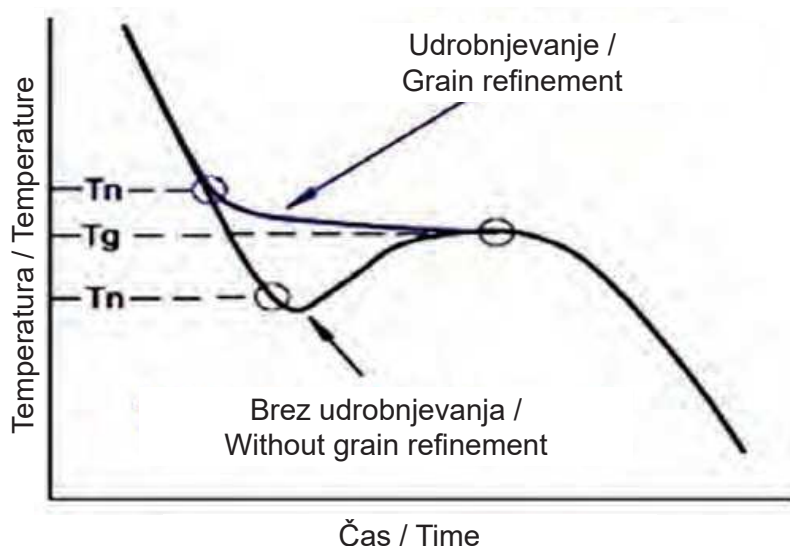
Vrednost $T \frac{\alpha - \text{Al}}{NUC}$ je močno odvisna od učinkovitosti udrobnjevanja. Več potencialno heterogenih nukleacijskih faz kot je dovedenih v talino, preprostejši je proces nukleacije. Učinkovito kemijsko udrobnjevanje se začne pri višji temperaturi, raste pa tudi temperatura nukleacije [5]. To je prikazano na Sl. 2., ki prikazuje krivulje ohlajanja udrobnjevanje zlitine kot tudi neobdelane zlitine.

V praksi se učinkovitost kemijskega udrobnjevanja pogosto razvrsti glede na razlike v vrednosti $T \frac{\alpha - \text{Al}}{MIN}$ in $T \frac{\alpha - \text{Al}}{G}$ temperatur, tj. glede na jasno podhladitev primarne kristalizacije. Načeloma je na popolnoma heterogenem mestu nukleacije energija za aktivacijo nukleacije enaka nič. To pomeni, da je podhlajenje povezano s kristalizacijo $\alpha\text{-Al}$ s posredno metodo, vendar je sorazmerno povezano tudi z učinkovitostjo udrobnjevanja, saj karakterizira aktivacijsko energijo heterogenega postopka nukleacije. Vendar je pomembno omeniti, da je majhna mera podhlajanja nujna, vendar ne predstavlja zadovoljivega merila za ustvarjanje

value of the cooling rate in this point (so the first derivative) is 0 °C/s. $T \frac{\alpha - \text{Al}}{G}$ is the temperature which, connected to the maximum of warming back, is caused by the released latent heat during crystallization (in literature it is named as growth temperature), after which the value of first derivative is going to be negative again [4].

The value of $T \frac{\alpha - \text{Al}}{NUC}$ nucleation temperature is significantly dependent from the efficiency of grain refinement. The more potential heterogeneous nucleating phases are introduced into the melt, the process of nucleation is easier. Thus, the reason of effective chemical grain refinement the nucleation begins on a higher temperature, so the temperature refinement on nucleation is also growing [5]. This is illustrated in Fig. 2., which shows the cooling curves of a grain refined and an unrefined alloy.

In foundry practice, the efficiency of chemical grain refinement is often classified by the difference of $T \frac{\alpha - \text{Al}}{MIN}$ and $T \frac{\alpha - \text{Al}}{G}$ temperatures, namely with the apparent overcooling of the primary crystallization. In principle, the nucleation activation energy is



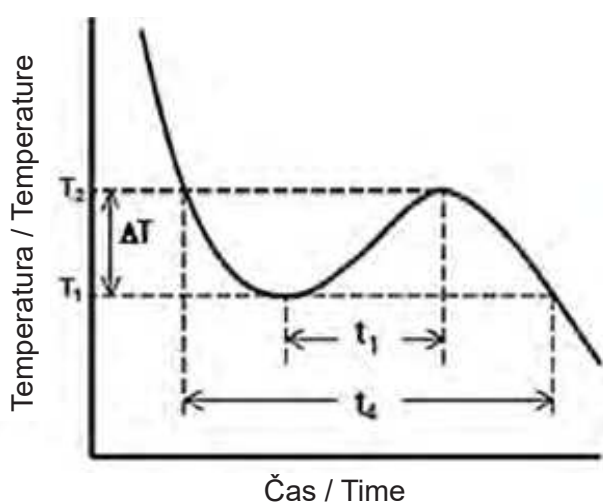
Sl. 2 Učinek udrobnjevanja na temperaturo nukleacije [5]; TN je (nukleacijska) temperatura med nastankom dendritske nukleacije; TG je začetna temperatura (povezava z maksimumom po podhlajanju) dendritske kristalizacije

Fig. 2. The effect of the grain refinement on nucleation temperature [5]; TN is the (nucleation) temperature of the creation of dendritic nucleation; TG is the beginner temperature (connecting to the maximum after overcooling) of dendritic crystallization

ustrezne strukture udrobnjevanja. Velikost zrn je namreč močno odvisna od procesa rasti delcev in od razpoložljivega časa, med katerim lahko poteče rast [6].

Trenutno ne obstaja splošno sprejeta metoda ocenjevanja kvalifikacije učinkovitosti udrobnjevanja s termično analizo. V literaturi obstajajo številna različna mnenja o tem, kateri parameter najbolje opisuje učinkovitost kemijskega udrobnjevanja. Charbonnier [7] navaja, da je treba za kvalifikacijo poznati dva pomembna parametra (Sl. 3). Prvi je očitno podhlajanje, tj. razlika med minimalno in maksimalno temperaturo (ΔT) primarne kristalizacije. Drugi parameter je pretečeni čas (t_1) med podhlajanjem in ponovnim segrevanjem, tj. čas med minimalno in maksimalno temperaturo. Bekaert in Wettinck [8] trdita, da je najpomembnejša kvalifikacijska lastnost vrednost t_4 , prikazana na Sl. 3, ki se povečuje z večanjem povprečne velikosti zrn. Pri zlitinah AlSi7Mg je mogoče učinkovitost udrobnjevanja kvalificirati, kot sledi:

- pričakovana drobna struktura zrn, če je $t_4 < 12,5$ s,



Sl. 3. Parametri, ki se uporabljajo za kvalifikacijo udrobnjevanja

Fig. 3. Parameters used for qualify the grain refinement

zero in a perfect heterogeneous nucleation place. Thus, overcooling connected to the α -Al crystallization with an indirect method, but proportional to the efficiency of grain refinement, because it characterizes the activation energy of the heterogeneous nucleation process. However, it is important to note that the small overcooling is a necessary, but not satisfactory criterion for the creation of the properly grain refined structure. Namely, the grain size is significantly depend on the particle growth process and on the available time during the growth can be happen [6].

Currently, there is no generally accepted evaluating method of the qualification of the grain refinement efficiency by thermal analysis. There are many different opinions in literature which parameter describes the efficiency of the chemical grain refinement as the best. According to Charbonnier [7], the knowledge of two important parameter is necessary for the qualification (Fig. 3.). One is the apparent overcooling which is the difference between the minimum and the maximum temperatures (ΔT) of primary crystallization. The other parameter is the passed time (t_1) between the overcooling and the warming back which is defined by the time between minimum and maximum temperatures. According to Bekaert and Wettinck [8] the most important qualifying characteristic is the value of t_4 shown in Fig. 3, which with increasing the average grain size is also increasing. At AlSi7Mg alloys the efficiency of grain refinement can be qualified as follows:

- expected fine grain structure, if $t_4 < 12,5$ s,
- expected medium-sized grains, if $12,5 < t_4 < 18,8$ s,
- expected rough grains, if $t_4 > 18,8$ s.

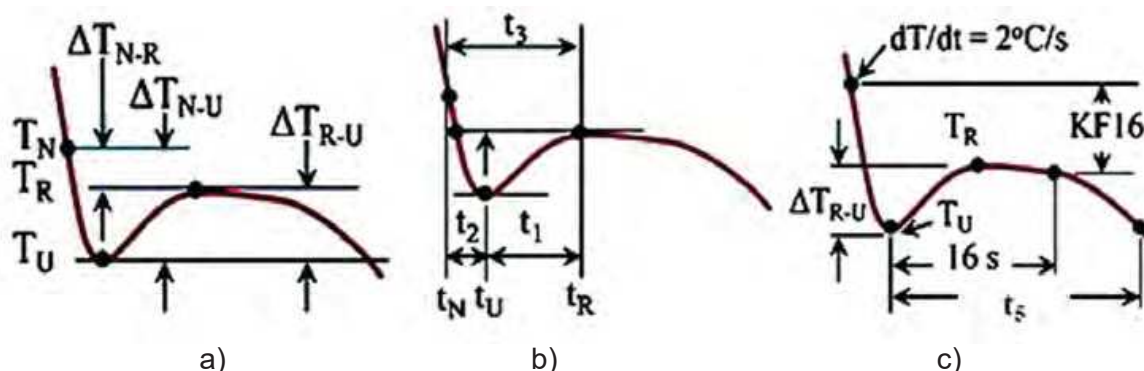
- pričakovana srednje velika struktura zrn, če je $12,5 \text{ s} < t_4 < 18,8 \text{ s}$,
- pričakovana velika zrna, če je $t_4 > 18,8 \text{ s}$.

Kvalitativni parametri udrobnjevanja, ki jih je mogoče določiti s termično analizo, so povzeti na Sl. 4. Na Sl. 4a je prikazan samo parameter temperatura in na Sl. 4b samo parameter čas. Na Sl. 4c so prikazane kvalifikacijske značilnosti, ki se obširno uporabljajo v industrijskem okolju v okviru avtomatiziranega postopka hitrega ocenjevanja. KF16 se izmeri pri hitrosti ohlajanja 2°C/s in je povezan s 16-sekundno temperaturno razliko, ki je izračunana glede na minimalno temperaturo podhlajanja. $t_{f, \text{Th-Al}}$ je čas od minimalne temperature podhlajanja do trenutka, ko temperatura znova doseže vrednost, povezano z minimalno točko podhlajanja po ponovnem segrevanju [9].

Z izboljšanjem učinkovitosti udrobnjevanja se povečata vrednosti $\Delta T_{\text{N-R}}$ in KF16, medtem ko se vrednosti $\Delta T_{\text{R-U}}$, t_1 , t_3 , $t_{f, \text{Th-Al}}$ zmanjšajo. Glede na najnovejše raziskave so časovni parametri in povezovalne vrednosti KF16 bolj značilni za učinkovitost udrobnjevanja kot s temperaturo povezane lastnosti, saj so bolj

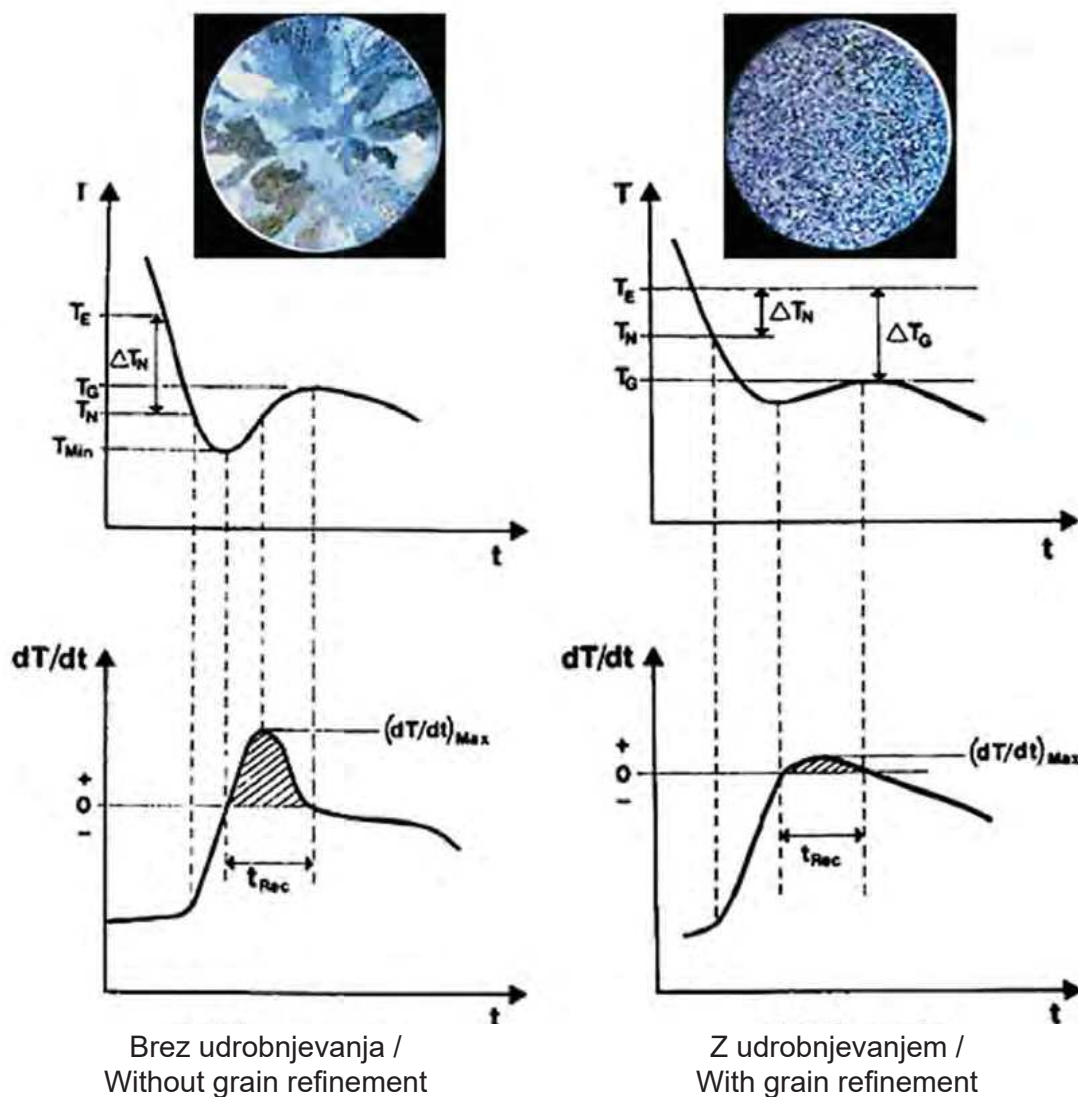
The qualitative parameters for grain refining, which can be determined by thermal analysis are summarized in Fig. 4. Fig. 4a shows only temperature and in Fig. 4b time parameters are displayed. Fig. 4c shows qualifying characteristics that are widely used in industrial scale as part of an automated quick-rating process. KF16 is measured at 2°C/s cooling rate and connecting to the 16 seconds temperature values difference which calculated from the minimum temperature of overcooling. $t_{f, \text{Th-Al}}$ is the time from the minimum overcooling temperature to the moment when the temperature reaches again the temperature value connecting to the overcooling minimum point after heating back [9].

With the improving of grain refinement efficiency $\Delta T_{\text{N-R}}$ and KF16 increase, while $\Delta T_{\text{R-U}}$, t_1 , t_3 , $t_{f, \text{Th-Al}}$ are reduced. According to recent researches, the time parameters and the connecting KF16 values characterize better the efficiency of grain refinement than the temperature-related characteristics, because their values dependent more from the energy of primary crystallization [9]. According to R. Döpp et al. [10] the value of KF16 is the temperature in the prevent cooling section of liquidus-transition at the point of 2°C/s cooling rate and this is



Sl. 4. a) Temperatura, b) čas, c) drugi parametri, ki jih je mogoče določiti s termično analizo udrobnjevanja [9]

Fig 4. a) Temperature, b) time, c) other parameters which can be determined by thermal analysis of grain refining [9]



Sl. 5. Kvalifikacija učinkovitosti udrobnjevanja s pomočjo prvega odvoda [11]

Fig. 5. Qualification of grain refinement efficiency with the help of first derivative [11]

odvisne od energije primarne kristalizacije [9].

Glede na R. Döpp in sod. [10] je vrednost KF16 enaka temperaturi pri preprečevanju ohlajajočega dela pri prehodu likvidusa pri hitrosti ohlajanja $2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ in to je podano s temperaturnimi razlikami, ki so povezane z naslednjimi 16 sekundami. Učinkovito kvalifikacijo je mogoče zagotoviti tudi z metodo, ki jo je predstavil Bäckerud [11] in je prikazana na Sl. 5.

given by the difference of the temperatures connecting to the followers 16 seconds. An effective qualification can also be provided by the method presented by Bäckerud [11] which is illustrated in Fig. 5.

For the qualification the first derivative of cooling curves are needed, which have a maximum value in the heating back phase after overcooling. The efficiency of grain refinement is given by the area under the heating back phase of the derivative curve. In principle, the grain refinement is more

Za kvalifikacijo so potrebni prvi odvodi ohlajevalnih krivulj, ki imajo maksimalno vrednost ponovnega segrevanja po podhladitvi. Učinkovitost udrobnjevanja je podana kot površina pod krivuljo derivata v fazi ponovnega segrevanja. Načeloma velja, da manjša kot je površina pod pozitivno fazo krivulje, bolj učinkovito je udrobnjevanje. Na Sl. 5 je prikazano, da se lahko velikost zrn močno razlikuje tudi pri skoraj enakem/enakovrednem času ponovnega segrevanja (t_{Rec}). Metoda torej zagotavlja natančnejše rezultate kot kvalifikacija časa ponovnega segrevanja. Pomembno je opomniti, da tudi ta metoda temelji na parametrih temperatura in čas, podobno kot zgoraj opisana metoda KF16. Učinkovitost udrobnjevanja torej temelji na več izvedenih meritvah. V primeru klasifikacije parametra čas je pomembno opredeliti težo preizkušenih vzorcev. Tako so metoda, ki jo je opisal Bäckerud, kot tudi rezultati, pridobljeni s pomočjo KF16, primernejši za ocenjevanje na podlagi samo parametra čas ali temperatura, kot je opisano zgoraj.

3 Razmerje med udrobnjevanjem in trdnostjo

Udrobnjevanje močno izboljša trdnost ulitkov; bolj drobna mikrostruktura namreč povzroči konstantno disperzijo sekundarnih faz (intermetalne spojine in poroznost) v strukturi materiala [5]. Po drugi strani pa se s povečanjem števila zrn poveča tudi specifična količina meja zrn v kovinski matrici, zaradi česar je oteženo gibanje dislokacij [12]. Ta drugi učinek je mogoče izraziti s Hall-Petchevo zvezo [13]. Med kristalizacijo in po njej se mehanske napetosti, ki nastajajo, porazdelijo po mejah zrn v ulitku. Manjša kot je povprečna velikost zrn, večja je površina meja zrn, na katerih

efficient, the smaller area under the positive phase of the curve. Fig. 5. shows that the grain size may be significantly different even with a relatively same/equal time of heating back (t_{Rec}). So the method gives a more accurate result than the qualification of the heating back time. It is important to note that similarly to the KF16 described above this method it is also based on temperature and time parameters. So it determines the efficiency of the grain refinement based on several measurement results. In the case of time parameters classification the identity of the tested samples' weight is important. Therefore, the method described by Bäckerud and the results obtained by KF16 can be considered more accurate than the rating methods based on only time or temperature parameters which are described above.

3 The relationship between grain refinement and strength properties

Grain refinement significantly improves the strength properties of castings based on that first, the finer microstructure cause a consistent dispersion of secondary phases (intermetallic compounds and porosity) in the material structure [5]. On the other hand, with the increasing grain number the specific quantity of grain boundaries is also increasing in the metallic matrix which makes the movement of dislocations more difficult [12]. The latter effect can be expressed by Hall-Petch correlation [13]. During and after crystallization the occurring mechanical strains are distributed on the grain boundaries in the castings. The smaller average grain size, specifically the greater surface area of the grain boundaries on which strains are dispersed. So grain refinement reduces the stress concentration values within the casting. As

je porazdeljena napetost. Udrobnevanje torej zmanjšuje koncentracijo obremenitev v ulitku. To pomeni, da so ulitki z manjšo velikostjo zrn bolj odporni na mehanske napetosti, zato je občutljivost na razpoke v vročem manjša in natezna trdnost večja [14].

