

LIVARSKI VESTNIK

Izdajatelj / Publisher:

Društvo livarjev Slovenije
Lepi pot 6, P.P. 424, SI-1001 Ljubljana
Tel.: ++ 386 1 25 22 488
Fax: ++386 1 426 99 34
E-mail: drustvo.livarjev@siol.net
www.drustvo-livarjev.si

Glavni in odgovorni urednik / Chief and responsible editor:

prof. dr. Alojz Križman
E-mail: probatu@triera.net

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
doc. dr. Gorazd Lojen, Univerza v Mariboru
prof. dr. Andreas Bührig-Polaczek, Giesserei Institut RWTH Aachen
prof. dr. Peter Schumacher, Montanuniversität Leoben
prof. dr. Reinhard Döpp, TU Clausthal
prof. dr. Jozef Suchy, AGH Krakov
prof. dr. Jaromir Roučka, Institut Brno
prof. dr. Faruk Unkić, Univerza Zagreb
dr. Milan Lampič, Fritz Winter, Stadtallendorf

Prevod v angleški jezik / Translation into English:

prof. dr. Andrej Paulin, Darja Srakar-Tomanič

Lektorji / Lectors:

Angleški jezik / English:
dipl. ing. Peter Haensel, Düsseldorf
Slovenski jezik / Slovene:
prof. Janina Šífrer

Tisk / Print:

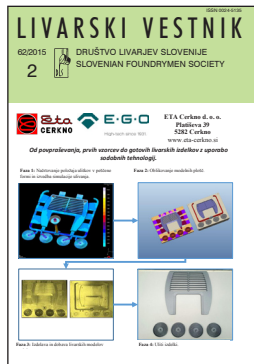
Fleks d.o.o.

Naklada / Circulation:

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

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

Dano v tisk: junij 2015



Naslov/Adress:

ETA d.o.o. CERKNO
Platiševa 39
SI-5282 CERKNO

Direktor: Egon Kofler

Tel.: +386 5 37 55 000
Fax.: +386 5 37 55 550
info@eta-cerkno.si
<http://www.eta-cerkno.si>

VSEBINA / CONTENTS

Stran / Page:

Philipp Weiß, Johannes Brachmann, Andreas Bührig-Polaczek, Sebastian F. Fischer:

Vpliv niklja in kobalta na mikrostrukturo duktilne litine, utrjene s trdno raztopino silicija / Influence of Nickel and Cobalt on the Microstructure of Silicon Solution-strengthened Ductile Iron

66

Hiroyasu Makino, Minoru Hirata:

Nova generacija procesov formanja s svežim peskom in uporabo tehnologije zračenja za rahljanje / New Generation of Green Sand Molding Process Using Aeration Technology

86

Jožef Medved, Miran Pirnat, Primož Mrvar:

Fazna ravnotežja v aluminijevih livarskih zlitinah v odvisnosti od vsebnosti Si in Fe / Phase Equilibrium in Aluminium Cast Alloys Depending on Si and Fe Content

99

AKTUALNO / ACTUAL

15. mednarodni nemški dan tlačnega litja 107

59. avstrijsko livarsko posvetovanje, Leoben 2015 108

Sejem varjenje in livarstvo 111

Program / Programme:

55. mednarodno livarsko posvetovanje Portorož 2015 / **55th International Foundry Conference Portorož 2015** 113

Častni predsednik društva Milan Trbižan na pragu častljivega jubileja 117

Koledar livarskih prireditiv 118

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

Vpliv niklja in kobalta na mikrostrukturo duktilne litine, utrjene s trdno raztopino silicija

Influence of Nickel and Cobalt on the Microstructure of Silicon Solution- strengthened Ductile Iron

Izvleček

Zaradi ugodne kombinacije livnosti, mehanskih lastnosti, strojne obdelovalnosti in sorazmerno majhne cene se je proizvodnja železove litine s kroglastim grafitom, imenovana duktilna litina (DI), od leta 2009 do 2012 povečala v Nemčiji za 35 %, na 1,6 milijona ton letno. Izboljšane mehanske lastnosti bodo še izboljšale njen položaj materiala z dobrimi uporabnimi lastnostmi pri izpolnjevanju prihodnjih zahtev v tekmi z varjenimi konstrukcijami in izkovki. Mehanske lastnosti standardne duktilne litine v litem stanju so predvsem posledica razmerja med feritom in perlitom v mikrostrukturi, na kar vplivajo zlitinski elementi. Popolnoma feritna duktilna litina ima največjo duktilnost in najmanjšo trdnost. S povečanjem deleža perlita se povečuje natezna trdnost ob velikem zmanjšanju raztezka pri zlomu. V nasprotju s tem ima »druga generacija« duktilne litine z deležem silicija do 4,3 % popolnoma feritno osnovo, ki je raztopinsko utrjena s substitucijsko raztopljenim silicijem. Dobljene raztopinsko utrjene vrste litine, kot so EN-GJS- 450-18, EN-GJS-500-14 in EN-GJS-600-10, imajo izvrstno kombinacijo trdnosti, duktilnosti in zelo dobro strojno obdelovalnost zaradi popolnoma feritne osnove [Bjorkegren, L.E., K. Hamberg, Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron, 2003]. Poleg tega velik delež silicija dopušča prisotnost večjih količin karbidotvornih elementov, kot so vanadij, krom in titan [Löblich, final report of AIF Project 41EN, 2012]. Vendar je največja trdnost omejena na 600 MPa pri deležu silicija 4,3 %. Pri večjem deležu silicija se natezna trdnost in raztezek pri zlomu drastično zmanjšata zaradi predpostavljenega nastanka urejene silicijeve strukture dolgega reda. [Löblich, final report of AIF Project 41EN, 2012]. Podatki za učinek nadaljnjih elementov, ki omogočajo raztopinsko utrjevanje popolnoma feritne duktilne litine, se komaj kje najdejo v objavljeni literaturi. Da bi zapolnili to praznino pri raziskavah, smo v naši raziskavi feritno duktilno litino z masnima deležema silicija 3,8 % in 4,3 % legirali z 2 mas. % in 4 mas. % kobalta ter 1,5 mas. % in 3 mas. % niklja. Glede na popolnoma faktorsko zasnovane poskuse smo učinke kobalta in niklja ovrednotili s termično in mikrostrukturno analizo in poskusi natezne trdnosti. Poleg tega smo te rezultate statistično potrdili z analizo varianc. Ta prispevek prikazuje rezultate mikrostrukturnih analiz.

Abstract

Due to its favourable combination of castability, mechanical properties, machinability and a comparatively low price, the production volume of cast iron with spheroidal graphite, so called ductile iron (DI), increased in Germany between 2009 and 2012 by 35 % to 1.6 million tons per year. Improving the mechanical properties of DI will help to strengthen its position as a high-performance-material, to fulfill future requirements and to withstand the competition to welded constructions and forgings. The as-cast mechanical properties of conventional

ductile irons are mainly adjusted by the ferrite and pearlite ratio of its microstructure, which is influenced by alloying. A fully ferritic ductile iron exhibits the highest ductility and lowest strength. By increasing the pearlite content the tensile strength is increased accompanied by a strong reduction of the elongation at fracture. In contrast to this, "Second Generation" DI with a silicon content of up to 4.3 % (mass fraction) exhibits a fully ferritic matrix, which is solution-strengthened by the substitutionally solved silicon. The resulting solution-strengthened grades like the EN-GJS-450-18, the EN-GJS-500-14 and the EN-GJS-600-10 offer superior combinations of strength, ductility and excellent machinability due to a fully ferritic matrix [Bjorkegren, L.E., K. Hamberg, Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron, 2003]. In addition a high silicon content leads to a higher tolerance against higher amounts of carbide-forming elements like e.g. vanadium, chrome and titanium [Löblich, final report of AIF Project 41EN, 2012]. However, the maximum strength is limited to 600 MPa at a silicon mass fraction of 4.3 %. At higher silicon contents the tensile strength as well as elongation at fracture are dramatically decreased due to the presumed formation of a silicon long range order [Löblich, final report of AIF Project 41EN, 2012]. The effect of additional solution strengthening elements on fully ferritic ductile iron is hardly addressed in literature. In order to close this current research gap, ferritic DI with a silicon content of 3.8 and 4.3 % Si were alloyed with 2 and 4 % Co and 1.5 and 3 % Ni in the present study. According to a full factorial experimental design, the effects of cobalt and nickel were evaluated with the aid of thermal and microstructural analysis and tensile tests. Further, these results were statistically proofed using analysis of variances. In this article the results of the microstructural analyses are presented.

1 Uvod

Zaradi dobre livnosti, duktilnosti, velike natezne trdnosti, korozijske in obrabne odpornosti, razmerja med uporabnostjo in ceno ter vsestranskosti je duktilna litina eden od najbolj uporabljenih litih materialov v svetu [1-4]. Npr. največ delov sodobnih vetrnih turbin, kot so pesta rotorja, cevni adapterji, glavni okvirji in osi, so narejeni iz duktilne litine [5]. Drugi primeri sedanje industrijske uporabe duktilne litine so varnostni deli avtomobilov, kot so členki krmila, okvirji kolutne zavore, naprave za skladiščenje in transport jedrskih odpadkov, cevi za svežo in odpadno vodo, črpalke in kroglasti ventili za delo v korozijskih medijih, strojni deli za poljedelstvo, rudarstvo, vojno industrijo in železnice [2,3,6].

Izvrstne lastnosti duktilne litine določa njena mikrostruktura, ki je v odvisnosti od

1 Introduction

Due to its good castability, ductility, high tensile strength, corrosion and wear resistance, performance to cost ratio and versatility ductile iron (DI) is one of the most used casting materials worldwide [1-4]. For example, most parts of modern wind turbine components, such as rotor hubs, tubular adapters, main frames and axles, are produced from DI [5]. Other examples of DI's actual applications are safety components of cars, such as steering knuckles and calipers, storing and transportation devices for nuclear waste, tubes for fresh and wastewater, pumps and globe valves operating with corrosive media, agricultural, mining, military, and railroad components [2, 3, 6].

DI's excellent properties are determined by its microstructure, which

kemične sestave zlitine, hitrosti ohlajevanja, načina cepljenja med strjevanjem sestavljena iz jeklu podobne osnove (ferit, perlit, bainit, poboljšani bainit, martenzit ali kombinacija teh mikrostrukturnih sestavin) ter grafitnih kroglic v tej osnovi [1,2,5,7]. Perlitna osnova daje duktilni litini visoko trdnost, a je litina krhka, medtem ko je navadna feritna duktilna litina mehka in duktilna, a ima povprečno trdnost, medtem ko ima mešanica ferita in perlita ima vmesne lastnosti [5].

Poleg tega so mehanske lastnosti duktilne litine odvisne od števila, velikosti in oblike grafitnih kroglic. Med evtektičnim strjevanjem je najprej potrebno minimalno število kroglic v talini, da se zavre nastajanje karbidov in krčilnih razpok, ki bi poslabšale mehanske lastnosti; karbidi dodatno tudi poslabšajo strojno obdelovalnost ulitka.

Po objavljeni literaturi [8] je število kroglic manjše od 60 na mm^2 nezadostno za preprečitev nastanka krčilnih razpok in/ali karbidov. Največje število kroglic še ni določeno, ker je lahko močno odvisno od kemične sestave litine in debeline stene ulitka [8]. Vendar število kroglic ne vpliva le na nastanek krčilnih razpok, ampak tudi na delež ferita oz. perlita v osnovi, kar tudi vpliva na mehanske lastnosti [7-9]. Čim večje je število kroglic, tem večji je delež ferita, ker termodinamično stabilna faza nastaja z difuzijo ogljika iz avstenita v prisotni grafit med evtektoidno reakcijo. Čim manjša je difuzija ogljika v grafit zaradi velikega števila kroglic, tem večja je možnost nastanka ferita. Poleg vpliva na samo mikrostrukturo število kroglic neposredno vpliva tudi na mehanske lastnosti duktilne litine. Večje število kroglic namreč omogoča večjo trajno nihajno trdnost in mejo vzdržljivosti [10].

Večje število kroglic ima za posledico tudi manjšo povprečno velikost teh kroglic, ker sta ta dva grafitna parametra obratno sorazmerna [3]. Neodvisno od

consists, depending on the alloy's chemical composition, cooling rate and inoculation condition during solidification, of a steel-like matrix (ferrite, pearlite, bainite, ausferrite, martensite, or a mixture of these), and embedded graphite nodules [1, 2, 5, 7]. A pearlitic matrix leads to high strength but comparatively brittle DI, conventional ferritic DI is normally soft and ductile but shows an average tensile strength; a mixture of ferrite and pearlite leads to intermediate mechanical properties [5].

Besides the influence of the matrix, the DI's mechanical properties are influenced by the number, size and shape of the present graphite nodules. First, during eutectic solidification a minimum number of graphite nodules is required in the melt to suppress the formation of carbides and microshrinkage, which lead to decreased mechanical properties; carbides additionally decrease the casting's machinability. According to [8] a nodule count smaller than 60 nodules/ mm^2 is insufficient to avoid microshrinkage and/or microcarbides. A suggested maximum nodule count is not yet established since it may depend strongly on the DI's chemical composition and the casting's wall thickness [8]. In addition to the carbide and microshrinkage formation the number of nodules influences the ferrite/pearlite content of the matrix also affecting the mechanical properties [7-9]. The higher the number of nodules the higher is the amount of ferrite, since this thermodynamically stable phase is formed by diffusion of carbon from austenite to the present graphite during the eutectoid reaction. The smaller the carbon's diffusion way to the graphite due to a high number of nodules, the higher is the possibility of the formation of ferrite. Besides the influence on the microstructure itself the number of nodules directly influences the mechanical properties of DI. For example, a higher

mikrostrukture osnove se življenjska doba zaradi utrujenosti pri kotalnem stiku (RCF - rolling contact fatigue) in duktilnost močno povečata z zmanjšanjem števila kroglic [11]. Poleg tega je večje število kroglic povezano z manjšim mikroizcejanjem zlitinskih elementov, kar vpliva na nastajanje krhkih delov in karbidov v mikrostrukturi.

Manjše kroglice so tudi bolj želene, ker imajo bolj kroglasto obliko. Ta oblika vpliva na napetost tečenja, natezno trdnost, raztezek pri zlomu in žilavost pri zlomu [4, 12-15]. Predvsem velika žilavost duktilne litine in dobra odpornost proti napredovanju razpok sta predvsem posledica nenavadnih oblik grafitnih sestavin [13]. Med nateznim obremenjevanjem malo nad napetostjo tečenja se kroglice navadno ločijo od osnove. Z večanjem obremenitve se praznine, ki vsebujejo grafitne kroglice, večajo in združujejo. Ko je dosežen določen prostorninski delež, postane to trganje nestabilno, kar vodi do zloma strojnega dela. Čim več praznin odstopa od okrogle oblike, tem hitreje je njihovo večanje, kar je povezano z zmanjšanjem duktilnosti kot pri majhnem številu kroglic [12]. Vpliv perlita na učinek grafitnih kroglic se lahko zanemari, dokler njihov delež ne preseže 10 % [5,16].

V preteklih letih so postale nove popolnoma feritne duktilne litine, ki so bile cenovno ugodne in dobro raztopinsko utrjene s silicijem v območju 3 do 4,3 mas. % Si, vse bolj priljubljene [17]. Mehanske lastnosti kot tudi toplotna odpornost in odpornost proti vremenskim vplivom teh s silicijem raztopinsko utrjenih vrst feritnih duktilnih litin (SSF DI - solution strengthened ductile iron) so enake ali celo boljše od lastnosti standardnih duktilnih litin. Prenos litin SSF DI v proizvodnjo je pomenil prihranek stroškov do 10 %, ker so se zmanjšali stroški strojne obdelave litin zaradi mehke feritne osnove in večjih dopustnih toleranc pri konstrukcijah kot

nodule count leads to a higher fatigue strength and endurance limit [10].

A high number of nodules lead to a smaller average nodule size, since both graphite parameters behave inversely proportional [3]. Independent of the matrix structure the RCF life and ductility are strongly increased with a decreased nodule size [11]. Furthermore, a higher amount of small nodules is accompanied by a smaller alloying elements' microsegregation, which influences the formation of brittle parts and carbides in the microstructure.

Besides this, smaller nodules are favoured since these exhibit a more spherical shape. This shape influences the yield strength, tensile strength, elongation at fracture and fracture toughness [4, 12-15]. In particular the DI's high toughness and good crack propagation resistance are mainly due to the peculiar graphite elements shape [13]. During tensile loading slightly above the yield stress the nodules normally debond from the matrix. With increasing load the voids, containing the graphite nodules, grow and coalesce. After a certain volume fraction is reached this tearing becomes unstable leading to the component's failure. The more the voids deviate from the spherical shape, the faster is the growth of the void, which is in line with the reduction in ductility for low nodularity [12]. The influence of pearlite on the effect of the graphite nodules can be neglected if its ratio does not exceed 10 % [5, 16].

In the past years, new full ferritic DI grades were getting more and more popular, which are cost-efficient and effectively solution strengthened by a silicon content in a range of 3 to 4.3 % [17]. The mechanical properties as well as thermal and weather-resistance of these silicon solid solution strengthened full ferritic DI grades (SSF DI) are equal to better than these properties of the conventional DI grades. Transferring

posledica višje napetosti tečenja in raztezka pri prelomu. Leta 2012 so bile litine SSF DI (EN-GJS-450-18, EN-GJS-500-14 in EN-GJS-600-10) standardizirane v standardu DIN EN 1563, kar je omogočilo prikazati njihovo mnogo boljše duktilnost ob enaki trdnosti, kot jo imajo feritno-perlitne litine. Za njihovo izdelavo se priporočajo predvsem deleži silicija 3,2 mas. %, 3,8 mas. % in 4,3 mas. [17-22].

Vendar so zaradi velikega deleža silicija največja trdnost in udarna žilavost litin SSF DI kot tudi livne lastnosti omejene [8,20,23-27]. Dodatno je pri zlitini EN-GJS-600-10, izdelani kot raztopinsko utrjeni s trdno raztopino silicija, predviden delež silicija 4,3 %. Ker delež silicija 4,4 mas. % vodi do dramatičnega zmanjšanja tako natezne trdnosti kot duktilnosti [23], je procesno okno za izdelavo zlitine EN-GJS-600-10 zelo majhno. Najmanjši raztros deleža silicija v talini, npr. zaradi raztrosa deleža silicija v cepivu ali cepivu za litino s kroglastim grafitom kot posledica nenatančnih meritev, lahko pripelje do popolne porušitve ulitka.

Zadodato optimiranje lastnosti izvrstnih novih duktilnih litin in zagotavljanja njihove široke uporabe, je uporaba elementov za raztopinsko utrjevanje perspektivna. Kaže, da imata kobalt in nikelj prednosti, da se z dodatnim raztopinskim utrjevanjem izdelajo litine z večjimi nateznimi trdnostmi ob dobri duktilnosti ali da se določena količina silicija nadomesti, pri čemer se ohranijo enake izvrstne lastnosti materiala, a se poveča procesna zanesljivost.

Nikelj ima dobro topnost v feritu in omogoča dobro utrjevanje s trdno raztopino glede na atomsko razmerje z železom [28]. Ker nikelj pospešuje grafitizacijo med evtektičnim strjevanjem, ne bo imel škodljivega učinka na evtektično strjevanje in na nastajanje grafitnih kroglic [2].

Kobalt ima podoben atomski polmer kot železo, zato se na prvi pogled zdi, da

SSF DI into the production scale resulted in a cost safety of up to 10 % due to decreased machining costs, related to the soft ferritic matrix, and construction tolerances, related to a higher yield strength and elongation at fracture of SSF DI. In 2012 the SSF DI grades EN-GJS-450-18, EN-GJS-500-14 and EN-GJS-600-10 were implemented in the DIN EN 1563, which exhibit a much higher ductility at the same strength than the conventional ferritic/pearlitic grades. For their realization, a silicon content of 3.2 %, 3.8 % and 4.3 % is suggested, in particular [17-22].

However, due to the high silicon content the SSF DI's maximum and impact strength as well as casting properties are limited [8, 20, 23-27]. In addition, the EN-GJS-600-10, realized by a silicon solid solution strengthening, envisages a silicon content of 4.3 %. Since a silicon content of 4.4 % leads to a dramatically decrease of both, the tensile strength and ductility [23], the process window for the production of an EN-GJS-600-10 can be defined as very small. A minimal scatter of the silicon content in melt, e.g. by a scatter of the silicon content in the nodularizer, in the inoculation agent or due to an imprecise measuring, can lead to a complete failure of the casting.

To further optimize the properties of the outstanding new ferritic DI grades and to ensure their widespread application the use of other solid solution strengthening elements is promising. Nickel and cobalt seem to be advantageous for further solid solution hardening to realize higher tensile strength grades with good ductility or to substitute some amounts of silicon with the same excellent material properties at the same time with an increased process safety.

Nickel exhibits a high solubility in ferrite and achieves a high solid solution strengthening per atom ratio [28]. Since

ni dovolj dobro sredstvo za utrjevanje s trdno raztopino [28]. Vendar ga njegova navidezno neomejena topnost [28] in grafitizacijski učinek med evtektično in evtektoidno reakcijo delata zanimivega za optimizacijo litine SSF DI.

Vpliv niklja in kobalta na mehanske in mikrostrukturne lastnosti, predvsem na grafitno fazo, je najbolj poznan pri standardnih popolnoma feritnih duktilnih litinah. Z dodatkom 1 mas. % Ni se temperatura prehoda iz duktilnega v krhko stanje poviša za 10 oC, s tem pa se izboljša udarna trdnost materiala pri nizkih temperaturah [29]. Majhne količine niklja premaknejo pri železovi litini krivuljo v diagramu čas - transformacija k višjim časom, kar pripelje do povečanja natezne trdnosti zaradi raztopinskega utrjevanja ferita [2, 30]. Med strjevanjem nikelj zmanjša stabilnost evtektičnega karbida [2], poveča število grafitnih kroglic, zmanjša velikost kroglic in udrobni feritna zrna [31,32].

V literaturi obstajajo različne trditve o vplivu kobalta na krogličavost grafita. Poroča se, da dodatek kobalta zmanjša [2] krogličavost, kot da jo tudi poveča [33,34]. Z dodatkom kobalta se število kroglic povečuje in njihova velikost zmanjšuje. Zaradi raztopinskega utrjevanja ferita celo pri dodatku 2 mas. % Co, se napetost tečenja in natezna napetost povečata ob sočasnem zmernem zmanjšanju raztezka ob zlomu [2, 33,35]. Pri 6 do 9 mas. % Co se dosežejo največja napetost tečenja, raztezek in udarna žilavost ter občutno poveča hitrost grafitizacije [34,35]. Višji deleži silicija povečajo udrobnilni učinek kobalta na grafitne kroglice [34]. Do 0,55 mas. % ni vpliva kobalta [35]. Kar se tiče udarne žilavosti feritne duktilne litine, kobalt povečuje temperaturo prehoda iz duktilnega v krhko stanje in zmanjšuje udarno žilavost [33,34].

nickel supports the graphitization during the eutectic solidification it will not be harmful regarding the eutectic solidification and nodule formation [2].

