

LIVARSKI VESTNIK

62/2015

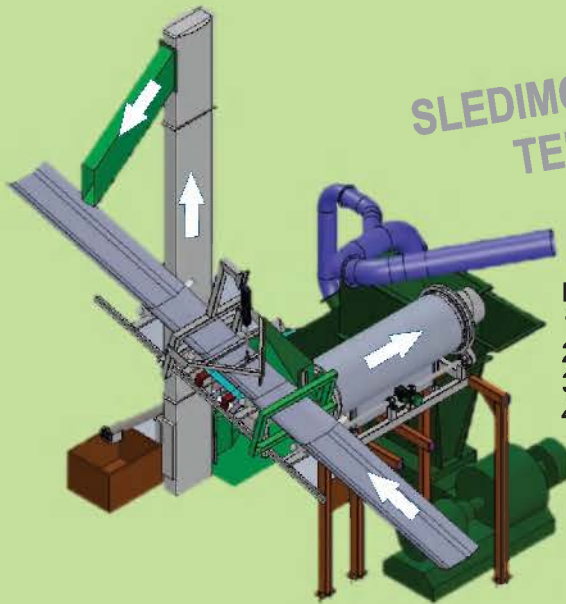
1



DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE
SLOVENIAN FOUNDRYMEN SOCIETY



SEKUNDARNA REGENERACIJA BENTONITNEGA PESKA



SLEDIMO NOVIM
TEHNOLOGIJAMI!

Koristi nove tehnologije:

1. Prihranki!
2. Boljša kvaliteta odlitkov!
3. Varovanje okolja!
4. Hitro povračilo investicije!

info@siapro.si

Slike: Razpored opreme s transporterji v hali. Vgradnja na obstoječi sistem regeneracije peska, na tračni transporter povratnega peska iz litja.

REFERENCA - Instalirana oprema za regeneracijo bentonitnega peska v Sloveniji.



SIAPRO
INŽENIRING NA
PODROČJU
LIVARSTVA
JEKLARSTVA
VZDRŽEVANJA
ČIŠČENJA
ULITKOV
POVRŠINSKEGA
UTRJEVANJA IN
ENERGETIKE

Kontaktirajte nas!

SIAPRO d.o.o.

Postaja 9

5216 Most na Soči

T: 00386 5 384 16 32

F: 00386 5 384 16 30

E: info@siapro.si

www.siapro.eu

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-Blažič

Uredniški odbor / Editorial board:

prof. dr. Alojz Križman, Univerza v Mariboru
prof. dr. Primož Mrvar, Univerza v Ljubljani
prof. dr. Jožef Medved, Univerza v Ljubljani
doc. dr. Gorazd Lojen, Univerza v Mariboru
prof. dr. Andreas Bührig-Polaczek, Giesserei
Institut RWTH Aachen
prof. dr. Peter Schumacher, Montanuniversität
Leoben
prof. dr. 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 Šifrer

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: marec 2015



Naslov/Address:

SIAPRO d.o.o.

Postaja 9

SI-5216 MOST NA SOČI

Direktor: Franci JEZERŠEK

Tel.: +386 5 3841 632

Fax: +386 5 3841 630

info@siapro.si

<http://www.siapro.eu>

VSEBINA / CONTENTS

Stran / Page:

Konrad J. Papis, Sabine Tunzini, dr. Werner Menk, Georg Fischer: **Razvoj duktilne litine za uporabo pri visokih temperaturah / Development of Ductile Cast Iron for High-Temperature Applications** 2

K. Dilger, H. Pries, T. Schuchardt: **Podaljšanje življenjske dobe kokil iz jekla za delo v vročem za tlačno litje s popravljivim varjenjem z elektronskim curkom ob integrirani lokalni toplotni obdelavi / Life extension of high-pressure die casting molds made of hot-work steels by regenerative electron-beam welding with local process-integrated heat treatment** 17

P. Mrvar, D. Mitrovič, J. Medved, A. Križman, M. Petrič: **Tehnologija izdelave in karakterizacija gradientnega ulitka / Manufacturing Technology and Characterization of Gradient Casting** 33

Franc Zupanič, Carlos A. Nunes, Gilberto C. Coelho, Paula L. Cury, Gorazd Lojen, Christian Gspan, Tonica Bončina: **Mikrostruktura kontinuirno ulite nikljeve dentalne zlitine / Microstructure of a Continuously Cast Ni-based Dental Alloy** 43

AKTUALNO / ACTUAL

Razgovor o prehojeni poti in dosežkih livarne ETA Cerkno d.o.o. 51

48. poročilo o svetovni livarski proizvodnji 55

Sodelovanje in aktivnosti v CAEF - Evropskem združenju livarjev 58

8. posvetovanje »Livarska tehnologija pri izdelavi motorjev 2015« 60

Seje organov Društva ob zaključku poslovnega leta 2014 61

Seminar o aktualni okoljevarstveni problematiki v livarstvu 62

Vabilo Portorož 2015 63

Program prireditve »DAN LIVARSTVA« na 6. sejmu Livarstvo in varjenje v Celju 64

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

Razvoj duktilne litine za uporabo pri visokih temperaturah

Development of Ductile Cast Iron for High-Temperature Applications

Izvleček

Od novih vrst duktilne litine se zahteva, da izpolnjujejo zahteve po zmanjševanju velikosti motorjev z notranjim izgorevanjem in povečanju delovne temperature. Prispevek opisuje razvoj novih feritnih duktilnih litin, odpornih pri višjih temperaturah, njihove lastnosti, serijske uporabe in najnovejše dosežke pri razvoju materialov.

Zmanjševanje velikosti bencinskih in dizelskih motorjev z notranjim izgorevanjem prispeva k zmanjšanju emisij CO₂. Konstruiranje manjših motorjev z notranjim izgorevanjem s povečanimi močmi vodi do višjih temperatur izpušnih plinov. Pri osebnih vozilih te presegajo 850 °C pri bencinskih motorjih in celo 1050 °C pri bencinskih motorjih s turbopolnilniki. Toplotna izolacija ščiti okolico motorjev, a še bolj omejuje delovne razmere izoliranih vročih delov.

Feritne silicijeve in molibdenove duktilne litine so v Evropi standardizirane s standardom EN-16124. Vendar lastnosti teh materialov niso dovolj dobre, da bi se materiali uporabljali za najnovejše zmanjšane motorje z notranjim izgorevanjem. Na osnovi SiMo-duktilne litine so se razvili novi feritni materiali s ciljem povišati temperaturo pretvorbe ferit-avstenit, povečati trdnost pri visokih temperaturah in odpornost proti oksidaciji.

Ključne besede: siva litina s kroglastim grafitom, SiMo, temperaturna odpornost, izpušni kolektor, turbo polnilnik, feritno avstenitna transformacija

Abstract

New ductile iron grades are required to meet the challenges arising from engine downsizing and subsequent temperature increase. This paper describes the development of new ferritic, temperature resistant ductile iron grades, their properties, serial applications and newest achievements in material development.

Downsizing of gasoline and Diesel engines helps to reduce CO₂ emissions. Constructing smaller engines with increased power levels leads to higher exhaust gas temperatures. In passenger cars, these exceed 850°C in Diesel engines and even 1050 °C in turbocharged gasoline engines. Thermal insulation protects the engine's surroundings, but tightens the operating conditions of the insulated hot parts even further.

Ferritic silicon and molybdenum-alloyed ductile iron grades are standardized in Europe in EN- 16124. However, these materials' properties are not sufficient for being applied in the newest downsized engines. Based on SiMo ductile iron, new ferritic materials are developed with the aim to raise ferrite/austenite transition temperature, high temperature (HT) strength and scaling resistance.

Keywords: ductile iron, SiMo, temperature resistance, exhaust manifold, turbocharger, ferrite-austenite transformation

1 Uvod

Vsesplošna javna razprava o segrevanju ozračja in zahteve po drastičnem zmanjšanju emisij CO₂ sili proizvajalce avtomobilov, da čim prej razvijejo nove avtomobile z manjšo porabo bencina in zmanjšanimi emisijami. Povečanje specifične moči in povišanje tlakov v zmanjšanim motorjih z notranjim izgorevanjem vodi do povišanja temperatur izpušnih plinov. Te se pri dizelskih motorjih gibljejo med 850 °C in 900 °C. Pri bencinskih motorjih s turbopolnilniki pa se omenja celo vrednost 1050 °C [1]. Zamisel zmanjševanja velikosti motorjev vodi nadalje v povečanje prenosa energije glede na prostornino valja.

Ta dejanski razvoj motorjev z notranjim izgorevanjem vodi do občutnega povečanja toplotnih obremenitev sestavnih delov, ki so v stiku z izpušnimi plini, kot so izpušni sistemi ali turbopolnilniki. Standardni materiali so dosegli svoje meje, zato je treba priti do novih rešitev.

V splošnem so temperature sestavnih delov motorja 50 do 80 °C nižje od temperatur izpušnih plinov, toda na izpostavljenih mestih – tj. na tankostenskih delih, ki so z več strani v stiku z izpušnimi plini, ali na toplotno izoliranih delih se lahko njihova temperatura zelo približa temperaturam izpušnih plinov.

1.1 Materiali za izpušne sisteme

Za te namene se uporabljajo v odvisnosti od temperatur izpušnih plinov različni materiali. Pri izpušnih sistemih tekmujejo med seboj konstrukcije iz varjene jeklene pločevine in ulitki, medtem ko so ohišja turbopolnilnikov v skoraj vseh primerih ulita. Za sestavne dele teh se do temperatur 820 °C uporabljajo feritna litina s 4 – 5 % silicija in 0,5 – 1,0 Mo, litina z vermikularnih grafitom

1 Introduction

The omnipresent public discussion about climate warming and the required drastic reduction of CO₂ emissions forces the car producers to develop new cars with lower gasoline consumption and reduced emissions as soon as possible. The raise of specific power and mean pressure of downsized engines leads to a raise of exhaust temperatures. These are in the region of 850 to 900 °C for Diesel engines. For turbocharged gasoline engines, a value of 1,050 °C is mentioned [1]. Furthermore, the downsizing concept leads to rising transferred energy amounts with respect to the cylinder volume.

These actual engine developments lead to a remarkable increase of thermal demands of components which are in contact with exhaust gas, such as exhaust manifolds or turbochargers. Conventional materials reach their limits, and new solutions have to be elaborated.

In general, the component temperatures remain 50 to 80 K below the exhaust gas temperature, but at exposed positions - e.g. thin walled areas in contact with exhaust gas from several sides, or areas with thermal insulation - the temperature of the material can reach values close to these of the exhaust gas.

1.1 Materials for exhaust applications

Depending on exhaust temperatures, various materials are used for these applications. For exhaust manifolds, welded steel sheet constructions are in competition with castings, while turbocharger housings are cast in almost all cases. Ferritic cast iron with 4 to 5 % Si and 0.5 - 1.0 % Mo, compacted graphite cast iron (GJV) as well as spheroidal graphite (GJS) is used

(GJV) kot tudi litina s kroglastim grafitom (GJS). Poleg standardnih SiMo-materialov se dobijo tudi različice z dodatkom 0,5 – 1,0 % Cr ali Ni (SiMoCr ali SiMoNi-litina), ki so bolj odporne proti oksidaciji [2]. Pri temperaturah izpušnih plinov do 950 °C se uporabljajo ali avstenitne duktilne litine kot GJSA-XNiSiCr35-5-2, znane tudi kot Ni-Resist D5S, ali feritna jekla, močno legirana s kromom. Pri temperaturah do 1000 °C lahko izpolnjujejo zahteve le močno legirana avstenitna jekla. Pri še višjih temperaturah pa se morajo uporabljati zlitine na osnovi niklja.

Boljše vrste materialov pogosto potrebujejo večje količine zlitinskih elementov. Predvsem nikelj, katerega cena je na borzah v bližnji preteklosti zelo nihala, se uporablja v velikih količinah. Z ekonomskega vidika je bolje razvijati manj legirane in zato cenejše materiale za uporabo pri povišanih temperaturah.

Glede na ta dejstva se je podjetje Georg Fischer pred več leti odločilo, da se bo osredotočilo na razvoj feritnih SiMo-materialov in s tem raztegnilo področje uporabe takšnih materialov tudi na višje temperature. Cilj tega razvoja je bil doseči lastnosti, ki bi bile blizu litini GJSA-XNiSiCr35-5-2, ki se uporablja predvsem za sestavne dele, ki vzdržijo najvišje temperature med 820 °C in 930 °C.

1.2 Zahteve za materiale za izpušne sisteme

Materiali za izpušne sisteme in ohišja za turbopolnilnike so izpostavljeni težkim toplotnim ter termomehanskim obremenitvam. Najpomembnejše lastnosti takšnih materialov so zato [3]:

- odpornost proti oksidaciji,
- natezna trdnost, predvsem pri povišanih temperaturah,
- temperaturna stabilnost mikrostrukture,

for component temperatures up to 820 °C. Along with standard SiMo materials, variants with additional Cr or Ni in the range of 0.5 to 1.0 % are available (SiMoCr and SiMoNi, respectively), which exhibit a better scaling resistance [2]. At higher exhaust temperatures up to 950 °C, either austenitic ductile iron grades, such as GJSA-XNiSiCr35-5-2, also known as Ni-Resist D5S, or highly Cr alloyed ferritic steels are used. At temperatures up to 1'000 °C, only highly alloyed austenitic steels are able to fulfil the requirements. At even higher temperatures, Ni-based alloys have to be used.

Superior grade materials often need a higher amount of alloying elements. Thus, material costs rise continuously with rising temperatures of the application. Especially nickel, which exhibited a volatile market price in the near past, is used in large amounts. From an economic point of view, it is advantageous to develop lower alloyed and therefore cheaper materials to be used at elevated temperatures.

Based on these facts, the company Georg Fischer decided to focus on the development of ferritic SiMo materials several years ago, and thus to extend the range of use of such a material to higher temperatures. The aim of this development was to attain properties close to GJSA-XNiSiCr35-5-2, which is predominantly used at maximum component temperatures between 820 °C and 930 °C.

1.2 Requirements for materials for exhaust applications

Materials for exhaust manifolds and turbocharger housings are exposed to heavy thermal and

thermo-mechanical loads. The most important properties of such materials are therefore [3]:

- toplotna utrujenost.

Toplotna utrujenost ali odpornost proti termomehanskemu utrujanju ni neodvisna lastnost materiala, ampak lastnost, ki je odvisna od številnih značilnosti materiala. Pri vsakem ciklu segrevanja sestavnega dela nastanejo temperaturni gradienti, ki povzročajo napetosti zaradi različnega toplotnega širjenja na različnih mestih in pri različnih temperaturah. Pri medsebojnem sestavljanju teh delov, npr. pri glavi motorja, je prosto toplotno širjenje omejeno, kar povzroča dodatne napetosti.

2 Zgodovina razvoja feritne duktilne litine za temperature nad 800 °C

Si-Mo duktilna litina je znana že več kot 30 let – leta 1980 je podjetje Georg Fischer delilo dokumentacijo o takšnih materialih [4]. V poznih osemdesetih letih so francoski znanstveniki veliko delali, da bi z dodajanjem aluminija izdelali duktilno litino, uporabno pri višjih temperaturah [5,6]. Zaradi ogromnih težav, ker ima tak material veliko nagnjenost k tvorbi oksidnih žlinder med litjem, razvoj ni dosegel uspehov na tržišču. Zato do sedaj še ni poznana nobena industrijska uporaba takega materiala. Konec devetdesetih let si je GF prizadeval nadaljevati delo Francozov in razvil patentirani material 'SiMo1000®' [7]. Leta 2008 je bilo možno z nadaljnjim

- Scaling resistance
- Tensile strength, especially at elevated temperatures
- Temperature stability of the microstructure
- Thermal fatigue

Thermal fatigue or the resistance against thermo-mechanical fatigue are not singular material properties, but depend on various material characteristics. With each heating cycle of the component, temperature gradients are created which induce tension due to different thermal elongation at different positions and temperatures respectively. By mounting this component to another, such as the cylinder head, free thermal expansion is restrained, causing additional stress.

2 History of the development of ferritic ductile iron for temperatures above 800 °C

Si-Mo-alloyed ductile iron is known since more than 30 years - e.g., in 1980, the company Georg Fischer distributed documentation about such materials [4]. In the late 80s, French scientists did a lot of work to find a ductile iron material applicable at higher temperatures, adding some Aluminium [5,6]. Due to massive problems caused by the very high tendency



Slika 1: Primer serijskega izpušnega sistema in ohišja turbopolnilnika, ki sta izdelana iz GJS SiMo1000®

Figure 1: Examples of a serial exhaust manifold and turbocharger housings made of GJS SiMo1000®.

razvojem tega materiala, predvsem postopka litja, začeti s serijsko proizvodnjo izpušnih sistemov in ohišij turbopolnilnikov za temperature izpušnih plinov blizu 900 °C [8]. Slika 1 prikazuje takšne dele, izdelane iz duktilne litine 'SiMo1000®', za uporabo pri visokih temperaturah.

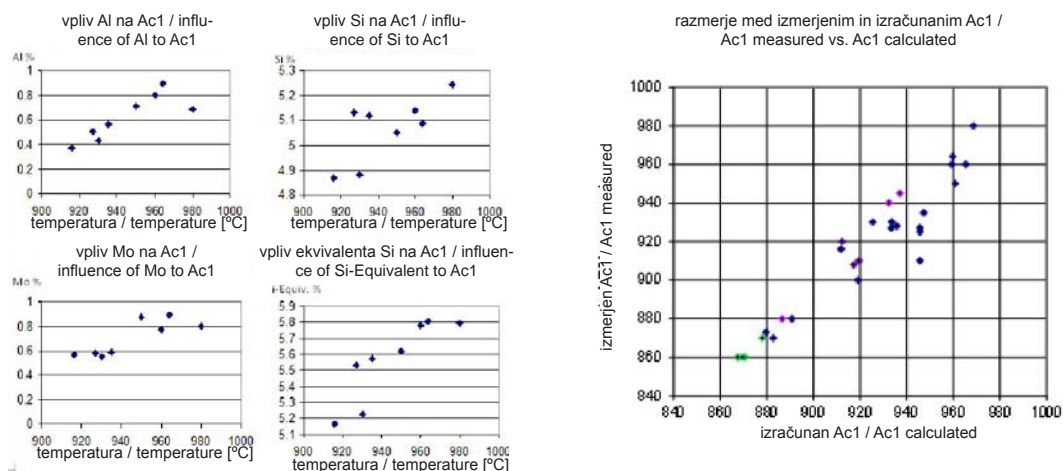
Razvoj materiala se ni zaključil s serijsko proizvodnjo. Prispevek ponuja izveček razprave o najnovejših aktivnostih in metodah, kako izboljšati visokotemperaturne lastnosti feritne duktilne litine.

3 Zadnji razvoj SiMo-materialov v GF

Uliti so bili vzorci z različnimi deleži Si, Al, Ni in Mo. Dilatometrsko so se ugotavljale temperature pretvorbe ferit-avstenit v teh materialih in ocenjevali vplivi zlitinskih elementov na temperaturo pretvorbe. Pokazalo se je, da molibden, silicij in aluminij povišajo temperaturo transformacije [9]. Kombinacija silicija in aluminija s silicijevim ekvivalentom ($Si_{ekv} = \% Si + 0.8 \cdot \% Al$)

of this material to build oxide slags during the pouring process, the development was not successfully introduced on the market. No industrial application of this material is known as yet. At the end of the 90s, GF pursued the French work and developed the patented material 'SiMo1000®' [7]. In 2008, with further development of this material and especially the casting process, it was possible to go into serial production of exhaust manifolds and turbocharger housings for exhaust temperatures close to 900 °C [8]. Fig. 1 shows such parts, produced with SiMo1000® ductile iron for HT applications.

Material development has not ended with the start of serial production. In this paper, the most recent activities are summarised, and methods to improve high temperature properties of ferritic ductile iron are discussed.



Slika 2 (levo) in **slika 3** (desno): Vpliv različnih zlitinskih elementov na temperaturo pretvorbe ferit-avstenit in korelacija med izračunanimi in izmerjenimi vrednostmi

Figure 2 (left) and **3** (right): Influence of different alloying elements on the ferrite/austenite transformation temperature, and correlation between calculated and measured values

daje mnogo boljšo korelacijo s temperaturo pretvorbe kot posamezna elementa (slika 2).

Z večkratno regresijsko analizo se je razvil obrazec za napovedovanje temperature pretvorbe. Primerjavo izračunanih in izmerjenih temperatur pretvorbe kaže slika 3.

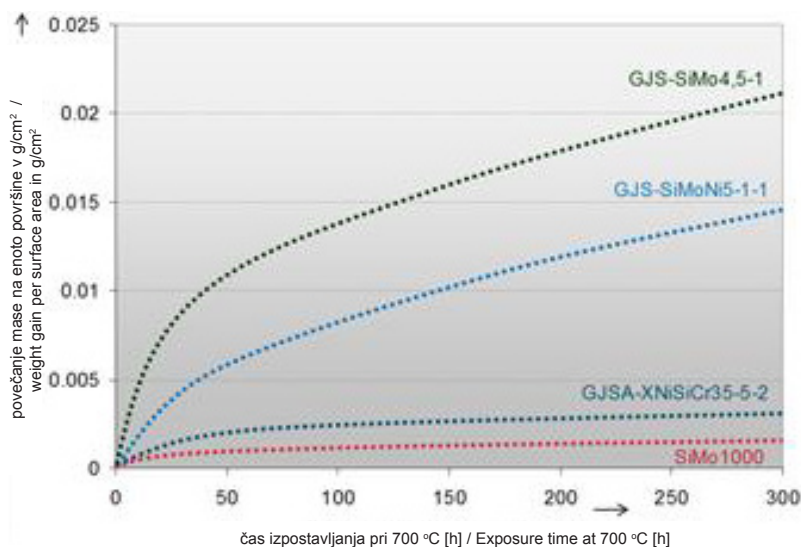
Vendar je temperatura pretvorb ferit-avstenit, ki je višja od temperature izpušnih plinov, le eden od kriterijev. Glede uporabnosti materiala je treba upoštevati še trdnost, obnašanje pri lezenju ter oksidacijo pri povišanih temperaturah. Obnašanje pri oksidaciji se preskuša empirično z različnimi kemičnimi sestavami ter merjenji razmerij prirastek mase-izguba mase in debeline oksidne plasti pri povišanih temperaturah. Slika 4 kaže tvorbo oksidne plasti na različnih materialih. V primerjavi s klasičnimi materiali ima SiMo1000® mnogo boljšo odpornost proti oksidaciji pri visokih temperaturah [2].

3 Recent SiMo materials development at GF

Samples with variations in Si, Al, Ni and Mo content were cast. Their ferrite/austenite transformation temperatures were measured by dilatometry, and the influence of the alloying elements on the transformation temperature was evaluated. Molybdenum, Silicon and Aluminium were shown to increase the transformation temperature [9]. The combination of Silicon and Aluminium by a Si-equivalent ($\text{Si-eq.} = \% \text{ Si} + 0.8 \cdot \% \text{ Al}$) results in a much better correlation to the transformation temperature than with the two elements separately (Fig. 2).

Using multiple regression analysis, a formula to predict transformation temperatures was developed. A comparison of calculated and measured transformation temperatures is shown in Fig. 3.

However, a ferrite/austenite transformation temperature, which is higher than the exhaust gas temperature is only one criterion. For the applicability of a material, strength, creeping behaviour and scaling at elevated temperature have to be



Slika 4: Tvorba oksidne plasti na različnih visokotemperaturnih materialih v mirujočem zraku pri 700 °C

Figure 4: Scaling of different high temperature materials in unmoved air at 700 °C

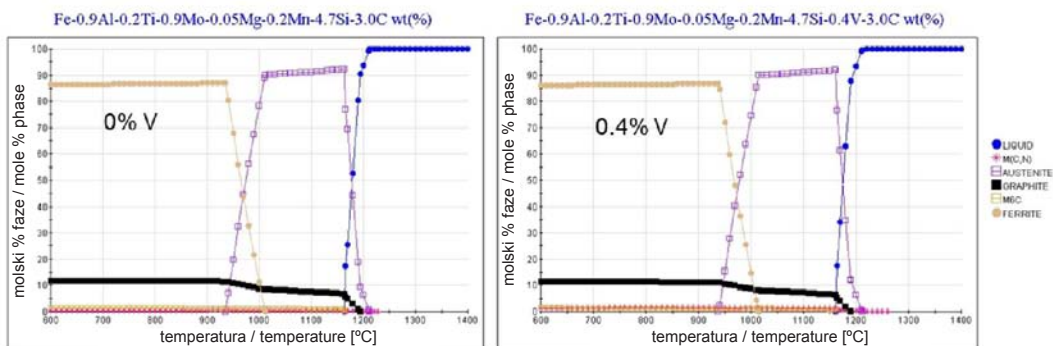
3.1 S simulacijo podprti razvoj materiala

Danes se simulacijska orodja uporabljajo za napovedovanje temperatur pretvorbe, izločanja in tvorbe faz za izboljšanje trdnosti in odpornosti proti lezenju pri visokih temperaturah. Sliki 5 in 6 kažeta primerjavo simulacijskih rezultatov pri uporabi programske opreme JMatPro [10]. Narejena je bila simulacija pri dveh kemičnih sestavah z različnima deležema vanadija, enkrat brez vanadija, drugič z 0,4 mas. % V [11]. Dodatek vanadija naj bi pripeljal do izločanja karbidov vrste VC iz trdne raztopine [12]. Simulacija je pokazala, da je temperatura pretvorbe ferit-avstenit pri 935 °C, če ni prisotnega vanadija, in 938 °C, kadar je prisotnega 0,4 mas. % V. Dodatek 0,4 % V povzroči povečanje M(C,N) z 0,42 % na 1,2 % in zmanjšanje z 2,21 % M_6C na 0,86 % M(C,N). M(C,N) je sestavljen iz VC, medtem ko M_6C vsebuje iz Mo_6C in Fe_6C [12]. Poskus je pokazal, da se je povečala celotna količina karbidov v mikrostrukturi, kot je bilo napovedano s simulacijo (sliki 7 in 8).

considered. The scaling behaviour is tested empirically by varying chemical composition and measuring weight gain/loss and oxide layer thickness at elevated temperatures. Fig. 4 shows the scaling of different materials: Compared to conventional materials, SiMo1000® exhibits a much better resistance to high temperature oxidation [2].