Manjša zrna imajo ne samo večjo natezno trdnost, ampak privedejo tudi do večjega raztezka ob porušitvi.

S pomočjo vrednosti natezna trdnost in raztezek ob porušitvi je mogoče določiti t.i. indeks kakovosti, s katerim se kvantificira kakovost ulitkov in omogoča njihovo primerjavo na podlagi njihove trdnosti. Izračun indeksa kakovosti [15]:

$$Q = R_m + 150 \times \lg A_5 \text{ [MPa]} \quad (1)$$

kjer:

Q – indeks kakovosti [MPa],

R_m – natezna trdnost [MPa],

A₅ – raztezek ob razpadu [%].

Na Sl. 6. je primerjava vrednosti indeksa kakovosti dveh različnih zlitin (AlSi7Mg, AlSi7Mg0,6) pri različnih velikostih zrn in parametrih termične obdelave.

a result, with finer grain size the casting is more resistant to mechanical strains, so the hot crack sensitivity will be smaller and the tensile strength will be higher [14].

The finer grain particles do not only have a higher tensile strength, but result a higher elongation at rupture, too.

With the help of tensile strength and elongation at rupture values can be determined the so- called quality index which makes the quality of castings quantitative and comparable based on their strength properties. Calculation of quality index [15]:

$$Q = R_m + 150 \times \lg A_5 \text{ [MPa]} \quad (1)$$

where,

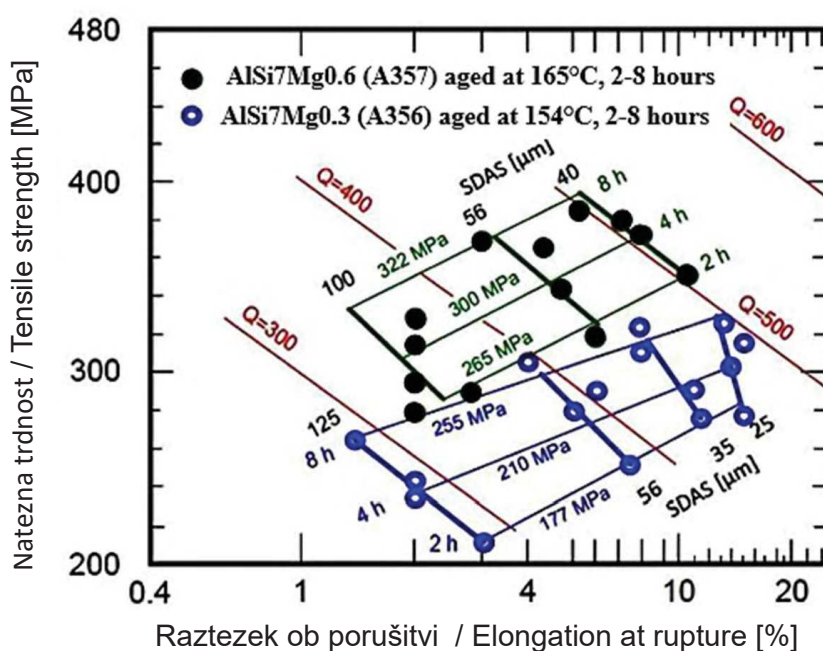
Q – quality index [MPa],

R_m – tensile strength [MPa],

A₅ – elongation at rupture [%].

Fig. 6. compares the quality index values of two different alloys (AlSi7Mg, AlSi7Mg0,6) at different grain size and heat treatment parameters.

In Fig. 6. the results connecting to the same quality index are changing along



Sl. 6. Primerjava natezne trdnosti in raztezka ob porušitvi zlitin A356-T6 in A357- T6 pri različnih velikostih zrn in parametrih termične obdelave [14]

Fig. 6. Comparison of the tensile strength and elongation at rupture of A356-T6 and A357- T6 alloys at different grain size and heat treatment parameters [14]

Na Sl. 6 se ob premici spreminjajo rezultati, povezani z enakim indeksom kakovosti. Razvidno je, da manjša kot je velikost zrn (sDAS), višji indeks kakovosti dajo izmerjeni rezultati, medtem ko se lahko zaradi spremembe termičnih parametrov spremenijo s trdnostjo povezane lastnosti znotraj iste premice indeksa kakovosti. Zato je razvidno, da sta nadzor nad velikostjo zrn ter učinkovita mikrostruktura udrobnjevanja ključnega pomena za proizvodnjo kakovostnih ulitkov.

4 Določitev učinka udrobnjevanja z uporabo ohlajevalnih krivulj

S termično analizo na podlagi ocene ohlajevalnih krivulj, določeno med strjevanjem taline, je mogoče določiti kakovost taline (stopnja udrobnjevanja, modifikacija). Termična analiza se izvaja s termočlenom, ki je povezan z napravo za obdelavo signalov in zbiranje podatkov proizvajalca National Instruments (Sl. 7). Naprava za zbiranje podatkov beleži ohlajevalne krivulje na podlagi matematičnih metod. S termično analizo na podlagi ocene ohlajevalnih krivulj, določenimi med strjevanjem taline, se določi kakovost taline.

a given line. It can be seen that with the decrease of grain size (sDAS) the measured results give a higher quality index, while changing the heat parameters the strength characteristics can change within the same quality index line. Thereby, it can be seen that the grain size control and the effective microstructure grain refinement are essential for the production of qualitative castings.

4 Determination of the effect of grain refinement using cooling curves

By thermal analysis, based on the evaluation of cooling curves taken during the melt solidification can concluded the quality of the melt (degree of grain refinement, modification). The thermal analysis consists of a thermocouple which is connected to a signal processing and data collecting device made by National Instruments (Fig. 7.). The data collector uses mathematics methods to record the cooling curves. By thermal analysis, based on the evaluation of cooling curves taken during the melt solidification, the quality of melt is concluded.



Sl. 7. Sistem za termično analizo in naprava za zbiranje podatkov NI

Fig. 7. The thermal analysis system and the NI data collector

5 Poskusni pogoji

Osnovna materiala, ki sta bila predmet raziskav, sta bili zlitini AlSi7MgCu0,5 (356Cu) in AlSi9Cu1 (226L), črka L pa pomeni nizko vsebnost železa. Kemijska sestava je podana v Preglednici 1. Po taljenju v plinski peči Striko med dodajanjem predpisane količine pomožne zlitine AlSr10 staljeni kovini v transportnem loncu se zagotovi koncentracija stroncija pribl. 200 ppm (zlitina 1 v Preglednici 1). V naslednjem koraku je bila talina prelita v talilno peč s kapaciteto 800 kg, talini pa je bilo dodanih 750 g/t predzlitine AlTi5B1.

Pred litjem je talina počivala 1 uro pri temperaturi 730 ± 5 °C. Vsebnost vodika je bila preverjena z metodo indeksa gostote, termična analiza pa je bila izvedena za talino pred dodatkom predzlitine kot tudi po njenem dodatku. Preiskave so bile izvedene na treh vzorcih na zlitino.

8 Rezultati poskusa

Sl. 8 prikazuje ohlajevalne krivulje preiskovanih livarskih zlitin.

Ohlajevalna krivulja preiskovanih zlitin prikazuje razlike v kemijski sestavi. V fazi primarne kristalizacije vseh treh zlitin poteče podhlajanje in ponovno segrevanje. Na Sl. 9 in 10 so prikazane krivulje hlajenja,

5 Experimental conditions

The basic material of the investigations were AlSi7MgCu0,5 (356Cu), AlSi9Cu1 (226L) alloys, where L letter means low iron content. The chemical composition is given in Table 1. After melting in the gas-fired Striko furnace during tapping the prescribed amount of AlSr10 auxiliary alloy added to metal bath in the forwarder ladle to provide the strontium concentration about 200 ppm (alloy 1. in Table 1.). In the next step, the melt was poured into a 800 kg capacity heat furnace where 750 g/t experimental amount of AlTi5B1 master alloy are added to liquid metal.

Before casting the melt was rested for 1 hour at 730 ± 5 °C. The hydrogen content of the alloy was checked by the density-index method and thermal analysis was used/done for the melt before and after adding the master alloy. The investigations were performed on three doses per alloy.

6 Experimental results

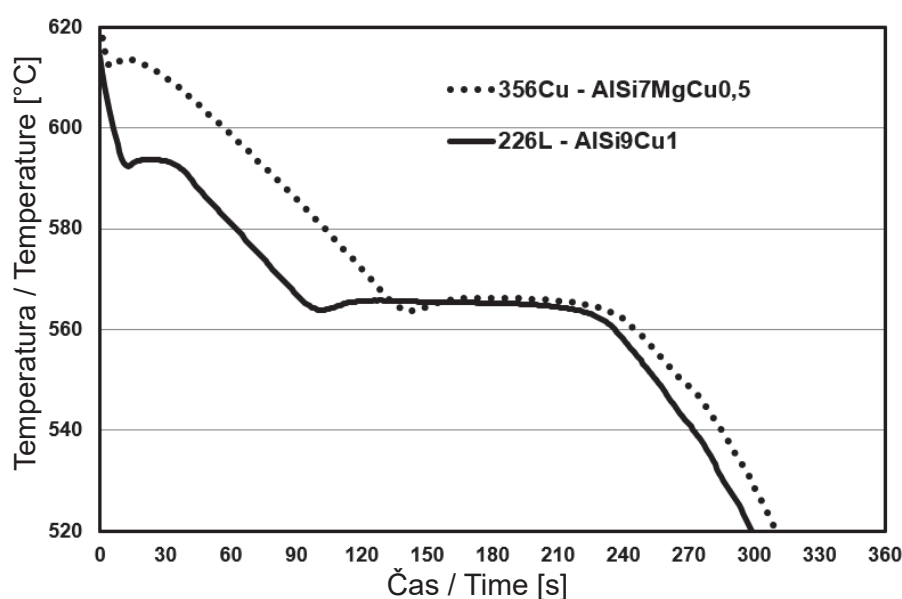
Fig. 8. shows the cooling curves of the investigated foundry alloys.

The cooling curves of investigated alloys shows differences in the chemical composition. In the primary crystallization phase of all three alloys overcooling and heat back are occurred. Fig. 9 - 10. show the

Preglednica 1. Kemijske sestave preiskovanih zlitin (masni odstotek)

Table 1. Chemical composition of the investigated alloys (weight%)

Element, %	356Cu	356Cu+Ti	226L	226L+Ti
Si	6,93	7,10	9,80	9,74
Fe	0,091	0,097	0,110	0,110
Cu	0,468	0,491	0,967	0,958
Mg	0,388	0,393	0,424	0,418
Ti	0,1194	0,1229	0,1109	0,1131
Sr	0,0235	0,0251	0,0239	0,0238



Sl. 8. Ohlajevalna krivulja preiskovanih livarskih zlitin

Fig. 8. Cooling curves of the investigated foundry alloys

ki so posledica učinkovanja majhne količine dodatka predzlitine za udrobnjevanje.

Proučili smo mikrostrukturo litih vzorcev z Barkerjevim jedkalom in prešteli število zrn. Vzorce smo nato pregledali z optičnim svetlobnim mikroskopom pri 25-kratni povečavi. Rezultati z dodatkom Ti in brez so bili povprečeni ter so prikazani na Sl. 11. Izbrali smo vzorce z najboljšo natezno trdnostjo. Pri vzorcih brez dodatka Ti je bila izmerjena vrednost 220,36 MPa, z dodatkom Ti pa 227,56 MPa. Rezultati na diagramu prikazujejo, da se je mikrostruktura po dodatku Ti izboljšala.

Obstajajo značilne razlike med ohlajevalnimi krivuljami in krivuljami njihovih prvih odvodov (hitrost hlajenja) za vse tri zlitine, in sicer zaradi učinka, ki je posledica dodatka majhne količine predzlitine za udrobnjevanje AlTi5B1. Tipične razlike pri dodatku Ti:

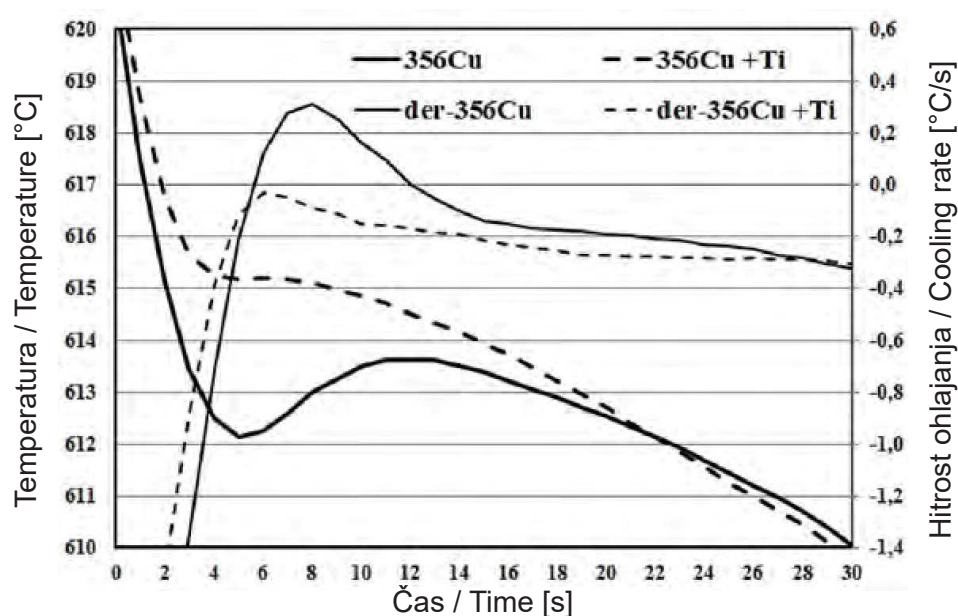
- višje so vrednosti začetne temperature primarne kristalizacije, maksimuma (T_{LR}) in minimuma likvidusa (T_{LU}),
- temperaturna razlika je nižja ($\Delta T = T_{LR} - T_{LU}$) pri ponovnem segrevanju v fazi primarne kristalizacije,
- ocena udrobnjevanja (KF16) je višja,

cooling curves of the effect of small amount of grain refining master alloy addition.

We examined the microstructure of the casting samples after Barker etching to count the grain numbers. The specimens were examined by optical light microscopy at 25X amplification. The results of before and after Ti addition were averaged and shown at Fig. 11. We have selected those samples which tensile strength were the best. Samples without Ti addition was 220,36 MPa, with Ti addition was 227,56 MPa. The results of the diagram show that the microstructure was refined after Ti addition.

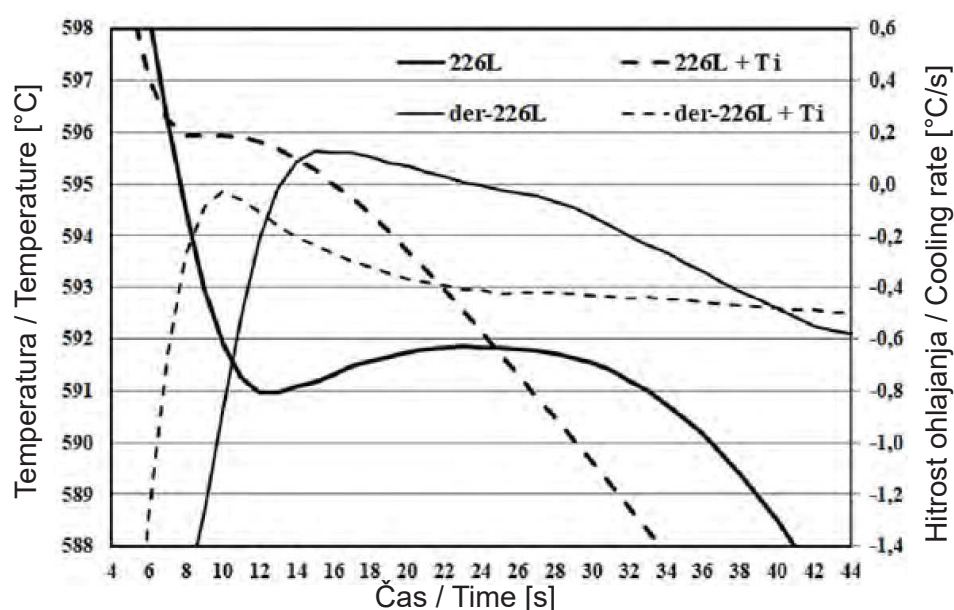
Significant differences are shown between the cooling curves and their first derivative curves (cooling rate) at all three alloys by the effect of small amount AlTi5B1 grain refinement master alloy are added. Typical differences at the auxiliary Ti-addition:

- primary crystallization initial temperatures, the liquidus maximum (T_{LR}) and liquidus minimum (T_{LU}) temperature values are higher,
- the temperature difference is lower ($\Delta T = T_{LR} - T_{LU}$) at heat back in the phase of



Sl. 9. Učinek predzlitine za udrobnjevanje, dodane talini zlitine AlSi7MgCu (356Cu), na primarno kristalizacijo ohlajevalne krivulje

Fig. 9. Effect of the grain refining master alloy added to melt of AlSi7MgCu (356Cu) the primary crystallization of the cooling curve



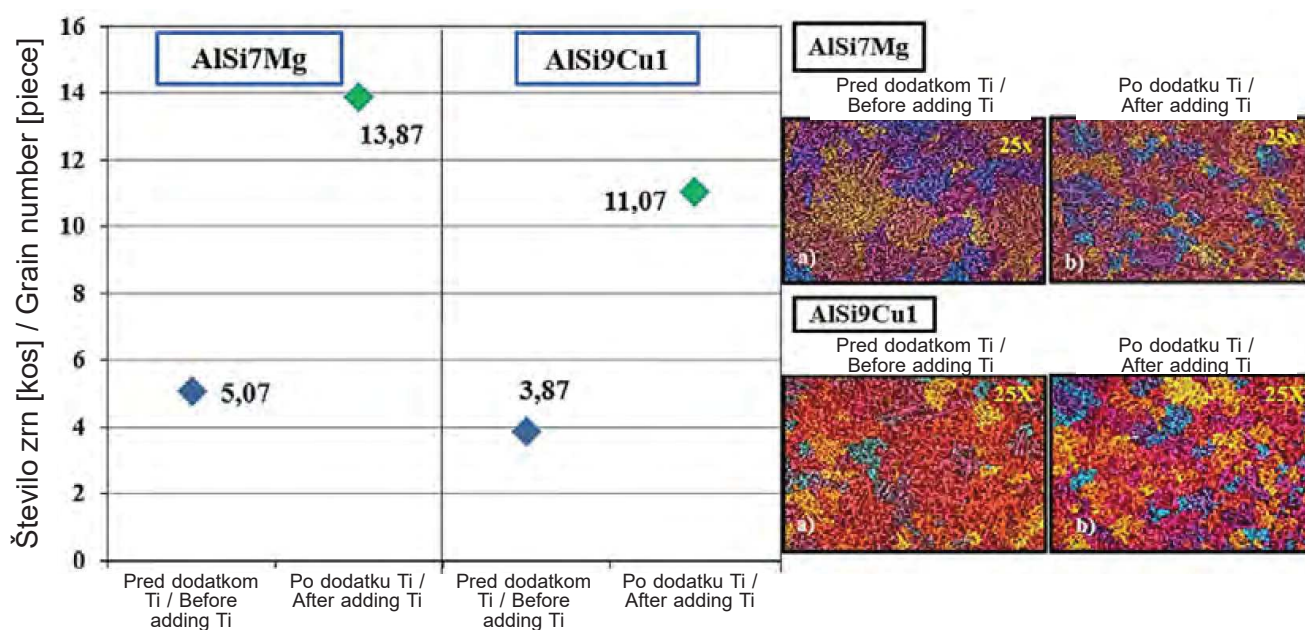
Sl. 10. Učinek predzlitine za udrobnjevanje, dodane talini zlitine AlSi9Cu1 (226L), na primarno kristalizacijo ohlajevalne krivulje

Fig. 10. Effect of the grain refining master alloy added to melt of AlSi9Cu1 (226L) alloy on the primary crystallization of the cooling curve

Preglednica 2. Izmerjeni in izračunani podatki termične analize preiskovanih zlitin

Table 2. Measured and calculated data for the thermal analysis of investigated alloys

Ocena / Rating	AlSi7Mg	AlSi7Mg+Ti	AlSi9Cu1	AlSi9Cu1+Ti
T_{LU} °C	612,3	615,6	590,1	595,9
$\Delta T_{LR}-T_{LU}$ °C	1,31	0,00	0,88	0,00
KF16 [9] °C	3,50	9,47	4,06	6,87
KF16 [10] °C	2,74	7,58	3,94	5,23
t_1 [3] s	7,0	0,0	12,0	0,0
t_4 [9] s	18,5	0,0	24,0	0,0
t_5 [9] s	16,0	0,0	21,5	0,0



SI 11. Učinek 750 g/t predzlitine za udrobnjevanje na primarno stopnjo kristalizacije na ohlajevalno krivuljo (zlitina je bila dodana staljeni zlitini), a) pred dodatkom predzlitine, b) po dodatku predzlitine

Fig. 11. The effect of the 750 g/t grain refining master alloy on the primary crystallization stage of the cooling curve which was added to the alloy melt, a) before master alloy addition, b) after master alloy addition

- trajanje kristalizacije v začetni fazi (t_4 in t_5) je krajše,
- začetna faza primarne kristalizacije, površina pozitivnih (nad 0) vrednosti krivulje prvega derivata je manjša.

