

LIVARSKI VESTNIK

69/2022

4



DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE
SLOVENIAN FOUNDRYMEN SOCIETY

**FLUORINE
PROBLEMS IN
FOUNDRY?**

HA
ITALIA



OUR SOLUTION:
A **FULL RANGE** OF
FLUORINE-FREE FEEDERS

ha-italia.com

CHEMEX
Foundry Solutions GmbH
Member of HAF Group

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@exoterm.si

LIVARSKI VESTNIK

Izdajatelj / Publisher:

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

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

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

Tehnično urejanje / Technical editing:
mag. Mirjam Jan-Blažić**Uredniški odbor / Editorial board:**

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

**Prevod v angleški jezik /
Translation into English:**

Marvelingua, Aljaž Seničar s.p.

Lektorji / Lectors:

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

Tisk / Print:

Fleks d.o.o.

Naklada / Circulation:

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

Letna naročnina: 35 EUR z DDV

Year subscription: 35 EUR (included PP)

Dano v tisk: december 2022

**Naslov / Address**

HA Italia S.p.A.
Viale della Scienza 78-80
36100 Vicenza

Direktor: Andrea Todeschini

T: +39 0444 337444
E: info@ha-italia.com
www.ha-italia.com

VSEBINA / CONTENTS

Stran / Page:

M. Pesci: Preprečevanje degeneracije grafita z napajalniki brez fluora CHEMEX / Preventing Graphite Degeneration with Fluorine-Free CHEMEX Feeders	196
M. Matejka, D. Bolibruchová, A. Sládek, R. Podprocká: Vrednotenje notranje homogenosti zlitine AlSi7Mg0,3Cu0,5 z dodatkom Zr, Ti in Sr / Internal Homogeneity Evaluation of AlSi7Mg0.3Cu0.5 Alloy with Addition of Zr, Ti, and Sr	212
J. Poklič, A. Nagode, P. Mrvar, A. Tekavčič, M. Petrič: Primerjava udarne in lomne žilavosti sive litine s kroglastim grafitom in feritnega jekla / Comparison of Impact and Fracture Toughness of Ductile Iron and Ferritic Steel	228

AKTUALNO / CURRENT

Povzetki vseh predavanj z 62. IFC Portorož 2022	242
74. Svetovni livarski kongres – 74 th WFC 2022	258
Pregled livarskih prireditvev v letu 2023	259
Seminar za tlačne livarne v firmi Bühler, Švica	260
Voščilo	261
Oktobrsko poročilo CAEF o stanju v evropski livarski industriji	262
63. IFC PORTOROŽ 2023	263

Preprečevanje degeneracije grafitu z napajalniki brez fluora CHEMEX

Preventing Graphite Degeneration with Fluorine-Free CHEMEX Feeders

Povzetek

V sodobnih livarnah uporaba natančnih napajalnikov oblikovalcem pomaga preprečiti poroznost v ulitkih iz nodularnega grafitnega železa, kar zagotavlja strukturno celovitost in mehanske lastnosti v skladu z zahtevami stranke. Hkrati pa lahko uporaba teh napajalnikov vpliva na metalurške vidike. V okolici oblog in mini napajalnikov je pogosto prisoten nenormalen ali celo degeneriran grafit, kar vodi do izgube mehanskih lastnosti do točke, ko je potrebno ulitek zavreči. Namen te študije je bil oceniti učinek eksotermnih oblog tako z vidika morfologije grafitu v površini ulitka kot tudi prisotnosti napake »ribje oko«. Preiskava je bila izvedena s primerjavo različnih vrst napajalnikov, kot so vložne obloge in mini napajalniki. Predvsem smo analizirali grafitno strukturo ob prisotnosti inovativnega eksotermnega materiala brez fluora podjetja CHEMEX in jo primerjali s klasičnimi eksotermnimi materiali, ki so na voljo na trgu.

Za izvedbo projekta je bila zasnovana modelna plošča s kockami z različnimi toplotnimi moduli, izračunanimi s simulacijsko programsko opremo NovaFlow&Solid: 1,6 cm, 1,9 cm in 2,3 cm. Eksperimentalni preskus je bil izveden v dejanski livarni, in sicer z litjem standardne sive litine s kroglastim grafitom razreda EN-GJS-500-7. Celoten postopek taljenja je bil nadzorovan z uporabo sistema za nadzor metalurških procesov ATAS MetStar 10.1, ki deluje na podlagi termične analize. Ugotovili smo, da lahko eksotermni napajalniki brez fluora CHEMEX zagotovijo popolno celovitost površine ulitka ter popolno nodularnost pod vratom napajalnika in neposredno ob njegovi površini zloma.

Ključne besede: napajalniki, degenerirani grafit, napaka »ribje oko«, eksotermne obloge, brez fluora

Abstract

Increasingly, in modern foundries, the application of precise feeders helps designers to prevent porosity in nodular graphite iron castings, ensuring the structural integrity and mechanical performance required by the client. However, at the same time, the metallurgical aspect can be affected by the use of these feeders. Indeed, the presence of abnormal or even degenerated graphite is often found in the surrounding area of sleeves and mini-risers, leading to a loss of mechanical properties to the point of scraping the casting. This study aimed to evaluate the effect of exothermic sleeves, both in terms of graphite morphology in the casting skin, and the presence of a fish-eye defect. The investigation was carried out by comparing different types of feeders, such as insert sleeves and mini-risers. Especially, the graphitic structure was analysed in the presence of CHEMEX's innovative fluorine-free exothermic material and compared with classical exothermic materials available on the market.

For the implementation of the project, a model plate was designed with cubes featuring different thermal moduli calculated by using NovaFlow&Solid simulation software: 1.6 cm, 1.9 cm and 2.3 cm. The experimental test was carried out in a real foundry by casting standard ductile iron grade EN-GJS-500-7. The entire melting process was monitored by using ATAS MetStar 10.1 adaptive metallurgical process control system based on thermal analysis. It was found that CHEMEX fluorine-free exothermic feeders can guarantee the full integrity of casting skin as well as complete modularity below the feeder's neck and immediately close to its fracture surface.

Keywords: feeders, degenerated graphite, fish-eye defect, exothermic sleeves, fluorine-free

1 Uvod

Zaradi naravnega krčenja kovine med strjevanjem je treba uporabiti dodajalnike, ki lahko tekočo kovino dovajajo v času in na mestu, kjer je potrebna. Z leti je postala uporaba oblog in mini napajalnikov ustaljena praksa za izdelavo primernih ulitkov tudi na izoliranih ali težko dostopnih območjih. Na trgu so se pojavile nove vrste visoko zmogljivih eksotermnih napajalnikov. Hkrati pa lahko pri izdelavi oblog in mini napajalnikov z neprimernimi mešanici nastanejo tudi hude napake v ulitkih. Najpogostejše napake, ki jih povzročajo eksotermni napajalniki, so:

- podpovršinska degeneracija grafita;
- napaka »ribje oko«.

Obe napaki vplivata na strukturo in celovitost na površinski in podpovršinski ravni ter ogrožata njihovo trdnost ulitkov. Obnašanje mehansko obremenjenih komponent iz litega železa, ki so izpostavljene utrujanju, je vedno pogostejše v središču pozornosti. Tudi livarji se dandanes zavedajo, da na življenjsko dobo komponente, izpostavljene utrujanju, močno vpliva material, še bolj pa kakovost/stanje njegove površine (npr. hrapavost površine, preostala napetost itd.) [1]. Zato predstavlja kakovost površine in območja pod površino ključni dejavnik. V skladu s tem

1 Introduction

The natural shrinkage of metal during solidification leads to the use of feeders capable of supplying liquid metal when and where it is needed. Over the years, the use of sleeves and mini-risers has become common practice to ensure the soundness of castings even in isolated or difficult-to-access areas. Moreover, new types of high-performance exothermic feeders have appeared on the market. At the same time, if sleeves and mini-risers are produced with unsuitable mixtures, they can lead to serious defects in the cast parts. The most common defects caused by exothermic feeders include:

- subsurface graphitic degeneration;
- fish-eye defect.

Both of these defects affect the structure and integrity at the surface and subsurface levels, compromising the fatigue strength of castings. Indeed, the behaviour of a cast iron mechanical component exposed to fatigue is increasingly the focus of attention. Even foundrymen are now aware that the life of a component exposed to fatigue is strongly influenced by the material, and even more so by its surface quality/condition (e.g., surface roughness, residual stress, etc.) [1]. Hence, surface and subsurface quality is a key factor. With this in mind, it is essential to

je treba raziskati in opredeliti prizadevanja, ki so potrebna za zagotavljanje vedno natančnejše površinske obdelave tudi pri ulitkih v litem stanju, in sicer z izbiro najboljših napajalnikov, ki so na voljo.

1.1 Degeneracija grafita

Čeprav se mehanske lastnosti strojno obdelanih vzorcev razvrščajo v skladu z mednarodnimi standardi (EN ali ASTM), večina ulitih sestavnih delov ohrani večino svoje površine v litem stanju. Ta površinski sloj, imenovan »skorja« ulitka, obsega površinski in podpovršinski sloj. Zaradi površine ulitka je mogoče močno vplivati na mehanske lastnosti sestavnih delov, zlasti na njihovo trdnost [2].

Nekateri avtorji so opazili, da se natezna trdnost in raztezek GJS zmanjšujeta zaradi površine ulitka, kar je pogosto povezano z mikrostrukturnimi odstopanji, kot v primeru degeneriranega grafita [2], [3]. Perlitno plast [4] so našli tudi v ulitkih s popolnoma feritno matrico. Pojav je bil raziskan tudi z ulitki iz sive litine z lamelnim grafitom. Prof. Stefanescu poroča o jasnem povečanju natezne trdnosti po odstranitvi približno 1 mm plasti vzorca, ki je vseboval grafit tipa D in popolnoma feritiziran sloj [2].

Ker ima površinska obdelava očitno tako pomemben vpliv na statične mehanske lastnosti, lahko pričakujemo, da bo ta vpliv še bolj izrazit v povezavi z lastnostmi utrujenosti. Prof. Stefanescu [2] je dognal, da so glavni viri poslabšanja mehanskih lastnosti zaradi kakovosti površine ulitka:

- hrapavost površine, ki lahko deluje kot hranilnik napetosti;
- površinske razpoke, razen hrapavosti, ki sprožijo lom;
- sprememba kovinske matrice v podpovršinskem sloju v primerjavi z matrico litja (npr. izčrpavanje ogljika);

investigate and identify the efforts required to ensure an increasingly accurate surface finishing even in as-cast castings by choosing the best feeders available.

1.1 Graphitic Degeneration

Although mechanical properties are classified accordingly with international standards (EN or ASTM) on machined specimens, most cast components retain much of their as-cast surface. This surface layer, referred to as the "skin" of the casting, includes both the surface and the subsurface layer. Due to the casting skin, the mechanical properties of the components can be significantly affected, particularly the fatigue strength [2].

Some authors have observed a tendency for the tensile strength and elongation of GJS to decrease due to casting skin, often associated with microstructural deviations, such as degenerated graphite [2], [3]. A pearlite layer [4] was also found in castings with a fully ferritic matrix. The phenomenon was also verified on lamellar graphite cast iron castings. Indeed, Prof. Stefanescu reports evidence of a clear increase in tensile strength after removing about 1mm of the sample layer, which had a D-type graphite and a fully ferritised layer [2].

Since the surface finishing appears to have such a significant effect on static mechanical properties, the effect is expected to be even more notable on fatigue properties. As reported by Prof. Stefanescu [2], it is well-known that the main sources of reduction in mechanical properties due to skin quality are:

- surface roughness, which can act as a stress accumulator;
- surface cracks, other than roughness, which act as a trigger for fracture;

- degeneracija grafita na podpovršinskih območjih oslabi površino ulitka.

Najbolj očiten primer teh mikrostrukturnih napak je sloj degeneriranega grafita (DGL) [5]. Ta napaka nastane zaradi absorpcije žvepla ali kisika med strjevanjem. Z zmanjšanjem učinka preostalega magnezija iz sive litine s kroglastim grafitom pride do nastanka lamelne plasti grafita na fronti med materialom forme in staljeno kovino. Poglobljene študije reakcij na fronti med formo in kovino so pravzaprav pokazale, da med polnjenjem in strjevanjem na površini poteka termično aktivirana kemijska reakcija. Reakcijski vmesni produkti, ki vsebujejo žveplo in kisik, nastanejo iz formarskih materialov med njihovo toplotno razgradnjo, absorbira pa jih tekoča kovina. To pomeni, da atomi žvepla ali kisika v tekoči kovini popolnoma disociirajo in reagirajo z magnezijem, kar vodi do nastanka MgS ali MgO . Vsebnost magnezija v talini blizu površine forme/kovine nato postopoma izpari, kar povzroči nastanek DGL [5].

Ta proces je izrazit pri večjih debelinah in zato daljših stopnjah ohlajanja, saj ima material forme več časa za dovajanje žvepla in/ali kisika tekoči kovini in posledično za ustvarjanje debelejšega sloja degeneriranega grafita. Proces nastanka DGL se razlikuje glede na vsebnost preostalega magnezija. Poleg tega se pri zmanjšanju preostalega magnezija, na primer v litini z vermikularnim grafitom GJV, pojavi večji sloj degeneriranega grafita, saj so bili pogoji odvajanja Mg doseženi mnogo hitreje. Posledično lahko debelina DGL sega več milimetrov pod površino ulitka [5].

Ker se DGL lahko pojavlja tako z žveplom kot s kisikom bogatih formarskih materialih, lahko to površinsko degeneracijo najdemo v številnih ulitkih iz sive litine s kroglastim grafitom, od tankostenskih ulitkov do težkih ulitkov, izdelanih v peščeni

- the change in the metal matrix in the subsurface layer, compared to the casting matrix (e.g., carbon depletion);
- the degeneration of graphite in subsurface areas weakens the casting "skin".

The most obvious example of these microstructural defects is the Degenerated Graphite Layer (DGL) [5]. This defect is caused by the absorption of sulphur or oxygen during solidification. Reducing the effect of residual magnesium from GJS, leads to the formation of a lamellar graphite layer at the interface between the moulding material and the molten metal. In-depth studies of reactions at the mould/metal interface have observed that a thermally activated chemical reaction takes place at the surface during filling and solidification. Reaction intermediates containing sulphur and oxygen are formed from the moulding materials during their thermal decomposition and are absorbed by the liquid metal. This means that the sulphur or oxygen atoms dissociate completely in the liquid and react with magnesium, leading to the formation of MgS or MgO . The magnesium content in the liquid metal near the mould/metal surface then gradually evaporates causing the formation of DGL [5].

This process is emphasised for larger thicknesses and, therefore, longer cooling rates as the moulding material has more time to supply sulphur and/or oxygen to the liquid metal, and consequently create a thicker DGL. The process of DGL formation varies depending on the residual magnesium content. Moreover, a higher DGL occurs with reduced residual magnesium, for example in GJV cast iron; because the condition of Mg removals reached much faster. As a result, the thickness of the DGL may extend for several millimetres below the surface of the casting [5].

mešanici, vezani z umetnimi vezivi. Pri kemijskem formanju z uporabo fenolnih ali furanskih smol je nastanek DGL pretežno posledica sulfonskih spojin, ki so prisotne v katalizatorju, tj. komponenti, bogati z žveplom. V tem primeru lahko prisotnost kisika poveča negativni učinek [5]. Pri izdelavi form iz svežega peska se kisik zagotavlja zaradi prisotnosti vode. Zaradi toplotnih obremenitev med polnjenjem in strjevanjem lahko voda disociira in kisik se sprosti v tekočo kovino, kar zmanjša učinek Mg in tvori se lamelni grafit. Prav tako smo zaznali tudi difuzijo kisika skozi stene Croning ki je povzročila nastanek DGL na fronti kovina/lupina [5].

Čeprav ima DGL na statične mehanske lastnosti zgolj omejen vpliv, pa negativno vpliva na nihajno trdnost komponent GJS. To je še posebej pomembno za sodoben pristop k načrtovanju litih sestavnih delov na podlagi življenjske dobe, tj. na podlagi poznavanja cikličnega vedenja materiala. Te morfološke napake površine ulitka preprečujejo zanesljivo oceno dejanske nihajne trdnosti. V praksi se s to težavo soočamo tako, da v fazi načrtovanja sestavnih delov uporabimo visoke varnostne faktorje, s čimer zmanjšamo potencialno zmanjšanje teže ulitkov GJS in povečamo njihove proizvodne stroške.

1.2 Napaka »ribje oko«

Ta napaka se na površini ulitkov kaže v obliki nepravilnih luknjic z bolj ali manj nazobčanimi robovi.

Običajno vsebujejo eksotermne obloge aluminij kot gorivo, kovinske okside in/ali nitrate kot oksidante ter tudi fluorove soli (npr. kriolit – Na_3AlF_6) kot iniciatorje in pospeševalce reakcije [6]. Pokazalo se je, da se lahko napaka pojavi že pri 200 ppm preostalega fluora v peščeni mešanici [6].

Since DGL can occur in both sulphur and oxygen-rich moulding materials, this surface degeneration can be found in a wide range of spheroidal iron castings, from thin-walled components to heavy castings made in chemically bonded sand. In the case of chemical moulding, using phenolic or furan resins, the formation of DGL is caused more by the sulphonic compounds present in the catalyst, i.e., the sulphur-rich component. In this case, the presence of oxygen may increase the negative effect [5]. In the case of green sand moulding, the presence of water acts as an oxygen supplier. Due to thermal stress during filling and solidification, water can dissociate and oxygen is released into the liquid metal, reducing the effect of Mg and forming lamellar graphite. Oxygen diffusion was also observed through the walls of the shells formed by the Croning method, where it caused DGL formation at the metal/shell interface [5].

Although static mechanical properties can only be slightly affected by DGL, the latter negatively influences the fatigue strength properties of GJS components. This is particularly critical for the modern approach to the design of cast components based on service life, i.e., based on knowledge of the cyclical behaviour of the material. These morphological defects of the skin prevent a reliable estimate of the actual fatigue strength. In practice, this problem is faced by applying high safety factors at the component design stage, thus reducing the potential lightening of GJS castings and increasing their production costs.

1.2 Fish-Eye Defect

This defect appears on the surface of the castings as irregular pockmarking with more or less jagged edges.

Mehanizem nastanka napak je bil opisan kot intenzivna aluminotermična reakcija, ki jo katalizira fluor in okrepi preostala voda, ki jo absorbira sveži pesek [6], [7]. Analize z vrstičnim elektronskim mikroskopom so razkrile bele usedline in visoke koncentracije fluora [7] znotraj tipične luknjičaste površine te napake. Zato je treba za odpravo te težave iz peska za formanje odstraniti vire fluora in klasične izotermne in eksotermne dodajalnike nadomestiti z napajalniki brez fluora (Slika 1).

2 Eksperimentalni del

Namen te študije je bil oceniti učinek eksotermnih oblog tako z vidika morfologije grafitu v površini ulitka kot tudi prisotnosti napake »ribje oko«. Zato je bila preiskava izvedena s primerjavo različnih vrst napajalnikov, tj. vzporednih stožčastih vložnih oblog in mini napajalnikov. Primerjan je bil tudi učinek klasičnih mešanic v primerjavi z mešanicami brez fluora, ki jih je izdelalo podjetje CHEMEX (Preglednica 1).

2.1 Geometrija ulitka

Za izvedbo projekta smo se odločili oblikovati vzorec plošče s kockami z različnimi moduli (Slika 2). Ulili smo kocke naslednjih dimenzij: 83 mm × 83 mm × 83 mm, 100 mm × 100 mm × 100 mm in 117 mm × 117 mm × 117 mm. Toplotne module 1,6 cm, 1,9 cm in 2,3 cm smo izračunali s simulacijsko programsko opremo NovaFlow&Solid. V tej študiji smo se odločili osredotočiti na kocko z največjim modulom.

2.2 Formanje in litje vzorcev

Vsi potrebni okvirji so bili oblikovani iz svežega peska in nato uliti z metodo gravitacijskega litja v skladu s standardnim

Typically, exothermic sleeves contain aluminium as a fuel, metal oxides and/or nitrates as oxidisers, and also fluorine salts (e.g., cryolite – Na_3AlF_6) as initiators and propagators of the reaction [6]. It has been shown that the defect can occur as early as 200ppm of residual fluorine in the moulding sand [6]. The mechanism of defect formation has been explained as an intense aluminothermic-type reaction catalysed by fluorine and intensified by free water absorbed by the green sand [6], [7]. Scanning Electron microscopy observations revealed white deposits and high concentrations of fluorine [7] within the typical pitted surface of this defect. Therefore, to eliminate this problem, it is necessary to remove the sources of fluorine from the moulding sand, replacing the use of classic iso/exothermic feeders with fluorine-free ones (Figure 1).

2 Experimental Part

This study aimed to evaluate the effect of exothermic sleeves, both in terms of graphite morphology in the casting skin, and of the presence of a fish-eye defect. The investigation was, therefore, carried out by comparing different types of feeders, i.e., both parallel conical insert sleeves and mini-risers. The effect of classic mixtures versus fluorine-free mixtures produced by CHEMEX (Table 1) was also compared.

2.1 Casting Geometry

For the implementation of the project, we decided to design a model plate with cubes featuring different modules (Figure 2). Specifically, cubes with the following dimensions were cast: 83 mm × 83 mm × 83 mm, 100 mm × 100 mm × 100 mm

postopkom livarne, ki je sodelovala pri projektu. Osnovna kovina je bila pripravljena v rotacijski peči s kovinsko šaržo, prikazano v Pregl. 2.

Nodulacija je bila izvedena s sendvič metodo v 700-kilogramskem loncu, v kateri je bila železova zlitina 1 % FeSiMg 631 prekrita z ustrezno ploščo. Železu je bilo pred litjem dodano 0,2 % cepiva, ki je vsebovalo 4 % aluminija. Končno železo je bilo EN-GJS-500-7 v skladu s sprejemljivimi razponi livarne. Vsi ulitki so bili uliti iz iste končne litine, njena kemijska analiza pa je podana v Pregl. 3. Celoten postopek taljenja je bil nadzorovan z uporabo sistema za nadzor metalurških procesov ATAS MetStar 10.1, ki deluje na podlagi termične analize.

2.3 Raziskava po litju

Ulitki so bili ustrezno očiščeni z metodo peskanja, ki se je uporabljala v livarni, tj. s približno 10-minutnim ciklom v bobnastem peskalnem stroju s trakom. Po čiščenju je bil opravljen začetni vizualni pregled ulitkov, nato pa je sledil razrez na dve polovici. Na tej stopnji smo ocenili učinkovitost napajanja.

2.4 Metalografska preiskava

Vsi potrebni metalografski vzorci so bili odvzeti iz kocke z največjim modulom, kot je prikazano na Sliki 3. Po tem ko se je vzorec odrezal na pravo velikost, je bil ta vstavljen v epoksidno smolo in zloščen do odsevne površine za namene preiskave pod optičnim mikroskopom. Celotna metalografska analiza je bila izvedena s svetlobnim mikroskopom Leica, opremljenim s programsko opremo za analizo posnetkov Olympus. Mikroposnetki so bili posneti pri 50-kratni in 100-kratni povečavi pred

and 117 mm × 117 mm × 117 mm. That is, with 1.6 cm, 1.9 cm and 2.3 cm thermal modulus calculated using NovaFlow&Solid simulation software. For the purpose of this study, we decided to focus on the cube with the largest modulus.

2.2 Moulding and Casting of Samples

All necessary flasks were formed in green sand and then cast with the gravity pouring method by the standard process of the foundry involved in the project. The base metal was prepared in the rotary kiln with the metal charge shown in Table 2.

The modularization was carried out via the sandwich method in a 700 kg ladle, where 1 % ferroalloy FeSiMg 631 was covered with the appropriate sheet. The iron was inoculated before casting with 0.2 % inoculant containing 4 % aluminium. The final iron was an EN-GJS-500-7 according to the foundry's acceptable ranges. All castings were cast from the same final cast iron, the chemical analysis of which is given in Table 3. The entire melting process was monitored using the ATAS MetStar 10.1 adaptive metallurgical process control system based on thermal analysis.

2.3 Post-Casting Survey

Castings were cleaned accordingly with the blasting method used in the foundry, i.e., a cycle of approximately 10 minutes in a tumble belt shot-blasting machine. After cleaning, an initial visual inspection of the castings was carried out, followed by sectioning into two halves. Feeding efficiency was evaluated at this stage.



Slika 1. Površina v litem stanju v stiku s formarskim peskom, pripravljenim z ostanki obloge, bogatimi s fluorom (levo); površina v litem stanju v stiku s formarskim peskom, pripravljenim z ostanki obloge brez fluora (desno). Povzeto po [7].

Figure 1. As-cast surface in contact with moulding sand prepared with fluorine-rich sleeve residues (left); as-cast surface in contact with moulding sand prepared with fluorine-free sleeve residues (right). Adapted from [7].

Preglednica 1. V tem delu uporabljene obloge in mini napajalniki.

Table 1. Sleeves and mini-risers used in this work.

Manica Sleeve	Origine Origin	ID	Modulo (cm) Modulus (cm)	Volume (cm ³) Volume (cm ³)
7/10	Produttore/Producer 1	KX	2.0	300
7710	Produttore/Producer 2	SX	2.0	300
70/100 W CB43	CHEMEX	CX	2.0	296
121/50	Produttore/Producer 1	FX	1.9	104
TELE 100 25 (40) CB31/21	CHEMEX	T100	1.9	96
TELE 125 32/14B0 CB43/21	CHEMEX	T125	2.0	104

Preglednica 2. Sestava šarže osnovnega železa.

Table 2. Charge composition of base iron.

Pani GJS GJS pig iron	Ritorni GJS GJS returns	Pet-Coke Pet-Coke	FeSi75	SiC
50%	45%	3%	1%	1%



Slika 2. Vzorec modelne plošče, ki jo je zasnovalo podjetje HA ITALIA in je bila proizvedena za projekt.

Figure 2. Model plate designed by HA ITALIA and manufactured for the project.

Preglednica 3. Kemijska analiza končnega litega železa, uporabljenega za izdelavo celotne serije ulitkov projekta (vrednosti v %).

Table 3. Chemical analysis of the final cast iron used to produce the whole series of castings of the project (values in %).

C	Si	P	Mn	Cu	Mg	S
3.72	2.65	0.052	0.21	0.048	0.039	0.009

jedkanjem z 2-odstotnim nitalom in po njem. Preiskava se je osredotočila na vedenje na območju stika med oblogo in preskusno kocko. Nadaljnji posnetki so bili zajeti na različnih razdaljah od površine.

3 Rezultati

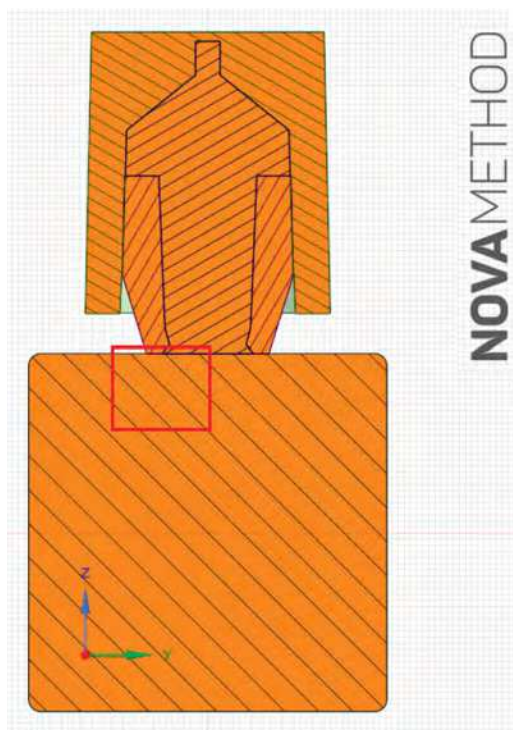
Spremljanje procesa taljenja s programsko opremo ATAS MetStar 10.1 je potrdilo hiperevtektično sestavo končne litine (Slika 4). Kot so dognali drugi avtorji [5], ta sestava ni ogrozila študije, temveč je omogočila izražanje določenih morfologij grafita. Analiza ulitkov takoj po peskanju je pokazala boljšo čistost na območju obloge pri vzorcih CX, T100 in T125. Pri serijah KX in SX je površina bolj luknjičasta. Pri podrobnem pregledu ulitkov je mogoče opaziti bele obloge v kockah, izdelanih z oblogami KX in SX. Te usedline so lahko v celoti posledica napake »ribje oko«, ki se na stiku med formo in kovino pojavi v primeru visoke vsebnosti fluora, kot je razvidno iz eksperimentalnih dokazov, kot so jih dognali že drugi avtorji [6], [7]. Takšnih usedlin ni bilo ob prisotnosti oblog CHEMEX brez fluora (Slika 5). Po razrezu so vse ulite kocke brez poroznosti zaradi krčenja, razen kocke, izdelane brez napajanja. Opaziti je mogoče, kako mini napajalnik T100 odlično napoji ulitek, s čimer se zmanjša količina dovajane kovine. Zlasti kocke, ulite z mini napajalnikom T100, so bile popolnoma brezhibne in zagotavljajo pribl.