Cobalt exhibits a similar atom radius compared to iron thus making it at first glance an insufficient solid solution hardener [28]. However, its quasi unlimited solubility [28] and graphitizing effect during the eutectic and eutectoid reaction makes it an attractive element for the optimization of SSF DI.

The influence of nickel and cobalt on the mechanical and microstructural properties, in particular the graphite phase, of conventional fully ferritic DI is mostly known. With 1% Ni, the ductile to brittle transition temperature is increased by 10 K and the material's impact toughness at low temperature is improved [29]. Small nickel amounts move the curve of the cast iron's time transformation diagram to higher time intervals and lead to an increased tensile strength due to solid solution strengthening of the ferrite [2, 30]. During solidification, nickel decreases the eutectic carbide stability [2], increases the nodule count, decreases the nodules' size and refines the ferrite grains [31, 32].

According to the cobalt's influence on the graphite nodularity there are different statements in literature. Besides a decrease of nodularity [2] also an increase of the nodularity by a cobalt addition is reported [33, 34]. With the addition of cobalt the nodule count is increased and the nodule size is decreased. Due to a solid solution strengthening of the ferrite, even at an addition of 2% Co, the yield and tensile strength are increased accompanied with a moderate decrease of the elongation at fracture [2, 33, 35]. 6 to 9% Co achieve the maximum yield strength, elongation and impact value and a marked increase in the graphitization rate [34, 35]. Higher silicon contents increase the nodule refining

Kljub temu, da sta nikelj in kobalt obetavna elementa za nadaljnje povečanje raztopinskega utrjevanja ali za zamenjavo silicija v litini SSF DI, je njun vpliv na mikrostrukturo popolnoma feritne, raztopinsko utrjene duktilne litine neznan. Da bi zapolnili to sedanjo raziskovalno praznino, smo v tekoči raziskavi dve duktilni litini, EN-GJS-500-14 in EN-GJS-600-10, ločeno legirali z nikljem in kobaltom po popolni faktorski zasnovi poskusov. Ulili smo klinaste vzorce vrste II in IV glede na standard DIN EN 1564 ter s svetlobnim mikroskopom preiskali učinke niklja in kobalta na mikrostrukturo duktilne litine.

2 Metode in materiali

2.1 Zasnova poskusov

V naši sedanji raziskavi smo litini, ki je imela sestavo blizu evtektične, EN-GJS- 500-14 (3,8 mas. % Si) in EN-GJS-600-10 (4,4 mas. % Si), legirali v prvi seriji poskusov z dvema različnima količinama kobalta in v drugi seriji poskusov z dvema različnima količinama niklja glede na popolno faktorsko zasnovo poskusov. Da bi se pokazalo lastnosti določene osnovne GLS-litine, sta obe seriji vsebovali tudi parameter, ko ni bilo dodanih zlitinskih elementov. Da bi izključili sistematično napako spremenljivk, so bile zasnove poskusov poljubno razporejene (razpredelnici 1 in 2). Za statistično ovrednotenje merjenih rezultatov je bila vsaka postavitev parametra ponovljena trikrat, kar je v celoti zahtevalo 36 talin.

Največji delež kobalta je bil nastavljen na 4 mas. %, ker literatura [34] navaja zmanjšanje napetosti tečenja pri tem deležu kobalta. Srednji delež kobalta je bil nastavljen na 2 mas. %, ko se pojavi prvi učinek raztopinskega utrjevanja pri klasični feritni duktilni litini.

effect of cobalt [34]. Up to 0.55 %, there is no influence of cobalt [35]. Concerning the impact toughness of ferritic ductile iron cobalt increases the ductile to brittle transformation temperature and decreases the impact toughness [33, 34].

However, although nickel and cobalt are promising elements for further solid solution strengthening or substitution of silicon in SSF DI, their influence on microstructure of fully ferritic solution strengthened DI is unknown. To close this current research gap, in the present study two ductile iron grades, EN-GJS-500-14 and EN-GJS-600-10, have been separately alloyed with nickel and cobalt according to a full factorial design, Y-shaped edges type II and IV have been casted, according to DIN EN 1564, and the nickel and cobalt's effects on the DI microstructure have been examined by means of light microscopy.

2 Methods and Materials

2.1 Design of experiments

In the present work near-eutectic EN-GJS-500-14 (3.8% Si) and EN-GJS-600-10 (4.3% Si) were alloyed in the first test set with two different amounts of cobalt and in the second set with two different amounts of nickel according to a full factorial design. To show the properties of the particular basis GJS grade both sets contained a parameter setting without additional alloying elements. To exclude a systematic influence of disturbance variable the designs were randomized (table 1 and 2). For a statistical evaluation of the measured results each parameter setting was repeated three times leading to overall number of 36 melts.

The maximum cobalt content was set at 4% because [34] reports a decrease of the yield strength at this cobalt amount. The

Največji delež niklja je bil nastavljen na koncentracijo niklja, pri kateri nastaja največji delež perlita 5 % glede na standard DIN EN 1563. V svojih patentih družba Siempelkamp Giesserei GmbH (Krefeld, Nemčija) omejuje delež niklja na 2,5 mas. % pri največjem deležu silicija 4 do 4,5 mas. % [36, 37]. Glede na to, je bil največji delež niklja nastavljen na 3 mas. % in srednji delež niklja na 1,5 mas. %.

2.2 Eksperimentalni postopek

Za ovrednotenje vpliva ohlajevalne hitrosti na učinek kobalta in niklja v litini SSF DI smo uporabili klinaste klinaste vzorce vrste II (debelina stene 25 mm) in vrste IV (debelina stene 75 mm) (slika 1), ki so bili simetrično razporejeni na okroglem modelu, da bi dosegli enakomerno zapolnjevanje forme in enakomerne razmere ohlajevanja. Forma je bila narejena iz kremenovega peska F 32 (Quarzwerte GmbH, Nemčija) in smole 7830 ter aktivatorja 7674 (oboje

mean cobalt content was set to 2%, which provides first solution strengthening effects in conventional ferritic DI.

The maximum nickel content is determined by the nickel content that generates a maximum perlite amount of 5 %, like it is advised in DIN EN 1563. In their patents the Siempelkamp

Giesserei GmbH (Krefeld, Germany) limits the nickel content at 2.5 % at a maximum silicon content of 4 to 4.5 % [36, 37]. Due to this, the maximum nickel content was set at 3% and the mean nickel content at 1.5 %.

2.2 Experimental procedure

To evaluate the influence of the cooling rate on the effect of cobalt and nickel on SSF DI, Y-wedges of the type II (25 mm wall thickness) and IV (75 mm wall thickness) were used (figure 1), symmetrically arranged on a circular pattern to realize uniform mould filling and cooling conditions.

Razpredelnica 1. Načrt poskusov prve serije

Table 1. Experimental design of the first set

test run	Co [%]	Si [%]
1	0	3.8
2	4	4.3
3	4	3.8
4	0	4.3
5	4	3.8
6	2	3.8
7	2	3.8
8	4	4.3
9	4	4.3
10	2	4.3
11	2	4.3
12	4	3.8
13	0	4.3
14	0	4.3
15	0	3.8
16	2	4.3
17	2	3.8
18	0	3.8

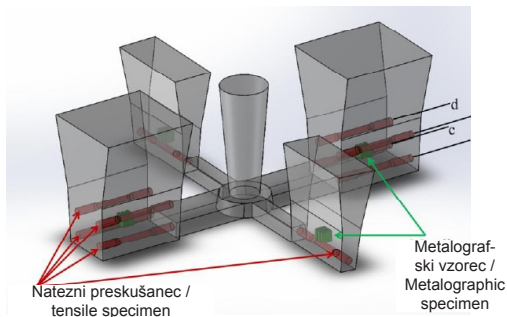
Razpredelnica 2. Načrt poskusov druge serije

Table 2. Experimental design of the second set

test run	Ni [%]	Si [%]
1	0	3.8
2	3	4.3
3	3	3.8
4	0	4.3
5	3	3.8
6	1.5	3.8
7	1.5	3.8
8	3	4.3
9	3	4.3
10	1.5	4.3
11	1.5	4.3
12	3	3.8
13	0	4.3
14	0	4.3
15	0	3.8
16	1.5	4.3
17	1.5	3.8
18	0	3.8

iz HÜTTENES-ALBERTUS Chemische Werke GmbH, Germany).

Slika 1. Uporabljeni model in mesta vzorčenja
Figure 1. Used pattern and sampling positions



Napajalniki duktilne litine GJS-400-15, ki jih je dobavila družba Georg Fischer GmbH (Mettmann, Nemčija), malolegirana jeklena lomnina (Albert Hoffmann GmbH, Eschweiler, Nemčija), zelo čisti katodni kobalt in nikljevi peleti (FESIL SALES GmbH, Duisburg, Nemčija) so bili staljeni v grafitnem loncu (Aug. Gundlach KG, Großalmerode, Nemčija) v srednjefrekvenčni indukcijski peči. Talina (kemična sestava v razpredelnici 2) je bila pregreta na 1500 °C in zadrževana pri tej temperaturi 10 min, nato je bila posneta žindra. Po obdelavi s cepivom ELMAG za litino s kroglastim grafitom (Elkem GmbH, Düsseldorf, Nemčija) s potopnim zvoncem pri temperaturi približno 1450 °C, posnetju žindre in cepljenju taline z 0,3 mas. % SMW605 (ASK termične analize izbranih talin. Kemično sestavo talin smo ugotavljali na ulitih spektrometrijskih vzorcih (premer 40 mm, CCD, debelina 5 mm; ulito v bakreno kokilo) z

Chemicals Metallurgy GmbH, Unterneukirchen, Nemčija), se je talina ulila pri približno 1350 °C v pripravljeno formo, v kateri je bil pesek vezan s smolo. Z napravo QuiK Cups (HERAEUS

The moulds were produced using silica sand F32 (Quarzwerte GmbH, Germany) and the resin 7830 and activator 7674 (both from HÜTTENES-ALBERTUS Chemische Werke GmbH, Germany).

EN-GJS-400-15 DI feeder, provided by Georg Fischer GmbH (Mettmann, Germany), low alloyed steel scrap (Albert Hoffmann GmbH, Eschweiler, Germany), high purity FeSi75, high purity cathode cobalt, and nickel pellets (FESIL SALES GmbH, Duisburg, Germany) were melted in a graphite crucible (Aug. Gundlach KG, Großalmerode, Germany) using a 50 kg medium frequency induction furnace. The melt (chemical composition see Table 2) was superheated to 1500 °C, held at this temperature for 10 min and slagged off. After the nodularization treatment using ELMAG (Elkem GmbH, Düsseldorf, Germany) in a plunger at a melt temperature of approx. 1450 °C, slagging off and inoculating the melt with 0.3 wt.% SMW605 (ASK Chemicals Metallurgy GmbH, Unterneukirchen, Germany) the melt was cast at approx. 1350 °C in the prepared resin-bonded mould. From selected melts thermo analyses curves were recorded with the aid of QuiK Cups (HERAEUS ELECTRONITE GmbH & Co. KG, Hagen, Germany). The chemical composition of the melts was determined with the aid of cast spectrometer specimens (40 mm diameter, 5 mm thickness; cast in a copper die) using the spark emission spectrometer SPECTRO LAB Jr.CCD (SPECTRO Analytical Instruments GmbH, Kleve, Germany). In addition selected specimens were analyzed by means of wet chemical analyses. The basic chemical composition was as follows mass fractions: 0.02-0.38% P; 0.01-0.03% S; 0.12-0.24% Mn; 0.86-0.12% Cu; 0.03-0.05% Mg; 0.03-0.05% Cr; 0.00-0.01% Al.

ELECTRONITE GmbH & Co. KG, Hagen, Nemčija) smo izdelali krivulje iskrnim emisijskim spektrometrom SPECTRO LAB Jr. ((SPECTRO Analytical Instruments GmbH, Kleve, Nemčija).

Dodatno smo izbrane vzorce analizirali z mokro kemično analizo. Osnovna kemična sestava je bila: 0,02-0,38 mas. % P, 0,01-0,03 mas. % S, 0,12-0,24 mas. % Mn, 0,86-0,12 mas. % Cu, 0,03-0,05 mas. % Mg, 0,03-0,05 mas. Cr, 0,00-0,01 mas. % Al.

2.3 Analize vzorcev

Za pripravo tankih metalografskih obrusov so bili vzorci izrezani iz Y-klinov (slika 1) z vodno hlajeno cirkularno žago in vloženi v mešanico araldita in utrjevala Ren HY 956 (oboje firme Huntsman GmbH & Co. KG, Bergkamen, Nemčija). Vzorci so bili potem brušeni na papirjih 180 do 1000 ter polirani z različnimi polirnimi sredstvi zrnavosti 9,3 in 0,25 μm . Tanki obrusi so bili jedkani z nitalom, da bi se odkrilo perlitno razmerje. Mikrostrukture vzorcev smo preiskali pri različnih povečavah s svetlobnim mikroskopom Axio Imager A1 m (LM from Carl Zeiss Microscopy GmbH, Jena, Nemčija). Pri vsaki povečavi je bilo narejenih vsaj 5 slik. Z računalniško opremo Axiovision KS4003.0 (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Jena, Nemčija) za analizo slik so bile obdelane svetlobnomikroskopske slike nejedkanih mikrostruktur pri povečavi 100 x, da bi se dobila količina, število, velikost, sferičnost (enačba 1 [38]) in krogljčavost grafitnih krogel (enačba 2 [39]).

$$F (\text{sferičnost}) = \frac{4 \cdot \pi (\text{površina delca})}{(\text{premer delca}^2)}$$

(> 0.7 = "kroglasta tvorba") (1)

$$N (\text{krogljčavost}) = \frac{\text{število krogljastih tvorbov}}{\text{število vseh grafitnih delcev}} \quad (2)$$

2.3 Specimen Analyses

For the preparation of the metallographic thin sections, samples were cut from the Y wedges (figure 1) using a water-cooled circular saw and were embedded in Araldite combined with the hardener Ren HY 956 (both from Huntsman GmbH & Co. KG, Bergkamen, Germany). The sections were then ground using abrasive paper (180 to 1000 grades) and polished with various polishing agents (9, 3 and 0.25 μm grain). The thin sections were etched with Nital to reveal the pearlite ratio. The microstructures of the specimens were examined at different magnifications using an Axio Imager A1 m light microscope (LM from Carl Zeiss Microscopy GmbH, Jena, Germany). Per magnification a minimum of 5 pictures was taken. With the aid of the image analyses software Axiovision KS 400 3.0 (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Jena, Germany) the LM pictures of the unetched microstructures in 100x magnification were analyzed to reveal the amount, number, size, sphericity (eq. 1 [38]), and nodularity of the graphite nodules (eq. 2 [39]).

$$F (\text{sphericity}) = \frac{4 \cdot \pi (\text{particle's area})}{(\text{particle's circumference}^2)}$$

(> 0.7 = "spherulites") (1)

$$N (\text{nodularity}) = \frac{\text{number of spherulites}}{\text{numb. of all detected graphite particles}} \quad (2)$$

The detected graphite particles were classified according to their size into particles class 1 (5 to 100 μm^2), particles class 2 (101 to 600 μm^2), and particles class 3 (> 601 μm^2).

All measurements were evaluated by using analyses of means (ANOM) and analyses of variance (ANOVA), and were modelled by linear regression [40].

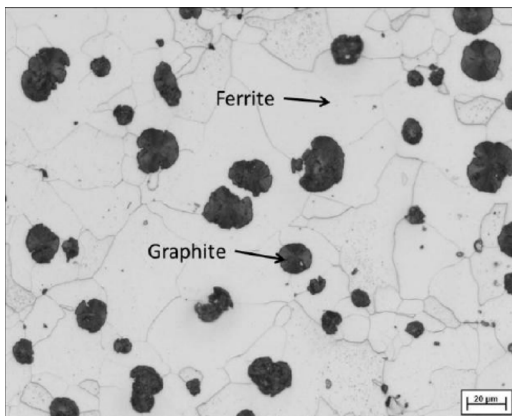
Zaznane grafitne delce smo razvrstili glede na velikost delcev v razred 1 (5 do 100 μm^2), razred 2 (101 to 600 μm^2) in razred 3 (> 601 μm^2).

Vse meritve so bile ovrednotene z analitičnimi sredstvi (ANOM), narejene so bile analize varianc (ANOVA) ter izdelana regresijska odvisnost [40].

3 Rezultati

Sliki 2 in 3 kažeta mikrostrukture poliranih in z HNO₃ jedkanih vzorcev. V vseh vzorcih je bila mikrostruktura sestavljena iz grafita v kovinski osnovi brez cementita.

Reprezentativno izbrana mikrostruktura vseh vzorcev, legiranih s kobaltom (serija 1), prikazana na sliki 2 (legirana z 3,8 mas. % silicija in 4 mas. % kobalta), kaže popolnoma feritno osnovo. Rezultati svetlobno mikroskopske preiskave kovinske osnove so prikazani na sliki 4. Dodatek 1,5 mas. % niklja litini SSF DI vodi do nastanka perlita v kovinski osnovi v deležu do 2 5 %



Slika 2 Mikrostruktura vzorca s 3,8 mas. % Si in 4 mas. % Co v svetlobnem mikroskopu, polirano, jedkano z HNO₃, povečava 500x

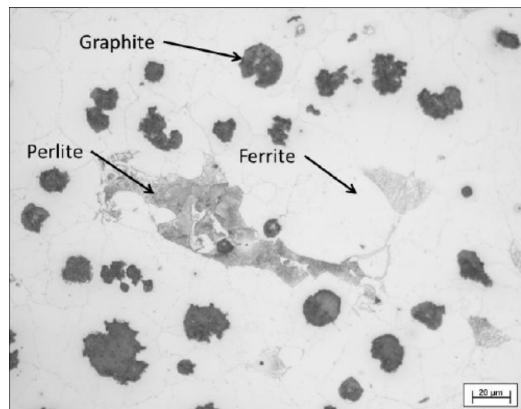
Figure 2. Light optical microstructure with 3.8% Si and 4% Co, polished, HNO₃-etched 500x

3 Results

Figures 2 and 3 show the microstructures of polished and HNO₃ etched specimen. All specimens show a microstructure that consists of graphite in a metallic matrix without the formation of cementite. Representatively selected for all cobalt alloyed specimens (set 1), the microstructure in figure 2 (alloyed with 3.8 % Si and 4 % Co) shows a fully ferritic matrix.

The results of the LM investigation of the metallic matrix are shown in figure 4. The addition of 1.5 % Ni to SSF DI leads to a perlite content of up to 2 % in the matrix; alloying with 3 % Ni results in a microstructure with up to 15 % perlite.

Alloying with cobalt causes no statistically proved effect on the graphite nodule count (figure 5 and table 3). With increasing nickel content a tendency of increasing nodule count can be observed (figure 6). However, this cannot be statistically confirmed, because the Tukey-Test classifies the results of all Co-levels as



Slika 3 Mikrostruktura vzorca s 4,3 mas. % Si in 3 mas. % Ni v svetlobnem mikroskopu, polirano, jedkano z HNO₃, povečava 500x

Figure 3. Light optical microstructure with 4.3 wt.% Si and 3% Ni, polished, HNO₃-etched, 500x

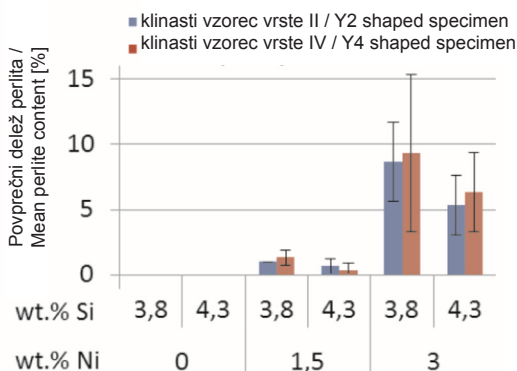
Legiranje s 3 mas. % niklja ima za posledico mikrostrukturo z do 15 % perlita.

Legiranje s kobaltom ni povzročilo nobenega statistično dokazanega učinka na število grafitnih kroglic (slika 5 in razpredelnica 3). S povečevanjem deleža niklja se je opazila tendenca povečanja števila kroglic (slika 6). Vendar tega ni bilo mogoče statistično potrditi, ker Tukeyev preskus razvršča rezultate vseh ravni kobalta, ker sta vrednosti »A« in p večji od kritične vrednosti 0,05 (razpredelnica 4). V obeh serijah vodi povečan delež silicija do povečanega števila grafitnih delcev. Manjša ohlajevalna hitrost v debelejših vzorcih Y4 ima za posledico manjše število kroglic.

Dodatek kobalta kot tudi dodatek niklja vodi do povečane krogličavosti (sliki 7 in 8). V prvi seriji smo opazili učinek zmanjšanja krogličavosti zaradi velikega deleža silicija pri 0 in 2 mas. % kobalta. Ko se poveča delež kobalta na 4 mas. %, pa silicij ne vpliva več na krogličavost grafitnih delcev. Rezultati druge serije niso pokazali statistično ovrednotenega vpliva deleža silicija na število grafitnih delcev. Na drugi strani je vpliv povečanega deleža niklja na

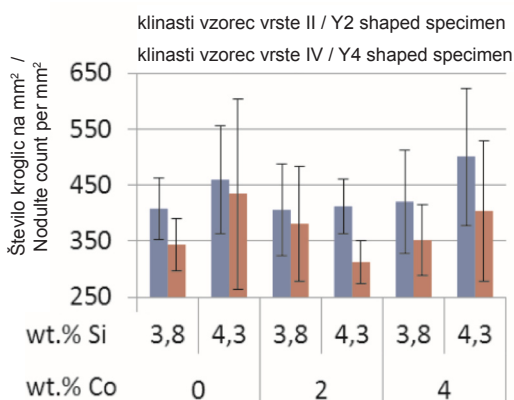
»A« and the p value is bigger than the critical value of 0.05 (table 4). In both sets, a higher content of silicon leads to an increased number of graphite particles. The slower cooling rates in the thicker Y4 shaped specimens result in lower nodule counts.