Kazalniki ocene primarne kristalizacije preizkušenih zlitin se določijo na podlagi ocene ohlajevalne krivulje (Sl. 4, [9]). Podatki ocen pripravljenih eksperimentalnih odmerkov so povzeti v Preglednici 2 z dodatkom majhne količine predzlitine za udrobnjevanje AlTi5B1 v livarni in med obdelavo z razplinjanjem.

Določitev karakteristične temperature in časa z udrobnjevanjem livarskih aluminijevih zlitin omogoča osnove metode za ocenjevanje na podlagi več parametrov, ki pomaga zanesljivo oceniti modifikacijo in postopek primarne kristalizacije.

- primary crystallization, the grain refining rating number (KF16) is higher,
- the duration of the primary crystallization stay in the initial phase (t_4 and t_5) is shorter,
- in the initial phase of primary crystallization, the area of positive (above 0) values of the first derivative curve is smaller.

The rating indicators of primary crystallization at the tested alloys are determined based on the evaluation of cooling curves (Fig. 4., [9]). The rating data of prepared experimental doses are summarized in Table 2. with the addition of small amount of AlTi5B1 grain refinement master alloy at the foundry and degassing treatment.

7 Sklepi

Izvedena je bila termična analiza različnih livarskih zlitin in preiskani učinki dodatka predzlitine za udrobnjevanje AlTi5B1.

V praksi smo izvedli termično analizo z napravo, ki smo jo posebej razvili za ta namen. Ocena primarne kristalizacije taline temelji na opredeljenih parametrih s pomočjo programske opreme, povezane z napravo.

Ocena in primerjava lastnosti v literaturi sta bili izvedeni s povezavo s termično analizo primarne kristalizacije. Preiskave dokazujejo, da ocena udrobnjevanja zagotavlja zanesljive rezultate, ki temeljijo na več parametrih.

V livarski praksi uporaba krožne litine, visok delež recikliranih odpadkov ali staljenih odpadkov, dolgoročno ohranjanje toplote taline v primarni kristalizaciji sprožijo spremembe nukleacijske faze zaradi grobe površine delcev spojine, ki vsebuje Ti in sproža nukleacijo. Njihov učinek na primarno kristalizacijo je mogoče zaznati samo s termično analizo.

Rezultati preizkusov potrjujejo ugoden učinek uporabe 0,75 kg/t predzlitine za udrobnjevanje AlTi5B1 v talini, ki izpolnjuje livarske zahteve glede vsebnosti titana v skladu s predpisi.

The determination of characteristic temperature and time data with the grain refining of the foundry aluminium alloys allows the formation of multi-parameters rating methods which help reliably estimate the modification and the primary crystallization processing.

7 Conclusion

Thermal analysis of various foundry alloys is performed and the effect of the AlTi5B1 grain refining master alloy auxiliary addition is investigated.

In the foundry practice, thermal analysis is performed with a target device developed for this purpose. The rating of primary crystallization of the melt based on the defined parameters by the associated program connecting to the device.

The evaluation and comparison of characteristics in literature have done connecting to the thermal analysis of primary crystallization. The examinations prove that the rating of grain refinement gives a reliable result with the consideration of several parameters.

In the foundry practice, the change in secondary material addition, the high recyclable waste ratio, or the melting of scrap, the long term heat keeping of melting at primary crystallization induce the change of nucleation phase because of the roughness of Ti-containing nucleation forming compound particles. Their effect on primary crystallization can only be detected by thermal analysis.

The test results confirm the beneficial effect of using 0,75 kg/t AlTi5B1 grain refining master alloy for melt which meets the foundry requirements for titanium-content according to the regulations.

Viri / References

- [1] D. M. Stefanescu: Thermal Analysis-Theory and Applications in Metalcasting. In: International Journal of Metalcasting, Vol. 9. No. 1., 2015. pp. 7–22.
- [2] M. Djurdjevic, I. Vicario, G. Huber: Review of Thermal Analysis Applications in Aluminium Casting Plants. In: Revista de Metalurgia, Vol. 50. No. 1., 2014. pp. 1–12.
- [3] J. A. Spittle: Grain refinement in shape casting of aluminium alloys. International Journal of Cast Metals Research, Vol. 19., No. 4., 2006. pp. 210-222.
- [4] F. C. Robles-Hernandez, J. M. H. Ramírez, R. Mackay: Al-Si Alloys - Automotive, Aeronautical, and Aerospace Applications. Springer International Publishing AG, 2017. pp. 17-33, 209-213. ISBN 978-3-319-58380-8
- [5] G. K. Sigworth, T. A. Kuhn: Grain refinement of aluminum casting alloys. International Journal of Metalcasting, Vol. 1. Issue 1, 2007. pp. 31–40. doi: 10.1007/BF03355416
- [6] B. S. Murty, S. A. Kori, M. Chakraborty: Grain refinement of aluminium and its alloys by heterogeneous nucleation and alloying. International Materials Reviews, Vol. 47(1), 2002. pp. 3–29, DOI:10.1179/095066001225001049
- [7] J. Charbonnier: Microprocessor assisted thermal analysis testing of aluminum alloy structures. AFS Transactions, Vol. 92., 1984. p. 907
- [8] F. Bekaert, E. Wettinck: Study of the grain refinement of A 356 and its control by thermal analysis. Aluminium, Vol. 72., No. 6., 1996. pp. 442-447.
- [9] W. Khalifa: Thermal Analysis of Grain Refining in A319 Alloys. In: Light Metals 2017, Edited by A. P. Ratvik, TMS, 2017. pp. 1027-1034.
- [10] MENK, W.–SPEIDEL, M. O.–DÖPP, R.: Die thermische Analyse in der Praxis der Aluminiumgießerei. Giesserei, Bd. 79, Heft 4 (1992), 125–134.
- [11] L. Bäckerud, G.C. Chai, J. Tamminen: Solidification Characteristics of Aluminum Alloys. AFS/Skanaluminium, Stockholm, 1990. p. 256.
- [12] R. Guan, D. Tie: A Review on Grain Refinement of Aluminum Alloys: Progresses, Challenges and Prospects. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), Online First Article, 2017. doi:10.1007/s40195- 017-0565-8
- [13] E. Ghassemali, M. Riestra, T. Bogdanoff, B. S. Kumar, S. Seifeddine: Hall-Petch equation in a hypoeutectic Al-Si cast alloy: Grain size vs. secondary dendrite arm spacing. Procedia Engineering, Vol. 207, 2017. pp. 19–24. doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.731
- [14] J. Fred Major: Aluminum and Aluminum Alloy Castings. In: ASM Handbook, Volume 15: Casting, ASM International, 2008. pp. 1059-1084.
- [15] G. K. Sigworth: Understanding Quality in Aluminum Castings. AFS Transactions, Vol. 119. 2011. pp. 211-227.

Razvoj naprednega orodnega jekla za najzahtevnejše aplikacije v industriji

Development of an Advanced Steel Tool for the Most Demanding Applications in Industry

Povzetek

V članku je predstavljen potek razvoja naprednega orodnega jekla za najzahtevnejše aplikacije v industriji, ki se izvaja v podjetju SIJ Ravne Systems v povezavi z Univerzo v Mariboru in partnerji Bosio d.o.o. ter CPPE d.o.o. Razvoj je na eni strani povezan z identifikacijo ključnih lastnosti orodnega jekla, ki predstavljajo konkurenčno prednost v primerjavi z ostalimi konvencionalnimi jekli. To so: žilavost, trdota, trdnost in rezilna sposobnost. Po drugi strani pa razvoj predstavlja vpeljavo ustrezne tehnologije izdelave in naknadne toplotne oziroma mehanske obdelave, kar omogoča doseganje ključnih lastnosti naprednega orodnega jekla.

Ključne besede: razvoj, orodno jeklo za delo v hladnem, lastnosti, toplotna in mehanska obdelava, karakterizacija

Abstract

In the lecture, we will present the development of an advanced steel tool for the most demanding applications in industry, implemented by SIJ Ravne Systems in conjunction with the University of Maribor, and partners Bosio d.o.o. and CPPE d.o.o. Development is, on the one hand, related to the identification of key properties of the steel tool which represent a competitive advantage compared to other conventional steel tools, which are: impact strength, hardness, tensile strength and cutting ability. On the other hand, the development represents the introduction of an appropriate production technology and subsequent heat or mechanical treatment, which enables the achievement of key properties of advanced steel.

Key words: cold-work tool steel, properties, heat and mechanical treatment

1 Uvod

Osrednji cilj razvoja naprednega orodnega jekla je okrepiti položaj in vlogo podjetja SIJ Ravne Systems (SRS) oziroma slovenske jeklarske industrije na področju posebnih orodnih jekel. Na ta način želimo vzpostaviti pogoje, da bo lahko podjetje SRS prešlo iz standardnega v razvojnega dobavitelja teh jekel, in to ne samo v mednarodnih verigah,

1 Introduction

The main goal of the development is to strengthen the position and role of the company SIJ Ravne Systems (SRS) and the Slovenian steel industry in the field of special tool steels. In this way, we want to establish conditions so that the company SRS will be able to transit from a standard to a development supplier of these steels, not

ampak tudi v drugih mrežah vrednosti, kar bo omogočilo dvig konkurenčnosti SRS na globalnem trgu. Razvojne aktivnosti so povezane z operativnim programom za izvajanje Evropske kohezijske politike v obdobju 2014-2020 in predvidevajo večjo osredotočenost na ciljne trge ter manjšo razdrobljenost znanstvenega in tehnološkega razvoja v Sloveniji. Slovenska industrija jekla je ključna za mnoga izvozno usmerjena podjetja, ki so poddobavitelji vodilnih evropskih in svetovnih proizvajalcev avtomobilov, strojev, itn.

Podjetje SRS je eno izmed vodilnih svetovnih podjetij na področju proizvodnje industrijskih nožev, kjer se odvija velika tekma za prevlado na trgu orodnih jekel. Ena izmed pomembnih tržnih niš je industrija furnirja. Podjetje SRS že danes izdeluje nože za rezanje za furnirsko industrijo - luščenje ter obrezovanje furnirja. S poznavanjem kakovosti obstoječih orodnih jekel ter na osnovi obvladovanja tehnologije izdelave obvladuje praktično vse branže v furnirski industriji, razen področja rezanja mehkega lesa. Za to področje tudi svetovna konkurenca nima tehnoloških rešitev oziroma znanj za takšno orodno hitrorezo jeklo, ki bi imelo kombinacijo lastnosti, kot sta visoka trdota in hkrati udarna žilavost. Zato je opisan razvoj zahteven projekt, ki poteka na več ravneh, in sicer od določitve nove kemijske sestave, tehnologije izdelave jekla (z inovativnimi in naprednimi pristopi), karakterizacije mikrostrukture in identifikacije lastnosti, do razvoja tehnoloških postopkov obdelave, ki bodo omogočali izdelovanje nožev iz novega orodnega jekla. Daljša življenjska doba nožev pri visokih hitrostih rezanja je povezana z ustrezno mikrostrukuro materiala rezila. Prav tako morajo imeti ti noži visoko in konstantno trdoto, trdnost, žilavost ter visoko obrabno obstojnost in rezilnost. Pri tem je potrebno upoštevati tudi

only in international chains, but also in other value-added networks, which will enable SRS to become more competitive on the global market. Development activities are linked to the operational program for the implementation of the European Cohesion Policy for the period 2014-2020, and they foresee a greater focus on target markets and less fragmentation of scientific and technological development in Slovenia. The Slovenian steel industry is crucial for many export-oriented companies, which are sub-suppliers of the leading European and global manufacturers of cars, machinery, etc.

The SRS company is among the global leaders in the manufacture of industrial knives, involved in a big race to dominate the market of tool steels. The veneer industry is an important market niche. The SRS is already manufacturing industrial knives for slicing, peeling and trimming veneer. Thanks to the quality of existent tool steels and technology developed by our own staff and based on our own knowledge, we substantially control all branches of the veneer industry, with the exception of softwood cutting. This sector is plagued by a lack of technological solutions or skills, which not even the rest of our global competitors, are able to provide, for producing high-speed steel with a combination of properties offering high hardness and impact resistance at the same time. As a result, this is a developmentally challenging area, which requires a multi-layer approach consisting of determining a new chemical composition, steelmaking technologies (using advanced and innovative methods), microstructure characterization and identification of properties, as well as developing technologies for machining processes that will allow the manufacture of knives from the new type of tool steel. The requirements imposing a longer service

geometrijske zahteve, med katere spada zagotavljanje skoraj ničelne ukrivljenosti rezalne površine ($\pm 0,01\%$ na 1 m).

Na podlagi preliminarne izdelanih vzorcev nožev iz obstoječega orodnega jekla in na osnovi izbranega referenčnega noža (stanje konkurence), predstavljamo smernice za izpeljavo postopkov razvoja novega noža, ki imajo temelj v karakterizaciji mikrostrukture in identifikaciji ključnih lastnosti.

2 Eksperimentalno delo

V eksperimentalnem testiranju smo za izdelavo vzorcev nožev uporabili obstoječe orodno jeklo z okvirno kemijsko sestavo: C 0,45-0,55 mas. % C; Si 0,9-1,2 mas. % C; Mn 0,3-0,6 mas. % C; Fmax 0,03 mas. % C; Smax 0,03 mas. % C; Cr 7,5-8,5 mas. % C; Mo 1,4-1,6 mas. % C; V 0,47-0,5 mas. % C; ostalo Fe (srednje ogljično malo legirano orodno jeklo s Cr, Mo in V). Za izvedbo raziskav in testiranj smo pripravili preliminarne izdelane vzorce nožev: (1) surovec, (2) toplotno obdelan in (3) referenčen nož. V tabeli 1 so predstavljene dimenzije vzorcev nožev. Toplotna obdelava vzorca noža (2) je vključevala postopek

life and the use of such knives in high-speed cutting applications are linked to a suitable microstructure, which is required for the functional contact surface (or cutting edge) of knives. Such knives must also possess a high and constant hardness, adequate level of mechanical properties (strength, resistance), high fatigue strength and cutting. In addition, blade geometry requirements for knives must also be taken into account, including providing the zero curvature of the cutting surface ($\pm 0.01\%$ per 1 m).

On the basis of pre-fabricated knife samples from existing tool steel and on the basis of the selected reference knife (state of competition), we will present guidelines for the development of new knife development procedures, which have the basis in the characterization of the microstructure and in the identification of key characteristics.

2 Experimental work

In experimental testing, an existing tool steel with an indicative chemical composition was used to make knife samples: C 0.45-0.55 wt. % C; Si 0.9-1.2 wt. % C; Mn 0.3-0.6 wt. % C; Fmax 0.03 wt. % C; Smax 0.03 wt. % C; Cr 7.5-8.5 wt. % C; Mo 1.4-1.6 wt. % C; V 0.47-0.5 wt. % C; other Fe (medium carbon slightly alloyed tool steel with Cr, Mo and V). To carry out research and testing, we prepared prefabricated knife samples: (1) a blank, (2) a heat treated, and (3) a reference. Table 1 shows the dimensions of the knife samples. Heat treatment of the knife sample (2) involved the austenitization process at $T_{\text{aust}} = 1010^\circ \text{C}$, quenching and two-step tempering at $T_{1.\text{temp}} = 520^\circ \text{C}$ and $T_{2.\text{temp}} = 515^\circ \text{C}$.

ASTM A370 - 17a [1] and literature references [2-4] were used to carry out the mechanical properties of knife

Tabela 1. Dimenzije vzorcev nožev

Table 1. Dimensions of knife samples

Vzorci nožev / Knife samples		Mere [mm] / Dimensions [mm]		
		Debelina / Thickness	Širina / Width	Višina / Height
1. nož / knife	surovec / blank	645	155	23
2. nož / knife	toplotno obdelan / heat treated	653	183	18
3. nož / knife	referenca / refrence	688	200	16

avstenitizacije pri $T_{avst} = 1010\text{ }^{\circ}\text{C}$, kaljenje ter popuščanje v dveh korakih pri $T_{1, pop} = 520\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $T_{2, pop} = 515\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Za izvedbo testov mehanskih lastnosti vzorcev nožev smo uporabili standard ASTM A370 – 17a [1] in napotke iz literature [2-4]. Na osnovi zahtev smo pripravili navodila za ustrezno odkrivanje mikrostruktur ter pregled primernih jedkal za vzorce.

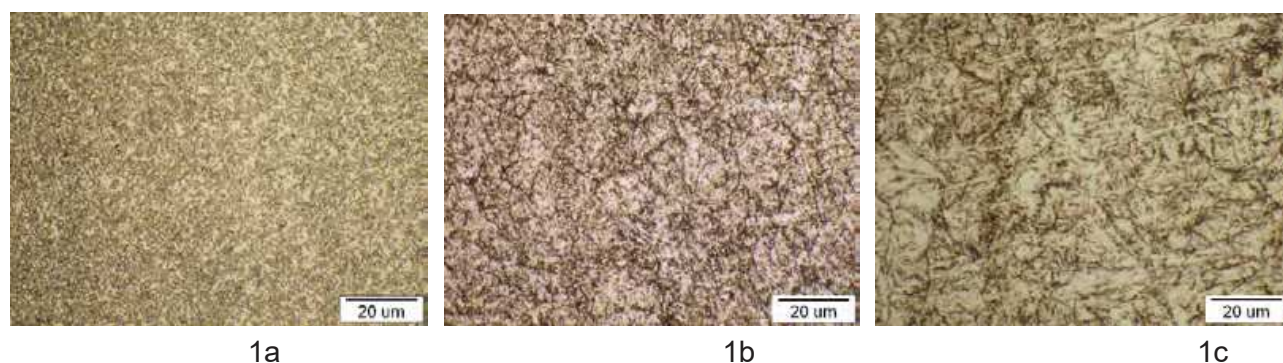
Sledila je izvedba preiskav in določitev ključnih lastnosti vzorcev nožev iz tabele 1: meritve trdote po standardu ISO-6507-1 [5], določitev natezne trdnosti po SIST EN ISO 6892-1 [6] ter udarne žilavosti po EN ISO 148-1 [7]. Za ta namen smo analizirali primernost različnih postopkov izdelave preizkušancev glede na trdoto materialov in ocenili, da je najprimernejši postopek za izdelavo preizkušancev iz kaljenih orodnih jekel za rezilna orodja žična erozija. Določili smo dimenzije preizkušancev in minimalno potrebno število posameznih tipov preizkušancev za zgoraj naštete preizkuse.