2.4 Metallographic Survey

All necessary metallographic specimens were taken from the cube with the highest modulus as shown in Fig.3. After appropriate reduction, the sample was embedded in epoxy resin and polished to a mirror finishing for investigation under an optical microscope. The complete metallographic analysis was conducted using a Leica light microscope equipped with Olympus image analysis software. Micrographs were acquired at 50× and 100× magnification, both before and after etching with 2 % Nital. The investigation focused on the behaviour in the contact area between the sleeve and the test cube. Further images were, however, collected at different distances from the surface.

3 Results

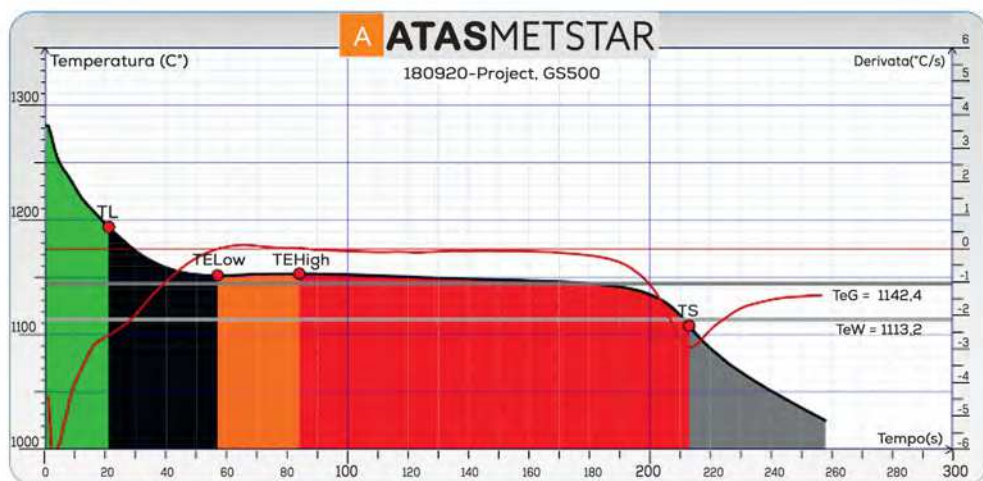
Monitoring of the melting process using ATAS MetStar 10.1 confirmed the hypereutectic composition of the final cast iron (Figure 4). As presented by other authors [5], this composition did not compromise the study, but rather allowed certain morphologies of the graphite to be emphasised. Observing the castings immediately after shot-blasting revealed better cleanliness in the sleeve area of samples CX, T100 and T125. Indeed, the surface is more pitted in the KX and SX series. Looking at the castings in detail, white deposits can be noticed in the cubes made with KX and SX sleeves.



Slika 3. Območje vzorčenja metalografskih vzorcev.

Figure 3. Sampling area for metallographic samples.

These deposits can be entirely due to the fish-eye defect, which occurs in case of high fluorine contents at the mould/metal interface, as shown by the experimental evidence already found by other authors [6], [7]. Such deposits were not found in the presence of fluorine-free CHEMEX sleeves (Figure 5). After sectioning, all the cast cubes are free of shrinkage porosity, except for the cube made without feeding. It is noticeable how the T100 mini-riser can feed the casting perfectly, saving metal feeding volume. Especially, the cubes casted with T100 mini-riser were fully soundness with approx. 8 % liquid saving, despite being



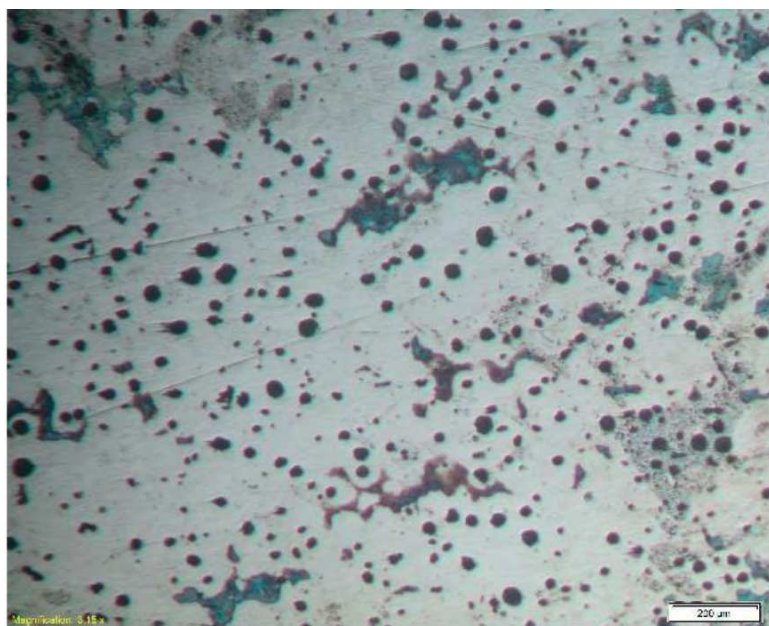
Slika 4. Ohlajevalna krivulja z izpeljanko za končne litine, ki je bila ulita za projekt. Črno območje v programski opreji ATAS MetStar je vidni znak hipereutektične sestave.

Figure 4. Cooling curve with its derivative of the final cast iron cast for the project. The black area in ATAS MetStar is a visual indication of the hypereutectic composition.



Slika 5. Detajl kocke, ulite z oblogo KX. Na luknjičasti površini so vidni beli nanosi, značilni za napako »ribje oko«.

Figure 5. Detail of cube casted with KX sleeve. White deposits typical of fish-eye defect are evident within the pitted surface.



Slika 6. Mikrostruktura kocke brez napajalnikov po jedkanju z 2-odstotnim nitalom (F80 %/P20 %). 50-kratna povečava.

Figure 6. Microstructure of the cube without feeders after etching with 2 % Nital (F 80 %/P20 %). Magnification 50×.



Slika 7. Nejedkana mikrostruktura podpovršinskega območja kocke, ulite z mini napajalnikom FX (vzporedni stožčasti vložni tulec 7/10, proizvajalec 1). Na stičnem območju je vidna lamelasta plast površine ulitka (50-kratna povečava).

Figure 7. Unetched microstructure of the subsurface area of the cube cast with FX mini-riser (parallel conical insert sleeve 7/10, manufacturer 1). The lamellar skin layer can be seen at the interface zone (magnification 50×).



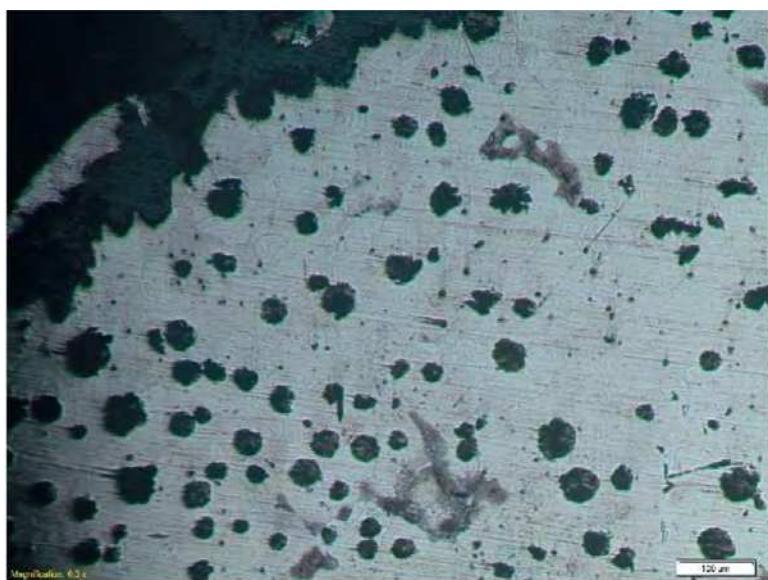
Slika 8. Morfologija grafita vzorcev z mini napajalnikom FX (vzporedni stožčasti vložni tulec 7/10, proizvajalec 1). Po prehodu fronte med formo in kovino se degeneracija nadaljuje do prehodnega območja med lamelnimi in degeneriranimi noduli (50-kratna povečava).

Figure 8. Graphite morphology for samples with the FX mini-riser (parallel conical insert sleeve 7/10, manufacturer 1). After passing the mould/metal interface, the degeneration continues to a transition zone between lamellar and degenerated nodules (magnification 50×).



Slika 9. Nejedkana mikrostruktura podpovršinskega območja kocke, ulite z mini napajalnikom CHEMEX T125 (50-kratna povečava).

Figure 9. Unetched microstructure of the subsurface area of the cube cast with CHEMEX T125 mini-riser (magnification 50×).



Slika 10. Morfologija grafita po jedkanju z 2-odstotnim nitalom na podpovršinskem območju kocke, ulite z mini napajalnikom CHEMEX T125 (100-kratna povečava).

Figure 10. Graphite morphology after etching with 2 % Nital of the subsurface area of the cube cast with CHEMEX T125 mini-riser (magnification 100×).

8 % prihranka tekoče kovine, čeprav so bile z vidika izbire modula namenoma na meji.

Mikroposnetek kocke, ulite brez napajalnika in uporabljene kot referenca za študijo, je prikazan na Sliki 6. Predstavlja tipično strukturo končnega litega železa, izbranega za preskuse (EN-GJS-500-7). Mikroskopska analiza podpovršinskih območij je razkrila močno prisotnost DGL v kockah, izdelanih z mini napajalniki FX. Zlasti smo zaznali izredno drobno, popolnoma lamelasto plast grafita tipa A z debelino do 2 mm (Slika 7). V teh vzorcih je na meji območja lamelnega grafita opaziti mešano prehodno območje z vermikularnim grafitom in nepravilnimi krogli (tj. oblika IV) (Slika 8). Po drugi strani pa je pri vzorcih, ulitih z mini napajalniki CHEMEX, podpovršinska struktura grafita v bližini obloge in v stiku z njim homogena in oblike VI (Sliki 9 in 10).

4 Sklepi in obeti

Med najpogostejšimi napakami, ki jih povzročajo eksotermni napajalniki, sta nastajanje plasti degeneriranega grafita (DGL) in napaka »ribje oko«, ki ogrožata strukturo in celovitost na površinski ravni kot tudi pod površino, kar poslabša nujno trdnost in močno skrajša življenjsko dobo sestavnega dela. Pokazalo se je, da na nujno trdnost litoželeznega sestavnega dela močno vpliva sam material, še bolj pa kakovost površine (npr. hrapavost površine, preostala napetost itd.). Zato smo se v tej študiji osredotočili na kakovost površine in zlasti na morfologijo grafitne strukture ulitkov iz sferoidne litine na območjih blizu eksotermnih napajalnikov, izdelanih po klasičnih in brezfluornih recepturah podjetja CHEMEX.

V vzorcih FX (mini napajalniki proizvajalca 1) je bila prisotna močna

deliberatno pri izbiri modula na meji izbire modula.

A micrograph of the cube casted without any feeder and used as a reference for the study is shown in Fig.6. It presents the typical structure of the final cast iron selected for the trials (EN-GJS-500-7). Microscopy analysis of the subsurface areas showed strong DGL in the cubes produced with FX mini-risers. In particular, a very fine, fully lamellar A-type graphite layer with thickness up to 2 mm was observed (Figure 7). In these samples, a mixed transition zone with vermicular graphite and irregular nodules (i.e., form IV) can be observed at the border of the lamellar graphite area (Figure 8). On the other hand, the specimens casted with CHEMEX mini-risers, the subsurface graphitic structure near and in contact with the sleeve is homogenous and VI-shaped (Figure 9 and Figure 10).

4 Conclusions and Prospects

Among the most common defects induced by exothermic feeders, degenerated graphite layer (DGL) formation and fish-eye defect compromise the structure and integrity at the surface and subsurface level, thus impairing fatigue strength performance and severely reducing the life of the component. Indeed, it has been shown that the fatigue strength of a cast iron component is strongly influenced by the material itself, but even more so by its surface quality (e.g., surface roughness, residual stress, etc.). Hence, in this study, we focused on the surface quality and, particularly, on the morphology of the graphitic structure of spheroidal cast iron castings in the areas close to the exothermic feeders, made with classic and fluorine-free recipes produced by CHEMEX.

FX samples (mini-risers from manufacturer 1) showed deep graphitic

degeneracija grafita v podpovršinskem območju v bližini obloge in v območjih preloma, in sicer do 2 mm popolnoma lamelnega grafita. Nasprotno pa je bila v vzorcih z mini napajalnikom CHEMEX TELE 100-25(40) CB31/21 in TELE 125-32/14B0 CB43/21 razkrita nodularna struktura tudi v podpovršinskem območju. Pri vzporednih stožčastih vložnih oblogah KX in SX proizvajalcev 1 in 2 je bila poleg DGL prisotna tudi značilna napaka »ribje oko«, pri kateri so se poleg vdolbinic pojavile tudi značilne bele obloge v površinskih porah. Ta napaka ni bila ugotovljena pri vzporednih stožčastih vložnih oblogah, ki jih proizvaja družba CHEMEX.

Zdi se, da ta študija potrjuje mehanizme, ki so jih predlagali drugi avtorji [5], [6], torej da sta obe težavi, povezani z napajalnim sistemom (tj. napaka »ribje oko« in DGL), lahko povezani z močno alumotermično reakcijo, ki jo katalizira fluor in okrepi preostala voda, ki jo absorbira peščena mešanica, ki lahko v tem primeru disociira, kar tekoči kovini omogoči dostop do kisika, zmanjša učinek Mg in posledično se tvori lamelni grafit. Raziskava je pokazala, da so napajalniki družbe CHEMEX, ki ne vsebujejo fluora, boljši z vidika kakovosti površine ulitka, in sicer tako v zvezi s strukturno kot morfološko celovitostjo grafita. Z vidika napajanja so bile obloge CHEMEX TELE 100-25(40) CB31/21 zelo učinkovite, saj so kljub manjšemu modulu v primerjavi z modulom FX omogočili prihranek 8 % kovine.

Ta študija je del širšega sklopa analiz, ki jih bodo podrobno proučili v kompetenčnem centru Hüttenes-Albertus – HA.

degeneration in the subsurface area near the sleeve and the fracture zones of the feeder, down to 2 mm of fully lamellar graphite. Conversely, CHEMEX mini-riser samples, TELE 100-25(40) CB31/21 and TELE 125-32/14B0 CB43/21, showed a nodular structure even in the subsurface zone. The parallel conical insert sleeves KX and SX, from manufacturers 1 and 2, in addition to the DGL also showed the typical fish-eye defect where, besides the pitted effect, they also showed the typical white deposits within the surface pores. This defect was not found with parallel conical insert sleeves manufactured by CHEMEX.

This study seems to confirm the mechanisms proposed by other authors [5], [6], i.e., that both problems linked to the feeding system (i.e., fish-eye defect and DGL) can be related to the intense aluminothermic reaction catalysed by fluorine and intensified by free water absorbed by the moulding sand, which in this case can dissociate making oxygen available to the liquid metal, reducing the effect of Mg and thus forming lamellar graphite. The study showed that CHEMEX's fluorine-free feeders perform better in terms of casting skin quality, both concerning the structural and morphological integrity of the graphite. In terms of feeding efficiency, CHEMEX TELE 100-25(40) CB31/21 sleeves performed very well saving 8 % metal, despite a smaller module than the FX.

This study is part of a wider set of analyses that will be studied in detail at the Hüttenes-Albertus – HA Centre of Competence.

Viri / References

- [1] M. Kovkavec, R. Konecna e G. Nicoletto, "Influence of surface quality on fatigue behaviour of nodular cast iron," *Acta Metallurgica Slovaca*, vol. 17, pp. 99-105, 2011.
- [2] D. Stefanescu, S. Willis e J. Massone, "Quantification of casting skin in ductile and compacted graphite iron and its effect on tensile properties," *International Journal of Metal casting*, 2008.
- [3] G. Goodrich e R. Lobenhofer, "Effect of cooling rate on ductile iron mechanical properties," *AFS Transactions*, vol. 110, pp. 1003-1032, 2002.
- [4] M. Starkey e P. Irving, "A comparison of the fatigue strength of machined and as-cast surfaces of SG iron," *Int. J. Fatigue*, 1982.
- [5] A. Kutz, P. Martin e A. Buhning-Polaczek, "Microstructural adjustment of the degenerated graphite layer in ductile iron for targeted evaluation on the fatigue properties," *International Journal of Metalcasting*, 2020.
- [6] R. Aufderheide, R. Showman, J. Close e E. Zins, "Eliminating fish-eye defects in ductile castings," *AFS Transactions*, 2002.
- [7] A. Rosário e M. Hupalo, "Characterization of surface fish-eye casting defect," *Rev. Esc. Minas*, 2013.

Vrednotenje notranje homogenosti zlitine AlSi7Mg0,3Cu0,5 z dodatkom Zr, Ti in Sr

Internal Homogeneity Evaluation of AlSi7Mg0.3Cu0.5 Alloy with Addition of Zr, Ti, AND Sr

Povzetek:

Dandanes inženirske industrije nenehno poudarjajo izboljšanje lastnosti materialov. Eden od načinov za izboljšanje lastnosti zlitine Al je dodajanje legirnih elementov. Ena od možnosti je uporaba Zr v zlitinah Al, ki pozitivno vpliva na povečanje trdnosti, odpornosti proti koroziji in toplotne odpornosti. Najpogosteje se izceja v obliki intermetalnih faz Al_3Zr oziroma AlSiZr. Nastane med peritektično reakcijo pri masnem deležu $Zr \geq 0,1$ mas. %. Osnovna morfologija intermetalnih faz Zr (disperzoidov) je v obliki dolgih iglic oziroma ploščic, njihova velikost pa se povečuje z večanjem vsebnosti Zr. Dodatek Zr in Ti zlitinam Al-Si povzroči močnejše udrobnjevanje kot pri uporabi posameznih elementov. Sr skupaj z Zr tvori faze na osnovi $Al_3(Sr_{1-x}Zr_x)$, ki lahko delujejo kot nukleacijska mesta kristalizacije. Prispevek se osredotoča na možnosti izboljšanja lastnosti zlitine AlSi7Mg0,3Cu0,5, obogatene z elementi na osnovi Zr, Ti in Sr, lite v keramične forme s tehnologijo precizijskega litja. Najboljše rezultate je dala zlitina z dodatkom 0,15 mas. % Zr in 0,2 mas. % Ti. Zlitina ima izboljšane mehanske lastnosti in ugodne lastnosti precipitiranih faz Zr v mikrostrukturi.

Ključne besede: zlitina Al-Si-Mg-Cu, dodatek Zr, Ti in Sr, mikrostruktura, mehanske lastnosti

Abstract:

Nowadays, engineering industries are constantly emphasizing the improvement of the material's properties. One way to improve the properties of the Al alloy is by adding the alloying elements. One of the possibilities is the application of Zr to Al alloys, which has a positive effect on increasing strength, corrosion resistance, and heat resistance. It is most often segregated in the form of intermetallic phases Al_3Zr respectively AlSiZr. Formation occurs during the peritectic reaction at $Zr \geq 0.1$ wt. %. The basic morphology Zr of intermetallic phases (dispersoids) is in the form of long needles resp. plates, their size increases with increasing content of Zr. The addition of Zr and Ti to Al-Si alloys results in more intensive grain refinement than when using individual elements alone. Sr together with Zr forms $Al_3(Sr_{1-x}Zr_x)$ based phases which can act as crystallization nuclei. The submitted paper focuses on the possibilities of improving the performance of AlSi7Mg0.3Cu0.5 alloy enriched with elements based on Zr, Ti, and Sr, cast into ceramic molds by investment casting technology. The best results were obtained by an alloy with an addition of 0.15 wt. % Zr and 0.2 wt. % Ti. The alloy showed an increase in mechanical properties and a positive character of the precipitated Zr phases in the microstructure.

Keywords: Al-Si-Mg-Cu Alloy, Addition of Zr, Ti, and Sr, Microstructure, Mechanical properties

1 Uvod

Ker sta livarska in metalurška industrija pomemben del industrijske proizvodnje, je treba povečati njuno učinkovitost in hkrati ohraniti konkurenčnost na svetovnih trgih [1]. Možnosti je več: od izboljšanja recikliranja kovinskega vračljivega materiala prek posodobitve proizvodnih tehnologij do razvoja novih materialov, ki predstavljajo bistveno izboljšanje izbranih lastnosti, podedovanih od predhodnikov. Razvoj novih materialov je zapleten proces, ki pa prinaša pomembne pozitivne učinke [2].

Razvoj novih, bolj izpopolnjenih zlitin Al, je lahko usmerjen ne samo v spreminjanje vsebnosti glavnih legirnih elementov (npr. Si, Mg ali Cu), ampak lahko na zlitine vpliva tudi majhno število posebnih legirnih, inokulacijskih in modifikacijskih elementov (kot so Zr, Cr, Ni, Mo, Mn, V, Ti, Sr itd.). Ti lahko vplivajo na način kristalizacije zlitin Al, kar pomembno vpliva na spremembo izbranih lastnosti. Ena od možnosti je uporaba Zr v zlitinah Al, saj pozitivno vpliva zlasti na povečanje trdnosti, odpornosti proti koroziji, toplotne odpornosti in toplotne (termične) trdnosti. Najpogosteje segregira v obliki intermetalnih faz Al_3Zr ali $AlSiZr$ [3,4]. Izločanje poteka med peritektsko reakcijo pri vsebnosti $Zr \geq 0,1$ mas.%. Osnovna morfologija intermetalnih faz Zr (dispersoidov) je v obliki dolgih acikularnih (igličastih) oblik ali ploščic, njihova velikost pa narašča z večanjem vsebnosti Zr. Posamezne iglice so gladke z rahlo razcepljenimi konci. Faze Zr se izločajo v dveh različnih kristalografskih morfologijah. Prva je tetragonalna mreža DO_{23} , ki pomembno vpliva na lastnosti trdnosti, vendar pa se zaradi zmanjšane simetrije tetragonalnih mrež poveča krhkost, kar negativno vpliva na duktilnost in modul elastičnosti. L_{12} je koherentna kubična

1 Introduction

As the foundry and metallurgical industries are an integral part of industrial production, there is a need to make them more efficient, while maintaining competitiveness in world markets [1]. There are several options: from improving the recycling of metal returnable material, through the modernization of production technologies, to the development of new materials that achieve a significant improvement in selected properties inherited from their predecessors. The development of new materials is a complicated process, but it brings significant positives [2].

The development of new more sophisticated Al alloys can be oriented not only to change the content of the main alloying elements (e.g. Si, Mg or Cu), but the alloys can also be influenced by a small number of specific alloying, inoculating, and modifying elements (such as Zr, Cr, Ni, Mo, Mn, V, Ti, Sr, etc.). These can influence the method of crystallization of Al alloys, which significantly affects the change in selected properties. One of the possibilities is the application of Zr to Al alloys, which has a positive effect, especially on the increase of strength, corrosion resistance, heat resistance, and heat strength (thermal strength). It is most often segregated in the form of intermetallic phases of Al_3Zr or $AlSiZr$ [3,4]. Excretion occurs during the peritectic reaction at Zr contents ≥ 0.1 wt. %. The basic morphology of Zr intermetallic phases (dispersoids) is in the form of long acicular (needle-like) forms or plates, their size increasing with increasing Zr content. The individual needles are smooth with slightly split ends. The Zr phases are excreted in two different crystallographic morphologies. The first is the DO_{23} tetragonal lattice, which is important for influencing the strength characteristics. However, the reduced symmetry of the tetragonal lattices causes

mreža, ki s svojo simetrijo kompenzira negativne lastnosti tetragonalne mreže DO_{23} [5,6].

Kot je splošno znano, se Ti v zlitinah Al uporablja kot sredstvo za inokulacijo, ki omogoča nastanek kali kristalizacije in izboljša strukturo faze α . Dodatek Zr in Ti zlitinam Al-Si povzroči bolj intenzivno udrobnjevanje v primerjavi z uporabo samo posameznih elementov. Ti se izloča v obliki faze Al_3Ti , za katero je značilna tetragonalna mreža DO_{22} . Atomska razdalja v mreži DO_{22} do najbližjega soseda je približno 0,2826 nm v ravnini $\{112\}$, v ravnini $\{111\}$ pa 0,2856 nm. Nizka prepustnost kristalografske mreže v ustreznih kontaktnih ravninah nakazuje naraščajoči učinek inokulacije v zlitinah Al. Sinergijski učinek Zr in Ti naj bi povečal lastnosti trdosti, trdoto in verjetno tudi toplotno odpornost zlitin Al-Si [7,8].

Sinergijsko delovanje Zr in Sr lahko pozitivno vpliva na zmanjšanje velikosti zrn, ta učinek pa je odvisen od njunih masnih razmerij v zlitini. Sr skupaj z Zr tvori faze na osnovi $Al_3(Sr_{1-x}Zrx)$, ki lahko delujejo kot nukleacijska mesta. Povečana vsebnost Sr lahko povzroči nastanek oksidov SrO in Al_2SrO_3 , ki negativno vplivajo na talino. Vendar pa so raziskave pokazale, da prisotnost oksidov majhnih velikosti pomaga pri oblikovanju nukleacijskih mest, zlasti tistih na osnovi Al_3Zr . Za razliko od kombinacije Zr in Sc ali Zr in Ti kombinacija Zr in Sr v aluminijevih zlitinah ne spremeni strukture v nedendritsko, hkrati pa lahko te faze nase vežejo Fe [9,10].

2 Metodologija

Poskusi so bili razdeljeni na dve različici materiala, ki se med seboj razlikujeta po vsebnosti Ti in Sr. Ti in Sr sta bila v talino vnesena s hkrati delujočim Zr. Rezultate smo primerjali z zlitino brez dodatka

an increase in brittleness, which hurts the ductility and modulus of elasticity. The L_{12} lattice is a cubic coherent lattice that, with its symmetry, compensates for the negative properties of the DO_{23} tetragonal lattice [5,6].

As is generally known, Ti is used in Al alloys as an inoculating agent, which allows the formation of crystallization nuclei and refines the structure of the α phase. The addition of Zr and Ti to Al-Si alloys results in a more intensive grain refinement compared to using the individual elements alone. Ti is excreted in the form of the Al_3Ti phase, which is characterized by the DO_{22} tetragonal lattice. The atomic distance in the DO_{22} lattice from the nearest neighbor is around 0.2826 nm in the $\{112\}$ plane, while it is 0.2856 nm in the $\{111\}$ plane. The low permeability of the crystallographic lattice in the respective contact planes indicates an increasing inoculating effect in Al alloys. The synergistic effect of Zr and Ti should increase the strength properties, and hardness, but also probably the heat resistance of Al-Si alloys [7,8].

The synergistic action of Zr and Sr can have a positive effect on the reduction of grain size, and this effect depends on their weight ratios in the alloy. Sr, together with Zr, forms $Al_3(Sr_{1-x}Zrx)$ -based phases that can act as nucleating nuclei. The increased content of Sr can cause the formation of SrO and Al_2SrO_3 oxides, which hurt the melt. However, research has shown that the presence of small-size oxides helps to form nucleation nuclei, especially those based on Al_3Zr . Unlike the combination of Zr and Sc or Zr and Ti, the combination of Zr and Sr in aluminum alloys does not change the structure to non-dendritic and at the same time, the given phases can bind Fe to them [9,10].

legirnega elementa (AlSi7Mg0,3Cu0,5 = zlitina R) ter zlitino s stalno količino Zr 0,15 mas.% (AlSi7Mg0,3Cu0,5Zr0,15 = zlitina P).

Eksperimentalno delo je bilo opravljeno pri treh stopnjah vsebnosti legirnih elementov za različice materiala Zr+Ti in Zr+Sr. Novo nastale različice materialov smo primerjali z zlitinami brez dodatka legirnih elementov (zlitina R) in z dodatkom samo Zr (zlitina P) (Preglednica 1). Zaradi poenostavitve označevanja so v drugih delih dokumenta uporabljene samo črke eksperimentalnih zlitin (navedene v Preglednici 1) in ne kemijske označbe (formule). Kemijska sestava je bila določena s spektroskopijo, inducirano z iskrenjem (Bunker – Q2 ION, Kalkar, Nemčija).

