

LIVARSKI VESTNIK

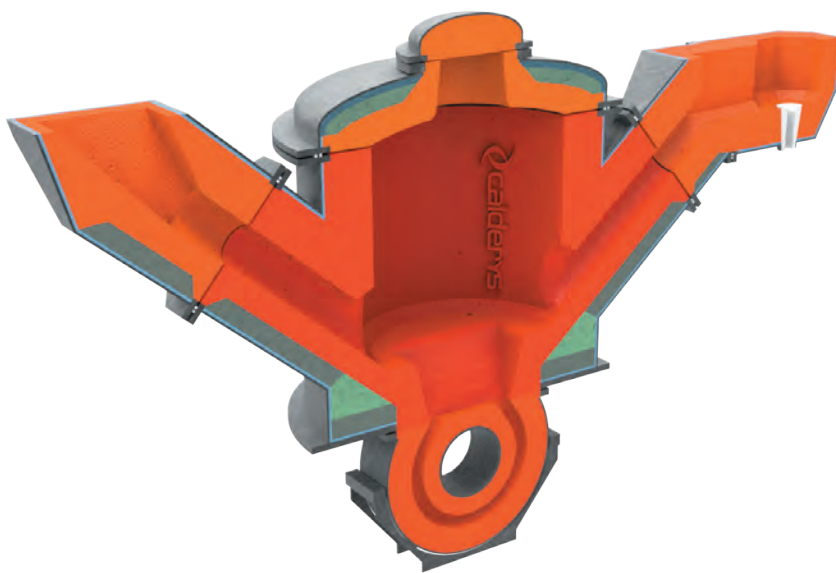
68/2021

3



DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE
SLOVENIAN FOUNDRYMEN SOCIETY

ENHANCE THE PRODUCTIVITY OF YOUR FURNACE
WITH **CALDERYS** SOL GEL TECHNOLOGY



- REDUCED START UP TIMES
- IMPROVED CORROSION RESISTANCE
- HIGH REFRACTORINESS
- ENLARGED SHELF LIFE

www.calderys.com



info@calderys.com

 **calderys**
a member of Imerys

PRODUCTS FOR FOUNDRIES AND STEELWORKS



**COATINGS FOR
FOUNDRIES**



**THERMOINSULATION
MATERIALS FOR
STEELWORKS AND
FOUNDRIES**



OTHER PRODUCTS
*ferro alloys, inoculants,
nodulators, recarburisers*



REPRESENTATIVES
*Magma, Tribo - Chemie,
Henschke*

 **exoterm-it**

exoterm@exoterm.si

LIVARSKI VESTNIK

Izdajatelj / Publisher:

Društvo livarjev Slovenije
Lepi pot 6, P.P. 424, SI-1001 Ljubljana
Tel.: + 386 1 252 24 88
Fax: + 386 1 426 99 34
E-mail: drustvo.livarjev@siol.net
Spletna stran: www.drustvo-livarjev.si

Glavni in odgovorni urednik / Chief and responsible editor:

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

Tehnično urejanje / Technical editing:

mag. Mirjam Jan-Blažić

Uredniški odbor / Editorial board:

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

Prevod v angleški jezik /

Translation into English:

Marvelingua, Aljaž Seničar s.p.

Lektorji / Lectors:

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

Tisk / Print:

Fleks d.o.o.

Naklada / Circulation:

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

Letna naročnina: 35 EUR z DDV

Year subscription: 35 EUR (included PP)

Dano v tisk: SEPTEMBER 2021



Naslov / Address:
CALDERYS Deutschland GmbH
Office Austria
IZ Nö-Süd, StraÙe 16, Objekt 69/7
A-2351 Wiener Neudorf

T: +43 2236 677090 + DW
F: +43 2236 677093 - 11
E: austria@calderys.com
www.calderys.com

VSEBINA / CONTENTS

Stran / Page:

- P. Martin, D. Franzen, B. Pustal, A. Bührig-Polaczek:** Modifikacija mehanskih lastnosti duktilnih litin z visoko vsebnostjo silicija z vplivanjem na mikrosegregacijo silicija skozi aluminij in nikelj / **Modification of Mechanical Properties of High Silicon Ductile Iron by Influencing Silicon Micro Segregation via Aluminum and Nickel** 144
- X. Jingpei, W. Aiqin, W. Wenyan, M. Douqin, Y. Bin, M. Zhiping, W. Zhenghui:** Računalniška simulacija strjevanja in modifikacije vključkov v velikih ulitkih krmil za navtiko / **The computer simulation of solidification and modification of the inclusions in large-scale rudder horn steel casting** 157
- M. Drobne, U. Klančnik, A. Stergar, S. Novak, B. Košec:** Ultrazvočna preiskava metalurških spojev na kompleksnih ulitkih / **Ultrasonic Investigation of Metallurgical Bonding in Complex Castings** 168
- J. Šporin, P. Mrvar, Ž. Vukelić:** Mehanizem obrabe kotalnega dleta / **Roller cone wear mechanism** 180