Analiza smiselnosti posameznih statičnih in dinamičnih mehanskih preizkusov, iz katerih je izdelan referenčni nož, je pomembna za razvoj novega orodnega jekla. Trdota je neposredno povezana z odpornostjo proti abrazivni obrabi, zato je ena od najpomembnejših karakteristik vsakega rezilnega orodja. Natezni preizkus je imel namen v pridobitvi podatkov o napetosti tečenja, natezni trdnosti in modulu elastičnosti obstoječega in referenčnega vzorca nožev. Ker so rezilna orodja obremenjena dinamično, udarne obremenitve niso izključene. V skrajnem primeru udarne obremenitve lahko pripeljejo do zloma orodja, preden je potrebna zamenjava zaradi obrabljenosti. Za preprečevanje predčasnega izpada orodja zaradi zloma, ki ga povzroči udarna obremenitev, je nujna zadostna udarna žilavost materiala. Zato so bili v raziskave vključeni tudi preizkusi udarne žilavosti.

samples. On the basis of requirements, we prepared instructions for proper detection of microstructures and a review of suitable etching agents.

It followed the implementation of the research and the determination of the key properties of the knife samples from Table 1: the measurement of hardness according to the ISO-6507-1 standard [5], the determination of the tensile strength according to SIST EN ISO 6892-1 [6] and impact toughness according to EN ISO 148-1 [7]. For this purpose, we analyzed the suitability of the different manufacturing processes of the test pieces in terms of the hardness of the materials and estimated that the most appropriate procedure for the preparation of test pieces from hardened tool steels for cutting tools by wire erosion. We determined the dimensions of the specimens and the minimum required number of individual types of test subjects for the above tests.

An analysis of the sensitivity of individual static and dynamic mechanical tests from which a reference knife is made is important for the development of a new tool steel. The hardness is directly related to the abrasion resistance, therefore it is one of the most important characteristics of each cutting tool. The tensile test had the purpose of obtaining data on the tension, tensile strength and elastic modulus of the existing and reference knife pattern. As the cutting tools are loaded dynamically, the impact loads are not excluded. In extreme cases, impact loads can lead to fracture of the tool before wear replacement is needed. To prevent early tool failure due to a fracture caused by a shock load, sufficient impact strength of the material is necessary. Therefore, tests of impact toughness were included in the research.



Slika 1. Mikrostrukture treh vzorcev nožev

Figure 1. Microstructure of the three knife samples

3 Rezultati in diskusija

Na slikah 1a - 1c so prikazane karakteristične mikrostrukture vzorcev nožev od 1-3.

Na sliki 1a je prikazana mikrostruktura surovca pred toplotno obdelavo, ki kaže fino zrnatost, zahtevano pred postopkom toplotne obdelave. Na slikah 1b in 1c pa je razvidna tipična mikrostruktura popuščnega martenzita, ki zahtevana za rezilna orodja.

Razvoj naprednega orodnega jekla je ciljno fokusiran na korekcijo kemijske sestave obstoječega orodnega jekla in toplotne obdelave, ki bo rezultirala v izboljšanih lastnosti orodnega jekla. Iz tega razloga je za primerjavo bil izbran referenčen nož, ki dosega najboljše rezultate.

Za doseganje zahtevanih lastnosti orodnih jekel se proizvajalci poslužujejo različnih tehnologij njihove izdelave in toplotne ter mehanske obdelave. Naš cilj je modifikacija kemijske sestave tako, da bodo izbrani mikrolegirni elementi stabilizirali popuščni martenzit, predvidena pa je tudi uvedba novih sistemov v finalizaciji izdelave s ciljem doseganja zelene mikrostrukture. Tako bomo lahko zagotovili zahtevane končne lastnosti orodnega jekla in s tem nožev. Načrtovana je optimizacija avstenitizacije ter razvoj popolnoma novega kalilnega sistema. Predvidevamo, da bomo tako pri novem orodnem jeklu dosegli tako

3 Results and discussion

Figures 1a - 1c show the characteristic microstructure of the knife samples from 1-3.

Figure 1a shows the microstructure of the blank before the heat treatment, which has the fine-grained structure, which is required before the heat treatment process. In Figs. 1b and 1c, a typical microstructure of the tempering martensite, which is required for cutting tools. The development of advanced tool steel is targeted at the correction of the chemical composition of existing tool steel and heat treatment, which will result in improved properties of tool steel. For this reason, the reference knife was selected for comparison, which achieved the best results.

In order to achieve the required properties of tool steels, manufacturers use various technologies for their production and thermal and mechanical treatment. Our goal is to modify the chemical composition so that the selected micro-alloy elements stabilize the tempering martensite, and the introduction of new systems in the finalization of production with the aim of achieving the desired microstructure. This way, we will be able to provide the required final properties of the tool steel and thus the knives. The optimization of austenitization

dobre lastnosti, da bodo delovali zahtevano število ur (vsaj 10 h) v ekstremnih rezalnih pogojih. V članku so predstavljeni: študija kemijske sestave in nastanek mikrostrukture ter rezultati meritev trdot in trdnostnih lastnosti, kar bo osnova za doseganje konkurenčnih lastnosti referenčnega vzorca in ostalih proizvajalcev.

V članku smo obstoječe lastnosti orodnega jekla povezali s problematiko rezanja, kjer je potrebno izpostaviti dejstvo, da v primeru rezanja mehkih materialov (mehekles) delujeta dva načina odrezovanja, t.j. princip klina in princip ploščatega sekača. Za tak primer mora imeti material noža ustrezno trdoto in trdnostne lastnosti, da lahko nastanejo odrezki. Nož deluje na izbrani globini rezanja, kjer mora v strižni coni z dovolj veliko silo povzročiti striženje in cepljenje lesa, ki se spremeni v odrezek. Na stični površini imamo opravka z zelo visokimi pritiski in temperaturami (prevlada Coulombovega zakona trenja, koeficienti trenja nad 0,5). Mazanje in hlajenje lahko v tem primeru zanemarimo, medtem ko kemičen vpliv v strokovni literaturi še ni pojasnjen. Vsled mehanskih in toplotne obremenitve prihaja med rezanjem na dotikalni liniji nožev lokalno do nadaljnjega popuščanja, kar lahko povzroči nezaželeno fazno transformacijo popuščenega martenzita v mehkejšo fazo. V splošnem je za martenzit značilna velika trdota, ki jo v največji meri povzroča deformacija železove kristalne mreže zaradi prisotnosti prisilno raztopljenega ogljika, pomembni pa so tudi prispevki gostote dislokacij (deformacijsko utrjanje) oziroma dvojčičnih mej v posameznih ploščicah martenzita oziroma visoka gostota martenzitnih ploščic (utrjanje s kristalnimi mejami). Ob upoštevanju, da martenzitne ploščice nastanejo na dislokacijah v kristalnih zrnih in da se pri njihovem nastanku močno povečajo notranje napetosti, predstavlja

is planned and the development of a brand-new quenching system. It is assumed, that with this new tool steel, we will achieve such good properties that the required number of hours (at least 10 hours) will work in extreme cutting conditions. In the lecture, we will present a study of the chemical composition and the formation of a microstructure and the results of hardness and strength measurements, which will be the basis for achieving the competitive properties of the reference sample and other manufacturers.

In the lecture we will connect the existing properties of the tool steel with the problem of cutting, where it is necessary to emphasize the fact that in the case of cutting soft materials (soft wood), two methods of cutting are working, i.e. the principle of the wedge and the principle of a flat cutter. For this purpose, the material of the knife must have the appropriate hardness and strength properties so that clippings can be formed. The knife works at the selected cut depth, where it is necessary to cause shearing and splitting of the wood, which turns into a snippet, in the shearing zone with sufficient force. On the contact surface, very high pressures and temperatures are presented (the dominance of Coulomb's law of friction, coefficients of friction above 0.5). Lubrication and cooling can be neglected in this case, while the chemical influence in the professional literature has not yet been clarified. Due to the mechanical forces and heat of the load, during cutting at the touch line of the knives, it is local to further degradation, which can cause undesired phase transformation of the tempering martensite into the softer phase. In general, martensite is characterized by a high hardness, which is mostly caused by the deformation of the iron crystal net due to the presence of forced dissolved carbon, and the contributions of the density of the dislocations (deformation hardening) or

martenzit metastabilno fazo. To pomeni, da je po naravi težnja martenzita njegova fazna transformacija oziroma prehod v stabilno stanje (ferit in karbide). Če je ob tem prisotna zadostna gonilna sila, kot so v primeru rezanja mehanske sile in nastala toplota, se ta transformacija prej ali slej tudi zgodi. Posledica je poslabšanje mehanskih lastnosti rezila in hitrejša obraba. Zato bo potrebno razviti takšno mikrostrukturo martenzitnega orodnega jekla, ki bo dalj časa odporna - stabilna na mehanski in toplotni vpliv iz procesa rezanja, s čimer bo transformacija martenzita prestavljena na kasnejši čas.

4 Zaključki

V članku smo predstavili prve rezultate raziskav obstoječega in referenčnega orodnega jekla, ki bodo smernica za nadaljevanje razvojnega dela na področju nožev za najzahtevnejše aplikacije v hladnem. Raziskave so bile izvedene v okviru projekta Rano@steel (OP20.03523), kjer je koordinator podjetje Ravne Systems in ga financira Evropski sklad za regionalni razvoj in Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport Slovenija.

the twinning boundaries in the individual martensitic plates, or the high density of martensitic plates (hardening with crystalline boundaries). Taking into account that martensitic plates are formed on dislocations in crystalline grains and that their intrinsic tension increases greatly, martensite is a metastable phase. This means that, by nature, the martensitic tendency is its phase transformation or transition to a stable state (ferrite and carbide). If sufficient propulsion force is present, as in the case of cutting heat generated, this transformation sooner or later also occurs. The result is the deterioration of the mechanical properties of the blade and faster wear. Therefore, it will be necessary to develop such a microstructure of martensitic steel, which will be resistant for a long time - stable on the mechanical forces and heat effect from the cutting process, with which the martensite transformation will be postponed to a later time.

4 Conclusions

In the lecture we presented the first results of the research of the existing and reference tool steel, which will be a guide for the continuation of the development work in the field of knives for the most demanding applications in cold work. Research was carried out as part of the Rano@Steel project (OP20.03523), where the coordinator is Ravne Systems and is funded by the European Regional Development Fund and the Ministry of Education, Science and Sport Slovenia.

5 Reference / References

- [1] ASTM A370 – 17a (Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products).
- [2] Wang, J., Shimada, K., Mizutani, M., Kuriyagawa T.; Tool wear mechanism and its relation to material removal in ultrasonic machining, *Wear*, 15 January 2018, 394-395:96-108.
- [3] Xu, Q., Zhao, J., Ai, X.; Cutting performance of tools made of different materials in the machining of 42CrMo4 high-strength steel *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Nov 2017, Vol. 93 Issue 5-8, p2061-2069.
- [4] Roberts, G. A., Kennedy, R., Krauss, G.; *Tool Steels* (5th ed. Materials Park, 1998, OH: ASM International).
- [5] ISO 6507-1:2018 Metallic materials -- Vickers hardness test -- Part 1: Test method.
- [6] ISO 6892-1:2009, Metallic materials -- Tensile testing -- Part 1: Test method.
- [7] ISO 148-1:2016, Metallic materials -- Charpy pendulum impact test -- Part 1: Test method.

Postavitev modela za toplotno obdelavo delovnih valjev za vroče valjanje

Set up of a Model for Heat Treatment of Rolls For Hot Strip Mills

Izvleček

Toplotna obdelava kompozitnih delovnih valjev je ključni korak v postopku, v katerem lahko nastanejo velike notranje napetosti, ki so posledica različnih termofizikalnih lastnosti uporabljenih materialov. Namen tega prispevka je bil ustvariti parametriziran model FE, ki omogoča varno preizkušanje novih materialov in načinov obdelave. V tem prispevku so predstavljeni uvodni eksperimentalni koraki, postavitev ter validacija simulacijskega modela v povezavi s simulacijo prevajanja toplote, kot tudi ocena nastajanja napetosti skozi mehansko simulacijo.

Ključne besede: valjanje, toplotna obdelava, simulacija, Abaqus, zaostala napetost

Abstract

The heat treatment of composite work rolls is a critical process step in which large internal stresses can occur due to the different thermophysical properties of the used materials. The aim of this work was to create a parameterized FE model to test new materials and heat treatment routes safely. This work presents the experimental preliminary work, the setup and the validation of the simulation model with regard to the heat conduction simulation, as well as the estimation of the stress development by the mechanical simulation.

Keywords: Rolls, heat treatment, simulation, Abaqus, residual stresses

1 Uvod

Delovni valji za obrate za toplo valjanje se proizvajajo skozi postopke centrifugalnega litja. Talina delovne plasti se vlije v vrtečo se formo, centrifugalne sile pa talino porazdelijo po cevi oblike valja. Po strjevanju delovne plasti se t.i. jedro vlije v formo valja, material delovne plasti in jedra pa se med seboj permanentno spojita.

1 Introduction

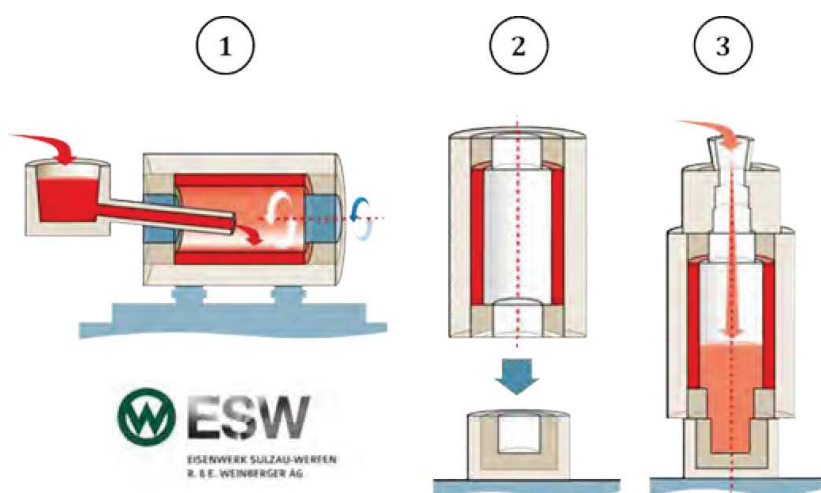
Work rolls for hot rolling mills are mostly produced using the centrifugal casting process. The shell-melt is poured into a rotating mould, the centrifugal forces distribute the melt into a cylindrical sleeve. After solidification of the shell, the so-called core iron is poured into the overall form of the roll and creates a permanent bonding between the shell and the core material.

¹ ESW Eisenwerk Sulzau-Werfen, R.&E. Weinberger AG, Bundesstrasse 4, 5451 Tenneck, Avstrija

² Materials Center Leoben Forschung GmbH, Roseggerstraße 12, 8700 Leoben, Avstrija

¹ ESW Eisenwerk Sulzau-Werfen, R.&E. Weinberger AG, Bundesstrasse 4, 5451 Tenneck, Österreich

² Materials Center Leoben Forschung GmbH, Roseggerstraße 12, 8700 Leoben, Österreich



Sl. 1. Shematski prikaz proizvodnje valjev v EWS; 1: horizontalno centrifugalno litje, 2: sestavljanje kalupov, 3: litje materiala jedra.

Fig. 1. Schematic drawings of the roll manufacturing process at ESW; 1: horizontal centrifugal casting, 2: assembly of the moulds, 3: pouring of the core material

Toplotna obdelava valjev v litem stanju se izvede v električni peči s pomičnim dnom. Specifikacija krivulje temperatura-čas je ključnega pomena. Prevelika hitrost segrevanja in/ali ohlajanja vodi v velike toplotne gradiente v valju, zaradi česar nastajajo velike notranje napetosti. Te napetosti še dodatno poveča fazno preoblikovanje materiala delovne plasti in jedra.

Napetosti, ki so večje od trdnosti materiala delovne plasti ali jedra, lahko privedejo do zloma valja. Po drugi strani pa je prenizka hitrost ohlajanja po avstenizaciji povezana s tveganjem neželenih feritno-perlitnih faz v materialu delovne plasti, saj bi negativno vplivale na odpornost na obrabo.

Raberger [1] je izvedel simulacije toplotnih in mehanskih končnih elementov (FE) postopka toplotne obdelave z uporabo različnih materialov delovne plasti in jedra ter martenzitnim preoblikovanjem modela za material delovne plasti. Plastičnost, ki jo povzročijo veliki toplotni gradienti, je bila karakterizirana kot odsekovno linearno izotropno strjevanje, upoštevan pa je bil tudi pojav plastičnosti zaradi preoblikovanja.

Večfazni model transformacij v tem delu je povzet po Brunbauerju [2] in Schemmelu [3] ter upošteva perlitno, bainitno in martenzitno fazo. Simulacija prevajanja

The thermal treatment of the as cast rolls is carried out in electrically heated bogie car furnaces. The specification of the temperature-time curve is of central importance. Too high heating and/or cooling rates produce large thermal gradients in the roll resulting in high internal stresses. These stresses are further increased by phase transformation of the shell and core material.

Stresses exceeding the strength of the shell or core material may result in breakage of the roll. On the other hand, too low cooling rates after austenitization bear the risk of undesirable ferritic-pearlitic phases in the shell material, which would negatively affect the wear resistance accordingly.

Raberger [1] carried out thermal and mechanical finite elements (FE) simulations of the heat treatment process using different core and shell materials and a martensitic transformation model for the shell material. Plasticity induced by high thermal gradients was considered as piecewise linear isotropic hardening, the occurrence of transformation induced plasticity was taken into account.

The multi-phase transformation model used in this work is based on the work of Brunbauer [2] and Schemmel [3], and takes the phases pearlite, bainite and martensite into account. The heat conduction simulation

toplote je inverzno prilagojena meritvi temperature delovnega valja, mehanski izračun pa je bil razširjen na način, da obsega tudi učinek lezenja.

2 Metodologija

2.1 Eksperimentalni postopek

Namen tega projekta je bil izdelati parametriziran, aksialno simetričen 2D-FE-model za enostavno preizkušanje različnih postopkov toplotne obdelave. Določeni so bili termofizikalni podatki (specifična toplotna kapaciteta c_p , temperaturna prevodnost DI/I , koeficient linearnega toplotnega raztezanja α , gostota ρ , dinamični E-modul E) v temperaturnem razponu od RT do 1000 °C za hitrorezo jeklo (HSS – material delovne plasti). Diagrami TTT so bili izdelani na podlagi preizkusov z dilatometrom in metalografsko karakterizacijo. Značilnosti materiala, povezane z materialom jedra (lito železo s sferoidnim grafitom), so bile povzete po Rabergerju [1].

2.1.1 Temperaturni profil med standardnim postopkom toplotne obdelave

Za potrditev izračuna temperatura-polje je bila izmerjena temperatura valja med standardnim postopkom toplotne obdelave. V ta namen je bil izdelan poskusni vaj ($\varnothing_{\text{valj}} = 750$ mm, $L_{\text{valj}} = 2400$ mm, skupna dolžina = 5500 mm) z 12 termočleni. Spreminjanje temperature v valju je bilo beleženo med celotnim dvotedenskim postopkom toplotne obdelave (Sl. 2 in Sl. 3).

Profil temperature toplotne obdelave je shematsko prikazan na Sl. 4. Po avstenizaciji pri temperaturi 1100 °C je bil valj sekvenčno ohlajen do sobne

was inversely adapted to a temperature measurement of an instrumented roll and the mechanical calculation was extended by considering creep effects .

2 Methodology

2.1 Experimental procedure

The aim of this project was to build up a parameterized, axially symmetric 2D-FE-Model for the simple testing of different heat treatment processes. The thermophysical data (specific heat capacity c_p , temperature conductivity DI/I , linear thermal expansion coefficient α , density ρ , dynamic E-module E) in the temperature range from RT to 1000 °C were determined for a high-speed steel (HSS - shell material). TTT diagrams were built up on the basis of dilatometer tests and metallographic characterization. Material characteristics relating to the core material (cast iron with spheroidal graphite) were taken from Raberger [1].