Posamezne različice materiala so bile s tehnologijo precizijskega litja ulite v keramične forme (Slika 1). Keramična forma je bila izdelana v treh plasteh (kontaktna, izolacijska in ojačitvena). Keramične forme so bile 1,5 ure žgane pri temperaturi 750 ± 10 °C. Nato so bile keramične forme odstranjene iz peči in pripravljene za litje. Površinska temperatura keramičnih form pred litjem je bila 510-540 °C. Temperatura litja eksperimentalnih zlitin je bila 750 ± 10 °C. Višina litja je merila 200 mm od vhodne odprtine. Hitrost litja je bila 0,6 kg.s⁻¹.

2 Methodology

The experiments were divided into two material variants, which differ from each other in the content of Ti and Sr. Both Ti and Sr were introduced into the melt with the coating Zr. The results were compared with an alloy without the addition of the alloying element (AlSi7Mg0.3Cu0.5 = R alloy) and with an alloy with a constant amount of Zr 0.15 wt. % (AlSi7Mg0.3Cu0.5Zr0.15 = P alloy).

Experimental work was performed at three levels of alloying elements contents for the Zr+Ti and Zr+Sr material variants. The newly formed material variants were compared with alloys without the addition of alloying elements (R alloy) and with the addition of only Zr (P-alloy) (Table 1). To simplify the marking, only the letters of the experimental alloys (listed in Table 1) are used in the other parts of the paper and not the chemical marking (formulas) of the alloys. The chemical composition was determined by arc spark spectroscopy (Bunker - Q2 ION, Kalkar, Germany).

The individual material variants were cast into ceramic molds by investment casting technology (Figure 1). The ceramic mold was made in three layers (contact, insulating, and reinforcing). The ceramic

Preglednica 1. Kemijska sestava referenčnih (R), primarnih (P) in eksperimentalnih zlitin (E, F) (mas.%).

Table 1. Chemical composition of reference (R), primary (P), and experimental alloys (E, F) (wt.%).

Zlitina / Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Ti	Cr
R – AlSi7Mg0,3Cu0,5	6,88	-	0,10	0,01	0,12	0,54	0,07	0,37
P – AlSi7Mg0,3Cu0,5Zr0,15	6,86	0,13	0,16	0,01	0,12	0,55	0,07	0,37
E1 – AlSi7Mg0,3Cu0,5Zr0,15Ti0,1	6,96	0,12	0,23	0,01	0,13	0,55	0,07	0,37
E2 – AlSi7Mg0,3Cu0,5Zr0,15Ti0,2	6,68	0,14	0,28	0,01	0,13	0,54	0,07	0,35
E3 – AlSi7Mg0,3Cu0,5Zr0,15Ti0,3	6,51	0,13	0,37	0,01	0,13	0,52	0,07	0,34
F1 – AlSi7Mg0,3Cu0,5Zr0,15Sr0,1	6,55	0,13	0,11	0,10	0,11	0,51	0,07	0,36
F2 – AlSi7Mg0,3Cu0,5Zr0,15Sr0,2	6,38	0,13	0,10	0,19	0,11	0,50	0,07	0,35
F3 – AlSi7Mg0,3Cu0,5Zr0,15Sr0,3	6,04	0,14	0,10	0,29	0,11	0,5	0,07	0,35

1. Po litju so se keramične forme eno uro hladile na zraku. Zlitina AlSi7Mg0,3Cu0,5 ni usklajena s standardom EN 1706 in ima možnosti uporabe, zlasti v avtomobilski industriji. Zlitino AlSi7Mg0,3Cu0,5 je proizvajalec že dobavil v modificiranem in udrobljenem stanju. Taline namenoma niso bile razplinjene.

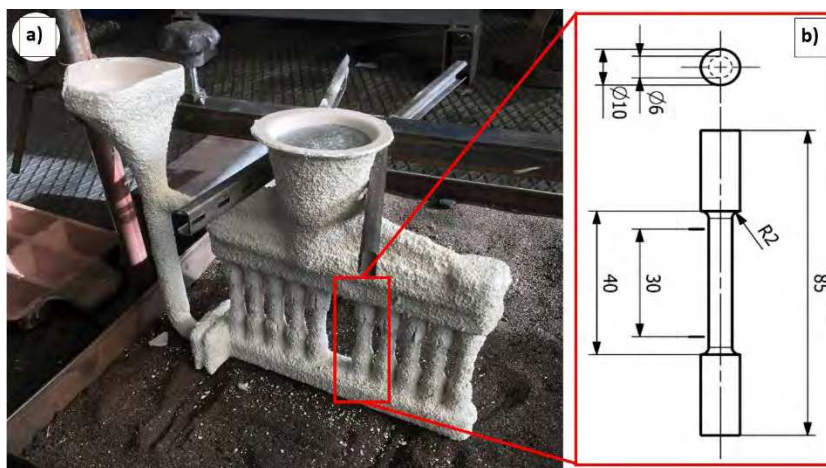
Zr je bil dodan v obliki predzlitine AlZr15 , Ti v obliki predzlitine AlTi5B in Sr v obliki AlSr10 . Eksperimentalne zlitine E1 do E3 so bile zlitine z različnimi stopnjami dodatka Ti v razponu od 0,1 mas.% do 0,3 mas.% Ti. Eksperimentalne zlitine F1 do F3 so bile modificirane z različnimi stopnjami dodatka Sr v razponu od 0,1 mas.% do 0,3 mas.%.

2.1 Toplotna obdelava in oprema

Iz vsake različice materiala je bila polovica vzorcev toplotno obdelana (HT) s strjevanjem precipitata T6 (5 od 10 kosov

molds were fired at a temperature of 750 ± 10 °C for 1.5 hours. Subsequently, the ceramic molds were removed from the furnace and prepared for casting. The ceramic molds had a surface temperature of 510-540 °C before casting. The casting temperature of the experimental alloys was 750 ± 10 °C. The casting height reached 200 mm from the inlet well. The casting velocity was 0.6 kg.s^{-1} . After casting, the ceramic mold was cooled in the air for 1 hour. The AlSi7Mg0.3Cu0.5 alloy is not standardized by the EN 1706 standard and has application possibilities, especially in the automotive industry. The AlSi7Mg0.3Cu0.5 alloy was already delivered by the manufacturer in a pre-modified and pre-inoculated state. The melts were intentionally not degassed.

Zr was added in the form of AlZr15 master alloy, Ti in the form of AlTi5B master alloy, and Sr in the form of AlSr10 . Experimental alloys E1 to E3 were alloyed with a graded addition of Ti in the range from 0.1 wt. % to 0.3 wt. % Ti. Experimental alloys F1 to F3 were modified with a graded



Slika 1. (a) Keramična forma, ki jo je dobavilo podjetje AluCAST s.r.o., (b) shema preskusnega vzorca.

Figure 1. (a) Ceramic mold supplied by AluCAST s.r.o., (b) Scheme of the test specimen.

litih vzorcev iz ene eksperimentalne taline). Režim toplotne obdelave T6 je bil sestavljen iz obdelave raztopine (540 ± 5 °C/12 ur), gašenja (voda 66 ± 2 °C) in umetnega staranja (155 ± 5 °C / 5 ur).

Mehanski preskusi so bili izvedeni z napravo za prelome Inspekt Table 50 kN v skladu s standardom EN ISO 6892-1. Vse navedene vrednosti mehanskih lastnosti so povprečne vrednosti petih meritev. Za oceno mikrostrukture po toplotni obdelavi so bili izbrani vzorci, povezani z najvišjimi vrednostmi mehanskih lastnosti. Vzorci so bili pripravljeni po standardnih postopkih, vendar so bili zaradi povečanja z Zr bogatega faznega kontrasta jedkani s H₂SO₄. Vzorce smo ocenili z optičnim mikroskopom (OM) Nikon Epiphot 200 (Nikon, Tokio, Japonska) in vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM) z energijsko-disperzijskimi spektrometri Oxford Ultim Max z vrstičnim elektronskim mikroskopom 65 (Oxford Instruments, Abingdon, Združeno kraljestvo).

3 Rezultati

3.1 Ocena mikrostrukture

AlSi7Mg0,3Cu0,5 (zlitina R – Slika 2a,b) je predhodno udrobljena, predhodno modificirana podevtektska zlitina z modificiranim evtektikom in udrobljenimi dendriti faze α . V strukturi smo zaznali tudi faze Al₂Cu in Mg₂Si, ki omogočajo utrjevanje zlitine. Škodljivo vsebnost Fe smo nadomestili z ustrezno vsebnostjo Mn, zato je mogoče opaziti s Fe bogate faze v obliki t. i. kitajskih pismenk. Vidno nastajanje faz Zr v kovinski matrici AlSi7Mg0,3Cu0,5Zr0,1 (zlitina P) se pojavi že pri vsebnosti Zr $\geq 0,1$ mas.% (Slika 2c, d). Zr se najpogosteje pojavi v obliki dolgih gladkih iglic z rahlo razcepljenimi konci. Z večanjem vsebnosti

amount of Sr in the range of 0.1 wt. % to 0.3 wt. %.

2.1 Heat Treatment and Equipment

From each material variant, half of the samples were heat treated (HT) by precipitation hardening T6 (5 pieces out of 10 pieces of cast samples from one experimental melt). The T6 heat treatment regime consisted of solution treatment (540 ± 5 °C / 12 h), quenching (water 66 ± 2 °C), and artificial aging (155 ± 5 °C / 5 h).

Mechanical tests were performed on an Inspect Table 50 kN rupturing device according to EN ISO 6892-1. All reported values of mechanical characteristics are average values from 5 measurements. Samples that reached the highest values of mechanical characteristics were selected to evaluate the microstructure after heat treatment. Samples were prepared by standard procedures, but to increase Zr - rich phase contrast, samples were etched with H₂SO₄. Samples were evaluated using an optical microscope (OM) Nikon Epiphot 200 (Nikon, Tokyo, Japan) and scanning electron microscope (SEM) observations with energy-dispersive detectors Oxford Ultim Max scanning electron microscope 65 (Oxford Instruments, Abingdon, United Kingdom).

3 Results

3.1 Evaluation of Microstructure

AlSi7Mg0.3Cu0.5 (R alloy – Figure 2 a, b) is a pre-inoculated, pre-modified sub-eutectic alloy with modified eutectic and refined α phase dendrites. The phases of Al₂Cu and Mg₂Si were also observed in the structure, which enable the hardening

Zr je prišlo do pričakovanega povečanja faz Zr. Te faze so zaradi toplotne obdelave razpadle, razpad pa je bil bolj izdaten, če je bila vsebnost Zr $\geq$ v zlitini 0,2 mas.%. To dejstvo označuje manjšo stabilnost tako nastalih faz Zr v zlitini P.

Pri zlitinah Zr s Ti (zlitine E1-E3) je nastalo večje število faz Zr (Slika 3a, c, e). Zanje je bila značilna bolj koherentna, krajša morfologija brez razcepljenih koncev. Število faz Zr se je v danih različicah materiala v primerjavi z zlitinami samo z dodatkom Zr povečalo za skoraj dvakrat. Hkrati smo opazili enakomerno razmerje intermetalnih faz Zr z daljšo ostrorobo in igličasto morfologijo ter bolj celovito koničasto morfologijo.

Z analizo porazdelitve smo zaznali intermetalne faze vrste AlSiZr. Tudi Vončina [8] je v svojem delu ugotovila podobno morfologijo faz Zr. Na Sliki 4 je prikazana porazdelitev Zr in Ti v aluminijasti matrici in fazi, bogati z Zr (iglična morfologija).

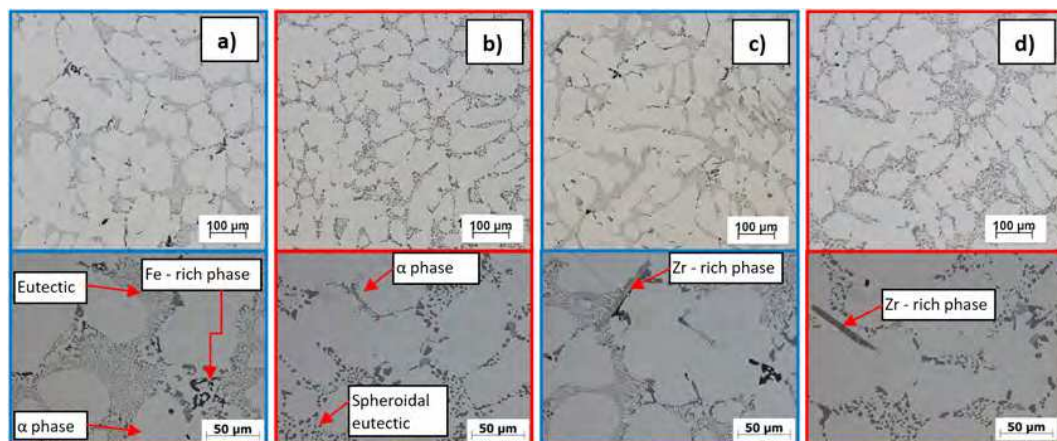
Za eksperimentalne zlitine F1 do F3 je bila značilna velika poroznost na opazovanih območjih. Vpliv kombinacije Zr in Sr na vsebnost plina v zlitini smo analizirali z metodo SEM. Pri opazovanju strukture zlitin F1 do F3 smo v nasprotju z zlitinami E1 do E3 opazili manjše število oblikovanih faz Zr z velikostjo kot pri zlitini P (Slika 5 in Slika 6). Razlika se je pokazala v obliki faz Zr, ki so imele pretežno koničasto obliko. Nastale intermetalne faze Zr so vzajemno delovale s fazami na osnovi Mg in Cu. Faze Zr smo zaznali predvsem v evtektični domeni. Z večanjem vsebnosti Sr v zlitinah F2 do F3 je bilo opaziti krajšanje nastalih Zr faz in spremembo morfologije v koničasto. Prav tako smo ugotovili, da faze Zr nastajajo v evtektičnem območju skupaj s fazami na osnovi Mg in Cu (Slika 5). Zaradi toplotne obdelave so faze Zr v nasprotju z zlitinami z Zr in Ti razpadle (Slika 6).

The harmful content of Fe was compensated by a suitable content of Mn and therefore it is possible to observe the Fe-rich phases in the form of the so-called Chinese script. Visible formation of Zr phases in the AlSi7Mg0.3Cu0.5Zr0.1 metal matrix (P alloy) occurs at Zr content $\geq$ 0.1 wt. % already (Figure 2c, d). Zr is most often formed in the form of long smooth needles with slightly split ends. With increasing Zr content occurred an expected increase in Zr phases. These phases disintegrated due to heat treatment, and the given disintegration was more significant when the content of Zr was $\geq$ 0.2 wt. % in the alloy. This fact indicates a reduced degree of stability of the thus-formed Zr phases in the P alloy.

In the case of Zr with Ti alloys (alloy E1-E3), an increased number of Zr phases (Figure 3a, c, e) were formed. These were characterized by a more coherent, shorter morphology without split ends. The increase in the number of Zr phases was almost twofold in the given material variants compared to alloys only with the addition of Zr. At the same time, a uniform ratio of intermetallic Zr phases with a longer sharp-edged and acicular morphology and a more integral angular morphology was observed.

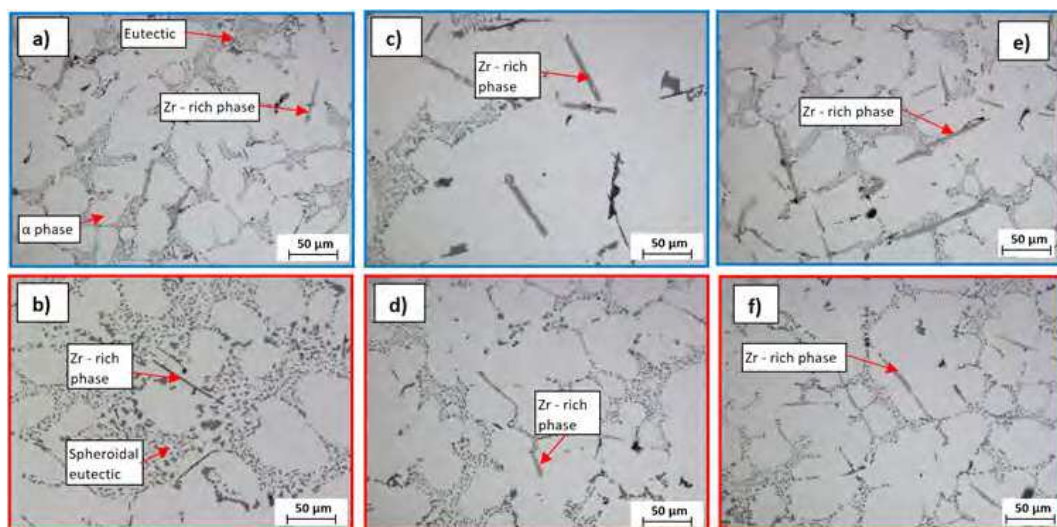
The intermetallic phase of the AlSiZr types was observed by mapping analysis. Vončina [8] also identifies a similar morphology of Zr phases in his work. The mapping in Figure 4 shows the distribution of Zr and Ti in the aluminum matrix and Zr-rich phase (needle morphology).

Experimental alloys F1 to F3 were characterized by high porosity in the observed areas. The effect of the Zr and Sr combination on the alloy gas content was analyzed by the SEM method. When observing the structure of alloys F1 to F3, in contrast to alloys E1 to E3, a lower number of formed Zr phases was observed with size as in the case of the P alloy (Figure



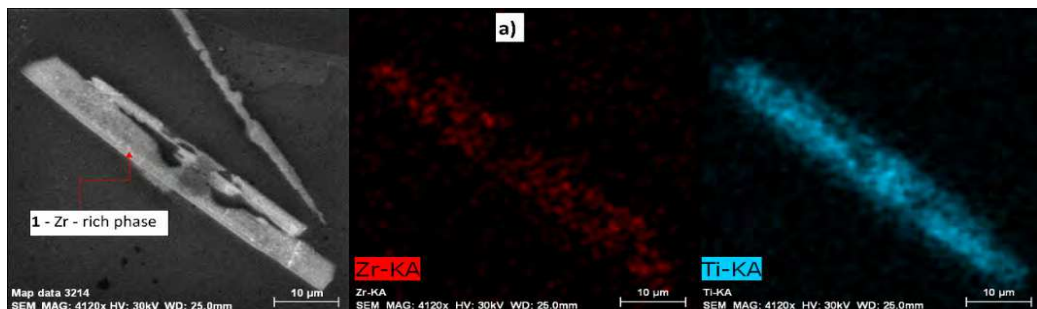
Slika 2. Mikrostruktura eksperimentalnih zlitin, (a) zlitina R v litem stanju, (b) zlitina R po toplotni obdelavi, (c) zlitina P v litem stanju, (d) zlitina P po toplotni obdelavi.

Figure 2. Microstructure of experimental alloys, (a) R alloy in cast state, (b) R alloy after heat treatment, (c) P alloy in cast state, (d) P alloy after heat treatment.



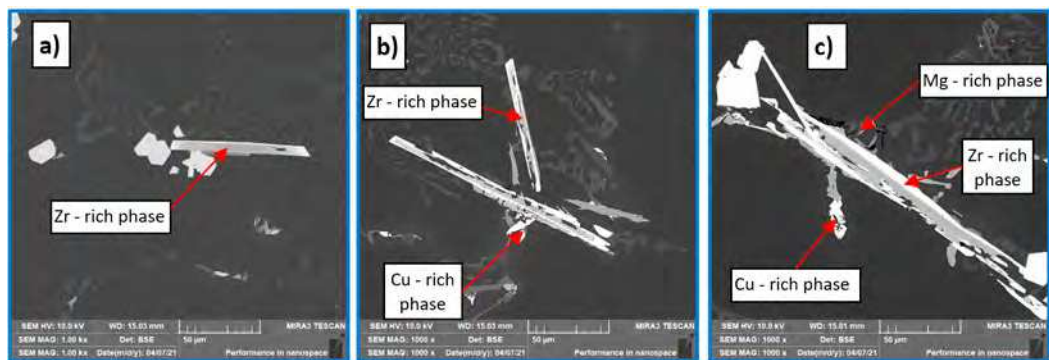
Slika 3. Mikrostruktura poskusnih zlitin, (a) zlitina E1 z 0,1 mas.% Ti v litem stanju, (b) zlitina E1 z 0,1 mas.% Ti po toplotni obdelavi, (c) zlitina E2 z 0,2 mas.% Ti v litem stanju, (d) zlitina E2 z 0,2 mas.% Ti po toplotni obdelavi, (e) zlitina E3 0,3 z mas.% Ti v litem stanju, (f) zlitina E3 0,3 z mas.% Ti po toplotni obdelavi.

Figure 3. Microstructure of experimental alloys, (a) alloy E1 0.1 wt. % Ti in the cast state, (b) alloy E1 0.1 wt. % Ti after heat treatment, (c) alloy E2 0.2 wt. % Ti in the cast state, (d) alloy E2 0.2 wt. % Ti after heat treatment, (e) alloy E3 0.3 wt. % Ti in the cast state, (f) alloy E3 0.3 wt. % Ti after heat treatment.



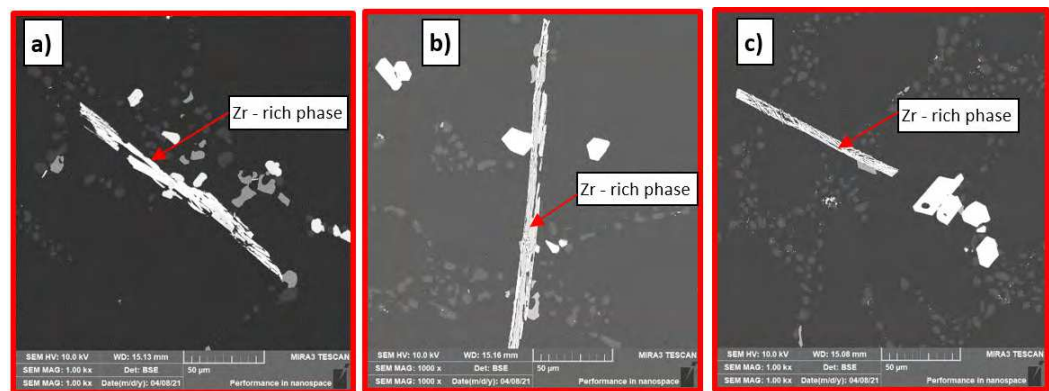
Slika 4. Identifikacija z Zr bogatih faz v primarni zlitini P z analizo porazdelitve, SEM

Figure 4. Identification of Zr - rich phases in the primary alloy P by mapping, SEM



Slika 5. Mikrostruktura eksperimentalnih zlitin – v litem stanju, (a) zlitina F1 0,1 mas.% Ti, (b) zlitina F2 0,2 mas.% Ti, (c) zlitina F3 0,3 mas.% Ti.

Figure 5. Microstructure of experimental alloys - in cast state, (a) alloy F1 0.1 wt. % Ti, (b) alloy F2 0.2 wt. % Ti, (c) alloy F3 0.3 wt. % Ti.



Slika 6. Mikrostruktura eksperimentalnih zlitin – po toplotni obdelavi, (a) zlitina F1 0,1 mas.% Ti, (b) zlitina F2 0,2 mas.% Ti, (c) zlitina F3 0,3 mas.% Ti.

Figure 6. Microstructure of experimental alloys - after heat treatment, (a) alloy F1 0.1 wt. % Ti, (b) alloy F2 0.2 wt. % Ti, (c) alloy F3 0.3 wt. % Ti.

3.2 Mehanske lastnosti

Pri ocenjevanju mehanskih lastnosti smo različice materiala z dodatkom Zr s Ti (zlitine E1–E3) in Zr s Sr (zlitine F1–F3) primerjali z zlitino R (brez dodatka legirnih elementov) in zlitino P (samo z 0,15 mas.% Zr). Povprečne vrednosti natezne trdnosti in meje plastičnosti ter ustrezni standardni odkloni so prikazani na Sliki 7. Mehanske lastnosti zlitine R so tako imenovani referenčni parametri (rdeča črta na Sliki 7), tj. lastnosti zlitine brez dodanih legirnih elementov. Zlitine niso standardizirane, zato so predstavljale »izhodišče«.

Pri zlitini P se je R_m v primerjavi z zlitino R zmanjšal samo za 0,9 %. Vrednost $R_{p0,2}$ se je povečala za 4 %. Eksperimentalni vzorci E1 do E3 so predstavljali različico, pri kateri je sinergijski učinek Zr s Ti izboljšal mehanske lastnosti tudi pri nižji vsebnosti Zr. Pri ocenjevanju zlitin E1 do E3 se je R_m v primerjavi z zlitino R povečal za približno 2 %. Do povečanja je prišlo pri zlitini E1. Nasprotno pa se je pri zlitini E3 v primerjavi z zlitino R zmanjšala vrednost R_m (za približno 5 %). Mehanske lastnosti vzorcev E1 do E3 so se najbolj povečale pri $R_{p0,2}$. Povečanje v primerjavi z zlitino R je bilo približno 20 %, v primerjavi z zlitino P pa približno 15 %. Največje povečanje je bilo zabeleženo pri vzorcu E3.

Pri ocenjevanju mehanskih lastnosti vzorcev F1 do F3 je bilo opaziti nekoliko večje zmanjšanje opazovanih vrednosti v primerjavi z vzorci E1 do E3; pri R_m je bilo opaziti zmanjšanje za 5 % v primerjavi z zlitinami R in P. Povečanje je bilo zaznано pri vzorcu F2 (za približno 4 % v primerjavi z zlitino R in za približno 5 % v primerjavi z zlitino P). V primerjavi z zlitino E1 (AlSi7Mg0,3Cu0,5Zr0,15Ti0,1), ki smo jo ocenili kot najboljšo, se je povečala samo za približno 2 %. Pri ocenjevanju $R_{p0,2}$ v zlitinah F1 do F3 je prišlo do povečanja

5 and Figure 6). The difference showed up in the form of Zr phases, which had a predominantly angular shape. The formed Zr intermetallic phases interacted with Mg- and Cu-based phases. Zr phases were observed mainly in the eutectic's domain. With increasing Sr content in alloys F2 to F3, a shortening of the formed Zr phases and a change in morphology to angular was observed. The formation of Zr phases in the eutectic region together with Mg- and Cu-based phases were also identified (Figure 5). Due to heat treatment, the Zr phases disintegrated (Figure 6), in contrast to alloys with Zr and Ti.

3.2 Mechanical Properties

In the evaluation of mechanical characteristics, material variants with the addition of Zr with Ti (alloys E1-E3) and Zr with Sr (alloys F1-F3) were compared with the R alloy (without the addition of alloying elements) and the P alloy (only with 0.15 wt. % Zr). The average values for tensile strength and yield strength as well as respective standard deviations are presented in Figure 7. The mechanical properties of the R alloy provided the so-called reference parameters (red line in Figure 7), i.e., these are the characteristics of the alloy without added alloying elements. Alloy is not standardized, so they were taken as a "baseline".

The P alloy achieved a decrease of only 0.9 % R_m compared to the R alloy. The $R_{p0,2}$ value increased by 4 %. Experimental samples E1 to E3 represented a variant where the synergistic effect of Zr with Ti increased the mechanical characteristics even at a lower Zr content. When evaluating alloys E1 to E3, there was an increase in R_m compared to R alloy by about 2 %. The increase occurred in the E1 alloy. On the

vrednosti, pri čemer so zlitine F1 do F3 dosegle višje vrednosti tudi od zlitin različice E. Zlitina z najvišjo vrednostjo je bila F2 (AlSi7Mg0,3Cu0,5Zr0,15Sr0,2) s povečanjem za 33 % v primerjavi z zlitino R in 27 % v primerjavi z zlitino P.

Povprečne vrednosti duktilnosti in modula elastičnosti eksperimentalnih zlitin ter ustrezni standardni odkloni so prikazani na Sliki 8. Pri analizi vrednosti duktilnosti A5 je bilo zaznано večje zmanjšanje pri zlitini P v primerjavi z oceno zlitine R. V primerjavi z zlitino R se je zmanjšala za skoraj 75 %.

Modul elastičnosti zlitine P (z dodatkom 0,15 mas. % mas. Zr) se je povečal za 19 %. Modul elastičnosti je bil parameter, pri katerem so se vrednosti najbolj povečale.