AKTUALNO / CURRENT

- Poročilo o 61. IFC Portorož 2021 (Prvi del) 199
- Galerija slik vseh sponzorjev razstavljalcev 206
- Galerija slik vseh razstavljalcev 208
- Pregled livarskih prireditev v letih 2021 in 2022 211
- Pokrovitelji 61. IFC Portorož 2021 212
62. IFC Portorož 2022 213

Modifikacija mehanskih lastnosti duktilnih litin z visoko vsebnostjo silicija z vplivanjem na mikrosegregacijo silicija skozi aluminij in nikelj

Modification of Mechanical Properties of High Silicon Ductile Iron by Influencing Silicon Micro Segregation via Aluminum and Nickel

Izvleček

S proizvodnjo sive litine s kroglastim grafitom (SGI) s povečano vsebnostjo silicija (Si) med 3,2 in 4,3 mas. % je mogoče doseči boljšo duktilnost in ohraniti enako trdnost v primerjavi s feritno-perlitnimi razredi. Izhajajoč razpon lastnosti materialov SGI, utrjenih z zmesnimi kristali silicija, predstavlja izboljšavo v primerjavi s konvencionalnimi razredi materiala in ponuja večji potencial za zamenjavo kovanih jeklenih delov, za katere veljajo enake materialne zahteve, s stroškovno učinkovitejšimi litimi strukturami. Vendar pa je ojačitveni učinek silicija omejen. Če vsebnost silicija preseže 4,3 mas. %, se raztezek do nastanka razpoke naglo zmanjša. Vzrok se verjetno skriva v nastanku superstruktur v kristalni mreži, ki močno zavirajo dislokacijsko gibanje in vodijo v krhkost materiala. To krhkost je mogoče zaznati tudi pri nižjih vsebnostih 3,8 mas. % Si. Zaradi izcejanja se silicij nabira v primarnem avstenitu in porabi skozi progresivno strjevanje v smeri robov zrn. Kot posledica višje lokalne vsebnosti Si v bližini kroglasto oblikovanih grafitnih delcev tam nastajajo superstrukture. Predhodne raziskave na livarskem inštitutu so pokazale, da je mogoče mikrosegregacijski profil silicija izravnati z dodatkom aluminija. Namen te raziskave je prilagoditi profil izcejanja silicija z ustvarjanjem namenske zlitine aluminija (Al) in niklja (Ni), ki preprečuje nastanek superstruktur FeSi. V ta namen smo preizkusili različne vsebnosti aluminija in niklja kot tudi kombinacije obeh. Profil izcejanja smo kvalitativno opisali s Klemmovim jedkalom ter kvantitativno ovrednotili z meritvami EDX. Končna ocena rezultatov se izvede z udarnimi preizkusi. V tej oceni se preverja, ali je mogoče krhkost pozitivno nevtralizirati.

Abstract

By producing spheroidal graphite cast iron (SGI) with silicon (Si) contents of 3.2 to 4.3 mas. %, a higher ductility can be achieved while maintaining the same strength compared to ferritic-pearlitic grades. The resulting property range of the silicon solid solution hardened SGI materials represents an improvement to conventional grades and offers the potential to replace steel forged parts with the same material requirements by more cost-effective cast structures. However, the strengthening effect of silicon is only of limited use. If the Si content exceeds 4.3 mas. %, the elongation at fracture drops rapidly. The reason for this is the formation of superstructures in the crystal lattice, which strongly impede dislocation movement and embrittle the material. This embrittlement can also be detected at lower contents of 3.8 mas. % Si. Due to its segregation behavior, silicon tends to build

up in the primary austenite and depletes with progressive solidification in the direction of the grain boundaries. As a result of locally higher Si content in the vicinity of the graphite spheres, superstructures are formed there. Previous investigations at the Foundry Institute have shown that the micro segregation profile of silicon can be levelled by the addition of aluminum. The aim of this work is to adjust the segregation profile of silicon by alloying aluminum (Al) and nickel (Ni) in a targeted manner, thus preventing the formation of FeSi superstructures. For this purpose, different contents of aluminum and nickel as well as a combination of both were tested. The segregation profile was qualitatively represented by Klemm etching and quantitatively evaluated by EDX measurement. A final evaluation of the results is carried out by means of an impact test. Here it is examined whether embrittlement could be positively counteracted.