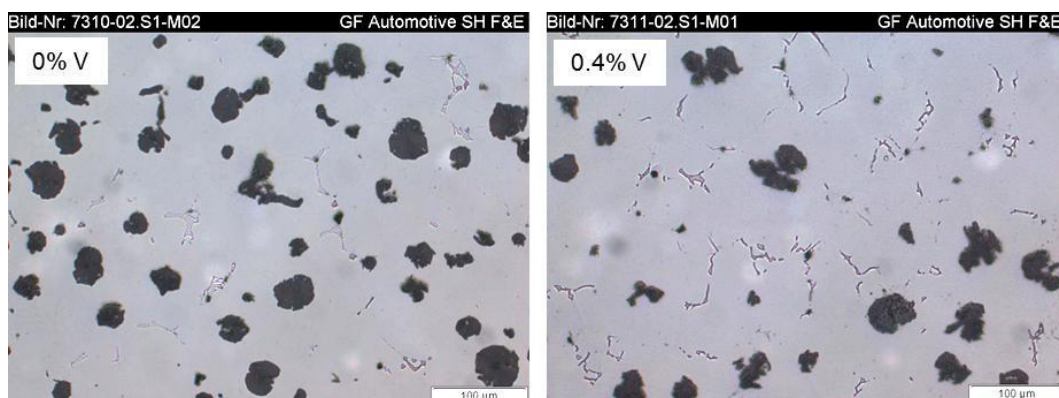
3.1 Simulation assisted material development

Nowadays, simulation tools are used to predict transition temperatures, precipitations and phases to improve high temperature strength and creep resistance. Fig. 5 and 6 show a comparison of simulation results using the software JMatPro [10]. Two chemical compositions with variations in the Vanadium content were simulated, one without V, the other one with 0.4 V (mass fraction, %) [11]. The addition of V should lead to carbide formation from solid solution with VC stoichiometry [12]. The simulation shows a ferrite/austenite transformation temperature of 935 °C without V and 938 °C with 0.4 % V. The addition of 0.4 % V leads



Slika 5 (levo) in **slika 6** (desno): Simulacija dveh sestav z različnima deležema vanadija z JMatPro: slika 5 brez V, slika 6 z 0.4 % V

Figure 5 (left) and **6** (right): JMatPro simulation of two compositions with variations in the Vanadium content: Fig. 5 without, Fig. 6 with 0.4 % V



Slika 7 (levo) in **slika 8** (desno): Mikroposnetka različic brez V (levo) in z 0.4 % V (desno)

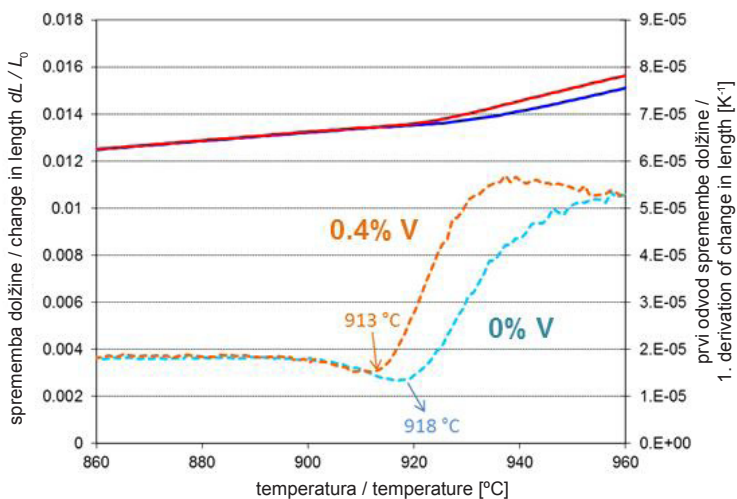
Figure 7 (left) and **8** (right): Micrographs of the two variants without V (left) and with 0.4 % V (right)

Vendar simulacija ne more vedno nadomestiti poskusa: glede na simulacijo naj bi bila temperatura pretvorbe ferit-avstenit pri litini z 0,4 % V 938 °C v primerjavi z 935 °C pri litini brez V. Dilatometrijski meritev prikazuje slika 9. 0,4 % V zniža temperaturo pretvorbe za 5 °C, namesto da bi se povišala za 3 °C. Vendar sta obe spremembi temperature, pri simulaciji in poskusu, nepomembni.

Večji delež karbidov pri vanadijevi duktilni litini SiMo1000® pomeni povečanje

to a raise of 0.42 % M(C, N) to 1.2 % and a drop of 2.21 % M₆C to 0.86 %. M(C,N) consists of VC, whereas M₆C consists of Mo₆C and Fe₆C [12]. The experiment results in an increased total amount of carbides in the microstructure, as predicted by the simulation (Fig. 7 and 8).

However, not every simulation result can be reproduced by experiment: According to the simulation, the variant with 0.4 % V should exhibit a ferrite/austenite transformation temperature of 938 °C, compared to 935 °C



Slika 9: Dilatometrijski meritev, ki nakazuje temperaturo pretvorbe ferit-avstenit

Figure 9: Dilatometer measurement indicating the ferrite/austenite transformation temperature

natezne trdnosti pri 800 °C za 20 % (z 52 MPa na 63 MPa). Delež karbidov, ki je manjši od 1 %, tako učinkovito poveča visokotemperaturno trdnost (slika 10).

Ena od omejitev simulacijskih metod je pomanjkanje podatkov o nekaterih zanimivih elementih, npr. o Co, ki utrjuje trdno raztopino. Tega do sedaj uporabljana programska oprema ne upošteva, bo pa to vključeno v podatkovno bazo programske opreme v prihodnje.

4 Nove duktilne litine za uporabo pri visokih temperaturah: materiali in metode

Obstaja manj načinov, kako povečati trdnost pri temperaturah $>0.4 \cdot T_m$ kot pri sobni temperaturi. Nasprotno, Hall-Petchov mehanizem za drobnozrnato strukturo ni samo neuporaben, po njem ima udrobnitev mikrostrukture celo nasproten učinek na odpornost proti lezenju. Utrjevanje z dislokacijami zmanjšuje podaljšek pri lezenju in lahko pripelje celo do rekristalizacije. Utrjevanje s trdno raztopino je uspešna metoda, ki pa ima omejitve. Edina zanesljiva metoda za izboljšanje visokotemperaturnih mehanskih lastnosti pri T_m je utrjevanje z

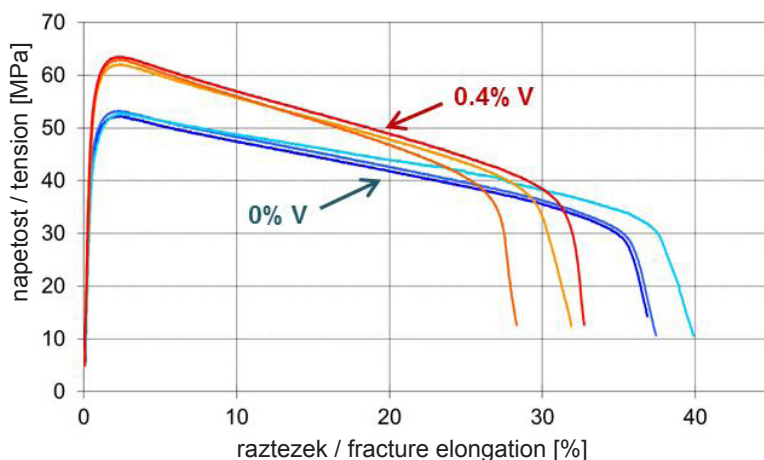
without V. The dilatometer measurement is shown in Fig. 9. 0.4 % V reduces the ferrite/austenite transformation temperature by 5 K instead of increasing it by 3 K. However, both temperature changes - in simulation and experiment - are insignificant.

The higher carbide content of V-alloyed SiMo1000® ductile iron leads to an increase of tensile strength of 20 % at 800 °C (from 52 MPa to 63 MPa). A carbide content of less than 1 % thus effectively increases high temperature strength (Fig. 10).

One limitation of simulation methods is the lack of data on some elements of interest, e.g. the solid solution strengthening element Co. So far, it has not found consideration by the software used, but might be included in the software's database in the future.

4 New ferritic ductile iron grades for high temperature applications: materials and methods

There are less ways to improve strength at temperatures $>0.4 \cdot T_m$ than at ambient conditions. On the contrary, the Hall-Petch mechanism of a fine grained structure is not only inoperative, but grain refinement has adverse effects on



Slika 10: Rezultat nateznih preskusov pri 800 °C: občutno višja natezna trdnost pri 0,4 % V (merjeno na ÖGI (avstrijski livarski inštitut), www.ogi.at, s hitrostjo 0,3 mm/min, po ISO 6892-2:2011)

Figure 10: Result of tensile tests at 800 °C: significantly higher tensile strength with 0.4 % V (measured at ÖGI, www.ogi.at, with a speed of 0.3 mm/min, according to ISO 6892-2:2011)

delci [13]. Dodatno se lahko s povišanjem T_m potisne visokotemperaturne lastnosti na višjo raven.

Z upoštevanjem teh osnov so bile izdelane štiri sestave z različnimi deleži Si, Al, Co in V, da bi se izboljšala uporabnost SiMo duktilne litine pri visokih temperaturah. Temperature pretvorbe ferit-avstenit so bil merjene z vakuumsko tesnim dilatometrom z vodoravnim pritiskanjem vrste Netsch DIL402C pri hitrosti segrevanja in ohlajevanja 4 K/min. Visokotemperaturni natezni preskusi so bili narejeni v osrednjem laboratoriju GF z walter+bai statičnim preskuševalnim strojem. Uporabljeni so bili preskušanci po DIN 50125 oblike B z 10 mm premera, segrevani v uporovni peči in obremenjevani s hitrostjo 0,2 mm/min po ISO 6892-2:2011.

4.1 Sestava taline

Element Co je znan, da stabilizira ferit in v trdni raztopini poviša mehanske lastnosti ferita. Dodatek Co SiMo-litini bi lahko bil način, kako povišati temperaturo pretvorbe ferit-avstenit in s tem visokotemperaturno trdnost. Na žalost naša simulacijska orodja niso imela v programu kobalta. Da bi se ugotovil vpliv Co, se je njegov učinek na temperaturo pretvorbe in s tem na visokotemperaturno trdnost ugotavljal s poskusi. Izdelana talina 1 je imela sestavo: 2.5 % C, 5.2 % Si, 0.25 % Mn, 0.21 % Cu, 0.6 % Al, 1.8 % Co. Sestava taline 2 je bila: 2.5 % C, 5.2 % Si, 0.24 % Mn, 0.21 % Cu, 0.4 % Al, 4.0 % Co.

S ciljanjem na temperaturo pretvorbe ferit-avstenit nad 1000 oC se je delež aluminija in silicija povečal glede na prejšnje sestave ter na serijsko proizvodnjo. Tako sta bili izdelani dve dodatni talini. Talina 3 je imela sestavo: 2.5 % C, 5.3 % Si, 0.27 % Mn, 0.2 % Cu, 1.96 % Al, 0.15 % Cr, 0.42 % V, 1.8 % Co. in talina 4 sestavo: 2.5 % C,

creep resistance. Dislocation hardening reduces creep elongation and may even lead to recrystallization. Strengthening by solid solution is a variable method with restrictions. The only secure method to increase high temperature mechanical properties at constant T_m is via particle strengthening [13]. Furthermore, one can try to increase T_m to push HT properties to higher levels.

With these basic principles at hand, four compositions with variations in Si, Al, Co and V contents were produced with the aim to enhance HT-performance of ferritic SiMo ductile iron. Ferrite/austenite transformation temperatures were measured using a Netsch DIL402C vacuum-tight, horizontal pushrod dilatometer with heating/cooling rates of 4 K/min. HT tensile tests were performed at GF central lab with a 600 kN walter+bai static universal testing machine on DIN 50125 Form B specimens with 10 mm diameter using a resistive furnace and testing rate of 0.2 mm/min, according to ISO 6892-2:2011.

4.1 Melt compositions

The element Cobalt is known as a ferrite stabilizer and increases the mechanical properties of ferrite by solid solution. Adding Co to a SiMo iron could thus be a means to raise ferrite/austenite transformation temperature and thus high temperature strength. Unfortunately, our simulation tools have no Co implemented. To characterize the influence of Co, its effect on transformation temperature and high temperature strength was measured empirically. Melt No. 1 was prepared with the following composition: 2.5 % C, 5.2 % Si, 0.25 % Mn, 0.21 % Cu, 0.6 % Al, 1.8 % Co. The composition of melt No. 2 was: 2.5 % C, 5.2 % Si, 0.24 % Mn, 0.21 % Cu, 0.4 % Al, 4.0 % Co.

5.5 % Si, 0.27 % Mn, 0.2 % Cu, 2.91 % Al, 0.15 % Cr, 0.40 % V, 1.7 % Co.

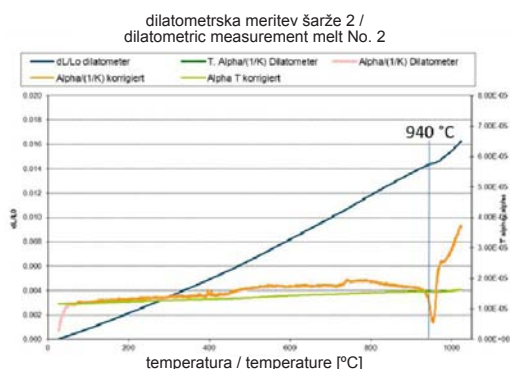
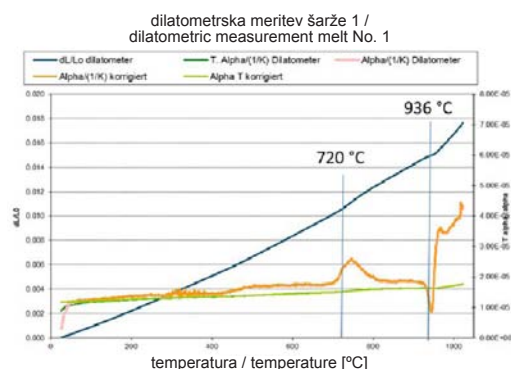
5 Rezultati: temperature pretvorbe ferit-avstenit in mehanske lastnosti pri visokih temperaturah

Pozitiven učinek vanadija na visokotemperaturne lastnosti s tvorbo karbidov po strjevanju je bil prikazan že prej. Njegov vpliv na temperaturo pretvorbe ferit-avstenit je nepomemben [11]. Z zgoraj omenjenim empiričnim obrazcem sta bili izračunani temperaturi pretvorbe ferit-avstenit okoli 930 °C in 920 °C za talino 1 oz. talino 2 (10 % nižja zaradi vpliva Al) – brez upoštevanja Co v izračunu. Razlika med izračunano in izmerjeno temperature pretvorbe se je povečala s plus 6 na plus 10 °C s povečanjem deleža Co z 1,8 % na 4,0 %. Očitno ima Co le manjši učinek na povišanje merjene temperature pretvorbe (sliki 11 in 12). Čeprav tvori trdno raztopino, Co nima občutnega vpliva na visokotemperaturno trdnost (slika 13). Natezni trdnosti taline 1 z

Aiming at ferrite/austenite transformation temperature above 1000 °C, the silicon and aluminium contents were increased compared to previous compositions and to serial production. Two further melts were thus prepared: Melt No. 3 with the following composition: 2.5 % C, 5.3 % Si, 0.27 % Mn, 0.2 % Cu, 1.96 % Al, 0.15 % Cr, 0.42 % V, 1.8 % Co. And melt No. 4 with: 2.5 % C, 5.5 % Si, 0.27 % Mn, 0.2 % Cu, 2.91 % Al, 0.15 % Cr, 0.40 % V, 1.7 % Co.

5 Results: Ferrite/austenite transformation temperatures and mechanical properties at high temperatures

The positive effect of vanadium on HT properties via the formation of carbides after solidification was shown above. Its influence on ferrite/austenite transformation temperature is insignificant [11]. Using the empirical formula mentioned above, the calculated ferrite/austenite transformation temperature was around 930 °C and 920 °C for melt No. 1 and melt No. 2, respectively



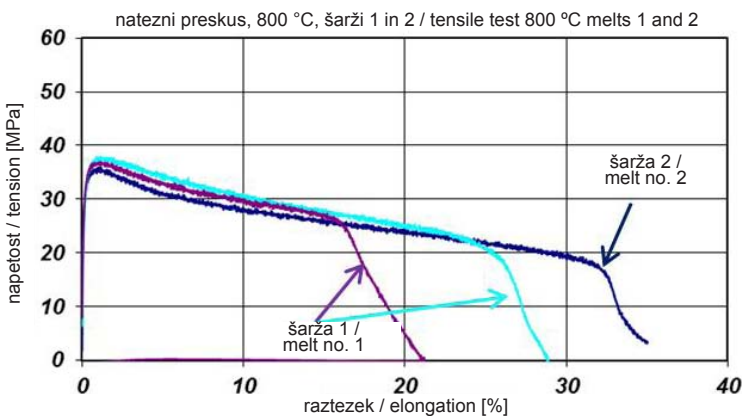
Slika 11 (levo) in **slika 12** (desno): Dilatometrijske meritve nakazujejo temperaturo transformacije ferit-avstenit vzorca iz taline z 1,8 % Co in taline 2 z 4,0 % Co. Prva konica pri vzorcu 1 pri 720 °C je verjetno posledica raztapljanja preostalega perlit

Figure 11 (left) and **12** (right): Dilatometer measurements indicating the ferrite/austenite- transformation temperature of melt No. 1 with 1.8 % Co, and melt No. 2 with 4.0 % Co. The first peak of melt 1 at 720 °C is probably due to solution of remaining pearlite

1,8 % in taline 2 z 4,0 % Co sta bili 36 MPa oz. 38 MPa.

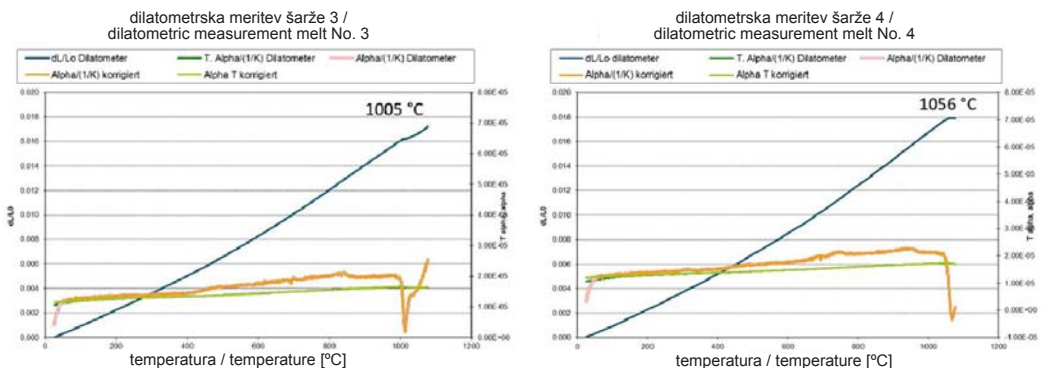
Empirični obrazec je dal vrednosti za temperaturi pretvorbe ferit-avstenit 988 °C in 1040 °C za šarži 3 in 4 (predvsem zaradi vpliva Al) – zopet brez upoštevanja kobalta. Dilatometrijske meritve so potrdile, da je vpliv kobalta na temperaturo pretvorbe zanemarljiv, pokazal pa se je občuten vpliv silicija in aluminija. Z 5,5 % Si in 2,9 % Al je možno doseči temperature pretvorbe precej nad 1000 °C (sliki 14 in 15). Natezne trdnosti pri 800 °C so se povečale s povišanjem

(10 % lower due to the influence of Al) - without considering cobalt in the calculation. The difference between calculated and measured transformation temperature is increased from plus 6 to plus 10 K by raising the cobalt content from 1.8 to 4.0 %. Apparently, Co has a minor raising effect on the measured transformation temperature (Fig. 11 and 12). Although it forms a solid solution, Co does not have a significant effect on HT strength (Fig. 13). The tensile strength of melt No. 1 with 1.8 % Co and



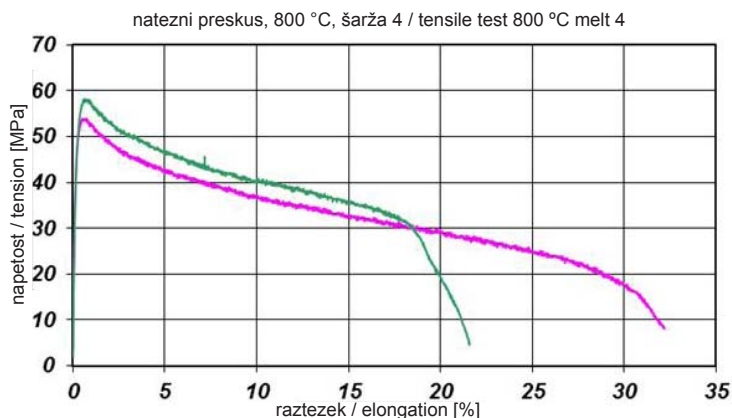
Slika 13: Natezni preskusi vzorcev iz talin 1 in 2 pri 800 °C

Figure 13: Tensile tests of melts No. 1 and 2 at 800 °C



Slika 14 (levo) in **slika 15** (desno): Dilatometrijske meritve nakazujejo temperaturo pretvorbe ferit-avstenit za vzorec iz taline 3 z 5,3 % Si in 1,96 % Al ter taline 4 z 5,5 % Si in 2,91 % Al

Fig. 14 (left) and **15** (right): Dilatometer measurements indicating the ferrite/austenite transformation temperature of melt No. 3 with 5.3 % Si and 1.96 % Al, and melt No. 4 with 5.5 % Si and 2.91 % Al



Slika 16: Natezni preskusi vzorcev iz šarže 4 z 5,5 % Si in 2,91 % Al pri 800 °C

Figure 16: Tensile tests of melt No. 4 with 5.5 % Si and 2.9 % Al at 800 °C

temperature pretvorbe in trdnosti trdne raztopine zaradi povečanja deleža tako Si kot Al, kar se vidi na sliki 16. Natezni trdnosti sta bili 54 MPa in 58 MPa. Za šaržo 3 manjkajo vrednosti preskusa strojne obdelave.

6 Razprava

Pričakovano utrjanje pri visokih temperaturah z dodajanjem kobalta se ni zgodilo, čeprav ima trdna raztopina utrjevalni učinek pri sobni temperaturi. Drugi elementi, ki tudi utrjujejo trdno raztopino železa pri sobni temperaturi (npr. Si), pa pripeljejo do velike trdnosti pri povišanih temperaturah. To lahko razložijo razlike med atomskimi polmeri, ki so 30 pm med Fe in Si, 15 pm med Fe in Al ter samo 5 pm med Fe in Co. Zato je popačenje mreže, ki jo povzroči Si, večje in s tem tudi očitno bolj učinkovito pri visokih temperaturah. Z drugimi besedami, energija napake zloga se mogoče s kobaltom ne zmanjša dovolj, da bi vplivala na visokotemperaturne lastnosti.

Poleg tega Si in Al povišata temperaturo transformacije ferit-avstenit. Zato ni možno kvantificirati očitnega povečanja visokotemperaturne trdnosti samo s trdno raztopino. S spreminjanjem deleža teh elementov se predvidoma dobi povezan

melt No. 2 with 4.0 % Co is 36 MPa and 38 MPa, respectively.

The empirical formula yields ferrite/austenite transformation temperatures of 988 °C and 1'040 °C for melts No. 3 and No. 4, respectively (mainly due to the influence of Al) - again without considering cobalt. Dilatometer measurements confirm that the influence of cobalt on the transformation temperature is negligible, but that there is a significant influence of silicon and aluminium. With 5.5 % Si and 2.9 % Al, it is possible to attain transformation temperatures well above 1000 °C (Fig. 14 and 15). Tensile strengths at 800 °C were increased by raising the transformation temperature and solid solution strength with increasing both the Si and Al contents, as depicted in Fig. 16. The tensile strength is 54 and 58 MPa. No values of melt No. 3 are available due to machining issues.

6 Discussion

The anticipated strengthening by the addition of cobalt did not happen at high temperatures, although it does have solid solution strengthening effects at ambient temperatures. Other elements however, which also strengthen the solid solution of

učinek utrjanja s trdno raztopino in spreminjanja temperature pretvorbe ferit-avstenit. Majhno povečanje temperature solidus, ko se zlitini dodajo ti elementi, ima verjetno samo manjšo vlogo pri visokotemperaturnih mehanskih lastnostih preiskovanih materialov.

7 Sklepi

Povezani učinki utrjanja z delci in s trdno raztopino ter povišana temperatura pretvorbe ferit-avstenit omogočajo najboljše visokotemperaturne mehanske lastnosti. S pozitivnim učinkom Si, Al in Mo na odpornost proti oksidaciji se bo bodoči razvoj materialov osredotočil na optimizacijo sestav, predstavljenih tukaj, in iskanju drugih načinov, da se izrabi preje omenjene mehanizme utrjanja (npr. z dodajanjem karbidotvornih in/alinitridotvornih elementov, kot sta Cr ali Ti).

Kobalt tvori v feritu trdno raztopino. Vendar dodajanje tega elementa ne izboljša visokotemperaturnih lastnosti materialov. Ob upoštevanju teh rezultatov je pomen kobalta kot zlitinskega elementa zanemarljiv tako s tehnološkega kot trgovskega vidika.

Duktilne litine s povečanimi deleži Si, Al, Cr, V, Ti, N imajo velik potencial pri izdelavi novih duktilnih litin v ulitem stanju ob le zmerno povečanih stroških za zlitinske elemente glede na klasično SiMo-litino, a s temperaturami pretvorbe ferit-avstenit nad 1000 °C in visokotemperaturno trdnostjo, ki je primerljiva z dražjimi avstenitnimi duktilnimi litinami. Ta novi material predstavlja potencial za uporabo pri izdelavi izpušnih sistemov in ohišij turopolnilnikov obremenjenih bencinskih motorjev z notranjim izgrevanjem.

iron at room temperature (e.g. silicon) do lead to higher strength at elevated temperatures. This can be explained by the differences of atomic radii, which are 30 pm between Fe and Si, 15 pm between Fe and Al, but only 5 pm between Fe and Co. Therefore, lattice distortions provoked by Si are more severe and apparently much more effective at high temperatures. In other words, the stacking fault energy might not be reduced enough by the element cobalt in order to affect HT properties.

However, Si and Al also increase the ferrite/austenite transformation temperature. It is therefore not possible to quantify the apparent increase of high temperature strength via solid solution only. When varying these elements, a combined effect of solid solution strengthening and changes in ferrite/austenite transformation temperature is thus assumed. The slight increase of solidus temperature when adding these elements to the alloy is believed to play only a minor role for the examined materials' HT mechanical properties.