Pri ocenjevanju vzorcev E1 do E3 (zlitina z dodatkom Zr s Ti) je bilo pri vseh vzorcih zabeleženo zmanjšanje duktilnosti A₅, podobno kot pri zlitini P, in sicer za 61 do 84 % v primerjavi z zlitino R in za 37 do 55 % v primerjavi z zlitino P. Najbolj se je zmanjšala pri vzorcu E3, pri katerem je bilo na mikrostrukturi opaziti enakomerno razmerje med oblikovanimi fazami z ostrimi robovi in bolj integralnimi koničastimi fazami Zr. Pri ocenjevanju modula elastičnosti smo pri vzorcih E1 in E2 opazili manjše povečanje v primerjavi z zlitino R. V primeru zlitine P so se vrednosti zmanjšale za približno 8 %. Povečanje modula elastičnosti smo zabeležili samo pri vzorcu E3.

Podobno kot pri vzorcih E1 do E3 se je tudi pri vzorcih F1 do F3 znatno zmanjšala duktilnost A₅, in sicer za 85 do 95 % glede na zlitino R in za 42 do 78 % glede na zlitino P. Pri zlitini P se je A₅ v vseh vzorcih zmanjšal za 7 do 20 %. Modul elastičnosti se je bistveno povečal samo pri zlitini E3.

Povprečne vrednosti trdote HBW eksperimentalnih zlitin in ustrezni standardni odkloni so prikazani na Sliki 9. Pri ocenjevanju trdote po Brinellu so se vrednosti zlitine P v primerjavi z zlitino R

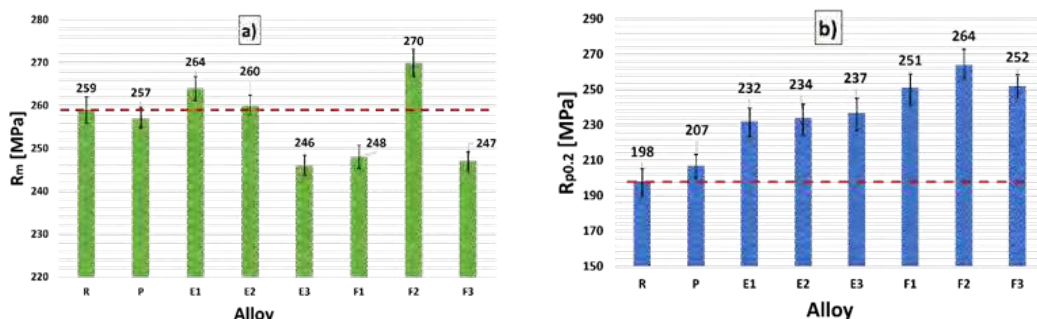
contrary, a decrease in R_m was recorded for alloy E3 (about 5 %) compared to the R alloy. The most significant increase in mechanical characteristics in samples E1 to E3 was recorded at Rp0.2. The increase compared to the R alloy was by about 20 % and compared to the P alloy by about 15 %. The highest increase was recorded for sample E3.

When evaluating the mechanical properties of samples F1 to F3, a slightly higher decrease of the monitored values was observed compared to samples E1 to E3. regarding R_m, there was a decrease of 5 % compared to the R and P alloys. An increase was observed in sample F2 (by about 4 % compared to R alloy and by about 5 % compared to P alloy). The increase compared to alloy E1 (AlSi7Mg0.3Cu0.5Zr0.15Ti0.1), evaluated by us as the best, was only by about 2 %. When evaluating Rp0.2 in alloys F1 to F3 there was an increase in values, while alloys F1 to F3 reached higher values also than alloys of variant E. The alloy with the highest value was F2 (AlSi7Mg0.3Cu0.5Zr0.15Sr0.2) with an increase of 33 % compared to the R alloy and 27 % compared to the P alloy.

The average values for ductility and modulus of elasticity of experimental alloys as well as respective standard deviations are presented in Figure 8. In the analysis of the values of ductility A₅, a decrease was observed for the P alloy to a higher extent compared to the evaluation of the R alloy. There was a decrease of almost 75 % compared to the R alloy.

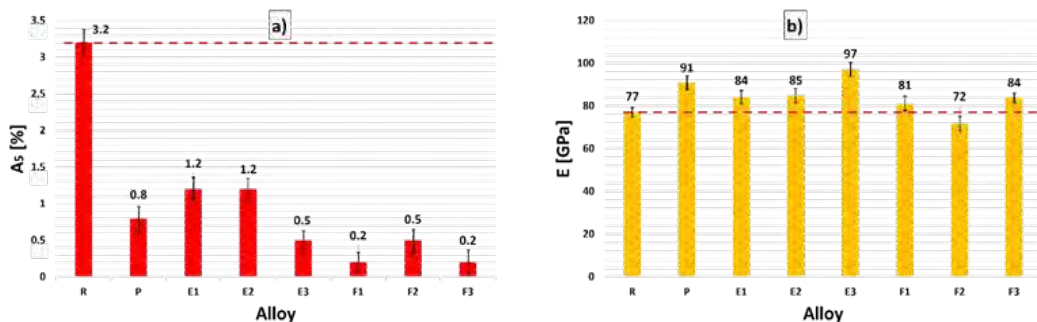
The modulus of elasticity of the alloy P (with the addition of 0.15 wt. % Zr) increased by 19 %. The modulus of elasticity was the parameter with which the largest increase in values occurred.

When evaluating samples E1 to E3 (an alloy with the addition of Zr with Ti),



Slika 7. Odvisnost (a) R_m in (b) $R_{p0.2}$ po toplotni obdelavi za zlitine R, P in eksperimentalne zlitine E1–E3 ter F1–F3.

Figure 7. Dependence of (a) R_m and (b) $R_{p0.2}$ after heat treatment for R, P, and experimental alloys E1 - E3 and F1- F3.



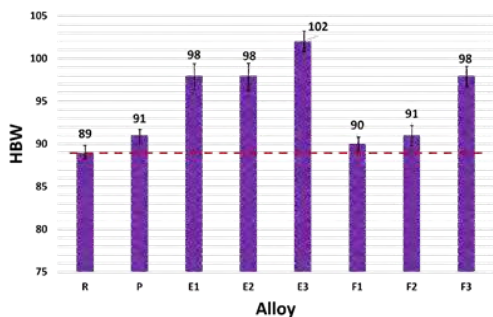
Slika 8. Odvisnost (a) raztezka A in (b) modula elastičnosti E po toplotni obdelavi za zlitine R, P in eksperimentalne zlitine E1–E3 ter F1–F3.

Figure 8. Dependence of (a) elongation A and (b) modulus of elasticity E after heat treatment for R, P, and experimental alloys E1 - E3 and F1- F3.

(referenčna vrednost – rdeča črta) povečale za 3 %. Trdota HBW vzorcev E1 do E3 se je v primerjavi z zlitino R povečala za približno 15 %. Trdota HBW se je v primerjavi z zlitino P povečala za približno 12 %. Trdota zlitin E3 je bila nad 100 HBW, kar so zelo visoke vrednosti za aluminijeve zlitine, ulite v keramične forme. Pri zlitinah F1 do F3 so vrednosti trdote HBW dosegle 90 do 98. Pri ocenjevanju vrednosti HBW je bilo v vseh poskusnih talinah F1 do F3 zabeleženo povečanje do približno 10 % v primerjavi z

a decrease in ductility A_5 similar to the P alloy was recorded in all samples by 61 to 84 % compared to the R alloy and by 37 to 55 % compared to the P alloy. The most significant decrease occurred in sample E3, in which a uniform ratio between the formed phases with sharp edges and more integral angular Zr phases was observed on the microstructure. When evaluating the modulus of elasticity, a smaller increase was observed for samples E1 and E2 compared to the R alloy. In the case of the P alloy, the

zlitinami R. Kot je razvidno, se pri zlitinah od E1 do E3 vrednost HBW znatno poveča.



Slika 9. Odvisnost vrednosti HBW po toplotni obdelavi za R, P in eksperimentalne zlitine E1–E3 in F1–F3.

Figure 9. Dependence of HBW after heat treatment for R, P, and experimental alloys E1 – E3 and F1– F3.

4 Razprava

V vzorcih E1 do E3 je bil potrjen učinek Ti kot udrobnjevalca faz Zr v eksperimentalni zlitini. Na podlagi ocene mehanskih lastnosti je bila določena optimalna vsebnost Ti 0,2 mas.% z interakcijo 0,15 mas.% Zr. Pri tej vsebnosti je bila v strukturi zlitine E2 zabeležena povečana vsebnost segregiranih faz Zr z uravnoteženim razmerjem manjših iglic z ostrimi konci in faz kvadrataste oblike. Opazili smo tudi povečano število skeletnih struktur v matrici eksperimentalnih zlitin, prišlo pa je tudi do interakcije faz na osnovi Mg, Cu in Fe s fazami Zr. Podoben pojav smo opazili tudi pri vzorcih zlitine P. To dejstvo potrjuje pomembno sposobnost faz Zr, da okrepijo kovinsko matrico in tako povečajo trdoto preiskovanih zlitin. Predpostavlja se, da bodo imele te faze stabilizacijski učinek tudi pri višjih temperaturah in bodo omogočale uporabo tudi pri višjih temperaturah (nad

values decreased by approximately 8 %. The increase in modulus of elasticity was recorded only in sample E3.

As with samples E1 to E3, samples F1 to F3 showed a significant decrease in ductility A5 by up to 85 to 95 % relative to the R alloy and a 42 to 78 % decrease relative to the P alloy. For the P alloy, there was a decrease in A5 in all samples in the range of 7 to 20 %. The modulus of elasticity manifested the only significant increase in the case of the E3 alloy.

The average values for HBW hardness of experimental alloys as well as respective standard deviations are presented in Figure 9. When evaluating the Brinell hardness, an increase in the values of P alloy by 3 % compared to R alloy (reference value - red line) was observed. The HBW hardness of samples E1 to E3 increased by about 15 % compared to R alloy. The increase in HBW hardness compared to P alloy was by about 12 %. The hardness of E3 alloys was above 100 HBW, which are very high values for aluminum alloys cast in ceramic molds. In the case of alloys F1 to F3, the HBW hardness values reached 90 to 98. In the evaluation of HBW, an increase was recorded in all experimental melts of F1 to F3 up to about 10 % compared to R alloys. As can be seen, alloys E1 to E3 show a significant increase in HBW.

4 Discussion

The effect of Ti as a nucleating element of Zr phases in the experimental alloy was confirmed in samples E1 to E3. Based on the evaluation of mechanical properties, the optimal Ti content was determined to be 0.2 wt. % with an interaction of 0.15 wt. % Zr. At this,, an increased content of segregated Zr phases with a balanced ratio of smaller sharp-ended needles and square-shaped

250 °C). Ocena strukture je potrdila korektivni učinek Zr kot elementa, ki odpravlja dolge igličaste faze Fe in ustvarja ugodnejšo morfologijo. Zaradi izločanja večjega števila faz Zr je bilo mogoče pri oceni prelomnih površin eksperimentalnih zlitin E1 do E3 opaziti zmanjšanje duktilne porušitve matrice.

Za eksperimentalne zlitine z Zr in Sr je bila značilna precipitacija faz Zr s podobno morfologijo kot pri zlitini P. Pri vsebnosti Sr nad 0,2 mas.% se je povečala interakcija med intermetalnimi fazami na osnovi Cu, Mg in Fe. To dejstvo potrjuje pozitiven učinek sinergije med Zr in Sr z možnostjo povečanja trdnosti kovinske matrice zlitine AlSi7Mg0,3Cu0,5. Zaradi povečane vsebnosti Sr (pred modifikacijo) je lahko prišlo do nastanka krhkih faz tipa AlSr₂Si₂, ki so skupaj z nastankom intermetalnih faz Zr s konci z ostrimi robovi pomnožile transkristalno lomljenje in tako močno vplivale na zmanjšanje v A5. Hkrati je povečana vsebnost krhkih faz na osnovi AlSr₂Si₂ spodbudila povečanje poroznosti. Zlitine različice F, razen zlitine F2, so dosegle nekoliko višje vrednosti A5 kot zlitina R.

5 Zaključek

Rezultate posameznih poskusnih različic materiala lahko povzamemo z naslednjimi ugotovitvami:

- sinergijski učinek Zr in Ti, zlasti Ti < 0,2 mas.% s stalnim dodatkom Zr 0,15 mas.% (zlitine F1–F3), vpliva na nastanek večjega števila faz Zr manjših dimenzij. Faze Zr se tvorijo v koničasti obliki,
- vpliv Zr in Sr pri stalnem dodatku Zr 0,15 mas.% (zlitine F1–F3) na preiskovano zlitino se kaže v nastanku faz Zr s koničastim koncem in položajem,

phases was recorded in the structure of the E2 alloy. An increased number of skeletal structures in the matrix of experimental alloys was also observed, while the interaction of phases based on, Mg, Cu, and Fe with Zr phases also occurred. A similar phenomenon was observed for P alloy samples. This fact confirms the significant ability of Zr phases to strengthen the metal matrix and thus increase the hardness of the investigated alloys. It is assumed that these phases will also have a stabilizing effect at higher temperatures and allow use even at higher temperatures (above 250 °C). The evaluation of the structure confirmed the corrective effect of Zr as an element that eliminates long acicular phases of Fe and creates a more favorable morphology. Due to the elimination of an increased number of Zr phases, it was possible to observe a decrease in the ductile failure of the matrix when evaluating the fracture surfaces of experimental al-loys E1 to E3.

Experimental alloys with Zr and Sr were characterized by the precipitation of Zr phases, in a similar morphology to that observed for the P alloy. With a Sr content above 0.2 wt. % there was an increase in the interaction between intermetallic phases based on Cu, Mg, and Fe. This fact confirms the positive effect of the synergy between Zr and Sr with the possibility of increasing the strength of the metal matrix of the alloy AlSi7Mg0.3Cu0.5. Due to the increased Sr content (premodification), the formation of brittle phases of the AlSr₂Si₂ type could occur, which together with the formation of Zr intermetallic phases with sharp-edged ends multiplied the transcrystalline cleavage and thus significantly affected the reduction in A5. At the same time, the increased content of brittle phases based on AlSr₂Si₂ promoted an increase in porosity. Alloys of variant F, except the F2 alloy, achieved slightly higher values of A5 than the R alloy.

skoncitriranim predvsem v evtektični domeni,

- spremljane mehanske lastnosti HBW in modul elastičnosti so dosegle visoke vrednosti, kar je predpogoj za uporabo danih materialov za zahtevno litje pri povišanih temperaturah,
- pričakovana težava so nizke vrednosti duktilnosti A5, ki jih bo treba še izboljšati.

Zaključimo lahko, da je učinek legirnih elementov na zlitino AlSi7Mg0,3Cu0,5 pozitiven, deluje pa bodisi posamično bodisi sinergično. Glede na trenutno znanje so najboljše mehanske lastnosti dosegle zlitine E2 (dodatek 0,12 mas.% Zr in 0,2 mas.% Ti).

Zahvala

Članek je nastal v okviru projekta razpisne agencije KEGA: 022ŽU-4/2021. Avtorji se želijo agenciji zahvaliti za vso podporo.

5 Conclusion

The results from individual experimental material variants can be summarized in the following conclusions:

- The synergistic effect of Zr and Ti, especially Ti < 0.2 wt. % with the constant addition of Zr 0.15 wt. % (alloys F1-F3), affects the formation of an increased number of Zr phases with smaller dimensions. Zr phases are formed in an angular form.
- Effect of Zr and Sr at constant addition of Zr 0.15 wt. % (alloys F1-F3) on the investigated alloy is manifested by the formation of Zr phases with an angular end and a position concentrated mainly in the eutectic domain.
- The monitored mechanical characteristics of HBW and the modulus of elasticity have reached high values, which gives a precondition for the use of given materials for demanding castings operating at elevated temperatures.
- The expected problem is the low values of A5 ductility, which will still need to be worked on.

In conclusion, it can be stated that the effect of alloying elements manifested positively, either individually or synergistically on the AlSi7Mg0.3Cu0.5 alloy. In the current state of knowledge, the highest mechanical characteristics were achieved by alloys E2 (addition of 0.12 wt.% Zr and 0.2 wt. % Ti).

Acknowledgments

The article was created as part of the KEGA grant agency project: 022ŽU-4/2021. The authors thank the agency for its support.

Viri / References

- [1] Hernandez, F., Ramírez, J. & Mackay R. (2017). Al-Si Alloys. Chan (Switzerland): Springer.
- [2] Gerber J. (2009). Global Aluminum Recycling: A Cornerstone of Sustainable Development. International Aluminum Institute, London.
- [3] Ciu, J. Roven, & H. J. (2010). Recycling of Automotive Aluminum. Transactions Of Nonferrous Metals Society of China, 20, 2057-2063. DOI: 10.1016/S1003-6326(09)60417-9
- [4] Bolibruchova, D. & Žihalova, M. (2014). Vanadium Influence on Iron Based Intermetallic Phases in AlSi6Cu4 Alloy. Archives Of Metallurgy and Materials, 59(3), 1029-1032. DOI: 10.2478/amm-2014-0172
- [5] Hernandez-Sandoval, J., Samuel, A. M., Valtierra, S. & Samuel, F. H. (2014). Ni- And Zr-Based Intermetallics in Al–Si–Cu–Mg Cast Alloys. Metallography, Microstructure, And Analysis. 3, 408–420. DOI: 10.1007/s13632-014-0164-2
- [6] Ozbakir E. (2008). Development of Aluminum Alloys for Diesel-Engine Applications. Master 'S Thesis, McGill University, Montréal, Qc, Canada.
- [7] Zhang, F. B., Zhang, J. Q., Ni, H. J., Zhu, Y., Wang, X. X., Wan, X, F. & Chen, K. (2021). Optimization of AlSi10MgMn Alloy Heat Treatment Process Based on Orthogonal Test and Grey Relational Analysis. Crystals. 11(4), 385. DOI: 10.3390/cryst11040385
- [8] Vončina, M., Medved, J., Kores, S., Xie, P.; Cziegler, A. & Schumacher, P. (2018). Effect of Molybdenum and Zirconium on Aluminium Casting Alloys. Livarski Vestnik. 68-78. DOI: 10.1016/j.jmrt.2015.02.007
- [9] Nabawy, A. M., Samuel, F. H., Alkahtani, S., Abuhasel, K. A. & Samuel, F. (2016). Role of Cerium, Lanthanum, and Strontium Additions in An Al – Si – Mg (A356) Alloy. Nternational Journal of Materials Research. 107(5), 446-458. DOI: 10.3139/146.111360
- [10] Lattanzi, L., Fortini, A., Giovagnoli, M., Merlin, M., Pirletti, S., Morè Spreafico, S. & Garagnani, G. L. (2018). Thermal Analysis for the Prediction of Grain Refinement: An Experimental Investigation on an AlSiMg Foundry Alloy. Materials Science Forum. 941, 1029–1034. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.941.1029

Primerjava udarne in lomne žilavosti sive litine s kroglastim grafitom in feritnega jekla

Comparison of Impact and Fracture Toughness of Ductile Iron and Ferritic Steel

Povzetek

Namen raziskave je bil določitev lomne in udarne žilavosti sive litine s kroglastim grafitom EN-GJS-400-18LT in njena primerjava z valjanim konstrukcijskim jeklom S235JR+AR pri sobni temperaturi, 0 °C, -20 °C in -40 °C. Prav tako je bil cilj določiti temperaturni interval prehoda iz duktilnega v krhek lom ter analizirati lomno obnašanje obeh zlitin.

V ta namen smo za obe zlitini izvedli preizkuse lomne žilavosti s tri-točkovnim upogibnim preizkusom in preizkuse udarne žilavosti po Charpyu pri prej omenjenih temperaturah. Izvedli smo tudi metalografsko analizo, analizo prelomnih površin na makroskopskem nivoju ter na določenih vzorcih tudi mikrofraktografijo z uporabo vrstičnega elektronskega mikroskopa (SEM).

Izkazalo se je, da je udarna žilavost jekla S235JR+AR pri sobni temperaturi bistveno večja kot udarna žilavost zlitine EN-GJS400-18LT, a z nižanjem temperature drastično pade, tako da pri -40 °C obe zlitini izkazujeta enako vrednost udarne žilavosti. Lomna žilavost zlitine EN-GJS-400-18LT je pri vseh temperaturah večja od lomne žilavosti jekla S235JR+AR in s padcem temperature celo nekoliko naraste.

Abstract

The aim of the study was to determine the fracture and impact toughness of ductile iron EN-GJS-400-18LT and to compare it with the hot-rolled structural steel S235JR+AR at room temperature, 0°C, -20°C and -40°C. Another objective was to determine the temperature interval of the transition from ductile to brittle fracture and to analyse the fracture behaviour of both alloys.

To this end, fracture toughness testing was carried out using a three-point bending test and Charpy impact toughness tests at the abovementioned temperatures for both alloys. Metallographic examination, macroscopic analysis of fracture surfaces and microfractography using a scanning electron microscope (SEM) were also carried out on certain samples.

The impact toughness of S235JR+AR at room temperature is shown to be significantly higher than that of EN-GJS400-18LT, however, drops markedly as the temperature is lowered, so that at -40°C, both alloys exhibit the same impact toughness value. The fracture toughness of EN-GJS-400-18LT is higher than that of S235JR+AR at all temperatures and even increases slightly with temperature.

1 Uvod

Železove litine srečujemo na vsakem koraku, saj so najpogostejše uporabljene zlitine na svetu. Poleg jekla, ki ima zelo široko uporabnost zaradi odličnih lastnosti, se veliko uporabljajo tudi sive litine. Od slednjih je še posebej uporabna siva litina s kroglastim grafitom. V primerjavi z jeklom ima boljšo livnost, drsne lastnosti, manjšo gostoto, postopek izdelave pa je enostaven in cenovno ugodnejši. [1] Za sive litine s kroglastim grafitom je značilna majhna udarna žilavost, ki je pri jeklu znatno večja. Žilavost se določa z udarnim preizkusom po Charpyu, ki je bil pred stotimi leti razvit za preizkušanje udarne žilavosti in za določanje temperature prehoda iz duktilnega v krhek lom. [2] Enak postopek se danes uporablja za vrsto materialov, med drugim tudi za sivo litino s kroglastim grafitom, čeprav gre za drugačno vrsto materiala. Mikrostruktura jekla je v veliko primerih feritno-perlitna, kar velja tudi za sivo litino s kroglastim grafitom, a ima le-ta med feritom in perlitom v matrici še ogljik, strjen v obliki grafitnih krogel. Tako imamo opravka s kompozitno zgradbo. Številni raziskovalci so mnenja, da siva litina vendarle nima tako nizke žilavosti, ampak je težava v preizkusu Charpy, ki ni primeren za določanje splošne žilavosti vsakega materiala pod istimi pogoji. Predlagajo določanje žilavosti s tri-točkovnim upogibnim preizkusom, pri katerem kot rezultat dobimo vrednosti J-integrala, faktor odpiranja vrha razpoke – CTOD ter lomno žilavost. Postopek temelji na eksperimentalno primerljivih situacijah situacije, saj se na preizkušancu najprej naredi ostra utrujenostna razpoka, obremenitev pa je kvazistatična in ne dinamična ter točkovno usmerjena z visoko hitrostjo, kot je to pri preizkusu Charpy. [3, 4]

1 Introduction

Cast iron is found all around us as it is the most commonly used alloy in the world. In addition to steel, which has a very wide range of applications due to its excellent properties, grey cast iron is also widely used. A particularly useful grey cast iron is ductile iron. Compared to steel, it has better casting and sliding properties, lower density, and is easier and cheaper to manufacture. [1] Ductile iron is characterised by low impact toughness, which is significantly higher in steel. The toughness is determined by the Charpy impact test, which was developed a hundred years ago to test impact toughness and to determine the temperature of transition from ductile to brittle fracture. [2] The same procedure is still in use today for a range of materials, including ductile iron, even though the material is completely different. In many cases, steel has ferrite-perlite microstructure, which is also true for ductile iron, with the different that it contains carbon in the matrix between the ferrite and perlite, solidified in the form of graphite nodules. So, what we are dealing with is a composite structure. Many researchers believe that the toughness of ductile iron is not as low and instead the problem lies with the Charpy test, which is not suitable for determining the overall toughness of any material under the same conditions. They propose to determine the toughness by means of a three-point bending test, which yields J-integral values, crack tip opening displacement (CTOD) and fracture toughness. The procedure is focused on simulating experimentally comparable conditions, as the specimen is first subjected to a sharp fatigue crack and the loading is quasistatic rather than dynamic and point-based at high speed, as is the case with the Charpy test. [3, 4]

2 Eksperimentalno delo

Jeklo S235JR+AR je bilo pridobljeno s strani zunanjega proizvajalca v obliki 25 mm debele valjane plošče. Zlitino EN-GJS-400-18LT smo pripravili v Kovis Livarni v 10-tonski indukcijski peči. Po doseženi načrtovani bazni kemijski sestavi in ustrezni temperaturi se je talina prelila v 2-tonsko ponvico, kjer je potekla reakcija z magnezijem po postopku »sandwich«. Sledilo je prelivanje v livno ponvico, dodano je bilo še cepivo na osnovi barija, sledil je transport na livni voz ter litje Y-prob tipa II v enkratne forme iz bentonitne peščene mešanice. Pri litju je potekalo še cepljenje v curek z dodatkom cerija.

Iz plošče S235JR+AR in ulitkov Y-prob zlitine EN-GJS-400-18LT smo s pomočjo tračne žage izrezali vzorce za preizkus lomne žilavosti (preizkušanci SENB), preizkus udarne žilavosti po Charpyu (preizkušanci CVN) ter vzorce za metalografsko analizo. Končne dimenzije vzorcev smo zagotovili z uporabo žične erozije, ustrezno hrapavost površine pa s ploskovnim brusilnim strojem.

2.1 Preizkus lomne žilavosti

Preizkuse lomne žilavosti smo opravili pri štirih različnih temperaturah, in sicer pri sobni temperaturi, 0 °C, -20 °C ter -40 °C. Pri vsaki temperaturi smo naredili preizkus na treh vzorcih sive litine in na enem vzorcu jekla. Preizkus lomne žilavosti je potekal v skladu s standardom ASTM E1820. [5] Vsi vzorci so bili najprej ciklično upogibno utrujani s ciljem, da iz mehansko narejene zareze nastane ostra utrujenostna razpoka. Med utrujanjem se je s pomočjo kamere nenehno nadzorovalo napredovanje razpoke. Ko je bila razpoka primerne dolžine, se je utrujanje končalo. Skupna dolžina

2 Experimental Work

S235JR+AR was obtained from an external producer in the form of 25 mm thick hot-rolled plate. EN-GJS-400-18LT was prepared at Kovis Livarna in a 10-tonne induction furnace. Once the planned base chemical composition and temperature were achieved, the melt was transferred to a 2-tonne pan where it reacted with magnesium in the „sandwich“ process. This was followed by pouring into a ladle, with the addition of a barium-based inoculant. Next, it was transported to the casting carriage and the casting of type II Y-blocks into single-use sand mix moulds. The casting process also involved pouring stream inoculation with the addition of cerium.

Specimens for fracture toughness testing (SENB specimens), Charpy impact toughness testing (CVN specimens) and metallographic examination were cut from S235JR+AR and EN-GJS-400-18LT Y-block castings using a band saw. The final dimensions of the samples were achieved using wire erosion while the corresponding surface roughness was achieved using a surface grinder.

2.1 Fracture Toughness Test

The fracture toughness tests were carried out at four different temperatures, i.e. room temperature, 0°C, -20°C and -40°C. At each temperature, three samples of ductile iron and one sample of steel were tested. The fracture toughness test was conducted in line with ASTM E1820. [5] All specimens were first subjected to cyclic bending fatigue testing with the aim of producing a sharp fatigue crack from the mechanically created notch. During fatigue testing, the crack propagation was continuously monitored using a camera. When the

začetne mehansko narejene razpoke in utrujenostne razpoke mora biti med 0,45 W in 0,70 W, kjer je W širina vzorca. Ko so bili vsi vzorci utrujani, je sledil preizkus lomne žilavosti. Preizkus lomne žilavosti poteka tako, da vzorec SENB z razpoko na spodnji strani namestimo v stroj na valja na razdaljo, predpisano v omenjenem standardu. Na utor na preizkušancu smo namestili tipalo, ki zaznava premik oziroma odpiranje ustja razpoke (CMOD) pri obremenjevanju. Preizkušane je nato upogibno statično obremenjen z naraščajočo silo. Računalnik tako beleži odpiranje ustja razpoke (CMOD) v odvisnosti od sile (F). Ko računalnik zazna, da prihaja do nestabilnega širjenja razpoke (sila začne padati, razpoka pa se širi) oziroma bi prišlo do zloma, se preizkus ustavi. Slika 1 prikazuje nameščen vzorec pred začetkom preizkušanja lomne žilavosti, na spodnji strani vzorca je v utor nameščeno tipalo za zaznavanje pomika, ki je povezano z računalnikom.