1 Uvod

Feritna siva litina s kroglastim grafitom z utrjeno trdno raztopino (SSFDI), imenovano tudi »druga generacija« materialov iz sive litine, zajema tri zlitine za litje z vsebnostjo silicija med 3,2 in 4,3 mas. %, ki se raziskujejo in razvijajo že več kot 30 let [1, 2]. Njihova izboljšana kombinacija natezne trdnosti in raztezka do nastanka razpoke v primerjavi z običajnimi vrstami je v zadnjem času pritegnila vse več pozornosti [3–9]. Z utrjevanje trdne raztopine sive litine s kroglastim grafitom z dodatkom silicija je mogoče določiti lastnosti profilov, ki jih feritno-perlitne vrste ne morejo doseči. Zaradi večjega raztezka do razpoke ob ohranjanju enake natezne trdnosti je za zlom komponente potrebna precej večja energija [10]. Zmožnost izvedbe bistveno večje deformacije, preden pride do kritične napake, omogoča možnost uporabe novega razreda materialov kot za varnostne komponente [11–13]. Druga značilnost je visoko razmerje med mejo plastičnosti ($R_{p0,2}$) in natezno trdnostjo (R_m). Medtem ko je pri običajnih vrstah razmerje meje plastičnosti največ 0,7, je pri vrstah, ki so utrjene s trdno raztopino, to razmerje 0,8 [14]. Višje vrednosti pomenijo, da lahko material opravi sorazmerno več elastičnega

1 Introduction

Solid solution-strengthened ferritic ductile iron (SSFDI), also referred to as the "second generation" of ductile iron materials, denotes three casting alloys with silicon contents between 3.2 and 4.3 mas. % which have been researched and developed for more than 30 years [1, 2]. Their improved combination of tensile strength and elongation at fracture compared to conventional grades has recently attracted more and more attention [3-9]. By solution strengthening of DI by adding silicon, property profiles can be set which the ferritic-pearlitic grades cannot achieve. Due to the higher elongation at fracture while maintaining the same tensile strength, a considerably higher energy is required to cause fracture of a component [10]. The ability to perform significantly more deformation before a critical failure occurs offers the potential for the new material class to be used as safety components [11-13]. Another characteristic property is the high ratio of yield strength ($R_{p0,2}$) to tensile strength (R_m). Whereas the conventional grades here only have a yield strength ratio of 0.7 at maximum, the solid solution strengthened grades achieve a ratio of 0.8 [14]. Higher values indicate that a material can perform comparatively more elastic

deformacijskega dela, preden se pojavi plastično vedenje materiala.

Vendar pa je učinek silicija pri legiranju omejen. Nad vsebnostjo 4,3 mas. % Si se zmanjša natezna trdnost in hitro se zmanjša raztezek do nastanka razpoke, na kar ne vpliva debelina stene pri strjevanju [15]. Kot vzrok za to poslabšanje mehanskih vrednosti je potrjeno tvorjenje superstruktur železa in silicija, ki povzročajo krhkost materiala [16].

Med strjevanjem silicij negativno segregira [17]. Atomi se raje kopičijo v prvi talini, ki se strjuje, v preostali talini pa pride do izčrpanja. Posledično nastaja visoka koncentracija silicija v neposredni bližini grafitnih delcev in nizka vsebnost v območjih, ki se strdijo nazadnje. Ker silicij matrico ojača, se posledično ustvari gradient trdnosti. Prav tako vodi lokalna obogatitev silicija v bližini grafitnih nodulov v nastanek superstruktur B2 in DO₃. Ta pojav je bil nedavno dokazan na livarskem inštitutu Univerze RWTH Aachen. S preiskavami TEM je bilo dokazano, da je mogoče že pri splošni vsebnosti silicija 3,95 mas. % zaznati dele faze B2. Povečanje koncentracije na 5,36 mas. % povzroči večji delež faze B2 in dodatno prisotnost formacije faze DO₃ [16]. V nedavnih študijah na livarskem inštitutu je bilo ugotovljeno, da dodatek aluminija k SSFDI vpliva na profil mikrosegregacije silicija [18]. Ker je aluminij po možnosti vdolan v primarni avstenit in zato nadomešča silicij, se domneva, da to zmanjšuje obseg segregacije silicija in tako izboljša žilavost. Prav tako se je domnevalo, da bi lahko imeli drugi negativni segregacijski elementi, kot je nikelj, primerljiv učinek. Žilavost SSFDI bi tako lahko izboljšali s prilagoditvijo zasnove legiranja.

Da bi zapolnili to trenutno vrzel v raziskavah, smo eksperimentalno

deformation work before plastic material behavior occurs.

However, there is a limit to the strengthening effect of silicon. Above contents of 4.3 mas. % Si, a decrease in tensile strength and a rapid reduction in elongation at fracture are observed, unaffected by the solidifying wall thickness [15]. The formation of iron-silicon superstructures, which leads to embrittlement of the material, has been confirmed as the cause for this deterioration of the mechanical values [16].