The addition of cobalt as well as the addition of nickel leads to an increasing nodularity (figures 7 and 8). For the first set



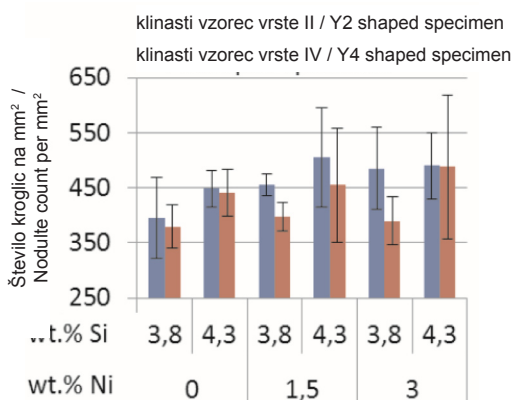
Slika 4. Vpliv silicija in niklja na mikrostrukturni delež perlita

Figure 4. Effect of silicon and nickel on the microstructure's perlitic content



Slika 5 U činek silicija in kobalta na število kroglic na mm²

Figure 5. Effect of silicon and cobalt on the nodule count per mm



Slika 6. Učinek silicija in niklja na število kroglic na mm²

Figure 6. Effect of silicon and nickel on the nodule count per mm

Razpredelnica 3 Rezultati ANOVA-meritev števila kroglic, serija 1 (interval zaupanja 95 %). Različne črke v isti vrsti in p-vrednosti manjše kot 0,05 kažejo na statistično pomemben vpliv določene spremenljivke, ukazuje. N = število merjenih vrednosti, S = standardna deviacija

Table 3. Results of the ANOVA of the nodule count measurements, set 1 (confidence interval of 95 %). Different letters in the same line and p values smaller than 0.05 indicate a statistically significant influence of the particular command variable. N = number of measuring values, S = standard deviation

		Povprečno število kroglic na mm ² / Mean nodule count per mm ²	N	S	Grupiranje po Tukeyevi metodi / Grouping per Tukey-method	p-vrednost / p-value
Si [mas.%]	3.8	385.4	103	80.2	A	0.016
	4.3	422.1	76	121.7	B	
Co [mas.%]	0	404.1	59	103.5	A	0.121
	2	380.6	60	84.0	A	
	4	418.2	60	112.4	A	
Oblika vzorca / Specimen shape	Y2	431.4	90	90.0	A	0.000
	Y4	370.4	89	103.2	B	

Razpredelnica 4. Rezultati ANOVA-meritev števila kroglic, serija 2 (interval zaupanja 95 %)

Table 4. Results of the ANOVA of the nodule count measurements, set 2 (confidence interval of 95 %)

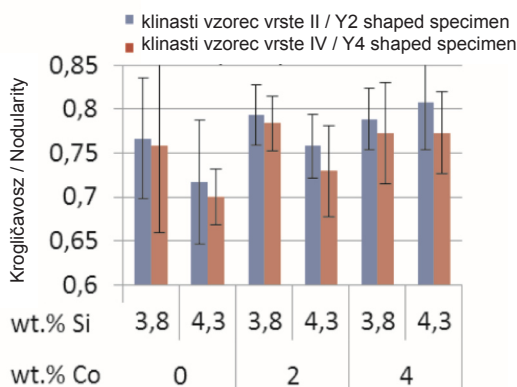
		Povprečno število kroglic na mm ² / Mean nodule count per mm ²	N	S	Grupiranje po Tukeyevi metodi / Grouping per Tukey-method	p-vrednost / p-value
Si [mas.%]	3.8	417.3	103	61.8	A	0.002
	4.3	471.0	76	81.6	B	
Ni [mas.%]	0	415.9	59	54.4	A	0.077
	1.5	453.3	60	76.1	A	
	3	462.8	60	89.0	A	
Oblika vzorca / Specimen shape	Y2	462.8	90	68.6	A	0.034
	Y4	424.8	89	79.5	B	

boljšo krogličavost statistično pomemben, kot kažejo rezultati ANOVA (razpredelnici 5 in 6).

4 Razprava

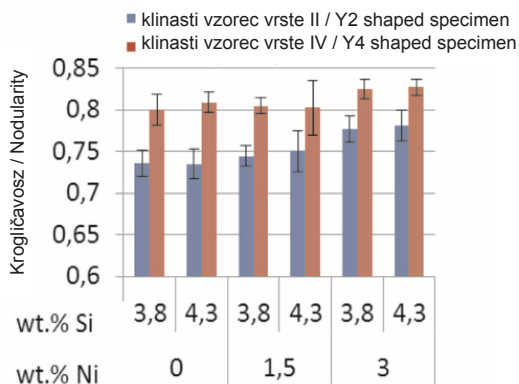
V tej predstavljeni študiji smo spreminjali ohlajevalno hitrost z izdelavo različnih oblik vzorcev z določenimi toplotnimi moduli. Lahko se vidi, da povečana ohlajevalna hitrost vodi do povečanega števila kroglic

a nodularity decreasing effect of the higher silicon content can be found at 0 and 2 % Co. When the cobalt content is increased to 4 %, silicon shows no effect on the nodularity of the graphite particles. The results of the second set reveal no statistically validated influence of the silicon content on the nodule count. The effect of improved nodularity by increasing the nickel content to 3 % on the other hand is statistically significant, as the results of the ANOVA show (table 5 and 6).



Slika 7. Vpliv silicija in kobalta na krogličavost grafita

Figure 7. Effect of silicon and cobalt on the nodularity



Slika 8. Vpliv silicija in niklja na krogličavost grafita

Figure 8. Effect of silicon and nickel on the nodularity

Razpredelnica 5. Rezultati ANOVA-meritev krogličavosti, serija 1 (interval zaupanja 95 %)

Table 5. Results of the ANOVA of the nodularity measurements, set 1 (confidence interval of 95 %)

		Povprečna krogličavost / Mean nodularity	N	S	Grupiranje po Tukeyevi metodi / Grouping per Tukey-method	p-vrednost / p-value
Si [mas.%]	3.8	0.777	103	0.05	A	0.002
	4.3	0.750	76	0.068	B	
Co [mas.%]	0	0.741	59	0.072	A	0.000
	2	0.771	60	0.046	B	
	4	0.785	60	0.05	B	
Oblika vzorca / Specimen shape	Y2	0.775	90	0.058	A	0.042
	Y4	0.757	89	0.061	B	

Razpredelnica 6. Rezultati ANOVA-meritev krogličavosti, serija 2 (interval zaupanja 95 %)

Table 6. Results of the ANOVA of the nodularity measurements, set 2 (confidence interval of 95 %)

		Povprečna krogličavost / Mean nodularity	N	S	Grupiranje po Tukeyevi metodi / Grouping per Tukey-method	p-vrednost / p-value
Si [mas.%]	3.8	0.77	36	0.07	A	0.985
	4.3	0.73	36	0.08	A	
Ni [mas.%]	0	0.7	24	0.08	A	0.001
	2	0.71	24	0.07	A	
	4	0.77	24	0.05	B	
Oblika vzorca / Specimen shape	Y2	0.67	36	0.06	A	0
	Y4	0.78	36	0.04	B	

v obeh serijah (sliki 5 in 6). Pričakovana odstopanja v seriji 2 kažejo na povečanje deleža kroglic z zmanjšanjem ohlajevalne hitrosti. Za ta pojav nismo našli razlage. Dobro je znano, da povečana ohlajevalna hitrost prispeva k povečanju števila kroglic, krogličavosti in sferičnosti. To občutno povečanje števila kroglic povzroči večja podhladitev, ki se pojavi med strjevanjem tanjših prereзов, kar naknadno aktivira večje število podlag za heterogeno nukleacijo grafitu [7].

Z mikrostrukturno analizo se ni našlo nobenih omejitev za nadaljnje raztopinsko utrjevanje litine SSF DI s kobaltom. Osnove vzorcev, legiranih s kobaltom (serija 1), so bile pri vseh uporabljenih deležih kobalta iz 100 % ferita. Ti rezultati potrjujejo pričakovanja, ker je dobro znano, da kobalt pospešuje nastajanje ferita. Zato ni omejitev za raztopinsko utrjevanje do 4 mas. % Co in predvidoma niti pri večjih deležih kobalta ni moteno nastajanje ferita. Ker legiranje s silicijem vodi do zmanjšanja deleža krogličavosti, legiranje s kobaltom izboljša obliko grafitnih kroglic. Ti učinki so v skladu z opazovanji standardnih vrst duktilne litine [33, 34]. Zaradi povečanja krogličavosti in s tem zmanjšanja zarezneга učinka grafitnih delcev se lahko pričakuje boljše razmerje med natezno trdnostjo in duktilnostjo. E. Modl [34] je opazil, da se poveča število grafitnih delcev z 140 na 340 na mm², če se standardna duktilna litina legira z do 6 mas. % kobalta. Povečanja števila kroglic in s tem udrobnjenja mikrostrukture pri legiranju s kobaltom nismo opazili v naši sedanji raziskavi. Ena od možnih razlag je, da prisoten delež silicija vodi do večjega osnovnega števila kroglic tako, da so vzorci že brez kobalta imeli 404 kroglice na mm². Nadalje, povprečno število kroglic 370 do 431 delcev na mm² v vzorcih legiranih s kobaltom je očitno preseгло minimalno število 60 delcev na mm², tako da je bil

4 Discussion

In present study the cooling rate has been varied by the production of different specimen shapes with defined thermal modules. It can be shown, that an increase in cooling rate leads to an increased nodule count in both sets (figures 5 and 6). Contrasting expectations, set 2 shows an increased nodularity with a decreasing cooling rate. For this phenomenon no explanation was found. It is well known that the increase of the cooling rate contributes to a raise in nodule count, nodularity and sphericity. This noticeable raise in nodule count is caused by higher undercooling that takes place during solidification of thinner sections, which subsequently activates a large number of substrates for heterogeneous nucleation of graphite [7].

Via microstructural analysis, no limitation for a further solid solution hardening of SSF DI by alloying with cobalt can be found. The matrixes of the cobalt alloyed specimens (Set 1) consist of a 100 % ferrite for all investigated cobalt contents. These results meet the expectations, since it is well known that cobalt promotes the formation of ferrite. Therefore, no restrictions for a solid solution hardening by alloying with up to 4% Co and presumably even higher contents of cobalt are given due to no interference with the formation of ferrite. While alloying with silicon leads to a decrease in nodularity, alloying SSF DI with cobalt improves the shape of the graphite nodules. These effects are in accordance with observations made in conventional ductile iron grades [33, 34]. Due to the increasing nodularity and the respective decreased notching effect of graphite particles, an enhanced ratio of tensile strength to ductility can be expected. E. Modl [34] observed an increase from 140 to 340 graphite particles per mm² by alloying a conventional DI with up to 6% Co. An

izključen nastanek mikroporoznosti kot posledica tega.

Zaradi velikega učinka raztopinskega utrjevanja [28] in s tem optimizacijskega potenciala za litino SSF DI je obetavno legiranje z nikljem. Največja količina niklja je povezana z učinkom nastajanja perlita, ki ga nikelj povzroča med eutektoidno reakcijo transformacije. Glede na strojno obdelovalnost in ohranitev izvrstnega razmerja med trdnostjo in duktilnostjo po DIN EN 1563, delež perlita v litini SSF DI ne sme preseči 5 %. V naši študiji je delež perlita presegel to mejo pri zlitinah, ki so bile legirane s 3 mas. % Ni. Rezultati potrjujejo največji delež 2,5 mas. %, ki je naveden v patentih firme Siempelkamp Giesserei GmbH [36, 37]. Zaradi učinka nastajanja ferita je vzorec, legiran z 4,3 mas. % silicija, pokazal manj perlita v mikrostrukturi kot vzorec, legiran s 3,8 mas. %. Pri vrednotenju deleža perlita je treba upoštevati elemente, ki povzročajo nastajanje perlita. Glede na kemično sestavo napajalnikov (EN-GJS-400-15), ki so se uporabljali kot surovina, in glede na sestavo jeklenih odpadkov smo privzeli, da se dopušča delež okoli 0,2 mas. % mangana in okoli 0,1 mas. % bakra. Ker baker pospešuje nastajanje perlita približno 13-krat bolj kot nikelj, se opažen delež nastanka perlita razume kot prekrivanje učinkov teh elementov. V nasprotju z učinkom silicija vodi dodatek niklja k povečani krogličavosti v litini SSF DI. To je v nasprotju z opažanji C.H.Hsua in sodelavcev [2] za standardno feritno duktilno litino. Kar se tiče legiranja s kobaltom, se zato lahko pričakuje, da bo nadaljnje raztopinsko utrjevanje z dodajanjem niklja imelo za posledico izboljšano razmerje med trdnostjo in duktilnostjo. Opažena tendenca po večjem številu kroglic zaradi dodajanja niklja se ni mogla statistično potrditi za litino SSF DI s Tukeyevin preskusom in p-vrednostjo v intervalu zaupanja 95 %. Ta

increase in nodule count and respectively a grain refining effect of cobalt cannot be seen for the cobalt contents used in the present study. One possible explanation is that the present silicon content leads to a higher base nodule count, so that specimens without cobalt already showed a nodule count of 404 nodules per mm². Furthermore, the mean nodule count of cobalt alloyed specimen of 370 to 431 particles per mm clearly exceeds the minimum amount of 60 particles per mm so that microporosity as an outcome of this can be excluded. Due its high solid solution hardening effect [28] and the resulting optimization potential for SSF DI grades, it is promising to alloy with nickel. The maximum amount of nickel is a result of the pearlite forming effect, which nickel reveals during the eutectoid phase transformation.

For reasons such as machinability and conserving the excellent ratio of strength to ductility, according to DIN EN 1563, the perlite content of SSF DI grades should not exceed 5 %. In the present study, the pearlite content exceeds this amount for alloys with the addition of 3% Ni. These results confirm the maximum amount of 2.5 %, that is given by the patents of Siempelkamp Giesserei GmbH [36, 37]. Due to ferrite forming effect, specimen alloyed with 4.3% Si exhibit less pearlite in the microstructure than specimen alloyed with 3.8%. When evaluating the pearlite content, the amount of other pearlite forming elements needs to be considered. Due to the chemical composition of the risers (EN-GJS-400-15) that have been used as raw material and due to the composition of the steel scrap an amount of about 0.2% Mn and about 0.1 % Cu were adapted. Since copper promotes the formation of pearlite approximately 13 times stronger than nickel, the observed pearlite forming can be understood as an overlaid effect of those elements. In contrast to the effect of silicon,

tendenca bi vodila do manjših kroglic, ki naj bi bile bolj okrogle kot večje kroglice in to bi lahko bila možna razlaga za opaženo povečanje krogličavosti. Število kroglic, ki smo ga dosegli v seriji 2 s povprečno 416 - 471 kroglic na mm^2 , je precej nad potrebnim minimumom, da se izogne mikroporoznosti.

5 Sklepi

Namen naše raziskave je bil ugotoviti vpliv kobalta in niklja na mikrostrukturo litine SSF DI. Rezultati preiskovanih zlitin, legiranih z do 4 mas. % kobalta in do 3 mas. % niklja omogočajo naslednje sklepe:

1. Dodatek do 4 mas. % kobalta ni škodljiv za nastajanje ferita. Ta dodatek ne vpliva negativno na število kroglic in z dodajanjem kobalta se povečuje krogličavost.
2. Dodajanje niklja je omejeno zaradi neizogibnega nastanka več kot 5 % perlita, kar se zgodi že pri 3 mas. % niklja. Dodajanje niklja nima vpliva na število kroglic, povečuje pa njihovo krogličavost.

Glede na omejitve zaradi nastajanja perlita pri legiranju z nikljem se lahko pokaže, da sta kobalt in nikelj z vidika mikrostrukture primerna za nadaljnje raztopinsko utrjevanje litin SSF DI. V nadaljnjih preiskavah se bo analizirala interakcija med kobaltom in nikljem. Zaradi močnega vpliva kobalta na tvorbo ferita lahko to omogoči večje dopustne deleže niklja, kar bo vodilo do nadaljnjega raztopinskega utrjevanja ferita. Učinek obeh serij legiranja na mehanske lastnosti litine SSF DI bo predstavljen v prihodnjih prispevkih.

a nickel addition leads to an increased nodularity in SSF DI. This disagrees with the observations made by C.H. Hsu et al. [2] for conventional ferritic DI. As for alloying with cobalt it can therefore be expected, that a further solid solution strengthening by the addition of nickel results in an improved ratio of strength to ductility. The observed tendency for a higher nodule count with the addition of nickel cannot be statistically confirmed for SSF DI by the use of the Tukey-test and p-value at a confidence interval of 95 %. This tendency would lead to smaller nodules that tend to be more spherical than larger nodules, which could be a possible explanation for the observed increase in nodularity. The nodule count achieved in set 2 with an average of 416-471 nodules per mm^2 is well above the necessary minimum of 60 nodules per mm^2 to avoid microporosity.

5 Conclusions

The purpose of the present study was to analyse the microstructural influence of cobalt and nickel on SSF DI. The results of the investigated alloying with up to 4% Co and up to 3% Ni can be concluded as follows:

1. The addition of up to 4% Co is not harmful to the formation of ferrite. The nodule count is not negatively influenced and the nodularity increases with the addition of cobalt.
2. The addition of nickel is limited to the intolerable formation of more than 5 % pearlite, which occurred at 3 % Ni. Besides this, the addition of nickel results in an unaffected nodule count and an improved nodularity.

With respect to the restrictions regarding the pearlite formation by alloying with nickel, it can be shown that cobalt and nickel

6 Zahvale

Avtorji se zahvaljujejo firmam Georg Fischer GmbH, Hoffmann Stahlgießerei GmbH, Quarzwerke GmbH, Hüttenes Albertus Chemische Werke GmbH and Rio Tinto AG za dobavo lomnine železove litine, jeklenih odpadkov, peska, veziva in grodlja, Ingo Braunu, Dietmarju Lembrechtu, Andreasu Gruszki, Timu Schneiderju ter Hergenu Großu za pomoč pri izdelavi vzorcev, kot tudi Dirku Freudenbergu in njegovi skupini, Clausu Grotenu, Elke Schaberger-Zimmermann, Elke Breuer, Mariji Schaarschmidt, Davidu Stepputat, in Anne Drevermann za pripravo vzorcev, preskušanje, metalografsko pripravo in analize vzorcev.

are, from a microstructural point of view, suitable for a further solution strengthening of SSF DI. In further studies, the interaction of nickel and cobalt will be investigated. Due to its strong ferritization effect cobalt maybe leads to a higher tolerable nickel content thus leading to a further solid solution strengthening of ferrite. The effect of both alloying series on the mechanical properties of SSF DI will be presented in future publications.

6 Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the Georg Fischer GmbH, Hoffmann Stahlgießerei GmbH, Quarzwerke GmbH, Hüttenes Albertus Chemische Werke GmbH and Rio Tinto AG for supplying us with cast iron scrap, steel scrap, sand, binder and pig iron; Ingo Braun, Dietmar Lembrecht, Andreas Gruszka, Tim Schneider and Hergen Groß for their support during the specimen production as well as Dirk Freudenberg and his team, Claus Groten, Elke Schaberger-Zimmermann, Elke Breuer, Maria Schaarschmidt, David Stepputat, and Anne Drevermann for the specimen preparation, testing, metallographical preparation and analyses of the samples.

7 Viri

1. Escobar, A., et al., Experimental and numerical analysis of effect of cooling rate on thermal-microstructural response of spheroidal graphite cast iron solidification. *International Journal of Cast Metals Research*, 2014. 27(3): p. 176-186.
2. Hsu, C.H., M.L. Chen, and C.J. Hu, Microstructure and mechanical properties of 4% cobalt and nickel alloyed ductile irons. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2007. 444(1-2): p. 339-346.
3. Fatahalla, N., et al., Effect of the percentage carbon equivalent on the nodule characteristics, density and modulus of elasticity of ductile cast iron. *Journal of Materials Science*, 1996. 31(18): p. 4933-4937.
4. Gonzaga, R.A., Influence of ferrite and pearlite content on mechanical properties of ductile cast irons. *Materials Science and Engineering: A*, 2013. 567(0): p. 1-8.

5. Canzar, P., Z. Tonkovic, and J. Kodvanj, Microstructure influence on fatigue behaviour of nodular cast iron. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2012. 556: p. 88-99.
6. Ismaeel, A.R., S.S.A. Rehim, and A.E. Abdou, Effect of heat treatment (ferritizing) on chemical composition, microstructure, physical properties and corrosion behaviour of spheroidal ductile cast iron. *Asian Journal of Chemistry*, 2007. 19(6): p. 4665-4673.
7. Borrajo, J.M., et al., Shape and count of free graphite particles in thin wall ductile iron castings. *Isij International*, 2002. 42(3): p. 257-263.
8. Labrecque, C., P.M. Cabanne, and E.C. Muratore, Ductile Iron Characteristics and Impact Strength at Low Temperature. *Transactions of the American Foundry Society*, Vol 118, 2010. 118: p. 233-242.
9. Pedersen, K.M. and N.S. Tiedje, Graphite nodule count and size distribution in thin-walled ductile cast iron. *Materials Characterization*, 2008. 59(8): p. 1111-1121.
10. Calderam, M., et al., Influence of nodule count on fatigue properties of ferritic thin wall ductile iron. *Materials Science and Technology*, 2007. 23(8): p. 1000-1004.
11. Dommarco, R.C., A.J. Jaureguiberry, and J.A. Sikora, Rolling contact fatigue resistance of ductile iron with different nodule counts and matrix microstructures. *Wear*, 2006. 261(2): p. 172-179.
12. Nilsson, K.F. and V. Vokal, Analysis of ductile cast iron tensile tests to relate ductility variation to casting defects and material microstructure. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2009. 502(1-2): p. 54-63.
13. De Santis, A., et al., Quantitative shape evaluation of graphite particles in ductile iron. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008. 196(1-3): p. 292-302.
14. Ivan, N., M. Chisamera, and I. Riposan, Graphite degeneration in surface layer of ductile iron castings. *International Journal of Cast Metals Research*, 2013. 26(3).
15. Hiratsuka, S., et al., Influence of steel scrap on microstructure and mechanical properties of spheroidal graphite cast iron. *Materials Transactions*, 2003. 44(7): p. 1419- 1424.
16. Stokes, B., N. Gao, and P.A.S. Reed, Effects of graphite nodules on crack growth behaviour of austempered ductile iron. *Materials Science and Engineering: A*, 2007. 445- 446(0): p. 374-385.
17. Huyan, F., et al., Effect of Solute Silicon on the Lattice Parameter of Ferrite in Ductile Irons. *Isij International*, 2014. 54(1): p. 248-250.
18. Song, Y.H., T.S. Lui, and L.H. Chen, Effect of Si content on the deterioration of vibration fracture resistance of ferritic SG cast iron under an aqueous environment. *Materials Transactions*, 2004. 45(7): p. 2463-2470.
19. Basso, A., et al., High Silicon Ductile Iron: Possible Uses in the Production of Parts with "Dual Phase ADI" Microstructure. *Isij International*, 2012. 52(6): p. 1130-1134.
20. Alhussein, A., et al., Influence of silicon and addition elements on the mechanical behavior of ferritic ductile cast iron. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2014. 605: p. 222-228.
21. Bjorkegren, L.E. and K. Hamberg, Silicon Alloyed Ductile Iron with Excellent Ductility and Machinability. *Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron*. 2003.
22. Larker, R., Solution strengthened ferritic ductile iron ISO 1083/JS/500-10 provides superior consistent properties in hydraulic rotators. *Proc. Keith Millis Symposium on*

Ductile Cast Iron. 2008.