Slika 1. Merjenje lomne žilavosti s tri-točkovnim upogibnim preizkušancem (SENB).

Figure 1. Measurement of fracture toughness with a three-point bending tester (SENB).

crack was of sufficient length, the fatigue testing was concluded. The total length of the initial mechanically created crack and the fatigue crack must be between 0.45 W and 0.70 W, where W is the sample width. Once all the samples were fatigue tested, fracture toughness testing was carried out. The test is conducted by placing the SENB sample with a crack on the underside inside the machine onto beams at the distance specified in the aforementioned standard. A sensor was placed in the test piece groove in order to detect the movement or crack mouth opening displacement (CMOD) during loading. The specimen is then subjected to a static bending load with increasing force. The computer records the crack mouth opening displacement (CMOD) as a function of force (F). When the computer detects the unsteady propagation of the crack (the force begins to reduce and the crack is propagating) or an imminent fracture, the test is stopped. Figure 1 shows the mounted specimen before the start of fracture toughness testing, with a displacement sensor connected to a computer inside the groove on the bottom of the specimen.

After fracture toughness testing was completed, cyclic fatigue testing was again undertaken, this time with reduced force until the failure of the specimen. The purpose of such fatigue testing is to distinguish on the surface of the specimen after fracture the area of the crack that formed during the first fatigue test, the area of actual stable crack growth during the fracture toughness test (crack increment) and the area of the last fatigue before fracture. The latter is needed to measure the crack increment as accurately as possible, which is required to calculate the J-integral, CTOD and fracture toughness. Figure 2 shows a snapshot of the fracture surface of one of the EN-GJS-400-18LT samples.

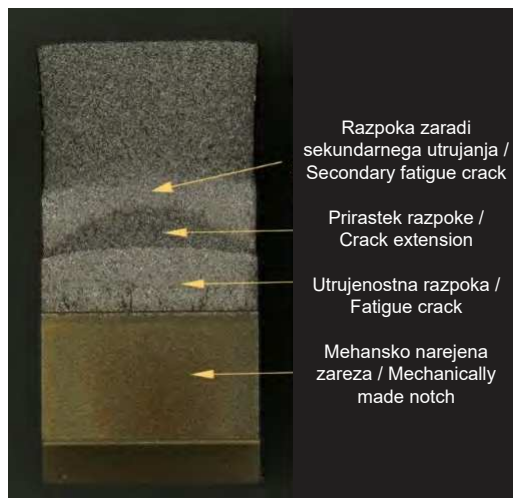
Po končanih preizkusih lomne žilavosti je bilo spet na vrsti ciklično utrujanje, tokrat z manjšo silo, dokler ni prišlo do zloma preizkušanca. Namen tega utrujanja je, da se na površini vzorca po lomu loči področje razpoke, ki je nastalo med prvim utrujanjem, področje dejanske stabilne rasti razpoke med preizkusom lomne žilavosti (prirastek razpoke) in področje zadnjega utrujanja pred zlomom. Slednje je potrebno, da lahko čim natančneje izmerimo prirastek razpoke, ki je nujen za izračun J-integrala, CTOD in lomne žilavosti. Na Sliki 2 je prikazan posnetek prelomne površine enega izmed vzorcev iz zlitine EN-GJS-400-18LT.

2.2 Preizkus udarne žilavosti

Preizkus udarne žilavosti je potekal po standardu SIST EN 1563. [6] Preizkusi so prav tako potekali pri temperaturah $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ter pri sobni temperaturi. Pri vsaki temperaturi smo naredili preizkus udarne žilavosti na treh vzorcih zlitine EN-GJS-400-18LT in treh vzorcih jekla S235JR+AR. Iz rezultatov smo izračunali povprečje za vsak material pri vsaki temperaturi ter naredili analizo rezultatov ter primerjavo z rezultati lomne žilavosti.

2.3 Metalografska analiza

Vzorci za analizo mikrostrukturnih sestavin so se pripravili po običajnem postopku priprave metalografskih vzorcev. Jedkanje je potekalo z 2-odstotnim NITAL-om za boljše razkritje mikrostrukturnih sestavin pod svetlobnim mikroskopom. Za opazovanje vzorcev smo uporabili svetlobni mikroskop Olympus BX61. S programsko opremo Ansys 5.0 smo določili tudi obliko, porazdelitev in velikost grafitnih krogel v skladu s standardom EN ISO 945-1.



Slika 2. Prelomna površina SENB vzorca iz zlitine EN-GJS-400-18LT.

Figure 2. Fracture surface of SENB sample made of EN-GJS-400-18LT.

2.2 Impact Toughness Test

The impact toughness test was carried out in line with SIST EN 1563. [6] Similarly, the testing was again carried out at temperatures of $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ and at room temperature. At each temperature, impact toughness tests were completed on three EN-GJS-400-18LT samples and three S235JR+AR samples. The results were averaged for each material at every temperature and analysed and compared with the fracture toughness results.

2.3 Metallographic Analysis

The samples for the analysis of microstructural elements were prepared according to the standard metallographic sample preparation procedure. The etching was performed using 2% NITAL to better reveal the microstructural elements under

[7] Za mikrofraktografijo smo uporabili vrstični elektronski mikroskop na poljsko emisijo (FEG SEM) proizvajalca Thermo Scientific, model Quattro S. Celotna analiza mikrostrukture je potekala na Naravoslovnotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani.

3 Rezultati in diskusija

3.1 Kemijska sestava in mehanske lastnosti

Kemijska sestava obeh zlitin je prikazana v Preglednici 1. Večja razlika med zlitinama je v deležu ogljika in silicija.

Preglednica 2 prikazuje mehanske lastnosti obeh zlitin. natezna trdnost in meja tečenja je pri jeklu S235JR+AR večja za 45 MPa oziroma 25 MPa, raztezek pa kar za 15 %.

3.2 Mikrostruktura

Na Sliki 3 je prikazana mikrostruktura zlitine EN-GJS-400-18LT. Grafitne krogle so dokaj sorazmerno razporejene, večinoma v najmanjših velikostnih razredih, njihovo povprečno število na kvadratni milimeter pa znaša 166. Delež ferita in perlita v matrici znaša 89 % oziroma 11 %.

Mikrostruktura jekla S235JR+AR na Sliki 4 je prav tako sestavljena iz 89 % ferita in 11 % perlita. Zrna so v smeri valjanja nekoliko podolgovata, opazna je rahla travavost.

an optical microscope. An Olympus BX61 optical microscope was used for sample examination. Ansys 5.0 software was also used to determine the shape, distribution and size of graphite nodules in line with EN ISO 945-1.[7] For microfractography, the Thermo Scientific field emission gun scanning electron microscope (FEG SEM), Quattro S model, was used. The complete microstructure analysis was carried out at the Faculty of Natural Sciences and Engineering, University of Ljubljana.

3. Results and Discussion

3.1 Chemical Composition and Mechanical Properties

The chemical composition of the two alloys is shown in Table 1. The major difference between the alloys is in carbon and silicon proportions.

Table 2 shows the mechanical properties of the two alloys. The tensile strength and yield strength of S235JR+AR are higher by 45MPa and 25MPa, respectively, and elongation by 15%.

3.2 Microstructure

The microstructure of EN-GJS-400-18LT is shown in Figure 3. Graphite nodules are distributed fairly evenly, mostly in the smallest size classes, with an average number of 166 per square millimetre. The

Preglednica 1. Kemijska sestava zlitine EN-GJS-400-18LT in jekla S235JR+AR.

Table 1. Chemical composition of EN-GJS-400-18LT and S235JR+AR.

ZLITINA	CE	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mg	Ni	Fe
EN-GJS-400-18LT	4,22	3,44*	2,33	0,17	0,019	0,01	0,04	0,05	0,04	0,02	Rest
S235JR+AR	-	0,12	0,17	0,57	0,034	0,02	0,2	0,54	0,00	0,16	Rest

Preglednica 2. Mehanske lastnosti zlitine EN-GJS-400-18LT in jekla S235JR+AR.

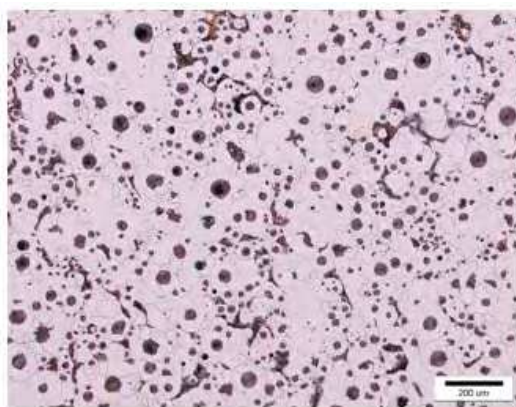
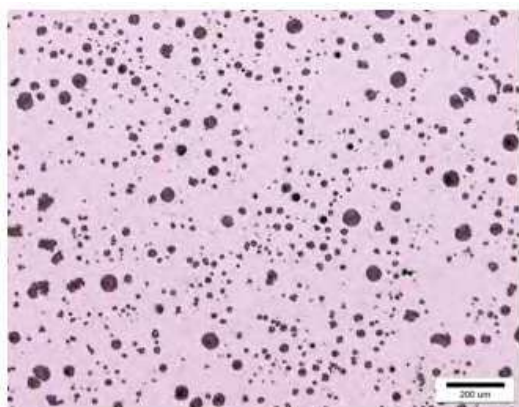
Table 2. Mechanical properties of EN-GJS-400-18LT and S235JR+AR.

ZLITINA	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A [%]
EN-GJS-400-18LT	413	269	19,4
S235JR+AR	457	294	34,4

proportion of ferrite and pearlite in the matrix is 89% and 11%, respectively.

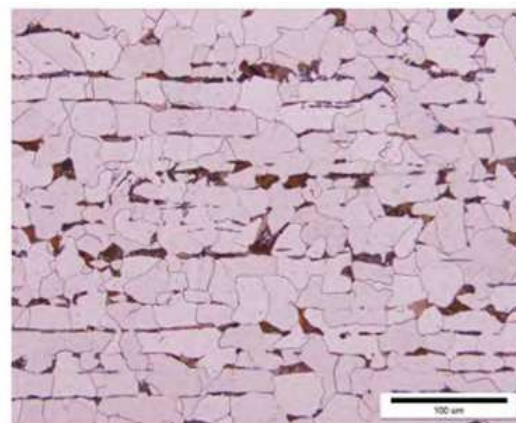
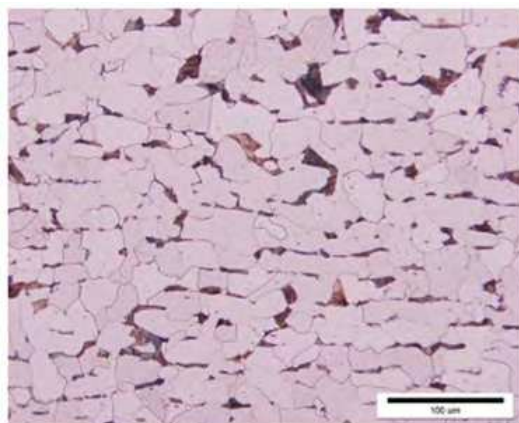
Figure 3: Microstructure of EN-GJS-400-18LT: a) In polished, unetched condition, b) After etching

The microstructure of S235JR+AR, shown in Figure 4, is also composed of 89% ferrite and 11% pearlite. The grains are slightly elongated in the rolling direction and slight banding can be observed.



Slika 3. Mikrostruktura jekla S235JR+AR: a) prečno na smer valjanja, b) v smeri valjanja.

Figure 3. Microstructure of S235JR+AR: a) Transverse to the rolling direction, b) In the rolling direction.



Slika 4. Lomna žilavost zlitine EN-GJS-400-18LT v odvisnosti od temperature.

Figure 4. Fracture toughness of EN-GJS-400-18LT as a function of temperature.

3.3 Lomna žilavost

Lomna žilavost zlitine EN-GJS-400-18LT je prikazana na Sliki 5. Na sobni temperaturi znaša približno 70 MPa na koren metra in s padcem temperature naraste kar na 86 pri -40°C .

Pri jeklu S235 je lomna žilavost v povprečju manjša za prib. 60 % in na sobni temperaturi znaša okoli 30 MPa na koren metra. S padcem temperature je bolj ali manj konstantna in prav tako nekoliko naraste, kot je razvidno iz Slike 6.

3.4 Udarne žilavost

Udarne žilavost pa prikazuje popolnoma drugačno sliko. Pri zlitini EN-GJS-400-18LT je izjemno nizka že pri sobni temperaturi in nekoliko pade s 15,7 J na 12,2 J pri -40°C , kar je prikazano na Sliki 7.

Jeklo S235 ima zelo veliko udarno žilavost pri sobni temperaturi, in sicer kar 141,5 J, a ta strmo pade z nižanjem temperature na samo 13,7 J pri -40°C , kar je primerljivo z sivo litino. Pri 0°C in -20°C je prisoten velik raztros meritev, kar je

3.3 Fracture Toughness

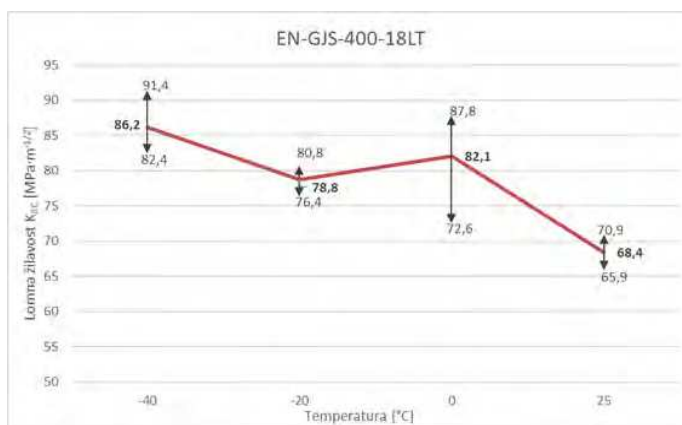
The fracture toughness of EN-GJS-400-18LT is shown in Figure 5. At room temperature, it measures about $70\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$, increasing to as much as 86 as the temperature drops to -40°C .

S235 has an average reduction in fracture toughness of under 60%, and at room temperature it was measured at about $30\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$. As the temperature drops, it is more or less constant and even increases slightly, as can be seen in Figure 6.

3.4 Impact Toughness

Impact toughness, however, paints a completely different picture. In the case of EN-GJS-400-18LT, it is already extremely low at room temperature, dropping even lower from 15.7J to 12.2J at -40°C , as shown in Figure 7.

At room temperature, S235 has a very high impact toughness of 141.5 J. However, as the temperature drops, it is reduced sharply to only 13.7 J at -40°C , comparable to ductile iron. At 0°C and -20°C , the



Slika 5. Lomna žilavost jekla S235JR+AR v odvisnosti od temperature.

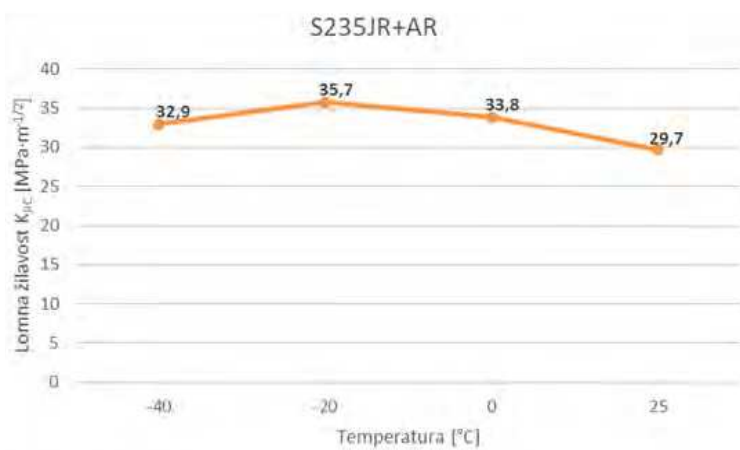
Figure 5. Fracture toughness of S235JR+AR as a function of temperature.

pokazatelj, da gre za prehodno območje med duktilnim in krhkim lomom.

Na Sliki 9 vidimo, da se pri lomu okoli grafitnih krogel pri sobni temperaturi izoblikujejo jamice. Vidijo se tudi vdolbine, iz katerih so bile izpuljene grafitne krogle, in nekaj grafitnih krogel, ki so ostale v vdolbinah. Feritna matrika okoli krogel se deformira, saj so vdolbine večje kot grafitne krogle v njih. Prelom ima duktilen značaj.

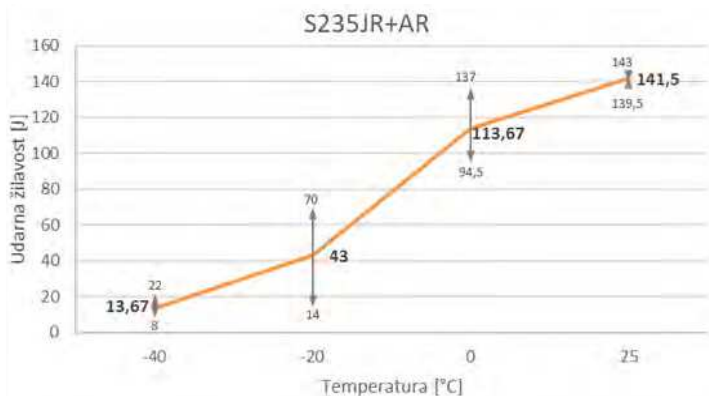
measurements are severely scattered, indicating a transition zone between ductile and brittle fracture.

In Figure 9, we can see that, in case of fracture around graphite nodules, voids are formed. Recesses are also visible from which the graphite nodules were ripped as well as some graphite nodules remaining in the recesses. The ferrite matrix around the graphite nodules deforms as the recesses



Slika 6. Udarna žilavost zlitine EN-GJS-400-18LT v odvisnosti od temperature.

Figure 6. Impact toughness of EN-GJS-400-18LT as a function of temperature.



Slika 7. Udarna žilavost jekla S235JR+AR v odvisnosti od temperature.

Figure 7. Impact toughness of S235JR+AR as a function of temperature.

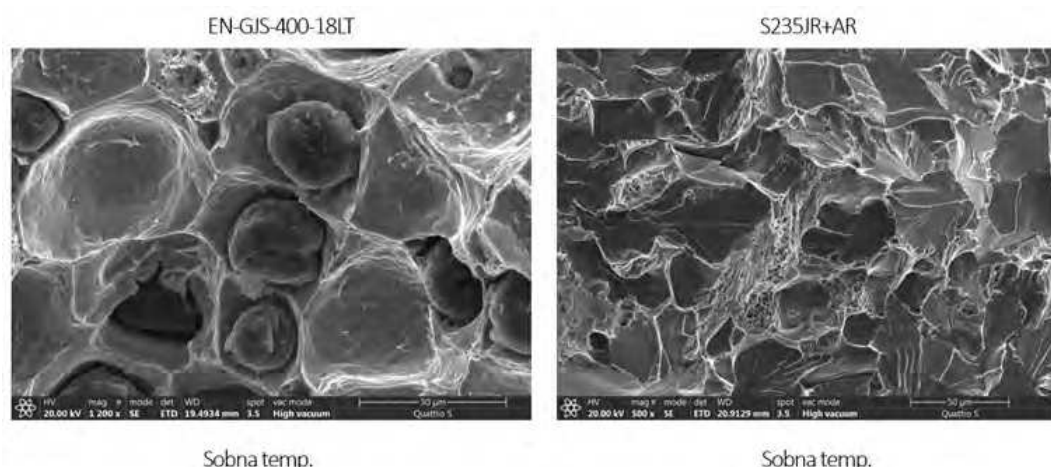
Pri jeklu so pri sobni temperaturi vidna področja duktilnega loma z značilnimi jamicami (duktilni prelom s koalescenco jamic) ter področja krhkega preloma z značilnimi gladkimi ploskvami, stopnicami in porečji (transkristalni cepilni prelom).

Pri $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ okoli grafitnih krogel ni znatne plastične deformacije (jamic se glede na kroglo niso povečale). Večina matrice okoli krogel je prelomljena krhko, kar dokazujejo ravne in gladke cepilne ploskve z značilnimi

are larger than the graphite nodules inside them. The break exhibits ductile characteristics.

At room temperature, steel exhibits ductile fracture areas with characteristic voids (ductile fracture with coalescence of voids) and brittle fracture areas with characteristic smooth faces, gradations and basins (transcrystalline cleavage fracture).

At $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, no significant plastic deformation is apparent around the graphite

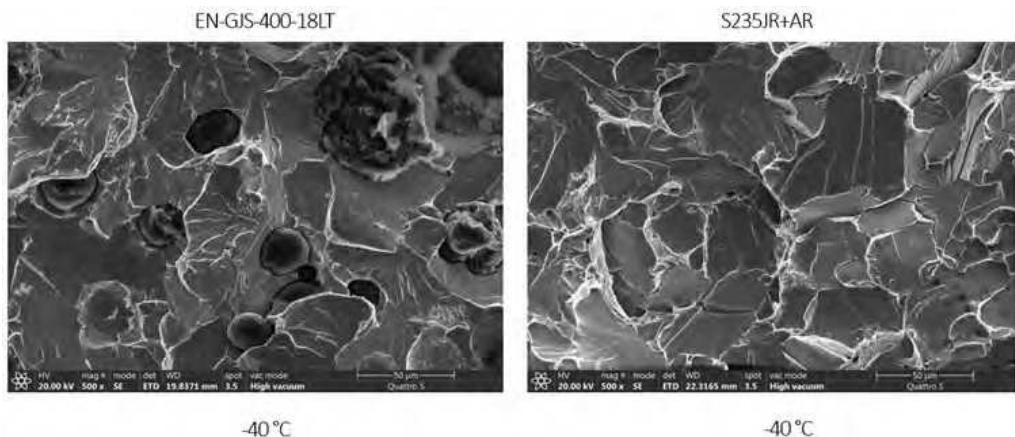


Sobna temp.

Sobna temp.

Slika 8. Prelomna površina CVN vzorcev obeh zlitin pri sobni temperaturi.

Figure 8. Fracture surface of CVN samples of both alloys at room temperature.



$-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

$-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Slika 9. Prelomna površina vzorcev CVN obeh zlitin pri $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Figure 9. Fracture surface of CVN samples of both alloys at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

porečji. Prav tako gre za transkristalni krhek lom.

Tudi pri jeklu na -20°C je očitno, da je lom potekal s transkristalnim cepilnim krhkim prelomom, saj so po celotni prelomni površini vidne gladke ploskve z rekami.

Z analizo prelomnih površin vzorcev CVN pod vrstičnim elektronskim mikroskopom smo potrdili, da lom v jeklu S235JR+AR poteka krhko pod temperaturo -20°C , pri sobni temperaturi pa gre za kombinacijo duktilnega in krhkega loma. Pri posnetkih prelomne površine zlitine EN-GJS-400-18LT je vidno, da grafitne kroglice močno vplivajo na izoblikovanje prelomne površine, pri čemer se kroglice trgajo iz matrice, ta pa se deformira, pri čemer nastaja površina v obliki stožcev in vdolbinic.

Razlog, da je lomna žilavost sive litine s kroglastim grafitom tako dobra kljub nizkim vrednostim udarne žilavosti, leži v grafitnih kroglicah, ki vplivajo na propagacijo razpoke. Pri počasnem napredovanju razpoke prihaja do otopitve konice razpoke, ko ta naleti na grafitno kroglico, zato se zmanjša intenziteta napetosti. Razpoka napreduje skozi matrico od kroglice do kroglice po poti, ki je energijsko najugodnejša. Ko razpoka napreduje skozi matrico in naleti na grafitne kroglice, se njeno širjenje upočasni, saj se mora razpoka širiti okoli grafitne kroglice. Razpoka se zato ukrivi med grafitnimi kroglicami, njena dolžina pa se posledično podaljša. Tako za ločevanje na fazni meji med grafitno kroglico kot tudi za podaljšanje dolžine razpoke je potrebna dodatna energija, kar prispeva k večji žilavosti pri kvazistatični obremenitvi. Pri preizkusu udarne žilavosti je hitrost deformacije tako visoka, da se ta prednost, ki jo dajejo grafitne kroglice sivi litini, izniči in so grafitne kroglice dejansko ravno razlog za nizko udarno žilavost. Tretiramo jih lahko kot poroznost, ki slabša udarno žilavost materiala.

nodules (the voids have not increased in size relative to the graphite nodules). Most of the matrix around the graphite nodules features a brittle fracture, as evidenced by flat and smooth fracture surfaces with characteristic basins. Furthermore, a transcrystalline brittle fracture also occurs.

Even at -20°C , the fracture is seen to have been a transcrystalline brittle cleavage fracture, as smooth planes with basins are visible across the entire fracture surface.

By analysing the fracture surfaces of CVN samples under a scanning electron microscope, it was confirmed that the fracture in S235JR+AR is brittle below -20°C , while at room temperature, it exhibits a combination of ductile and brittle fracture. The images of the fracture surface of EN-GJS-400-18LT show that the graphite nodules have a strong influence on the formation of the fracture surface, with the nodules being ripped out of the matrix, deforming the latter and forming a cone and recess-shaped surface.

The reason why the fracture toughness of ductile iron is so favourable despite low impact toughness lies in the graphite nodules that influence crack propagation. As the crack slowly propagates, the tip becomes more obtuse as it encounters the graphite nodules, reducing the stress intensity. The crack progresses through the matrix from nodule to nodule along the most energetically favourable path. As the crack progresses through the matrix and encounters the graphite nodule, its propagation slows down as the crack must expand around the graphite nodule. The crack therefore bends between the graphite nodules, and its length is extended. Both the separation at the interface between the graphite nodule as well as crack elongation require additional energy, which contributes to the increased toughness under quasistatic loading. In the impact

4 Zaključki

Namen raziskave je bila primerjava lomne in udarne žilavosti sive litine s kroglastim grafitom EN-GJS-400-18LT pri različnih temperaturah ter primerjava z jeklom S235JR+AR. Prišli smo do naslednjih ugotovitev:

- mikrostruktura zlitine EN-GJS-400-18LT in jekla S235JR+AR je sestavljena iz povprečno 11 odstotkov perlita in 89 odstotkov ferita, z razliko, da je pri prvi v matrici še ogljik – strjen grafit v obliki krogel,
- grafitne krogle pri kvazistatični obremenitvi vplivajo na propagacijo razpoke. Konica razpoke pri grafitni krogli otopi, kar zniža faktor intenzitete napetosti, širjenje razpoke pa se upočasni. Razpoka se ukrivi med grafitnimi krogli, kar podaljša njeno pot, za kar se porabi več energije,
- lomna žilavost sive litine s kroglastim grafitom EN-GJS-400-18LT je s padcem temperature bolj ali manj konstantna oziroma celo nekoliko naraste z $68,4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$ na $86,2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$. Lomna žilavost jekla S235JR+AR je prav tako konstantna skozi temperaturni interval in ravno tako nekoliko naraste z $29,40 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$ pri sobni temperaturi na $32,93 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$ pri -40°C . Lomna žilavost zlitine EN-GJS-400-18LT je tako v celotnem temperaturnem intervalu približno dvakrat večja od lomne žilavosti jekla, kar lahko pripišemo grafitnim krogli, ki vplivajo na propagacijo razpoke,
- pri preizkusu lomne žilavosti je prišlo pri zlitini EN-GJS-400-18LT v celotnem temperaturnem intervalu do stabilne rasti razpoke, pri jeklu S235JR+AR pa je prišlo pri temperaturah -20°C in -40°C do nestabilnega širjenja razpoke in nestabilnega loma v fazi otopitve

toughness test, the rate of deformation is so high that the advantage that graphite nodules impose on ductile iron is negated, and in fact, reversing the effect, resulting in extremely low impact toughness. They can be treated as porosity, which weakens the material's impact toughness.