During solidification, silicon segregates negatively [17]. The atoms are preferably accumulated in the first solidifying melt and a depletion occurs in the residual melt. This results in a high concentration of silicon in the direct vicinity of graphite particles and a low content in the last solidified areas. Since silicon exerts a strengthening effect on the matrix, a strength gradient is created as a result. Furthermore, the local enrichment of silicon in the vicinity of graphite nodules leads to the formation of B2 and DO₃ superstructures. This phenomenon has recently been demonstrated at the Foundry Institute of RWTH Aachen University. By means of TEM investigations it was shown that already at a global silicon content of 3.95 mas. % portions of B2 phase are detectable. An increase of the concentration to 5.36 mas. % leads to a higher proportion of B2 phase and additionally to the presence of the DO₃ phase formation [16]. In recent studies at the Foundry Institute, it was found that the addition of aluminum to SSFDI has an influence on the microsegregation profile of silicon [18]. Since aluminum is preferably embedded in the primary austenite and thereby replaces silicon, it is suspected that this will minimise the extent of silicon segregation and thus improve toughness. It was also assumed that other negative segregating elements such as nickel could have a comparable

analizirali vpliv aluminija in niklja na profil mikrosegregacije silicija v SSFDI.

2 Eksperimentalno delo

2.1 Zasnova poskusov

Da bi raziskali vpliv aluminija in niklja na segregacijsko vedenje silicija, smo izdelali serijo petih ulitkov. Na podlagi razreda GJS-500-14 evropskega standarda DIN EN 1563 je bila splošna vsebnost silicija prilagojena na 3,8 mas. %. Seriji 1 in 2 sta vsebovali 0,3 in 0,6 mas. % Al, seriji 3 in 4 pa sta bili legirani z 1 oziroma 2 mas. % Ni. Nazadnje je bila v zlitini 5 izbrana optimalna sestava aluminija in niklja z namenom raziskave skupnega učinka obeh elementov.

2.2 Poskusni postopek

Vsa litja so potekala v srednjefrekvenčni indukcijski peči z največjo kapaciteto 250 kg. Obdelava z magnezijem je potekala s prelivanjem v kadi. Predzlitina na osnovi železa se prekrije z jeklenimi ostanki, da se preprečijo prezgodnje reakcije. V preskusni seriji, ki vsebuje aluminij, se je postopek legiranja izvedel sočasno z obdelavo z magnezijem. Čisti aluminij se je v enem kosu v peči segrel na 550 °C, da se je odstranila preostala vlaga in pospešil proces raztapljanja. Malo pred izpuščanjem v peč se je aluminij odstranil iz peči, položil na magnezijevo predzlitino in prekril z jeklenimi ostanki. Talina se je nato inokulirala tako, da smo jo tik pred vlivanjem v kad s pomočjo potopne palice potopili 0,3 mas. % cepiva.

2.3 Analize vzorcev

Za mehansko preskušanje nateznih lastnosti zlitin so bili izdelani trije preskusni vzorci.

effect. The toughness of SSFDI could thus be improved by the adaption of the alloying design.

To close this current research gap, the influence of aluminum and nickel on the silicon micro segregation profile in SSFDI was analyzed on an experimental basis.

2 Experimental work

2.1 Design of Experiments

To investigate the influence of aluminum and nickel on the segregation behavior of silicon, a series of five castings was carried out. Based on the grade GJS-500-14 of the European standard DIN EN 1563, the global silicon content was adjusted to 3.8 mas. %. Castings 1 and 2 contained 0.3 and 0.6 mas. % Al, series 3 and 4 were alloyed with 1 and 2 mas. % Ni respectively. Finally, an optimized composition of aluminum and nickel was selected in alloy 5 to investigate the combined effect of both elements.

2.2 Experimental procedure

All castings were carried out using a medium-frequency induction furnace with a maximum capacity of 250 kg. The magnesium treatment is carried out by pouring over in the ladle. The iron-based master alloy is covered with steel scrap to avoid premature reactions. In the test series containing aluminum, the alloying process is carried out at the same time as the magnesium treatment. The pure aluminum is heated in one piece to 550 °C in a furnace to remove residual moisture and to promote the dissolving process. Shortly before the furnace tapping, the aluminum is removed from the furnace, placed on the magnesium master alloy, and covered with steel scrap.

Z vodno hlajenim svedrom se iz ulitkov odvzamejo valjasti vzorci s premerom 18 mm. Vzorci za natezni preskus so obdelani v skladu s standardom DIN EN 550125 in imajo premer 8 mm ter skupno dolžino 115 mm. Pri nateznih preskusih se uporablja glavna hitrost $0,60 \text{ mm min}^{-1}$.