23. Stets, W., et al., Solution Strengthened Ferritic Ductile Cast Iron Properties, Production and Application. *International Journal of Metalcasting*, 2014. 8(2): p. 35-40.
24. Gonzaga, R.A. and J.F. Carrasquilla, Influence of an appropriate balance of the alloying elements on microstructure and on mechanical properties of nodular cast iron. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005. 162-163(0): p. 293-297.
25. Lekakh, S., V. Richerads, and N. Medvedeva, Effect of Si Segregation on Low Temperature Toughness of Ductile Iron. *AFS Transactions* 2012, 2012. 120: p. 319-326.
26. Lin, B.Y., E.T. Chen, and T.S. Lei, The effect of segregation on the austemper transformation and toughness of ductile irons. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1998. 7(3): p. 407-419.
27. Menk, W., Promising perspectives for chassis components (in German). *Giesserei*, 2005. 92: p. 66-67.
28. Leslie, W.C., Iron and its Dilute Substitutional Solid Solutions. *Metallurgical Transactions*, 1972. 3: p. 5-26.
29. Cho, G.S., et al., Effects of Alloying Elements on the Microstructures and Mechanical Properties of Heavy Section Ductile Cast Iron. *Journal of Materials Science & Technology*, 2007. 23(01): p. 97-101.
30. Reynolds, C.F. and H.F. Taylor, Mechanical Properties of Spherulitic Graphite Cast Iron. *AFS Transactions* 1952. 60.
31. Fatahalla, N., A. Abuelezz, and M. Semeida, C, Si and Ni as alloying elements to vary carbon equivalent of austenitic ductile cast iron: Microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2009. 504(1-2): p. 81-89.
32. Kawano, Y., S. Yamamoto, and N. Inoyama, Influence of Nickel and Copper on Impact Resistant Properties of Ferritic-Annealed Spheroidal Graphite Cast Iron THE JOURNAL OF THE JAPAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY, 1987. 59(9): p. 531-535.
33. Thury, W., R. Hummer, and E. Nechtelberger, Influence of cobalt, nickel and copper on the microstructure and mechanical properties of ductile iron (in German). *Giesserei-Praxis*, 1967: p. 273-279.
34. Modl, E., Cobalt-alloyed ductile iron (in German). *Giesserei* 1968. 55: p. 244-251.
35. Shen, X.P., S.J. Harris, and B. Noble, Influence of Small Vanadium and Cobalt Additions on Microstructure and Properties of Ductile Iron. *Materials Science and Technology*, 1995. 11(9): p. 893-900.
36. Patent DE10101159C2. 2003.
37. Patent DE102004045613A1. 2006.
38. Velichko, A., Quantitative 3D Characterization of Graphite Morphologies in Cast Iron using FIB Microstructure Tomography, in *Chemie, Pharmazie, Bio- und Werkstoffwissenschaften*. 2008, Universität des Saarlandes: Saarbrücken. p. 182.
39. Grundlach, R.B., Nodularity, its Measurement, and its Correlation with the Mechanical Properties of Ductile Iron. 2006, Stork Climax Research Services: Wixom, Michigan.
40. Kumar, S., P. Kumar, and H.S. Shan, Optimization of tensile properties of evaporative pattern casting process through Taguchi's method. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008. 204(1-3): p. 59-69

Nova generacija procesov formanja s svežim peskom in uporabo tehnologije zračenja za rahljanje

New Generation of Green Sand Molding Process Using Aeration Technology

Izvilleček

Da bi se zmanjšala poraba surovin in energije, zahteve po izdelavi ulitkov s skoraj končno obliko postajajo vse večje. Za izdelavo visokokakovostne forme, ki bi zadovoljila takšne zahteve, se v svetu vse več uporablja postopek zapolnjevanja forme s peskom pri nizkotlačnem zračenju, kar omogoča enakomerno gostoto forme ob majhni porabi energije. Pri dejanskem ulivanju se je pokazalo, da ima tehnologija zračenja številne prednosti, kot so izvrstno zapolnjevanje s peskom, veliko trdnost in enakomerno gostoto forme, velike prihranke energije, majhno raven hrupa, manjšo obrabo modelov itn. Prispevek daje nekaj pomembnih informacij o postopku formanja s svežim peskom.

Abstract

Demands for near-net-shape iron castings become much stronger in order to save resource and energy consumption. In order to make a high quality mould to satisfy such demands, a moulding process using low air pressure "Aeration" sand filling, which can make the uniformly dense moulds with lower energy consumption, is becoming popular worldwide. In actual casting production, it has been proven that the aeration technology provides several advantages such as, excellent sand filling, high strength and uniformly dense mould, superior energy saving, low noise level, less pattern wear, etc. This study provides some valuable information for green sand moulding process.

1 Uvod

Svetovna livarska proizvodnja je leta 2012 presegla 100 milijonov ton. Nad 80 % proizvodnje se predstavljali izdelki iz železove litine, uliti v peščene forme. Tehnologija formanja s svežim peskom je pomembna v proizvodnji železovih ulitkov. Zahteve za izdelavo ulitkov s skoraj končno obliko so vse večje, da bi se zmanjšala poraba surovin in uporaba energije. Pri izdelavi visokokakovostne forme, ki bi zadovoljevala te zahteve, je bistvena izbira najbolj optimalnega procesa formanja s svežim peskom, s katerim se dobi

1 Introduction

World casting production in 2012 exceeded 100 million tons. Over 80 % of production was iron castings and made with sand moulds. Green sand moulding technology plays an important role in the iron casting production. Demands for near-net-shape iron castings become much stronger in order to save resource and energy consumption. In order to make a high quality mould to satisfy such demands, it is critical to choose the most optimum green sand moulding process which achieves making uniformly dense moulds with lower energy consumption [1-5].

enakomerno goste forme ob majhni uporabi energije[1-5].

V zadnjem času se v svetu vse več uporablja postopek zapolnjevanja forme ob nizkotlačnem zračenju peska, ki povzroča rahljanje in omogoča enakomerno goste forme pri majhni uporabi energije. Ta postopek formiranja je sestavljen iz naslednjih dveh stopenj:

- 1) Zapolnjevanje forme z zračenim peskom: surovi zračen pesek zapolnjuje okvir forme tekoče in gladko. Dodatno je nastajanje mostičkov, do katerega pogosto pride v nekaterih območjih zapletene geometrije modela in na ustju dolgih žepov, je zmanjšano na minimum.
- 2) Visokotlačno stiskanje: peščene forme se dokončno zgostijo z visokotlačnim stiskanjem. Glava za stiskanje po odsekih je pri formarskem stroju predhodno nastavljena glede na geometrijo modela. Po stiskanju se ustrezno zglati še zadnja stran forme.

Pri dejanski izdelavi ulitkov se je tehnologija z zračenjem izkazala s številnimi prednostmi, kot so izvrstno zapolnjevanje forme, manj drobnega materiala [6-7], doseganje enakomerno goste trdne forme, veliki prihranki energije, malo hrupa, manjša obraba modelov itn.

Prispevek prikazuje analizo formarskega postopka s surovim peskom s poskusi in numerično simulacijo [3-5]. Matematični model zapolnjevanja forme z zračenim peskom, ki sloni na zveznem modelu dvofaznega toka, se je uporabil za formiranje v dejanskem industrijskem merilu. Za stiskanje se je uporabila metoda končnih elementov. Z zelo občutljivo kamero in lastno izdelavo zaznavala za prisotnost peska smo prikazali, da zračen pesek teče tekoče [11]. Ta študija daje nekatere zelo pomembne informacije za formarski proces s surovim peskom.

Recently, a moulding process using low air pressure "Aeration" sand filling¹, which can make uniformly dense moulds with lower energy consumption, is becoming popular worldwide. This moulding process consists of the following two steps

- 1) Aeration sand filling: Green sand under aeration fills the flask smoothly and gently. Accordingly, the bridge-forming phenomenon, which often happens at some regions s. with complicated pattern geometry and at the entrance of a deep pocket, is minimized.
- 2) High pressure squeezing: Sand moulds are finally compacted by high pressure squeeze. The segment squeeze head is preset to contour the pattern geometry for flask tight moulding machine. Accordingly, the mould back is formed flat after squeezing.

In actual casting production, it has been proven that the aeration technology provides several advantages such as excellent sand filling, less friable [6-7] and uniformly dense strong mould, superior energy saving, low noise level, less pattern wear, etc.

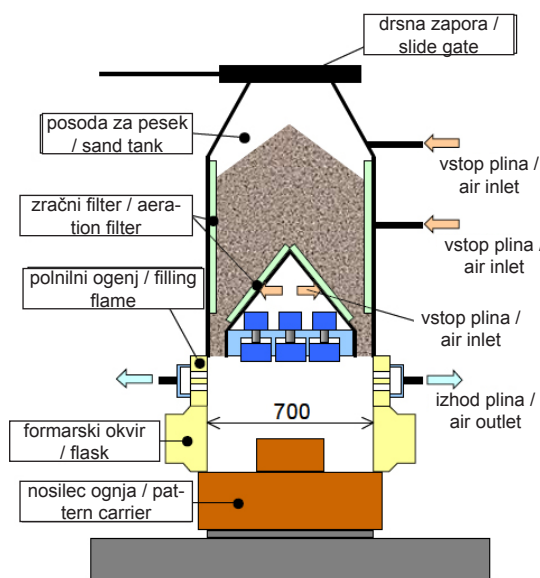
In this paper, the green sand moulding process was studied with experiments and numerical simulation [3-5]. A mathematical model of aeration sand filling based on two-phase flow continuous model was applied to actual production scale mould. Successively, a finite element method was applied for squeezing. It was clarified that the aerated sand flows smoothly by using a high speed video camera and a developed sand detecting sensor [11]. This study provides some valuable information for green sand moulding process.

2 Aerations and Filling

The sand filling density in small pocket is measured when mould is made with an

2 Zapolnjevanje forme z Zračenim peskom

Merili smo gostoto pri zapolnjevanju majhnega žepa, ko se je forma izdelovala na formarskem stroju med redno proizvodnjo¹. Na sliki 1 je shematično prikazano industrijsko zapolnjevanje forme z zračenim peskom in visokotlačno stiskanje forme. Dimenzije formarskega okvirja so bile 700 mm x 900 mm x 300 mm (višina). Stisljivost svežega peska je bila 40 %.



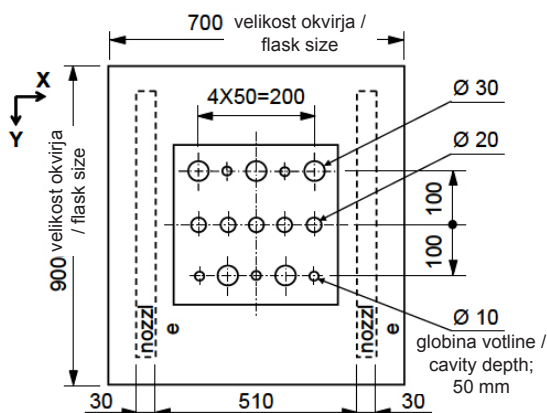
Slika 1. Shematičen prikaz industrijskega formarskega stroja za zračenje in stiskanje

Figure 1. Schematic illustration of production scale aeration / squeeze moulding machine

Skico eksperimentalne naprave za zapolnjevanje s peskom kaže slika 2. Tri različne oblike majhnih žepov smo namestili na model. Premeri majhnih žepov so bili 30 mm, 20 mm, 10 mm. Globina žepov je bila 50 mm. Zračilni kanali so bili postavljeni na dno vsakega žepa. Položaj šob prikazujejo črtkane črte. Šobe so nameščene vzdolž y-osi.

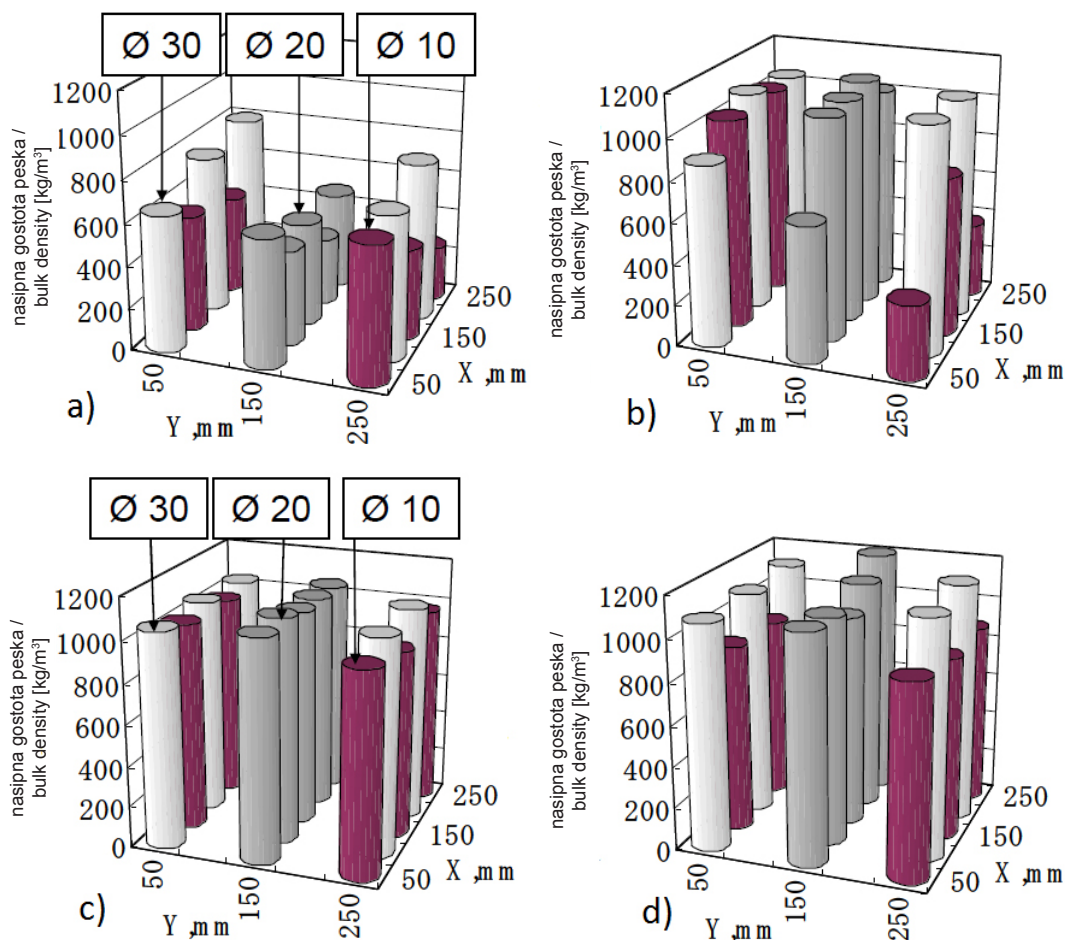
actual production moulding machine¹. The schematic illustration of production scale aeration sand filling / high pressure squeezing moulding machine is shown in Fig. 1. The Flask size is 700mm x 900mm x 300mm (height). The compactability of the green sand is 40%. The layout of the test pattern for sand filling experiment is shown in Fig. 2. Three different types of small pockets are placed on the pattern. The diameters of small pocket are 30, 20, and 10mm respectively. The depth of the small pockets is 50mm. Vents are installed at the bottom of each pocket. The position of the nozzle is shown with dotted lines. The nozzles are arranged along Y-axis.

The weights of the sand filled in each pocket with 3 different filling methods, i.e., gravitational free fall from a lower hopper, conventional high-pressure blowing, and low-pressure aeration, are measured and the bulk densities are calculated. Experimental results of sand filling for small pockets in cases of free fall, blow filling, and aeration filling (of 0.1 and 0.15 MPa) are shown in Figure 3.



Slika 2. Zasnova preskusne naprave za polnjenje s peskom

Figure 2. The layout of the test pattern for sand filling experiment



Slika 3. Eksperimentalni rezultati polnjenja majhnih žepov s peskom; a) prosti pad, b) pihanje: 0,3 MPa, c) zračenja 0,1 MPa, d) zračenje 0,15 MPa

Figure 3. Experimental results of sand filling for small pockets; a) free fall, b) blow: 0.3 MPa, c) aeration: 0.1 MPa, d) aeration: 0.15 MPa

Mase peska, ki je zapolnil vsak žep s tremi načini zapolnjevanja: s težnostnim prostim padanjem peska iz lijaka z zaporo, s standardnim visokotlačnim pihanjem in z nizkotlačnim zračenjem, smo merili ter nato izračunali gostote peska.

Eksperimentalne rezultate polnjenja majhnih žepov s peskom s prostim padom, pihanjem in zračenjem (z 0,1 in 0,15 MPa) kaže slika 3.

Regarding to the gravitational free falling by louver hopper shown in Fig.3-A), even in the case of the largest pocket of 30mm diameter, the average density achieved is 730 kg/m³, and the density becomes lower as the diameter becomes smaller.

Regarding to the high pressure blow filling shown in Fig. 3-B), the bulk densities are generally higher than those obtained with free falling from louver hopper, by the

Pri polnjenju s prostim težnostnim padanjem iz bunkerja z zasunom (Slika 3-A) je bila celo pri največjem žepu s premerom 30 mm dosežena povprečna gostota 730 kg/m^3 : gostota peska se je zmanjševala z zmanjševanjem premera žepa.

Pri polnjenju s pihanjem pri velikih tlakih (slika 3-B) je bila v splošnem gostota peska večja kot pri polnjenju s prostim padom iz bunkerja zaradi vpliva zračnega toka na delce peska. Gostote so bile večje pri večjih žepih. Pri žepu s premerom 30 mm so dosegle celo 1040 kg/m^3 . Vendar pa gostote v žepih premera 10 mm in 20 mm niso bile zadostne.

Pri polnjenju z nizkotlačnim zračenjem (sliki 3-C in 3-D) pa so bile dosežene gostote v splošnem kljub nižjemu tlaku kot pihanju višje kot pri pihanju. Razume se, da zmanjšanje odpora zaradi trenja v območju zračilnega filtra prispeva, da se dosežejo višje gostote. V primeru polnjenja z zračenjem namreč teče formarski pesek tekoče, ne da bi nastajali mostički.

Pri tlaku zračenja $0,1 \text{ MPa}$ (slika 3-C) je bila dosežena gostota v žepu premera 10 mm 950 kg/m^3 , v žepih premera 20 mm in 30 mm pa je presegla raven 1000 kg/m^3 .

Na drugi strani pa je bila pri zračilnem tlaku $0,15 \text{ MPa}$ (slika 3-D) dosežena gostota v žepu s premerom 10 mm 980 kg/m^3 , kar je manj kot pri zračilnem tlaku $0,1 \text{ MPa}$. To pomeni, da nastopajo energijske izgube pri visokotlačnem pihanju delcev svežega peska, ki imajo nasproten učinek pri polnjenju majhnega žepa. Pri naših eksperimentalnih razmerah je dal zračilni tlak $0,1 \text{ MPa}$ najboljše rezultate.

3. Računalniška simulacija polnjenja z zračenim peskom

Da bi analizirali obnašanje formarskega peska med formanjem smo pripravili

effect of airflow acting on sand particles. The bulk densities are higher in larger size of pocket. In the 30mm diameter pocket, the bulk density reaches as high as $1,040 \text{ kg/m}^3$. However, the bulk densities obtained in 10mm and 20mm diameter pockets are not sufficient.

Regarding to the low pressure aeration filling shown in Fig. 3-C) and D), although, the aeration pressure is much lower than blow filling, the obtained bulk density is generally higher than that of blow filling. It is considered that the decrease of friction resistance at the aeration filter area contributed to achieving higher bulk density. Namely, in the case of aeration filling, moulding sand flows smoothly without bridge-forming.

In the case of 0.1 MPa aeration pressure shown in Fig. 3-C), the bulk density of the 10mm diameter pocket reaches about 950 kg/m^3 , and that of 20 and 30mm diameter pockets exceed the level of $1,000 \text{ kg/m}^3$. On the other hand, in the case of 0.15 MPa aeration pressure shown in Fig. 3-D), the bulk density of the 10mm diameter pocket is about 980 kg/m^3 , which is lower than that of 0.1 MPa aeration pressure.

Therefore, high pressure blowing of green sand particles has an energy loss and an opposite effect for filling into the small pocket. In this experimental condition, the case of 0.1 MPa aeration pressure brings the best result.

3. Computer Simulation Aeration Sand Filling

In order to analyze the behaviour of moulding sand during moulding, a computer simulation is performed for aeration sand filling. In the mathematical model [3] for aeration filling processes, the Euler two-phase flow model has been taken as the

računalniško simulacijo zapolnjevanja forme z zračenim peskom. V matematičnem modelu polnjenja z zračenim peskom [3] se je uporabil Eulerjev dvofazni model toka kot osnova. V tem modelu sta plinska in trdna faza vzeti kot zvezni fazi, tj. vzeti sta bili kot tok zraka in tok peska.

V osnovnih enačbah matematičnega modela so bile enačbe kontinuuma in enačbe gibalne količine za plinsko ter trdno fazo obravnavane ločeno. Vzeto je bilo, da so vsi delci peska enaki in da sta njihovi značilnosti povprečni premer ter povprečna gostota. Za opis trkov med posameznimi delci se je uporabil značilni kinetičnoteoretični model večfaznega toka, ki ga je postavil Gidaspow [8]. Enačbe ravnovesja mas in gibalnih količin plinske ter trdne faze so se izračunale po metodi končnih razlik. V teh enačbah so odvisne spremenljivke delež prostornine plina, delež prostornine trdne faze, gostota plina, hitrostni vektorji toka plina in toka peska.

Enačba zveznosti plinske faze je:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g V_g) = 0, \quad (1)$$

enačba gibalne količine plinske faze:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g V_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g V_g V_g) = \beta(V_g - V_s) + \nabla \cdot \tau_g. \quad (2)$$

Težnostna sila zraka se zanemari, ker je zelo majhna v primerjavi z napetostjo zraka. Enačba zveznosti trdne faze je:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s V_s) = 0, \quad (3)$$

in enačba gibalne količine trdne faze:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s V_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s V_s V_s) = \beta(V_s - V_g) + \nabla \cdot \tau_s \quad (4)$$

kjer je α_g prostorninski delež plinske faze in α_s prostorninski delež trdne faze. Zato je $\alpha_g + \alpha_s = 1$. β je koeficient zračnega upora,

basis of design. In this model, both gas phase and solid phase have been assumed as continuum, i.e., they have been treated as air flow and sand flow respectively. In the governing equations of mathematical model, the continuity equations and momentum equations of gas phase and solid phase have been treated separately. All of the sand particles are considered to be identical and characterized by a mean diameter and a mean density. To describe the collision between different sand particles, a typical kinetic theory model for multiphase flow is built based on the Gidaspow [8]. The mass and momentum balance equations for the gas phase and solid phase are solved by FDM (Finite Difference Method). In these equations, the dependent variables are the gas volume fraction, the solid volume fraction, the gas density, the velocity vectors of the gas and sand flow.