4 Conclusions

The purpose of the study was to compare the fracture and impact toughness of EN-GJS-400-18LT ductile iron at different temperatures, as well as to compare it to S235JR+AR steel. The following conclusions were made:

- The microstructure of EN-GJS-400-18LT and S235JR+AR consists of an average of 11% pearlite and 89% ferrite, while the matrix of the former also contains solidified graphite nodules.
- Graphite nodules under quasistatic loading affect crack propagation. The crack in spheroidal graphite becomes obtuse, which lowers the stress intensity factor and the crack propagation is made slower. The crack bends between graphite nodules, lengthening its path and resulting in increased energy consumption.
- The fracture toughness of EN-GJS-400-18LT ductile iron is more or less constant or even increases slightly from $68,4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$ to $86,2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$ as the temperature is reduced. Furthermore, the fracture toughness of S235JR+AR is also constant throughout the temperature interval and even increases slightly from $29,40 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$ at room temperature to $32,93 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$ at -40°C . This means that the fracture toughness of EN-GJS-400-18LT is approximately twice that of steel across the entire temperature interval, which

konice razpoke,

- povprečna udarna žilavost zlitine EN-GJS-400-18LT je zelo nizka pri vseh temperaturah in pade s 15,7 J na sobni temperaturi na 12,2 J pri -40 °C. Pri jeklu S235JR+AR je pri sobni temperaturi povprečna udarna žilavost odličnih 141,5 J, a strmo pade na 13,7 J pri -40 °C,
- pri jeklu se pri preizkusu udarne žilavosti vzpostavi ravninsko napetostno stanje, kar praviloma daje večje rezultate kot meritve v deformacijskem napetostnem stanju. Dokaz za to so velike plastične deformacije na prelomni površini in krčenje vzorca v prečni smeri. Pri zlitini EN-GJS-400-18T večjih deformacij in krčenja v prečni smeri ni,
- temperatura prehoda iz duktilnega v krhek lom je pri jeklo S235JR+AR v temperaturnem intervalu med 0 °C in -20 °C. To so dokazali rezultati udarne žilavosti in mikrofraktografije.

Zaključimo lahko, da je siva litina s kroglastim grafitom EN-GJS-400-18LT bolj odporna na kvazistatične obremenitve med sobno temperaturo in -40 °C kot jeklo S235JR+AR. Jeklo S235JR+AR je bolj primerno, kadar je komponenta izpostavljena udarnim, sunkovitim obremenitvam, saj ima precej večjo udarno žilavost kot zlitina EN-GJS-400-18LT, razen na -40 °C, kjer sta zlitini enakovredni.

can be attributed to graphite nodules influencing crack propagation.

- In the fracture toughness test, EN-GJS-400-18LT showed stable crack growth across the entire temperature interval while S235JR+AR demonstrated unstable crack propagation at -20°C and -40°C, and unstable fracture in the crack tip obtusion phase.
- The average impact toughness of EN-GJS-400-18LT is extremely low at all temperatures, dropping from 15.7J at room temperature to 12.2J at -40°C. S235JR+AR has an excellent average impact toughness of 141.5J at room temperature, but is reduced sharply to 13.7J at -40°C.
- In the case of steel, the impact toughness test establishes a plane loading state, which generally yields higher results compared to measurements in the deformation loading state. This is substantiated by the large plastic deformations at the fracture surface and the shrinkage of the sample in the transverse direction. EN-GJS-400-18T does not exhibit significant deformation and shrinkage in the transverse direction.
- The ductile-to-brittle fracture transition temperature for S235JR+AR is in the 0°C and -20°C temperature interval. This is demonstrated by impact toughness and microfractography results.

It can be concluded that EN-GJS-400-18LT ductile iron is more resistant to quasistatic loading between room temperature and -40°C than S235JR+AR. S235JR+AR is more suitable when a component is subjected to impact and sudden loads as it has a much higher impact toughness than EN-GJS-400-18LT, except at -40°C where the alloys exhibit equivalent characteristics.

5 Literatura / References

1. HOLTZER, M., GORNY, M., DANKO, R. Microstructure and Properties of Ductile Iron and Compacted Graphite Iron Castings. New York : Springer International Publishing, 2015, Str. 166.
2. Charpy impact test [online]. [citirano 15. 3. 2022]. Dostopno na svetovnem spletu: https://en.wikipedia.org/wiki/Charpy_impact_test.
3. BRADLEY, W. L., SRINIVASAN, M. N. Fracture and fracture toughness of cast irons. International Materials Reviews, 1990. vol. 35, no. 3, str. 129–161.
4. MCKINNEY, K. E., BRADLEY, W. L., GERHARDT, P. C. An Evaluation of the Toughness of Ductile Iron vs Cast Steel Using Modified Charpy Test Specimens. AFS Transactions, str. 239–50.
5. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, E1820-13. Str. 54.
6. Livarstvo - siva litina s kroglastim grafitom. (ekvivalenten EN 1563:2011). SIST EN 1563:2012. Str. 46.
7. Graphite classification by visual analysis, ISO 945-1:2019. Str. 32.

AKTUALNO / CURRENT**Povzetki vseh predavanj z 62. IFC Portorož 2022**

V nadaljevanju vam predstavljamo povzetke predavanj, ki so bila predstavljena na zadnji livarski konferenci v Portorožu, t.j. 62. IFC Portorož 2022 v času od 14.–16. septembra 2022.



Mag. Mirjam Jan Blažič, predsednica organizacijskega odbora, pred obravnavo prve skupine plenarnih predavanj



Zasl. prof. dr. Alojz Križman, vodja znanstveno-programskega odbora



Predsedujoči pri plenarnih predavanjih, od leve proti desni: prof. dr. Jožef Medved, prof. dr. Rebeka Rudolf, mag. Andrej Megušar, g. Thomas Demsky, mag. Andraž Čevka

PLENARNA PREDAVANJA



Plenarni predavatelj, prof. dr.
Rüdiger Deike

R. DEIKE: Univerza Duisburg-Essen (DE): POSEBNA POMEMBOST KOVIN V KROŽNEM GOSPODARSTVU

Osnovni cilj krožnega gospodarstva je v uporabi manjše količine primarnih surovin. Osnova je v vračanju materialov po izteku življenjske dobe ter njihova ponovna uporaba. Vendar bi morali vedno izhajati iz osnovne naloge, da v osnovi med samo proizvodnjo nastane čim manj odpadkov in da je potem možno nastale odpadke v čim večji količini predelati in reciklirati v čim večji meri. Prav tako pa je pomembna gospodarnost reciklažnih postopkov. Najracionalnejša je uporaba v zaprtih ciklih, ki v zadostni meri omogočajo trajnostne proizvodne modele. V gospodarskem smislu pa je vse bolj pomembna zahteva, da se delež primarnih surovin zadrži na čim nižji stopnji uporabe in da se največji možni delež surovin uporabi v zaprtih ciklih. Prav industrija proizvodnje materialov, livarska industrija in industrija predelave materialov imajo veliko možnosti in s tem tudi odgovornosti do skrajne racionalnosti v uporabi materialov.



Plenarni predavatelj, dipl. inž.
Mirnes Berbić

M. BERBIĆ, P. HOFER-HAUSER, G. SCHINDELBACHER, P. SCHUMACHER: Avstrijski livarski Institut (AT): VEČJE KORISTI OPTIMIZACIJE TOPOLOGIJE KOT POSLEDICA 3-D TISKANJA PESKA

Peščena jedra in forme omogočajo notranjo in zunanjo strukturo ulitkov s tolerancami do nekaj desetink milimetra. Med litjem morajo prenesti visoke temperature in mehanske obremenitve ter po litju razpasti brez ostankov. Pretežno jedra in forme vsebujejo organska veziva, ki se vbrizgavajo skladno s strogimi standardi. Alternativni proizvodni postopek je 3-D tiskanje peska, ki zagotavlja določene okoljske prednosti zaradi zmanjšanja količine veziv in ima ogromen potencial za lahke konstrukcije. Predstavljeni so bili primeri optimizacije s 3-D tiskanjem peska, ki omogočajo izboljšanje lastnosti razgradnje ter s tem ugodnejši CO₂ odtis. Izdelani vzorci so bili primerjani z upogibno trdnostjo vzorcev, izdelanih na konvencionalen način. Z numerično simulacijo so optimizirali strukturo jedra in notranjosti. Med seboj so primerjali optimizirana in običajna jedra glede prednosti lokalne optimizacije.



Plenarni predavatelj, prof. dr.
Alojz Križman

A. KRIŽMAN^{1,3}, P. MRVAR^{2,3}, M. JAN-BLAŽIČ³, ¹Univerza v Mariboru, ²Univerza v Ljubljani, ³Društvo livarjev Slovenije, (SI): RAZISKOVALNA UNIVERZA – OSNOVA ZA GLOBALNE IZZIVE IN NAPREDEK SLOVENSKE LIVARSKE INDUSTRIJE

Slovenska livarska industrija je v letu 2021 v primerjavi z letom 2020 povečala količinski obseg proizvodnje za 9% in je ta znašal skupno 188.717 ton. Največji porast je bil na področju ulitkov iz Al-zlitin, in sicer za 18%, sledijo ulitki iz nodularne litine z +11%, iz cinkovih zlitin +9%, iz jeklo litine +6% ter iz bakrovih zlitin +2%. Konstantna rast proizvodnje je povezana s hitro prilagodljivostjo slovenskih livarn in stalnim generiranjem znanja. Oddelek za materiale in tehnologijo Naravoslovno tehniške fakultete Univerze v Ljubljani, je vodilna institucija na področju livarske industrije v Sloveniji in povezana s številnimi inštitucijami v tujini. Izpostavljeno je bilo delo na naslednjih področjih: Sinteza in karakterizacija Al-zlitin s kvazikristali, razvoj naprav za merjenje dimenzijskih sprememb

med strjevanjem, razvoj merilnih celic za kontrolirano ohlajanje, raziskave oksidacijske obstojnosti Ti zlitin, razvoj novih Al-zlitin, razvoj naprav za detekcijo mikrostrukturnih sprememb, razvoj postopkov modeliranja in simulacij, razvoj zahtevnih izračunov za livarske procese, razvoj termalne vakuumske komore. Univerza v Mariboru ima programe povezane z metalurgijo, materiali in livarstvom na fakulteti za strojništvo. V nacionalne razvojne projekte so bili vključeni s projektom: Tehnologija metastabilnih materialov s kovinsko osnovo, raziskave biomedicinskih zlitin ter sinteza kovinskih in kompozitnih mikro in nanodelcev z ultrazvočno razpršilno pirolizo.



Plenarni predavatelj, dr.
Konrad Weiss

**K. WEISS¹, P. STOLFIG², C. SCHENDERA³, ¹RWP GmbH,
²Leichtbaukompetenzzentrum Eichelhardt, ³EFM, (DE):
GRAVITACIJSKO LITJE Z UPORABO TLAKA**

Litje kompleksnih oblik elementov z zahtevami glede površine, gostote in mehanskih lastnosti je izjemno zahtevno. Izhodišče sta dovajalni in napajalni sistem ter pogoji litja. Prednost pri tem ima lamelarno polnjenje z lokalnim tlakom za kompenzacijo deficita prostornine. Predvsem je potrebno preprečiti dolgi čas strjevanja na območju napajanja. Dovajalni sistem mora izpolnjevati pravila za zagotavljanje hitrega in neoviranega polnjenja forme. Za to so uporabili programsko opremo WinCast. Uporabljen je bil poseben zgornji del forme, zato da bi nadomestili lokalni deficit prostornine in izdelali gost ulitek. Izvedba je potekala na hidravlični stiskalnici za izdelavo ulitkov z debelino stene iz Al ~ 1,2 mm, iz Mg ~ 0,8 mm. Potrebne temperature in časi se izračunajo in prenesejo v livni stroj. Med preskusi ni bilo zapaziti napak. S to novo tehnologijo se lahko izdelujejo tankostenski ulitki s posebnimi zahtevami, ki jih je običajno možno izdelovati s HPDC postopkom.



Plenarni predavatelj, dr.
Leopold Kniwallner

**L. KNIWALLNER¹, S. WIESSNER², D. FOKIN³, ¹Rusal
Marketing GmbH (CH), ²Aluminium Rheinfelden Alloys GmbH
(DE), ³Institute of Light Materials and Technologies, Moskau (RU):
RAZVOJ LIVARSKIH ZLITIN – IZZIV MED LASTNOSTMI IN TRAJNOSTJO**

Primarne livarske zlitine (PFA) se uporabljajo za širok spekter aplikacij v avtomobilski industriji in tudi drugje. Sekundarne livarske (SFA) pa so izdelane večinoma iz recikliranih materialov po njihovi uporabi. Z novimi cilji o ogljičnem odtisu in porabi energije v izogib povečanju globalne temperature bodo meje teh dveh skupin izginile in nova skupina primarno ekvivalentnih livarskih zlitin (PEFA) lahko predstavlja obetavno rešitev za doseganje obeh ciljev, to je učinkovitosti in trajnosti. Kombinacija zlitin z večjo vsebnostjo recikliranega materiala skupaj s primarnim aluminijem z nizkim ogljičnim odtisom predstavlja določeno rešitev za izpolnitev ciljev. Primeri razvoja zlitin Rheinfelden / Rusal za strukturne komponente in varnostne dele nakazujejo morebitne rešitve za

boljšo zmogljivost in manjši ogljični odtis. Glavni cilj je razvoj zlitin, ki lahko dosežejo zahtevane mehanske lastnosti brez dodatne toplotne obdelave. Takšni zlitini sta Castasil-37 in Castaduct-42.

**A. KEIDIES, BDGuss (DE): CASTING 2035 – NOVE PERSPEKTIVE
ZA LIVARSKO INDUSTRIJO**

Študija Casting 2035 obravnava nove vidike za livarsko industrijo, ki so jo leta 2021 pripravili ugledni strokovnjaki livarske industrije. Obeti za to industrijo so zelo pozitivni. V študijskem projektu so opredelili ključne točke in predpogoje. Iz študije je razvidno, da bo industrija litja litega železa in neželeznih litin še naprej zasedala pomemben položaj kot dobavitelj za vse industrijske sektorje. Brez izdelkov livarskih podjetij ni mogoče uresničiti



Plenarni predavatelj, dr.
Achim Keidies

prihodnjih projektov, ki temeljijo na njih. Poleg tega so v programu »Casting 2035« prepoznana tudi rastoča področja povpraševanja po ulitkih v prihodnosti. Podpodročja kot so npr. infrastruktura, sprememba mobilnosti in energetski prehod, izpostavljajo potenciale za livarsko industrijo. Scenariji prihodnosti pa so nedvoumno odvisni od zavezujočih smernic evropske politike in trajnostnega sodelovanja med politiki in industrijo.



Plenarni predavatelj, dipl. inž.
Mathieu Weber

M. WEBER, MAGMA Giesserei Technologie GmbH (DE): DIGITALNI LIVARSKI PROCES –MAGMA IN INDUSTRIJA 4.0

Industrijo 4.0 lahko opišemo kot inteligentno povezovanje procesov in podatkov za doseganje optimalnega rezultata inteligentno povezovanja podatkov za doseg pametno nadzorovanega proizvodnega procesa. Zbiranje podatkov omogoča ustvarjanje digitalne sence dejanskega proizvodnega procesa. Matematično in fizikalno modeliranje digitalne sence pa omogoča izdelavo digitalnega dvojčka sistema, ki se uporablja za napovedovanje pričakovane kakovosti komponent. Povezovanje virtualnega in realnega omogoča analizo podatkov in spremljanje sistemov, npr. razumevanje in reševanje težav. Programska oprema za avtonomni inženiring MAGMASOFT nadomešča konvencionalno simulacijo procesa litja z virtualnim načrtovanjem poskusov in genetsko optimizacijo za podporo načrtovanja litja, robustne postavitve procesa in optimalnega vrednotenja litja, še preden je izdelan prvi del. Avtonomni inženiring predstavlja in zagotavlja kvantitativno znanje za pregledno in dobro nadzorovano delovanje livarne.



Plenarni predavatelj, dr. Ion-
Alexandru Bacanu

I. A. BACANU, M. KLÄS, HA Group (DE): UGODNOSTI LIVARN PRI UPORABI PLATFORME, PONUJENE S STRANI HA KOMPETENČNEGA CENTRA CoC

Kompetenčno središče HA, poznano pod kratico CoC, je objekt, namenjen ustvarjanju napredka v livarski industriji. S tem je ustvarjena platforma za obširnejše sodelovanje s partnerji. Opisani so glavni cilji in značilnosti CoC. V tem konceptu so izpostavljeni štirje stebri: pilotni livarni za namene preizkušanja, projektno sodelovanje, optimizacija procesne verige in usposabljanje partnerjev. Predstavljenih je bilo nekaj študij primerov, ki se osredotočajo na posamezne projekte, razvite z različnimi partnerji, na podlagi uporabe sodelovalne platforme, ki jo zagotavlja CoC. Predstavljeno je sodelovanje med različnimi subjekti, povezanimi z livarsko industrijo, kot so univerze, razvojni centri, proizvajalci opreme in seveda livarne.



Plenarni predavatelj, dr.
Christoph Bleicher

C. BLEICHER, C. PITTEL, K. LIPP, Fraunhofer Institute for Structural Durability and System Reliability LBF (DE): UPOŠTEVANJE TRAJNE DINAMIČNE TRDNOSTI Z VIDIKA LOKALNE MIKROSTRUKTURE ZA PROIZVODNJO UČINKOVITIH PRESTAV IZ SIVE LITINE S KROGLASTIM GRAFITOM

Veliki ulitki iz nodularne litine (GJS) ponujajo, zaradi najrazličnejših možnosti oblikovanja in nizkih stroškov izdelave, številne prednosti. Trdota materiala se uporablja za izpeljavo nihajne trdnosti za skupine materialov, vendar pa ne upošteva različnih in nehomogenih mikrostruktur in s tem gradientov lastnosti komponente. Na podlagi preizkusnih vzorcev in litih sestavnih delov zobnikov v resničnih pogojih litja in z dejanskimi parametri toplotne obdelave na podlagi EN-GJS-700-2 in ADI-900 so bile podrobno analizirane ciklične nihajne trdnosti ter izvedena primerjava s parametri mikrostrukture in kvazistatičnim vedenjem materiala. Zaradi velikih debelin sten takšnih zobnikov se pri mehanskih in mikrostrukturnih lastnostih pri

materialu pojavljajo gradienti, ki jih je potrebno upoštevati. Metalografske in fraktografske preiskave so bile izvedene na reprezentativnih vzorcih za utrujanje. Predstavljen je koncept načrtovanja specifične komponente, v katerem so predstavljeni predlogi za določitev metalografskih in kvazistatičnih značilnih vrednosti na podlagi rezultatov večkratne linearne regresije. Koncept zasnovane sestavnega dela združuje lokalno trdnost med valjanjem in lokalno nihajno trdnost s kvazistatičnimi in metalografskimi značilnimi vrednostmi za namene zagotavljanja kakovosti, kot so trdota, nodularnost, gostota grafitnih delcev, raztezek do pretrga, meja plastičnosti in natezna trdnost. Z večkratno linearno regresijo se lahko iz navedenih vrednosti značilnosti določi statistično pomemben model.



Plenarni predavatelj, dr.
Daniel Molnar

D. MOLNAR, Univerza v Miskolcu (HU): OBRATNI INŽENIRING ARTEFAKTOV

Z računalniško simulacijo in nedestruktivnimi metodami je bila proučena tehnologija litja in napake pri litju artefakta-sekire z očesom. Preučevan je bil artefakt iz prazgodovinske zbirke v Madžarskem narodnem muzeju. Kemijska sestava je bila analizirana z aktivacijsko analizo gama žarkov. Zunanjo obliko in notranjo strukturo artefakta te sekire so proučili z nevtronsko radiografijo. Izdelali so eksperimentalno repliko ulitka in virtualno geometrijo. Eksperimentalna replika ni tako zelo omejena z vidika metod preiskav in so seveda s tem tudi rezultati zaradi napak pri litju manj reprezentativni. Z računalniško simulacijo so preizkusili več primerov polnjenja in strjevanja ter preverili vpliv materiala forme in temperature taline na porazdelitev poroznosti. Rezultate simulacije so potrdili s slikami nevtronske radiografije, analizo mikrostrukture ter analizo diferencialnega interferenčnega kontrasta.



Plenarni predavatelj, prof. dr.
Iulian Riposan

I. RIPOSAN, D. ANCA, S. STAN, I. STAN, M. CHISAMERA, Univerza v Bukarešti (RO): STRJEVANJE SIVE LITINE S KROGLASTIM GRAFITOM Z VISOKO VSEBNOSTJO SI V KOVINSKI FORMI

Uporaba sive litine z visoko vsebnostjo Si (3 do 6 %) zagotavlja visoko trdnost, trdoto, odpornost proti oksidaciji in koroziji. Ob tem pa manjšo duktilnost, žilavost in toplotno prevodnost, na kar pomembno vpliva grafit. Cilj je bil opredeliti strukturne parametre nemodificirane sive litine s 4,5 % Si ter proučiti učinke hitrosti ohlajanja med strjevanjem, ki so posledica značilnosti forme in ulitka. Vzorci klinaste oblike so bili uliti v peščeno formo ter kovinsko formo. Količina grafita v kovinski formi je bila manjša za 65 %, povečalo se je število nodul (> 30 %), posledica česar je zmanjšana debelina stene. Povečanje velikost preseka ulitka vodi v povečanje oboda grafita. Uporaba kovinske forme je vodila v 8–10 % višjo nodularnost. Faktor okroglosti in faktor sferičnosti imata višjo vrednost pri strjevanju v kovinski formi. Strjevanje sive litine z visoko vsebnostjo Si je bolj občutljivo na manj pomembne elemente kot pri strjevanju v peščeni formi. Višja vsebnost Si na splošno zavira tvorbo karbidov v velikosti ulitka s presekom najmanj 3 mm v peščeni formi. Inokulacija pa je potrebna, da bi zmanjšali karbide v kovinski formi in izboljšali kakovost grafitne faze.

SEKCIJA A – LITO ŽELEZO IN LIVARSKA TEHNOLOGIJA

G.GEIER, D. HOWE, Siempelkamp Giesserei GmbH (DE): DIGITALIZACIJA V LIVARSKI INDUSTRIJI – OD KONCEPTA DO REALNE APLIKACIJE

Za energetske intenzivno gospodarstvo, vključno z livarsko industrijo, je glede na načrte Evropske unije izredno pomembno zagotoviti cenovno dostopno oskrbo z energijo in ob tem zmanjšati izpuste CO₂. Vse težja je oskrba z viri, kot so surovine in primarni materiali, kar je v središču pozornosti industrije. Vse več pozornosti mora energetske intenzivna industrija posvetiti tudi zagotovitvi



Predavatelj, dr. Georg Geier

kadra od inženirjev do polkvalificiranih kadrov. Ključ za izboljšave vseh vidikov je digitalizacija. Pri tem je potrebno izpostaviti vse cilje, ki bi jih z digitalizacijo morali doseči. Na primeru podjetja Siempelkamp Giesserei kako je digitalizacija lahko uspešna za celovito preobrazbo. Pojasnjen je bil primer posebnosti te livarne. Posebno je bil prikazan primer sodobne programske arhitekture z možnostjo umetne inteligence. Upoštevana je bila celotna tehnologija peči, njihovo delovanje in krmilne zanke v sodelovanju s podjetji ABP Induction systems in Zorc Technology. Prikazan je bil stalni razvoj postopkov formiranja z uvedbo novih kontrolnih zank.

P.MRVAR¹, M.PETRIČ¹, B.BAUER², ¹Univerza v Ljubljani (SI), ²Univerza v Zagrebu (HR): ANALIZA POŠKODB NA ULITKIH IZ CGI IN SGI ZARADI TERMOMEHANSKEGA IN EROZIJSKEGA DELOVANJA TEKOČE AL ZLITINE

Izvedena je bila izdelava in karakterizacija nove komore za tlačno litje (HPDC) s hladno komornim strojem po dveh industrijskih testih, in sicer: po 16k ciklih z uporabo komore večje dimenzije in po 21k ciklih polnjenja Al komore manjše dimenzije, v stroju za tlačno litje. Komori za tlačno litje sta bili izdelani ter razviti iz SiMoCr litega železa z dodatkom silicija ter vermikularno do kroglaste oblike grafita (SiMoCr CGI-SGI). Za izdelavo komor za tlačno litje je bil izdelan material, ki izkazuje boljšo toplotno prevodnost SiMoCr CGI in SGI. Pojasnjen je bil mehanizem ter nadaljevanje poškodbe po uporabi. Ugotovljen je nastanek razpok na ostrih robovih grafitnih delcev ter zmanjšanje adhezije med mejami zrn. Razpoke so lokalno napredovale in povzročale lokalne porušitve zlitine. Opremljen pristop omogoča cenovno ugodnejšo aplikacijo v primerjavi z obstoječimi materiali, ki se uporabljajo za izdelavo komor hladno komornega stroja.



Vabljeni predavatelj, prof. dr. Primož Mrvar

M. MANAPURAM, North Eastern Regional Institute of Science and Technology (IN): PREOBlikOVANJE OPERACIJ LITJA Z UPOŠTEVANJEM VHODNO-IZHODNEGA UPRAVLJANJA DOBAVNE VERIGE.

Po podatkih svetovnega popisa livarn iz leta 2021 je Indija drugi največji proizvajalec ulitkov (11,31 milijona ton v 4.500 livarnah) na svetu. Svetovna proizvodnja ulitkov je v letu 2021 znašala 105,5 milijona ton v več kot 46.500 livarnah v 34 državah. Livarstvo potrebuje velike količine vhodnih surovin. Vhodni-izhodni model ulitkov in upravljanje dobavne verige sta bistvenega pomena za livarsko industrijo. Nove tehnologije predstavljajo nove težave za obstoječe livarne. Lastniki morajo zaradi tega preoblikovati svoje postopke litja. Indijske livarne dobavljajo kovinske ulitke za avtomobile (32 %), traktorje in železnice (6 %), stroje in orodja (8 %), sanitarne armature in pribor za cevi (16 %), energetske stroje in železnice (11 %), ostalo 27 %. Zaradi tega so izvedli poskuse preoblikovanja postopkov litja, primerna hibridna električna vozila, 3-D tiskanje ulitkov in drugo. Prav tako se vse večja pozornost usmerja v upravljanje dobavnih verig.



Vabljena predavateljica, prof. dr. Zdenka Zovko Brodarac

Z. ZOVKO BRODARAC¹, A. MAHMUTOVIĆ², S. ZELJKO³, L. ZELJKO¹, ¹Univerza v Zagrebu (HR), ²TC Livarstvo d.o.o. (SI), ³Plamen d.o.o. Požega (HR): USPEŠNOST NUMERIČNIH SIMULACIJ PRI OPTIMIZACIJI PROIZVODNJE ULITKOV

Kemijske lastnosti in pogoji strjevanja pomembno vplivajo na razvoj mikrostrukture in mehanskih lastnosti. Uporaba sive litine v primeru litja tankostenskih ulitkov zahteva natančno pripravo tankostenskega ogrodja parametrov tehnološkega procesa litja, in sicer zaradi nagnjenosti k

ukriviljanju in videza ožganosti. Prednost numeričnih simulacij je v učinkovitem in hitrem izračunavanju litja in strjevanja ulitkov. Gospodarska prednost je v hitri zamenjavi različic izdelkov v kratkem času. Eksperimentalni del zahteva več različic numerične simulacije postopka litja. Prva različica je izvirna geometrija, ki je uporabljena pri običajnem postopku litja tankostenskega ogrodja za vrata kamina. Izdelane so bile še druge različice ulitkov z optimizirano geometrijo. Izveden je bil postopek litja vseh različic ulitka kakovosti EN GJL-200. Sledila je raziskava medsebojnega vpliva kakovosti ulitka in procesnih parametrov. Ugotavljali so vpliv položaja vpenjal, velikosti zračnikov in toplotne distribucije med strjevanjem ulitka na razvoj mikrostrukture, trdoto in natezno trdnost vzorcev ulitkov ter jih primerjali z rezultati pridobljenimi z numerično simulacijo.



Predavatelj, g. Carsten Nielsen

C. NIELSEN, DISA Industries A/S (DK): IZKORIŠČANJE PODATKOV ZA UPRAVLJANJE IN IZBOLJŠANJE LIVARSKEGA PROCESA

Uporaba digitalnih orodij za zbiranje, vizualizacijo, spremljanje in analizo podatkov iz vseh delov livarskega procesa je najučinkovitejši način za upravljanje in nadaljnje izboljšanje proizvodnje ulitkov. Končni cilj je lahko dinamičen nadzor procesa v realnem času na celotni liniji. Združiti je potrebno livarske izkušnje in digitalno strokovno znanje. Pri celotnem delu je pomembno povezovanje in vzpostavitev centraliziranega zbiranja podatkov za vsak podproces:

1. korak: Namestitev infrastrukture za zbiranje podatkov iz strojev in drugih virov podatkov v livarni in združevanje podatkov v enotno zbirko.

2. korak: Vizualizacija in poročanje; ustvarjanje zasnove izpeljanih spremenljivk; spremljanje ključnih kazalnikov uspešnosti; izdelava nadzornih plošč.

3. korak: Izkoriščanje podatkovne platforme; optimizacija celotnega procesa z uporabo umetne inteligence.