2.1.1 Temperature profile during a standard heat treatment process

To validate the temperature-field calculation, the temperature of a roll during a standard heat treatment process was measured. For this, an experimental roll ($\varnothing_{\text{barrel}} = 750$ mm, $L_{\text{barrel}} = 2400$ mm, total length = 5500 mm) was instrumented with 12 thermocouples. The temperature evolution in the roll was recorded during the whole two-weeks heat treatment process (Fig. 2 & Fig. 3).

The temperature profile of the heat treatment is shown schematically in Fig. 4. After the austenitization in the range of 1100°C, the roll was cooled discontinuously



Sl. 2. Shematski prikaz delovnega valja, krogi: položaj termočlenov v valju, kvadrat: termočlen na površini

Fig. 2. Schematic drawings of the instrumented roll, circles: position of the thermocouples in the roll, square: thermocouples on the surface



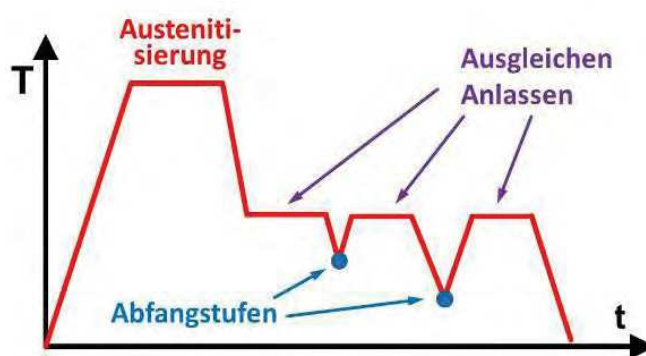
Sl. 3. Delovni valj v peči s pomičnim dnom

Fig. 3. Instrumented roll on the boogie furnace

temperature. Hlajenje je bilo prekinjeno zaradi več t.i. faz temperiranja z namenom zmanjšanja napetosti v valju.

2.1.2 Merjenje zaostalih napetosti

Zaostale napetosti v delovnem valju smo določili na površini valja v različnih stanjih toplotne obdelave, in sicer s postopkom »ring-core«. Napetosti v okolici rozete DMS $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ se sprostijo skozi elektrolitsko erozijo utora obroča, globina utora pa je malo manjša od 5 mm. Izračun napetosti se izvede z uporabo izmerjenih napetosti ter s funkcijo razkroja.



Sl. 4. Shematski prikaz postopka toplotne obdelave

Fig. 4. Schematic heat treatment process

to room temperature. The cooling is interrupted by several so-called temper stages for the purpose of stress reduction in the roll.

2.1.2 Measurement of the residual stresses

The residual stresses of the instrumented roll were determined at the barrel surface at different heat treatment states by means of the ring-core process. The stresses around a $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ -DMS-rosette are released by electrolytic erosion of a ring groove, the depth of the groove is just under 5 mm. The stress calculation is carried out using the measured strains and using a decay function [4].

2.2 Simulacijski modeli

Vse simulacije končnih elementov (FE) so bile izdelane in izračunane s programsko opremo za FE Abaqus2018 [5].

2.2.1 Potek transformacije materiala

Za opis difuzno nadzorovane fazne transformacije (v tem primeru perlita in bainita) je bil parametriziran termokinetični model materiala na podlagi nukleacijske teorije, povzete po Garret in sod. [6].

Martenzitna transformacija, osnovana na enačbi Koistinen-Marburger [7] in prilagojena po Wolff in sod. [8], je izračunana pod s poskusom določeno martenzito začetno temperaturo.

Modeli so parametrizirani na podlagi dejanskih valjev z uporabo v poskusu določenih diagramov TTT in meritev trdnosti, namenjeni pa so opisu vedenja pri transformaciji dejanskega material jedra in delovne plasti v simulacijah FE.

2.2.2 Simulacija prenosa toplote

Rotacijsko simetrični modeli prevajanja toplote FE temeljijo na dejanskih geometrijah s pravokotnimi elementi (funkcije linearnega navezovanja DCAX4). Običajno število elementov v proučenih geometrijah je okoli 20.000, porazdelitev velikosti elementov pa meri od 0,7 do 20 mm (Sl. 5).

Obremenijo se proste površine valja z inverzno določenimi in od časa ter temperature odvisnimi koeficienti prenosa toplote pri opredeljenih temperaturah. Časovno odvisna toplotna distribucija se oceni na podlagi opredeljenih izmerjenih točk in se primerja z vrednostmi, določenimi v preizkusu. Vhodni termofizikalni podatki gostota, toplotna prevodnost in latentna

2.2 Simulation models

All finite elements (FE) simulations were built up and calculated using the commercial FE program Abaqus2018 [5].

2.2.1 Transformation behaviour of the material

For description of the diffusively controlled phase transformations (here pearlite and bainite), a thermo-kinetic material model was parameterized based on the theory of nucleation according to Garrett et.al. [6].

The martensitic transformation, based on the equation of Koistinen-Marburger [7] and as adapted by Wolff et. al. [8], is calculated below the experimentally determined Martensite start temperature.

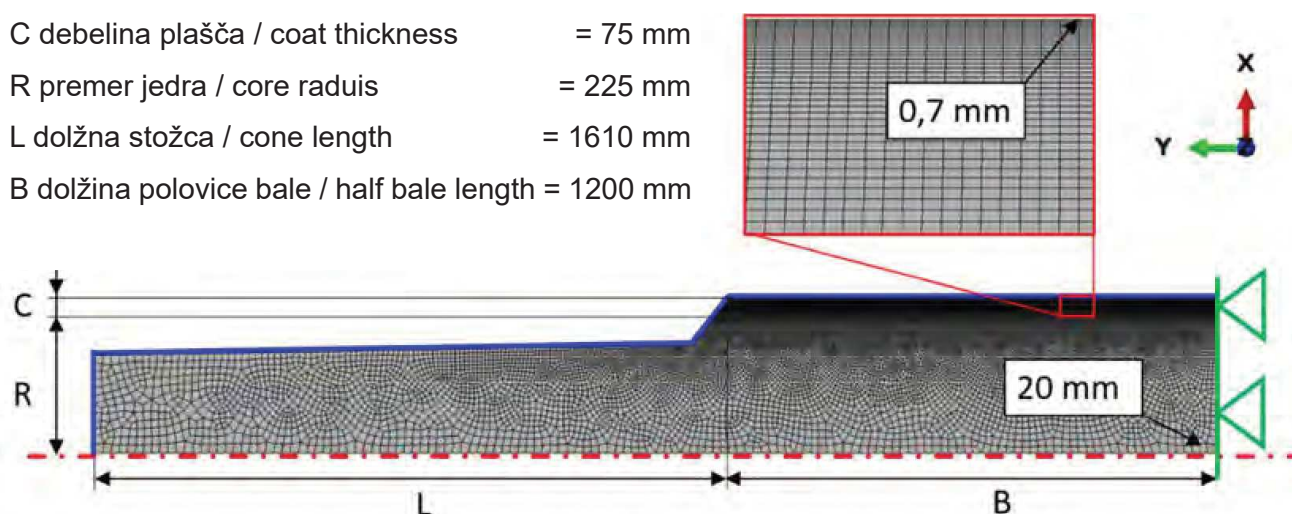
The models are parameterized on real rolls using the experimentally determined TTT diagrams and hardness measurements and are intended to reflect the transformation behaviour of the real core and shell material in the FE simulations.

2.2.2. Simulation of the heat transfer

Rotationally symmetric FE heat conduction models are based on real geometries with square elements. (linear attachment functions DCAX4). Typical element counts for the examined geometries are around 20,000 elements, with a size distribution of the element from 0.7 to 20 mm (Fig. 5).

The roll is loaded on the free surfaces with inversely determined, time- and temperature- dependent heat transfer coefficients at defined temperatures. The time dependent temperature distribution is evaluated at the defined measuring points and compared with the experimentally determined values. The thermophysical

C debelina plašča / coat thickness = 75 mm
 R premer jedra / core radius = 225 mm
 L dolžna stožca / cone length = 1610 mm
 B dolžina polovice bale / half bale length = 1200 mm



Sl. 5. Opredelitev geometrije valja, mreže in obremenitve: os vrtenja je prikazana z rdečo prekinjeno črto. Zelena črta predstavlja ravnino simetrije v smeri Y. Modri obris predstavlja prosto površino, ki se skupaj s toploto uporabi v simulaciji prevajanja toplote. Največja in najdaljša dolžina roba mreže 20 mm in 0,7 mm se narišeta shematsko

Fig. 5. Roll geometry, mesh and load definitions: The rotation axis is shown as a red stroke-dotted line. The green line represents the symmetry plane in the Y direction. The blue contour represents the free surface, which is applied with heat in the heat conduction simulation. The maximum and minimum mesh edge lengths of 20 and 0.7 mm are drawn schematically

toplota so povzeti na podlagi poskusnih meritev.

input data density, thermal conductivity and latent heat were taken from experimental measurements.

2.2.3 Mehanska simulacija

Geometrija, uporabljena v simulaciji prevajanja toplote (Sl. 5), je bila spremenjena za mehanske izračune (CAX4). Valj je simetrično fiksiran v prostoru in obremenjen z izračunanimi ter od časa odvisnimi temperaturnimi distribucijami iz simulacije prevajanja toplote. Podatki o plastičnosti materiala jedra so povzeti po Rabergerju [1], potek transformacije materiala delovne plasti je določeno s poskusi v avstenitnem stanju in je vključeno v simulacijo kot linearni, izotropni zakon o strjevanju. Faze nizke temperature materiala delovne plasti (martenzit in

2.2.3 Mechanical Simulation

The geometry used in the heat conduction simulation (Fig. 5) was modified for mechanical calculations (CAX4). The roll is fixed by the symmetry conditions in the room and is loaded with the calculated, time-dependent temperature distributions from the heat conduction simulation. Data for plasticity of the core material was taken from Raberger [1], the flow behaviour of the shell material was determined experimentally in the austenitic state and incorporated into the simulation as a linear, isotropic hardening law. The low-temperature phases of the shell material (martensite and bainite)

bainit) so opredeljene elastično. Koeficienti toplotnega raztezanja so določeni na podlagi preizkusa z dilatometrom, nastanek preoblikovalne plastičnosti pa smo pri martenzitni transformaciji upoštevali na enak način kot Raberger [1]. Zaradi dolgih obdobij toplotne obremenitve pri konstantno visokih napetostih je bil parametriziran in inverzno izveden od temperature odvisen model lezenja.

V ta namen je bil v programski opremi Abaqus privzet model lezenja »Power Law – Strain Hardening« (Terminologija – Abaqus [3]).

3 Rezultati

3.1 Potek transformacije materiala

V poskusu določen potek kot tudi ustreznik v simulaciji preiskovanega materiala HSS je prikazan na Sl. 6.

3.2 Toplotne meritve

Na Sl. 7 so prikazane toplotne meritve in temperaturni gradient valja tekom celotnega

were defined elastically. The thermal expansion coefficients were determined from dilatometer tests and the occurrence of transformation plasticity was taken into account as by Raberger [1], for the martensitic transformation. Due to the long thermal load periods at consistently high stresses, a temperature-dependent creep model was parameterized and inversely implemented.

For this purpose, the creep model "Power Law – Strain Hardening" (Terminology - Abaqus [3]) was adapted in Abaqus.

3 Results

3.1 Transformation behaviour

The experimentally determined behaviour as well as the match with the simulation for the investigated HSS material is shown in Fig. 6.

3.2 Thermal measurements

Fig. 7 shows the temperature measurement and the temperature gradients of the roll

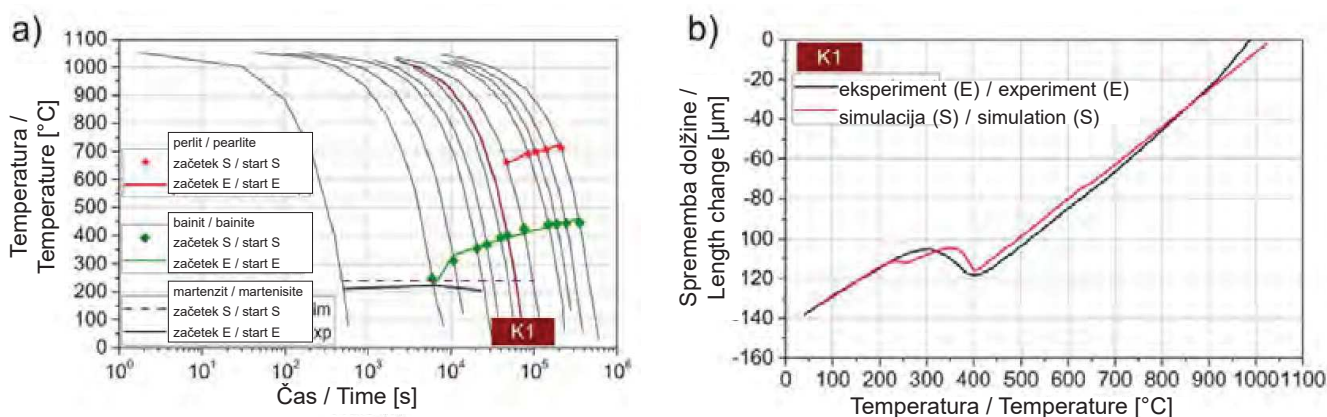


Fig. 6. Dilatometrija in simulacija vedenja pri transformaciji materiala delovne plasti HSS: (a) Ustrezniki izhodiščnih točk faznih transformacij v poskusu in v simulaciji. (b) Primer kinetike pri transformaciji za krivuljo hlajenja K1 (kot je prikazano v primeru (a))

Fig. 6. Dilatometry tests and simulated transformation behaviour of the HSS shell material: (a) Match of starting points of the phase transformations between experiment and simulation. (b) An exemplary representation of the transformation kinetics of the cooling curve K1 (as shown in (a))

postopka toplotne obdelave. Z inverzno prilagoditvijo koeficientov prenosa toplote je mogoče zanesljivo reproducirati simulirano toplotno stanje (gl. Sl. 7).

Fazna transformacije jedrnega materiala se zaključi v prvih 3 urah v okviru primarnega ohlajanja do nižjih temperatur prvi dan toplotne obdelave. Material delovne plasti se pretvori pretežno bainitno (-85 %). Zaostala avstenitna vsebnost se po nadaljnjem hlajenju spremeni v martenzito (Sl. 8).

3.3 Mehanska analiza

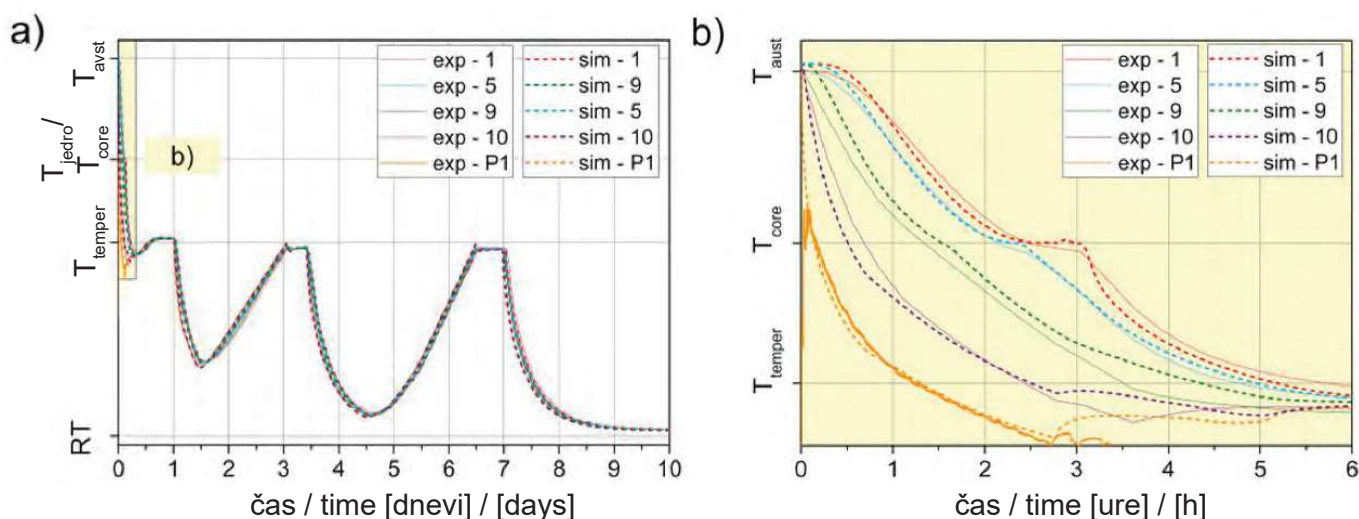
Mehanske napetosti so bile ocenjene v pomembnih točkah med celotnim postopkom toplotne obdelave (Sl. 8). Faza hitrega hlajenja na začetku vodi do najvišjih temperaturnih gradientov in posledično do visokih mehanskih napetosti

over the entire heat treatment process. By inversely adjusting the heat transfer coefficients, the simulative thermal situation can be well reproduced (see Fig. 7).

The phase transformation of the core material is completed within the first three hours, as part of the first cooling to lower temperatures at the first day of heat treatment. The shell material transforms largely bainitic (-85%). The remaining austenite content transforms martensitic during the further cooling (Fig.8).

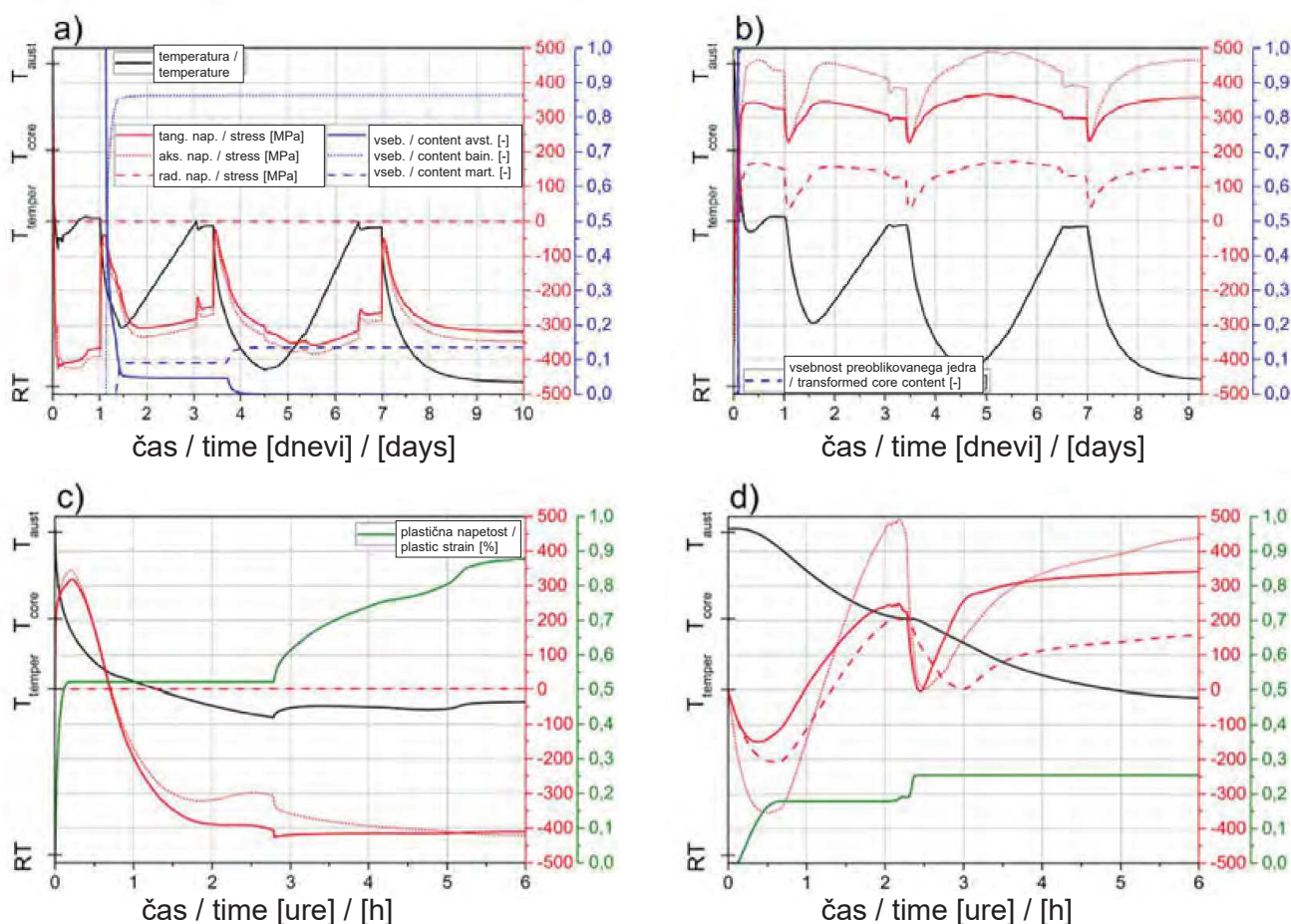
3.3 Mechanical Analysis

The mechanical stresses were evaluated at significant points along the entire heat treatment process (Fig. 8). The sharp cooling phase at the beginning leads to the highest temperature gradients and thus to high mechanical stresses and the formation