Continuity equation of the gas phase:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g V_g) = 0, \quad (1)$$

momentum equation of the gas phase:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g V_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g V_g V_g) = \beta(V_g - V_s) + \nabla \cdot \tau_g \quad (2)$$

The gravity force of air is neglected because it is very small compared with the stress of air. Continuity equation of the solid phase:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s V_s) = 0, \quad (3)$$

momentum equation of the solid phase:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s V_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s V_s V_s) = \beta(V_s - V_g) + \nabla \cdot \tau_s \quad (4)$$

where, α_g is the volume fraction of gas phase, α_s is the volume fraction of solid phase, namely, $\alpha_g + \alpha_s = 1$. β is the drag coefficient, τ_g is the stress tensor of gas flow which is expressed by Sinclair's model [9],

τ_g napetostni tenzor plinskega toka, ki ga podaja Sinclairov model [9], τ_s napetostni tenzor trdne faze, ki ga podaja Millerjev model [10].

4. Stiskanje

Za simulacijo stiskanja se je uporabila trgovska računalniška oprema, ki sloni na metodi končnih elementov. Model nelinearnega elastičnega materiala se je uporabil za simulacijo stiskalnega formanja [4-5]. Sočasno obstajajo tri vrste nelinearnosti pri standardnem procesu stiskanja.

- 1) Mehanska odzivna nelinearnost: krivulje deformacija-napetost [4] smo dobili s poskusi s štirimi svežimi peski z različnimi gostotami. Kaže, da napetost narašča eksponentno z deformacijo in da se lahko pri procesu stiskanja dosežejo velike deformacije, 30-40%.
- 2) Strukturnanelinearnost: formarski pesek je sestavljen iz posameznih kremenovih zrn, pokritih s plastjo bentonit/voda, ter prazninami med njimi, zapolnjenimi z zrakom. Za takšen material sta kot notranjega trenja in kohezija dva glavna faktorja, ki se navadno uporabita kot značilnosti materiala. Če na ta material delujejo zunanje sile, se zrak iz praznin med delci iztisne. Zato je deformacija formarskega peska plastična.
- 3) Kontaktna nelinearnost: zunanje trenje, ki obstaja med peskom in okvirjem forme, močno vpliva na učinek zgoščevanja.

5 Razmere pri simulaciji

Naredili smo računalniško simulacijo in poskuse formanja brez okvirja. Slika 4-A kaže geometrijski model te študije.

τ_s is the stress tensor of solid phase which is expressed by Miller's model [10].

4. Squeeze

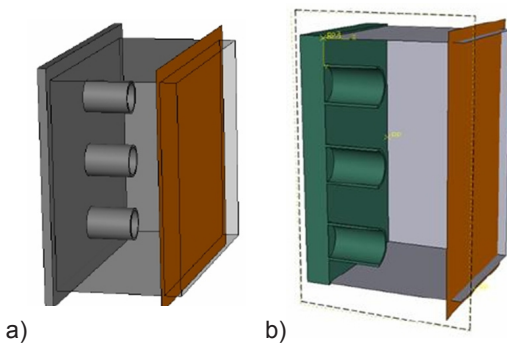
In the squeeze moulding simulation, commercial software, which is based on FEM (Finite Element Method), is applied. The nonlinear elastic material model is used for squeeze moulding simulation [4-5]. There are three types of nonlinearity existing simultaneously in a normal compaction process.

- 1) Mechanical response nonlinearity: The strain-stress curves [4] are obtained experimentally for four green sands with different density. It seems that the stress increases exponentially with strain, and a large deformation of 30%-40% can be obtained upon the completion of a compact process.
- 2) Structural nonlinearity: Moulding sand is composed of discrete silica sand grains covered with bentonite/water layer and air voids. For such material, the internal friction angle and cohesion are two major factors, which are usually used to represent the features of material. When subject to an external force, the air voids existing among moulding sand are squeezed out. Consequently, the deformation of mould sand is plastic.
- 3) Contact nonlinearity: External friction which exists between sand and flask influences the compaction effect significantly.

5 Simulation Condition

Computer simulation and experiment are performed for flask-less moulding process. Figure 4-A) shows geometrical model for the present study. The dimension of the

Dimenzije okvirja so bile 608 mm x 510 mm x 260 mm. Modelna plošča je imela tri rokave z notranjim premerom 70 mm in višino 110 mm. Na dnu rokavov so bili zračilni kanali. Smer toka peska je bila skoraj navpična na odprtino rokava. Glede na simetričnost modela se je samo ena polovica forme uporabila, da se skrajša čas računanja in zmanjša velikost pomnilnika. Slika 4-B kaže simetrično polovico za simulacijo.



Slika 4. Geometrijski model procesa stiskanja, a) integriran geometrijski model, b) simetrična polovica

Figure 4. Geometrical model of squeezing process; a) Integrated geometrical model b) Symmetrical half part

6 Rezultati simulacije

Rezultate simulacije in eksperimentalne rezultate zapolnjevanja forme z zračenim peskom prikazuje slika 5. V našem primeru je bilo zelo težko popolnoma zapolniti vodoravni rokav. Vendar formarski pesek teče tekoče v tri rokave zaradi učinka nizkotlačnega zračenja. Izračunano obnašanje je zelo podobno eksperimentalnemu.

Pred simulacijo stiskanja je treba rezultate simulacije zapolnjevanja forme z zračenim peskom prenesti v geometrijski model stiskanja, kar se lahko razdeli na 5 delov glede na gostoto. Po tem se lahko

flask is 608mm×510mm×260mm. Pattern plate has three sleeves with inner diameter of 70mm and height of 110 mm.

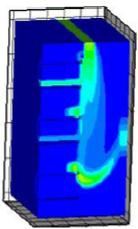
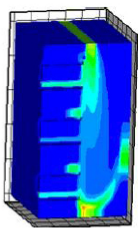
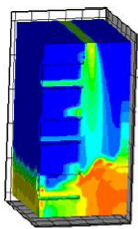
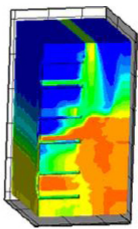
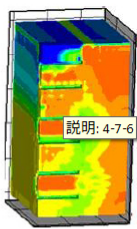
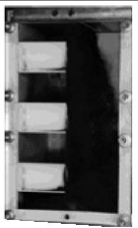
There are vents at the bottom of the sleeve. The direction of sand flow is nearly perpendicular to the opening of the sleeve. For the symmetrical feature of the model, only one half of the mould is calculated to decrease calculation time and memory size. Figure 4-B) shows a symmetrical half part for simulation.

6 Simulation Results

The simulation and experimental results for aeration sand filling is shown in Fig. 5. In this case, it is quite difficult to fill the horizontal sleeve completely. However, moulding sand flows smoothly into the three sleeves by the effect of low pressure aeration. The calculated behaviour is very similar to experimental one.

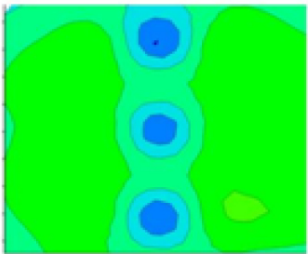
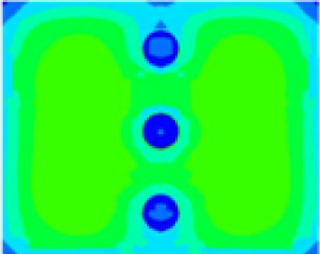
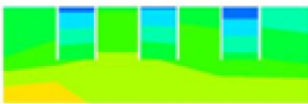
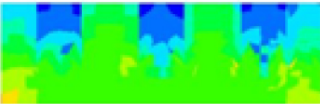
Before squeeze simulation, the simulation results of aeration sand filling should be transferred to squeezing geometrical model which can be divided into 5 parts according to bulk density. After that, the squeeze simulation can be done with Finite Element Method. The simulation results of squeeze are converted according to the relationship between calculated stress field and mould strength field [4].

Figure 6 shows the simulation and experimental mould strength distribution after squeezing. The experimental results are measured using actual production scale flask-less moulding machine. The simulation results are very similar to the experimental one. However, the experimental value at the corner is higher than the simulation one because the actual flask has tapered corner.

simulacija / simulation					
eksperiment / experiment					
čas / time	0.05s	0.15s	0.25s	0.45s	0.80s

Slika 5. Rezultati simulacije in poskusov zapolnjevanja forme z zračenim peskom

Figure 5. Simulation and experimental results for aeration sand filling process

	eksperimentalni rezultati / experimental result	rezultati simulacije / simulation result
delilna ploskev / parting plane		
prerez / cross section		

Slika 6. Simulacijska in eksperimentalna porazdelitev trdnosti po stiskanju

Figure 6. Simulation and experimental strength distribution after squeezing

simulacija stiskanja naredi po metodi končnih elementov. Rezultati simulacije stiskanja se lahko pretvorijo v skladu z odnosom med izračunanim napetostnim poljem in trdnostnim poljem forme [4].

7 Analyze of Sand Filling with Sand Detection Sensor [11]

It is essential to know sand filling behaviour and bulk density after sand filling. Generally,

Slika 6 prikazuje simulacijsko in eksperimentalno porazdelitev trdnosti forme po stiskanju. Eksperimentalni rezultati so bili merjeni med industrijskim procesom formanja. Simulacijski rezultati so zelo podobni eksperimentalnim. Vendar so dobljene eksperimentalne vrednosti v vogalih večje od simulacijskih, ker ima dejanski formarski okvir vogale z naklonom.

7 Analiza zapolnjevanja s peskom z zaznavalom za zaznavanje peska [11]

Zelo pomembno je poznati obnašanje peska pri zapolnjevanju forme ter njegovo gostoto po zapolnjevanju. V splošnem ni možno meriti gostote peska v formi med zapolnjevanjem. Zato smo razvili zaznavalo za pesek, da bi lahko ugotavljali obnašanje peska med zapolnjevanjem.

8 Zaznavalo za zaznavanje peska med zapolnjevanjem

Namen razvitega zaznavala za zaznavanje peska je bil vedeti, kdaj surovi pesek doseže modelno ploščo, posebno pri globokem žepu. Standardna tehnologija za zaznavanje peska meri tlak stika peska. Obnašanje surovega peska med stiskanjem se je ugotavljalo z zaznavalom, ki so ga razvili J. Bast in sodelavci [12]. Tlak ob stiku peska med zapolnjevanjem forme z zračnim peskom je namreč premajhen, da bi ugotovili njegov tlak s tem zaznavalom. Poleg tega zaznavalo tlaka ne meri samo tlak ob stiku peska, ampak tudi zračni tlak. Pred kratkim je bilo razvito novo zaznavalo za zaznavanje peska na osnovi električne tehnologije, s katerim je mogoče ugotavljati stik peska pri zapolnjevanju forme z zračnim peskom.

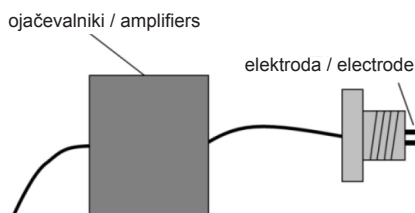
Slika 7 shematično prikazuje razvito zaznavalo za pesek, ki je sestavljeno iz

it is impossible to measure the bulk density inside mould during sand filling. Therefore, a sand sensor has been developed in order to detect the sand filling behaviour.

8 Sand Detection Sensor for Sand Filling

Purpose of developing sand detection sensor is to know when green sand arrives at pattern plate, especially, in the deep pocket. A conventional technology for sand detection is measuring sand contact pressure. The green sand behaviour during squeeze has been evaluated by a sensor developed by J. Bast et al. [12]. However, the sand contact pressure during aeration sand filling is too weak to detect the pressure with this sensor. Furthermore, the pressure sensor measures not only sand contact pressure but also air pressure. Recently, a new sand detection sensor has been developed by electrical technology to detect sand contacting during aeration sand filling.

Figure 7 shows schematic illustration of developed sand detection sensor which consists of electrodes and amplifiers. When sand particles enter between electrodes, the electric circuit is closed. The voltage is amplified because the conductivity of the green sand is extremely low.



Slika 7. Shematičen prikaz razvitega zaznavala za zaznavanje peska

Figure 7. Schematic illustration of developed sand detection sensor

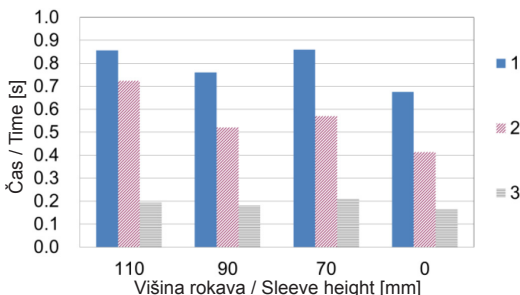
elektrod in ojačevalnikov. Ko zrno peska pride med elektrodi, se električni tokokrog zapre. Napetost se ojači, ker je prevodnost surovega peska izredno majhna.

9 Eksperimentalne razmere

Razvito zaznavalo se je preverjalo na dejanskem formarskem stroju. Velikost okvirja je bila 508 mm x 610 mm. Uporabili smo ploščat model in model rokava za vrednotenje obnašanja peska pri zapolnjevanju. Model rokava je imel v sredini tri rokave. Notranji premer rokavov je bil 70 mm, višine pa 70, 90 in 110 mm. Model rokava je shematično prikazan na sliki 8. Zračilni tlak med zapolnjevanjem s peskom je bil 0,1 MPa. Stisljivost surovega peska je bila nastavljena na 35 %.

10 Eksperimentalni rezultati

Slika 9 daje primerjavo časov, ko pesek pride na dno vsakega, različno visokega rokava. Višine rokavov so bile 110, 90 in 70 mm. Višina rokava 0 mm na sliki 9 pomeni, da je bil uporabljen ploščat model pri poskusu zapolnjevanja s peskom.

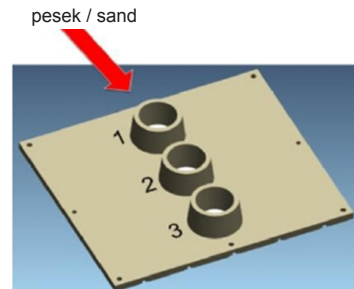


Slika 9. Primerjava časov, ko pride pesek na dno rokava, v odvisnosti od višine

Figure 9. Comparison of sand arrival times at the bottom of sleeves in each sleeve height

9 Experimental conditions

Actual production scale moulding machine is used to verify this developed sensor. The flask size is 508 x 610 mm. Flat pattern and sleeve pattern are used to evaluate the sand filling behaviour. The sleeve pattern has three sleeves along the center. Inner diameter of sleeve is 70 mm. Heights of sleeve are 70, 90 and 110 mm. Schematic illustration of sleeve pattern is shown in Fig. 8. Aeration pressure during sand filling is 0.1 MPa. The green sand is adjusted to 35 % compactability.



Slika 8. Shematični prikaz preskusnega modela s tremi rokavi

Figure 8. Schematic illustration of test pattern with sleeves

10 Experimental Results

Figure 9 shows comparison of sand arrival times at the bottom of sleeves in each sleeve height. Sleeve heights are 110, 90 and 70mm. Sleeve height 0 mm in Fig. 9 means that flat pattern is used for sand filling experiment. The sand filling behavior observed by video camera is shown in Fig.5. The sand arrival times at the bottom of lower sleeve (No.3) are about 0.2 s. in all conditions. Then, the green sand arrives at the bottom of middle sleeve (No. 2) between 0.4 and 0.7 s. Finally, the sand filling is finished less than 1.0 s. in all conditions.

Obnašanje peska med zapolnjevanjem smo zasledovali z video kamero, kar je prikazano na sliki 5. Čas, da je prišel pesek na dno nižjega rokava (št. 3) je bil pri vseh razmerah 0,2 s. Na dno srednjega rokava (št. 2) je pesek prispel v 0,4 s do 0,7 s. V vseh primerih je bilo zapolnjevanje s peskom končano v manj kot 1,0 s. Zato na obnašanje zračenega peska oblika modela ne vpliva veliko. Surovi pesek namreč teče zelo tekoče pri zapolnjevanju z zračenim peskom.

11 Sklepi

Tehnologijo zapolnjevanja forme z zračenim peskom smo vrednotili pri formanju s surovim peskom z vidika, kako pesek zapolnjuje formo. Prišli smo do naslednjih ugotovitev:

- 1) Proces zapolnjevanja z zračenim peskom smo matematično numerično simulirali na osnovi teorije dvofaznega toka v kombinaciji s kinetično teorijo. Rezultati simulacije so se ujemali z eksperimentalnimi rezultati. Proces zaključnega stiskanja smo računali z metodo končnih elementov. Tudi trdnost forme smo numerično simulirali in rezultate simulacije primerjali z eksperimentalnimi rezultati. S poskusi in simulacijo smo ugotovili, da je zapolnjevanje forme z zračenim peskom učinkovito za majhne žepe in omogoča doseči veliko trdnost forme ter enakomerno gostoto peska, poleg tega pa še manjšo porabo zraka.
- 2) Zaznavalo za zaznavanje peska, razvito na osnovi električne tehnologije, lahko vrednoti obnašanje peska pri zapolnjevanju. Na obnašanje zračenega peska pri zapolnjevanju forme oblika modela ne vpliva veliko. Surovi pesek namreč teče tekoče pri nizkotlačnem zračenju.

Therefore, the behaviour of aeration sand filling is not much affected by pattern shape. Namely, the green sand flows very smoothly by aeration sand filling.

11 Conclusion

Aeration sand filling technology in green sand moulding process is evaluated from the view of sand filling process. The results are summarized as follows.

- 1) Aeration sand filling is numerically simulated with the two-phase flow theory and the mathematical model is built with kinetic theory. The calculated behaviour of aeration sand filling is in agreement with the experimental results. The final squeeze compaction process is calculated with Finite Element Method. The mould strength can be numerically simulated. The results of simulation are compared with the experimental results. Through these experiment and simulation, aeration sand filling is effective for small pocket and can make high strength and uniform density mould by lower air consumption.
- 2) The sand detection sensor, which is developed using electrical technology, can evaluate sand filling behaviour. The behaviour of aeration sand filling is not much affected by pattern shape. Namely, the green sand flows very smoothly by low pressure aeration.

12 Acknowledgment

The authors gratefully acknowledge to Prof. WU Junjiao at Tsinghua University, China for computer simulation of sand moulding. They also gratefully acknowledge Dr. Hartmut Polzin and Dr. Matthias Strehle at TU Bergakademie Freiberg, Germany for developing sand detection sensor.

12 Zahvala

Avtorji se zahvaljujejo prof. WU Junjiao z Tsinghua univerze, Kitajska, za računalniško simulacijo formanja s peskom ter dr. Hartmutu Polzinu in dr. Matthiasu Strehleju, TU Bergakademie Freiberg, Nemčija, za razvitje zaznavala za zaznavanje peska.

13 Viri / References

- 1) M. Hirata, H. Makino, and Y. Hadano, „Green Sand Filling Using Aeration“ Journal of Japan Foundrymen's Society, vol. 73 (2001) pp436-440
- 2) H. Makino, Y. Maeda, and H. Nomura, „Force Analysis in Air-Flow Press Moulding using the Distinct Element Method“ International Journal of Cast Metals Research, vol 10, (1997) pp171-175
- 3) J. Wu ,H. Li, W. Li, H. Makino, T. Hanai and M. Hirata, „Computer Simulation of Sand Molding Using Blow Filling and Aeration Filling“ AFS Trans. 112 (2006) pp419-427
- 4) H. Li, J. Wu, T. Huang and H. Makino, „A new numerical simulation model for high pressure squeezing molding“ Asia Foundry Congress, China (2011) pp25-29
- 5) C. Ni, Q. Zhang, T. Jing, J. Wu and H. Makino, „3D Numerical Simulation of Aeration Sand Filling-High Pressure Squeeze Molding Method“ 71th World Foundry Congress, Spain (2014)
- 6) S. N. Ramrattan, A. M. Paudel, H. Makino and M. Hirata, „Desirable Green Sand Properties via Aeration Sand Filling,“ AFS Transactions, Paper 08-128 (2008) pp493-503
- 7) S. Ramrattan, H. Makino, M. Hirata, S. Takasu, and H. Miyazaki „A Rational for Determining the Benefit of Aeration Green Sands Filling“ 71th World Foundry Congress, Spain (2014)
- 8) D. Gidaspow : Multiphase flow and fluidization (Academic Press, Inc.) (1994)
- 9) J. L. Sinclair and R. Jackson : AIChE J. 35 (1989) 9, 1473
- 10) A. Miller and D. Gidaspow : AIChE J. 38 (1992) 11, 1801
- 11) M . Strehle, H. Polzinand, H. Makino, Sensor for the Detection of Sand-Filling-Process in Aeration Molding Machines“ 71th World Foundry Congress, Spain (2014)
- 12) J. Bast, A. Malashkin and T. Hahm, „Optimizing Molding Parameters for Green Sand Compaction“, AFS Transactions, Paper 05-008 (2005) pp309-318

Fazna ravnotežja v aluminijevih livarskih zlitinah v odvisnosti od vsebnosti Si in Fe

Phase Equilibrium in Aluminium Cast Alloys Depending on Si and Fe Content

POVZETEK

Železo v aluminijevih zlitinah predstavlja glavno nečistočo. V nekaterih zlitinah predstavlja železo glavni legirni element, ki poveča trdoto zlitin, a tudi povečuje krhkost. V tem delu smo preiskovali fazna ravnotežja v Al-Si livarskih zlitinah in vpliv razmerja železa in silicija (Fe/Si). Preiskovali smo tako, da smo uvajali železno žico v talino, ki je bila izdelana iz elektroliznega aluminija in zlitine AlSi12Cu(Fe) pri temperaturi 750°C in pri različnih časih raztapljanja. Za ugotavljanje značilnih temperatur procesa taljenja in strjevanja ter sproščanja toplote pri tem smo uporabili metodo simultane termične analize (STA). Z uporabo Thermo-Calc programa smo izvedli termodinamično simulacijo napovedovanja faznega ravnotežja nastalih faz železa. S programom Thermo-Calc smo izvedli tudi vrednotenje eksperimentalnih podatkov in izračunali fazne diagrame pri različnih razmerjih železa in silicija (Fe/Si).

Ključne besede: aluminijeve zlitine, termodinamika, železove faze, termična analiza

ABSTRACT

Iron in aluminium alloys presents the main impurity. At some alloys the iron presents the main alloying element, which increases the hardness of the alloys, but also increases brittleness. In this work the phase equilibrium in Al-Si cast alloys and influence of Fe/Si was investigated. Phase equilibrium was researched with the putting iron wire into the melt of electrolytic aluminium and AlSi12Cu(Fe) alloy at temperature 750°C and different dissolving times. For identifying the characteristic temperatures of the solidification and melting process with the precipitation heats was used simultaneous thermal analysis (STA). Thermodynamic modeling simulation with Thermo-Calc program was tool to predict phase equilibrium of precipitated iron phases. Evaluation of the experimental data with Thermo-Calc program were calculated phase diagrams at different Fe/Si ratio.