7 Conclusions

The combined effects of particle hardening, solid solution strengthening and increased ferrite/austenite transformation temperature yield the best HT mechanical properties. With the positive effect of Si, Al and Mo on scaling resistance, future material development will focus on optimisation of the compositions presented here, and finding other ways to employ the aforementioned strengthening mechanisms (e.g. adding elements to provoke carbide and/or nitride formation, such as Cr or Ti).

Cobalt forms a solid solution in ferrite. However, the addition of this element does not increase the material's HT properties. Considering these results, the importance

Zahvale

Avtorji se zahvaljujejo gdč. Franceski Friso za dilatometriške meritve in so hvaležni g. Rudolfu Kubitzu za metalurško ovrednotenje poskusov.

of Co as an alloying element is negligible both from technological and commercial points of view.

Ductile iron materials with increased Si-, Al-, Cr-, V-, Ti-, N-contents show a big potential for a new as cast ductile iron with moderately higher element costs compared to conventional SiMo, but with a ferrite/austenite transformation temperature above 1000 °C and high temperature strength similar to the much more expensive austenitic ductile iron. This new material provides a potential for being used for exhaust manifolds and turbocharger housings of charged gasoline engines.

Acknowledgements

The authors would like to thank Ms. Francesca Friso for performing dilatometer measurements. Mr. Rudolf Kubitz is gratefully acknowledged for metallurgic evaluations of the experiments.

Viri

1. R. Krebs et al.: MTZ 66, 11, 2005, 844-856
2. SiMo1000 Verzunderung: Georg Fischer Automotive AG, Dec. 19th, 2008. (internal documentation) on SiMo1000 scaling
3. W. Kallen, K. Röhrig, konstruieren + giessen, 26, 2001, 17-39.
4. Warmfeste Werkstoffe (SiMo5.1): Georg Fischer Automotive AG, Oct. 24th, 1980. (internal documentation)
5. European patent EP 0 534 850, registered 24.9.1992
6. A. Reynaud, J.-L. Roberge, Fonderie – fondeur d'aujourd'hui, 182, 1999, 37-41.
7. European patent EP 1 386 976, registered 30.04.2003
8. S. Kleiner, Giesserei, 97, 2010, 28-34.
9. Schmelzversuche GJS SiMo1000: Georg Fischer Automotive AG, Jul. 12th, 2002. (internal documentation)
10. JMatPro software, <http://www.sentessoftware.co.uk/jmatpro.aspx>
11. Werkstoffuntersuchungen GJS SiMo-Varianten: Georg Fischer Automotive AG, Apr. 9th, 2010. (internal documentation)
12. R. Bürgel, H.J. Maier, T. Niendorf, Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik, 4. ed., Vieweg+Teubner, 2011, 350-352.
13. R. Bürgel, H.J. Maier, T. Niendorf, Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik, 4. ed., Vieweg+Teubner, 2011, 89.

Podaljšanje življenjske dobe kokil iz jekla za delo v vročem za tlačno litje s popravljivim varjenjem z elektronskim curkom ob integrirani lokalni toplotni obdelavi

Life extension of high-pressure die casting molds made of hot-work steels by regenerative electron-beam welding with local process-integrated heat treatment

Izvleček

Na ekonomsko učinkovitost celotnega procesa tlačnega litja bistveno vpliva življenjska doba uporabljene kokile. Takšne kokile so med postopkom litja stalno izpostavljene velikim toplotnim, mehanskim, kemičnim in tribološkimi cikličnim obremenitvam. Te obremenitve lahko povzročajo različne napake na kokili ali v kokili, zato se občutno skrajša njihova življenjska doba. Če se proizvodnja nenačrtovano ustavi zaradi kritične napake v kokili, je popravljivo varjenje pogosto edini način med proizvodnjo za njeno ponovno uporabo. Sedaj se za takšna rutinska popravila največ uporablja TIG-varjenje ali plazemsko varjenje. Vendar so te standardne tehnike popravljalnega varjenja nezadostne za zanesljivost in zato se z njimi ne doseže zanesljivo podaljšanje življenjske dobe. Proces popravljalnega varjenja namesto ponovne izdelave kokile je vsekakor ekonomsko in tehnično izvedljiv, če se varjenje uporabi takoj, in zanesljiv, s čemer se v zadostni meri podaljša življenjska doba.

Glavni cilj tega prispevka je razvitje tehnologije za popravo lokalno poškodovanih orodij za litje s poudarkom na metalurških lastnostih, da se s tem dosežejo boljše lastnosti v primerjavi s standardnimi tehnikami popravljalnega varjenja, kot je TIG-varjenje ali plazemsko varjenje. Tehnika varjenja z elektronskim curkom dovoljuje spremenljivo, potrebam prilagojeno načrtovanje toplotne bilance in uporabo dodatnih materialov. Zato se jo lahko imenuje popravljivo varjenje za jekla, ki se industrijsko uporabljajo za delo v vročem. Prispevek se začne s pregledom značilnih vrst poškodb kokil. Poleg tega bodo pojasnjene metode navadnega popravljalnega varjenja kokil, kot sta TIG-varjenje ali plazemsko varjenje, v primerjavi z varjenjem z elektronskim curkom. Prispevek tudi pojasnjuje tehniko in možnosti varjenja z elektronskim curkom kot način popravljalnega varjenja. Za zaključek bodo prikazani trenutni doseženi rezultati in predstavljene nadaljnje raziskave.

Abstract

The economic efficiency of the whole high-pressure die-casting process is essentially influenced by the lifetime of the used die casting die. Such dies are constantly exposed by high thermal, mechanical, chemical, and tribological cyclic loads during the operation. These loads might cause different defects on or in the mould and thereby reduce the die lifetime significantly. In the case of an unexpected production stop caused by a critical defect in the mould, repair welding is often the only way of reinstating the casting tool during the production. Currently, the TIG or plasma welding processes are mainly used for such repair welding routines. Nevertheless these conventional repair welding techniques constitute

an insufficient process reliability and therefore achieve an insufficient life extension. A repair welding process instead of a remanufacture of a die is, however, economically and technically feasible, if the welding is done immediately and reliably and results in a sufficient lifetime.

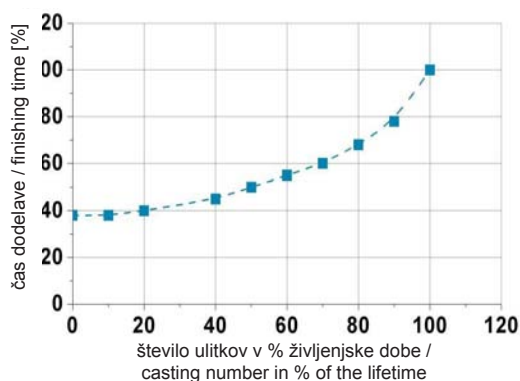
The primary objective is thus the development of a technology for an economic regeneration of locally damaged die casting tools, focusing on the metallurgical properties with improved properties compared to conventional repair welding techniques such as TIG or plasma welding. The electron-beam welding technique allows a variable, needs-adapted design of the overall heat balance and the use of filler material; therefore it is going to be qualified as a repair welding technology for industrially used hot-work steels. This article starts with an overview of the typical types of damages to die casting moulds. Furthermore, common repair welding methods for die casting moulds, like TIG- or plasma welding will be explained for a comparison to the electron-beam welding. The article also explains the technique and potential of the electron-beam welding as a repair welding method. To sum up this article, the current achieved results and the following researches will be presented.

1 Uvod

Trajne forme za tlačno litje se imenujejo kokile. To pomeni, da se te forme lahko vedno znova uporabijo pri litju, ne da bi bilo potrebno ponovno formanje s trajnim modelom. To dejstvo dovoljuje cenovno učinkovit proizvodni proces z velikim številom enot, ki se uvršča med postopke tlačnega litja in je idealna metoda za izdelavo velikih serij [1]. V tem procesu ima vsaka kokila bistveno vlogo. To pomeni, da je ekonomičnost vsakega procesa tlačnega litja bistveno odvisna od dosežene življenjske dobe kokile. Do 50 % stroškov za uliti sestavni del predstavlja izdelava in vzdrževanje orodja za tlačno litje. Zato se zahteva v vsakem primeru najdaljša možna življenjska doba kokile F2G. Kakovost površine ulitka je tudi neposredno povezana s kakovostjo površine kokile. Poškodbe zaradi procesa in propadanja materiala, ki se stalno povečujejo z vsakim ulitkom in se kažejo na t.i. funkcionalnih površinah ulitka, je treba obdelati ročno, kar je časovno zamudno in zahteva velike napore. Trud pri strojni dodelavi bo vse večji z naraščajočo stopnjo propadanja materiala. To korelacijo

1 Introduction

The moulds used in high-pressure die casting are so-called permanent moulds. This means that these moulds can be reused constantly after each casting without requiring them to be moulded again by a permanent pattern. This fact allows a cost-effective production process with a high number of units and classifies the high-pressure die casting as being the ideal manufacturing method for the production of large series [1]. In this process each mould plays a decisive role. This means that the profitability of each die casting process is significantly influenced by the achievable lifetime of the form. Up to 50 % of the cost for one cast component might be applied to the production and maintenance of die casting tools. Hence, a maximum lifetime of the form is to be demanded in each case [2]. The surface quality of the cast component, too, is directly correlated with the surface quality of the permanent mould. The process-related damages and deteriorations increasing constantly with every cast component and map onto to the so-called functional surfaces of the cast component,



Slika 1: Vpliv števila ulitkov na čas dodelave [3]

Figure 1: Influence of the cast number on the finishing time [3]

kaže diagram na sliki 1 kot čas, potreben za dodelavo vsakega ulitka [3]. To je ali postopek popravilnega varjenja ali celo izdelava nove kokile ali kokilnega vložka, če so napor in s tem stroški strojne dodelave neekonomični [2].

Zaradi velikih izdelovalnih stroškov novega kokilnega vložka, ki lahko dosega do 50 % začetnih stroškov novega kokilnega vložka in stalnega stroškovnega pritiska na livarne, se raje uporablja popravilno varjenje namesto izdelave novega vložka ali kokile [4]. Zato je časovno ugodno in zanesljivo popravilno varjenje poškodovane kokile še bolj pomembno.

2 Vrste poškodb kokil

Na osnovi izkušenj pri tlačnem litju aluminija v zadnjih desetletjih lahko danes livarne ugotovijo in pojasnijo značilne poškodbe, ki pripeljejo do zloma kokile za tlačno litje. Osnovno poznavanje poškodb, ki nastajajo na kokilah in mehanizma njihovega nastanka je zelo pomembno pri popravilnem varjenju. Podaljšanje življenjske dobe s popravilnim varjenjem je možno le s tem znanjem. Zato bomo v

must be reworked manually, which is time-intensive and requires a great effort. The effort of the machine finishing will be more and more complex with the increasing degree of degeneration. This correlation is shown in the diagram in Figure 1 as a the finishing time for each cast component [3]. There is either a repair process by means of welding or even the new production of a mould or a mould insert, if the effort and thus costs for the machine finishing will be uneconomical[2].

Due to the high costs for the production of a new mould insert, which can amount to at least 50 % of the initial cost of a new mould insert, and the continuous cost pressure on the foundries, repair welding instead of new manufacturing is to be preferred [4]. Thus, a timely and reliably conducted repair welding process of a damaged die casting mould takes on even more importance.

2 Types of damage to die-casting molds

Based on the experiences collected over the last decades in the field of aluminum die casting, the foundries are nowadays able to identify and explain the characteristic damages which lead to a breakdown of die casting moulds. The fundamental knowledge of the damages occurring on the molds and their formation mechanism is very important for the application of the repair welding. An increase of the lifetime by using repair welding is only possible with that knowledge. In the following, therefore, the three typical types of damage are explained in detail.

Stress cracks occur sporadically and preferably in areas where, due to the engraving geometric and thermal stress concentrations can occur. This can happen after a few hundred casts and is

nadaljevanju prispevka podrobno opisali tri značilne vrste poškodb.

Napetostne razpoke se pojavljajo občasno in predvsem na območjih, kjer se te lahko pojavljajo zaradi geometrije poglobitev v kokili in toplotno vplivanih koncentracij napetosti. To se lahko zgodi po nekaj sto ulivanjih in je posledica lokalnega utrujanja materiala zaradi cikličnih temperaturnih sprememb v kokili. Značilne za to vrsto poškodbe so široke in globoke razpoke, zaradi katerih se lahko odlomijo posamezni kosi kokile. Zareze, robovi in spremembe prerezov z zelo majhnim polmerom ukrivljenosti so s stališča geometrije kokile območja velikega tveganja za nastanek napetostnih razpok. Z vidika vpliva toplote predstavljajo veliko tveganje mesta, kjer se pojavlja dvodimenzijski prenos toplote [2,5].

Pokanje zaradi toplotne utrujenosti je glavni vzrok za zlom kokil za tlačno litje in se lahko pojavi po več kot okoli 2000 ulivanjih. Ta vrsta razpok se pojavlja za razliko od napetostnih razpok predvsem na ravnih delih, kjer ni makroskopskih koncentracij napetosti. Za pokanje zaradi toplotne utrujenosti je značilno mrežasto pojavljanje drobnih razpok na površini. Posamezna razpoka lahko sega le nekaj mm globoko v material. Če se razpoke zaradi toplotne utrujenosti pojavijo na površini kokile, jih bo le po nekaj novih nastalo med nadaljnjimi ulivnimi cikli. To se lahko razloži z zmanjšanjem notranjih napetosti, kar je posledica plastičnega obnašanja ustij razpok. Čeprav pokanje zaradi toplotnega utrujanja nima podobnih posledic kot napetostne razpoke, lahko vseeno vodi do poslabšanja kakovosti površine ulitka. Od določene stopnje naprej, kar je odvisno od zahtev, da je površina ulitka funkcionalna in dobra na otip, se te napake ne morejo tolerirati in lahko tudi vplivajo na doseganje želene življenjske dobe delovanja [2].

the result of a local material fatigue due to the cyclic temperature changes within the die. Characteristic of this type of damage is often a strong and deep crack growth, which can even lead to the individual mould pieces breaking away. Notches, edges, and cross-sectional transitions with very small radii are the areas with a high risk for stress cracks, from the geometrical point of view. From the thermal point of view radii, where the heat transfer takes place in two dimensions, are a big risk [2,5].

Heat checkings are considered to be the main reason for the breakdown of die casting molds and can occur after about 2000 casting cycles. This crack type appears unlike the stress cracks predominantly in the form of flat areas in which no macroscopic stress concentrations exist. The appearance of the heat checkings is characterized by a net-like surface structure plan. One single crack can thereby extend only a few millimeters into the material. If heat checkings occur on the surface of a mould, only a few will be developed during the following casting cycles. This fact can be explained by the reduction of the internal stress, which is a consequence of the plastic behaviour of the crack opening. Although the heat checkings do not have similar consequences as the stress cracks, they still lead to a significant deterioration of the surface quality of the cast component. To a certain degree, which depends on the requirements of the surface to function and feel, these defects cannot be tolerated and might also lead to the achievement of the service life [2].

Erosion is traced back to the mechanism of the abrasion and caused by the rapid and relative movement between the molten aluminum and the mould surface. In this case, the melt can be considered as a viscous liquid containing abrasive particles such as silicon, oxides or

Erozija lahko spremlja mehanizem obrabe, povzročajo pa jo hitra relativna gibanja med staljenim aluminijem in površino kokile. V tem primeru se talina lahko smatra kot viskozna tekočina, ki vsebuje abrazivne delce, kot so silicij, oksidi ali intermetalne faze. Če se pojavlja turbulentno gibanje v profilu toka, ki ga povzroča oblika kokile, nastajajo vrtinci in abrazivni delci so potisnjeni k steni kokile. Sile, ki pri tem delujejo na steno kokile, povzročajo odnašanje delcev materiala s površine kokile. Rezultat tega je žlebasta površina. Poškodbe se pojavljajo predvsem na območjih odnašanja in nanašanja materiala, kjer so največje hitrosti tokov in tlakov taline. Predvsem območja, kjer se spreminja smer toka taline, in robovi so najbolj nevarni za erozijo [6,7].

Tri značilne vrste poškodb prikazuje slika 2.

3 Standardne metode popravilnega varjenja kokil za tlačno litje

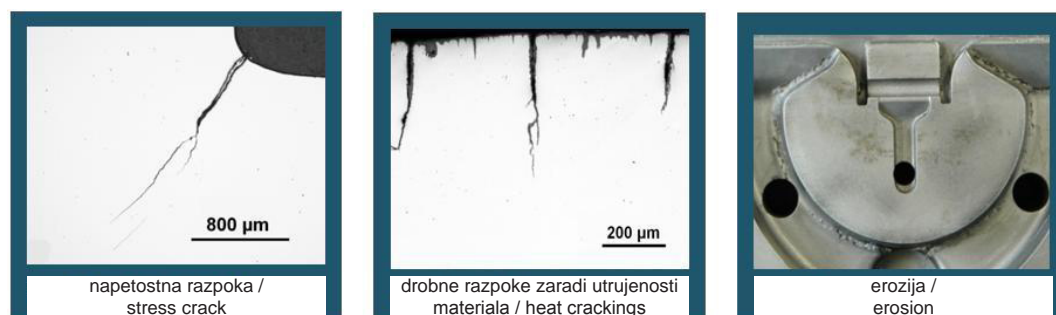
Popravilno varjenje kokil za tlačno litje je že več desetletij uveljavljen in učinkovit način za podaljšanje uporabe poškodovanih kokil. Za to se uporabljajo različni varilni postopki, med drugim TIG-varjenje ali plazemsko

intermetallic phases. If there are turbulent flows in the flow profile caused by the shape of the mould, vortexes will be formed and the abrasive particles thrown against the mould surface. The forces, which affect thereby onto the mould surface, cause the material particles to be separated from the surface. Trough-like formed contours are the result. The damage occurs mainly in the excavating and filling areas, where the highest flow velocities and melt pressures are reached. Especially melt deflections and edges represent erosion hazard areas [6,7].

The three typical types of damage are shown in the figure 2.

3 Conventional repair welding methods for pressure casting moulds

The repair welding of die casting moulds has been established over the decades as an effective means for the continued use of damaged forms. For this purpose, various welding processes are used, although the manual TIG or plasma welding processes are used, due to the relatively low-cost system technology. Repair welding are also increasingly performed by using the semi-automated laser surface cladding [8].



Slika 2: Značilne napake na kokilah za tlačno litje.

Figure 2: Typical damages on high pressure die casting molds

varjenje, ker predstavljajo sorazmerno ceneno tehnologijo. Popravljalno varjenje se tudi vse več uporablja s postopkom polavtomatiziranega laserskega navarjanja [8].

3.1 TIG-varjenje in plazemsko varjenje

Poleg primerne izbire varilnega postopka je za doseganje dolge življenjske dobe pomembno tudi celotno vodenje popravljalnega varjenja. To pomeni, da so predvsem priprava vara, izbira dodatnega materiala in temperaturni profil med postopkom obnove kokile pomembni za trajnostno popravljalno varjenje [9].

Material kokile, ki se največ uporablja pri tlačnem litju aluminija, je jeklo 1.2343 (X38CrMoV5-1) za delo v vročem. Zaradi sorazmerno velikih deležev ogljika, molibdena, vanadija in kroma to jeklo ni zelo dobro varivo. Ravno ti zlitinski elementi, ki prispevajo k dobri kaljivosti, predstavljajo pri varjenju veliko tveganje za utrjevanje materiala s kaljenjem in za pokanje. Da se pri varjenju izognemo tem napakam, je pomembno, da se pri varjenju segreje kokilni vložek nad temperaturo začetka tvorbe martenzita pri okoli 320 °C. Vendar se je treba izogniti predgrevanju nad 450 °C, ker to lahko to pripelje do pojava krhkosti osnovnega materiala [9]. Predvsem popravljalno varjenje velikih kokilnih vložkov predstavlja težave pri TIG-varjenju ali plazemskem varjenju. Poleg velike porabe časa in energije pri predgrevanju kokilnih vložkov se pojavlja tudi zapleten nadzor temperature. To pomeni, da je težko doseči ponovljivost.

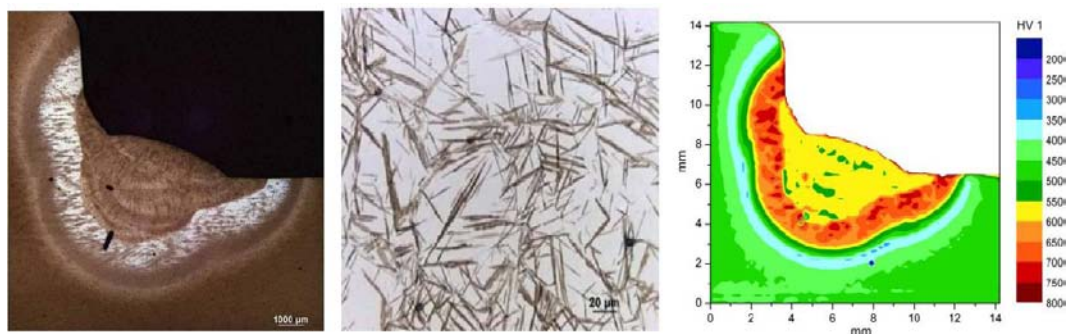
Kot posledica nezadostnega predgretja kokile ali predolgega ohlajanja pred začetkom popravljalnega varjenja se pojavlja zelo velika trdota mikrostrukture vara, kot se lahko vidi na sliki 3. To lahko tudi pripelje do makrorazpok v navaru.

3.1 TIG-/Plasma welding

In addition to the appropriate welding process, however, the whole process management of the repair welding is also an important factor for achieving a high lifetime. That means that especially the preparation of the weld, the choice of filler material and the temperature profile during the regeneration process may cause a sustainable repair welding [9].

The mould material mostly used in aluminium die casting is the hot-work steel 1.2343 (X38CrMoV5-1). Due to its relatively high carbon, molybdenum, vanadium and chromium contents, this steel is not very well weldable. Just these alloying elements that contribute to a good hardenability of the hot-work steel, constitute a high risk of hardening and cracking during welding. To avoid these welding failures it is essential to heat the mould insert before welding to above the martensite start temperature of about 320 °C. However, preheating temperatures should be avoided above 450 °C, as this may lead to embrittlement of the base material [9]. Particularly the repair welding of large mould inserts shows the difficulties in TIG or plasma welding. In addition to the high time and energy consumption during preheating of the mould inserts there is the complex handling of the temperature control. This means that the reproducibility is difficult to achieve.

As a consequence, insufficient preheating of the die or a too long cooling prior to performing the repair welding cause a very high hardness in the weld microstructure, which can be seen in Figure 3 left. This may also lead to macro cracks in the weld deposit. An absolutely necessary downstream heat treatment may reduce the hardness in the weld structure within certain limits, by welding martensitic materials. Apart from the outstanding hardness peaks,



Slika 3: Poliran prerez vzorca, varjenega po TIG-postopku z jasno vidnimi martenzitnimi iglami in razporeditvijo trdote

Figure 3: Cross-section polish with clearly identified martensite needles and a hardness allocation of a TIG-welded sample

Absolutno potrebno je, da toplotna obdelava, ki sledi, v določenih mejah zmanjša trdoto mikrostrukture vara pri varjenju martenzitnih materialov. Poleg izrazitih konic trdote je opaziti tudi območja, kjer so vrednosti trdote v toplotno vplivani coni manjše od trdote osnovnega materiala. To povzročajo učinki segrevanja zaradi dovajanja toplote med varjenjem. Omejitveni faktor pri tem je zahteva, da toplotna obdelava ne sme vplivati na osnovni material. Zaradi velike trdote se pojavlja še metalurška zarezna v toplotno vplivani coni. Kljub končni strojni obdelavi površine lahko ta zarezna med litjem hitro pripelje do ponovne razpoke in zloma kokile v okolici popravljelnega varjenja. Slika 3 kaže primer poliranega makrobrusa in ustrezno dvodimenzijsko porazdelitev trdote pri popravljalnem plazemskem varjenju.

3.2 Lasersko navarjanje

Med laserskim navarjanjem se dodajni material v obliki prahu ali žice vloži v interakcijsko cono med laserskim snopom in osnovnim materialom, da se stali in z metalurško vezjo veže s podlago. V primerjavi s TIG-varjenjem ali plazemskim varjenjem je za lasersko navarjanje značilna

also areas with hardness values in the heat-affected zone below the base material are noted. These are caused by annealing effects due to the heat input during the welding process. The limiting factor here is the requirement that the base material must not be influenced by the heat treatment. Because of the high hardness there is still a metallurgical notch in the heat-affected zone. Despite the final machining of the the surface, this notch might quickly lead to a renewed crack and a failure of the permanent mould in the environment of the repair weld during the casting process. Figure 3 shows an exemplary macro cross-section polish and the corresponding two dimensional hardness distributions of a plasma weld repair.

3.2 Laser surface cladding

During the laser surface cladding process a filler material composed of powder or wire is placed into the interaction zone of the laser beam with the base material, melted and bonded to the substrate via a metallurgical bond. Compared to the TIG or plasma welding the laser surface cladding is characterized by a low and precisely

majhna in natančno krmiljena količina dovedene toplote. To lahko povzroči majhno izveganje, manjši prenos toplote na osnovni material in skoraj končno obliko varjenja ter majhno porabo dodatnega materiala.

S prilagoditvijo parametrov procesa je možno uporabiti plast debeline 1 – 2 mm kot tudi zelo tanke plasti od 0,05 do 0,1 mm. Sočasno dodajanje različnih prahov, ki se lahko dodajajo neodvisno drug od drugega, omogoča mešanje materialov tako, da se lahko uporabi npr. karbide v kovinski osnovi ali gradirane plasti. Postopek se lahko uporabi tako za navarjanje z enakim materialom 1.2343, kot tudi za navarjanja z različnimi materiali [10].

Tvorba laserskega curka je drugačna kot pri selektivnem laserskem taljenju (SLM – selective laser melting), kjer laserske plasti določajo laserska polja posteljic prahu, ki se talijo. V industrijski tehnologiji tlačnega kokilnega litja se uporablja proces SLM z nikljevimi martenzitnim materialom 1.2709 [11,12]. Uporabnost martenzitnega jekla za delo v vročem, kot je jeklo 1.2343, se trenutno še raziskuje [13]. Tu se pojavlja težava z nastajanjem razpok v strojnem delu zaradi lokalnih temperaturnih gradientov in s tem povezanih napetosti. Težave se stalno poskuša reševati s predgrevanjem kopeli, nastale iz prahu.

Ročno ali polavtomatsko varjenje z laserskim snopom predstavlja sodoben način popravljalnega varjenja pri tlačnem litju. Vendar je treba tu narediti kompromis pri izbiri dodatnega materiala, da se zagotovi varivost. Navadno se uporablja dodatni material z deležem ogljika manjšim od deleža v osnovnem materialu. Da bi se preprečila zmanjšana trdnost in kaljivost, se dodatnemu materialu npr. dodaja molibden. Ta element je karbidotvorec in povečuje tudi kaljivost in varivost.