Vzorci za preiskave s spektrometrijo so bili pripravljeni z vlivanjem taline v bakreno formo pred obdelavi z magnezijem in inokulaciji ter po njej. Nato so bili obrušeni z grobim brusnim papirjem SiC in testirani z emisijskim spektrometrom z induciranim iskrenje. Pri nekaterih vzorcih je bila dodatno opravljena zunanja analiza vsebnosti silicija in ogljika. Kemična sestava vseh talin je prikazana v Preglednici 1. Metalografski vzorci so bili hladno vdelani, brušeni in loščeni do ravni $0,25 \mu\text{m}$. Za vizualizacijo mikrosegregacij silicija se je izvedlo jedkanje po Klemmu. Mikrostrukturne analize loščenih in jedkanih vzorcev so se izvedle z optičnim svetlobnim mikroskopom. Za nadaljnje raziskovanje in preverjanje pojava segregacije so bile opravljene analize z vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM). Vse preiskave so se izvajale pri pospeševalni napetosti 15 kV in delovni razdalji elektrode približno 10 mm. Natančneje se je rentgenska spektroskopija (EDX-) izvajala na območjih med dvema grafitnima delcema, njen namen pa je bil raziskati lokalno kemijsko sestavo in

The melt is then inoculated by immersing 0.3 mas. % of an inoculant into the ladle using a plunging rod shortly before pouring.

2.3 Specimen analyses

A total of three tensile test specimens is produced for the mechanical testing of the alloys. Cylindrical samples with a diameter of 18 mm are taken from the castings using a water-cooled core drill. Tensile test specimens are machined according to DIN EN 550125 with a diameter of 8 mm and an overall length of 115 mm. Tensile tests are conducted using a main cross speed of 0.60 mm min^{-1} .

Samples for spectrometric examinations are produced by pouring the melt in a copper die before and after magnesium treatment and inoculation. They are then ground with coarse SiC-grinding paper and tested using a spark emission spectrometer. For some samples, the silicon and the carbon content were additionally externally analysed. Chemical composition of all melts is presented in Table 1. Metallographic samples are cold-embedded, ground and polished to a level of $0.25 \mu\text{m}$. Etchings according to Klemm are performed in order to visualize silicon micro segregations. Microstructural analyses of both polished and etched specimens are carried out

Preglednica 1. Kemična sestava petih preiskovanih talin (vsebnost v mas. %)

Table 1. Chemical composition of the five investigated melts (contents in mas. %)

Zlitina / Alloy	C	Si	Mg	Al	Ni	CE
1	3,08	3,63	0,048	0,31	0,03	4,29
2	3,05	3,81	0,053	0,67	0,02	4,32
3	3,05	4,19	0,051	0,04	0,97	4,42
4	3,01	3,75	0,052	0,02	1,92	4,22
5	3,50	3,89	0,042	0,23	0,97	4,83

pojave segregacije. Raziskani so bili zlasti gradienti koncentracije silicija, aluminija in niklja v mikrostrukturi.

3 Rezultati

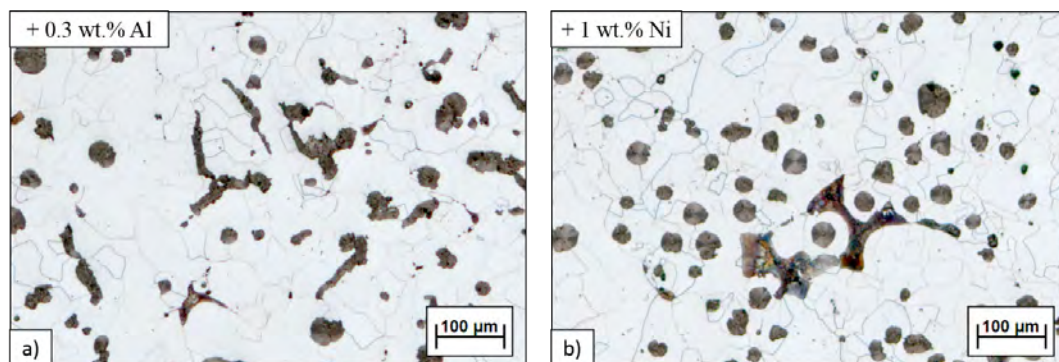
Slika 1 prikazuje jedkane mikrostrukture zlitin 1 in 3. V vseh primerih je dodatek aluminija povzročil veliko količino degeneriranega grafitu, zaradi česar je bila nodularnost nizka. Uporaba niklja ni vplivala na morfologijo grafitu. Vendar je bil v matrici najden delež perlita. Pri 2 mas. % Ni in debelini stene 25 mm je presežena največja dovoljena vsebnost perlita, in sicer 5 %. Učinek niklja, ki spodbuja nastanek perlita, je mogoče nadomestiti s kombinacijo aluminija in niklja. Tudi v tem primeru to vodi do velikega deleža degeneracij, ki jih je mogoče pripisati uporabi aluminija. Pri vseh zlitinah je bilo mogoče v mikrostrukturi opaziti povečano mikroporoznost.