Key words: phase equilibrium, aluminium alloys, thermodynamics, iron phases, thermal analysis

1 Uvod

Namen naše preiskave je bil ugotoviti fazna ravnotežja v aluminijevih livarskih zlitinah v odvisnosti od vsebnosti silicija in železa. Izvedli smo preiskavo raztapljanja železove žičke v elektroliznem aluminiju in v livarski

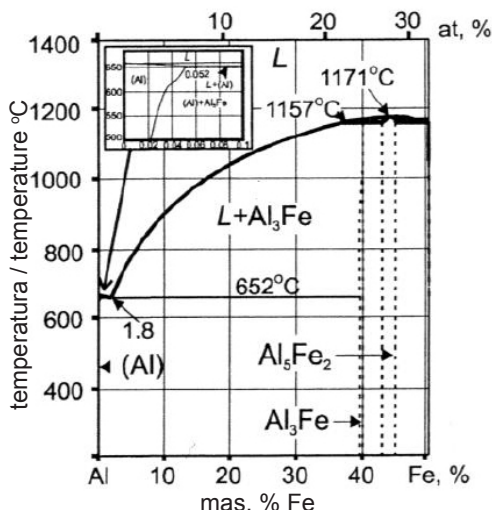
1 Introduction

The goal of our research was to determine phase equilibria in aluminium casting alloys as a function of silicon and iron contents. The applied research method was dissolution of iron wire in the melt of

zlitini AlSi12Cu(Fe), ki je vsebovala 0,8 % Fe. Preiskovo smo izvedli v elektro-uporobni peči pri temperaturi 750°C in časih raztapljanja 0, 15 in 30 minut. Opravili smo simultano termično analizo (STA) in s programom Thermo-Calc določili fazna ravnotežja.

2 Fazna ravnotežja pri strjevanju aluminijevih zlitin

Za študij faznih ravnotežij pri strjevanju aluminijevih zlitin se uporabljata ravnotežni fazni diagram Al-Fe in ternarni sistem Al-Fe-Si. Aluminijev kot v diagramu Al-Fe prikazuje slika 1. Topnost železa v trdnem aluminiju je pri temperaturi 652 °C zelo majhna in znaša 0,04 mas. %. Pri koncentracijah železa, ki so večje kot 10 mas.% in pri temperaturi 1158°C poteka v sistemu Al-Fe peritektična reakcija $L + Al_5Fe_2 \rightarrow Al_3Fe$. Pri tej reakciji nastane intermetalna spojina Al_3Fe , ki vsebuje 40,7 mas.% Fe. Ta faza je krhka in nezaželena.1



Slika 1. Aluminijev kot faznega diagrama Al-Fe [1]

Figure 1. Aluminium corner of the Al-Fe phase diagram [1]

electrolytic aluminium and AlSi12Cu(Fe) alloy containing 0.8 % Fe. Experiments took place in electric resistance furnace at 750 °C. Applied dissolution times were 0, 15, and 30 min. Simultaneous thermal analysis (STA) with Thermo-Calc programme was used to determine the phase equilibria.

2 Phase equilibria in solidification of aluminium alloys

Binary Al-Fe and ternary Al-Fe-Si phase diagrams were applied for studying phase equilibria in the solidification of aluminium alloys. Aluminium corner of the Al-Fe diagram is presented in Figure 1. Iron solubility in solid aluminium is very low at 652 °C, it is only 0,04 % (mass fraction).

At iron contents higher than 10 % and at 1158 °C $L + Al_5Fe_2 \rightarrow Al_3Fe$ peritectic reaction takes place resulting the formation of intermetallic Al_3Fe compound with 40.7 % Fe. This phase is brittle and not desired.

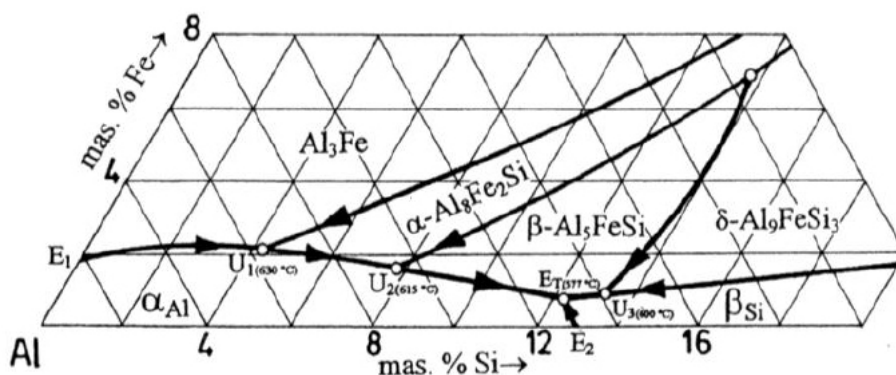
In the Al-Si casting alloys there are in presence of iron formed various equilibria and numerous phases as presented in the aluminium corner of the ternary Al-Fe-Si diagram in Figure 2.

Based on chemical composition and solidification conditions intermetallic compounds can appear already as primarily precipitated phases in the Al-Si casting alloys. Table 1 presents the intermetallic compounds with corresponding compositions that most often appear in the Al-Si casting alloys with iron.

3 Experimental

Phase equilibria were investigated with samples of electrolytic aluminium and

AlSi12Cu(Fe) casting alloy. Chemical compositions of the electrolytic aluminium and the AlSi12Cu(Fe) alloy are given in Table 2.



Slika 2. Aluminijev kot ternernega sistema Al-Fe-Si [2]

Figure 2. Aluminium corner of the ternary Al-Fe-Si diagram [2]

V Al-Si livnih zlitinah ob prisotnost železa nastanejo fazna ravnotežja in se tvorijo številne faze, ki jih prikazuje tudi aluminijev kot v ternernem faznem diagramu sistema Al-Fe-Si na sliki 2.

Samples of electrolytic aluminium and AlSi12Cu(Fe) casting alloy were melted in electrical resistance furnace with graphite crucible. Iron wire was inserted into crucible centre (Figure 3) at 750 °C and held there for 0, 15, and 30 min.

Tabela 1. Intermetalne spojine v Al-Si zlitinah z železom [3]

Table 1. Intermetallic compounds in the Al-Si alloys with iron [3]

Faza / Phase	Kemijska sestava / Chemical composition (mass fraction %)
$\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ (Al_3Fe)	Fe: 33,9-37,8; Si: 0,8-2,9
Al_6Fe	Fe: 25,6-28,0
$\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$	Fe: 23,5-30,0; Si: 12,0-18,9
$\beta\text{-Al}_{4,5}\text{FeSi}$ ($\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$)	Fe: 27,0-28,0; Si: 14,0-15,0
$\gamma\text{-Al}_3\text{FeSi}$	Fe: 33,0-38,0; Si: 13,0-18,5
$\delta\text{-Al}_9\text{FeSi}_3$	Fe: 15,0-25,4; Si: 20,0-25,5
$\alpha\text{-Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$	Fe: 28,2-31,6; Si: 7,9-10,5
$\text{Al}_9\text{Fe}_{0,84}\text{Mn}_{2,16}\text{Si}$	Fe: 10,7; Si: 6,44; Mn: 27,2
$\pi\text{-Al}_8\text{Si}_8\text{Mg}_3\text{Fe}$	Fe: 8,0; Si: 25,0-33,8; Mg: 13,0-16,0
$\alpha\text{-Al}_{12-15}(\text{Fe,Mn,Me})_3\text{Si}_{1,2}$, Me=(Cr,Cu)	Fe: 8,6-30,7; Si: 4,5-12,5; Mn: 0,52-14,0; Cu: up to 7,5; Cr: do 14,4
$\alpha\text{-Al}_{12-25}(\text{Fe,Me})_{2,3}\text{Si}_{2,4}$, Me=(Mn,Cr,Cu,Co,Ni)	Fe: 6,3-25,2; Si: 4,6-10,0; Mn: do 13,1; Cu: up to 13,0; Cr: up to 14,4; Co: up to 20,1; Ni: up to 26,8
$\text{Al}_{19}\text{Fe}_4\text{MnSi}_2$	Fe: 19,2; Si: 8,3; Mn: 7,8; Cu: 2,5; Cr: 0,2

Tabela 2. Kemijska sestava preiskovanih vzorcev v mas. %

Table 2. Chemical compositions of investigated samples in % (mass fraction)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Al
Elektrolizni Al	0,041	0,1497	<0,0008	<0,0001	0,0011	0,0098	ostalo
AlSi12Cu(Fe).	11,5584	0,8292	0,7159	0,1915	0,0546	0,4673	ostalo

Glede na kemijsko sestavo in pogoje strjevanja lahko v livarskih Al-Si zlitinah z železom pričakujemo intermetalne spojine že kot primarno izločene faze. Tabela 1 prikazuje intermetalne spojine s kemijskimi sestavami, ki se najpogosteje pojavljajo v Al-Si livnih zlitinah z železom.

3 Eksperimentalni del

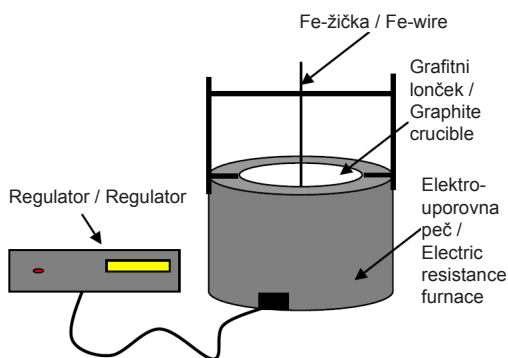
Fazna ravnotežja smo preiskovali v vzorcih iz elektroliznega aluminija in iz livarske zlitine AlSi12Cu(Fe). Kemijska sestava elektroliznega aluminija in livarske zlitine AlSi12Cu(Fe) je prikazana v tabeli 2.

Vzorci elektroliznega aluminija in livarske zlitine AlSi12Cu(Fe) smo stalili v elektro- uporovni peči z grafitnim lončkom. Pri temperaturi taline 750 °C smo na sredino lončka (slika 3) vstavili železno žičko in jo v njej držali 0, 15 in 30 minut.

Ohlajene vzorce smo vzdolžno razrezali ob Fe-žički. Analizirali smo vsebnost železa v aluminiju in livarski zlitini AlSi12Cu(Fe) v oddaljenosti 1 do 9 mm od žičke. Rezultate so zbrali v diagramu vsebnost Fe v odvisnosti od oddaljenosti od žičke. Z računalniško simulacijo Thermo-Calc smo določili fazna ravnotežja v livarski zlitini AlSi12Cu(Fe) z 0,8 % Fe. Vzorce livarske zlitine AlSi12Cu(Fe) smo preiskali tudi s simultano termično analizo (STA) na aparaturi STA 449 firme NETZSCH. Vzorce smo segreli do temperature 720 °C s hitrostjo 10 K/min v zaščitni atmosferi argona in jih nato z isto hitrostjo ohladili do sobne temperature.

4 Rezultati in diskusija

Na sliki 4 so rezultati koncentracijskega diagrama raztapljanja železa v odvisnosti od oddaljenosti od Fe-žičke pri temperaturi



Slika 3. Skica naprave

Figure 3. Scheme of apparatus

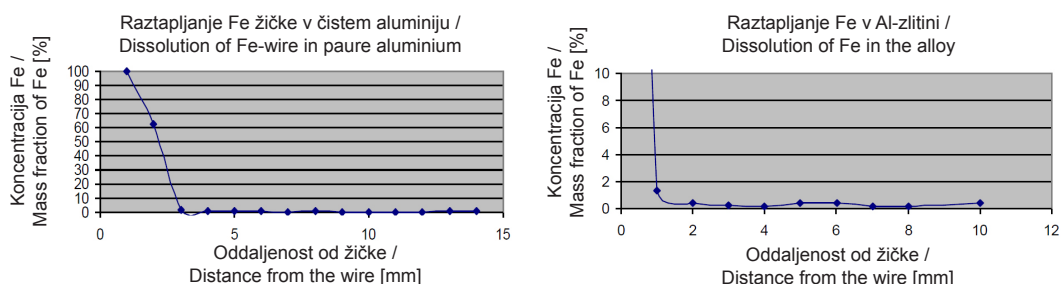
Cooled samples were cut longitudinally along the Fe wire. Iron contents in aluminium and AlSi12Cu(Fe) alloy were analysed at distances 1 to 9 mm. Results are collected in the diagram iron content - distance from iron wire.

Thermo-Calc computer simulation was applied to determine phase equilibria in the AlSi12Cu(Fe) casting alloy with 0.8 % Fe. Samples of the AlSi12Cu(Fe) alloy were investigated also with the simultaneous thermal analysis (STA) using STA 449 apparatus of Netzsch company. Samples were heated to 720 °C with heating rate 10 K/min in protective atmosphere of argon and then they were cooled with the same rate to room temperature.

4 Results and Discussion

Figure 4 presents results of content measurements at distances 3 mm and 9 mm from the wire during the iron dissolution for 30 min at 750 °C. Iron content drop was observed in the electrolytic aluminium as well as in the AlSi12Cu(Fe) casting alloy.

Phase equilibrium was predicted applying Thermo-Calc thermodynamic simulation programme. Phase equilibria in the AlSi12Cu(Fe) alloy were determined



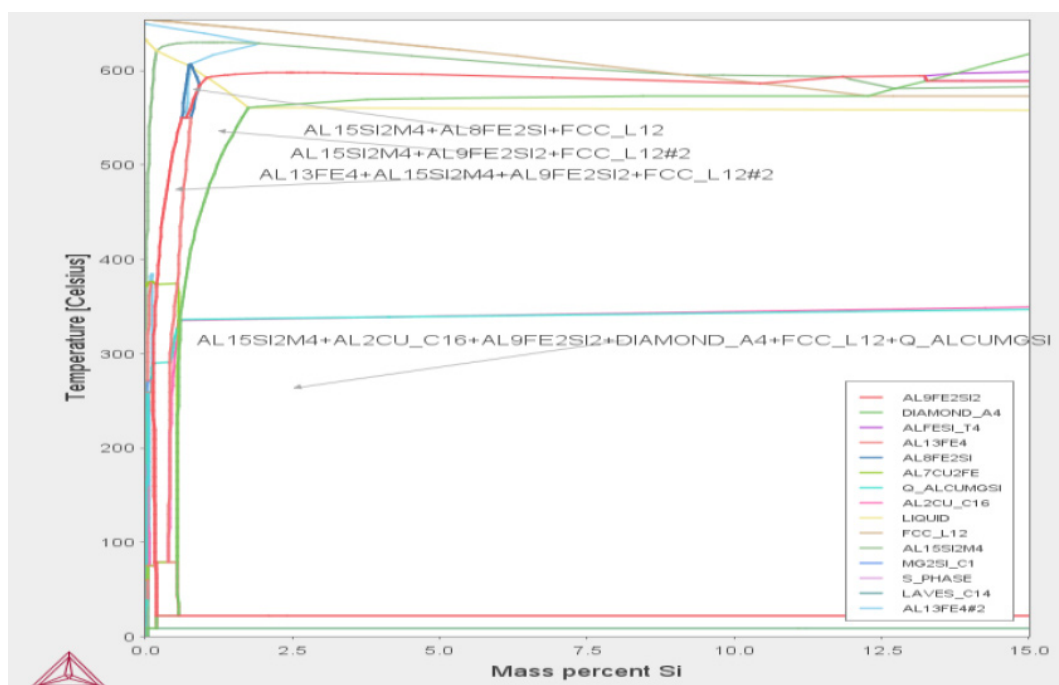
Slika 4. Koncentracijski diagram raztapljanja Fe-žičke pri 750 °C in času 30 min v čistem aluminiju in livarski zlitini AlSi12Cu(Fe) na oddaljenosti 3 in 9 mm od žičke

Figure 4. Content diagram of Fe wire dissolution for 30 min at 750 °C in pure aluminium and in the AlSi12Cu(Fe) alloy at distances 3 and 9 mm from the wire

750 °C in času raztapljanja 30 min na oddaljenosti 3 mm in 9 mm. Viden je padec koncentracije Fe tako za čisti aluminij, kot tudi za livarsko zlitino AlSi12Cu(Fe).

Z uporabo Thermo-Calc programa smo izvedli termodinamično simulacijo

and isopleth phase diagram was plotted. It is presented in Figure 5. The diagram shows the presence of $Al_{13}Fe_4(Al_3Fe)$ iron phase and the presence of Al_8Fe_2Si , $Al_9Fe_2Si_2$, $Al_{15}Si_2M_4$ and Al_2Cu phases. All these phases were formed in the content



Slika 5. Izopletni diagram faznih ravnotežij v livarski zlitini AlSi12Cu(Fe)

Figure 5. Isopleth diagram of phase equilibria in the AlSi12Cu(Fe) casting alloy

napovedovanja faznega ravnotežja. Določili smo fazna ravnotežja v zlitini AlSi12Cu(Fe) ter izrisali izopletni fazni diagram, ki je na sliki 5. Iz diagrama je razvidno, da so prisotne železove faze $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ (Al_3Fe) in faze v obliki $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$, $\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$, $\text{Al}_{15}\text{Si}_2\text{M}_4$ in Al_2Cu faza. Vse faze so nastale v koncentracijskem območju do 2,5% Si in razmerja železa in silicija (Fe/Si)=0,33.

Za vzorce livarske zlitine AlSi12Cu(Fe) smo opravili tudi simultano termično analizo. Slika 6 prikazuje primerjavo segrevalnih krivulj livarske zlitine AlSi12Cu(Fe) in toplot, ki se pri taljenju porabljajo. Pri daljšem času držanja Fe-žičke pri 750 °C, so nižje likvidus temperature, višje pa so temperature taljenja evtektika. To je bila posledica povečanja deleža železa v zlitini (0 min - rdeča; 15 min - zelena; 30 min - modra).

Temperature začetka taljenja, taljenja evtektika in njihove toplote so v tabeli 3.

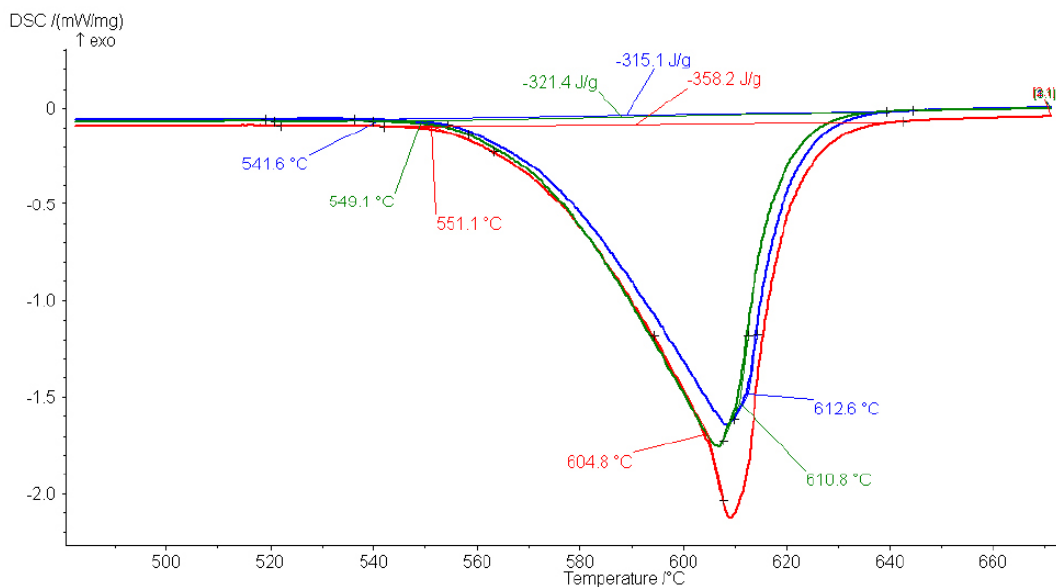
Slika 7 prikazuje primerjavo ohlajevalnih krivulj v livarski zlitini AlSi12Cu(Fe). Iz krivulj lahko opazimo, da so temperature

interval up to 2.5 % Si and at iron/silicon ratio (Fe/Si) = 0.33.

Samples of the AlSi12Cu(Fe) casting alloy were analysed also with the simultaneous thermal analysis. Figure 6 gives comparison of heating curves of the alloy and of heats consumed in melting the alloys. After longer times of holding iron wire in the melt at 750 °C lower liquidus temperatures and higher temperatures of melting of eutectic were obtained. This was consequence of higher iron content in the alloy (0 min - red, 15 min - green, 30 min blue).

Temperatures of the beginning of the alloy melting, of melting of eutectic, and the consumed heats are presented in Table 3.

Figure 7 presents comparison of the cooling curves of the AlSi12Cu(Fe) casting alloy. Curves indicate that the temperatures of the beginning of primary solidification and of solidification of eutectic are similar. With longer holding times of iron wire in the melt at 750 °C liberated heat in solidification was



Slika 6. Primerjava segrevalnih krivulj v livarski zlitini AlSi12Cu(Fe)

Figure 6. Comparison of heating curves of the AlSi12Cu(Fe) casting alloy

Tabela 3. Temperature začetka taljenja in toplote pri taljenju livarske zlitine**Table 3.** Temperatures of the beginning of the AlSi12Cu(Fe) casting alloy melting and the consumed heats

	0 min	15 min	30 min
Začetek taljenja / Beginning of melting	551,1 °C	549,1 °C	541,6 °C
Taljenje evtektika / Melting of eutectic	604,8 °C	610,8 °C	612,6 °C
Porabljena toplota / Consumed heat	-358,2 J/g	-321,4 J/g	-315,1 J/g

začetka primarnega strjevanja in strjevanja evtektika podobne. Z daljšim časom držanja Fe-žičke v talini na temperaturi 750°C se je sprostilo manj toplote pri strjevanju. Tabela 4 prikazuje temperature primarnega strjevanja, strjevanja evtektika in toplot, ki se pri strjevanju sprostile za livarsko zlitino AlSi12Cu(Fe).

4 Zaključki

Namen naše preiskave je bil ugotoviti fazna ravnotežja v aluminijevih livarskih zlitinah v odvisnosti od vsebnosti silicija in železa.

reduced. Table 4 presents temperatures of primary solidification, solidification of eutectic and liberated solidification heats for the AlSi12Cu(Fe) casting alloy.