Sl. 7. Temperaturni profil iz poskusov in simulacij za reprezentativne ocene: v začetnem stanju je temperatura valja pri T_{avst} v razponu med 1000 in 1100 °C z majhnimi temperaturnimi gradienti, ki izhajajo iz postopka segrevanja. T_{jedro} se nanaša na razpon transformacije jedra med 700 in 800 °C, T_{TEMPE} pa predstavlja razpon faz kaljenja (500–600 °C). a) Temperaturni gradienti med celotnim postopkom toplotne obdelave. b) Površina hitrega ohlajanja se je povečala, kot je prikazano pod a)

Fig. 7. Temperature profile from experiment and simulation for representative evaluation points: In the initial state, the roll temperature at T_{AVST} is in the range of 1000-1100 °C with slight temperature gradients from the heating process. T_{CORE} refers to the range of core transformation between 700 and 800 °C, T_{TEMPER} represents the range of the tempering stages (500-600 °C). a) Temperature gradients over the entire heat treatment process. b) Area of the sharp cooling as shown in a) enlarged

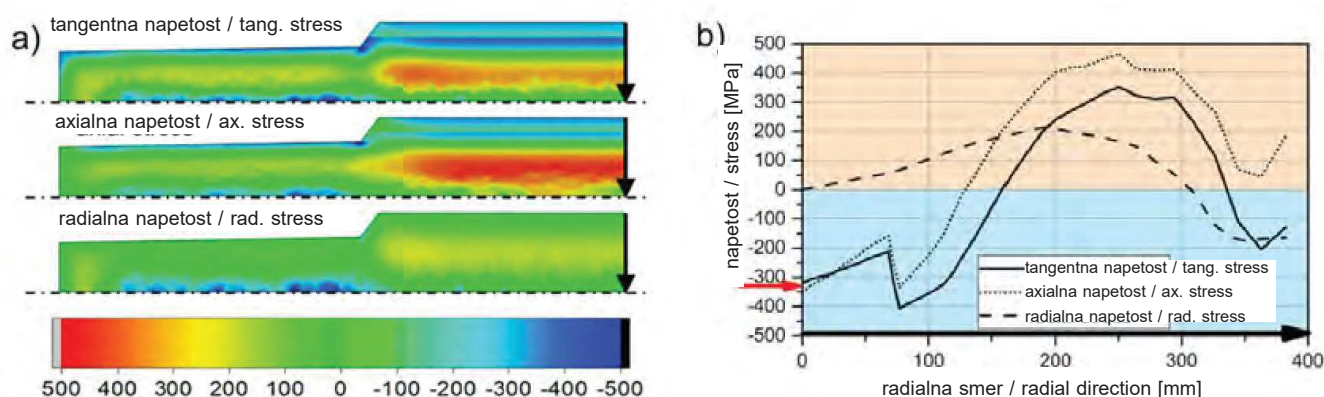


Sl. 8. Gradient napetosti in potek transformacije materiala ter napetosti v odvisnosti od časa: a) in c) Pri oceni točke »P1« – material delovne plasti, položaj osrednje osi na površini valja. b) in d) Pri oceni točke »4« – material jedra, položaj osrednje osi, radialni položaj 100 mm. Gradienti napetosti in lestvice so prikazani z rdečo, fazni gradienti in lestvice so prikazani z a) in b) modro ter c) in d) gradienti plastičnih napetosti z zeleno. Krivulja temperature in ustrezna lestvica so prikazani s črno

Fig. 8. Stress gradients and transformation behaviours and strains over time: a) and c) In the evaluation point "P1" - shell material, central axis position on the roll surface. b) and d) In the evaluation point "4" - core material, central axis position, radial position of 100mm. Stress gradients and scales are shown in red, phase gradients and scales are shown in a) and b) blue, in c) and d) plastic strain gradients shown in green. The temperature curve and the corresponding scale are shown in black

ter nastanka plastičnega raztezka (gl. Sl. 8c in d). Plastične napetosti se minimalno povečajo v nadaljevanju toplotne obdelave, vendar pa se manjše količine napetosti TRIP (Transformation Induced Plasticity – pojav plastičnosti zaradi preoblikovanja) seštevajo v okviru faznega preoblikovanja. Na Sl. 8d je prikazan začasen obrat napetosti v površini fazne transformacije na temperaturnem vrhu po pribl. 2 urah obdelave.

of plastic elongation (see Figs. 8c and d). The plastic strains increase only marginally in the further heat treatment process, but smaller amounts of TRIP (Transformation Induced Plasticity) strains are added up in the context of phase transformation. Fig. 8d shows a temporary stress reversal in the area of phase transformation on the temperature plateau at approx. two hours process time.



Sl. 9. Porazdelitev napetosti po toplotni obdelavi: a) Pregled porazdelitve aksialnih, radialnih in tangentialnih napetosti – vse vrednosti so izražene v MPa. b) Globinski profil ob črni puščici v a), S poskusi določene napetosti tik pod površino so označene z rdečo puščico.

Fig. 9. Stress distribution after heat treatment: a) Distribution view for axial, radial and tangential stresses – all values in MPa. b) Depth profile along black arrow in a), the near-surface experimentally determined stress values indicated by a red arrow

Izračunana napetost, ki nastane po toplotni obdelavi, je povsem skladna s stanjem, določenim v poskusu (gl. Sl. 9b). V predelu delovne plasti imajo aksialne in tangentialne napetosti tlačno napetost v razponu 300 MPa. V jedru merijo povprečne hidrostatične natezne napetosti okoli 150 MPa (gl. Sl. 9a), tangentialne in aksialne napetosti se povečajo do 300 in 400 MPa (gl. Sl. 9b).

The calculated stress resulting after the heat treatment is well in line with the experimentally determined state (see Fig. 9b). In the shell area, the axial and tangential stresses have compressive stress in the range of 300 MPa. In the core, the average is hydrostatic tensile stresses in the range of 150 MPa (see Fig. 9a), the tangential and axial stresses increase up to 300 and 400 MPa respectively (see Fig. 9b).

4 Zaključki

4.1 Kritični toplotni gradienti

Kritični toplotni gradienti nastanejo v valju, ko postane izmenjava toplote med valjem in sosednjimi območji prevelika. Med hlajenjem se v predelu jedra zaradi toplotnih gradientov kopičijo natezne napetosti. Med segrevanjem je stanje toplotnih napetosti ravno obratno. V prvih nekaj urah postopka se valj obremeni z večjimi koeficienti toplotnega prenosa in višjimi toplotnimi obremenitvami. To vodi do

4 Discussion and Conclusion

4.1 Critical thermal gradients

Critical thermal gradients developed in the roll when the heat exchange between the roll and the surrounding area becomes too large. During cooling, tensile stresses in the shell area and compressive stresses in the core area build up due to the thermal gradients. During heating, the thermal stress situation is exactly reversed. Within the first few hours of the process, the roll is loaded with higher heat transfer coefficients

nastanka plastične anizotropije v predelu delovne plasti in jedra (glejte Sl. 8c in d). Zato se ustvarijo zaostale napetosti zaradi različnih koeficientov toplotnega raztezanja dveh materialov v kombinaciji z napetostmi TRIP, ki jih povzroča fazna transformacija.

4.2 Lezenje

Valji so več kot 10 ur izpostavljeni temperaturam med 500 in 600 °C (gl. Sl. 8a in b). Pri tej temperaturi igra ključno vlogo deformacija zaradi lezenja. Predhodna plastičnost in transformacija povzročata velike notranje napetosti v valju tudi brez velikih temperaturnih gradientov. Skladno z dejanskim procesom je mogoče napetosti modela zmanjšati z izvedenim modelom lezenja, ki je odvisen od časa, temperature in napetosti.

4.3 Kritične napetosti

Podrobna analiza napetosti v različnih predelih valja dokazuje, da so v velikem delu jedra prisotne natezne napetosti v odvisnosti od dolgega časa obdelave. Faze segrevanja ustvarjajo največ napetosti, vendar se pretežni del teh napetosti ohrani tudi v ohlajenem stanju. Napetosti prav tako vključujejo konkretno mero hidrostatske natezne napetosti. Nasprotno pa v predelu delovne plasti prevladujejo tlačne napetosti. Za ohranjanje nizkih nateznih napetosti jedra toplotni gradienti v valju ne smejo postati preveliki, kar je treba upoštevati še posebej v primeru faze hitrega ohlajanja ob začetku toplotne obdelave. Napetosti v jedru so konstantne po fazi hitrega ohlajanja, vključno s transformacijo jedra, in se zgolj rahlo zmanjšajo zaradi od časa odvisnih učinkov, kot je lezenje.

and the highest thermal loads. This leads to the formation of plastic strains in the shell and core area (see Figs. 8c and d). Thereby residual stresses are generated due to the different thermal expansion coefficients of the two materials combined with the TRIP strains caused by the phase transformation.

4.2 Creep

The rolls are held for more than 10 hours at temperatures in the range of 500 to 600 °C (see Figs. 8a and b). At this temperature, creep deformation plays an essential role. Previous plastification and transformation induce large internal stresses in the roll, even without high temperature gradients. In agreement with the real process, the model stresses can be reduced by the implemented creep model, which is time, temperature and stresses dependent.

4.3 Critical stresses

A detailed analysis of the stresses at different roll positions proves that high tensile stresses over long process times can be found in a large area in the core. The heating phases generate the highest stresses, but even in the cooled state a large part of the stresses maintains. The stresses also show a considerable hydrostatic tensile component. In contrast, compressive stresses prevail in the shell area. In order to keep the core tensile stresses low, the thermal gradients within the roll must not become too large, which must be taken into account especially in the sharp cooling phase at the beginning of the heat treatment. The core stresses remain at a constant level after the sharp cooling phase including core transformation and are only slightly reduced by time-dependent effects such as creep.

5 Viri References

- [1] R. Raberger, Optimierung der Wärmebehandlung von Walzwerkswalzen unter Einbeziehung der numerischen Simulation, Dissertation, TU Graz (2005)
- [2] S.Brunbauer, G.Winter, T.Antretter, P.Staron, W.Ecker, Residual stress and microstructure evolution in steel tubes for different cooling conditions – Simulation and verification, Materials Science & Engineering (2019, Volume A747), p. 73–79
- [3] M. Schemmel, P. Prevedel, R. Schöngrundner, W Ecker, T Antretter, Size Effects in Residual Stress Formation during Quenching of Cylinders Made of Hot-Work Tool Steel, Advances in Materials Science and Engineering (2015, Volume 22), p. 1–7
- [4] K. H. Ziehenberger, Legierungstechnische Verbesserung gegossener Schnellarbeitsstahlwalzen für Warmbreitbandstraßen, Dissertation TU-Wien (2002), p.59
- [5] Abaqus, Abaqus Manuals, version 2018, Providence, RI: Dassault Systèmes Simulia Corp (2018)
- [6] R.P.Garret, S.Xu, J.Lin, T.A.Dean, A model for predicting austenite to bainite phase transformation in producing dual phase steels, International Journal of Machine Tools and Manufacture (2004, Volume 44), p.831-837
- [7] D.P.Koistinen, R.E.Marburger, A general equation prescribing the extent of the austenite- martensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels, Acta Metallurgica (1959, Volume 7-1), p.59-60
- [8] M.Wolff, S.Boettcher, M.Böhm, Phase transformations in steel in the multi-phase case – general modelling and parameter identification (2007)

AKTUALNO / CURRENT

60. IFC Portorož 2020 s predstavitevijo vseh predavanj in galerijo slik vseh razstavljalcev na konferenci

V Livarskem vestniku št. 3/2020 smo samo okvirno predstavili vse aktivnosti iz programa letošnjega osrednjega jubilejnega livarskega dogodka - 60. IFC Portorož 2020, ki je potekal v času od 16.-18. septembra 2020.

Ta prispevek pa posvečamo izključno strokovni kratki predstavitvi vseh podanih predavanj na konferenci v rednem programu.

Prvega dne konference so bila predstavljena naslednja **PLENARNA PREDAVANJA**:



Dr. Konrad Weiss, plenarni predavatelj

1. K. WEIß, RWP GmbH, (D): **Livarstvo od zgodovine do prihodnosti**

Podana je bila predstavitev zgodovine livarstva od prvih začetkov v 3. tisočletju pr. n. št. do današnjih časov. Ves čas je bila gonilna sila razvoja optimizacija teže ter načrtovanje dovodov litine in sistemov napajanja. Šele po letu 1980 so bile razvite numerične metode, kot so FDM, FEM, BM. Razviti sta bili vakuumsko in visokotemperaturna tehnologija. Prihodnost livarske tehnologije temelji na raziskavah materialov in livarske tehnologije. Izdelki iz kompozitnih zlitin, tehnologija enojnih kristalov in amorfne strukture zahtevajo uporabo zelo zapletenih matematičnih postopkov. Tudi livarstvo vstopa v razvojno fazo IT 4.0 in razvoj metod aditivne tehnologije.



prof. Dr. Primož Mrvar, plenarni predavatelj in predsedujoči

2. A. KIŽMAN^{1,3}, P. MRVAR^{2,3}, M. JAN-BLAŽIČ³, M. DEBELAK³, ¹Univerza v Mariboru, ²Univerza v Ljubljani, ³Društvo livarjev Slovenije: **Slovensko livarstvo: iz tradicije v prihodnost zasnovano na znanju, ustvarjalnosti in inovativnosti**

Tradicija slovenskega livarstva izhaja iz 4. stoletja pr. n. št. z litjem sekiric iz bakra v kalupe iz gline na Igu pri Ljubljani. Pomemben del zgodovine je vezan na litje zvonov. Poseben pomen pa ima litje kipa sv. Marije iz leta 1681, ki ga načrtoval in vodil J. V. Valvasor. Celotna proizvodnja slovenskih livarn v letu 2019 je znašala 195.609 ton. V celoti je bil v tem letu zaznan kakovostni in vrednostni premik v: tehniško zahtevnejše ulitke, višjo stopnjo obdelave in izdelavo komponent za vgradnjo v finalne izdelke. Predstavljeni so bili primeri izdelave tehniško zahtevnih ulitkov štirih slovenskih livarn: Talum livarna- Kidričevo, Akrapovič livarna-Ivančna Gorica, Livar- Ivančna Gorica in Mariborska livarna Maribor.

3. P. SCHUMACHER^{1,2}, T. PABEL², C. KNEISL², T. PETKOV², ¹Montanuniversität Leoben, Avstrija, ²Austrian Foundry Research Institut, Leoben, Avstrija: **Z nanodelci utrjena kovinska matrica v delih iz lahkih kovinskih zlitin**



prof. Dr. Peter Schumacher,
plenarni predavatelj



Prof. Robin Rosenstock,
plenarni predavatelj v
imenu prof. Dr. Friedrich
Klein kot avtorja



Dr. Joerg C. Sturm,
plenarni predavatelj

Za proizvodnjo lahkih delov kompleksnih komponent so vse večje zahteve po visokih trdnostnih lastnostih in povečani togosti. Razvoj na področju magnezijevih in aluminijevih zlitin je glede tega omejen. Višje trdnostne lastnosti pri teh zlitinah je delno mogoče doseči s toplotnimi postopki, ki pa so velik potrošnik energije. V te zlitine dodani nanodelci delujejo kot zavora gibanj dislokacij. V okviru projekta LightMe je bila pomoč malim in srednje velikim livarnam in s tem končnim odjemalcem ulitkov, iskana z raziskavami dodajanja nanodelcev v lahke kovinske zlitine. Prikazani so bili doseženi rezultati.

4. F. KLEIN¹, N. SÜDLAND¹, A. BAßMANN², R. ROSENSTOCK²,
¹Aalener Gesellschaft für Leichtbauteile GmbH (D), ²SP Süddeutsche
Prüfanlagen GmbH (D): **Univerzalna testirna naprava s kontrolo
deformacij pri preizkušanju mehanskih lastnosti kovinskih
materialov**

Preizkusni stroj Twist-Control obremenjuje vzorec materiala s konstantno hitrostjo vse do zloma. Nameščeni senzorji zaznajo kot vrtenja in moment odpornosti. Ustrezna programska oprema za merjenje deluje na osnovi patentiranih algoritmov, ki omogočajo izris diagrama napetost-deformacija. Izrisan diagram omogoča meritev naslednjih vrednosti: natezna trdnost R_m , 0,2-odstotno mejo plastičnosti $R_p 0,2$ in raztezek A . Zaradi geometrije preizkušancev je mogoče vzorce izdelati s poljubnim postopkom izdelave forme in dodatna strojna obdelava preizkušancev ni potrebna. Naprave so lahko zelo majhne in je njihova namestitve možna v neposredni bližini jemanja vzorcev. Prav tako so idealnih dimenzij za namestitve v laboratorijih za raziskovanje materialov.

**5. J.C. STURM, MAGMA GmbH, Aachen (D): »Virtualno
jedro«-simulacija in optimizacija kompleksnega materiala od
proizvodnje do aplikacije med litjem.**

Simulacija postopka proizvodnje jeder omogoča kvantifikacijo in optimizacijo glavnih parametrov, ki vplivajo na kakovost jedra pred proizvodnjo orodja in serijsko proizvodnjo. Pesek za jedra je kompleksen sistem, ki ga sestavlja več zrnatih materialov, ki se ob dodajanju organskih ali anorganskih vezivnih sistemov spojijo v porozno jedro. Z modeliranjem fizikalne interakcije peska in orodnih materialov je možno tudi napovedovati obrabo jedrovnika. Izračuna se pretok plina in upoštevajo se transformacije in toplotno ravnovesje. Med litjem jedro razpada zaradi toplotnih obremenitev na veziva. Posledice so spreminjanje mehanskih in fizikalnih lastnosti. Razvoj omogoča simulacijo pretoka in tlaka v skupnem sistemu. Simulacijska programska oprema v milisekundah izračuna postopek vbrizgavanja. Rezultati modela omogočajo primerjavo trenutnih pogojev z uporabo senzorjev v stroju. Predstavljeno je modeliranje kompleksnega peska za jedra. Opisano je ponašanje zrnatega materiala na kakovost ulitka.