Bistvena pomanjkljivost varjenja z laserskim snopom je optična odbojnost

controlled amount of heat contribution. This might cause a low shape distortion, a lower heat transfer to the base material and a near net shape and resource-conserving application of the filler material.

By adjusting the process parameters it is possible to apply layer thicknesses of 1-2 mm as well as very thin layers of 0.05-0.1 mm. A simultaneous feeding of several powders, which are charged independently of each other, allows the mixing of materials so that, for example, carbides in a metallic matrix or graded layers can be applied. The process can be used for both, conspecific surfacing from 1.2343 as well as different types of surfacing [10].

The laser beam generation distinguishes itself from the SLM (Selective Laser Melting), in which layers defined by a laser fields of a powder bed are melted. The state of industrial technology for high-pressure die casting applications is the SLM process with the nickel-martensitic material 1.2709 [11,12]. The use of a martensitic hot-work steel such as 1.2343 is currently subject of research [13]. The problem here are cracks in the component due to high local temperature gradients and associated stresses. Consequently, an attempt is made to address the problem through a preheating of the powder bath.

The manual or semi-automatic welding with the laser beam is state of the art in the repair welding of die-casting. However, a compromise must be made here when selecting the welding filler material to ensure weldability. Usually, a filler material is used with carbon contents lower than the base material. In order to counteract a reduced strength and hardenability, for example, molybdenum is alloyed to the filler material. This element acts as a carbide former and also has a positive effect on the hardenability and weldability.

osnovnega materiala. Zaradi optične odbojnosti materialov in površin obdelovanca se del monokromatske svetlobe odbije. To obnašanje materiala vodi na eni strani do zmanjšanja učinkovitosti dovedene energije, na drugi strani pa do občutno bolj zapletenega krmiljenja te energije.

4 Tehnologija in možnosti varjenja z elektronskim curkom

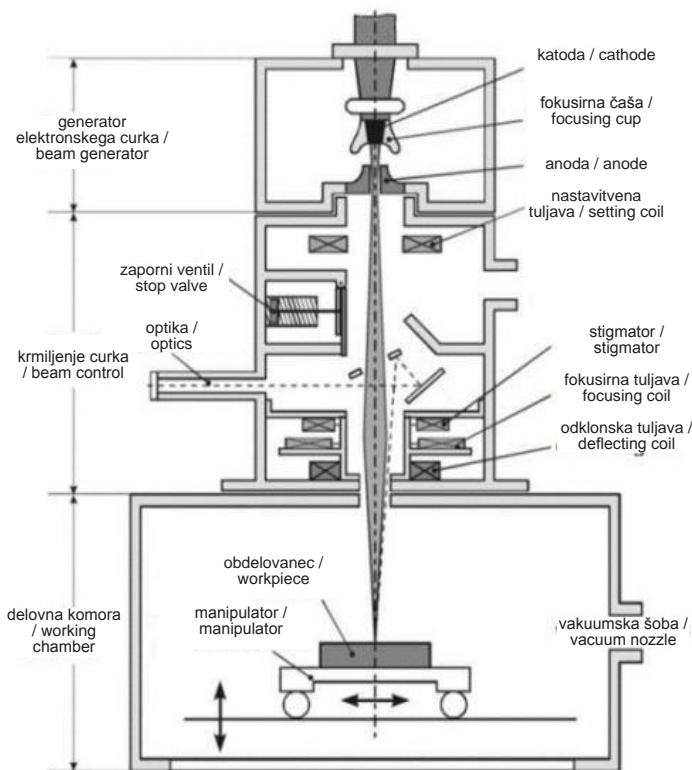
Poleg metode z laserskim snopom predstavlja metoda z elektronskim curkom drugo tehnologijo za obdelavo toplotnih materialov s snopom ali curkom.

Pri tej tehnologiji za obdelavo toplotnega materiala se elektroni, ki so skoraj brez mase in zato na njih ne delujejo vztrajnostne sile,

An essential disadvantage of the laser beam welding is the reflectivity of the base material. Because of the optically reflective light properties of materials and work piece surfaces, a part of the monochromatic light is reflected. This material behaviour leads on the one hand to a reduction in the efficiency and on the other hand to a considerably more complex controllability of the power input.

4 Technology and Potential of the Electron-Beam Welding

In addition to the laser beam method, electron beam technology represents the second beam technology for the processing of thermal materials.



Slika 4: Shematični prikaz naprave za varjenje z elektronskim curkom

Figure 4: Schematic setting of the electron-beam welding machine

s pospeševalno napetostjo deloma večjo od 150 kV pospešijo iz elektronskega oblaka pred katodo na 2/3 svetlobne hitrosti: če ti elektroni udarijo ob površino obdelovanca, se zavrejo. Pri tem procesu zmanjšanja hitrosti se kinetična energija elektronov pretvori v toplotno energijo in tako ustvari možnost stalitve osnovne kovine ali dodajnega materiala [14].

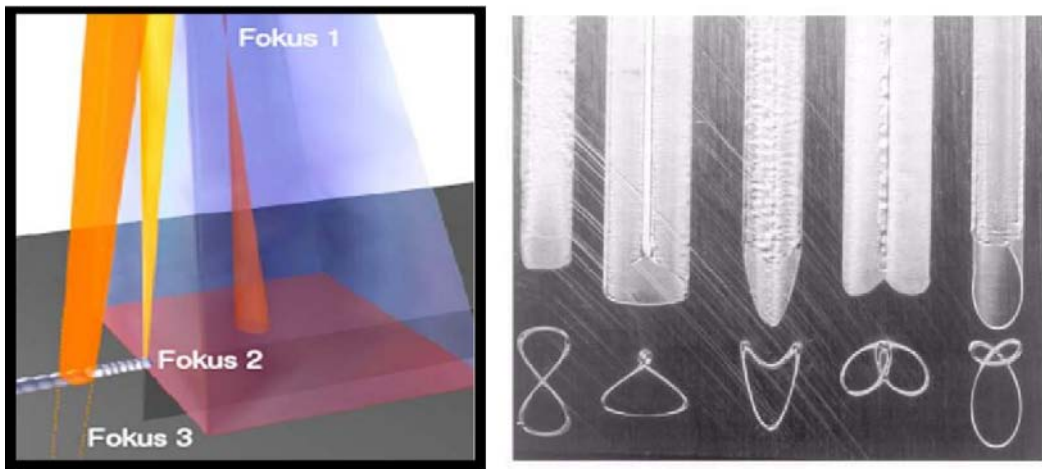
Na splošno je sistem z elektronskim curkom sestavljen iz generatorja curka, sistema za vodenje in oblikovanje curka ter delovne komore. Naloga generatorja je, da z visoko napetostjo ustvarja stalen, fokusiran curek elektronov med katodo in anodo. Fokusiranje in zelo dinamično odklanjanje elektronov se dosega s številnimi elektromagnetnimi lečami v generatorju, kot kaže slika 4, npr. z nastavitveno tuljavo, stigmatorjem, fokusirno in odklonsko tuljavo. Celoten proces poteka v visokem vakuumu, zato se pojavljajo določene omejitve v primerjavi z drugimi varilnimi postopki. V delovni komori so naprave za premikanje in vpenjanje, s katerimi se varjenec in potrošni material postavi v določen položaj. Uporaba porabljivih materialov za varjenje, kot so žice, predstavlja osnovo nastanek zgradbe navara.

Posebna tehnična lastnost sistema z elektronskim curkom je sposobnost odklanjanja curkov tako, da se navidezno cepijo v več curkov, kot kaže slika 5 levo. Ta tehnika odklanjanja omogoča sočasno izvedbo več operacij curka na površini varjenca pri veliki in bolj fleksibilno nastavljivi gostoti energije. Zato se lahko istočasno varijo različni spoji. V nekaterih primerih se ta tehnika z več snopi uporablja za ciljano krmiljenje toplotne bilance na območju spoja. Cilj tega je npr. varjenje ogljikovih jekel brez pokanja [15] ali ciljane nastavitve razmer hlajenja pri dupleksnih jeklih. Poleg tega periodično odklanjanje curka iz njegove začetne smeri omogoča

Here, almost massless and thus inertialess electrons for the thermal material processing are accelerated up to 2/3 of the speed of light by means of an acceleration voltage of partially > 150 kV from an electron cloud in front of the cathode. If these electrons impact on the workpiece surface, they will be braked. At this deceleration process, the kinetic energy of the electrons is converted into thermal energy and thus creates the possibility of melting the metal base or filler material [14].

In general, an electron-beam system is composed of the beam generator, the beam guidance and shaping as well as the working chamber. The beam generator has thereby the task of generating a constant, focused beam of electrons by a high voltage and is applied between a cathode and anode. The focusing and highly dynamic deflection of the electron beam is effected by a number of electromagnetic lenses in the generator, shown in Figure 4 as setting coil, stigmator, focusing and deflection coil. The entire process takes place in a high vacuum, which is why particular constraints arise compared to other welding processes. Within the working chamber moving and clamping devices are available by means of which the weld metal and welding consumables can be positioned. The use of welding consumables in the form of wires represents the basis for a generative structure.

A special technical feature of the electron-beam system is the ability to deflect the beams so that they seemingly split into multiple beams, shown in Figure 5 on the left. This deflecting technique allows a simultaneous realization of several actions of the beam on the component surface at high and more variably adjustable power density. Hence, several joints could be welded at the same time. In some cases, these multi-beam technique is used for



Slika 5: Shematičen prikaz tehnike z več curki (levo) in možnosti nihanja curka (desno) [16]

Figure 5: Schematic image of the multi-beam technique (left) and possibilities of beam oscillation (right) [16]

natančno spreminjanje tvorbe varkov in njihove geometrije, kot se to lahko vidi na sliki 5 desno. To odklanje curka lahko posebej vpliva na proces taljenja in strjevanja med varjenjem in s tem se občutno izboljša razplinjevanje. Druga - in verjetno najbolj pomembna prednost varjenja z elektronskim curkom v primerjavi s standardnimi tehnikami varjenja - je velika gostota energije. Ta velika gostota energije omogoča zelo ozko toplotno vplivano cono, ki na najmanjšo mero zmanjša možne deformacije.

5 Navarjanje s sistemom za varjenje z elektronskim curkom

Glavni del raziskav za podaljšanje življenjske dobe kokil za tlačno litje, narejenih iz jekel za delo v vročem z varjenjem z elektronskim curkom se lahko pripiše popravljalnemu varjenju, ker se izrabljajo možnosti za spremenljivo, potrebam prilagojeno načrtovanje celotne toplotne bilance ter uporabljajo dodatni materiali. Da se to

the targeted control of the heat balance in the joint region. The aim is, for example, a crack-free welding of carbon steels [15] or a targeted adjustment of cooling conditions on duplex steels. Furthermore, a periodic deflecting of the beam from its initial position enables the specific alteration of the seam formation and geometry, as can be seen on the right in Figure 5. This can influence specifically the melting and solidification processes during welding and thus significantly improve the degassing. Another and probably the most important advantage of the electron-beam welding technique compared to the conventional welding techniques is the high power density. This high power density enables a quiet slim heat affected zone, which minimizes a potential deformation.

5 Deposit Welding by an Electron Beam Welding System

As the main part of the research to extend the lifetime of die casting moulds made of

doseže, morajo biti izpolnjene dodatne zahteve:

- prepoznavanje in razvrščanje primernih porajljivih materialov za varjenje,
- razvoj primerne lokalnega krmiljenja toplote, vključenega v proces (pregrevanje in naknadno segrevanje), da se dosežejo navari s funkcionalno pravilnimi značilnostmi materiala,
- določanje parametrov prilagojenega procesa in razvoj strategij načrtovanja (prilagoditev položaja in zaporedja osnovnih oblik ter poti zapolnjevanja),
- razvoj strategij za zapleteno navarjanje in tridimenzijske osnovne oblike orodij.

V prvem delu načrtovanja preiskav so bili narejeni poskusi na ravnih površinah in na globelih, nastalih pri brušenju. Z brušenjem narejena globel bi lahko simulirala realno stanje pri popravljalnem varjenju, ker so vse možne razpoke v kokili pobrušene in potem ponovno zapolnjene z dodajnim materialom. Osnovni material je bilo jeklo z oznako S255, za dodajni material z oznako G3Si1 (1.5125) se je uporabila jeklena žica premera 1,2 mm. Privarjena je bila tako, da je bil gorilnik neposredno usmerjen na že izdelan del varka, pri čemer se je vzorec z vpenjanjalno napravo zasukal za 180°. Vzrok za to je bil, da se je lahko na koncu vsake poteze pri varjenju oblikovala višina kapljice pri varku. Omenjeni zasuk je nadomestil razmere pri varjenju. V celoti je bilo potrebnih pet plasti, da se je zapolnila globel globine 10 mm.

Na osnovi poskusov se je ugotovilo, da je v osnovi možno izdelati napravo, ki uporablja sistem z elektronskim curkom in sistem za dodajanje materiala. Vzrok za našo izbiro osnovnega materiala in dodajnega materiala je bilo zelo dobro upravljanje z materialom. Za oba materiala so obstajale dovolj dobre izkušnje, material S255 je v splošnem zelo primeren za varjenje. Na sliki 6 levo se jasno vidi

hot-work steels the electron beam welding technique is to be qualified as a repair welding process because of its possibilities for the variable, needs-adapted design of the overall heat balance and the use of filler material. To achieve this, the following sub-objectives must be achieved:

- Identification and qualification of suitable welding consumables
- Development of a suitable process-integrated local heat control (pre-heating and post-heating) to achieve a functionally correct material characteristic of the surfacing
- Determination of adapted process parameters and development of construction strategies (adaptation of position and sequence of the contour and fill-up path)
- Development of strategies for building complex, three-dimensional tool contours

In the first part of the investigations construction tests were performed on flat surfaces and in extra pre-milled swales. The milled swale should simulate the real situation in the repair welding process in this connection, since any possible cracks in the die are milled and then back-filled with the filler material. The basic material is a steel served with the designation S255, using G3Si1 (1.5125) as filler material, with a diameter of 1.2 mm in the form of wire. It was welded with a torch directed toward the finished part of the weld, at which the sample was rotated to 180° by means of clamping. This was the reason that at the end of each track, a drop height of the weld took shape. Said rotation compensated this condition. A total of five layers is required to fill the 10 mm depth of recess.

Based on the experiments, it was found that a generative structure using the electron-beam system and an additional material is generally possible. The reason



Slika 6: Poskus navarjanja v izbrušeni globeli (levo) in ustrezen prerez poliranega prereza navara (desno)

Figure 6: Trial of the generative build-up in a milled swale (left) and the appropriate cross-section polish of the generated deposit welding (right)

enakomerna mikrostruktura varka. Dobra povezanost med dodajno in osnovno kovino je prikazana na polirani površini na desnem delu slike 6. Varilskih napak, kot je pokanje v hladnem ali vročem, ni bilo pri nobenem navaru.

Z ugotovitvami strategije grajenja plasti ali možnimi spremenljivi hitrostmi varjenja, ki smo jih dosegli pri poskusih z materialoma S255 in G3Si1, bo sedaj možno navarjati na orodno jeklo za delo v vročem s standardno oznako 1.2343 ob uporabi primernih porabljivih varilnih materialov.

Orodno jeklo za delo v vročem kakovosti ESR (postopek električnega pretaljevanja pod žlindro) in popuščeno na trdoto okoli 43 HRC je dobavilo podjetje *Böhler-Uddeholm*. Kot dodajni material za varjenje smo uporabili material, ki je bil legiran manj, enako ali bolj kot osnovni material. Kot možnost pufernih plasti je bilo treba preiskati dodatni dodajni material na osnovi materiala Coblat in na osnovi jekel za martenzitno staranje s standardno oznako 1.2709. Vsak dodajni material se je dodajal kot žica premera 1,6 mm v staljeno kopol z dodajalnikom žice v sistem varjenja

for the selection of the base material and the filler material was the very good handling of the materials. For both materials sufficient experiences are available, the S255 is generally considered as very suitable for welding. In Figure 6, left, a uniform structure of the weld beads can clearly be seen. A good connection of the welding filler metal to the base metal in the cross-section polish in the right picture of Figure 6 is visible. Welding defects such as hot or cold cracking did not occur at all surfacings.

With the help of the findings for the strategy of the layer structure or the possible mobile welding speeds, which were obtained from the experiments with the S255 and the G3Si1, surfacing should now be carried out with the hot-work tool steel with the standard designation 1.2343 as the base material and suitable welding consumables.

The hot-work tool steel was supplied by the company *Böhler-Uddeholm* in ESR (Electro-Slac-Remelting) quality and tempered to a hardness of about 43 HRC. As filler material for the welding an under-alloyed, a similar and an over-alloyed

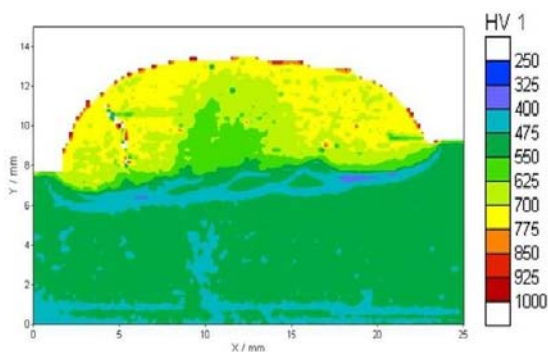
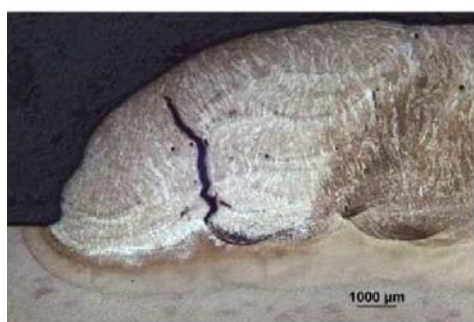
z elektronskim curkom, žice je dobavljalo podjetje *Welding Alloys Group*.

Pretekle študije so do danes vključevale sorazmerno enostavno navarjanje posamezne plasti jekla 1.2343 in podobnega dodatnega materiala. To pomeni, da so bili posamezni varki narejeni neurejeno eden poleg drugega. V splošnem bi bilo treba preiskati pet porabljivih varilnih materialov za uporabo pri varjenju z elektronskim curkom. To je potrebno, ker se lahko v vakuumu spremeni varivost dodatnega materiala. Čeprav prvi rezultati kažejo enakomerno mikrostrukturo nastalih varkov, kar se vidi na naslednji sliki, je bilo opaziti rahlo povečanje trdote varjene kovine pri meritvah trdote na sliki levo. Zaradi občasnih pojavov je bil osnovni material rahlo zmeččan. Pojava razpoke v vročem na levi sliki je rezultat hitrega ohlajanja dodatnega in osnovnega materiala. To varjenje je potekalo brez predgrevanja in naknadnega žarjenja. Vidi se, kako pomembni sta obe obdelavi za uspešno popravljivo varjenje jekla za delo v vročem z oznako 1.2343 tudi pri varjenju z elektronskim curkom.

Treba bo raziskati še toplotne obdelave in uporabo drugih dodatnih materialov.

material were used. For possible buffer layers an additional filler material should be examined for Coblat basis and on the basis of a maraging steel with the standard designation 1.2709. Each filler material is fed as a filler wire with a diameter of 1.6 mm into the molten bath with an in the electron-beam system built-in wire conveyor and were supplied by the *Welding Alloys Group*.

Up to this time, past studies have included relatively simple single-layer surfacing with the 1.2343 and the similar filler metal. This means that several weld beads only placed side by side and not in accordance. In general, the overall applicability of the five welding consumables should be investigated for use in the electron-beam method. This is necessary, because the filler materials might change their weldability in a vacuum atmosphere. Although the first results during the weld show the uniform structure of the generated beads in the Figure 7, a slight increase in hardness of the weld metal can be seen in the hardness measurement in the left picture. The base material is, however, slightly softened by occasional effects. The occurred hot crack in the left figure is a result



Slika 7: Poliran prerez z jasno vidno razpoko v vročem (levo) in z izmerjenimi trdotami vzorca varka, narejenega z varjenjem z elektronskim curkom (desno)

Figure 7: Cross-section polish with clearly identified hot crack (left) and a hardness allocation of an EB-welded sample (right)

6 Sklepi in prihodnje delo

Raziskave do sedaj so pokazale, da je varjenje z elektronskim curkom metoda, ki je primerna za navarjanje kovinskih materialov. Zato smo delali večplastne navare z jekli in dodajnimi materiali, s katerimi je bilo delo sorazmerno lahko. Možno je bilo tudi uresničiti strategijo izdelave tridimenzijjskih teles, katerih oblike so osnova za varjenje z elektronskim curkom kot načinom popravljalnega varjenja kokil za tlačno litje, z navarjanjem.

Pri varjenju jekla za delo v vročem z oznako 1.2343 in podobnega dodatnega materiala je bilo ugotovljeno, da se pojavljajo težave pri izdelavi varov brez napak. Zato je predgrevanje in naknadno segrevanje navara bistveno v vsakem primeru. Varjenje z elektronskim curkom je tehnika, ki omogoča s tehnologijo z več curki v primerjavi s klasičnim varjenjem, da se vključi tudi predgrevanje in naknadno segrevanje v proces varjenja.

7 Zahvala

Avtorji se zahvaljujejo Zveznem ministrstvu za ekonomijo in tehnologijo za financiranje tega raziskovalnega projekta (štev. AiF 17.843 N)

of the fast cooling velocity of the filler and base material. This welding was executed without a pre-heating and downstreamed annealing treatment. Here you can see, how important these both treatments are for a succesful conducted repair welding process of the hot work steel 1.2343, also at the electron-beam welding.

Researches with the heat treatments and the other selected filler materials have to be done.

6 Conclusion and Prospect

The up to this moment executed studies have shown that the electron beam welding method is suitable for a generative development of metallic materials. For this purpose, multi-layer deposit weldings were realized with comparatively easy to handle steels and filler materials. It also could hence derived possible construction strategies of three-dimensional bodies, which forms the basis for the use of the electron beam welding process as repair welding of die casting moulds.

In applying the findings to the welding of hot-work steel 1.2343 and the similar filler material difficulties have been occurred focusing on the production of defect-free welds. A pre-and post-heating of the weld metal is hence essential in this or any case. The electron-beam welding technique allows with his multi-beam technology compared to the conventional welding methods a possible process-integrated pre-heating and post-heating.

7 Acknowledgements

The authors would like to thank the Federal Ministry for Economics and Technology (project no. AiF 17.843 N) for funding this research project.

Viri / References

1. Westkämper E.; Warnecke H.-W.: Einführung in die Fertigungstechnik, Vieweg +Teubner-Verlag, Wiesbaden, 2010
2. Liluashvili, Z.: Verschleißmechanismen und Standzei-toptimierung von Druckgießformen, Dissertation, Technische Universität Carolo Wilhelmina zu Braunschweig, 2009
3. Blümlhuber, W.: (2011): Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von Druckgussstrukturbau-teilen im Karosseriebau, in: Präsentation Leichtbau in Guss, Stuttgart
4. Wanke, P.: Leichtbaupotentiale im Automobilbau durch Gießtechnik, Landshut, 27.10.2010
5. Liluashvili, Z.; Pries, H.; Dilger, K. (2008): Untersuchungen zur Standzei-toptimierung von Aluminium-Druckgießformen, in: Schlussbericht AiF 14389 N
6. Sommer, K.; Heinz, R.; Schöfer, J.: Verschleiß metallischer Werkstoffe, Vieweg + Teubner-Verlag, Wiesbaden, 2010
7. Norström, L.-Å.; Klarenfjord, B.; Svensson M.: Allgemeines zur Entstehung von Auswaschungen bei Druckgießformen für Aluminium, Giesserei-Praxis, 1994, Nr. 9; S.204-210
8. Müller, S.; Pries, H.; Dilger, K.; Ocylok, S. et al. (2011): Applying Functionally Graded Materials by Laser Cladding: a cost-effective way to improve the Life-time of Die-Casting Dies, in: Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Management, pp. 235-239
9. Garthoff, Chr.; Müller, S.; Dilger, K. (2011): Reparaturschweißen von Aluminiumdruckgießformen, in: Assistentenseminar Fügetechnik und Schweißtechnik, Vol. 270
10. Vedani, M. (2004): Microstructural evolution of tool steels after Nd-YAG laser repair welding, in: Journal of Materials Science, Vol. 39, pp. 241-249
11. N.N. (2007): Lasertechnologie optimiert die Fertigung von Druckgießwerkzeugen, in: Der Stahlformenbauer 05/2007, pp. 18-27
12. Sagert, D.; Scholl, I. (2009): Vom Versuch zur Standardtechnologie, in: Gießerei-Erfahrungsaustausch 05/2009, pp. 12-15
13. N.N. (2011): Formgebungswerkzeuge aus Warmarbeitsstählen – Prozesssichere Verarbeitung im Strahlschmelzprozess, in: Präsentation im Rahmen der Sitzung FA Werkzeugstähle 10/2011
14. Schultz, H. (2000): Elektronenstrahlschweißen, Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 93
15. Krüssel, Th. (2012): Elektronenstrahl - das innovative Fertigungswerkzeug, in: Präsentation im Rahmen des Innovationsforums „Elektronenstrahltechnologie im Maschinen- und Apparatebau“, Burg (b. Magdeburg)
16. PTR Präzisionstechnik GmbH

P. Mrvar¹, D. Mitrovič², J. Medved¹, A. Križman³, M. Petrič¹

¹ Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, Slovenija /
Faculty of Natural Sciences and Engineering, University of Ljubljana, Slovenia;

² Livar d.d, Slovenija / Slovenia

³ Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Slovenija /
University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering, Slovenia

Tehnologija izdelave in karakterizacija gradientnega ulitka

Manufacturing Technology and Characterization of Gradient Casting

Izvleček

Ta prispevek obravnava izdelavo sestavljenih ulitkov za valje, ki se imenujejo tudi gradientni ulitki. Izdelavna tehnologija je kombinacija vodoravnega centrifugalnega litja legirane bele litine (dve fazi) in težnostnega litja jeder v tretji fazi. Pri industrijskem postopku litja je potekalo sistematično vzorčevanje za različne preiskave: kemične analize, termodinamično računanje ravnotežnih faz s programi TCW in Computerm, dilatometrija v trdnem stanju, izračuni gostot izločenih mikrostrukturnih sestavin po programu TAPP 2.2, linearne meritve trdote, ugotavljanje mehanskih lastnosti pri sobni temperaturi in višjih temperaturah, svetlobna in elektronska mikroskopija, računanje procesa litja pri vseh treh fazah po metodi končnih elementov. Delovna plast valja je izdelana iz bele litine, legirane s kromom, medtem ko je jedro iz sive litine s kroglastim grafitom (SGI). Glavni poudarek je na srednji plasti, ki je narejena iz sive litine z luskastim grafitom. Mikrostrukturne sestavine so bile določene kvalitativno in kvantitativno. Gostote vsake od mikrostrukturnih sestavin so bile izračunane po zgoraj omenjenih programih. Ugotovljeno je bilo, da se gostote avstenita in karbidov tipa M_7C_3 med seboj razlikujejo za okoli $0,3 \text{ kg/dm}^3$, kar vpliva na porazdelitev mikrostrukturnih sestavin po prerezu valja zaradi centrifugalnih sil. Merjene in izračunane so bile tudi notranje napetosti v ulitku. Pojasnjeni so bili vplivi nehomogene porazdelitve karbidov v prvi in drugi plasti ter vpliv jedra iz SGI na mehanske lastnosti ulitka skupaj z notranjimi napetostmi.