4 Conclusions

The goal of research was to determine phase equilibria in aluminium casting alloys depending on the silicon and iron contents. The following conclusions can be made:

1. $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ (Al_3Fe) phase and phases in form of $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$, $\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$, $\text{Al}_{15}\text{Si}_2\text{M}_4$ next to Al_2Cu phase are present. Formation

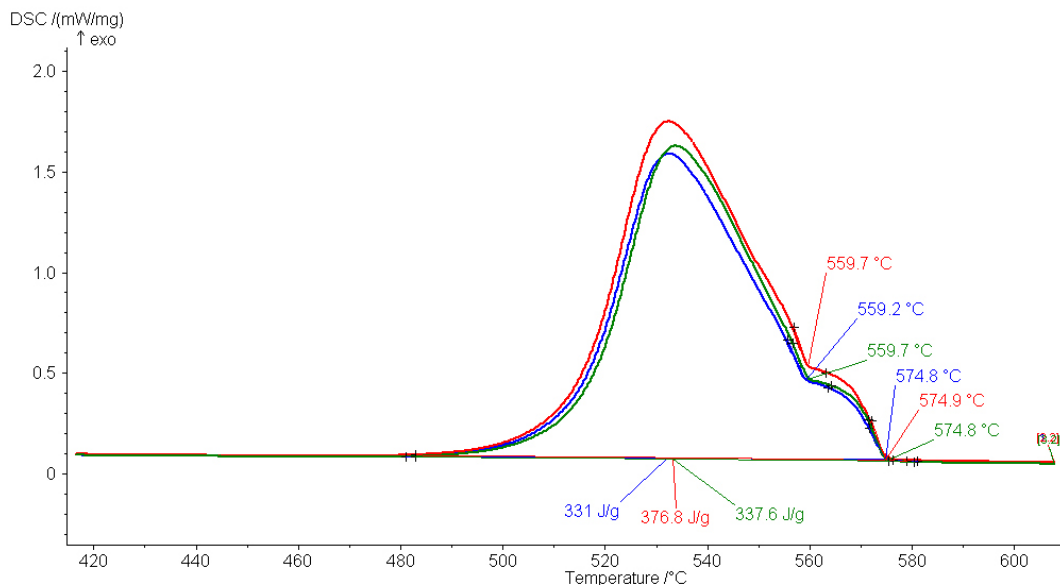
**Slika 7.** Primerjava ohlajevalnih krivulj v livarski zlitini AlSi12Cu(Fe)**Figure 7.** Comparison of cooling curves of the AlSi12Cu(Fe) casting alloy

Tabela 4. Temperature začetka strjevanja in strjevanja evtektika ter sproščene toplote livarske zlitine AlSi12Cu(Fe)

Table 4. Temperatures of the beginning of solidification of the alloy, solidification of eutectic, and liberated heats of the AlSi12Cu(Fe) casting alloy

	0 min	15 min	30 min
Začetek strjevanja / Beginning of solidification	574,9 °C	574,8 °C	574,8 °C
Taljenje evtektika / Solidification of eutectic	559,7 °C	559,7 °C	559,2°C
Sproščena toplota / Liberated heat	376,8 J/g	337,6 J/g	331 J/g

S preiskavami smo prišli do naslednjih zaključkov:

1. Da so prisotne železove faze $Al_{13}Fe_4$ (Al_3Fe) in faze v obliki Al_8Fe_2Si , $Al_9Fe_2Si_2$, $Al_{15}Si_2M_4$ in Al_2Cu faza. Nastanek faz v livarski zlitini AlSi₁₂Cu(Fe) je potekal do deleža 2,5% Si in pri razmerju železa in silicija (Fe/Si) = 0,33.
2. Iz koncentracijskih profilov raztapljanja železa je razvidno, da koncentracija železa pada z oddaljenostjo od žičke. Najvišjo koncentracijo železa smo dobili z raztapljanjem žičke pri 750°C in času 30 minut. Krivulja se je izravnala na oddaljenosti 4 mm od žičke.
3. S simultano termično analizo livarske zlitine AlSi12Cu(Fe) smo ugotovili, da se z večanjem deleža železa v zlitini znižuje temperatura tališča, temperatura tališča evtektika pa se zvišuje, pri čemer se zniža tudi toplota, ki se porablja pri taljenju.

of these phases in the AlSiCu(Fe) alloy took place in content interval up to silicon fraction of 2.5 % and at the silicon/iron ratio (Fe/Si) = 0.33.

2. Content profiles of iron dissolution showed that the iron content reduced with the distance from the iron wire. The highest content by dissolving iron wire obtained for 30 min at 750 °C. The curve flattened at the distance of 4 mm from the wire.
3. Simultaneous thermal analysis of the AlSi12Cu(Fe) alloy showed that increased fraction of iron in the alloy reduced melting point of alloy while melting point of eutectic was increased. Heat consumed for melting was reduced too.

5 Literatura / References

- 1 Belov, N.A., Aksenov, A. A. in Eskin D.G. Iron in Aluminum Alloys, Impurity and Alloying Element, London and New York, 2002.
- 2 Binary Alloys Phase Diagrams; 2nd ed., Massalski, T.B., ASM, Metals Park, Ohio 1990.
- 3 Markoli, B., Spaič, S., Zupanič, F., The intermetallic phases containing transition elements in common Al-Si cast alloys, Aluminium, 80. Jahrgang 2004, 1/2.

AKTUALNO / ACTUAL

15. mednarodni nemški dan tlačnega litja

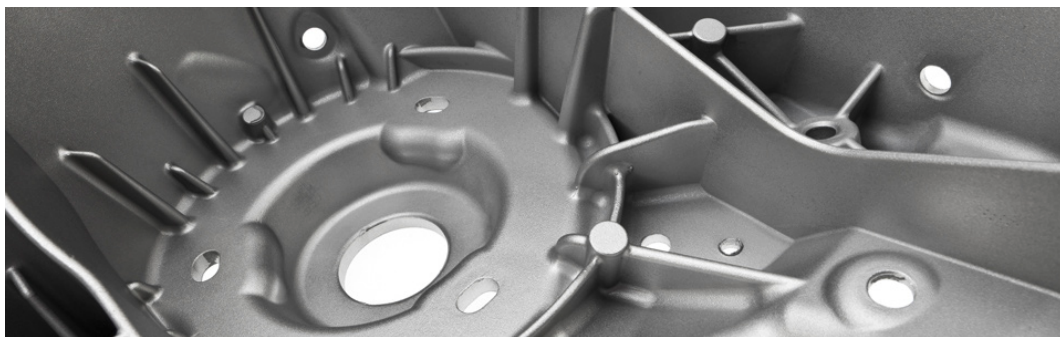
Okrog 200 udeležencev iz Nemčije in drugih evropskih držav se je 5.marca 2015 zbralo v Kongresnem centru v Bad Homburgu. Zelo zanimiv program je bil razdeljen na prvi del, ki je bil bolj »gospodarsko in ekonomsko« naravnani, po premoru pa so bila predstavljena predavanja, ki so bila bolj praktično tehnične narave. Predavanja so bila simultano prevajana v angleščino in nemščino. V predverju pa je bila tradicionalna razstava dobaviteljev te veje industrije in rešitve, ki jih le-ti ponujajo.



Po uvodnem nagovoru so v prvem delu bila na vrsti predavanja o konkurenčnih zmožnostih tlačnih livarn kot jih vidijo kupci ulitkov, nato smo slišali strukturne podatke o nemških tlačnih livarnah in o potencialih standardnih tlačnih zlitin glede na kvaliteto, livnost in značilnosti. Sledilo je predavanje, ki je obravnavalo karakteristike premazov za tlačno litje v odvisnosti od uporabljene »tehnike« za procese visokotlačnega litja.

Po premoru pa so bila na vrsti predavanja s tematiko virtualne resničnosti v proizvodnih procesih in prikazane rešitve uporabe virtualnih optimizacijskih metod. Zanimiv prikaz je bil v predavanju na temo odločilnih parametrov pri izdelavi visoko integralnih strukturnih delov pri lahkih ulitkih. V zadnjih dveh predavanjih pa smo se srečali s tematiko povečane uporabe hitre računalniške tomografije pri tlačnem litju in še zmeraj aktualno tematiko Kitajska – priložnosti in »pasti«.

Vse osnovne stroške srečanja so pokrili sponzorji, zato je udeležba bila brezplačna za vse udeležence srečanja. Žal pa organizator na tej podlagi očitno ni mogel poskrbeti za izdajo kakšnega tiskanega gradiva o predstavljenih predavanjih.



Poročala: mag. Mirjam Jan-Blažič in mag. Martin Debelak

AKTUALNO / ACTUAL



59. avstrijsko livarsko posvetovanje, Leoben 2015

V organizaciji Avstrijskega društva livarskih strokovnjakov VÖG, Katedre za livarstvo Univerze za montanistiko v Leobnu ter Avstrijskega livarskega inštituta ÖGI, je bilo v času med 23. in 24. aprilom 2015 na Univerzi za montanistiko v Leobnu, organizirano že 59. Avstrijsko livarsko posvetovanje.

Posvetovanje je potekalo pod geslom: » **Energijska in materialna učinkovitost, nujnost livarske tehnike**«. Predavatelji iz Nemčije in Avstrije so podali skupaj 13 predavanj, od tega 5 plenarnih ter po 4 predavanja v sekciji železovih litin ter 4 v sekciji neželeznih zlitin. Zaradi otvoritve novih prostorov Avstrijskega livarskega inštituta (ÖGI), je del posvetovanja bil namenjen predstavitvi projektov ÖGI ter slovesnosti ob otvoritvi razširitve inštituta. Skupno se je posvetovanja udeležilo 244 udeležencev iz sedmih držav. Na spremljajoči razstavi opreme in izdelkov je sodelovalo 30 razstavljalcev iz štirih držav. Organizatorji so pripravili manjši zbornik s povzetki predavanj ter seznamom udeležencev in razstavljalcev. Osnovni moto posvetovanja je bil zajet izključno v plenarnih predavanjih. Projekti ÖGI ter predstavitve inštituta v zborniku niso bili zajeti. Podajam osnovne dosežke plenarnih ter nekaterih drugih zanimivejših predstavitev:

Christian Wilhelm, iz vodstva nemškega združenja livarske industrije, je predstavil plenarno temo: » **Izzivi livarske tehnike**«. V svojem predavanju je izpostavil predvsem naslednje zahteve za livarsko tehnologijo: zmanjšanje dimenzij ulitkov, zmanjšanje teže ulitkov, znižanje materialnih stroškov, nižja poraba energije, okoljske zahteve. Bistveno za izpolnitev teh zahtev je v medsebojnem sodelovanju konstrukterjev, razvojnikov in livarn. Globalna konkurenca zahteva znižanje stroškov proizvodnje, za kar pa je rešitev le v povezavah celotne tehnološke verige in ne več samo v livarnah. To je možno doseči le z veliko znanjem in učinkovitimi organizacijskimi posegi.

Jochen Volkert, direktor podjetja Promeos GmbH Nürnberg, je v svojem plenarnem predavanju: » **Nova definicija taljenja-nova merila za energijsko učinkovitost in gospodarnost postopkov taljenja in zadrževanja na temperaturi v livarnah**«, izpostavil nove poglede na učinkovitost termičnih procesov. Ob tem je prikazal nov princip plinskih gorilnikov s popolnim predmešanjem in modularnim načrtovanjem v območju od 10 do 1.500 kW. Ti gorilniki, ki jih označujejo kot » plinska toplota v kakovosti električne energije », imajo optimalen učinek ogrevanja z močjo 5 MW/m² in imajo v primerjavi s konvencionalnimi gorilniki bistveno višjo učinkovitost in ekološke prednosti.

Ferdinand Hofer, vodja Inštituta za elektronsko mikroskopijo in nano analitiko Tehniške univerze Gradec, je v plenarnem delu podal strokovno izjemno predavanje: » **Razločevanje atomske velikosti kompleksnih kovinskih sistemov z elektronsko mikroskopijo**«. Izpostavil je najprej razvoj nove vrstične transmisijske elektronske mikroskopije-STEM,

opremljene s korekcijskimi faktorji zaznavanja, ki omogoča razločevanje atomskih velikosti. Z izboljšanimi detektorji in spektrometri je možno vršiti analize do 0,1 nanometra. S tem je možno analizirati posamezne položaje in zgradbe atomov v kristalih. Prikazane so bile analize dodatnih elementov v zlitinah Al-Si ter kristalnih mej in izločkov v različnih zlitinah in jeklih.

Izjemno kakovostno plenarno predavanje je z naslovom ;« **Livarski produkti in njihova dodatna vrednost glede na opazovanje njihovega življenjskega ciklusa**«, predstavil predstojnik katedre za gospodarske in proizvodne znanosti Univerze v Leobnu , **Hubert Biedermann**. Cilj nove evropske zakonodaje o energetske učinkovitosti je v izboljšanju »Input-Output« razmerja ter v zavedanju nujnosti učinkovitega energijskega vložka. Za proizvodne obrate je obvezen energijski audit oziroma implementacija certificiranega sistema energijskega upravljanja do 30.11. 2015, ki bi naj zmanjšala porabo primarne energije za 0,6% letno. Na osnovi celovitega modularnega nastavka in na osnovi življenjskega ciklusa produktov je možen nov način zapažanj in vrednotenja heterogenih proizvodov v livarski industriji, ki je prilagojen posebnostim te dejavnosti. Nujno bo potrebno preiti na celotno proizvodno verigo vključno z analizo življenjskega ciklusa. Uvaja se sistem LCC- Life cycle costing, energijski stroški v času celotnega življenjskega ciklusa.

Med predavanji iz področja železovih litin sta največ zanimanja bili deležni dve predavanji.

Peter Langenberg iz Inženirskega biroja za tehniko materialov v Aachenu, ZR Nemčija, je predstavili temo: **Ocena kontinuirano ulite visoko trdnostne in duktilne litine EN GJS 500-14 legirane s silicijem, za tlačno obremenjene dele v strojegradnji** . Za ulitke v javni uporabi se zahtevajo vse večji varnostni faktorji. Predvsem so izpostavljene



zahteve po večji žilavosti. Predstavljen je bil primer bloka krmilnega ventila. Lito železo ima zaradi odlične sposobnosti mehanske obdelave gospodarske prednosti pred kovanim jeklom. S kontinuiranim litjem je možno dosegati večjo homogenost in s tem izboljšano varnost izdelkov. Ob zahtevani trdnosti je v preizkušanje potrebno vključiti tudi prelomno in poškodbeno mehaniko in s tem določevanje zahtev po večji žilavosti. **Wolfgang Knothe** iz podjetja Franken Guss Kitzingen GmbH, Nemčija, je podal predavanje : **Ocenjevanje materialnih lastnosti sive litine s kroglastim grafitom v primeru dinamičnih obremenitev**. V novih konstrukcijah avtomobilov se odkovki nadomeščajo z ulitki. S tem se povečajo tudi zahteve po lastnostih in kakovosti ulitkov. Zaradi vse lažjih izvedb in s tem povečanih obremenitev materialov so razvili materiale na osnovi litega železa z višjo mejo lezenja ter višjimi raztezki. Pri tem so v ospredju sive litine s kroglastim grafitom legirane s silicijem..Podane so bile gospodarske prednosti. V primeru dinamičnih obremenitev je potrebno zagotoviti zadosten delež ferita s sposobnostjo prenašanja elastičnih in plastičnih deformacij.

Iz področja neželeznih kovin bi lahko izpostavili dve najzanimivejši predavanji . **Mihael Rafetzeder** iz podjetja Nemak Linz GmbH je predstavil temo: **Razvoj in uporaba visokokakovostne AlCu zlitine za izdelavo glav cilindrov**. Do sedaj so te zlitine zaradi občutljivosti na nastajanje razpok in večjega skrčka pri strjevanju zaostajale za zlitinami AlSiCu. Razvili so novo zlitino AlCu7MnZr, ki ima zelo dobro trajno trdnost pri temperaturah nad 200 ° C in zelo dobro prenaša termo-mehanske obremenitve. Z razvojem primernega postopka obdelave taline so zagotovili tudi ustrezno livnost in obstojnost proti nastajanju razpok. Prav tako sta z AlSiCu zlitinami primerljiva toplotna prevodnost in korozijska obstojnost. Prve serije izdelanih ulitkov glav cilindrov so potrdile rezultate raziskav. **Wolfgang Prein** iz podjetja LTC GmbH, Lebring, Avstrija je podal predavanje: **Thixomolding, prihodnost tlačnega litja magnezija**. LTC ,ki je predtem deloval v okviru koncerna Magna, se je od leta 2006 naprej usmeril izključno na izdelavo in razvoj magnezijevih izdelkov po Thixomolding postopku. Ob sodelovanju z Avstrijskim livarskim inštitutom ÖGI,so izvedli številne inovacije na področju tehnike brizganja in izvedbe tehnike vročih livnih dovodnih kanalov. Predstavljena je bila prihodnost serijske izdelave Mg ulitkov po Thixomolding postopku in primeri izdelkov kot: ohišje mobilnega telefona, okvir teniškega loparja,nosilci LED žarometov,ohišje prenosnega računalnika,ohišje daljnogleda.

Ob zaključku posvetovanja sta prof. Peter Schumacher in Gerhard Schindlbacher je bilo predstavila delo Avstrijskega livarskega inštituta in razvoj ter sedanje projekte Avstrijskega livarskega inštituta-ÖGI. Projekti so usmerjeni predvsem v optimiranje livarskih postopkov, nove metode raziskovanja, aplikacije in numerične tehnike in so jih s skupnim nazivom poimenovali CONAN (Casting, Optimization, New methods, Application and Numerical techniques) pri tem je bilo izpostavljeno zelo dobro sodelovanje z Avstrijsko nacionalno družbo za podporo raziskovanju-FFG ter z Avstrijsko nacionalno družbo za kooperativne raziskave –ACR , ki v veliki meri sofinancirata raziskave ÖGI. Prav tako je bilo izpostavljeno še področje dodatnega izobraževanja in izpopolnjevanja strokovnih kadrov v livarskih podjetjih. Sledil je ogled novih dograjenih prostorov ter nove opreme ÖGI.

ÖGI ima danes že 35 zaposlenih ter ob sodobni raziskovalni opremljenosti predstavlja enega najpomembnejših evropskih raziskovalnih inštitutov s področja livarstva.

Glavni in odgovorni urednik Livarskega vestnika
Zasl. prof. dr. Alojz KRIŽMAN

AKTUALNO / ACTUAL

Sejem varjenje in livarstvo

6. sejem **VARJENJE IN LIVARSTVO** je potekal na Celjskem sejmu v času od 21.- 24. aprila letos pod naslovom »**Vse za varjenje in rezanje, livarstvo, oprema in materiali.**« Že šestič zapored, vsako drugo leto Društvo livarjev Slovenije in Celjski sejem vzpostavljata ugoden stroškovni paket sodelovanja, ki pa ob dodatnem angažiranju Društva omogoča brezplačen nastop vsem članicam Društva na razpoložljivem sejmskem prostoru. Za to stroškovno ugodno promocijo na tem sejmu so se odločile letos naslednje članice Društva: Almos, Škofja Loka, d.o.o., FerroČrtalič d.o.o., Livar d.d. Ivančna Gorica, Livarna Titan d.o.o., Litostroj jeklo d.o.o., Mariborska Livarna Maribor d.d. in Telkom d.o.o. Trbovlje. Predstavniki Društva so skupaj s predstavniki Katedre za livarstvo in Oddelkom za materiale in metalurgijo Naravoslovnotehniške fakultete Univerze v Ljubljani tekom celega sejma skrbeli za popularizacijo izobraževanja za livarsko stroko in promocijo tudi vseh tistih članic Društva, ki se sejma s svojimi eksponati in predstavniki niso udeležile. Največ obiskovalcev - interesentov za livarstvo je obiskalo sejem v sredo 22. aprila, ko je Društvo skupaj s fakulteto organiziralo »Dan livarstva« s krajšo mednarodno livarsko konferenco.



Na le-tej so bila predstavljena v pretežni meri predavanja oz. teme s strani slovenskih predavateljev, ki so obravnavale naslednjo strokovno problematiko: Krčenje Al-Si zlitin med strjevanjem; Razvoj TTT diagrama z energijsko vsebnostjo; Raztapljanje Zr v talinah Al-Mg-Si; Ultrazvočno razpršilna piroliza – postopek izdelave nanostrukturnih materialov; Pojav chunky grafit v debelostenskih ulitkih iz sive litine s kroglastim grafitom; Termodinamična analiza Al-u-X zlitin.

V istem času so si obiskovalci lahko na Celjskem sejmu ogledali še posebno zanimiv sejem za strokovnjake iz livarn, t.j. 13. sejem FORM TOOL, orodja, orodjarstvo, stroji in tudi 11. sejem PLAGKEM, plastika, guma, kemija in 7. sejem GRAF&PACK, grafika, papir, stroji, embalaža, pakiranje.

Koristimo to priložnost, da se za dobro organizacijo sejma in poslovno sodelovanje prijazno zahvalimo Celjskemu sejmu in še posebno njegovim skrbnikom, ki so bili zadolženi za Društvo livarjev Slovenije.