Vabljeni predavatelj, prof. dr. Branko Bauer

B. BAUER¹, K. JURKOVIĆ¹, S. KASTELIC², P. MRVAR², ¹Univerza v Zagrebu (HR), ²Univerza v Ljubljani (SI): SIMULACIJSKA ŠTUDIJA CENTRIFUGALNEGA LITJA CEVI IZ NERJAVNEGA JEKLA S POMOČJO PROGRAMA PROCAST

Za izdelavo cevi ali oblik, povezanih s cevjo, za katere je značilen relativno velik premer, a kratka dolžina ulitka, se uporablja vertikalno centrifugalno litje. Razvit je bil laboratorijski prototip stroja za ta način litja. S programsko opremo ProCAST je bila izvedena simulacija polnjenja in strjevanja, da bi lahko določili vpliv hitrosti vrtenja forme in temperature litja na končno kakovost ulitka. Simulirane so bile cevi iz nerjavnega jekla EN 1.4581 z zunanjim premerom 84 mm, višino 42 mm in debelino 7 mm. Analiziran je bil učinek hitrosti vrtenja ter učinek temperatur litja. Za hitrost vrtenja 1.400 vrtljajev na minuto in temperaturo litja 1.485 °C so bile simulirane deformacije napetosti in mikrostrukture. Priporoča se hitrost vrtenja 1.400 vrt/minuto in temperatura litja 1.510 °C, ko se ulitek ohladi se napetosti spremenijo iz nateznih v tlačne. Deformacija vzdolž osi x znaša 0,84 mm in vzdolž. Glede na rezultate simulacije osi y 0,83 mm. Vrednosti deformacij so dokaj homogene. Ker se notranja stran v sredini ulitka strdi zadnja, ulitek se torej polni iz sredine, je na tem delu največja možnost napak v ulitku.

K. VAN NIEKERK^{1,2}, ¹Lauds Foundry Equipment GmbH (DE)¹, ²Siapro d.o.o. (SI): REŠITVE ZA NEUPORABLJENO COLD BOX PEŠČENO MEŠANICO; PRIMARNA IN SEKUNDARNA REGENERACIJA

Podjetje Lauds Foundry Equipment GmbH je razvilo sistem za ravnanje z neuporabljenim mokrim peskom iz sistema Coldbox, omočenim s smolo, zavrženimi jedri ali sklopi jeder, ki se

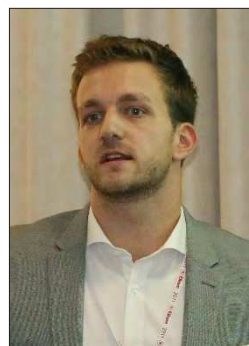


Predavatelj, inž. Kevin Van Niekerk

ovrednotijo in dovedejo nazaj osnovni ekipi za izdelavo peščenih jeder. Razvili in uspešno uvedli so rotacijski stroj za sušenje Lauds, ki lahko pesek iz sistema Coldbox, omočen s smolo, obdela v rotacijskem stroju za sušenje. Osušeni pesek se razgradi skupaj z izločenimi jedri ali sklopi jeder, ki so nato primerna za primarno regeneracijo. V sistemu sekundarne predelave Lauds, se smola iz sistema Coldbox razgradi. Tako lahko livarna na odlagališčih ne odlaga več strupenih materialov. Edini material, ki ga odlaga, je drobni prah iz izločevalnika prahu.

**J. POKLIČ^{1,2}, A. NAGODE¹, P. MRVAR¹, A. TEKAVČIČ², M. PETRIČ¹,
¹Univerza v Ljubljani, ²Kovis Livarna d.o.o., (SI): PRIMERJAVA
UDARNE IN LOMNE ŽILAVOSTI SIVE LITINE S KROGLATIM GRAFITOM
IN FERITNEGA JEKLA**

Izvedena je bila primerjava lomne in udarne žilavosti sive litine s kroglastim grafitom EN-GJS-400-18LT(SL) in valjanega feritnega jekla S 235 JR + AR(ST). Za preizkus lomne žilavosti so pripravili preizkušance za tri-točkovni upogibni preizkus (SENB), preizkušane za preizkus udarne žilavosti po Charpyju (CVN) ter vzorce za metalografsko analizo. Preizkuse lomne in udarne žilavosti so opravili pri različnih temperaturah 0 °C, - 20 °C ter - 40 °C. Metalografska analiza je pokazala, da obe zlitini vsebujeta enak delež ferita in perlita. S preizkusi je bilo ugotovljeno, da je udarna žilavost sive litine majhna na celotnem temperaturnem intervalu in medtem ko je udarna žilavost SL majhna na celotnem temperaturnem intervalu, je le ta pri ST pri sobni temperaturi visoka, potem s temperaturo pada in je pri - 40 °C enaka udarni žilavosti SL. Lomna žilavost SL pa je na celotnem temperaturnem intervalu višja od lomne žilavosti ST. Razlog za dobro lomno žilavost SL so grafitne krogle, ki otopijo konico razpoke. Prav grafitne krogle pa so razlog za nizko udarno žilavost.



Predavatelj, mag. Jan Poklič

L. LAZIČ¹, M. LOVRENČIČ-JUGOVIČ¹, M. BOROŠIČ², ¹Univerza v Zagrebu, ²ABS Sisak d.o.o., (HR): DOLOČITEV RAZMERJA KOVINSKIH KOMONENT VLOŽKA PRI KUPOLNI PEČI

Glavna prednost kupolk v primerjavi z električnimi pečmi so manjša občutljivost na nizkokakovostne materiale šarže in onesnaževalce, oksidacijske in redukcijske reakcije med taljenjem v kupolki potekajo znotraj talilne cone in nad njo, kar omogoča uporabo visoko oksidiranega in nizkokakovostnega odpadnega materiala, uporabo cenejših zlitin in nekovinskih dodatkov. Ena osnovnih tehnoloških težav pri delovanju kupolke je določitev razmerij med komponentami šarže, ki jo sestavljajo koks, topilo in šarža kovin. V praksi je masni delež med šaržo kovin in koksom od 1:10 do 1:8. Pogosto topilo je apnenec, katerega skupna masa je običajno enaka 20 % mase koksa. Z uporabo metode izbire iz razpoložljivega območja so izračunali deleže kovinskega dela šarže za izdelavo taline iz sive litine, standardizirane pod oznako EN-GJL-250, ki je sestavljena iz 3% C, 94,25 % Fe, 1,8 % Si, 0,7 % Mn, 0,10 % S, 0,15 % P. Med prehodom skozi redukcijsko cono taljeno železo pridobiva ogljik, na drugi strani pa v zgorevalni coni potekajo oksidacijske reakcije Mn in Si. Glede na rezultate izračuna bi morale 100 kg kovinske šarže vsebovati: odpadki iz lastne proizvodnje 20 kg, kupljena siva litina 15 kg, odpadno jeklo 14 kg, nodularna litina 21 kg, bela litina 30 kg, silicijev mangan 0,748 kg, ferosilicij 3 kg. Razlika dodanih 3,748 kovinskega dela šarže ne vpliva bistveno na zahtevano sestavo taline.



Vabljeni predavatelj, prof. dr. Kemal Delijić

**K. DELIJIĆ¹, M. FILIPOVIĆ², V. MANOJLOVIĆ², D. RADONJIĆ¹,
¹Univerza v Črni Gori (MNE), ²Univerza v Beogradu (SRB):
**KOROZIJSKE LASTNOSTI MLEVNIH KROGEL IZ BELE LITINE Z
VISOKO VSEBNOSTJO KROMA, IZDELANE Z Al5Ti1B CEPIVOM****

Korozijsko vedenje krogel za mletje iz bele litine z visoko vrednostjo kroma, izdelanih z udrobnjenjem Al5Ti1B, so ocenili z linearno potenciodinamično polarizacijsko metodo. Preiskave so bile izvede v sladki vodi pri temperaturi 20 °C. Taljenje zlitin je potekalo v indukcijski peči, krogle za mletje s premerom 60 mm pa so bile ulite v trajne forme. Obseg in masni delež faz, prisotnih v strukturi, so določili s pomočjo analizatorja slik. Lastnosti vzorcev so ocenili z elektrokemičnimi metodami, analizo mikrostrukture in meritvami trdote vzorcev. Ugotovili so, da imajo zlitine bele litine z visoko vsebnostjo kroma višje vrednosti polarizacijske odpornosti in manjše vrednosti gostote korozijskega toka v primerjavi z nemodificirano zlitino. Dodatek Al5Ti1B premakne korozijske potenciale proti nižjim negativnim vrednostim. Najugodnejši vrednosti polarizacijske odpornosti in korozijskega toka sta bili izmerjeni za vzorec, modificiran z 0,5 % Al5Ti1B. Potenciodinamične polarizacijske krivulje vzorcev bele litine z visoko vsebnostjo kroma so v primerjavi z osnovno nemodificirano zlitino premaknjene proti nižjim negativnim potencialom. Z dodatki 0,5 % Al5Ti1B se poveča trdota ulitih krogel za 1,5 HRC. Trdota krogel se giblje med 53,8 in 54,1 HRC. Z višjo vsebnostjo Al5Ti1B postaja struktura bele litine drobnejša, velikosti primarnega avstenitnega dendrita in velikost evtektičnega karbida M_7C_3 pa se zmanjšujeta.



Predavatelj, mag. Jan Brence

**J. BRENCE¹, S. KASTELIC², A. MAHMUTOVIĆ², P. MRVAR³,
¹Livarna Titan d.o.o., ²TC Livarstvo d.o.o., ³Univerza v Ljubljani, (SI):
**UPORABA IZRAČUNA LIVARSKIH PROCESOV ZA OPTIMIZACIJO ULIVNO-
NAPAJALNEGA SISTEMA ULITKA KAPE IZOLATORJA****

Ulivno-napajalni sistem za vertikalno litje v peščene forme mora biti dimenzioniran tako, da je tok taline čim manj turbulenten, da plini iz peščene forme ne prehajajo neposredno v zračni tok in da med litjem ne prihaja do erozije peščene forme. Zagotoviti je potrebno tudi usmerjeno strjevanje ulitka. Med masovno proizvodnjo se lahko pri litju v peščene forme pojavijo številne poznane napake. Računalniško podprte simulacije litja in strjevanja so ključne za optimizacijo livarskih procesov in tveganj še preden te nastopijo. Z računalniškimi simulacijami že v fazi razvoja orodja določimo najbolj optimalne pogoje litja in konstruiramo primeren ulivno-napajalni sistem glede na specifikacije ulitka. V celoti je podan primer optimizacije elementov ulivno-napajalnega sistema kape izolatorja iz bele temprane litine. Pri litju je bilo že v začetni fazi veliko število poroznih ulitkov. Na osnovi izračunov simulacije litja in strjevanja z uporabo programskega paketa ProCAST je bila izvedena optimizacija elementov ulivno-napajalnega sistema ter spremenjen ulivni sistem, ki je zagotovil kakovostno proizvodnjo zahtevnega ulitka.



Vabljeni predavatelj, dr. Sebastjan Kastelic

**S. KASTELIC^{1,3}, M. GRAH², J. SELJAK², D. KOGOJ², A.
MAHMUTOVIĆ³, P. MRVAR¹, ¹Univerza v Ljubljani, ²ETA d.o.o. Cerkno,
³TC Livarstvo d.o.o., (SI):
**UMERJANJE NUMERIČNEGA IZRAČUNA ZA
OPTIMIZACIJO PROCESA LITJA GRELNE PLOŠČE****

Numerični izračun livarskih procesov nam danes omogoča vpogled v posamezno sekvenco litja na tak način, da nam pomaga odkriti in razumeti vzroke za nastale defekte in s tem razumevanjem napak je možna učinkovita optimizacija procesa. Zaupanje v pravilnost rezultatov numeričnega izračuna

in vse baze podatkov uporabljenih materialov nam omogočajo pravilno usmeritev za določeno tehnologijo litja in specifičnost posameznega proizvodnega procesa. Predstavljeno je bilo umerjanje prestopnostnega koeficienta na meji med peščeno formo in ulitkom. Na več točno določenih mestih v peščeni formi je bila izmerjena temperatura med litjem in ohlajanjem ulitka. Izmerjeni rezultati so bili primerjani z numerično izračunanimi. Na osnovi tega se je ustrezno kalibriral prestopnostni koeficient. Proces usmerjanja prestopnostnega koeficienta je nato bil izveden skupaj z optimizacijo dovodnega kanala na primeru litja grelnih plošč za odpravo poroznosti na mestu pripetja.

SEKCIJA B – NEŽELEZNE ZLITINE



Vabljen predavateljica, prof. dr. Rebeka Rudolf

R. RUDOLF^{1,2}, P. MAJERIČ^{1,2}, V. LAZIČ³, ¹Univerza v Mariboru, ²Zlatarna Celje d. o. o., (SI), ³Univerza v Beogradu (SRB): RAZVOJ NOVE DENTALNE ZLITINE NA OSNOVI ZLATA IN GERMANIJA

Razvoj nove zlato-germanij (Au-Ge) zlitine poteka v okviru mednarodnega Eureka projekta GOLD-GER E! 17091. Zahteve in lastnosti nove Au-Ge zlitine so: I. uporaba v zobozdravstvu, kjer so zahteve podobne tistim materialom, ki so namenjeni za porcelanaste zobne konstrukcije, II. uporaba v proizvodnji nakita, kjer so zahteve vezane na barvo Al-zlitine in III. za lastnosti vezane na uporabo najzahtevnejših spajk. Razvoj nove Au-GE dentalne zlitine je vezana na biokompatibilnost obstoječih Au dentalnih zlitin. Druga možnost je zamenjava, ki bi se koristila v sektorju nakita. Pri Au je sedaj ključni dodani element Ni, ponekod pa celo zelo dragi Pd. Oba ta dva elementa sta alergen, kar zahteva dodatek ključne plasti z nanometersko debelino elementov Rh ali Pt. Raziskave so pokazale, da dodatek Ge poveča tudi fluidnost Au zlitine, kar je pomembno za spajkanje brez dodanega fluksa. Pričakuje se, da bo zlitina Au-GE imela visoko električno in toplotno prevodnost ter korozijsko odpornost.



Predavatelj, dipl. inž. Ashley Stone

A. STONE, MAXImolding! Technology GmbH (DE): VERTIKALNE ŠOBE ZA HKRATNO IN EFEKTIVNO DOVAJANJE DELNO STRJENE TALINE V KOVINSKA ORODJA – NOV GIGA PRESS ZA STRUKTURNE ELEMENTE IZ LAHKIH ZLITIN

Čeprav je možno proizvesti vedno večje elemente za izdelavo avtomobilov, ni nujno, da so večji stroji hkrati prijaznejši do okolja in energetsko učinkovitejši. Leta 2017 je bil predlagan nov način litja velikih strukturnih delov z namestitvijo več injektorjev za dovajanje poltrdne taline navpično nad velikim kalupom ali okoli njega. Poleg samega stroja za tlačno litje potrebuje celotna giga celica za litje in proizvodnjo tekoče taline dodatno opremo. Takšni stroji za vbrizgavanje tekoče taline so okoljsko netrajnostna rešitev. Velike in težke dele je potrebno prepeljati na končno lokacijo, jih sestaviti s posebnimi stroji in na koncu okoli giga livnega stroja zgraditi še tovarno. Za izdelavo velikih strukturnih ulitkov predlagajo več razširljivih modelov injektorjev za poltrdno, nefluidizirano talino, ki jo vbrizgavajo sočasno ali zaporedno. Takšen pristop je za litje velikih delov boljši. Na veliko površino kalupa nameravajo namestiti več manjših injektorjev in vbrizgati poltrdno suspenzijo za izdelavo ulitkov velikih delov, kot so bočni paneli ali strehe avtomobilov. Tako je mogoče uliti veliko bolj kakovostne dele. Postopek MAXImolding omogoča bistveno bolj kakovostne dele. Obdelava taline v tem primeru poteka v popolnoma zaprtem stroju.



Vabljen predavateljica, prof.
dr. Maja Vončina

M. VONČINA, K. RUDOLF, J. MEDVED, Univerza v Ljubljani (SI): VPLIV SPECIFIČNE POVRŠINE IN DELEŽA RECIKLIRANEGA ALLUMINIJA NA KAKOVOST ZLITINE AISi10Mg(Fe)

Reciklaža je izjemnega pomena za ohranjanje naravnih virov surovin in zmanjšanje onesnaževanja. Delež uporabljenega sekundarnega materiala pri izdelavi Al-zlitin vztrajno narašča. Ob natančni pripravi in ločevanju je možno reciklirani Al uporabljati skoraj v vse namene. Namen raziskave je bila analiza vpliva različnega deleža krožnega procesa ter specifične površine in kakovosti izdelane zlitine. Izdelanih in analiziranih je bilo sedem vzorcev. Prvi je služil kot osnova in je bil izdelan iz 100 % bloka vhodne zlitine, ostalih šest pa je bilo izdelanih iz različnih deležev krožne litine z različnimi površinami. Vsi vzorci so bili analizirani v litem stanju. Izkoristek taljenja se zmanjša z večjim deležem in večjo specifično površino uporabljenih krožnih litin. To se najizraziteje odraža v kopičenju deleža železa, zaradi česar se tudi delež igličaste faze β -Al₅FeSi poveča. Natezna trdnost ter raztezek pa se v primerjavi z vzorcem izdelanim le iz primarnega Al bloka, zmanjšata.



Vabljeni predavatelj, dr.
Vladimir Krutiš

V. KRUTIŠ, R. ŠTEPAN, Tehnološka univerza Brno (CZ): OPTIMIZACIJA S FDM METODO 3-D NATISNjenih MODELOV ZA TEHNOLOGIJO PRECIZIJSKEGA LITJA

Tehnologija precizijskega litja (IC) je skladna s posebnimi zahtevami glede široke variabilnosti materialov kot tudi možnostjo kompleksnih oblik. Hkrati je to tudi tehnologija, ki se pogosto uporablja za izdelavo prototipov in jo lahko kombiniramo s 3-D tiskanjem modelov in govorimo tudi o hibridni tehnologiji. Prednosti so prav tako v nizkih stroških in prihrankih časa za izdelavo prototipov in malih serij. Precej cenejša metoda je tehnologija ciljnega nanosa (FDM) ali ekstrudiranja plastičnih materialov (FFF), ki sta namenjeni tiskanju vzorcev iz plastike, kot je PLA, ABS ali posebnih filamentov, kot je npr. PolyCAST™. Slabost obeh metod pa je slabša kakovost površine natisnjenih modelov in težave s pokanjem lupine. Proučen je bil vpliv polnila na nastanek razpok med izgorevanjem modela s tehnologijo »flash fire«. Preizkusili so tudi »geroidna« polnila v razponu 0–15 %. Raziskali so tudi

toplotne lastnosti materiala PolyCAST. Podatke o koeficientu toplotnega raztezanja so pridobili z dilatometrijo. Poznavanje termičnih procesov so naknadno preverili na konkretnem ulitku.



Predavatelj, dipl. inž. Nejc
Jeršin

N. JERŠIN, LTH Castings d.o.o. (SI): AVTOMATIZIRANO ZALAGANJE TALILNIH PEČI

Peči s kapaciteto taljenja 2–3 tone na uro zahtevajo neprekinjen vnos materiala. Transport materiala poteka v posebej prilagojenih vozičkih. V sistem avtomatiziranega odvoza materiala je vključenih 28 livarskih celic in vsebuje 8 avtomatsko vodenih vozil (AGV), ki izvršujejo transportne naloge pod nadzorom sistema za upravljanje prometa (TCS). Vozilo na poziv livarja do livarske celice dostavi prazen voziček, obenem pa zapne in odpelje polnega. S podatki o materialu, ki jih priskrbi ERP sistem, se na posamezno peč dostavi ustrezno zlitino. Talilna peč, skupaj s šaržirno napravo, linijo za manipulacijo ulitkov in talnim transporterjem z vgrajeno tehniko, tvori celico z avtomatskim praznjenjem vozičkov. Vsaki dve minuti, AGV dostavi poln voziček v linijo, kjer bo v sklopu avtomatskega cikla izprazenjen. Vsi podatki po praznjenju se vpišejo v bazo ERP sistema. S tem se nadzoruje količina in razmerje tipov vnesenega materiala, kar ima neposreden vpliv na

kakovost taline. Po uspešno izvedenem avtomatskem ciklu, AGV zapne prazen voziček in nadaljuje z izvajanjem transportov.



Predavatelj, g. Günther Zippel

G. ZIPPEL, Piller Entgrattechnik GmbH (DE): UPORABA TLAČNE TEHNOLOGIJE – RAZIGLJEVANJE IN ČIŠČENJE PRI LITJU V TRAJNE FORME

Energijsko optimizirana in inovativna tehnologija obrezovanja ter najsodobnejše strojne rešitve uvrščajo podjetje med vodilna specializirana podjetja na področju industrijske visokotlačne tehnike peskanja z vodo, rezalnega olja in hladilnih maziv. Na osnovi patentiranih postopkov se rezalni vodni ali oljni curek s tlakom do 1.100 barov usmeri neposredno na obdelovance, in sicer za namene obrezovanja in odstranjevanja zarobkov ter drugih nečistoč. Visoko tlačna obrezovanja s CNC stroji z najvišjo natančnostjo in hitrostjo ter inovativnim pristopom čiščenja, ki temelji na novem modularnem sistemu, daje izredno konkurenčne rezultate pri najnižjih vrednostih TCO. Učinkovita kinetična energija nadomešča visoke temperature pri postopku čiščenja in sušenja. Pri tem so prešli na uporabo modularnih linij in sistemov, ki omogočajo obširne možnosti prilagajanja specifičnim zahtevam kupcev. Rezultate v povezavi s čiščenjem izboljšujejo tudi s patentirano ultrazvočno tehnologijo.



Vabljeni predavatelj, prof. dr. Mitja Petrič

M. PETRIČ, M. VONČINA, T. BALAŠKO, S. KASTELIC, M. ŽBONTAR, P. MRVAR, Univerza v Ljubljani (SI): VPLIV DODATKA Li LIVARSKI ZLITINI AISi7Mg

Delo predstavlja izdelavo livarske zlitine na osnovi AISi7Mg z dodatkom 1 mas. % Li. Preiskan je bil vpliv na potek strjevanja in nastalo mikrostrukturo ter mehanske lastnosti. Zlitina AISi7Mg je bila pripravljena v indukcijski peči v zaščitni atmosferi argona. Po dosegu temperature taline 750 °C je bil z zvonom dodan Li v obliki granulata. Talina je bila nato ulita v dve merilni celici z različnimi ohlajevalnimi hitrostmi. Prva je bila izdelana iz grafitu, druga pa iz Croning peščene mešanice in premazana z grafitnim premazom. Na podlagi termične analize ter svetlobne in vrstične elektronske mikroskopije je bil opredeljen potek strjevanja in vpliv ohlajevalne hitrosti na nastalo mikrostrukturo in mikrotrdoto. Strjevanje take zlitine je različno od osnovne zlitine, saj že pri temperaturah okoli 635 °C pride do strjevanja nove AlSi faze, temu sledi strjevanje dendritov in strjevanje eutektika. Poleg omenjenih faz v strukturi nastopajo še faze bogate na železu in Mg₂Si. Ugotovljeno je bilo, da dodatek Li poveča zlitini trdoto pri nižjih ohlajevalnih hitrosti za 11 %, pri višji ohlajevalni hitrosti 160 K na sekundo pa kar za 35 %.

M. MATEJKA¹, M. BRUNA¹, A. SLADEK¹, I. VAŠKO², ¹Univerza v Žilini, ²IGV technologie s.r.o., (SK): OCENA NOTRANJE HOMOGENOSTI ZLITINE AISi7Mg0.3Cu0.5 Z DODATKOM Zr, Ti IN Sr

Eden kot načinov izboljšanja zlitin Al je dodajanje legirnih elementov. Tudi dodatek Zr pozitivno vpliva na povečanje trdnosti, odpornosti proti koroziji in toplotne upornosti. Najpogostejše je kot izceja v obliki intermetalnih faz Al₃Zr oziroma Al Si Zr. Ta faza nastaja pri masnem deležu Zr nad 0,1 ut. %. Osnovna morfologija teh je v intermetalnih fazah Zr (disperzoidov) v obliki dolgih iglic oziroma ploščic. Titan se v zlitinah Al uporablja za udrobnjevanje. Titan se oblikuje v obliki faze Al₃Ti. Sr lahko pozitivno vpliva na zmanjšanje velikosti zrn. Sr skupaj s Zr tvori faze na osnovi Al₃(Sr₁Zr_x), ki lahko deluje kot jedro kristalizacije. Prispevek je vezan na možnosti izboljšanja lastnosti zlitine AISi7Mg 0,3 Cu 0,5, obogatene, lite v keramične kalupe z elementi Zr, Ti in Sr s tehnologijo precizijskega litja. Najboljše rezultate je dala zlitina z dodatkom 0,15 wt % in 0,2 wt Ti. Ta zlitina ima izboljšane mehanske lastnosti in ugodne lastnosti precipitiranih faz Zr v mikrostrukturi.

S. SURESH KUMAR, M. MANAPURAM, North Eastern Regional Institute of Science and Technology (IN): ŠTUDIJA PODSISTEMOV ZA HIBRIDNA, LAHKA MOTORNA VOZILA ZA INDIJSKO AVTOMOBILSKO INDUSTRIJO

Indija je četrti največji proizvajalec lahkih motornih vozil na svetu. Trenutno v Indiji izdelajo letno 4 milijone lahkih motornih vozil z motorji z notranjim izgorevanjem. Indija je začela lahka električna motorna vozila proizvajati leta 2015. Proizvodnja pa se relativno hitro povečuje. Na letni ravni je leta 2021 bilo proizvedenih 0,5 milijona vozil in ob tem računajo, da bi ta proizvodnja vseh električnih vozil do leta 2030 dosegla 1 milijon vozil. Izpostavljeno je bilo predvsem lahko hibridno električno vozilo HELMV, ki ga poganjata tako motor z notranjim izgorevanjem kot baterija. Podsystemi HELMV so baterija, elektromotor, močnostna elektronika in prenos, napajalni sklopnik in motor z notranjim izgorevanjem. Opredeljeni so bili hibridno električno vozilo in njegovi podsystemi ter obravnavani različni systemi pogonskega sklopa: zaporedni, vzporedni, zaporedno-vzporedni in kompleksni. Predstavljeni so bili podsystemi primerni za indijsko avtomobilsko industrijo ter tehnična in gospodarska analiza ter podana primerjalna analiza vozil ICE-LMV in HELMV.

SEKCIJA C – SEKUNDARNA OPREMA IN TEHNOLOGIJE ZA LIVARSTVO



Predavatelj, g. Carsten Müller

C. MÜLLER, Laempe Mössner Sinto GmbH (DE): NASTAVITEV OPREME ZA IZBOLJŠANJE STORILNOSTI IN KAKOVOSTI V JEDRARNI

Livarska industrija ima vse večje zahteve po kakovosti in količini jeder. Kompleksni ulitki, kot so glave valjev, ohišja ročičnih gredi, ohišja elektromotorjev, deli podvozja in strukturne komponente, so sestavljeni iz zelo zapletenih struktur s pogosto izjemno tankimi stenami. Potrebne votline v teh litih delih, kot so povratni kanali za olje ali vodni tokokrogi za hlajenje v komponentah motorja, nastanejo v procesu litja z uporabo peščenih jeder, kar zahteva veliko parametrov. Priprava peska tako ni samo vprašanje mešanja s kemikalijami, ampak zahteva kakovost peska, odmerjanje aditivov v prahu ter odmerjanje tekočega vezivnega sredstva. Prikazani so bili sodobni stroji za vbrizgavanje jeder, sofisticirane naprave za pripravo peska, popolnoma avtomatizirane celice za vbrizgavanje jeder z rokovanjem in naknadno obdelavo (premazovanje, obrezovanje, sestavljanje, logistika in skladiščenje) ter evidentiranje. Kot alternativa kompleksnim jedrom je bilo podano tudi področje 3-D tiskanja s peskom.