Ključne besede: gradientni ulitki, bela litina, siva litina s kroglastim grafitom, računanje litja in napetosti, karakterizacija mikrostrukture

Abstract

This work deals with the problem of casting production of composed castings for rolls also called gradient castings. The technology of production is a combination of the horizontal centrifugal casting of alloyed white cast iron (two sequences) and gravity casting of cores which occurs in third sequence. From the industrial casting, the systematical sampling for different investigation methods was done. The following examination methods were used: chemical analyses, thermodynamic calculation of equilibrium phases by TCW and Computer programmes, dilatometry in the solid state, calculation of density for extracted microstructural components by programme TAPP 2.2, linear hardness measurements, determination of mechanical properties at room temperature and higher temperatures, optical and electron microscopy, FEM calculation of casting process for all three sequences of casting. Working layer of the roll is made from chromium alloyed white cast iron. The core is made by spheroidal graphite cast iron (SGI). The main focus was on intermediate layer,

which is made from flake graphite cast iron. Microstructural constituents were determined quantitatively and qualitatively. With help of mentioned programmes, the calculation of density for each microstructural constituent was done. It was found out that austenite and M_7C_3 type of carbides have a difference in density for approximately $0,3 \text{ kg/dm}^3$ which influences the distribution of microstructural constituents in roll cross-section due to centrifugal forces. The internal stresses in the casting were also calculated and measured. The explanations of the influences of inhomogeneous carbide distribution in a first and the second layer and influence of core made of SGI on mechanical properties of the casting together with internal stress were also made.

Key words: gradient castings, white cast iron, spheroidal graphite cast iron, casting and stress calculations, characterization of microstructure

1 Uvod

Centrifugalno litje je postopek, pri katerem se kovina vliva in strjuje v vrteči se kokili zaradi centrifugalnih sil¹. Smer strjevanja se pri centrifugalnem postopku razlikuje od smeri pri litju v pesek. Zaradi hitrega prehoda toplote na kokilo se začne kristalizacija na zunanji površini ulitka in napreduje v notranjost. Rezultat tega je drobnozrnata površinska plast, medtem ko strjevanje proti notranjosti poteka z rastjo dendritov².

Pri izdelavi valjev se uporablja kombinacija centrifugalnega in težnostnega litja, pri čemer se delovna in vmesna plast ulivata centrifugalno, jedro iz sive litine s kroglastim grafitom pa težnostno. Delovna plast je iz kromove bele litine, da se dosežeta trdota in obrabna trdnost, vmesna plast pa je iz neke vrste sive litine, da sta delovna plast in jedro dobro povezana, medtem ko je jedro iz sive litine s kroglastim grafitom, kar daje valju žilavost in togost³.

Za plast kromove bele litine je željeno, da vsebuje čim manj zaostalega avstenita v osnovi in da mikrostruktura ne vsebuje perlita.

Osnova v ulitem stanju vsebuje občuten delež zaostalega avstenita (30-60 %), ki mora razpasti pri eno- ali večstopenjski toplotni obdelavi, da se doseže zahtevana mikrostruktura, ki vsebuje majhne in

1 Introduction

Centrifugal pouring technology is a casting process, where metal can be poured and solidified in a rotating permanent mould under the influence of centrifugal force. The direction of solidification in centrifugal process differs from the sand casting. Due to the rapid transfer of heat to the permanent mould, crystallization starts on the outer surface of the casting and progresses towards the inside. The result is a fine-grained surface crust, further solidification towards the interior takes place with the growth of dendrite crystals.²

Combination of centrifugal and gravity casting is used at roll production, where working layer and intermediate layer are casted centrifugally and core is gravity casted from spheroidal graphite cast iron. Working layer is made of chromium white cast iron to achieve hardness and wear resistance, intermediate layer is sort of grey cast iron to produce good bonding of working layer and core while core is made of spheroidal graphite cast iron to obtain toughness of a roll.³

With chromium white cast iron layer, it is desirable to have as little as possible retained austenite in the matrix and that does not contain the pearlite phase in microstructure.

enakomerno porazdeljene karbide vrste M₂₃C₆ v kovinski osnovi α 4. Ker so ti zelo trdi in enakomerno porazdeljeni v osnovi, so za obrabno trdnost zelo pomembni sekundarni karbidi.

Ciljane mehanske lastnosti se dosežejo s toplotno obdelavo, pri kateri se ulitek segreje na temperaturo avstenitizacije in krmiljeno ohlaja do sobne temperature. Takšna obdelava omogoča dober nadzor nad izločanjem sekundarnih karbidov v temperaturnem območju 800-1050 °C.

2 Eksperimentalni del

Vzorci, vzeti iz delovne in vmesne plasti ter jedra, so bili analizirani in preiskani s svetlobno in elektronsko mikroskopijo (SEM) z EDS, merjene so bile natezne trdnosti pri različnih temperaturah, trdote in dilatometrski raztezki. Gostote strjenih faz so bile izračunane s programom TAPP 2.2 in termodinamična fazna ravnotežja s programsko opremo Thermo-Calc.

Kemične sestave vseh treh plasti so v razpredelnici 1.

3 Rezultati in razprava

Slika 1 prikazuje mejno plast delovne plasti, vmesno plast in jedro valja. Mikrostruktura

In as-cast state, the matrix contains a substantial proportion of residual austenite (30–60 %), which is necessary to decompose with single or multistage heat treatment, in order to achieve the required microstructure, which contains small and evenly distributed M₂₃C₆ type carbides in α -metallic matrix.⁴ Due to their high hardness and uniform distribution in the matrix, secondary carbides are of great importance for wear resistance.

Target mechanical properties are obtained by heat treatment, where casting is heated to austenitising temperature and control cooled to room temperature. Such treatment allows a good control over the segregation of secondary carbides in the temperature range from 800 to 1050 °C.

2. Experimental

Analyses were carried out on samples taken from working layer, intermediate layer and core. Optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM) with EDS-analysis, tensile tests at various temperatures, hardness measurements and dilatometric analysis were carried out. Densities of solidified phases were calculated by TAPP 2.2 programme and thermodynamic phase equilibrium calculations performed by Thermo-Calc software.

Razpredelnica 1: Kemična analiza gradientnega ulitka (mas. %)

Table 1: Chemical analysis of gradient casting (mass fraction, %).

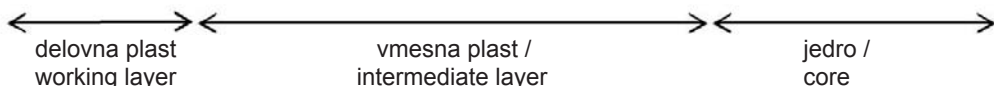
| | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Mg | Cu | Sn | Al | V | Ti | W | Co | Fe |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Delovna plast / Working layer | 2,799 | 0,703 | 0,965 | 0,030 | 0,037 | 16,681 | 1,433 | 1,154 | 0,003 | 0,081 | 0,000 | 0,0000 | 0,296 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 75,818 |
| Vmesna plast / Intermediate layer | 3,118 | 1,034 | 0,342 | 0,026 | 0,010 | 0,129 | 0,247 | 0,029 | 0,000 | 0,039 | 0,005 | 0,0013 | 0,012 | 0,006 | 0,009 | 0,018 | 94,965 |
| Jedro / Core | 3,002 | 2,734 | 0,366 | 0,031 | 0,007 | 0,131 | 0,247 | 0,029 | 0,099 | 0,039 | 0,007 | 0,0229 | 0,013 | 0,007 | 0,009 | 0,017 | 93,198 |

delovne plasti je sestavljena iz avstenita in karbidov, ker je zlitina bogata s kromom. Vmesna plast, ki se zliiva z jedrom, je zelo bogata s karbidi M_7C_3 . Pri strjevanju vmesna plasti nastanejo v talini najprej primarni kristali avstenita, ki se zaradi centrifugalne sile in večje gostote od ostale taline začno pomikati proti delovni plasti. Talina vmesne plasti ponovno stali tanko plast delovne plasti in nekateri karbidotvorni elementi, posebno krom, se raztopijo v vmesni plasti, kar povzroči tvorbo karbidov in zaradi manjše gostote od γ -Fe se izločijo v plasti med vmesno plastjo in jedrom. Velika količina karbidov se dobro vidi na sliki 1. Dovolj velik interval strjevanja in manjša hitrost ohlajanja povzročita, da nastane plastovita vmesna plast, ki pa ni želena mikrostruktura. Karbidi, ki niso enakomerno razpršeni v kovinski osnovi, predstavljajo krhko plast v ulitku.

Chemical compositions of all three layers are presented in table 1.

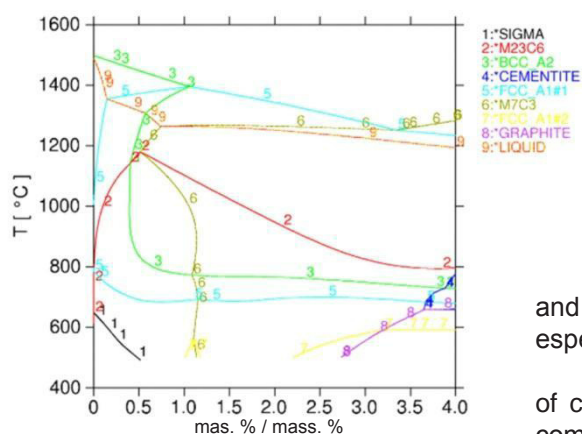
3 Results and Discussion

Figure 1 presents the boundary layer of working layer, intermediate layer and core of a roll. Microstructure of working layer consists of austenite and of carbides since alloy is rich on chromium. The intermediate layer, which merges with the core, is highly rich of M_7C_3 carbides. At solidification of the intermediate layer melt in the first stage the formation of primary austenite crystals occurs, which by means of centrifugal force due to higher density than the rest of the melt start to impose towards the direction of the working layer. Melt of intermediate layer remelts a thin layer of a working layer



Slika 1: Makrostruktura delovne in vmesne plasti ter jedra

Figure 1: Macrostructure of a working layer, intermediate layer and a core



Slika 2: Izopletni fazni diagram delovne plasti

Figure 2: The isopleth phase diagram of working layer

Slika 2 prikazuje izopletni fazni diagram za material delovne plasti. Strjevanje začne s strjevanjem avstenita, ki mu sledi eutektična reakcija ob strjevanju karbidov vrste M_7C_3 med 1260 °C in 1230 °C. Strjevanje karbidov vrste $M_{23}C_6$ poteka pri 820 °C.

Gostote eutektičnih karbidov M_7C_3 in avstenita so bile izračunane pri ustreznih temperaturah s programom TAPP 2.2. Gostota karbida M_7C_3 je bila pri temperaturi izločanja 6,738 kg/dm³, medtem ko je bila gostota avstenita pri temperaturi njegovega izločanja 6,99 kg/dm³. Zdi se, da ta relativna razlika med gostotami avstenita in karbidov v talini povzroča pri strjevanju vmesne plasti nastanek slojev obeh mikrostrukturnih sestavin. V prvi fazi strjevanja se pojavijo dendriti avstenita, ki jih centrifugalne sile potisnejo zaradi njihove večje gostote proti delovni plasti. Ko se temperatura preostale taline zniža do temperature eutektičnega strjevanja, kar povzroči nastanek krali in rast karbidov, potisnejo centrifugalne sile karbide, ki so lažji od avstenita, proti območju med vmesno plastjo in jedrom. Čeprav je razlika gostot avstenita in karbidov le 0,3 kg/dm³, postane ta razlika pomembna pri centrifugalnih silah 120 G, kar pripelje do nastanka nehomogene mikrostrukture.

and some carbide promoting elements, especially chromium, dissolves in

intermediate melt causing the formation of carbides, and due to the lower density compared with the γ begin to deposit on the interface of intermediate layer and core. Large amount of carbides is well seen on figure 1. Sufficient solidification interval and a lower cooling rate are necessary to produce so stratified intermediate layer, which is undesirable microstructure. Carbides, which are not evenly dispersed on the metal matrix, represent a brittle layer in the casting.

Figure 2 is showing the isopleth phase diagram of working layer material. Solidification starts with solidification of austenite followed by eutectic reaction with solidification of M_7C_3 type carbides between 1260 and 1230 °C. Precipitation of $M_{23}C_6$ type carbides is taking place at 820 °C.

With the help of the programme TAPP 2.2, the density of eutectic M_7C_3 carbides and austenite at reference solidification temperature were calculated. Density of carbide M_7C_3 is 6.738 kg/dm³ at temperature of precipitation; austenite has a density of a 6.99 kg/dm³ at a temperature of precipitation. Given the relative difference in density between the austenite, carbides and the melt in the solidification stage of intermediate layer, it seems that stratification of both microstructural ingredients occurs. In first stage austenite dendrites appear and are pushed by centrifugal forces and higher density in direction near the working layer. When the temperature of

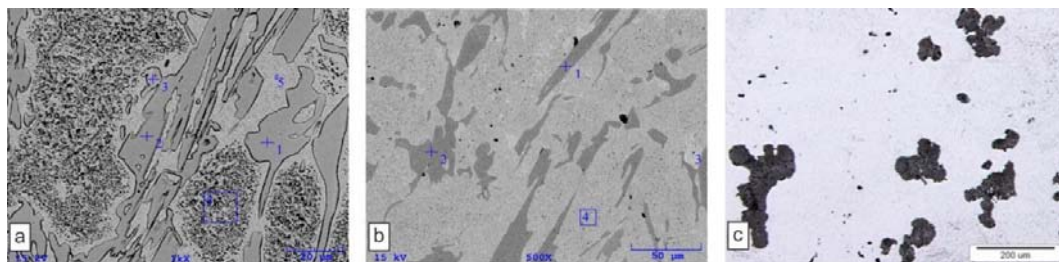
Slika 3a prikazuje SEM-mikroposnetek delovne plasti, v kateri so veliki delci karbidi, nastali pri evtektičnem strjevanju. EDS analiza kaže, da so ti delci karbidi vrste M_7C_3 . Manjši delci v osnovi so karbidi vrste $M_{23}C_6$, ki se izločajo v trdnem stanju iz trdne raztopine avstenita. Jasno je, da se je med toplotno obdelavo praktično ves avstenit pretvoril v martenzit. Vmesna plast tudi vsebuje karbide. Z EDS-analizo je bilo ugotovljeno, da so to karbidi vrste M_7C_3 , kar se vidi na sliki 3b. Obstaja še majhna količina manjših delcev, ki so porazdeljeni v osnovi martenzita, toda ta količina je mnogo manjša, ker je tu tudi količina karbidotvornih elementov občutno manjša kot v delovni plasti. Slika 3c kaže mikroposnetek poliranega vzorca jedra v svetlobnem mikroskopu, kjer se vidi grafit v železovi osnovi. Grafit naj bi bil kot kroglice, vendar ni, verjetno zaradi neustrezne obdelave taline z Mg in odgora magnezija med dolgotrajnim strjevanjem jedra.

Slika 4 prikazuje EDS-spekter analiziranih mikrostrukturnih sestavin, označenih na slikah 3a in 3b.

Izmerjene so bile trdote po Rockwellu od površne valja do globine 80 mm. Slika 5 prikazuje trdoto delovne plasti, ki je bila okoli 61 HRC do globine 600 mm, kjer se začne vmesna plast. V tej plasti se je

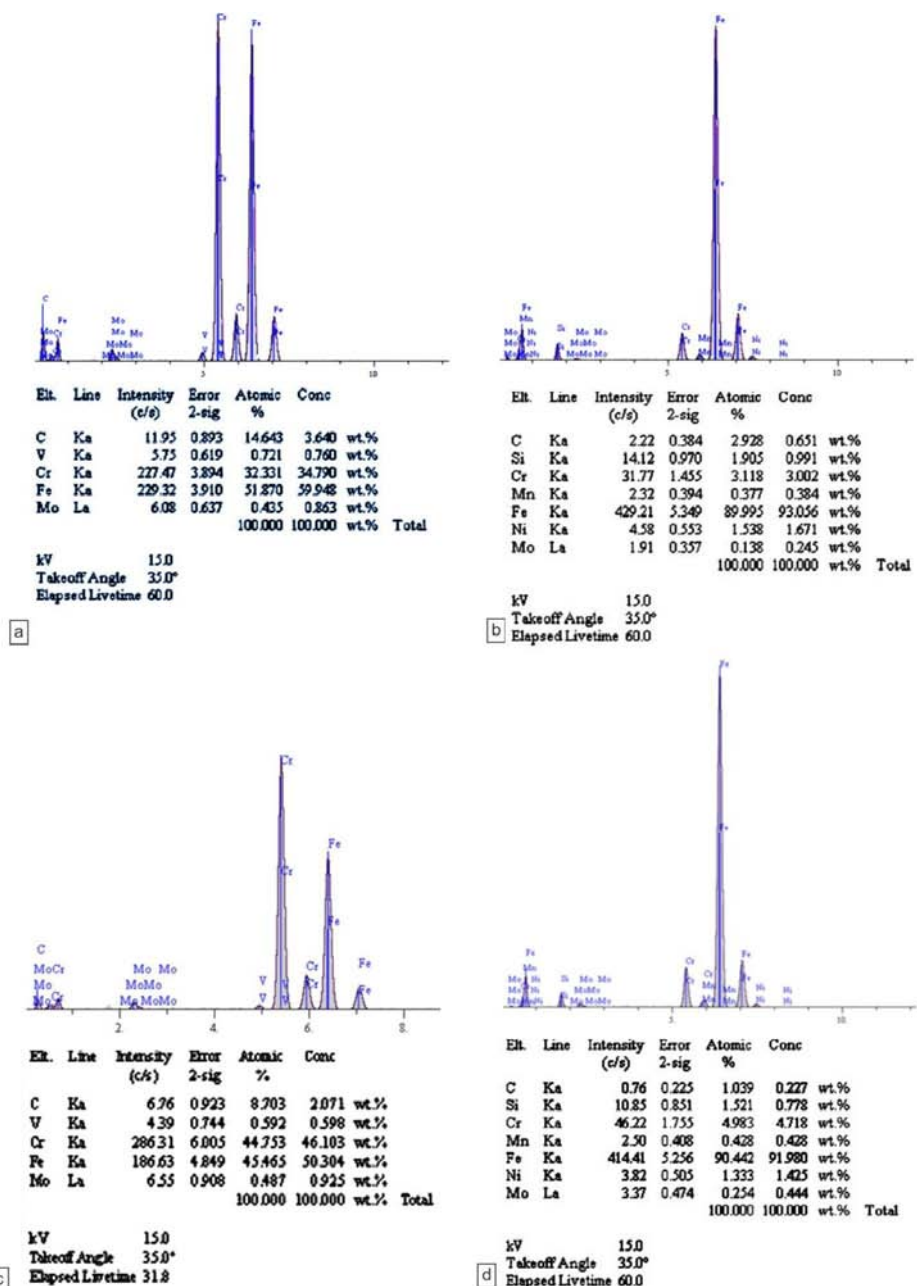
the remaining melt falls within the scope of eutectic solidification, leading to the development of nucleation and growth of the carbides they are pushed in the direction of interface between intermediate layer and core since carbides have lower density than austenite. The difference in density between the austenite and carbide is only $0,3 \text{ kg/dm}^3$ but the difference is much significant at centrifugal forces of 120 G leading to inhomogeneous microstructure development.

Figure 3a shows a SEM-microphotograph of working layer where large particles are carbides solidified during eutectic reactions. EDS-analysis show that these should be carbides of M_7C_3 type. Smaller particles in the matrix are carbides of $M_{23}C_6$ type precipitated in solid state from the solid solution of austenite. It is clear that practically whole austenite was transformed into martensite during heat treatment. Intermediate layer also contains carbides, determined by EDS-analysis to be M_7C_3 type seen on figure 3b. There is some small amount of smaller particles of secondary carbides distributed in the martensite matrix but the amount is much lower since the concentration of carbide promoting elements is much lower than in working layer. Figure 3c shows optic



Slika 3: Mikrostrukture vseh treh plasti: SEM-mikroposnetek delovne plasti (a), SEM-mikroposnetek vmesne plasti (b) in mikroposnetek jedra v svetlobnem mikroskopu (c)

Figure 3: Microstructures of all three layers: SEM microphotograph of working layer (a), SEM microphotograph of intermediate layer (b) and optic microphotograph of core(c)



Slika 4: EDS-spektri faz: karbidi M7C3, mesto 1 na sliki 3b (a), martenzit, mesto 3 na sliki 3b (b), karbidi M23C6, mesto 6 na sliki 3a (c) in martenzit s karbidi M23C6, mesto 4 na sliki 3b

Figure 4: EDS-spectrums of phases: M_7C_3 carbide, spot 1 on figure 3b (a), martensite, spot 3 on figure 3b (b), carbides $M_{23}C_6$, spot 6 on figure 3a (c) and martensite with carbide $M_{23}C_6$, spot 4 on figure 3b

trdota zmanjševala do jedra, kjer je bila trdota samo 32 HRC.

Natezni preizkusi vzorcev delovne plasti pri različnih temperaturah so pokazali, da se je natezna trdnost do temperature 400 °C zmanjšala za okoli 10 %, pri višjih temperaturah pa se je zmanjševala še hitreje in dosegla vrednost le 200 MPa pri 700 °C. To pomeni, da je delovna plast nagnjena k pokanju med ohlajanjem po litju, ker ima jedro mnogo višjo temperaturo, kar povzroča natezne napetosti v delovni plasti.

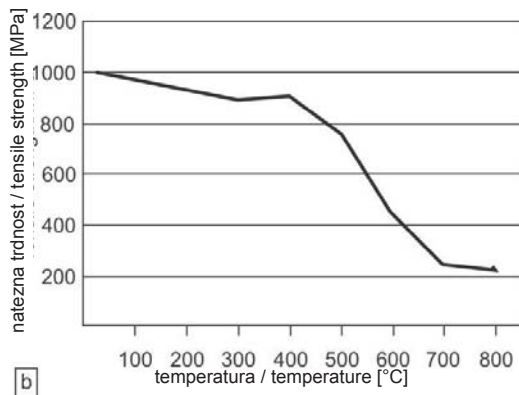
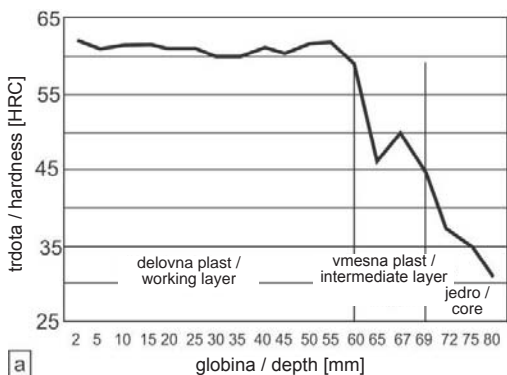
Slika 6 prikazuje rezultate dilatometrijske analize za dva vzorca delovne plasti, en vzorec vmesne plasti in en vzorec jedra. Delovna plast je pokazala najmanjše raztezanje od sobne temperature do 1100 °C. Vmesna plast je imela rahlo večje raztezanje pri najvišjih temperaturah, jedro pa največje raztezanje. Te razlike raztezanja povzročajo velike notranje napetosti med ohlajanjem gradientnega ulitka. Jasno je, da se pri ohlajanju ulitka površina (delovna plast) krči hitreje kot jedro, kar povzroča natezne napetosti v delovni plasti in to lahko vodi do pokanja. Podobne razmere so pri toplotni obdelavi valja, kjer se ves ulitek segreje na temperaturo avstenitizacije.

microphotograph of a core in a polished state where graphite in iron matrix is seen. Graphite should be in nodule like form but it is not probably due to insufficient Mg-treatment and burn-off of Mg during long solidification time of a core.

Figure 4 presents EDS spectrums of analyzed microstructural constituents marked on figures 3a and b.

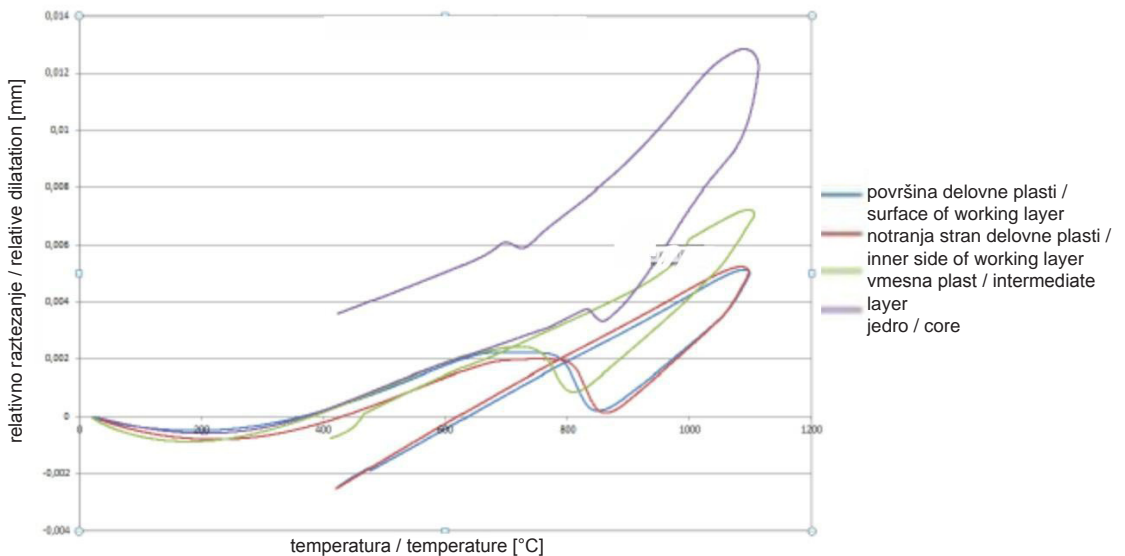
Rockwell Hardness measurements from surface of the roll to the 80 mm depth were carried out. Figure 5 presents hardness of a working layer which is around 61 HRC till the 600 mm in the depth when intermediate layer starts. In this layer hardness starts to descend and proceeds to descend into the core too where the hardness is only 32 HRC.