Raziskava pojava mikro segregacije s Klemmovim jedkalom je razkrila vpliv na mikro segregacijo silicija. Jedkanje je pokazalo rumeno obarvanost, kar kaže na visoko vsebnost silicija, sicer pa se pojavlja modra obarvanost. Ob legiranju z nikljem se pojavi rumenkasta obarvanost, zlasti na

using an optical up-light microscope. To further investigate and verify segregation phenomena, scanning electron microscope analyses are performed. All investigations are carried out at an accelerating voltage of 15 kV and a working distance of the electrode of about 10 mm. Specifically, X-ray spectroscopy (EDX-) line scans along areas between two graphite particles are performed in order to investigate the local chemical composition as well as segregation phenomena. In particular, the concentration gradients of silicon, aluminum and nickel in the microstructure are investigated.

3 Results

Figure 1 shows the etched microstructures of alloy 1 and 3. In all cases, additions of aluminum resulted in a high amount of degenerated graphite, resulting in low nodularity. The use of nickel had no effect on the graphite morphology. However, a portion of pearlite was found in the matrix. At 2 mas. % Ni and a wall thickness of 25 mm, the maximum permitted pearlite content of 5 % is exceeded. The pearlite-promoting effect of nickel can be compensated by the



Slika 1. Mikrofotografije vzorcev z a) dodatkom 0,3 mas. % Al in b) dodatkom 1 mas. % Ni

Figure 1. Micrographs of samples with a) an addition of 0.3 wt.% Al and b) an addition of 1 wt.% Ni

območjih, ki so običajno zadnja območja strjevanja, kot je prikazano na Sliki 2 b). Povečanje debeline stene je na splošno povezano z nekoliko večjim deležem rumenih površin obrusih. To pomeni, da počasnejše ohlajanje vodi v bolj izrazit profil segregacije.

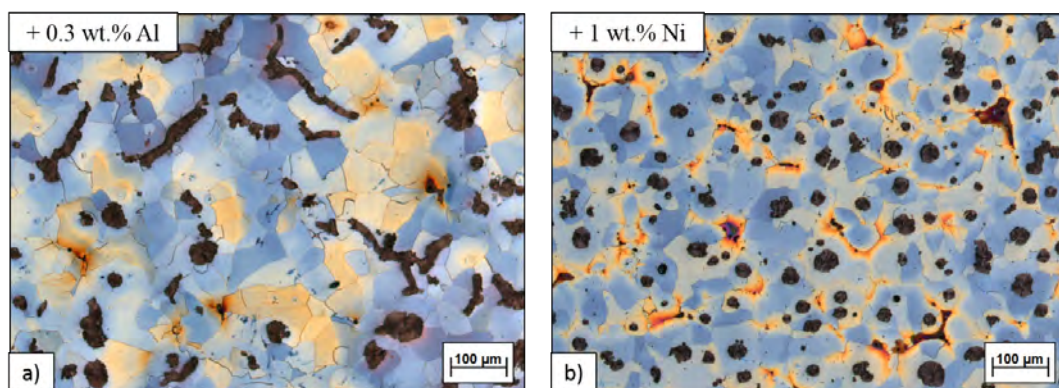
Dodatek 0,3 mas. % Al vodi k bolj homogeni porazdelitvi silicija. To se enakomerno kaže v preiskavah z jedkanjem in SEM. Pri 0,6 mas. % pa rezultati niso več tako dosledni. Zlitine z vsebnostjo 1 in 2 mas. % Ni niso povezane s podobnimi rezultati, profili silicija, izmerjeni z metodo EDX, pa niso tako homogeni. Predpostavlja se, da pri teh koncentracijah nikelj nima kompenzacijskega učinka. Eden od možnih vzrokov je lahko nastanek perlita, ki povzroči bistveno močnejše gradiente segregacije v mikrostrukturi. Zato je homogenizacijo težko doseči. Ker pa je prišlo do delnega obrata segregacije silicija, bi lahko homogenizacijski učinek dosegli z manjšimi koncentracijskimi gradienti, kot so bili raziskani v študiji.

S Charpyjevem preizkusom določena udarna žilavost različnih zlitin nakazuje zgolj

combination of aluminum and nickel. This again results in a high proportion of degenerations which can be attributed to the use of aluminum. For all alloys, an increased number of micro porosities could be observed in the microstructure.

The investigation of microsegregation phenomena conducted by Klemm's etchings show an influence on the silicon microsegregation. The etchings show a yellowish coloration indicating a high silicon content, otherwise a blue colouring appears. By alloying with nickel a yellowish coloration occurs particularly in areas that tend to be last solidifying areas as shown in Figure 2 b). An increase in wall thickness generally shows slightly larger proportions of yellow areas on the microsections. This indicates, that slower cooling rates results in a more distinctive segregation profile.