Michael Colditz, plenarni predavatelj

6. **M. COLDITZ**, Pour-Tech AB (SE): **Operater umetne inteligence(ai) v livarnah-včasih vizija, danes realnost**

Podjetje Pour-tech AB je razvilo dovršen integriran sistem za popolnoma avtomatizirano litje na podlagi laserske tehnologije in tehnologije strojnega nadzora. Vsi elementi tehnologije litja so na osnovi izdelanih algoritmov pod stalnim nadzorom. AI- operater med samim postopkom litja lahko sprejema odločitve in s tem poskuša optimalno upravljati sam proces. Predstavljene so bile osnovne informacije o najnovejših napravah za samodejno litje in popolnoma avtomatiziran proces, ki se samodejno optimizira. Prav tako so bili prikazani primeri delovanja v dejanskih pogojih v livarnah ter možnost združevanja tehnoloških procesov litja z drugimi proizvodnimi obrati. Predstavljene so bile tudi ideje novih rešitev ob upravljanju z umetno inteligenco.



prof. Dr. Rebeka Rudolf, plenarna predavateljica in predsedujoča

7. **R. RUDOLF^{1,2}, P. MAJERIČ^{1,2}, Ž. JELEN¹, A. KRIŽMAN¹, B. ALBREHT²**, ¹Univerza v Mariboru, ²Zlatarna Celje: **Prenos nanotehnologije na industrijsko raven-kot primer dobre prakse v Zlatarni Celje, na primeru zlatih nanodelcev**

Nanodelci na osnovi zlata imajo nekatere izjemne lastnosti: optične lastnosti, inertnost in predvsem visoka biokompatibilnost. Njihova uporaba je predvidena predvsem v medicini, dalje za katalizo v kemijskih procesih, za plinske in kemične senzorje, za biosenzorje, za prevodne prevleke v elektroniki, za elektronska črnila, aditive za gorilne celice ,fluorescentne sonde, pri čiščenju vode, pa tudi pri shranjevanju podatkov. Predstavljena je bila metoda izdelave nanodelcev z ultrazvočno razpršilno analizo(USP),ki je uporabna za sintezo nanomaterialov. Pri USP se z ultrazvokom razprši raztopino želenega materiala v kapljice aerosola. Iz kapljic velikosti nekaj mikronov se nato sintetizirajo nanodelci. Pomembna stopnja za morfologijo nanodelcev je hitrost izhlapevanja nanodelcev s katero dobimo različne oblike in velikosti nanodelcev. Predstavljene so omejitve in zahteve prenosa nanotehnologije na industrijsko raven



Ashley Stone, plenarni predavatelj

8. **A. STONE**, Jacobsen Real –Time X ray Machinery inc. (CAN): **MAXImolding – Livarski stroj za litje ulitkov magnezijevih zlitin v testastem stanju za velikoserijsko proizvodnjo**

MAXImolding je podan kot rešitev za izdelavo kakovostnih ulitkov iz magnezijev zlitin. Razvit je bil nov postopek litja tovrstnih ulitkov v testastem stanju. Horizontalni stroj za injekcijsko brizganje je postavljen vertikalno in predstavlja varianto injekcijskega brizganja testastih kovin (SSM-IMM). Stroj je veliko učinkovitejši. Material v obliki opilkov založijo v argonsko atmosfero predprocesorja, kjer opilke posušijo pri temperaturi 200oC.V glavnem procesorju se trdna Mg-zlitina na temperaturi med 480 in 580oC spremeni v testasto stanje. Testasto stanje se vbrizga se z injekcijskim brizganjem vbrizga v trajno kovinsko formo. Postopek je v celoti avtomatiziran, prijazen okolju in ga je možno izvajati v vsakem proizvodnem obratu.



Mirco Moretto, plenarni predavatelj

9. **M. MORETTO, A. NARDELLO, MAZZON s.p.a., (IT): Furanske smole-neprekinjen razvoj**

Zaradi težav z nestabilnimi cenami surovin za proizvodnjo klasičnih furanskih smol so iskali variante v možnosti izdelave dovolj kakovostnih furansko-fenolnih smol. Zaradi tega je podjetje raziskovalo različne sinteze in kemijske procese, da bi lahko izdelovali smolo podobno furanski, strošek pa bi bil podoben kot pri fenolnih smolah. Odkrili so, da lahko ob daljšem reakcijskem času fenolne smole s furfural alkoholom, v reaktorju, pri določenem specifičnem tlaku in določeni temperaturi, izdelajo učinkovite polimere z lastnostmi, ki po trdnosti, viskoznosti, času obdelave, emisijah, varnosti ter ceni, omogočajo visoko kakovost in za trg sprejemljivo ceno. Tako načrtovane in izdelane hibridne smole so v celoti zadostile vsem tržnim zahtevam.



Martin Liepe, plenarni predavatelj

10. **M. LIEPE, R. BÄHR, Otto von Guericke Universität Magdeburg (D): Numerične raziskave centrifugalno ulitih dvoplastnih železovih kompozitov**

V primeru izdelave rotacijsko simetričnih delov iz ulitkov, ki morajo imeti površino odporno na obrabo ter duktilno jedro, je možno s simuliranjem centrifugalnega litja debelostenskih delov doseči ustrezne lastnosti. Prikazan je bil primer centrifugalnega litja, ki se osredotoča na proces vrtenja forme, prenos toplote in numerične parametre. Poleg simuliranja konvencionalnih enoslojnih ulitkov, je bil prikazan primer modeliranja polnjenja forme in strjevanje dvoslojnih komponent, ki so sestavljene iz različne zgradbe litin na osnovi železa. Ta metoda omogoča ustrezno simulacijo kompozitnih materialov ob upoštevanju zaporednega litja z različnimi fizikalnimi lastnostmi in toplotno distribucijo. Na praksi zasnovana raziskava je osredotočena na ocenitev pretoka, strjevanja in temperaturnih pogojev taline. Prikazana je bila tudi metoda za napovedovanje pričakovanih mehanskih lastnosti in oceno notranjega jedra.

Delo drugega dne konference je potekalo v dveh sekcijah. V nadaljevanju najprej predstavljamo predavanja iz sekcije **Litine na osnovi železa in različne livarske tehnologije:**



Maximilian Brait, predavatelj

1. **M. BRAIT¹, E. KOPPENSTEINER¹, G. SCHINDELBACHER¹, P. SCHUMACHER^{1,2}, ¹Avstrijski livarski inštitut ÖGI (A), ²Montanuniversität Leoben (A): Preiskave specifičnega vpliva na lokalne lastnosti duktilnega litega železa ob uporabi 3d-tiskanih jeder**

Namen tega prispevka je bil opredelitev selektivnega vpliva na lastnosti duktilnega sivega železa pri uporabi 3D tiskanih jeder. Konstruiran, simuliran in izdelan je bil poskusni ulitek z internim jedrom in steno različnih debelin. Uporabljeni so bili različni hladilni mediji od počasnega zračnega hlajenja do hitrega hlajenja ob pršenju z vodo. Izpostavljenost jeder visokim temperaturam med strjevanjem je uničila vezivna sredstva in jedro je bilo možno izpihati iz ulitka enostavno z zrakom. S tem je bilo mogoče povečanje trdnosti neobdelanega ulitka za več kot 70%, brez toplotne obdelave. Stroškom visokotemperaturne obdelave se je mogoče izogniti z natančnim upravljanjem lokalnega hlajenja. Iz poskusov pridobljeno znanje predstavlja osnovo za zasnovano



Janez Pristavec,
predavatelj in predsedujoči

in optimizacijo tehnologije dejanskih komponent z uporabo lokalnih hitrosti hlajenja in lastnosti mikrostruktur.

**2. J. PRISTAVEC¹, A. BRANISELJ², I. TRATAR², A. ČATIČ²,
¹Exoterm-IT d.o.o. (SI), ²Livar d.d. (SI): Analiza in optimizacija
procesa izdelave peščenega jedra s pomočjo numerične
simulacije in statističnih orodij**

Podana je bila zahteva izvedbe radija na obrobi dveh lukenj, kar je zahtevalo izdelavo jedra v dveh korakih, v prvem segmentu z luknjama z radiji, v drugem pa vstavljanje tega segmenta v jedrovnik s končno obliko in izdelavo celotnega jedra po postopku cold-box. Kljub spreminjanju parametrov strela in odzračevanju, je kritično mesto ostalo neizpolnjeno. Za odpravo težave je bila izvedena analiza tehnologije z uporabo simulacije s programom MAGMASOFT®, modul MAGMAc+m. Ugotavljanje parametrov je bilo opravljeno z metodo DOE. Ugotovilo se je, da je v kritičnem področju, ki se ne zapolni tlak prenizek. Narejeno je bilo več simulacij zračnikov v kritičnem področju. S pomočjo v programski paket vgrajenih statističnih orodij je bila izbrana najboljša kombinacija zračnikov, ki je potem zagotavljala proizvodnjo kvalitetno ustreznih jeder.



Predavatelj prof. Dr.
Branko Bauer, predavatelj

**3. B. BAUER¹, I. MIHALIĆ POKOPEC¹, M. PETRIČ², P. MRVAR²,
¹Univerza v Zagrebu (CRO), ²Univerza v Ljubljani (SI): Vpliv povišane vsebnosti silicija na lastnosti sive litine s kroglastim grafitom**

Nodularna litina z visoko vsebnostjo silicija združuje edinstveno kombinacijo natezne trdnosti in visokega raztezka. To je možno doseči z ojačanjem feritne matrice s vsebnostjo Si med 3 in 4,3 ut.%. Raziskan je bil vpliv hitrosti ohlajanja in visoke vsebnosti Si na mikrostrukturo in mehanske lastnosti te litine. Izdelani so bili trije ulitki z visoko vsebnostjo silicija: 3,0, 3,4 in 4,8 ut.%. Štirje deli neobdelanega materiala so bili uliti v isto formo, kocko z debelino stene 180mm in standardnimi bloki Y2, Y3, Y4. Izdelana je bila analiza mikrostrukture ter preizkus natezne trdnosti. Rezultati so pokazali, da so z večjo vsebnostjo Si povezani vsebnost grafita, feritna frakcija, meja plastičnosti in natezna trdnost, po drugi strani pa zmanjšanje raztezka. Tveganje pojave grudastega grafita se poveča z večanjem vsebnosti Si in nižjo hitrostjo ohlajanja.



prof. Jožef Medved,
predavatelj in predsedujoči

**4. S. RAMRATTAN¹, I. WELLS¹, R. TUTTLE², J. MEDVED³,
¹Western Michigan University (ZDA), ²Saginaw Valley State University (ZDA), ³Univerza v Ljubljani (SI): Karakterizacija
površine ognjevdzdržno premazanih in kemično vezanih vzorcev
peščenih mešanic v obliki diska pri uporabi za jekleno litino**

Kemično vezane peščene mešanice so vse pomembnejši del v livarstvu, njihova interakcija z jeklom pa je na osnovi I. dela raziskave vprašljiva. Spremembe kakovosti površin na fazni meji med nepremazano peščeno mešanico in jekleno litino, zahtevajo nanos ognjevdzdržnih premazov. Štirje ognjevdzdržni premazi so bili uporabljeni na vzorcih v obliki diskov z uporabo običajnih tehnik nanašanja. Preizkusi ulivanja so bili izvedeni pri znanem metalostatičnem tlaku, temperaturi in kemijski sestavi. Preizkusi so pokazali, da različni ognjevdzdržni premazi zagotavljajo različne površine ulitkov. Nova tehnologija ognjevdzdržnih premazov zagotavlja vrhunsko kakovost površine kremenovih in

keramičnih mešanic pri ulivanju jeklene litine. Prav tako vplivajo na odstranjevanje s stresanjem kemično vezanih peščenih mešanic.



Matthias Steinbuch,
predavatelj

5. **M. STEINBUCH**, Voxeljet AG (D): **Anorganska peščena mešanica za 3d tiskanje- pametna livarna prihodnosti**

Za zagotavljanje konkurenčnosti v tem dinamičnem tržnem okolju so livarne primorane vlagati v tehnološke inovacije in s tem v napredek. Ena izmed pomembnih novih tehnologij je 3D-tiskanje peščenih form in jeder. Z aditivno tehnologijo je mogoče zagotoviti hitro, natančno in stroškovno konkurenčno proizvodnjo. Vendar je za sedaj proizvodnja še vedno počasna, izbira materialov omejena in obdelovalne tehnike še niso avtomatizirane. Podjetje Voxeljet je z dvema partnerjema uspešno razvilo popolnoma avtomatiziran proizvodni proces. Tehnologijo so poimenovali ICP (Industrialization of Core Printing). Gre za prvo popolnoma avtomatizirano linijo za aditivno proizvodno tehnologijo na svetu, zasnovano za serijsko proizvodnjo kompleksnih anorganskih livarskih jeder.



Zdenka Zovko Brodarac,
predavateljica

6. **Z. ZOVKO BRODARAC¹, A. MAHMUTOVIĆ², S. ZELKO³, L.ZELJKO¹**, ¹Univerza v Zagrebu (CRO), ²TC Livarstvo d.o.o. (SI), ³Plamen Ltd (CRO): **Uporaba numeričnih simulacij pri optimizaciji tankostenskih ulitkov iz zlitine en-gjl-200**

Numerične simulacije litja in strjevanja, ki temeljijo na kompleksnih in celovitih matematičnih modelih predstavljajo osnovo za ocenjevanje procesov v livarstvu. Omogočajo analogno prikazovanje metalurških procesov z izračuni in grafično dispozicijo od litja do končnega strjevanja ulitkov. Kompleksnost kovinskih ulitkov sestavljajo interakcije elementov in masni prenos med strjevanjem ter tehnološki razvoj vključno s prenosom toplote. Podana raziskava se je osredotočila na optimizacijo litja in strjevanja tankostenskih ulitkov iz litine EN-GJL-200, s pomočjo numerične simulacije. Kompleksna geometrija tankostenskega ulitka predstavlja izziv zaradi skorjastih delov in upogibanja ulitka. Razkrite so spremembe tehnoloških parametrov pri dovodnih, prezračevalnih in podpornih sistemih. Optimizacija omogoča tudi preprečevanje toplotnih preobremenitev.



Lukasz Borkowski,
predavatelj

7. **L. BORKOWSKI, J. ANDREJEWSKI**, OTTO Junker GmbH (D): **Srednjefrekvenčna brezjedrna indukcijska peč - koncept tehnološkega napredka v livarni Srem na Poljskem**

Gibanje taline v lončni indukcijski peči je odvisno od moči peči in delovne frekvence ter omogoča vsestransko homogenost zlitine. Prav tako je omogočeno vmešavanje drobnih kovinskih odpadkov v talino. Z uvedbo novih krogotokov je možno delo optimizirati in prikrojiti specifičnim potrebam. Z napajanjem zgolj zgornjega dela tuljave pa se lahko izboljša gibanje taline na površini ob koncu taličnega ciklusa. Predstavljena je bila optimizacija vseh komponent za učinkovitejšo proizvodnjo. Z uporabo naprednega sistema IGBT se zagotavlja vrhunska samozaščita, konstanten visok faktor moči in nizka zahteva po kakovosti hladilne vode. Z multifrekvenčno tehnologijo (250/125 Hz) je možna izbira optimalne frekvence za taljenje (250 Hz) in hitrejše legiranje (125 Hz).



Johann Hagenauer,
predavatelj

8. J. HAGENAUER, HAGI GmbH (A): **3D tisk – popolno dopolnilo v livarski industriji**

Industrija 4.0 - digitalizacija industrijske proizvodnje, omogoča nove možnosti tudi v livarski industriji. Podjetje HAGI GmbH vse od začetka leta 2020 razen svetovanja v livarnah, svetuje tudi na področju 3D - tiskanja. Aditivna proizvodnja omogoča povečanje učinkovitosti in znižanje stroškov v livarski industriji. Industrijski trg 3D tiskanja je v izjemno hitrem razvoju, saj omogoča visoko stopnjo svobode pri zasnovi izdelkov. Tekstura delov proizvedenih s 3d-tiskanjem je lahka in stabilna. Podjetje se je specializiralo za tiskanje peska in kovin, svetovanje pri analizah investicijskih odločitev in zagona ter začetka proizvodnje.



Jovan Jovanović,
predavatelj

9. P. PASHKOV¹, J. JOVANOVIĆ², ¹Nordinkraft AG (D), ²Instro d.o.o. (SI): **Avtomatska industrijska ultrazvočna preiskava visokotemperaturnih kovinskih materialov**

Phased array (PA) ultrazvočni pretvornik je napredna metoda ultrazvočnega testiranja ,ki ima široko uporabo v industrijskih neporušnih preiskavah različnih oblik izdelkov. PA pretvornik je sestavljen iz več majhnih aktivnih elementov od katerih lahko vsak posamezno emitira v računalniško izračunanem zaporedju. Izraz faza se nanaša na čas, izraz matrika pa na več elementov. Fazno zaporedje ultrazvočnega testiranja temelji na načelih fizike valov. Posebna ultrazvočna tehnologija je elektromagnetni akustični pretvornik EMAT, ki se uporablja za industrijske preglede kovinskih izdelkov in ne potrebuje medija ter se uporablja za preglede visokotemperaturnih kovinskih izdelkov. Prikazane so praktične možnosti pretvornikov, ki se uporabljajo v avtomatskih ultrazvočnih sistemih in njihova uporaba v praksi.

10. R. KUNJU¹, M. SOLINA², K. ASFARIDIS³, ¹Altair (USA), ²Altair (E), ³Altair (GR): **Simulacijsko podprto načrtovanje ulitkov z učinkovitim preverjanjem proizvodnih omejitev**

Metode za optimizacijo strukture omogočajo zasnove zanimivih in izredno lahkih izdelkov. Ob tem pa je potrebno vnaprej poznati vse omejitve, da lahko z numeričnimi simulacijami načrtujemo oblike katerih proizvodnja je enostavnejša. Pri kovinskih izdelkih so velike in debelostenske površine podvržene napakam, na tankih površinah pa je lahko prisotna mikroporoznost ali pa deformacije zaradi neenakomernega ohlajanja. Omejitve so dejansko vodilo načrtovanja. V tem prispevku pa je opisana metodologija, ki pomaga razumeti in obvladati takšne omejitve. Na podlagi celotne ali le delne skice, je mogoče ustvariti strukture primerne za konvencionalno litje. Poskušali so razviti smernice, ki temeljijo na proizvodnih metodah, da bi tako ustvarili le tiste dizajne, ki so primernejši za litje. Predstavljeni so praktični primeri, ki na podlagi predvidenih livnih postopkov, prikazujejo omejitve in na osnovi tega iščejo rešitve v načrtovanju izdelkov.



predavatelj Weiss
Simulation d.o.o.



Egidij Hudrap, predavatelj

11. E. HUDRAP¹, T. RAVLAN¹, G. LOJEN², P. MAJERIČ², R. RUDOLF², ¹SIJ Ravne systems d.o.o. (SI), ²Univerza v Mariboru: Predstavitev rezultatov razvoja naprednega orodnega jekla za najzahtevnejše aplikacije v industriji

SIJ Ravne systems ob vključevanju Univerze v Mariboru ter partnerjev Bosio d.o.o. in CPPE d.o.o. razvija napredna orodna jekla za najzahtevnejše aplikacije v industriji. Projekt je usmerjen v iskanje inovativnih tehnoloških rešitev pri postavitvi nove kalilne linije na ravni TRL4, v tesni povezavi z doseganjem ključnih lastnosti naprednega orodnega jekla za izdelavo nožev. Predstavljene in analizirane so možnosti za nove materiale in iskanje novih konstrukcijskih in tehnoloških rešitev. Preko razvoja prototipov bo omogočen prehod v eksperimentalno fazo projekta z novimi pristopi in uvedbo novih konstrukcijskih rešitev na izdelovalni liniji. Cilji so naslednji: prototip novega orodnega jekla, načrt nove toplotne in mehanske obdelave orodnega jekla ter prototip noža iz novega orodnega jekla.



Tin Perressuti, predavatelj

12. M. ŽAJDELA, T. PERESSUTTI, Termit d.d. (SI): Izdelava jeder po croning postopku

Croning postopek za izdelavo livarskih form ali jeder izberemo v primeru velikoserijske proizvodnje, kjer je potrebna velika natančnost ponovitev, dober razpad jeder in manjša masa jeder. Termit je začel izdelovati jedra po vročem postopku leta 2000. Uporabljajo se stroji za izdelavo jeder ogrevani s plinom ali električno. Pesek se polni v jedrovnike z nasutjem, ali s pomočjo komprimiranega zraka za popolno zapolnitev jedrovnika. Za močno razvejana jedra in manjše prehode v jedrih je pomemben čas polnjenja. Za enakomerno zapolnitev in preprečitev vrtinčenja je pomembna tudi postavitev šob. Polna jedra ne smejo imeti poroznih delov, votla pa morajo imeti zadostno debelino stene, da vzdržijo pritisk med litjem. Za načrtovanje tehnologije izdelave orodja in raznovrstne simulacije izdelave jeder se uporablja program Magmasoft. Za enakomerno in pravilno zapečenost jedra je pomembna pravilna postavitev grelcev. Polna jedra morajo biti enakomerno

zgoščena in brez ujetega zraka. Pri votlih jedrih pa je pomembna določitev minimalnih debelin sten in maksimalne debeline jedra.