Tensile tests of working layer at different temperatures are presenting that tensile strength is lowered for about 10 % at 400 °C and at higher temperatures is lowered even faster and reaches only 200 MPa at 700 °C. This means that working layer has a tendency of crack formation during cooling after casting since core has much higher temperature and is causing tensile stresses in the working layer.



Slika 5: Mehanske lastnosti: trdota (a) in natezna trdnost pri različnih temperaturah (b)

Figure 5: Mechanical properties: hardness (a) and tensile strength at different temperatures (b).



Slika 6: Dilatacijske krivulje vzorcev različnih plasti

Figure 6: Dilatation curves of samples at different layers.

Jedro se razteza bolj kot delovna plast, kar znova povzroča natezne napetosti. Na sliki 6 se vidi, da je bila kvantitativna razlika pri raztezanju vzorcev 0,055 mm pri 1000 oC, kar ni zanemarljiva vrednost.

Napetosti, ki jih povzročajo različno raztezanje posameznih plasti pri strjevanju in ohlajanju ulitka so bile tudi izračunane s programsko opremo Procast. Vidi se, da so bile največje natezne napetosti dosežene ravno na meji med vmesno plastjo in jedrom, kar vodi do pokanja, potem pa je valj neuporaben zaradi luščenja⁵.

4 Sklepi

Ugotovljeno je bilo, kako poteka strjevanje različnih plasti. Očitno je, da vmesna plast natali delovnoplastin se nekaj karbidotvornih elementov raztopi v talini vmesne plasti, kar povzroči nastanek karbidov vrste M_7C_3 . V delovni plasti so tudi sekundarni karbidi vrste $M_{23}C_6$.

Figure 6 presents dilatometric analysis of for samples, two from working layer, one from intermediate layer and one from core. It is seen that working layer has the lowest dilatation in the temperature range from room temperature up to 1100 °C. Intermediate layer has slightly higher dilatation at the highest temperature but the core has the highest dilatation. These differences in dilatation are causing high internal stresses during cooling of the gradient casting. It is clear that when the casting is cooling the surface – the working layer in this case is shrinking faster than the core, which causes tensile stresses in the working layer, which might lead to a crack formation. Similar situation is met at heat treatment of the role, where whole casting is heated to austenitising temperature and core expands more than working layer causing tensile stresses again. From figure 6 it is seen that quantitative difference in

Karbid M_7C_3 imajo manjšo gostoto od avstenita, kar je vzrok, da so ti pri počasnem strjevanju vmesne plasti zaradi velikih centrifugalnih sil potisnjeni v notranji del plasti. Tako nastane nehomogena mikrostruktura.

Natezna trdnost delovne plasti se ne spreminja do 500 °C, potem pa se hitro zmanjšuje, kar vodi do odpovedi valja, če delovne temperature dosežejo take vrednosti.

Trdota po prerezu valja se v vmesni plasti zmanjšuje, kar je posledica manjše koncentracije primarnih in sekundarnih karbidov.

Dilatometriška analiza je pokazala velike razlike pri koeficientih linearnega raztezanja različnih plasti. Razlika pri raztezanju delovne plasti in jedra je 0,055 mm pri 1000 °C. Takšne razlike lahko povzročijo težave že med ohlajanjem ulitka po strjevanju ali pa med nadaljnjo toplotno obdelavo.

Viri / References

1. Trbižan M. Livarstvo, Ljubljana 2002
2. Jean-Pierre Breyer, Gisele Walmag, Metallurgy of High Chromium-Molybdenum White Iron and Steel rolls. Liege.
3. Rivera G., Calvillo P.R., Boeri R., Houbaert Y., Sikora J. Examination of the solidification macrostructure of spheroidal and flake graphite cast irons using DAAS and EBSD, Materials Characterization, vol. 59, 1342-1348. s.l. : Elsevier Science Publishing Company, 2008.
4. Gologranc F., Preoblikovanje 1. Ljubljana: s.n., 1991.
5. Roll Failures Manual - Hot Mill Cast Work Rolls, 1st Edition, The European foundry association – Roll selection, 2002.

dilatation of samples is 0,055 mm at 1000 °C which is not insignificant value.

Stresses caused by different dilatations of layers at solidification and cooling of the casting were also calculated by Procast software. It is seen that the highest tensile stresses are reached just at the interface between intermediate layer and the core, which can lead to a crack formation and a failure of a role such as spall. ⁵

4 Conclusions

Solidification of different layers was determined. It is clear that intermediate layer remelts the working layer and some carbide promoting elements dissolve in an intermediate layer melt, which cause formation of M_7C_3 type carbides. Working layer consists of secondary carbides too of a $M_{23}C_6$ type.

M_7C_3 type carbides have lower density than austenite which are a reason that at slow solidification of intermediate layer the formed carbides are pushed by high centrifugal forces into inner side of the layer. Inhomogeneous microstructure is obtained in this way.

Tensile strength of a working layer is not changed until 500 °C, then is rapidly lowered which can lead to role failure if such working temperatures are reached.

Hardness of the role cross-section is lowering in intermediate layer and in role as a result of lower concentration of primary and secondary carbides.

Dilatometric analysis showed high differences in linear expansion coefficients of different layers. The difference in the dilatation of a working layer and a core is 0,055 mm at 1000 °C. Such differences may cause problems already during cooling of the casting after solidification or during the following heat treatment.

Franc Zupanič¹, Carlos A. Nunes², Gilberto C. Coelho², Paula L. Cury², Gorazd Lojen¹, Christian Gspan³, Tonica Bončina¹

¹ Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Slovenija /

University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering, Slovenia

² Univerza v Sao Paulu, Šola za strojništvo, Brazilija / University of Sao Paulo, School of Engineering, Brazil

³ Inštitut za elektromikroskopijo in nanoanalize, Avstrija /

Institut für Elektronenmikroskopie und Nanoanalytik, Austria

Mikrostruktura kontinuirno ulite nikljeve dentalne zlitine

Microstructure of a Continuously Cast Ni-based Dental Alloy

Povzetek

Nikljeve zlitine, ki jih kontinuirno ulijemo, imajo več prednosti v primerjavi s klasično ulitimi zlitinami. Njihova mikrostruktura je bolj drobna, kar zagotavlja boljše mehanske lastnosti, prav tako pa so stroški za kontinuirno litje manjši. V tem delu smo se posvetili predvsem karakterizacije lite mikrostrukture. Preiskana zlitina je bila taljena v vakuumski indukcijski peči ter vertikalno kontinuirno lita. Palice premera 10 mm smo raziskali s svetlobnim mikroskopom, vrstičnim in presevnim elektronskim mikroskopom ter energijskodisperzijsko spektroskopijo rentgenskih žarkov. Mikrostruktura je bila sestavljena iz dvofazne osnove (izločki γ' v nikljevi trdni raztopini) ter nizkotaljivega eutektika. Prispevek obravnava tudi procese, ki potekajo med strjevanjem.

Ključne besede: kontinuirno litje, nikljeva zlitina, dentalna zlitina, mikrostruktura

Abstract

Ni-based alloys produced by continuous casting possess several advantages when compared to the conventionally cast ones. Their microstructure is much finer, providing better mechanical properties, and the continuous casting process is more cost effective. The main emphasis was given to characterization of the as cast microstructure. The investigated alloy was melted in a vacuum induction furnace and the vertically continuously cast. The rods with the diameter of 10 mm were investigated using light optical microscopy, scanning electron microscopy, transmission electron microscopy and energy dispersive X-ray spectroscopy. The microstructure consisted of the two-phase matrix (Ni-based solid solution and Ni₃(Al,Ti)-precipitates), and a low melting eutectic. The contribution also discusses processes taking place during solidification.

Keywords: continuous casting, nickel alloy, dental alloy, microstructure.

1 Uvod

V današnjem času večino kovinskih polproizvodov izdelujemo s kontinuirnim litjem. Glavne prednosti kontinuirnega litja

1 Introduction

Nowadays, the majority of semi-finished metal products are being cast continuously. The main benefits of continuous casting are

so povečanje produktivnosti in kakovosti produktov, kakortudizmanjšanje proizvodnih stroškov. Z vakuumskim taljenjem nikljevih zlitin lahko proizvajamo mnoge čistejše zlitine kot z običajnimi izdelovalnimi postopki, kajti takšni ulitki so skoraj brez oksidov in drugih škodljivih vključkov.

Raziskana nikljeva zlitina se uporablja kot substrat za kovinsko-keramične zobne krone [3]. Glavno prednost v primerjavi z zlatom predstavljata povečan modul elastičnosti in trdnost. Zato so lahko prerezi manjši, zmanjša pa se tudi možnost poškodbe zoba pri pripravi krone. Poleg tega se lahko kovina in keramična krona tesno sprimeta med žganjem, ker je temperaturni razteznostni koeficient nikljevih zlitin podoben temperaturnemu razteznostnemu koeficientu porcelana. Kljub številnim prednostim lahko slabša korozijska obstojnost [4] in cena teh zlitin omejeta njihovo uporabo.

Pri tej raziskavi smo kontinuirno ulili valjaste palice s premerom 10 mm. Glavni cilj je bil natančno opredeliti lito mikrostrukturo.

1 Materiali in metode

Zlitina je bila kontinuirno ulita na napravi za kontinuirno litje, ki je sestavljena iz vakuumske indukcijske talilne peči Leybold Heraeus in naprave za navpično kontinuirno litje Technica Guss. Sestava zlitine v masnih odstotkih je bila: 10,10 % Cr, 1,5 % Mo, 5,2 % Si, 0,2 % Ti, 3,5 % Al and 2,1 % Nb. Približno 14 kg zlitine je bilo taljene v korundnem loncu v vakuumu pri tlaku 10^{-3} do 10^{-2} mbar. Litje je potekalo v varovalni argonski atmosferi. Zlitina se je strjevala v 10 mm kokili iz bakrove zlitine. Pri litju je bil uporabljen izmenični vlek, ki je bil sestavljen iz obdobja vlečenja, obdobja mirovanja in obdobja povratnega sunka. Srednja hitrost litja je bila 520 mm/min.

increased productivity and quality of the products, as well as reduced production costs. The vacuum-melting of Ni-based alloys can produce much cleaner alloys in comparison to traditional manufacturing methods because the products are almost free of oxides and other harmful inclusions. In addition, their microstructure is finer, providing better mechanical properties [1,2].

The investigated nickel-based alloy is commonly used as a substructure of metal-ceramic crowns [3]. The main advantage of its usage represents an increased modulus of elasticity and strength as compared with gold. Thus, thinner sections of the alloy can be used, and consequently, tooth destruction during the crown preparation is less probable. Additionally, the metal and ceramic crown can be intimately bonded during firing because the thermal expansion coefficient of Ni-based alloys is well matched to that of the conventional porcelain. Despite many advantages, the corrosion resistance [4] and cost of these alloys somewhat limit their usage.

In the framework of this investigation, cylindrical rods with a diameter of 10 mm were continuously cast, and the main goal of this study was to characterize the as-cast microstructure.

1 Materials and Methods

The alloy was continuously cast by using a pilot-scale set up consisting of a Leybold Heraeus vacuum induction melting furnace and a Technica Guss vertical continuous caster. The composition of the alloy (in mass fraction, %) was: 10.10 % Cr, 1.5 % Mo, 5.2 % Si, 0.2 % Ti, 3.5 % Al and 2.1 % Nb. Approximately 14 kg of the alloy was melted under a vacuum of 10^{-3} to 10^{-2} mbar in an alumina crucible. A protective argon

Preiskavo s svetlobnim mikroskopom smo izvedli z mikroskopom Nikon Epiphot 300. Uporabili smo tudi vrstična elektronska mikroskopa FEI SIRION NC in FEI Quanta 3D ter presevalni elektronski mikroskop FEI Tecnai F20. Vzorec za presevalno elektronsko mikroskopijo je bil odvzet na določenem mestu z napravo fokusirani ionski curek (FEI Nova 200).

2 Rezultati in diskusija

Površina palice z ustnikovim znamenjem (primary witness mark) in znamenjem združitve (secondary witness mark) ter makrostruktura palice sta bili podobni kot v prejšnjih delih [2]. Makrostruktura je bila v glavnem sestavljena iz stebrastih kristalov, ki so segali od površine do središča palice. Kristalna zrna so rastle z značilno dendritno morfologijo (sl. 1). Razdalja med primarnimi in sekundarnimi vejami se je povečevala s povečevanjem razdalje od površine palice. Občasno se je v središču palice pojavila nitasta poroznost.

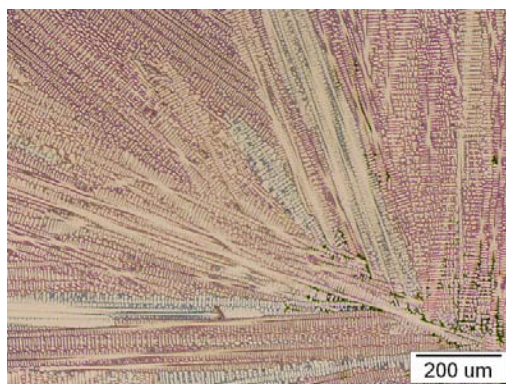
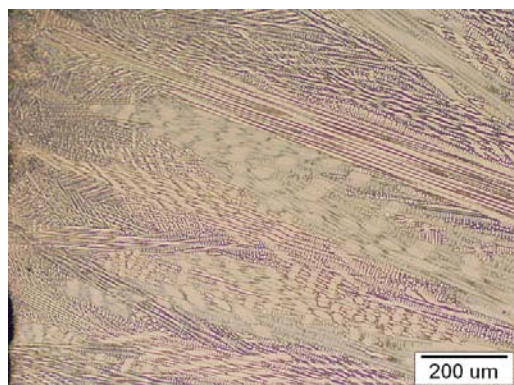
V vzdolžni smeri je makrostruktura periodična, kar izvira iz izmeničnega načina

atmosphere was used during continuous casting. The alloy solidified within a water-cooled copper-alloy mould (\varnothing 10 mm). The rod was extracted out of the mould using an “alternating drawing mode” consisting of the drawing stroke, the resting period and the reverse stroke, and the average casting speed was 520 mm/min.

Light microscopy (LM) work was done using Nikon Epiphot 300. The scanning electron microscopy (SEM) was carried out in a FEI SIRION NC and FEI Quanta 3D, and the transmission electron microscopy (TEM) in a FEI Tecnai F20. The TEM specimen was cut out at a specific site using a focussed ion beam (FIB) in a FEI Nova 200.

2 Results and Discussion

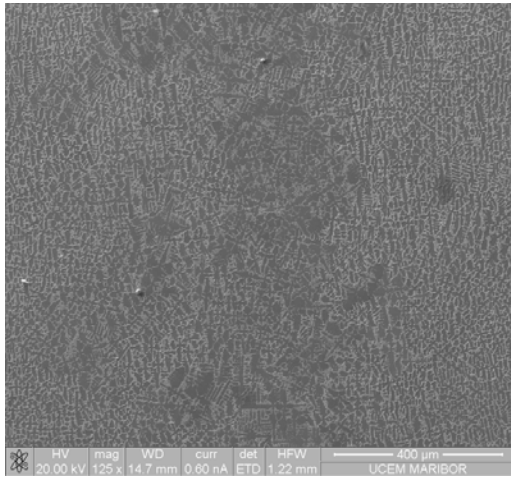
The surface of the rod with primary and secondary witness marks, as well as the macrostructure, was very similar to those reported in a previous work on continuous casting [2]. The macrostructure mainly consisted of columnar grains, extended from the rod surface towards the rod's centre.



Slika 1: Svetlobna mikrosposnetka prečnega prereza a) roba in b) središča palice.

Figure 1: Light-optical micrographs a) at the edge, b) at the centre of the rod (transversal cross-section)

vlečenja [1]. Valovna dolžina periodičnega vzorca je bila zelo blizu dolžini cikla. Ozko območje ob površini je bilo sestavljeno iz naključno orientiranih kristalnih zrn.



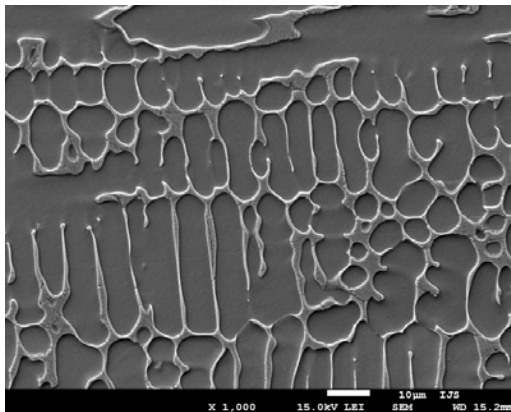
Slika 2: Elektronski mikrosnetek z odbitimi elektroni prikazuje vzdolžni prerez središča palice

Figure 2: A backscattered electron micrograph at a centre of the rod (longitudinal cross-section)

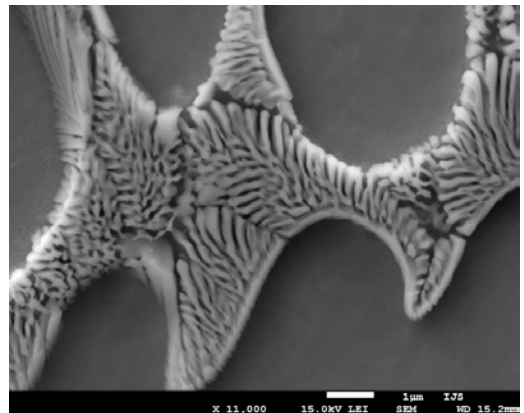
The grains grew with a typical dendritic morphology (Figure 1). The distances between the primary and secondary arms increased with increasing distance from the rod surface. Occasionally, solidification porosity was present at the rod's centre.

In the longitudinal direction, the rods clearly showed periodic macrostructure caused by the alternating drawing mode similar as in [1]. The wavelength of the periodic pattern corresponded closely to the cycle length. A shallow chill zone composed of randomly oriented crystal grains was present at the rod surface. Otherwise, columnar grains prevailed. They extended from the chill zone to the rod centre, except for some places (Figure 2). The γ -grains propagated almost perpendicular to the rod surface during drawing stroke, while they grew inclined to the casting direction during the resting period.

Figure 3 shows a typical microstructure. It consisted of γ -dendrites and binary eutectic ($\gamma + \text{Nb}_6\text{Ni}_{16}\text{Si}_7$). The intermetallic eutectic phase $\text{Nb}_6\text{Ni}_{16}\text{Si}_7$ has a morphology typical for a complex regular eutectic.



a)



b)

Slika 3: Mikrosnetka z odbitimi elektroni v središču palice (vzdolžni prerez): a) pregledna slika, b) povečana slika meddendritnega prostora z binarnim evtektikom

Figure 3: Backscattered electron micrograph at a centre of the rod (longitudinal cross-section): a) an overview image, b) magnified image of the interdendritic spaces, with the binary eutectic

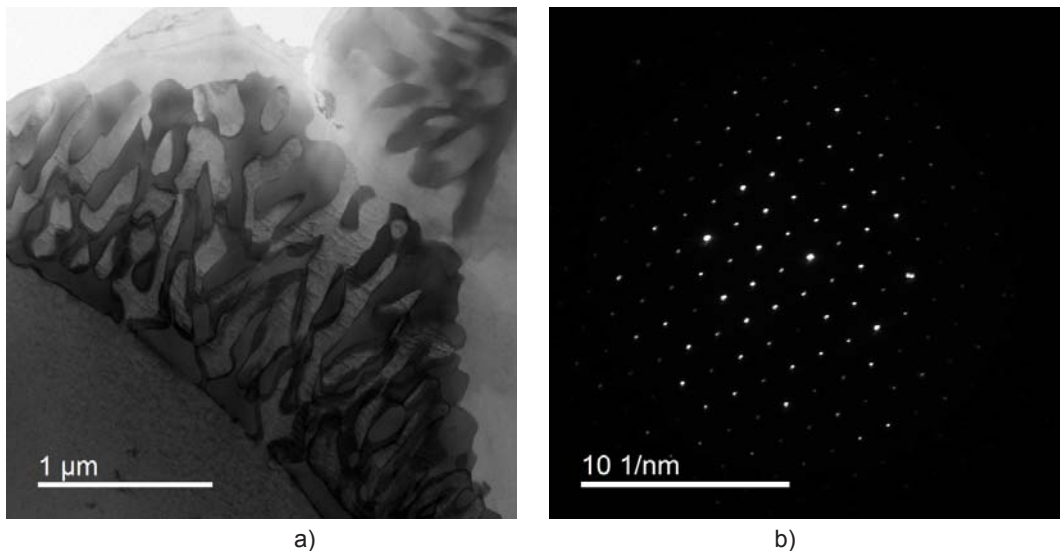
V večjem delu prereza so prevladovala usmerjena kristalna zrna. Razen na nekaterih mestih so se vselej raztezala od hitroohlajenega območja ob površini pa vse do središča palice (Sl. 2). Zrna γ (to je oznaka za trdno raztopino na osnovi niklja), ki so nastala med vlekem, so bili praktično pravokotna na površino kokile, medtem ko so zrna med obdobjem mirovanja rastle v smeri litja.

Slika 3 prikazuje značilno mikrostrukturo. Sestavljena je iz γ -dendritov in binarnega evtektika ($\gamma + \text{Nb}_6\text{Ni}_{16}\text{Si}_7$). Intermetalna evtektična faza $\text{Nb}_6\text{Ni}_{16}\text{Si}_7$ ima obliko, ki je podobna kompleksno urejenemu evtektiku. Natančnejša raziskava s presevnim elektronskim mikroskopom je pokazala, da $\text{Nb}_6\text{Ni}_{16}\text{Si}_7$ nastane na dendritnih vejah in potem raste v preostalo talino (sl. 4a). Ta faza se lahko hitro razveja, tako da se z lahkoto prilagaja spremembam strjevalnih parametrov ter razpoložljivemu prostoru v meddendritnem območju. Značilne velikosti

Close examination using TEM showed that $\text{Nb}_6\text{Ni}_{16}\text{Si}_7$ formed on dendritic arms of γ , and then grew into the remaining liquid (Fig. 4a). This phase can branch rapidly, thus easily responding to variation in solidification conditions, and adapting to the available space in the interdendritic region. Typical sizes of the eutectic cells were few micrometres, while the distances between lamellas were few tenths of micrometre.

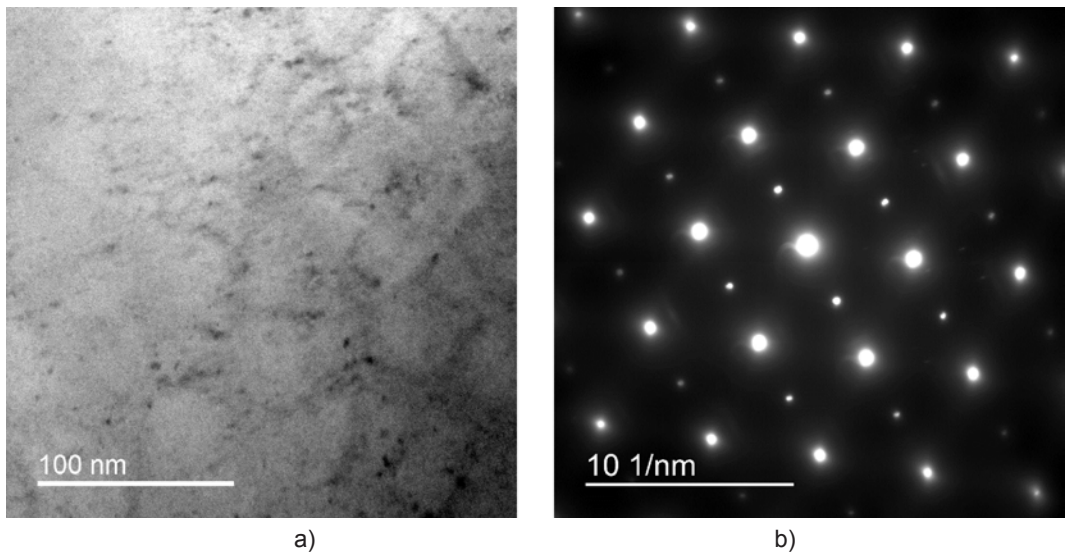
Fig. 4b shows the selected area diffraction pattern (SADP) taken along a $[011]$ axis of FCC- $\text{Nb}_6\text{Ni}_{16}\text{Si}_7$. From the positions of diffraction spots, it was calculated that the lattice spacing of $\text{Nb}_6\text{Ni}_{16}\text{Si}_7$ was $1.129 \text{ nm} \pm 0.010 \text{ nm}$.

Fig. 5 shows that the matrix was not only of Ni-solid solution γ , but also possessed precipitates γ' - $\text{Ni}_3(\text{Al},\text{Ti})$. Even more, the volume fraction of the precipitates was much larger than the volume fraction of the γ -phase. SADP shows that γ and γ' have almost the same lattice parameters,



Slika 4: Presevna elektronska mikroskopija: a) meddendritni prostor z binarnim evtektikom, b) uklonski vzorec izbranega območja (SADP) faze $\text{Nb}_6\text{Ni}_{16}\text{Si}_7$, s consko osjo vzporedni smeri $[011]$

Figure 4: Transmission electron microscopy: a) interdendritic space with the binary eutectic, and b) the selected area diffraction pattern taken along $[011]$ axis of the eutectic phase: $\text{Nb}_6\text{Ni}_{16}\text{Si}_7$



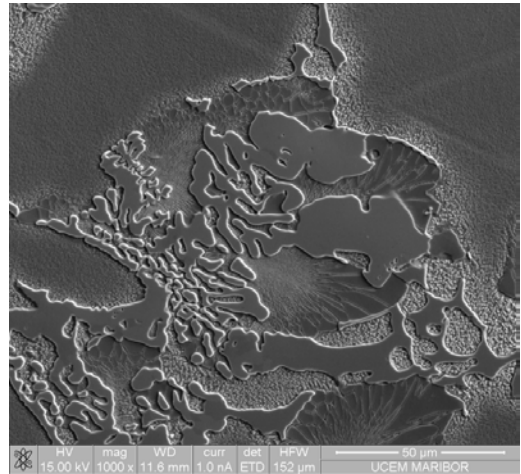
Slika 5: Presevna elektronska mikroskopija: a) osnova ($\gamma + \gamma'$), in b) in njen uklonski vzorec (SADP)
Figure 5: Transmission electron microscopy: a) the matrix ($\gamma + \gamma'$), and b) its selected area diffraction pattern (SADP).

evtektičnih celic so nekaj mikrometrov, medtem ko so bile razdalje med evtektičnimi lamelami nekaj desetink mikrometra.