Poročala: mag. Mirjam Jan-Blažič

AKTUALNO / ACTUAL



DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE

SLOVENIAN FOUNDRYMEN SOCIETY

vas vljudno vabi na / invites you to

55. MEDNARODNO LIVARSKO POSVETOVANJE

55th INTERNATIONAL FOUNDRY CONFERENCE

PORTOROŽ 2015

s spremljajočo razstavo / with accompanying exhibition

16.-18. september 2015

Informacije/Contact: Društvo livarjev Slovenije,
Lepi pot 6, p.p. 424, 1001 Ljubljana, T: +386 1 2522 488, F: +386 1 4269 934
drustvo.livarjev@siol.net, www.drustvo-livarjev.si

Program / Programme

Sreda / Wednesday, 16. 09. 2015

16.30-19.00:	Prijava udeležencev na recepciji posvetovanja / Registration of participants at the Conference reception desk
17.30:	Transfer pred Hotelom Slovenija za Piran / Bus transfer from Hotel Slovenija to Piran
18.00:	Sprejem na občini Piran / Reception at the Municipality of Piran

Četrtek / Thursday, 17. 09. 2015 Dvorana / Hall Cristoforo Colombo

9.30-9.45:	MIRJAM JAN-BLAŽIČ predsednica / President , <i>Društvo livarjev Slovenije</i> Otvoritveni nagovor / The Opening Address
------------	---

Dvorana / Hall Cristoforo Colombo

Plenarna predavanja / Plenary Lectures

9.45-10.15:	M. SCHUMACHER, <i>Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie, Düsseldorf (D)</i> : Status and challenges of the foundry industry / Stanje in izzivi livarske industrije
10.15-10.45:	R. BÄHR, S. SCHARF, M. LIEPE, E. RIEDEL, <i>Otto – von – Guericke – University Magdeburg, Institute of Manufacturing Technology and Quality Management (D)</i> : Primary Shaping – The Additive Manufacturing Process / Primarno oblikovanje – Dodaten izdelovalni proces
10.45-11.15:	A. KRIŽMAN ¹ , M. DEBELAK ² , M. JAN-BLAŽIČ ³ , P. MRVAR ⁴ , ¹ Univerza v Mariboru, ² Gospodarska zbornica Slovenije, ³ Društvo livarjev Slovenije, ⁴ Univerza v Ljubljani, <i>Naravoslovnotehniška fakulteta (SI)</i> : Slovenian Foundry in the Year 2014 and its integration into the development strategy of the metallurgy in Slovenia 2015-2025 / Slovensko livarstvo v letu 2014 in vključevanje v strategijo razvoja metalurgije v Sloveniji 2015- 2025
11.15-11.30:	Odmor /Break
11.30-12.00:	P. SCHUMACHER ^{1,2} , K. TUCAN ² , P. HOFER ² , ¹ Chair of Casting Research, <i>University of Leoben, Leoben, (A)</i> : Aspects of modern production methods of integrated high pressure die castings / Vidiki modernih proizvodnih metod pri integriranem tlačnem litju
12.00-12.30:	M. TOPIČ ¹ , K. TSCHIGGERL ¹ , M. RAUTER ² , K. DOSCHEK ² , H. BIEDERMANN ¹ , H. RAUPENSTRAUCH ² , ¹ Chair of Economic and Business Management, <i>Montanuniversitaet Leoben</i> , ² Chair of Thermal Processing Technology, <i>Montanuniversitaet Leoben (A)</i> : Foundry products and their added value in life cycle assessments / Livarski izdelki in njihova dodana vrednost z vidika življenjske dobe
12.30-13.00:	I. RIPOSAN ¹ , V. UTA ¹ , I.C. STEFAN ¹ , M.C. FIRICAN ¹ , S. STAN ¹ , R.L. NARO ² , D.C. WILLIAMS ² , ¹ Politehnica University of Bucharest, <i>Bucharest (RO)</i> , ² Asi International, Ltd, <i>Cleveland, Ohio (USA)</i> : Cast Iron Inoculation Enhancing – Solution for Critical Production Conditions / Pospeševanje cepljenja sivih litin – Rešitev za mejne proizvodne pogoje
13.00-15.00:	Odmor za kosilo / Lunch Break
15.00-15.30:	K. WEISS, <i>RWP GmbH, Roetgen (D)</i> : Calculation of Micro Matrix for Aluminium Silicon Alloys / Izračun mikro osnove za Al–Si zlitine
15.30-16.00:	B. KALKUNTE ¹ , V.KOLDA ² , ¹ Calcom ESI SA(CH), ² Mecas ESI (CZ): Casting simulation applied successfully to die castings in industrie/ Simulacije litja uspešno uporabljene v industriji kokilnega in tlačnega litja
16.00-16.15:	Odmor / Break
16.15-16.45:	R. SQUATRITO, I. TODARO, L. TOMESANI, <i>Centro Interdipartimentale di Ricerca Industriale Meccanica Avanzata e Materiali (I)</i> : How research can support European foundries to increase their competitiveness: some examples of success from the Italian Motor Valley / Kako raziskave lahko podpirajo evropske livarne v namenu povečanja konkurenčnosti: nekaj uspešnih primerov iz Italian Motor Valley
16.45-17.15:	P. MRVAR ¹ , M. PETRIČ ¹ , J. MEDVED ¹ , M. KOMPREJ ¹ , A. KRIŽMAN ² , ¹ Univerza v Ljubljani, <i>Naravoslovnotehniška fakulteta</i> , ² Univerza v Mariboru (SI): Production of reference samples / Izdelava referenčnih vzorcev

Četrtek zvečer / Thursday evening, 17. 09. 2014

18.00:	Večerja na ladjah Portorož in Laho z vožnjo po slovenskem morju in zaključkom na terasi hotela Riviera / Dinner on board of boats Portorož and Laho and a boat ride along Slovenian coast and afterwards gathering on the terase of hotel Riviera.
--------	---

Petek / Friday, 18. 09. 2014

Sekcija A / Section A: Dvorana / Hall: Robert Scott

Železove litine in livarska tehnologija / Cast iron and casting technology

9.00 - 9.20:	A. NOFAL ¹ , M. AHMED ¹ , L. REIZIG ² , A. HUSSEIN ³ , ¹ <i>Central Metallurgical R & D Institute (CMRDI), Cairo, Egypt</i> , ² <i>Fraunhofer Institute-IWT, Freiburg, Germany (D)</i> , <i>Faculty of Engineering, Cairo University, Egypt (EG): Machinability of Austempered Ductile Iron (ADI) as related to Microstructure and Strain Hardening Behaviour</i> / Obdelovalnost izotermno poboljšane sive litine s kroglastim grafitom (ADI) v povezavi z mikrostrukturo in deformacijskim utrjanjem
9.20-9.40:	R. DOEPP, <i>Technical University Clausthal (D): Contribution to ductility of cast Fe-C-Si-X-materials</i> / Prispevek k duktilnosti Fe-C-Si-X livnih materialov
9.40-10.00:	B. BAUER ¹ , I. MIHALIĆ -POKOPEC ¹ , P. MRVAR ² , ¹ <i>Fakulteta za strojništvo in brodogradnjo, Univerza v Zagrebu (CRO)</i> , ² <i>Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta (SI): Influence of cooling rate and addition of Ce and Bi on graphite morphology in spheroidal graphite iron/</i> Vpliv ohlajevalne hitrosti in dodatkov Ce in Bi na obliko grafita v sivi litini s kroglastim grafitom
10.00-10.15:	Odmor / Brake
10.15-10.35:	I. DUGIĆ, <i>Linnaeus University, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Växjö, Sweden (SE): Effect of cooling rate on the casting defects of high chromium white cast iron for the impellers</i> / Vpliv ohlajevalne hitrosti na livarske napake na rotorjih iz bele litine z visoko vsebnostjo kroma
10.35-10.55:	M. ACARER ¹ , M.ÖZDEMİR ¹ , H. AHLATCI ² , Y.TÜREN ² AND Y.SUN ² , ¹ <i>Selcuk University, Metallurgy-Materials Engineering Department, Konya</i> , ² <i>Karabuk University, Metallurgy-Materials Engineering Department, Karabuk (TR): Characterization of Co Base Superalloy Produced by Investment Casting</i> / Karakterizacija superzlitine na bazi Co izdelane s precizijskim litjem
10.55-11.15:	P. WEISS, P. F. BANSZERUS, C. CREMER, A. BÜHRIG-POLACZEK, <i>Gießerei-Institut der RWTH Aachen (DE): Copper and Aluminium in High Silicon Ductile Iron</i> / Baker in aluminij v sivi litini s kroglastim grafitom z visoko vsebnostjo silicija
11.15-11.30:	Odmor / Brake
11.30-11.50:	D. SOJER ¹ , M. BRUNČKO ^{2,1} , Ž. ERMAN ¹ , I. ANŽEL ² , ¹ <i>Magneti Ljubljana d.d., Ljubljana, Slovenia</i> , ² <i>University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering, Maribor, Slovenia (SI): Centrifugal atomization of Nd-Fe-B flakes used for production of permanent magnets</i> / Centrifugalna atomizacija Nd-Fe-B kosmičov za uporabo pri izdelavi trajnih magnetov
11.50-12.10:	Č. MIKYŠKA, <i>Livar d.d., Ivančna Gorica (SI): Effect of different covers for "sandwich" method</i> / Vpliv različnih pokrivalnih materialov za "sandwich" postopek
12.10-12.30:	U. KLANČNIK ¹ , J. HABJAN ¹ , J. MEDVED ² , ¹ <i>Valji, d.o.o., Slovenija</i> , ² <i>Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Slovenija (SI): Characterization of modified indefinite alloy for roll working layer in rolls</i> / Karakterizacija modificirane indefinitne litine za izdelavo delovne plasti valjev
12.30-12.45:	Odmor / Brake
12.45-13.05:	S. HALAGAN, <i>Ferročrtalič d.o.o. (SI): The use of abrasives in foundry industry</i> / Uporaba abrazivov v livarski industriji
13.05-13.25:	D. ŽIVKOVIĆ ¹ , D. MANASIJEVIĆ ¹ , D. MINIĆ ² , N.TALIJAN ³ , V. ČOSOVIĆ ³ , A. KOSTOV ⁵ , ¹ <i>University of Belgrade, Technical Faculty in Bor, Bor, Serbia</i> , ² <i>University of Priština, Faculty of Technical Sciences, Kosovska Mitrovica, Serbia</i> , ³ <i>University of Belgrade, Institute of Chemistry, Technology and Metallurgy, Belgrade, Serbia</i> , ⁴ <i>Institute for Mining and Metallurgy, Bor, Serbia (RS): Survey on some potential ecological metallic materials with application in electronics</i> / Pregled nekaterih potencialnih ekoloških kovinskih materialov za aplikacije v elektroniki
13.25-13.45:	M. PETRIČ ¹ , J. MEDVED ¹ , S. KASTELIC ² , A. KRIŽMAN ³ , P. MRVAR ¹ , ¹ <i>Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta</i> , ² <i>TC Livarstvo Ljubljana</i> , ³ <i>Univerza v Mariboru (SI): Measurement of dimensional changes of AlSi alloys during solidification</i> / Meritve dimenzijskih sprememb med strjevanjem Al-Si zlitin

Sekcija B / Section B: Dvorana/ Hall: Roald Amundsen

Neželezne zlitine / Non-ferrous alloys

9.00-9.20:	J. MEDVED ¹ , S. KORES ¹ , P. MRVAR ¹ , M. VONČINA ¹ , A. KRIŽMAN ² ¹ Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, ² Univerza v Mariboru, (SI): Influence of Zr addition on Al alloys properties / Vpliv dodatka Zr na lastnosti Al zlitin
9.20-9.40:	G. PODLIPNIK, T. MUHIČ, LTH Castings d.o.o., Ljubljana, Škofja Loka (SI), Al-cast parts with cold welding technique / Spajanje Al ulitkov z varjenjem v hladnem
9.40-10.00:	W.K. KRAJEWSKI ¹ , J. BURAS ¹ , G. PIWOWARSKI ¹ , P.K. KRAJEWSKI ¹ , A.L. GREER ² , K. FAERBER ³ , P. SCHUMACHER ³ , ¹ AGH University of Science and Technology, Faculty of Foundry Engineering, Krakow, (PL), ² University of Cambridge, Department of Materials Science and Metallurgy, Cambridge, (UK), ³ University of Leoben, Department of Metallurgy, Leoben, (AU): Processing of molten aluminium-zinc based cast alloys / Obdelava staljenih Al-Zn livarskih zlitin
10.00-10.15:	Odmor / Brake
10.15-10.35:	B. MARKOLI, B. LESKOVAR, I. NAGLIČ, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta (SI): Development of high-strength quasicrystalline Al-based alloys via casting into permanent mould/ Razvoj visokotrdnih kvazikristalnih Al-zlitin s postopkom litja v kovinsko kokilo
10.35-10.55:	F. ZUPANIČ ¹ , T. BONČINA ¹ , C. GSPAN ² , ¹ University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering (SI), ² Institut für Elektronenmikroskopie und Nanoanalytik, Graz, (AT): Precipitates in an aluminium quasicrystalline alloy / Izločki v aluminijevi kvazikristalni zlitini
10.55-11.15:	Z. Z. BRODARAC ¹ , J. KALINIČ ² , V. ŠUICA ¹ , ¹ University of Zagreb, Faculty of Metallurgy, Sisak, ² Jajce Alloy Wheels Ltd, Jajce (BIH), ¹ University of Zagreb, Faculty of Metallurgy, Sisak (HR): Solidification sequence of AlSi11 alloy / Potek strjevanja AlSi11 zlitine
11.15-11.30:	Odmor / Brake
11.30 - 11.50	R. RUDOLF ^{1,2} , ¹ University of Maribor, Faculty of mechanical Engineering, ² Zlatarna Celje (SI): Gold nanoparticles – Properties, Synthesis and Application/ Au-nanodelci-lastnosti, sinteza, uporaba
11.50-12.10:	N. M. TALIJAN ¹ , V. R. ČOSOVIČ ¹ , A. R. ČOSOVIČ ² , D. T. ŽIVKOVIČ ³ , ¹ University of Belgrade, Institute of Chemistry, Technology and Metallurgy, Beograd, Serbia, ² Institute for Technology of Nuclear and Other Mineral Raw Materials, Belgrade, Serbia, ³ Technical Faculty in Bor, University of Belgrade, Bor, Serbia (SRB): Innovative approach on improvement of metal oxide dispersion and structure dependent properties of Cd free silver/metal oxide electrical contact materials / Inovativni pristop k izboljšanju razpršenosti kovinskih oksidov in strukturno odvisnih lastnosti materialov za električne kontakte na osnovi srebro/kovinski oksidi
12.10-12.30:	M. ZEYVELI, Y. TÜREN, Karabuk University, Faculty of Technology, Department of Mechatronic Engineering (TR): Investigation of the effects of cooling rate and cutting parameters on the machinability of the ecobrass / Raziskava vpliva ohlajevalne hitrosti in parametrov odrezavanja na obdelovalnost ekološke medi
12.30-12.45:	Odmor / Brake
12.45-13.05:	J. PRISTAVEC ¹ , H. ROCKMANN ² , ¹ EXOTERM-IT d.o.o., Kranj (SI), MAGMA GmbH, Aachen (D): Finding causes of crack occurrence at automotive wheels with the use of numerical simulation of the complete production cycle / Iskanje vzrokov za pojav razpok na avtomobilskih platiščih z uporabo numeričnih simulacij celotnega proizvodnega cikla
13.05-13.25:	U. GAUERMANN, Electronic GmbH, Neuhausen (D): Cost reduction by using process data systems / Zmanjšanje stroškov z uporabo sistemov procesnih podatkov
13.25-13.45:	K. DILGER, H. PRIES, S. MULLER, Braunschweig University of Technology, Braunschweig (D): Prediction of thermal fatigue life for aluminium die casting moulds by experimental and computational methods / Eksperimentalno in numerično napovedovanje življenjske dobe pri toplotni obremenitvi orodji za tlačno litje aluminijevih zlitin

Posterske predstavitve / Poster presentations

1.	G. TIMELLI, A. GUGLIELMI, D. CALIARI, <i>University of Padova, Department of Management and Engineering, Vicenza (IT): Effects of process parameters on the microstructure and casting defects of a LPDC engine block</i> / Vpliv procesnih parametrov na mikrostrukturo in livarske napake pri LPDC bloku motorja
2.	D. CALIARI, G. TIMELLI, <i>University of Padova, Department of Management and Engineering, Vicenza (IT): Characterization of anodic oxide film formed on HPDC components</i> / Karakteristike oksidnega anodnega filma nastalega na HPDC komponentah
3.	D. PIHURA ¹ , D. MUJAGIĆ ² , D. NOVIČ ³ , ¹ Ljevari BiH, Zenica, BiH, ² University Zenica, Metallurgical institute "K. Kapetanović", Zenica, (BiH), ³ Energoinvest, Sarajevo, (BiH): Bringing pilot plant knowledge to foundry platform / Prenos znanja pilotnih naprav na nivo livarn
4.	Y. SUN, S. YILMAZ, H. KOÇAK, M. ACARER, H. AHLATCI, Y. TUREN, <i>Departments of Metallurgical and Materials Engineering, Engineering Faculty, Karabuk University (TR): Effect of Aging Heat Treatment on Mechanical Properties of Cupro NSS Alloys Produced by Casting</i> / Vpliv toplotne obdelave za staranje na mehanske lastnosti Cupro NSS zlitin proizvedenih z litjem
5.	M. ÜNAL, H. A. GÖREN, E. KOC, <i>Karabuk University, Technology Faculty, Karabuk (TR): An investigation on cooling rates as a function of Si content of AZ91 magnesium alloy</i> / Vpliv ohlajevalnih hitrosti kot funkcija količine Si v AZ91 magnezijevi zlitini
6.	Y. TUREN, M. M. YILDIRIM, M. ACARER, H. AHLATCI, Y. SUN, M. UNAL, <i>Karabuk University, Engineering Faculty, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Karabuk (TR): The effect of silicon content on microstructure and mechanical properties of lead-free brass casting alloys</i> / Vpliv vsebnosti Si na mikrostrukturo in mehanske lastnosti medene livarske zlitine brez svinca
7.	H. AHLATCI, H. CUG, H. ZENGİN, Y. TUREN, Y. SUN, M. ACARER, <i>Karabuk University, Engineering Faculty, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Karabuk (TR): The effect of manganese content on wear properties of AS41 magnesium casting alloys</i> / Vpliv vsebnosti mangana na obrabne lastnosti AS41 magnezijeve livne zlitine
8.	M. ACARER, G. ARICI, F. AYDIN, M. UYANER, M. COLAK, R. KAYIKCI, <i>Selcuk University, Technology Faculty, Konya (TR): Production of 3Cr-3W Steel by Investment Casting</i> / Izdelava 3Cr-3W jekla s precizijskim litjem
9.	A. MAHMUTOVIĆ ¹ , S. KASTELIC ¹ , M. PETRIČ ² , P. MRVAR ² , A. KRIŽMAN ³ , ¹ TC Livarstvo Ljubljana, ² Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, ³ Univerza v Mariboru (SI): Novelties in the numerical simulations of casting process / Novosti pri numeričnih simulacijah livarskih procesov
10.	M. VONČINA, V. TUBIN, P. MRVAR, J. MEDVED, <i>Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta (SI): Bonding of AA 1170 and AA 6060 alloys</i> / Spajanje zlitin A31 in A6060

AKTUALNO / ACTUAL

Častni predsednik društva Milan Trbižan na pragu častljivega jubileja



Zaslužni profesor dr. Milan Trbižan

Prihajajočega 6. julija letos bo častni predsednik Društva livarjev Slovenije, zaslužni profesor dr. Milan Trbižan, praznoval 80. življenjski jubilej. Za častljivi jubilej mu v imenu članstva Društva vodstvo Društva in uredniški odbor Livarskega vestnika izrekata prisrčne čestitke ter iskrene in najlepše želje. Naj mu nenehni spomini na bogato ustvarjalno preteklost prinašajo naprej ob dobrem zdravju upanje in pozitivna pričakovanja za prihodnost.

Prof. Trbižan se je rodil leta 1935 v Ljubljani. Leta 1953 se je po opravljeni maturi v gimnaziji v Kamniku vpisal na univerzitetni študij metalurgije v Ljubljani, ki ga je končal leta 1960. Kot diplomirani inženir metalurgije je svojo prvo zaposlitev našel v livarni temprane litine Titan v Kamniku. Po štirih letih dela v tem podjetju, se leta 1964 začelja njegova znanstvena pot na Univerzi v Ljubljani, Oddelku za montanistiko, katedri za železarstvo, na položaju asistenta za predmet livarstva pri prof. dr. Cirilu Pelhanu. Leta 1973 je opravil doktorat s temo »Obstojnost sive litine na temperaturne spremembe« pri prof. dr. K. Zeppelzauerju

na Montanuniversität Leoben v Avstriji.

Njegov nadaljnji akademski dosežki oziroma napredovanja pa sledijo v letu 1976, ko je postal docent, leta 1987, ko prejme naziv izrednega profesorja, ter leta 1993, ko je bil promoviran v rednega profesorja za področje livarstva. Od slednega leta naprej je bil tudi predstojnik Katedre za livarstvo. Leta 2010 pa je prejel še najvišji možni akademski naziv: zaslužni profesor.

V Društvu livarjev Slovenije je bil od leta 1966 do 1991 strokovni tajnik, od leta 1991 do leta 2005 pa predsednik, od leta 1983 do 2005 tudi glavni in odgovorni urednik Livarskega vestnika. V teh letih dela na Društvu je postavil čvrste temelje vsakoletnega mednarodnega livarskega posvetovanja v Portorožu, ki je osrednja livarska prireditev Društva še danes.

Skupaj s predstavniki iz livarskih združenj Avstrije in Nemčije je leta 1992 sodeloval pri ustanovitvi livarske asociacije Hexagonale oz. pozneje preimenovane v MEGI (Mitteleuropäische Giessereiinitiative), kjer je bil v mandatu 1999/2000 tudi njen predsednik.

Prof. Trbižan je bil leta 1996 pobudnik ustanovitve mednarodne Komisije 3.3 »Computer Simulation of Casting Processes«, znotraj tedanje svetovne livarske organizacije CIATF (sedanje WFO), ki jo je tudi pozneje vodil.

Obsežna strokovna in v prvi vrsti znanstveno raziskovalna pot prof. Trbižana obsega znanstveno delo in sodelovanje na naslednjih področjih: toplotno utrujanje sive litine z lamelnim grafitom, postopki izdelave livarskih form, livarski peski s poudarkom na regeneraciji peska iz croning-postopka, bentonitni peski, postopki s vodnim steklom in raziskovanje reakcij na mejni površini med talino in formo.

Svoje znanstveno delo je predstavljal doma in na tujem v vrsti svojih predavanj na kongresih in strokovnih prireditvah. Tesno sodelovanje z vrsto livarskimi društvi in združenji v tujini so mu prinesla tudi vrsto častnih priznanj.

Po upokojitvi v letu 2006 je prof. Trbižan podaril Naravoslovnotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani svojo osebno zbirko umetniških livarskih izdelkov, v obsegu več kot 100 različnih ulitkov. Zbiral jih je celih 40 let iz prejetih osebnih daril in spominskih pridobitev na raznih kongresih ter livarskih prireditvah v tujini. Vsi ulitki so našli s tem odlično domovanje na stenah v hodniku pisarn in predavalnic Katedre za livarstvo in materiale.

Uredniški odbor Livarskega vestnika
Predsednik
zasl.prof. dr Alojz Križman

Društvo livarjev Slovenije
Predsednica
mag. Mirjam Jan Blažič

AKTUALNO / ACTUAL

Koledar livarskih prireditev

Termin	Naziv dogodka	Kraj / država dogodka
21.-24.09.2015	GOM konferenca o optičnem 3D meroslovju	Braunschweig/ Nemčija
21.10.2015	Europäische Normen für Gusswerkstoffe	Düsseldorf/ Nemčija
22.-23.10.2015	Metallurgie und Schmelztechnik der Eisen-Gusswerkstoffe im Kupolofen	Düsseldorf/ Nemčija
13.11.2015	Anwendung der Konstruktion in der Gussherstellung	Düsseldorf/ Nemčija
23.-24.11.2015	Konstruieren mit Gusswerkstoffen	Düsseldorf/ Nemčija
07.-09.12.2015	Formfüllung, Erstarrung, Anschnitt- und Speisertechnik bei Gusseisen-Werkstoffen	Düsseldorf/ Nemčija
12.-14.01.2016	EUROGUSS 2016	Nürnberg/Nemčija
07.-08.04.2016	60. Österreichische Giesserei-Tagung	Bad Ischl/ Avstrija
14.-15.04.2016	Deutscher Giessereitag 2016	Magdeburg/ Nemčija
22.-25.05.2016	72 th World Foundry Congress 2016	Nagoya/ Japonska