Christian Gawert, predavatelj

Nadaljujemo s predstavitvijo predavan v sekciji **ZLITINE NEŽELEZNIH KOVIN**

1. C. GAWERT, R. BÄHR, Otto von Guericke Universität, Magdeburg, (D): Tankostenski kompozit z aluminijevo osnovo (AMC), z visokim deležem utrjevalnih delcev: proizvodne možnosti s postopkom visokotlačnega litja (HPDC)

Mehanske lastnosti kompozitov z aluminijevo matrico in dodajanjem utrjevalnih delcev (AMCp) so bistveno boljše kot pri monolitnih Al-zlitinah in v primerjavi z Fe-litinami pomenijo tudi velik prihranek pri teži. Prav tako je višja tudi odpornost proti obrabi. Pri tlačnem litju se postopek polnjenja forme izvaja z veliko hitrostjo, kar zagotavlja velike strižne sile, ki zagotavljajo omočenje delcev, ob tem pa se zmanjša tekočnost taline z AMCp delci. Pri gravitacijskem litju pa je uporaba večjega

deleža utrjevalnih delcev prav zaradi tega pri izdelavi tankostenskih ulitkov problematična. Vsled tega ima tlačno litje pri visokem deležu visoko viskoznih suspenzij prednosti. Z vidika stroškov pa je ob tem problematična življenjska doba kovinskih form. Rešitev je v zaobljenosti utrjevalnih delcev, ki omogočajo manjšo obrabo materiala form.



Klemen Turk, predavatelj

2. K. TURK, LTH castings d.o.o. (SI): Lasersko procesiranje aluminijevskih visokotlačnih ulitkov z namenom povišanja adhezivnosti površine

Ohišja in pokrovi elektronskih komponent izdelanih z visokotlačnim litjem imajo mnogokrat zahteve za čistost in adhezivnost površine ulitka. Nečistoče na površini so posledica narave postopka in okolja livarne. Kljub kasnejšemu vibracijskemu poliranju izdelkov in pranju oz. spiranju tlačnih ulitkov, se nečistoče s površine ne odstranijo v zadostni meri, da bi dosegli zahtevano adhezivnost površine. Obstaja več rešitev zaboljšanje adhezivnosti površine. Med najbolj učinkovitimi metodami je lasersko procesiranje. S hitro-pulzirajočim laserjem visoke moči in ustreznim oblikovanjem žarka ter fokusne pege laserja lahko dosežemo odstranitev nečistoč s površine in plitko pretalitev zgornjega sloja površine, kar omogoča dodatno tudi njeno višjo korozijsko odpornost.

Zaradi visoke hitrosti pulziranja in kratkega časa pulza, ni gretja površine in tako ni vpliva na geometrijo izdelka. Ustreznost procesa se potrjuje in preverja s postopki testiranja sklopa v slani komori, testi odpornosti na korozijo, pregledom mikrostrukture in testom lepljenja, kjer se preverja ali prihaja do kohezivnega ali adhezivnega loma silikona.



Mirnes Berbić, predavatelj

3. M. BERBIĆ¹, P. HOFER-HAUSER¹, R. GSCHWANDTNER¹, M. OGNIANOV², S. LEUDERS³, S. GLATZ⁴, C. LOCHBICHLER⁵, M. MANGELBERGER⁵, ¹ÖGI, Leoben (A), ²VA Böhler (A), ³Additive manufacturing center, Düsseldorf (D), ⁴VA eifeler Vacotec (D), ⁵VA high Performance Metals (A): Termomehanska in termokemična vzdržnost jekel za delo v vročem in PVD prevlek pri tlačnem litju

Toplotno obdelana orodna jekla imajo zaradi svojih mehanskih lastnosti in kemijske ter toplotne vzdržljivosti uporabnost kot materiali za forme pri tlačnem in kokilnem litju. Predvsem pri tlačnem litju so ta jekla izpostavljena kompleksnim obremenitvam, ki imajo velik vpliv na življenjsko dobo orodij. Cilj predstavljenih raziskav je bil odpornost teh jekel na spajkanje in toplotno utrujanje. Učinke spajkanja so preizkušali z namakanjem in nekaj časnim vrtenjem v talini zlitine AISi9Cu3. Z analizo izgube mase je mogoče sklepati o termokemijski odpornosti.

Za analizo termomehanskih lastnosti so zasnovali vzorce s posebno geometrijo in jih izmenično potapljali v Al-talino in kopel tople vode. Na podlagi ocene skupnega števila razpok, njihove dolžine in površinskih proporcev so lahko določili odpornost preizkušenih vzorcev na toplotno utrujenost. Kot naslednji korak so preizkušali pozitivne učinke konvencionalnih premazov in obdelave z nitridiranjem/ oksinitridiranjem v enakem preizkusu. Rezultati celotnega dela so izpostavili pomanjkljivosti maraging jekel ter dobre rezultate aditivne in konvencionalne proizvodnje toplotno obdelanih orodnih jekel, pri čemer aditivna izdelava teh jekel izkazuje boljšo odpornost na spajkanje. Z dodatno obdelavo površine je mogoče bistveno povečanje termokemijske odpornosti.



Dr. Sebastijan Kastelic,
predavatelj in predsedujoči

4. V. KOLDA, Mecas ESI (CZ): **Najnovejši trendi pri računalniški simulaciji tlačnega litja**

Ob standardnih analizah, kot sta temperatura litega materiala in hitrost pretoka, lahko sedaj spremljamo oksidacijo kovine, njeno starost in trajanje, gibanje kovine in tujkov, tlak bata ali celo tlak lokalnega stiskanja. Dolgo časa je usmeritev bila le v ulitke same in ne v metode obdelave forme. Prav tako so z razvojem novih tehnoloških možnosti zahteve postale vse večje. Na področju simulacij je potrebno odkrivanje in napovedovanje za izboljšanje spremljanja same tehnologije. To je do sedaj bilo vključeno zgolj v poenostavljeni obliki. Predstavljena je industrijska uporabnost novega pristopa k simulaciji cikla visokotlačnega litja v praksi. Prikazana je pomembnost opisovanja hlajenja forme v dejanskih pogojih in z realno površinsko obdelavo, saj je brez tega napovedovanje življenjske dobe forme nemogoče.



Nejc Marčič, predavatelj

5. N. MARČIČ¹, S. KASTELIC^{2,3}, A. MAHMUTOVIĆ², A. MIKLOŽIČ¹, P. MRVAR³, ¹Mariborska livarna Maribor (SI), ²TC Livarstvo (SI), ³Univerza v Ljubljani NTF: **Optimizacija hlajenja tlačno ulitega dela z uporabo numeričnega izračuna**

Numerični izračuni livarskih procesov nam danes omogočajo vpogled v posamezno sekvenco litja tako, da nam pomagajo odkriti vzroke za nastale napake. Z razumevanjem vzrokov napak lahko pristopimo k optimizaciji procesa najprej v virtualnem smislu in nato v samem postopku litja. Prikazana je uspešna optimizacija procesa tlačnega litja. V raziskanem primeru so bile težave s pregrevanjem posameznih delov orodja in jeder. Na osnovi numerične analize stanja so bile predlagane spremembe hladilnega sistema. Za učinkovito odvajanje toplote je bilo potrebno povečati površino hladilnega sistema na kritičnih mestih. Hladilne površine so bili ustrezno približane površini jedra in na ta način povečale učinkovitost odvoda toplote. Na bolj kompleksnih odvodih toplote so bili bolj optimalno razporejeni hladilni kanali in s tem povečana površina v kontaktu s hladilnim medijem. Vse rešitve so bile

najprej preizkušene virtualno in ko je bilo doseženo željeno temperaturno polje v orodju, se je potrdila odločitev za dejanske spremembe na orodju.



Predstavniki Carl Zeiss

6. M. POZZI¹, B. BOHL², ¹Zeiss IQS (IT), ²Zeiss SSC (A): Popolnoma avtomatizirana z linijo integrirana računalniška tomografija v industriji aluminija-pridobitev točnih podatkov o izdelkih v zelo kratkem času.

Predstavljen je nov razvoj na področju kontrole v okviru proizvodnih linij ter predstavljen koncept delovanja računalniške tomografije (CT) v proizvodni liniji ter prednosti povezave v primerjavi s klasično radioskopijo. Podane so bile integracije in izboljšave zahvaljujoč zasnovi prehajanja vzorcev skozi sistem. Z integracijo sistema VoluMAXthunder v proizvodne linije in procese je možno doseči skrajšanje časa in večjo kakovost. Zahvaljujoč

razvoju opreme Zeiss automated defect detection je možno samodejno zaznati napake, poiskati njihova mesta, jih razvrstiti in med proizvodnjo oceniti. Podjetje Zeiss je razvilo opremo za zajemanje posnetkov, rekonstrukcijo, vizualizacijo, evalvacijo in upravljanje podatkov na enem mestu. Celovit paket programske opreme omogoča uporabnikom popoln nadzor nad celotno proizvodnjo in postopkom za zagotavljanje kakovosti.



Dr. Mitja Petrič, predavatelj in predsedujoči



Jaka Trček, predavatelj



Daniel Frese, predavatelj

7. M.PETRIČ, B.ZEKA, P. MRVAR, B. LESKOVAR, B. MARKOLI, Univerza v Ljubljani (SI): **Razvoj zlitine AlSi7Mg z dodatkom litija**

Aluminijeve zlitine z dodatkom litija odlikujejo majhna gostota in dobre mehanske lastnosti, predvsem pa izboljšani modul elastičnosti. Izboljšane mehanske lastnosti so posledica izločevalnega utrjevanja, pri katerem se izloča metastabilna δ' faza. Težave pri zlitinah z dodatkom litija, pa so v hitri oksidaciji Li. Ob tem lahko prihaja do redukcije drugih kovinskih oksidov in ob tem sproščanja plinov, ki povzročajo poroznost. Predstavljene so raziskave dodajanja Li livarski aluminijevi zlitini AlSi7Mg z maksimalnim dodatkom 1%Li. Preučeval se je vpliv različnih formarskih materialov na kakovost površine ulitka in količino reakcijskih produktov. Najboljšo površino ulitkov zagotavljata grafitna in jeklena forma. Izvedena je bila enostavna termična analiza in opisan potek strjevanja zlitine na osnovi termodinamičnih izračunov faznih ravnotežij. Z optično metalografsko analizo ter vrstično elektronsko mikroskopijo so bile identificirane faze AlLiSi in ostale, ki so prisotne v zlitini AlSiMg. Testiranja mehanskih lastnosti so pokazale, da med naravnim staranjem prihaja do povišanja trdote, kar nakazuje na najverjetnejše izločanje Al₃Li faze.

8. J. TRČEK, J. ŠTUCIN, Hidria d.o.o. (SI): **Optimizacija temperirnih kanalov izdelanih s postopkom SML**

V livarni podjetja HIDRIA Alutec proizvajajo tlačne ulitke iz Al-zlitin za avtomobilsko industrijo, ki zahtevajo visoko kakovost. Visokotlačno litje aluminija je kompleksen proces, kjer vsaka sprememba v procesu pripomore h kakovosti izdelanega ulitka. S pomočjo postopka SMS-selektivnega laserskega pretaljevanja, se lahko izvede kompleksnejše temperiranje v livarskih orodjih. Pri načrtovanju kanalov je možno s pomočjo simulacij optimizirati oblike in velikost kanalov. V podjetju za to uporabljajo računalniški paket Magmasoft, s pomočjo katerega lahko simulirajo poljubno obliko temperirnega kanala, izračunajo pretok in spremembo temperature ter s tem koeficient prenosa toplote kanala. To se upošteva pri izračunu temperature med ciklom litja. S simulacijo proces litja tako dosežejo, da ima površina orodja enakomerno temperaturo, kar je velikega pomena za doseganje kakovostnih zahtev ulitkov.

9. D. FRESE, Krüss GmbH (D): **Metode kota omočenja in površinske napetosti za določanje čistosti pri litju**

Pri optimizaciji procesov igrajo veliko vlogo morebitne nečistoče, saj imajo lahko že sledi relativno močan vpliv. Prav tako se ulitki pri nadaljnji obdelavi pogosto premazujejo in lepijo. Omočenje površin lahko tako vodi do razlik med simulacijami in eksperimenti. Zgotoviti je potrebno čisto površino podlage in poznati osnovne lastnosti, predvsem površinsko

napetost in kot omočenja kovinske taline. Predstavljene so rešitve za obe omenjeni zahtevi. Pri atmosferskih pogojih so meritve kota omočenja preprosto in zmogljivo orodje za preverjanje čistoče ulitih delov. Že majhne količine ostankov nečistoč vplivajo na lastnosti testne tekočine. Potrebno je uporabljati prenosne merilce kota omočenja. Optimalni čas čiščenja v ultrazvočni kopeli je določen na podlagi sprememb površinske napetosti. Druga metoda za določanje površinske napetosti litih delov, je uporaba testnih črnih ali peres Dyne. Vendar testna črnila zanemarjajo medfazno površinsko napetost med tekočino in trdno snovjo in ne upoštevajo polarnih/disperzijskih interakcij. Šibke točke testnih črnih so bile podrobno predstavljene. Predstavljen je bil še test pripravljen za merjenje kota omočenja, površinske napetosti in dimenzije kapljic kovinske taline na keramiki. Parametre meritev vnesemo v simulacije in tako pomagamo preprečiti potencialne livarske napake, kot so nepopolno zapolnjena livna forma in hladni zvari.



Milan Kambič, predavatelj

10. M. KAMBIČ¹, F. CECCHETTO², P. GRUBELNIK¹, ¹Olma d.o.o. (SI), ²MotulTech-Baraldi (IT): Vidiki in izzivi mazanja bata z oljem

Mazanje bata na visokotlačnih livarskih livnih strojih je zahteva in lahko tudi problem. Za zagotavljanje zadostnega mazanja livnega bata in doseganje dovolj visokega števila ciklov pred zamenjavo bata in livne komore je potrebno dodajati zadostno količino maziva, saj del maziva ob polnjenju komore zgori, del maziva pa prehaja v talino in lahko povečuje plinsko poroznost ulitkov in nekovinske vključke. Z boljšimi mazalnimi lastnostmi se poveča število ciklov, ki jih izvedemo z enim batom, podaljša pa se tudi življenjska doba livne komore. S tem se zmanjšajo tudi zastoji zaradi zamenjave batov in znižajo stroški. Glavni poudarek predstavitve je bila uporaba sintetičnih olj brez grafita. S to uporabo znižamo poroznost ulitkov, odpravimo del vključkov in zmanjšamo plamen. Z odpravo dima, ki sicer nastaja pri zgorevanju klasičnih maziv, pa preprečimo prekomerno emisijo plinov.



Luka Kranjc, predavatelj

11. L. KRAJNC¹, M. BOJINOVIĆ¹, M. PETRIČ², ¹Pro Labor d.o.o. (SI), ²Univerza v Ljubljani (SI), Tehnološki pristop k digitalizaciji livarn

Digitalizacija livarn je eden izmed temeljev za boljšo kakovost, večjo produktivnost in učinkovitost livarskih proizvodov. V preteklosti so promotorji digitalizacije bili na eni strani računalniški programerji, ki niso dovolj poznali livarskih procesov, na drugi strani pa tehnologi, ki pa niso imeli znanja o programiranju. Cilj te študije je bil, da se pregleda vse glavne tehnološke in proizvodne parametre livarn in da se najde najboljše rešitve za njihovo digitalizacijo in njihovo shranjevanje v učinkovitih programskih sistemih. Predstavljeni so bili glavni parametri po posameznih področjih in prikazana je njihova integracija v glavno IT arhitekturo na ravni celotnega podjetja.

Predstavil:

Zasl. prof. dr. Alojz Križman

Predsednik programsko znanstvenega odbora



zasl. prof. dr. Alojz
Križman, predavatelj in
predsedujoči



prof. Dr. Ivan Anžel,
predavatelj in predsedujoči



prof. Dr. Franc Zupanič,
predavatelj in predsedujoči



Dr. Maja Vončina,
predavateljica in
predsedujoča



Dr. Matej Drobne,
predsednik in predsedujoči

AKTUALNO / CURRENT

Galerija slik vseh razstavljalcev na 60. IFC Portorož 2020



WEILER ABRASIVES d.o.o.



ALTAIR/WEISS SIMULATION d.o.o.



BRIO-MOULDS S.r.l.



CARL ZEISS d.o.o.



AVL LIST GmbH



BELLOI & ROMAGNOLI S.r.l.



BL METAL



FOMET S.r.l.



CHEMETS d.o.o. + VOXELJET AG



EDC PROTECTION SAS



EKW-KREMEN d.o.o.



EXOTERM-IT d.o.o.



F.LLI MAZZON S.p.A.



HAGI GmbH



HYDRAPROSER HYDRAULIK SYSTEME GMBH



INDUCTOTHERM EUROPE Ltd



INTERGUSS GIEßEREIPRODUKTE



GAMBAZZI Srl



INSTRO d.o.o.



IRT 3000



LIVING d.o.o.



KOSMEK EUROPE GmbH



LABTIM d.o.o.



MODELLERIA ZUIN s.r.l.



NORICAN GROUP/PSR d.o.o



OLMA d.o.o.



OTTO JUNKER GmbH



POUR-TECH AB



PRIMAKEM d.o.o



SIAPRO d.o.o



SP SÜDDEUTSCHE PRÜFANLAGEN GmbH



STEM d.o.o



TERMIT d.d.



RWP GmbH



TC LIVARSTVO d.o.o. + MECAS ESI



TCT TESIC GmbH



University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering

AKTUALNO / CURRENT**Pregled livarskih prireditev v letih 2021 in 2022**

Datum dogodka	Ime dogodka	Mesto in država
09.03.2021	Druckgusstag	Nuernber, Nemčija
15.- 16.04.2020	64.Oesterreichische Giesserei -Tagung	Schladming, Avstrija
12.- 14.06.2021	19. International Foundrymen Coference	Split, Hrvaška
27.- 28.05.2020	Deutscher Giessereitag	Aachen, Nemčija
14.-15.06.2021	Forum Giesserei-Industrie	Wuerzburg, Nemčija
08.- 09.10.2021	Zink Die Casting Conference	Koblenz, Nemčija
15.- 17. 09.2021	61. IFC Portorož 2021	Portorož, Slovenija
18.- 20.01.2022	EUROGUSS	Nuernber, Nemčija
2022	75 th World Foudry Congers	Italija





DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE

Vabilo za

61. IFC PORTOROŽ 2021

z livarsko razstavo

15.-17. SEPTEMBER 2021

Kontakt: DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE,
Lepi pot 6, p.p. 424, 1001 Ljubljana
T: +386 1 2522 488, F: +386 1 4269 934
drustvo.livarjev@siol.net, www.drustvo-livarjev.si

Instro d.o.o., Stegne 7, 1000 Ljubljana, Slovenija

email: info@instro.si, Tel. +386 (0)40 243 755 www.instro.si



Elementna analiza



Vakuum

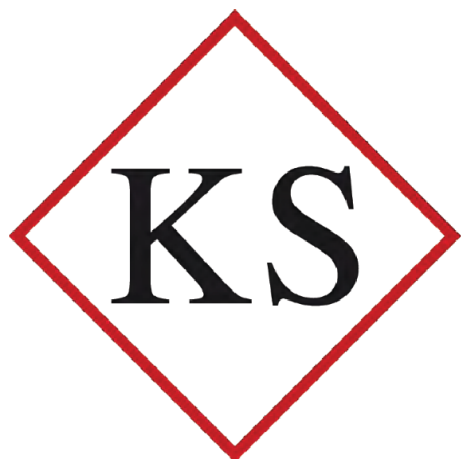
Neporušitvene
preiskave



Tehnična diaagnostika:
ultrazvok, vibracije in
termografija



Meritve sevanja in
kontaminacije



KNEISSL & SENN TECHNOLOGIE GMBH

www.ks-tech.at



Mühlgraben 43b | A-6343 Erl | Tirol | Austria
t. +43 (0)5373 76020-0
f. +43 (0)5373 76020-20
e. info@ks-tech.at

www.ks-tech.at





TERMIT

Družba TERMIT je rudarsko podjetje
za pridobivanje kremenovih peskov



NAŠ PROGRAM:

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

www.termit.si