Slika 4b prikazuje uklonski vzorec izbranega območja (SADP), pri čemer je bila conska os ploskovno centrirane kubične faze $\text{Nb}_6\text{Ni}_{16}\text{Si}_7$ vzporedna s smerjo [011]. Iz položaj uklonskih lis smo izračunali, da je bila mrežna konstanta faze $\text{Nb}_6\text{Ni}_{16}\text{Si}_7$ enaka $1.129 \text{ nm} \pm 0.010 \text{ nm}$.

Slika 5 kaže, da v osnovi ni bila samo faza γ , temveč tudi izločki γ' - $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$. Še več, prostorninski delež teh izločkov je presegal prostorninski delež faze γ . Uklonski vzorec izbranega območja (SADP) je pokazal, da sta imela γ in γ' skoraj enak mrežni parameter. Njegova vrednost je znašala $a = 0.328 \text{ nm} \pm 0.003 \text{ nm}$. Izločki γ' so nastali med ohlajanjem v trdnem stanju, pod temperaturo solvus te zlitine.

Slika 6 prikazuje mikrostrukturo precizijsko ulitega vzorca. Razvidno je, da so mikrostrukturne sestavina dosti bolj



Slika 6: Mikrosposnetek z odbitimi elektroni precizijsko ulite Ni-zlitine

Figure 6: Backscattered electron micrograph of the investment cast Ni-alloy

grobe. Strjevanje pri precizijskem litju je namreč počasnejše, zato nastanejo bolj grobe intermetalne faze. Navzočnost bolj grobih faz lahko podaljša čase taljenja v zobnem laboratoriju. Še več, makroizceje so v palicah, ulitih s precizijskim litjem, bolj pogoste in tudi izrazite, zato imajo lahko končni produkti neenake kemične sestave in s tem tudi različne tehnološke lastnosti.

Glede na vse rezultate lahko rečemo, da dobimo pri kontinuirnem litju mikrostrukture, ki so bolj primerni za zobotehniške aplikacije, kot tiste, ki nastanejo pri precizijskem litju.

3 Zaključki

V tem delu smo raziskali mikrostrukturo kontinuirno ulitih palic iz nikljeve zlitine, ki se uporablja za zobotehniške aplikacije. Mikrostruktura je bila pretežno sestavljena iz dendritne osnove, v kateri sta bili faza γ in izločki γ' . V meddendritnih prostorih je bil binarni evtektik ($\gamma + \text{Nb}_6\text{Ni}_{16}\text{Si}_7$). Izločki γ' so nastali med ohlajanje pri izločanju iz trdne raztopine pod temperaturo solvus.

Mikrostruktura, ki je nastala pri kontinuirnem litju, je bila drobnejša kot v precizijskih ulitkih. Poleg tega je imela manj makroizcej ter je bila precej čistejša. Na tej osnovi lahko upravičeno pričakujemo, da bo v naslednjih letih večina Ni-zlitin za zobotehniko izdelanih s kontinuirnim litjem.

4 Acknowledgements

To delo je podprla agencija ARRS v okviru bilateralnega projekta med Slovenijo in Brazilijo, št. BI-BR/12-14-003. Del dela je bil tudi podprt s strani Evropske skupnosti. TEM-raziskave na TU Graz so prejele finančno pomoč s strani 7. okvirnega programa: Grant Agreement 312483

and are coherent than in other nickel-based superalloys. The evaluated lattice parameters of both phases were: $a = 0.328 \text{ nm} \pm 0.003 \text{ nm}$. The γ' -precipitates formed during cooling in the solid state, below the alloy's solvus temperature.

Fig. 6 shows the microstructure of the investment cast sample. It is evident that the microstructural constituents are much coarser. The solidification of the investment cast rods was rather slow, resulting in formation of coarse intermetallic phases. The presence of coarse phases can increase the melting time in dental laboratory. In addition, macrosegregations are rather frequent in investment cast rods, thus the final parts can possess different chemical compositions, and thus different technological properties.

Therefore, continuous casting can produce microstructures that are more convenient for dental applications than those formed by investment casting.

3 Conclusions

In this work, the microstructure of continuously cast rods of a Ni-based alloy for dental applications was investigated. The microstructure composed mainly of the dendritic columnar matrix: γ -solid solution and γ' -precipitates. In the interdendritic regions, a binary eutectic formed ($\gamma + \text{Nb}_6\text{Ni}_{16}\text{Si}_7$). γ' -precipitates formed during cooling below the alloy's solvus temperature.

The microstructure formed during continuous casting was much finer than that formed during investment casting. In addition, the alloy possessed much less macrosegregation and it was much cleaner. Thus, it is expected that in the following years, most of the Ni-based dental alloys will be continuously cast.

- ESTEEM2 (Integrated Infrastructure Initiative–I3).

4 Acknowledgements

This work was supported by the ARRS under the framework of the Slovenian-Brazilian bilateral project BI-BR/12-14-003. Part of the work was carried out with the support of the European Community. The TEM investigations in TU Graz have received funding from the European Union Seventh Framework Programme under Grant Agreement 312483 - ESTEEM2 (Integrated Infrastructure Initiative–I3).

Viri / References

1. E. Herrmann, D. Hoffman (ed): "Handbook on Continuous Casting", V-VI; Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 1980
2. Zupanic, F., T. Boncina et al., "Microstructural evolution on continuous casting of nickel based superalloy Inconel* 713C." *Materials Science and Technology*, **18**(2002)7, 811-819.
3. J. C. Wataha, Alloys for prosthodontic restorations, *The Journal Of Prosthetic Dentistry*, **87** (2002), 351-363
4. M.J. Perricone and J.N. Dupont, Effect of Composition on the Solidification Behavior of Several Ni-Cr-Mo and Fe-Ni-Cr-Mo Alloys, *Metallurgical And Materials Transactions A*, **37A**, (2006), 1267-1280

AKTUALNO / ACTUAL



eta
CERKNO

Razgovor o prehojeni poti in dosežkih livarne ETA CERKNO d.o.o.



Slika 1: ANDREJ LIPUŠČEK, univ. dipl. ing. stroj., član uprave

Letošnji Občni zbor Društva livarjev Slovenije, je potekal 25.02.2015 v livarni Eta Cerčno d.o.o.. To priložnost smo izkoristili tudi za razgovor s članom uprave, gospodom Andrejem Lipuščkom, ki je v livarni Eta Cerčno zaposlen že 30 let, najprej je delal kot tehnolog, nato kot pomočnik direktorja, zadnjih 9 let pa je član uprave.

Začetek livarne sive litine sega v 50.leta prejšnjega stoletja. Torej gre za dolgoletno tradicijo. Na katerih proizvodih je livarna bila zasnovana ob svojih začetkih in kolikšno je bilo takratno število zaposlenih v livarni?

Začetek livarstva sega v 70- leta.

Otvoritev livarne 1 je bilo leta 1972. Delala je v 3. izmenah, na izmeni je bilo 20 delavcev, 3 delovodje in 10 vzdrževalcev. Če upoštevamo še tehnologijo in administracijo, je bilo vseh skupaj cca. 75 zaposlenih. Zasnovana je bila na ulitkih za kahalne plošče, tehnologija formanja je bila z vertikalno delilno ravnino DISA MATIC.

V segmentu električnih grelnih plošč je ETA Cerčno danes vodilni svetovni proizvajalec. Temu enkratnemu razvoju je moral slediti tudi razvoj livarne. Kateri so bili bistveni razvojni in tehnološki premiki v livarni, da je lahko sledila razvoju električnih grelnih plošč?

Bistvene spremembe v razvoju livarne, da smo ostali vodilni v svetu je bila sprememba tehnologije formanja iz vertikalne v horizontalno delilno ravnino. Na vertikalni delilni ravnini so se ulitki ulivali v etažah, kar je predstavljalo različen ferostatičen tlak in posledično različno površino ulitkov. Težave so bile z nedolitostjo tankih reber (cca. 1mm) na zgornji etaži, torej pri nižjem ferostatičnem tlaku. Ulitki so bili na vencu ovalni do 0,5 mm zaradi vertikalne lege v formi. S horizontalno delilno ravnino smo te napake v glavnem odpravili. Velik napredek v razvoju smo naredili s spremembo tehnologije cepljenja. Pri stari tehnologiji je cepljenje potekalo v ponvi, pri čemer se je dodalo FeSi na dno ponve pred polnjenjem, nakar se je naredilo klin probo in se dodalo še dodatno količino FeSi. Dodajalo se je cca. 1,5% FeSi na težo litine. Zaradi težav z dobavami kakovostnega FeSi po 90 – tem letu, smo začeli razmišljati o nujnosti spremembe tehnologije cepljenja. Poizkušali smo z doma narejeno napravo za cepljenje v curek, pri kateri smo količino cepiva regulirali z revolverjem, na

katerem so bile skožnje luknje različnih premerov. Ko se je potrdila pravilna usmeritev v tehnologijo cepljenja v curek, smo kasneje nabavili cepilni avtomat z vso potrebno regulacijo in nadzorom.

Danes vaša livarna ne proizvaja le grelnih plošč, temveč tudi druge vrste ulitkov. V katera nova uporabna področja sive litine ste se že podali in kakšne načrte imate še naprej? Ali so te spremembe v proizvodnem programu zahtevale tudi spremembe v sami tehnologiji in opremi?

Danes se ukvarjamo tudi z ulitki za strojogradnjo, z estetskimi ulitki za vidne dele samostoječih kaminskih peči, s temperaturno obremenjenimi ulitki za peči, z ulitki za ročne primeže različnih velikosti, z ulitki za rešetke na plinskih štedilnikih.

ETA Cerklje ima zelo dobro Orodjarno in možnosti mehanske obdelave ulitkov. Kakšne načrte in možnosti za razvoj vidite na tem področju na tej lokaciji?

ETA planira razvoj Orodjarne v sklopu novoustanovljenega obrata PTC 2 – proizvodno tehnološki center z vso konstrukcijsko in tehnično podporo za potrebe novih ulitkov v DE Livarna. Za izpolnitev zahtev bomo koristili vse lastne zmogljivosti in mrežo kooperantov. Njena primarna naloga pa ostaja izvajanje nalog za potrebe proizvodnih programov znotraj podjetja ETA.

Za načrtovanje ulitkov in livnega sistema ter simulacijo procesa litja uporabljate računalniško podporo. Katere programe uporabljate ter katere prednosti vam zagotavlja računalniška podpora?

Za simulacijo ulivanja in strjevanja uporabljamo programski paket MAGMA. Za konstrukcijo ulivnih sistemov, kot tudi modelov in modelnih plošč pa uporabljamo SolidWorks in Pro/ENGINEER. 3D modeliranje je danes postalo že standard. S simulacijo skušamo preveriti kakovost oblike ulivnega sistema, tako da pri analizi simulacije opazujemo določene parametre, za katere vemo, da morajo biti znotraj določenih mej, če želimo preprečiti nastanek napak na ulitkih. Predvsem se ukvarjamo z čim enakomernejšim polnjenjem livne votline, hitrostjo toka litine, ki ne bi smel presežati kritične hitrosti, možnostjo poroznosti oz. lunckerjev na ulitkih. Analizo simulacije uporabljamo tudi po izdelanih prvih kosih, v kolikor so na njih napake. Preverimo dogajanje, ki nam ga pokaže simulacija na lokaciji napake na ulitku.

Za vsako livarno so problemi tudi z ustvarjanjem ustreznih pogojev dela v obratih ter emisijami v okolje. Kako ste te probleme reševali do sedaj in kaj vas čaka še na tem področju glede na okoljske direktive oz. zakonodajo?

Livarna ETA je IPPC zavezanec, kar pomeni, da je dolžna spremljati in uvajati najboljše prakse v proizvodnji na tem področju. V okviru IPPC zavezanca smo že do sedaj skrbeli za ustrezno zmanjšanje koncentracij emisij – sežiganje halogenskih plinov, prašnih emisij in tudi obremenitev z hrupom.



Slika 2: Proizvodnja livarna

Kakovost proizvodnje je vezana tudi na analize in kontrolne postopke. Kako zagotavljate te zahteve?

Kakovost zagotavljamo s kontrolo procesa in prevzemno kontrolo. Za kontrolo procesa taljenja uporabljamo merjenje temperature s potopnim pirometrom. Za vsako šaržo se naredi bazično kemično analizo na spektrometru in na osnovi te se izvede korekcijo litine z dodatkom Fe – legur in naogljičevalca, nakar se pred izlivanjem ponovno preveri kemično sestavo. Uvajamo tudi termično analizo. Formarski pesek se pripravlja v avtomatiziranem procesu, kjer predpišemo količino dodatkov in ciljno vlago. Proces se kontrolira v livarskem laboratoriju. Prevzemna kontrola predstavlja vzorčno kontrolo ulitkov, na katerih se preveri parametre, ki so predpisani v konstrukcijski in kontrolni dokumentaciji. Ulivanje je avtomatizirano, pri čemer se po predhodnih nastavitvah, ki izhajajo iz tehnološke dokumentacije nadzira čas ulivanja, višina napolnjenega lijaka, enakomernost polnjenja.



Slika 3: vrata in kurišča

Katere večje investicije so bile v livarni izvedene v zadnjih petih letih in s kakšnim osnovnim ciljem? Katere razvojne projekte in investicije predvidevate v naslednjem srednjeročnem obdobju in s kakšnimi pričakovanimi rezultati?



Slika 4: venec zobati za betonski mešalec

Pomembna razvojna usmeritev je bila nabava spektrometra, ki je bil vključen v proizvodni proces kot tehnološko merilo. Do tedaj so se kemične analize izvajale samo v kemičnem laboratoriju in organiziranost ni dopuščala večje fleksibilnosti, ki je bila potrebna zaradi prilagajanja proizvodnega procesa potrebam trga. Nov koncept je zasnovan tako, da analizo naredi delovodja izmene, s čemer pravzaprav izvaja samokontrolo. Z investicijo v ulivni avtomat z negreto ponvijo in zapiranjem s čepom smo močno izboljšali pogoje ulivanja. Nivo litine v formi je znotraj manjšega raztrosa in



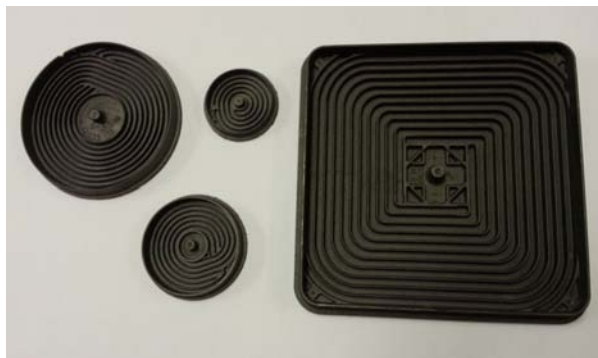
Slika 5: ulitki za peči na pelete

je v povprečju nižji, kar predstavlja manjšo porabo električne energije za taljenje (izboljššan izkoristek). Toplotne izgube pri ulivanju so manjše, ker je ponev v celoti zaprta in je eno prelivanje odpadlo. Če izgube izrazimo v temperaturi pregretja, lahko rečemo, da litino v peči pregrevamo v povprečju na 40°C nižjo temperaturo. Naslednji pomembni razvojni korak smo naredili z investicijo v regeneracijo povratnega peska. Težava, ki se je kazala in je posledica zasnove livarne 2, ki je še vedno bazirala na proizvodnji tankostenih ulitkov za kuhlne plošče, je zelo veliko razmerje pesek : litina. To veliko razmerje izhaja iz zadostne višine forme, ki je bila pri takratnih vedenjih in izkušnjah potrebna za primeren ferostatičen tlak, s čemer smo poleg visoke temperature litine, zagotavljali zalitost tankih sten. Veliko razmerje pesek : litina, nam je povzročalo težave v tem, da so se fine frakcije in odprane snovi stabilizirale na zelo visokem nivoju in so vezale velike količine vode. Največkrat dodana voda ni zadoščala za ustrezno vezivno sposobnost bentonita in posledično napake na ulitkih. Frakcije, ki »kradejo« vlago bentonitu smo zmanjševali z večjim dodatkom novega peska, pri čemer pa je količina v sistemu narasla preko kapacitet, tako da ga je bilo potrebno jemati iz sistema in odvažati na deponijo. Z investicijo v regeneracijo povratnega peska smo porabo novega peska močno zmanjšali in količina peska v sistemu je stabilna. Dodajamo ga samo toliko, kot je naravnih

izgub.

ETA Cerkno je že vrsto let vključena v ugledno mednarodno skupino E.G.O. group. Kakšne pridobitve in sinergijske učinke ter prednosti prinaša podjetju ETA vključevanje v ta poslovni sistem?

EGO skupina je lastnik pomembnih programov iz proizvodnje podjetja ETA, kot je litoželezna plošča. Program le te je bil prenesen samo za določena tržišča, šele kasneje je ETA postala največje proizvodno mesto litoželeznih plošč na svetu. S tem, ko je EGO prenašal proizvodnjo tega izdelka v Slovenijo, je omogočil tehnološko obvladovanje velike globine proizvodnje. V primeru grelnih plošč vstopa v proces staro železo, električna energija, izolacijska masa, špirale, izstopa pa izdelek grelna plošča. Sama globina proizvodnje, ustrezna racionalizacija in konkurenčnostjo nam je do sedaj in v bodoče zagotavljala uspešno poslovanje.



Slika 6: ulitki za litoželezne plošče

AKTUALNO / ACTUAL**48. poročilo o svetovni livarski proizvodnji**

V letu 2013 se je nadaljevala rast svetovne livarske proizvodnje. Svetovna livarska proizvodnja se je povečala do cca. 103 mio. ton, kar je 3,43 mio. ton več oz. 3,4 % povečanje v primerjavi z letom 2012.

Povečanje je torej za spoznanje večje od doseženega 2,4 % povečanja v letu 2012.

Od 31 držav, ki so zagotovile podatke za zadnji dve leti, jih je 18 poročalo o zmanjšani letni količinski proizvodnji v letu 2013 v primerjavi z letom 2012. Poljska je povečala svojo celotno proizvodnjo za 18%. V skupini s slabšimi rezultati je Pakistan doživel največji padec proizvodnje v livarski industriji, ki se je zmanjšala za celih 23,2 %. Med 10 državami svetovne livarske proizvodnje, je Brazilija dosegla največji porast proizvodnje v letu 2013 in sicer za 6,9 %.

Kitajska je svojo celotno proizvodnjo povečala za 2 milijona ton, kar znaša 44,5 mio. ton. Pretežni del porasta v globalni livarski proizvodnji torej prispeva Kitajska in se tem tudi nadaljuje s povečevanjem svojega deleža na svetovnem trgu. Na drugi strani pa so Združene države Amerike, ki so na drugem mestu po količinski livarski proizvodnji, povečale proizvodnjo za 32,9 %, kar znaša 12,25 mio. ton. Medtem ko sta dve vodilni državi v svetovni livarski proizvodnje beležili porast proizvodnje, so v nekaterih drugih državah dosežki slabši. Tako so denimo Francija, Rusija in Nemčija beležile padec proizvodnje za 3-5 %.

Indija je ostala na 3. mestu na lestvici svetovne livarske proizvodnje s proizvedenimi 9,81 mio. ton. Mesta na lestvici od 4. pa vse do 10. so ostala nespremenjena. Japonska je proizvedla 5,54 mio. ton, Nemčija 5,19 mio. ton, Rusija 4,1 mio. ton, Brazilija 3,07 mio. ton, Koreja 2,56 mio. ton, Italija 1,97 mio. ton in Francija 1,75 mio. ton. Top 10 držav je proizvedlo 88 % celotne svetovne livarske proizvodnje.

Livarska industrija ZDA je dosegla povprečen porast proizvodnje na livarno za 4,4 %, kar znaša 6,122 ton. Nemčija pa je kot vodilna po proizvodnji na livarno, je s proizvedenimi 8659 tonami na obrat, dosegla v letu 2013 povečanje za samo 41 ton na livarno.

Kitajska in Indija, državi z največjim številom proizvodnih livarskih obratov, sta poročali o porastu produktivnosti za 4,73% oz. 2,7%.

Gibanje skupne livarske proizvodnje na bazi železa pa je naslednje. Pri sivi litini in nodularni litini se beleži povečanje za 4,6% oz. 1,3%, pri temprani litini pa padec za 27,1%. Proizvodnja jekla se je znižala za 0,1%, medtem ko se je proizvodnja aluminija povečala za 9,9%.

Podatki, navedeni v 48. Cenzusu svetovne livarske proizvodnje, so pridobljeni s strani livarskih združenj ali s strani njihovih predstavnikov v posameznih državah. Države, ki niso sodelovale v letošnjem letu so bile Danska, Mehika, Srbija, Slovaška in Južna Afrika. Zato so v pregledu za leto 2013 za te države upoštevani podatki za leto 2012. Mongolija, ki ni predložila podatkov že od leta 2009 naprej, je bila odstranjena s seznama. Tajska se je po daljšem premoru zopet vključila in poročala o proizvodnji 316.400 ton.

Mehika, Ukrajina in Turčija ostajajo izven lestvice top 10 držav po obsegu livarske proizvodnje. Odvisno od gospodarskih razmer v naslednjih letih, pa je žožno pričakovati, da bi se njihov položaj lahko izboljšal in presegel npr. Francija in Italija.

Povzeto iz revije Modern Casting, Vol. 104, Nr. 12, Dec. 2017, str. 17/21: 48th Census of World Casting Production.

Podobno je podatke obdelala tudi avstrijska livarska revija, Giesserei Rundschau, letnik 62, zvezek.1-2, 2015.

Skupna svetovna proizvodnja

| Siva litina | Nodularna litina | Temprana litina | Jeklo litina | Baker | Aluminij | Magnezij | Cink | Druge neželezne | Skupno |
|-------------|------------------|-----------------|--------------|-----------|------------|----------|---------|-----------------|-------------|
| 47.821.690 | 25.057.669 | 925.565 | 11.123.572 | 1.788.602 | 15.357.327 | 175.861 | 453.861 | 525.672 | 103.229.774 |

Amerika

| Država | Siva litina | Nodularna litina | Temprana litina | Jeklo litina | Baker | Aluminij | Magnezij | Cink | Druge neželezne | Skupno |
|-----------|-------------|------------------|-----------------|--------------|---------|-----------|----------|---------|-----------------|------------|
| Brazilija | 1.825.000 | 746.300 | - | 232.500 | 17.700 | 241.700 | 4.600 | 3.600 | - | 3.071.400 |
| Kanada | 377.789 | - | - | 91.983 | 14.536 | 220.729 | - | - | - | 705.037 |
| Mehika** | 771.700 | 58.947 | - | 78.746 | 140.701 | 600.469 | 109 | 1.007 | - | 1.651.679 |
| ZDA | 4.083.000 | 4.251.500 | 81.250 | 1.422.850 | 321.400 | 1.682.000 | 108.000 | 238.400 | 61.600 | 12.250.000 |

**podatki iz 2011

Azija

| Država | Siva litina | Nodularna litina | Temprana litina | Jeklo litina | Baker | Aluminij | Magnezij | Cink | Druge neželezne | Skupno |
|----------|-------------|------------------|-----------------|--------------|---------|-----------|----------|--------|-----------------|------------|
| Kitajska | 20.550.000 | 10.600.000 | 600.000 | 5.500.000 | 750.000 | 5.200.000 | - | - | 300.000 | 44.500.000 |
| Indija | 6.700.000 | 1.000.000 | 60.000 | 1.100.000 | - | 950.000C | - | - | - | 9.810.000 |
| Japonska | 2.135.794 | 1.683.250 | 45.001 | 181.679 | 79.611 | 1.382.015 | - | 27.293 | 6.394 | 5.538.037 |
| Koreja | 1.086.400 | 705.100 | 6.000 | 164.100 | 26.400 | 560.900 | - | - | 13.100 | 2.562.000 |
| Pakistan | 150.000 | 15.000 | - | 35.000 | 10.000 | 10.000 | - | - | - | 220.000 |
| Rusija | 2.800.000 | - | - | 700.000 | - | 600.000C | - | - | - | 4.100.000 |
| Tajvan | 560.989 | 190.941B | - | 75.872 | 42.429 | 280.571 | 6.748 | - | - | 1.157.550 |
| Tajska | 72.400 | 28.800 | 29.500 | 29.800 | 26.100 | 105.400 | - | 24.400 | - | 316.400 |
| Turčija | 600.000 | 500.000 | 8.000 | 135.000 | 14.000 | 270.000 | - | 16.000 | - | 1.543.000 |

Afrika

| Država | Siva litina | Nodularna litina | Temprana litina | Jeklo litina | Baker | Aluminij | Magnezij | Cink | Druge neželezne | Skupno |
|---------------|-------------|------------------|-----------------|--------------|--------|----------|----------|-------|-----------------|---------|
| Južna Afrika* | 161.000 | 59.000 | - | 118.000 | 14.300 | 21.000 | 300 | 1.400 | - | 375.000 |