Vabljeni predavatelj, mag. Christian Pittel

C. PITTEL, C. BLEICHER, H. KAUFMANN, Fraunhofer Institute for Structural Durability and System Reliability LBF (DE): OCENA LOKALNE TRDNOSTI KOMPONENT NA OSNOVI VIRTUALNEGA MEJNEGA VZORCA Z VIDIKA TRAJNE DINAMIČNE TRDNOSTI GLEDE NA NEPOPOLNOSTI ULITKA

Liti sestavni deli iz nodularne litine (GJS) ponujajo pomembne prednosti zaradi najrazličnejših možnosti dizajna in nizkih proizvodnih stroškov. Ocena življenjske dobe velikih litih sestavnih delov v povezavi z utrujenostjo zahteva na eni strani poznavanje trdnosti materiala, na drugi pa dodatne informacije, pridobljene s simulacijami procesa litja in z nedestruktivnim preizkušanjem (NDT). Povezava simulacije litja in nedestruktivnega nadzora z numeričnim okoljem pomaga oceniti možnost preprečevanja napak materiala. Mogoče je optimizirati velike lite sestavne dele z vidika trdnosti in razširitve potenciala lahkih konstrukcij. Vendar je pojav napak materiala, kot so krčenje, pena ali koščki grafita, ključnega pomena z vidika življenjske dobe v povezavi z utrujenostjo, in lahko dovede do izmeta sestavnega dela. Preiskave na vzorcih s krčenjem, peno ali koščki grafita iz materialov EN-GJS-400-18-LT, EN-GJS-450-18, EN-GJS-700-2 in ADI-1050 se

izvajajo na podlagi preizkusov utrujenosti z nadzorovano obremenitvijo. Rezultati vseh teh preiskav so vključeni v virtualni vzorec, da bi ugotovili vpliv velikosti posameznih napak, na nihajno trdoto litega sestavnega dela. Na območjih, ki so izpostavljena visokim obremenitvam ni dovoljena nobena oz. so dovoljene zgolj majhne napake, medtem ko so na območjih z nizkimi obremenitvami dovoljene tudi večje napake, ne da bi pri tem tvegali prezgodnjo okvaro sestavnega dela.



Predavatelj, dr. Matteo Pesci

M. PESCI, HA ITALIA S. p. A. (IT): PREPREČITEV DEGENERACIJE GRAFITA Z UPORABO CHEMEX NAPAVALNIKOV BREZ FLUORA

Namen te raziskave je bil oceniti učinek eksotermnih tulcev, tako z vidika morfologije grafita v livni kožici, kot tudi ob prisotnosti napake »ribje oko«. Preiskava je bila izvedena s primerjavo različnih vrst dodajalnikov, kot so vložni tulci in mini napajalniki. Predvsem je bila analizirana grafitna struktura ob prisotnosti inovativnega eksotermnega materiala brez fluora podjetja CHEMEX in izvedena primerjava s klasičnimi eksotermnimi materiali, ki so na voljo na trgu. Za izvedbo projekta je bil zasnovan vzorec plošče s kockami z različnimi toplotnimi moduli, izračunanimi s simulacijsko programsko opremo NovaFlow&Solid: 1,6 cm, 1,9 cm in 2,3 cm. Eksperimentalni preizkus je bil izveden v dejanski livarni z litjem standardne duktilne litine razreda EN-GJS-500-7. Celoten postopek taljenja je bil nadzorovan z uporabo prilagodljivega sistema za nadzor metalurških procesov ATAS MetStar 10.1, ki deluje na podlagi toplotne analize. Ugotovili so, da lahko eksotermni dodajalnik brez fluora CHEMEX zagotovi popolno celovitost livne kožice ter popolno nodularnost pod grlom dodajalnika in neposredno ob njegovi površini zloma.



Predavatelja, dipl. inž. Jožef Babič in dipl. inž. Franc Žaberl

F. ŽABERL¹, J. BABIČ², ¹FANUC ADRIA d.o.o., ²Nopromat d.o.o. (SI): UPORABA INDUSTRIJSKIH ROBOTOV FANUC V LIVARSTVU IN OBDELAVI ULITKOV S PRIMERI IZ PRAKSE

V vseh fazah livarske proizvodnje in manipulacije z izdelki so potrebni roboti različnih specialnosti. Robote lahko učinkovito uporabimo v procesih izdelave, finalizacije in rokovanja z modeli. Delo v talilnicah omogočajo specialni roboti s povečano zaščito pred vročino, vlago in prahom in na katere se lahko dodatno montirajo servisi za pogon ponev za litino. Roboti za posluževanje strojev za tlačno litje se lahko opremijo s specialnimi programskimi opcijami, ki omogočajo natančno in robustno posluževanje strojev za tlačno litje. Širok nabor robotov omogoča manipulacijo z ulitki. Z uporabo strojnega vida (2D in 3D) je možno rokovanje z izdelki. Za odrez živnih kanalov in odstranjevanje srha se lahko uporabijo roboti v kombinaciji s sistemi za nadzor sile oz. pritiska. K tem vrstam robotov sodi dodatna periferna oprema (senzorji sile, Ferrobotics ACF moduli), ki zagotavlja natančno odrezovanje živnih sistemov in odstranjevanje srha. Učinkovito in hitro obdelavo ulitkov lahko zagotovimo z vertikalnimi obdelovalnimi centri FANUC Robodrill. Te centre je možno nadgraditi z roboti, s čimer se lahko doseže povsem avtomatizirana proizvodnja. Robote je mogoče uporabljati tudi za pakiranje izdelkov in paletizacijo.

L. HAŠKA¹, J. ANDREJEWSKI², ¹JUNKER Industrial Equipment s.r.o. (CZ), ²OTTO JUNKER GmbH (DE): JUPITERLine in JUPITER BoxLine – STANDARDIZIRANE MODULARNE INDUKCIJSKE TALILNE PEČI

Indukcijske talilne peči spadajo med tehnologije za taljenje kovin brez lokalnih izpustov CO₂ in z zelo nizkimi izpusti NO_x. Livarne so kot dobavitelji s prihodnostjo močno motivirane za uporabo zelenih tehnologij. Peči JUPITERLine in JUPITERBox Line so cenovno dostopne naprave, ki so sestavljene iz sodobnih komponent vodilnih evropskih proizvajalcev. Standardizacija in modularizacija



Predavatelj, g. Ladislav
Haška

sta ključ do nižjih cen najsodobnejših komponent, hitrega in enostavnega servisiranja ter široke razpoložljivosti nadomestnih delov. Modularizacija prav tako omogoča visoko stopnjo prilagajanja brez potrebe po dodatnem inženiringu. Prikazane so bile hitrosti taljenja s konfiguracijami prostornine in moči. IGBT sodi med prvovrstne komponente in visoko razvite zasnove. Za to tehnologijo sta značilna predvsem visok dejavnik moči in zanesljivost delovanja. Indukcijsko navitje je ena najbolj obremenjenih komponent. Pravilna zasnova navitja vpliva na njegovo življenjsko dobo in zanesljivost ter je ključnega pomena za varnost. Peči JUPITER BoxLine so visoko standardizirane peči s prostornino do 1.000 kg sive litine. Prikazali so postavitev peči na jekleni ploščadi, vključno s posameznimi deli. Opisana je bila prednost te ureditve. Prikazane so bile hitrosti taljenja Cu, Al in Fe.

K. GOLDA, Cold Jet bvba (BE): TRAJNOSTNO IN INTELIGENTNO ČIŠČENJE S SUHIM LEDOM V LIVARSKI INDUSTRIJI



Predavatelj, mag. Krzysztof
Golda

Danes se podjetja vse pogostje soočajo z vprašanjem odgovornega in trajnostnega razvoja. Pri tem je pomemben poslovni model z upoštevanjem okoljskega, socialnega in korporativnega upravljanja z upoštevanjem standardov ESG (Environmental, Social, Governance). Vsa podjetja morajo po sklepih EU upoštevati te osnovne elemente družbenega upravljanja. To so danes ključna merila, ki jih morajo upoštevati tudi livarne. Okolju prijazne metode čiščenja postajajo tako za industrijo vse pomembnejša. Pri tradicionalnih metodah čiščenja nastajajo škodljivi sekundarni odpadki, prav tako, ki negativno vplivajo na okolje. Čiščenje s suhim ledom je ena najučinkovitejših tehnologij za čiščenje v livarski industriji. Čiščenje s suhim ledom omogoča znatno skrajšanje časa čiščenja (do 60 %) in nato ponovnega sestavljanja. Poleg recikliranja odpadnega CO₂ in njegove ponovne uporabe suhi led zagotavlja dodatno okoljsko vrednost, saj odpravlja negativne učinke običajnih postopkov sanitarne obdelave, dodelave delov in priprave površin.

M. MENCEJ, Carl Zeiss d.o.o. (SI): ČASOVNO UČINKOVITA ANALIZA TEHNIČNE ČISTOSTI Z MIKROSKOPOM



Predavatelj, dipl. inž. Matjaž
Mencej

Tako sami proizvajalci komponent kot tudi kupci komponent zahtevajo podrobne analize preostalih nečistosti na površini proizvodov. Osnovna standarda, ki se pojavljata pri analizah komponent sta VDA 19.1 in ISO 16232. Za področje medicinske opreme in olja pa so na voljo še drugi standardi. Rešitve so možne tako s svetlobno kot elektronsko mikroskopijo. Prav tako pa so možne rešitve s korelativno mikroskopijo, ki povezuje svetlobne z elektronskimi mikroskopi. Na področju svetlobne mikroskopije standard predpisuje, da celotno površino zajamejo v dveh tehnikah mikroskopiranja, in sicer svetlo polje in polarizacija. V ta namen so razvili posebno kamero. S posebno razvito kamero je mogoč zajem slik v tehnikah svetlega polja in polarizacije hkrati in s tem prihranek 50% časa. Z uporabo modelov umetne inteligence se izboljša lahko klasifikacija prepoznanih delcev. Z elektronskim mikroskopom je možna ugotovitev kemijske sestave nečistoč. S kombinacijo

obeh mikroskopov pa izkoristimo hitrost svetlobnih mikroskopov za odkrivanje nečistoč in svetlobno kategorizacijo in nato s prenosom filtra na elektronski mikroskop izkoristimo možnost kemične analize zanimivih delcev.



Predavatelj, dipl. inž. Claudio Cossalter

C. COSSALTER, Lianco Technologies Ltd (GB): DODELAVA ULITKOV NEPOSREDNO PO IZBRUHU COVIDA

V današnjih zahtevnih razmerah je vse večja zahteva za prehod iz ročnega na avtomatski način končne obdelave. V zadnjih letih je vse večje pomanjkanje delovne sile v brusilnicah. Zaradi zmanjšanja delovne sile za brušenje je edina možna rešitev v avtomatizaciji tega končnega procesa. Zanašanje na ročni proces brušenja je za današnje težave z delovno silo zelo vprašljivo in nezanesljivo. V obratih za končno obdelavo je tako avtomatizacija enega izmed ključnih postopkov nujna. Predavanje je izpostavilo vprašanje znanja za postopno uvedbo avtomatskega brušenja in ključnih dejavnikov, ki ji je potrebno upoštevati:

1. Osnove za avtomatizacijo delavnic za končno obdelavo
2. Najnovejše razpoložljive tehnologije samodejnega brušenja
3. Kako izbrati pravo tehnologijo za samodejno brušenje
4. Kako samodejno brušenje spremeniti v opravilo dodane vrednosti
5. Jeklo kot naslednja meja za samodejno brušenje



Vabljeni predavatelj, prof. dr. Ivan Jandrić

J. JANDRIĆ, F. KOZINA, T. BRILIĆ, L. MRKOBRADA, Univerza v Zagrebu (HR): SPREMEMBE STRUKTURE IN LASTNOSTI BAKROVE ŽICE MED PROZVODNJO IN PREDELAVO

Baker je kot prevodnik električne energije nenadomestljiv. Najpogostejše uporabljene metode za proizvodnjo bakrenih vodnikov vključujejo neprekinjeno litje bakrene žice, naknadno deformacijo s hladnim vlečenjem in nato toplotno obdelavo za izboljšanje mehanskih in elektro prevodnih lastnosti. Prispevek je izpostavil raziskave bakrene žice, proizvedene z neprekinjenim litjem postopkom UPCAŠT. Po litju se izvede postopek hladne deformacije ulite žice s postopkom deformacije s hladnim vlečenjem od izhodnih 8 mm premera na premer 2,6 mm in nato sledi toplotna obdelava. Raziskane so bile spremembe lastnosti v posameznih fazah proizvodnje. Spremembe strukture so bile opazovane s svetlobnim mikroskopom, meritve trdote pa z Vickersovo metodo meritev. Raziskave so pokazale, da se začetna grobozrnata struktura litega stanja med valjanjem

in redukcijo premera spremeni v drobnozrnato strukturo usmerjeno v smeri postopka hladnega vlečenja. Posledično se poviša trdota in zmanjša prevodnost. Po toplotni obdelavi se doseže boljša prevodnost in ustrežnejša mikrostruktura bakrenega vodnika.

Dodatno so bile prikazane tudi tri POSTERSKE PREDSTAVITVE:

1. H. FRANSSON¹, M. HAGBYHN², NovaCast Systems AB (SE): **ZMANJŠANJE CO₂ EMISIJ BREZ ZMANJŠANJA KAKOVOSTI IZDELKOV**
2. A. ŠUČ¹, U. KLANČNIK², M. DROBNE², M. PETRIČ¹, ¹Univerza v Ljubljani, ²VALJI d.o.o. (SI): **UČINEK CEPIV Z RAZLIČNIMI VSEBUJOČIMI ELEMENTI NA IZLOČANJE GRAFITA V CENTRIFUGALNO LITI MELIRANI LITINI**
3. I. VASKOVA¹, M. CONEV², P. DELIMANOVA¹, ¹Tehniška Univerza v Košicah, ²Nemak Slovaška, (SK): **NEKAJ IZKUŠENJ Z JEDRI, IZDELANIMI Z ANORGANSKIMI VEZIVI**

Pripravil:

Zasl. prof. dr. Alojz Križman,
glavni in odgovorni urednik Livarskega vestnika

AKTUALNO / CURRENT



74. Svetovni livarski kongres – 74th WFC 2022

Po dveh letih prestavljanja datuma se je med 16. in 20. oktobrom letos odvil 74. Svetovni livarski kongres (The 74th World Foundry Congress) pod sloganom »Ulijmo prihodnost« (Cast the Future). Tovrstni kongres se običajno odvija vsaki dve leti, sedaj pa se je zaradi pandemije Covid-19 datum prestavil za kar dve leti. Kongres je bil tokrat organiziran v Južni Koreji v Busanu, s strani Svetovne livarske organizacije (WFO) in korejskega livarskega društva. Kongres je potekal v hibridnem načinu, v živo in on-line. Zbralo se je preko 700 obiskovalcev in razstavljalcev iz celega sveta. Po uradni otvoritvi kongresa so se zvrstila številna znanstvena in strokovna predavanja. Predstavljenih je bilo šest plenarnih predavanj s strani svetovno znanih profesorjev in znanstvenikov kot so: Doru M. Stefanescu, Babette Tonn, Quingyan Xu, Steve Dawson, Adel Nofal in Akira Sugiyama. Predstavili so svoja raziskovanja iz različnih področij livarstva, tako s strani livarskih materialov, livarskih tehnologij ter njihovega pogleda na prihodnost livarske industrije. Zvrstilo se je tudi šestinštirideset vabljenih predavanj, od tega tudi dva iz Slovenije in še več kot sto dvajset predavanj in več kot šestdeset posterjev. Poleg znanstvenih prispevkov so bile organizirane tudi delovne ekskurzije v različna lokalna podjetja. Tako so si lahko udeleženci ogledali livarne sivih litin, sivih litin s kroglastim grafitom, tlačne livarne aluminijevih zlitin, jeklo livarno, proizvodnjo avtomobilov ter proizvodnjo traktorjev in kmetijske mehanizacije.



Iz Slovenije so se kongresa udeležili trije člani, in sicer predsednica Društva livarjev Slovenije, mag. Mirjam Jan-Blažić ter prof. dr. Primož Mrvar in doc. dr. Mitja Petrič iz Naravoslovnotehniške

fakultete Univerze v Ljubljani. Prof. dr. Mrvar je predstavil raziskovalno delo iz tematike aplikacij in lastnosti legiranih sivih litin, namenjenih za transport tekočega aluminija, doc. dr. Petrič pa novosti iz razvoja lahkih aluminijevih zlitin z dodatki litija. Oba predavanja sta bila dobro sprejeta s strani publike, kar nakazuje na aktualnost obravnavanih tematik.



Ob zaključku kongresa so bile podeljene tudi nagrade za najboljša predstavljena dela s področja znanosti, tehnologij in industrijske prakse, kot tudi za najboljši poster in najboljše študentsko delo. Omeniti je potrebno še, da se je po 22 letih delovanja pri WFO zamenjal glavni tajnik organizacije Andrew Turner iz Velike Britanije, njegovo funkcijo pa je prevzel Jose Javier Gonzales iz Španije.

Poleg znanstvenih prispevkov pa tovrstni kongres omogoča in vzdržuje osebna poznanstva in druženja strokovnjakov iz področja livarstva, kar je tudi eden od glavnih namenov kongresov takega kova. V prihodnje si želimo še veliko takih obiskov in pa čim manj težav in prekinitev tradicije s strani različnih epidemij.

Dr. Mitja Petrič

AKTUALNO / CURRENT

Pregled livarskih prireditev v letu 2023

Datum dogodka	Ime dogodka	Mesto in država
5.–16. 03. 2023	Fraunhofer Direct Digital Manufacturing – Conference (DDMC)	Berlin, Nemčija
08. 03. 2023	22 nd Die Casting Day	Mainz, Nemčija
29.–30. 03. 2023	4 th Molding Material Forum	Clausthal-Zellerfeld, Nemčija
27.–28. 04. 2023	65. Österreichische Gießereitagung	Schladming, Avstrija
16.–19. 05. 2023	65. Mednarodni sejem tehnike	Beograd, Srbija
17.–19. 05. 2023	XV International Mineral Processing and Recycling Conference (IMPRC)	Beograd, Srbija
12.–16. 06. 2023	Mednarodni sejem metalurgije in livarstva (GIFA)	Düsseldorf, Nemčija
29.–31. 03. 2023	Metals, Extrusion, Foundry (METEF)	Bologna, Italija
13.–15. 09. 2023	63. IFC Portorož 2023	Portorož, Slovenija

AKTUALNO / CURRENT**Seminar za tlačne livarne v firmi Bühler, Švica**

Društvo livarjev Slovenije je skladno s svojim programom izobraževanja za leto 2022 organiziralo v času od 26.–28. 10. 2022 tridnevni seminar za livarne tlačnega litja v firmi Bühler, Uzwil v Švici. Seminar je bil namenjen visoko usposobljenim strokovnjakom s področja litja Al zlitin pod tlakom.

Prvi dan seminarja se je v prvem delu osredotočil na obnovitev osnovnih znanj iz tlačnega litja, sestavo stroja za tlačno litja in periferije. V nadaljevanju pa so bile predstavljene naslednje teme:

- Optimizacija I. in II. faze ter najpogostejše napake v procesu le-teh.
- Vpliv vakuumu in pravilna izbira vakuum-ventilov ter evidentne težave s posameznimi vakuum-ventili.
- Kvaliteta taline v luči vzdrževanja čistoče dozirne peči.
- Dimenzioniranje komore/bata glede na določeno fazo litja.
- Osnove mazanja tlačnega orodja, učinkovitost premazov, prednosti in pomanjkljivosti ter napake pri izboru izbrane variante mazanja.

Drugi dan seminarja je bil posvečen:

- Optimizaciji III. faze litja, težavam na orodju/stroju pri nepravilnem ali neustreznem izboru III. faze.
- Uporaba tako imenovane tehnologije »Squeeze Pins«, pravilno dimenzioniranje ter ustrezna uporaba.
- Predstavitve napak, ki so posledica neoptimalne III. faze ter nepravilne uporabe »Squeeze Pins-a«.



Udeleženci seminarja v firmi Bühler

- Prikaz termalnega stanja orodja, prenos toplotne energije, ustreznost temperiranja.
- Seznanjanje z novimi Al legurami z vidika njihovih lastnosti in uporabnosti (predavatelj s strani proizvajalca legur Rheinfelden, Nemčija).

Nadaljnji predstavitvi tehnologije »Squeeze Pins« je bil namenjen tudi tretji dan seminarja, kjer je v nadaljevanju bilo obravnavano še:

- Dizajniranje in preračun dolivnega sistema.
- Seznanitev z napakami, ki so posledica napačnega dizajna dolivka/orodja.
- Seznanitev s splošnimi napakami pri litju.

Slušatelji seminarja sporočamo, da je splošni vtis tega strokovnega dogodka bil zelo dober. Pridobili smo veliko novih koristnih informacij in znanj. Vse pohvale izvajalcu seminarja – firmi Bühler za odlično organizacijo in potek seminarja. Strokovnjaki slovenskih livarn si želimo takih možnosti za izobraževanje tudi v naslednjem letu oziroma v bodoče.

Poročal:
Luka Jamnik,
LTH Castings d.o.o.



AKTUALNO / CURRENT

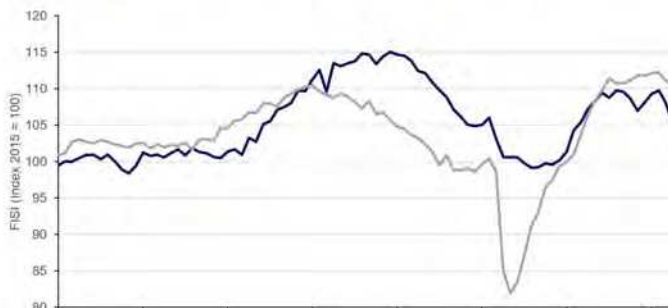
Oktobrsko poročilo CAEF o stanju v evropski livarski industriji

CAEF kot krovna organizacija nacionalnih evropskih livarskih združenj mesečno podaja informacije o uspešnosti evropske livarske industrije. Na podlagi anket, ki jih izvaja znotraj evropske livarske industrije, izdelava kazalnik FISI – European Foundry Industry Sentiment Indicator, katerega predstavljamo v današnji številki Livarskega vestnika za mesec oktober 2022. FISI se je oktobra znižal za 1,2 točki in je dosegel 102,8 točk. Splošna pričakovanja za naslednjih 6 mesecev in ocena trenutnega poslovnega stanja pada. V železovih livarnah je že drugič zaporedoma zabeležen občuten padec ocene trenutnega poslovnega položaja, medtem pa se pričakovanja za naslednjih pol leta niso spremenila v odnosu na mesec september. Pri livarnah barvnih kovin je ocena stanja ostala na šibki ravni prejšnjega meseca, pričakovanja pa naprej padajo. Pogled v leto 2023 pokaže, da so v več evropskih državah evidentni močni predznaki recesije. IMF v oktobrski napovedi za Nemčijo napoveduje negativno stopnjo rasti BDP (–0,3 %). Enako tudi velja za Italijo, kjer napovedujejo negativno stopnjo BDP (–2 %). Tudi za druge gospodarsko večje države napovedi za prihodnje leto niso obetavne. Kljub temu da so napovedi BDP-ja za Severno Ameriko in Azijo bile negativne, je BDP v Severni Ameriki zrasel na 1,0 %, na Kitajskem pa na 4,4 %, kar pomeni, da je situacija bistveno boljša, kakor v Evropi.

Ni pa še dovolj jasno, koliko močno se bo zmanjšalo povpraševanje po odličnih.

Kazalnik poslovne klime (BCI) se je oktobra znižal za 0,6 točk in znaša 0,76 točk. Povečana ocena zalog končnih izdelkov in padajoča pričakovanja glede prodajnih cen sta uravnotežena. BCI – Business Climate Indicator je kazalnik, ki ga objavlja evropska komisija in z njim se vsako leto ocenjujejo razvojne razmere proizvodnega sektorja v EUR območju po mesecih, pri čemer se uporablja pet mnenj iz industrijske raziskave, ki se nanašajo na: proizvodne trende, naročila knjig, izvozna naročila knjig, zaloge in pričakovano proizvodnjo.

**European Foundry Industry Sentiment Indicator (FISI) a
Business Climate Indicator Euro Area (BCI)
October 2022**



Priložen graf in dodatne informacije so na voljo na www.caef.eu.

Pripravila: mag. Mirjam Jan-Blažič



DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE



Vabilo za

63. IFC PORTOROŽ 2023

z livarsko razstavo

13. - 15. SEPTEMBER 2023

Kontakt: DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE,

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

T: +386 1 2522 488

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



STEM d.o.o.

Vipavska cesta 67
5000 Nova Gorica
Slovenija

tel.: +386 5 33 52 100

fax: +386 5 30 01 558

e-mail: info@stem.si

www.stem.si



Company ID: 5306779
Dun & Bradstreet d.o.o. / 18.1.2021

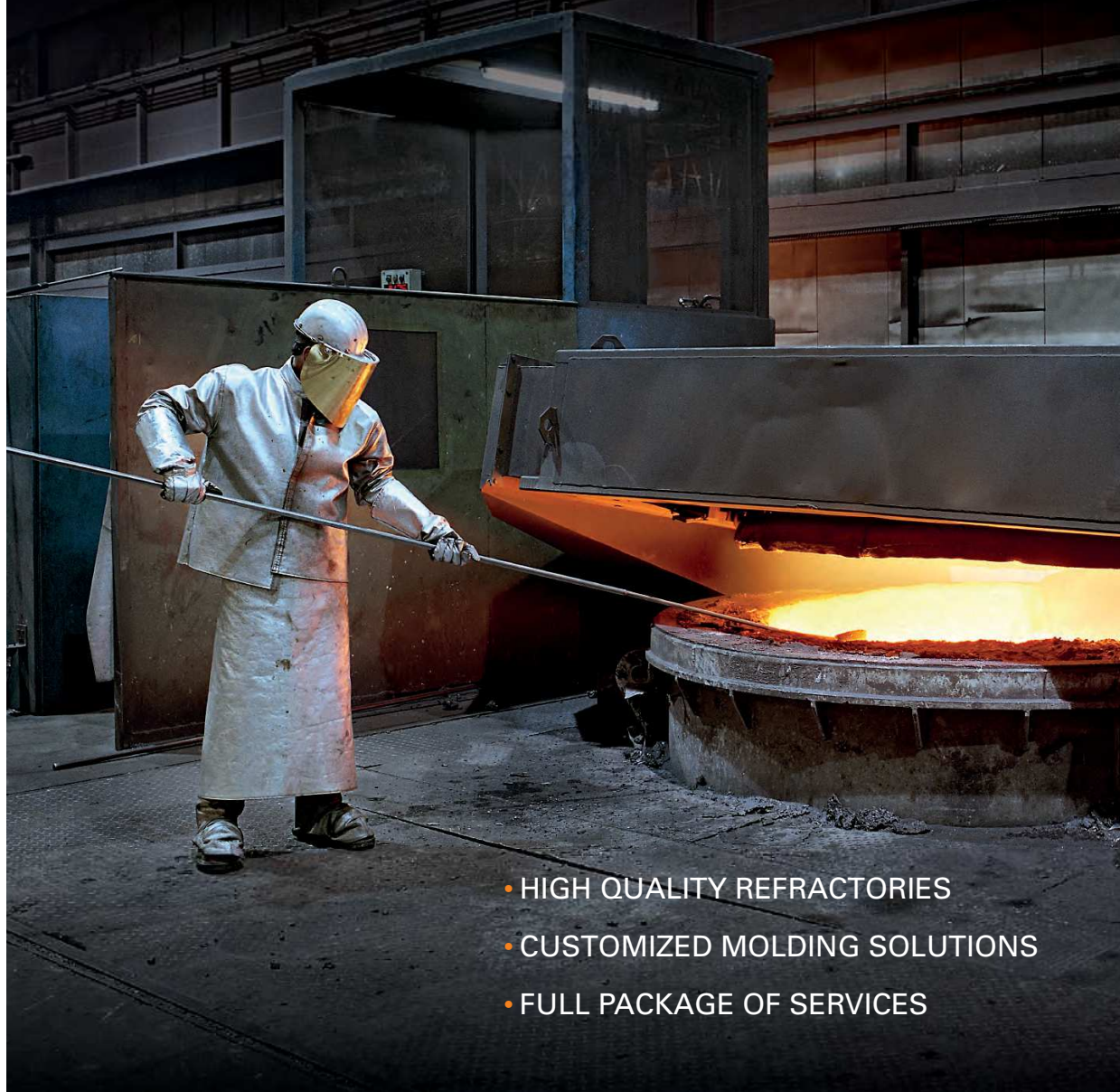


STEM d.o.o. kot največji proizvajalec peskalnih strojev v Sloveniji ter eden vodilnih proizvajalcev peskalnih strojev v Evropi, je zaradi rasti poslovanja razširil svoje proizvodno-razvojne zmogljivosti z novimi, najodobnejše opremljenimi proizvodnimi prostori, ki vključujejo tudi testno-razvojni center. Ta večmilijonska naložba pomeni dodatno zagotovilo za nemoteno nadaljno rast in širitev podjetja na obstoječih in novih trgih.



PESKALNA TEHNIKA

CALDERYS *ONE STOP SHOP*



- HIGH QUALITY REFRACTORIES
- CUSTOMIZED MOLDING SOLUTIONS
- FULL PACKAGE OF SERVICES



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