An addition of 0.3 mas. % Al tends to lead to more homogeneous silicon distributions. This is shown uniformly in etching and SEM investigations. At 0.6 mas. % this is no longer so consistent. Alloy contents of 1 and 2 mas. % Ni do not show similar results, silicon profiles measured



Slika 2. Barvno jedkani mikrografi a) zlitine 1, ki vsebuje 0,3 mas. % Al, in b) zlitine 3, ki vsebuje 1 mas. % Ni

Figure 2. Color etched micrographes of a) alloy 1 containing 0.3 wt.% Al and b) alloy 3 containing 1 wt.% Ni

občasno višje vrednosti kot v nelegiranem stanju. V večini primerov predstavlja raziskano območje med 20 in 120 °C vedenje pod zgornjo ravno. Zato je večina vzorcev še vedno krhkih ali samo delno duktilnih. Nekoliko višja energija udarca po Charpyju pri vzorcih z 0,3 mas. % Al nakazuje, da ima homogenizacija profila mikrosegregacije Si pozitiven na žilavost.

Slika 4 prikazuje reprezentativne statične mehanske lastnosti. Zahtevano natezno trdnost 500 MPa je bilo mogoče določiti pri vseh zlitinah. Podvojitve vsebnosti zlitine privede do dodatnega povečanja trdnosti, nikelj pa doseže bistveno višjo ojačitev. Pri uporabi aluminija ni mogoče doseči zahtevanega raztezka do razpoke 14 %. Izjema je zlitina 4 pri termičnem modulu 0,8 cm, kjer je vsebnost perlita presegla 5 %, zlitini 3 in 4 pa dosežata zadostno duktilnost.

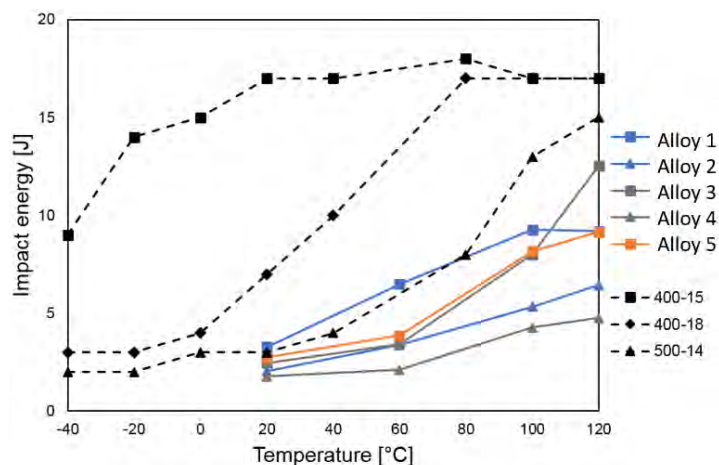
4 Razprava

Po podatkih iz literature dodatek aluminija povzroči degeneracijo precipitirane grafitne faze [20–22]. Posledično so zaznane zgolj nizke nodularnosti in majhna števila

by EDX are not as homogeneous. It is assumed that nickel has no compensating effect at these concentrations. One possible cause can be the formation of perlite, which results in significantly stronger segregation gradients in the microstructure. Accordingly, homogenization is difficult to achieve. Since, however, a partial reversal of the silicon segregation occurred, a homogenizing effect could possibly be achieved with lower concentration gradients than investigated in the present study.

The measured Charpy impact work of the alloy systems produced shows only sporadically higher values than in the unalloyed state. In most cases, the investigated range between 20 and 120 °C represents the behaviour below the upper level. Accordingly, most specimens still fail brittle or only partially ductile. A slightly higher Charpy impact energy in specimens with 0.3 mas. % Al is an indication that homogenization of the Si micro segregation profile tends to have a positive effect on toughness.

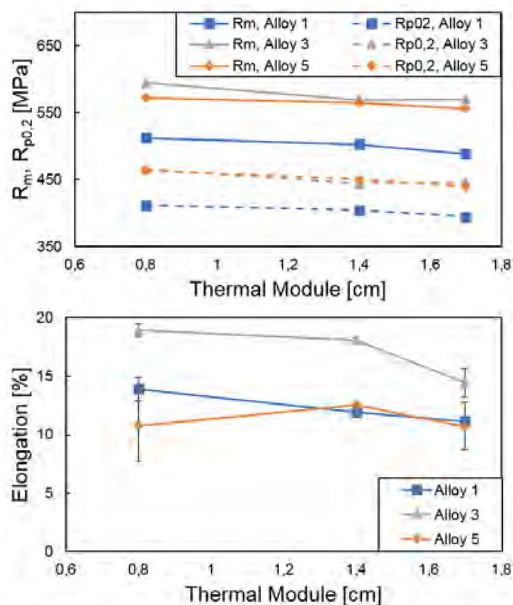
Figure 4 shows the representative static mechanical properties. The required tensile strength of 500 MPa could be set for all alloys. The doubling of the alloy contents



Slika 3. Udarne vrednosti po Charpyju za testirane zlitine 1–5 v primerjavi z običajnimi zlitinami in zlitinami z visoko vsebnostjo silicija [19]

Figure 3. Charpy impact energies for the tested alloys 1–5 in comparison with conventional and high silicon grades [19]

nodulov. Priporoča se dodajanje elementov, npr. cerija, ki preprečujejo ta učinek. Ni bilo dokončno pojasnjeno, ali je nizka nodularnost neposredno povezana z nizko žilavostjo. Pričujoče delo te hipoteze ne more potrditi. Velik delež mikroporoznosti je mogoče opaziti na mikrostrukturnih posnetkih. To je eden od razlogov za nizko žilavost.