B) vsebuje temprano litino C) vse neželezna zlitina

*podatki iz leta 2012

| Evropa | | | | | | | | | | |
|----------------------|-------------|------------------|-----------------|--------------|--------|----------|----------|--------|-----------------|-----------|
| Država | Siva litina | Nodularna litina | Temprana litina | Jeklo litina | Baker | Aluminij | Magnezij | Cink | Druge neželezne | Skupno |
| Avstrija | 40.751 | 116.966B | - | 13.084 | - | 125.768 | 5.818 | - | 14.408 | 316.795 |
| Belgija | 35.000 | 5.800 | - | 30.600 | - | 646C | - | - | - | 72.046 |
| Bosna in Hercegovina | 9.738 | 1.675 | - | 4.385 | - | 7.158C | - | - | - | 22.956 |
| Hrvaška | 33.900 | 8.600 | 100 | 200 | 16.400 | 19.781 | - | 30 | - | 79.011 |
| Češka | 169.564 | 48.202 | 8.650 | 76.380 | 6.609 | 87.744 | - | 10.182 | 1.072 | 408.358 |
| Danska** | 31.800 | 47.400 | - | - | 1.273 | 3.172 | - | - | 290 | 83.935 |
| Finska | 19.300 | 37.000 | - | 13.900 | 4.346 | 2.996 | - | 258 | - | 77.800 |
| Francija | 635.414 | 703.141 | - | 80.688 | 17.618 | 290.721 | - | 17.765 | 2.819 | 1.748.166 |
| Nemčija | 2.381.462 | 1.541.737 | 30.234 | 207.858 | 68.523 | 885.661 | 16.371 | 55.142 | 3 | 5.186.727 |
| Madžarska | 30.900 | 39.400 | 13 | 5.000 | 2.333 | 97.960 | 331 | 3.798 | 170 | 179.905 |
| Italija | 689.000 | 387.600B | - | 69.700 | 63.122 | 695.697 | - | 6.729 | 59.120 | 1.970.968 |
| Norveška | 13.613 | 37.183 | - | 2.493 | - | 6.474C | - | - | - | 59.763 |
| Poljska | 700.000 | 156.000 | 1.100 | 55.000 | 6.000 | 340.000 | - | 8.000 | - | 1.226.100 |
| Portugalska | 33.140 | 67.641 | - | 7.557 | 9.502 | 20.014 | - | 1.073 | - | 138.927 |
| Romunija | 25.385 | 3.024 | 875 | 15.420 | 4.216 | 48.725 | 5.050 | 175 | 168 | 103.038 |
| Srbija* | 37.251 | 15.162 | 10.328 | 9.050 | 2.220 | 4.958 | - | - | 7.528 | 86.497 |
| Slovaška** | 2.700 | 18.200 | - | 4.100 | - | 46.000C | - | - | - | 11.000 |
| Slovenija | 77.500 | 34.900 | 3.800 | 31.400 | 59.800 | 35.521 | - | 2.650 | - | 245.571 |
| Španija | 321.300 | 579.700 | 5.100 | 75.300 | 11.756 | 110.601 | - | 8.288 | - | 1.112.045 |
| Švedska | 163.000 | 44.900 | - | 20.400 | 10.300 | 35.700 | 1.400 | 6.500 | - | 282.200 |
| Švica | 15.900 | 29.600 | - | 1.800 | 1.207 | 15.646 | 4.960 | - | - | 69.113 |
| Ukrajina | 360.000 | 120.000 | 35.000 | 470.000 | 40.000 | 250.000 | 12.000 | 20.000 | 58.000 | 1.365.000 |
| Velika Britanija | 121.000 | 175.000 | 650 | 64.000 | 9.200 | 101.600 | 3.400 | 7.900 | 1.000 | 483.750 |

*podatki iz leta 2012 **podatki iz leta 2011 B) Vsebuje temprano litino C) Vse neželezna zlitina

| Število livam po državah | | | | |
|--------------------------|-------------|--------------|-----------|--------|
| Država | Siva litina | Jeklo litina | Neželezne | Skupno |
| Avstria | | | | 46 |
| Belgija | 12 | 6 | 7 | 25 |
| Bosna in Hercegovina | 7 | 4 | 4 | 15 |
| Brazil | 500 | 148 | 704 | 1.352 |
| Kanada | 41 | 29 | 110 | 180 |
| Kitajska | 17.000 | 5.000 | 8.000 | 30.000 |
| Hrvaška | 26 | 5 | 27 | 58 |
| Češka | 86 | 34 | 63 | 183 |
| Danska** | 9 | - | 11 | 20 |
| Finska | 14 | 5 | 16 | 35 |
| Francija | 89 | 36 | 303 | 428 |
| Nemčija | 258A | - | 341 | 599 |
| Madžarska | 27 | 19 | 97 | 143 |
| Indija | - | - | - | 4.600 |
| Italija | 149 | 25 | 913 | 1.087 |
| Japonska | 817 | 75 | 1.193 | 2.085 |
| Koreja | 525 | 146 | 239 | 910 |
| Mehika** | 175 | 167 | 339 | 681 |
| Norveška | 7 | 3 | 6 | 16 |
| Pakistan | 1.500 | 40 | 100 | 1.640 |
| Poljska | 185 | 48 | 255 | 488 |
| Portugalska | 31 | 7 | 30 | 68 |
| Romunija | 40 | 39 | 55 | 134 |
| Rusija* | - | - | - | 1.200 |
| Srbija | 12 | 8 | 18 | 38 |
| Slovaška** | 12 | 7 | 32 | 51 |
| Slovenija | 8 | 2 | 5 | 15 |
| Južna Afrika* | 63 | 26 | 91 | 180 |
| Španija | 48 | 30 | 52 | 130 |
| Švedska | 34 | 13 | 77 | 124 |
| Švica | 18 | 4 | 50 | 72 |
| Tajvan | - | - | - | - |
| Tajska | 280 | 40 | 260 | 580 |
| Turčija | 603 | 66 | 366 | 1.035 |
| Ukrajina | 285 | 305 | 310 | 900 |
| Velika Britanija | 221A | - | 205 | 426 |
| ZDA | 640 | 360 | 1.001 | 2.001 |
| SKUPNO | 23.745 | 6.703 | 15.313 | 51.561 |

*Podatki iz leta 2012 **Podatki iz leta 2011 A) livarne železnih litin

AKTUALNO / ACTUAL



Sodelovanje in aktivnosti v CAEF - Evropskem združenju livarjev

The European Foundry Association

Predstavitev združenja CAEF in aktivnosti v letu 2014

CAEF- The European Foundry Association (evropska zveza livarn) povezuje 22 nacionalnih livarskih združenj iz 21 evropskih držav. Ustanovljena je bila leta 1953 in tako je eden od pionirjev v evropskih povezavah. Sedež CAEF je od leta 1997 v Duesseldorfu. Slovensko livarstvo je povezano v CAEF preko Gospodarske zbornice Slovenije.

Po statutu je osnovna naloga organizacije vpogled v vsa vprašanja, ki so pomembna za livarsko industrijo, ne glede na to ali gre za vprašanja iz ekonomskega, tehničnega, pravnega ali pa socialnega področja. Istočasno pa CAEF vključuje tudi aktivnosti, ki imajo namen razvijati livarsko industrijo pri posameznih članicah in implementirati mednarodne interese.

Osnovno poslanstvo CAEF je:

Prvič - udejanjati interese livarske industrije napram Evropskim institucijam, še več, poskuša postati partner v vseh segmentih livarske industrije.

Drugič - usmerjanje je v promoviranje informacij med posameznimi livarskimi združenji in koordinacija aktivnosti med nacionalnimi združenji, če se pokaže, da to prispeva k višjemu »izplenu« industrije kot celote. Na tej stopnji ima CAEF že zelo dobro razvito institucionalno strukturo sodelovanja med nacionalnimi zvezami.

Ustanovljene so različne komisije, skupine in sekcije, ki koordinirajo delo CAEF. Aktivnosti komisij so usmerjene na splošni interes oziroma na celotno livarsko industrijo, neodvisno od nacionalnih združenj. Sedaj ima CAEF šest komisij, komisijo za izobraževanje, za okoljsko problematiko, za raziskovalno dejavnost, za statistiko...

Pri skupinah gre večinoma za aktivnosti izmenjave informacij o ekonomski situaciji pri posameznih članicah. Ima dve skupini in sicer za jeklolitino in neželezne ulitke.

Sekcije pa so naslednje: za avtomobilsko industrijo, konti litje, splošno inženirstvo, valje, precizijsko litje in sekcija za ulitke za vetrne elektrarne.



Slika: Udeleženci sestanka koordinacijskega odbora iz Avstrije, Belgije, Češke Republike, Španije, Francije, Finske, Hrvaške, Italije, Norveške, Nizozemske, Portugalske, Slovenije, Velike Britanije in Nemčije in Madžarske

Na vrhu CAEF-a deluje managing committee, ki ima nalogo koordiniranja in usklajevanja aktivnosti sekretarjev posameznih nacionalnih združenj. V novembru lansko leto, je potekal sestanek tega organa z naslednjim dnevnim redom: ogled novih prostorov (laboratorijev in oddelka za mehanske preiskave), splošna ekonomska situacija – pregled je podal generalni sekretar CAEF, g. Max Schumacher, nato pa je sledila diskusija, v kateri so posamezni člani podali stanje livarstva v državah članic, kar je zelo zanimiv pristop. Sledila so poročila komisij in sekcij z obširno diskusijo oziroma dopolnitvami posameznih članov. Pod točko Razno pa smo določili datume sestankov in dogodkov za naslednje leto. Velikokrat pa imamo na sejah posebne goste, ki osvetlijo določene aktualne teme.

V vsakem primeru, so na dnevnem redu zelo aktualne teme, ki se osvetlijo s podatki iz različnih strani, in na podlagi le teh so zaključki izredno usmerjeni, saj udeleženci s svojimi dolgoletnimi izkušnjami dodajo novo vrednost.

Poročal: mag. Martin Debelak- strokovni tajnik Društva livarjev Slovenije

AKTUALNO / ACTUAL



8. posvetovanje »Livarska tehnologija pri izdelavi motorjev 2015«

V času od 10.-11. februarja letos je v Magdeburgu, Nemčija, potekalo osmo posvetovanje »Livarska tehnologija pri izdelavi motorjev«. Organizator je bil skupaj z univerzo v Magdeburgu VDI - Verein Deutscher Ingenieure.

Posvetovanje je na vsaki dve leti, predstavlja pa tradicionalen pregled stanja livarske tehnologije pri izdelavi avtomobilskih motorjev. V zadnjih letih se je razvil v dneve »Usmerjanja dejavnosti za livarje in razvojnike avtomobilskih motorjev«. S svojim celotnim spektrom obravnavane tematike z inovativnim pristopom izdelave posameznih sklopov, livarsko tehnologijo in procesi kot tudi simulacijami procesov, posvetovanje predstavlja pogled na aktualne trende pri uporabi novih materialov in tehnologij, predvsem pri uporabi motorjev z notranjim zgorevanjem. Prav zaradi zelo aktualnih tem je bilo udeležencev skoraj 400 iz različnih dejavnosti, tako livarn kot uporabnikov ulitkov in pa seveda raziskovalne sfere iz praktično celotne avtomobilske dejavnosti. Predavanj je bilo skupno 22.

Poleg aktualnih primerov uporabe iz avtomobilske dejavnosti s poudarkom na uporabo lahkih materialov in izdelkov s končnimi oblikami, z vključevanjem možnosti zmanjševanja stroškov izdelave, so bile predstavljene tudi nove livarske tehnologije z uporabo nove tehnologije izdelave jeder. Podane so bile tudi inovativne simulacijske metode za procesne tehnologije kot tudi napovedovanje lastnosti posameznih izdelovalnih sklopov ulitkov pod toplotno-mehanskimi obremenitvami in izračuni življenjskih dob takšnih »sklopov. Doprinos k novim materialom ali hibridnim kombinacijam materialov, kot tudi izboljšanju lastnosti z dodatno obdelavo, nudi nove izzive konstruktorjem po čedalje višjih zahtevah pri obremenitvah delov motorjev ob istočasno zmanjšanih težah.

Predavanja so bila razdeljena na posamezne tematske sklope, ki so zaokroževali raziskovalne, tehnološke in razvojne teme.

Plenarna predavanja so pokrivala osnovne trende izdelave motorjev, ki jo pokriva livarska tehnologija oziroma trende v livarstvu glede na zahteve in priložnosti.

Pregled sklopov predavanj pa je na kartko naslednji:

Razvoj izdelkov - primerjava konkurenčnih prednosti aluminija in sive litine, izdelava glav cilindrov, vrednotenje oziroma izračun pri simulacijah izdelave in pa simulacije livarskih procesov za izdelavo različnih vrst ulitkov.

Materiali - razvoj materialov glede na statične in dinamične lastnosti, dinamični preiskusi, strjevanje pod različnimi pogoji, razvoj novih materialov na osnovi AlCu zlitin, vpliv različnih elementov na kokilno litje AlCu zlitin in razvoj sredstev za »udrobnavanje« za izboljševanje mehanskih lastnosti blokov motorjev.

Kvaliteta - uporaba visokotlačnih tehnik za čiščenje ulitkov, uporaba različnih modelov za numerično predvidevanje napetosti pri glavah cilindrov (izračun lastnih napetosti, izračun temperaturnega polja, uporaba viskoplastičnih materialnih modelov).

Komponente izpušnih sistemov - razvoj litin za uporabo v izpušnih sistemih (visoke temperature izpušnih plinov, različne litine za te namene, poskusi uporabe feritne litine pri relativno visokih temperaturah plinov...), izdelava turbinskih ohišij za Ottove motorje, predlogi rešitev pri čedalje višjih kvaliteten zahtevah in razvoj procesov »near net shape« z uporabo precizijskega litja - zlitine AlTi.

Livarski procesi - uporaba nove zlitine iz aluminija za ohišje cilindrov, popolnoma robotizirana obdelava pri izdelavi anorganskih jeder, sistemi aktivacije za termično »oplaščenje oziroma mazanje« površine valjev in pa tehnologija z iztaljivimi jedri (proces od oblikovanja do končnega ulitka).



Slika: Pogled na dvorano posvetovanja v Magdeburgu

Za rezime še naslednja misel: zelo kvalitetna predavanja, prav tako izbrane teme, pri praktično vseh predavanjih je prisotno to, da gre za projektno organizacijo dela od sodelovanja projektantov do visokokvalificiranih tehnologov v livarnah in koordinacije dela managementa, kar lahko že tudi vidimo pri nekaterih naših livarnah.

Poročal: mag. Martin Debelak-strokovni tajnik Društva livarjev Slovenije

AKTUALNO / ACTUAL

Seje organov Društva ob zaključku poslovnega leta 2014

Ob zaključku poslovnega leta 2014 so bile za 25. februar 2015 sklicane seje vseh organov Društva livarjev Slovenije (v nadaljevanju Društvo), in sicer najprej seja Nadzornega odbora, nato seja Izvršnega odbora in na koncu še Občni zbor Društva oziroma zbor članstva.

Izvršni odbor in Občni zbor je obravnaval poročilo o delu in finančnem poslovanju Društva v letu 2014 ter program dela Društva za leto 2015. Člani Izvršnega odbora in vse članice Društva so prejeli za obe osrednji točki dnevnega reda s sklicom sej pisna gradiva. Poročilo o delu in finančnem poslovanju je na obeh organih ustno podrobno predstavila predsednica Društva, mag. Mirjam Jan Blazič.

Iz poročila je razvidno, da je program Društva za leto 2014, ki ga je sprejel Občni zbor dne 27.02.2014 v Livarju d.d., Ivančna Gorica, bil v pretežni meri uresničen. Zaradi stečaja inštituta Ifg iz Düsseldorfa v Nemčiji, ki bi moral izvesti seminar za livarne železnih zlitin, predviden seminar za to skupino livarn ni mogel biti pravočasno realiziran. Društvo tudi ne bo moglo pripraviti skupnega nastopa na letošnjem sejmu GIFA, ker preko državne

agencije SPIRIT ne bo zagotovljene finančne podpore države za to livarsko sejmsko prireditev. Društvo je izdalo štiri številke Livarskega vestnika, ki so skladno s pogodbo bile objavljene tudi na ameriškem spletnem portalu ProQuest. Uspešna je bila tudi organizacija tradicionalnega, že 54. Mednarodnega livarskega posvetovanja Portorož 2014 in dva enodnevna seminarja, eden za livarne neželeznih zlitin in drugi s tematiko varstva okolja za vse livarne.

V letu 2014 se je nadaljevala izmenjava

Livarskega vestnika z vrsto stokovnimi livarskimi revijami po svetu. Predstavniki vodstva Društva so sodelovali kot častni gostje na naslednjih livarskih dogodkih sorodnih združenj v tujini: 58. avstrijsko posvetovanje v Bad Ischlu, WFC-Svetovni livarski kongres v Bilbau (Španija), 14. Mednarodno livarsko posvetovanje v Opatiji (Hrvaška), Nemški dan livarstva v Hamburgu (Nemčija), IFF-Mednarodni livarski forum v Benetkah (Italija), 8. posvetovanje "Livarske tehnologije pri izdelavi motorjev" v Magdeburgu (Nemčija). Delegat Društva se je udeležil tudi generalne skupščine WFO-Svetovne livarske organizacije v Bilbau v Španiji.

Društvo je opravilo svojo vsakoletno nalogo zbiranja in obdelave podatkov o livarski proizvodnji v Sloveniji za leto 2013. Poročilo je bilo pripravljeno v obliki pregleda slovenske



livarske proizvodnje v tonah po posameznih vrstah litine oziroma zbirno po vrstah livarn. V decembrski številki ameriške livarske revije Modern Casting pa je objavljena statistika svetovne livarske proizvodnje, iz katere je razvidna tudi slovenska proizvodnja.

Društvo je skladno s predpisi poročalo o svojem delovanju in doseženih rezultatih v letu 2013 Ministrstvu za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo.

Izvajanje programa 2014 je potekalo skrbno v okviru razpoložljivih finančnih sredstev. Društvo je poslovalo s pozitivnim finančnim rezultatom. Zaradi manjšega obsega pokroviteljskih sredstev, težav v poslovanju nekaterih članic, ki bodo v letu 2015



na minimalnem članskem prispevku, je pričakovati, da se bodo finančni pogoji za poslovanje Društva v letu 2015 skrčili. Zato bo potrebno po menju predsednice Društva med letom priti do novih finančnih virov. V nasprotnem primeru bo realizacija programov Društva ogrožena. Vsi organi Društva so soglasno sprejeli poročilo o realizaciji programa dela Društva v letu 2014 in poročilo o finančnem poslovanju.

Organi Društva so sprejeli tudi predlagan program dela Društva za leto 2015, ki vključuje vse že tradicionalne aktivnosti, ki jih Društvo izvaja skladno s svojim poslanstvom. V letu 2015 so dodane aktivnosti glede sodelovanja Društva na 6. sejmu Varjenje in livarstvo v času od 21. do 24. aprila 2015 v Celju. Društvo bo nadaljevalo začeto sodelovanje z livarskim inštitutom v Leobnu, in sicer bo v aprilu organiziran seminar za livarne železovine litin, v novembru pa za livarne neželeznih zlitin.

Poročala: *mag. Mirjam Jan Blažič, predsednica Društva Livarjev Slovenije*

AKTUALNO / ACTUAL



Seminar o aktualni okoljevarstveni problematiki v livarstvu



V okviru programa dela Društva livarjev Slovenije (v nadaljevanju Društva) za poslovno leto 2014, ki obsega obdobje od februarja 2014 do februarja 2015, je Društvo 12. februarja letos skupaj s Službo za varstvo okolja Gopodarske zbornice Slovenije organiziralo seminar z naslovom: »Aktualna okoljevarstvena problematika v livarstvu«.

Seminarja so se udeležili nekateri direktorji in strokovnjaki, zadolženi po livarskih podjetjih za varstvo okolja. Prisotne so bile vse vrste livarn, od livarn sive in nodularne litine, temprane litine do neželeznih livarn s področja visokotlačnega, peščenega, kokilnega in nizkotlačnega litja. Seminar sta vodili odlični predavateljici in strokovnjakinji

za okoljevarstveno problematiko livarstva Gospodarske zbornice Slovenije: Janja Leban in Antonija Božič Cerar, s katerima Društvo sodeluje že kar nekaj časa. Za razliko od preteklih seminarjev na to temo smo se tokrat odločili, da bo seminar potekal v obliki delavnice, kar se je izkazalo kot zelo dobra in koristna rešitev. Vsi udeleženci so namreč na seminarju lahko aktivno sodelovali, saj so lahko postavili vsa aktualna vprašanja s tega področja, s katerimi se srečujejo v vsakdanji praksi v svojih podjetjih. Seminar je bil programsko osredotočen predvsem na naslednjo tematiko: industrijsko onesnaževanje, odpadki in krožno gospodarstvo ter energetska učinkovitost.

V kontekstu omenjenih tem je bila posebna pozornost posvečena emisijam-imisijam pri površinskih in podzemnih vodah, v zraku in tleh. Kar nekaj časa smo namenili temi meritve- priprava izhodiščnega poročila v duhu navodil evropske komisije, ki se nanašajo na industrijske emisije. Glede na to, da tudi v Sloveniji v osprednje prihaja problematika onesnaževanja tal, ki je za večino livarskih podjetij zelo pereča, predvsem zaradi neznanih in nekontroliranih onesnaževanj tal v preteklosti, je ta segment, ki ga mora vsebovati izhodiščno poročilo, zahteval več diskusije oziroma vprašanj in komentarjev.

Seminar je omogočil vsem slušateljem tudi okvirno seznanitev z vsemi novimi zakonskimi opredelitvami in normativi države na področju varstva okolja v letu 2014, kot tudi vseh tistih, ki so že v pripravi ali v programu priprave za leto 2015.

Poročala: mag. Mirjam Jan Blažič- predsednica Društva livarjev Slovenije

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

AKTUALNO / ACTUAL

**Program prireditve »DAN LIVARSTVA« na
6. sejmu Livarstvo in varjenje v Celju,
od 21. do 24. aprila 2015**

sreda, 22. april, Sejna soba Celjanka,

| | |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10.00-13.00 | Organizator Dneva livarstva: Društvo livarjev Slovenije in Naravoslovnotehniška fakulteta Oddelek za materiale in metalurgijo, Katedra za livarstvo |
| 10.00-10.20 | Krčenje Al-Si zlitin med strjevanjem M. Petrič, J. Medved, P. Mrvar, Naravoslovnotehniška fakulteta Univerze v Ljubljani |
| 10.20-10.40 | Development of TTT diagram with energy content-Razvoj TTT digrama z energijsko vsebnostjo K. Weiss, RWP GmbH (D) |
| 10.40.-11.00 | Raztapljanje Zr v talinah Al-Mg-Si , F. Zupanič, Fakulteta za strojništvo univerze v Mariboru |
| 11.00-11.20 | Odmor |
| 11.20-11.40 | Ultrazvočna razpršilna piroliza – postopek izdelave nanostrukturnih materialov , P. Majerič, R. Rudolf, Fakulteta za strojništvo univerze v Mariboru |
| 11.40-12.00 | Pojav chunky grafita v debelostenskih ulitkih iz sive litine s kroglastim grafitom , B. Bauer, Fakulteta za strojništvo in ladjedelništvo (HR) |
| 12.00.-12.20 | Termodinamična analiza Al-u-X zlitin , M. Pirnat, D. Voljšak, M. Vončina, J. Medved, Naravoslovnotehniška fakulteta Univerze v Ljubljani |

PROIZVODNI PROGRAM:

- **KREMENOV PESEK**
- **KERAMIČNI PESEK**
- **OPLAŠČENI KREMENOV
IN KERAMIČNI PESKI**
- **OGNJEVZDRŽNI PREMAZI**
- **POMOŽNA LIVARSKA SREDSTVA**



exoterm-it

**MATERIALS FOR MELTING SHOP -
RECARBURISER, INOCULANTS
AND FERROALLOYS**

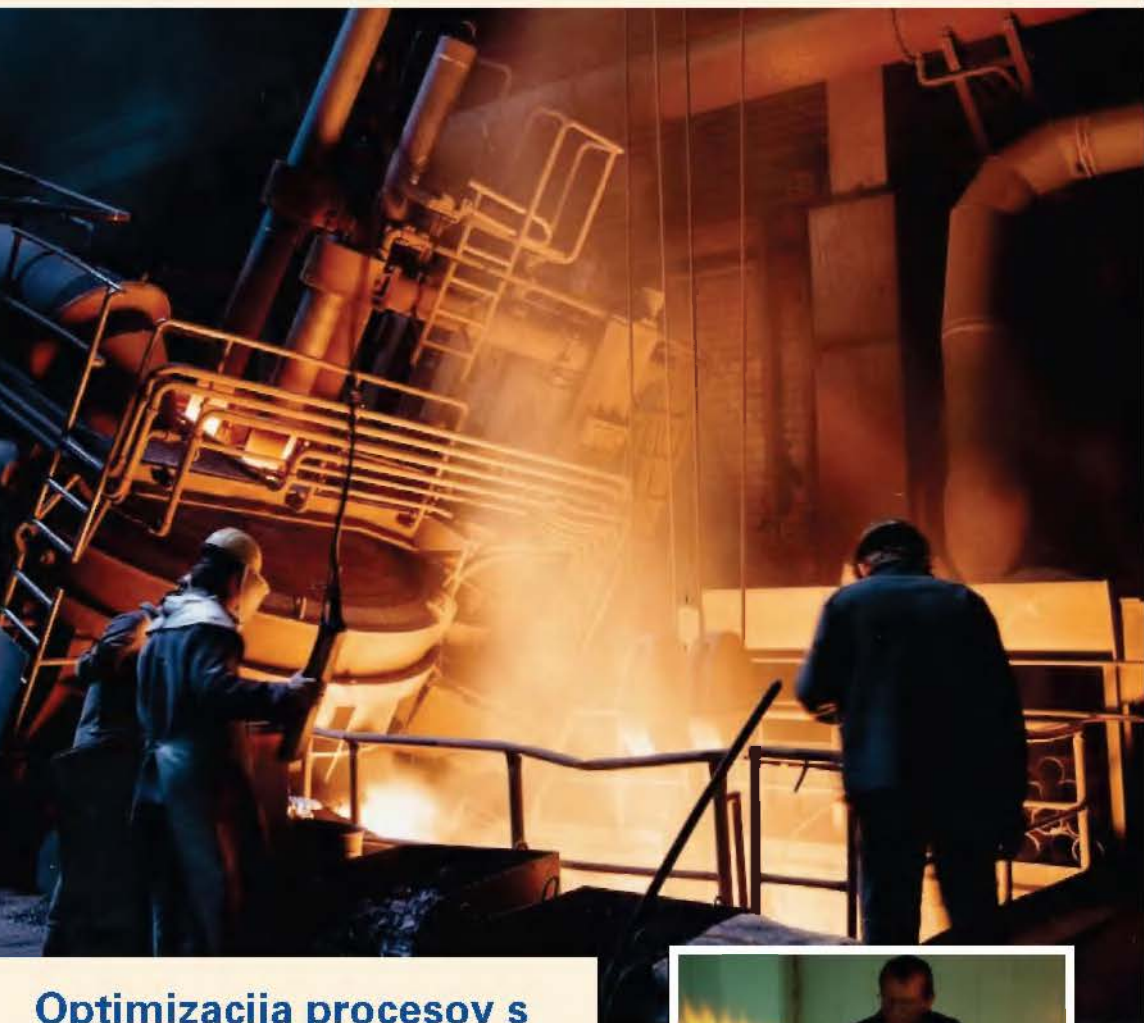
**COATINGS AND ADDITIVES
FOR SAND CORES
AND FOR SAND MOULDS**

**EXOTHERMIC MATERIALS, FEEDER
SLEEVES AND OTHER AUXILIARIES**

**EXOTHERMIC AND INSULATING
MATERIALS FOR STEEL WORKS**

CASTING TECHNOLOGY WITH

MAGMA



Optimizacija procesov s plini na vseh področjih metalurgije

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

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

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



MESSER 

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

Part of the Messer World 