Slika 4. Statične mehanske lastnosti zlitin 1, 3 in 5

Figure 4. Static mechanical properties of alloys 1, 3 and 5

Nikelj ima zgolj majhen vpliv na grafitno fazo. Velike količine Ni v kombinaciji z majhnimi debelinami sten povzročijo nastanek perlit. Če sta aluminij in nikelj zlita skupaj, se lahko učinek niklja, ki stabilizira perlit, nadomesti z učinkom aluminija, ki grafitizira. Hkrati pa se znova pojavijo negativni vplivi na nastanek grafitne faze, zaradi česar je nodularnost nizka.

results in an additional increase in strength, with nickel achieving a significantly higher strengthening. The required elongation at fracture of 14 % cannot be achieved when aluminum is used. Except for alloy 4 at 0.8 cm thermal modulus, where pearlite content exceeded the amount of 5 %, alloys 3 and 4 achieve sufficient ductility.

4 Discussion

According to the literature, the addition of aluminum results in a degeneration of the precipitated graphite phase [20-22]. As a result, only low nodularities and nodule counts are observed. An addition of elements e.g., cerium that counteract this effect is recommended. It has not been finally clarified whether low nodularities correlate directly with low toughness. The present work cannot support this hypothesis. A high proportion of micro porosities can be observed in the microstructural images. This is mentioned as one of the reasons for the low toughness.

Nickel has only a minor influence on the graphite phase. High quantities of Ni combined with low wall thicknesses result in the formation of pearlite. If aluminum and nickel are alloyed together, the pearlite stabilizing effect of nickel can be compensated by the graphitizing effect of aluminum. At the same time, however, negative effects on the formation of the graphite phase occur again, resulting in a low nodularity.

Aluminum and nickel have a strengthening effect when added to SSFDI. The alloys produced in this study all achieved the strengths required by the standard. Due to a high degree of graphite degeneration, the required elongation at fracture of 14 % is rarely achieved with the addition of aluminum. When nickel is

Aluminij in nikelj imata pri dodatku k SSFDI ojačevalni učinek. Vse zlitine, izdelane v tej študiji, so dosegle trdnosti, zahtevane s standardom. Zaradi visoke stopnje degeneracije grafita se z dodatkom aluminija le redko doseže zahtevani raztezok do razpoke 14 %. Z dodatkom niklja se dosežejo najboljše znane statične mehanske lastnosti. Omejitev raztezka pri zlomu je mogoče določiti izključno zaradi prisotnosti perlita. Večje debeline sten ali dodajanje grafitizacijskih elementov na tej točki učinkujejo pozitivno. Kombinirana uporaba aluminija in niklja omogoča visoke trdnosti na eni strani, vendar pri nobenem preiskovanem termičnem modulu, ki izpolnjuje minimalne zahteve, ni mogoče izmeriti raztezka do nastanka razpoke. Pri vseh sistemih zlitin je v mikrostrukturi nadpovprečno povečana mikroporoznost. Razlogi za to so lahko neustrezno cepljenje taline ali pa neugodne morfologije strjevanja, ki zmanjšujejo zmožnost napajanja.

Pri analizah mikrosegregacije opazimo, da povzroči zlitina z 0,3 mas. % Al homogenizacijo profila mikrosegregacije silicija. To je mogoče dokazati tako z jedkanjem po Klemmu kot z meritvami EDX. Udarna energija zlitine 1 se zmerno poveča, kar naj bi bila posledica bolj homogenega profila mikrosegregacije Si. Ko se vsebnost Al poveča na 0,6 mas. %, pa ni mogoče zaznati učinka homogenizacije na mikrosegregacijo silicija. Zlitine z 1 in 2 mas. % Ni kažejo zgolj slabo težnjo po homogenizaciji. To pripisujemo spremembi kinetike med evtektičnim strjevanjem, ki povzroči intenzivnejše profile segregacije. V predhodnem delu je bilo mogoče vedenje segregacije aluminija napovedati z numerično simulacijo [18]. Ker pa uporabljeni model še ni zmožni upoštevati nastajanja perlita, ni bilo mogoče izračunati rezultatov za zlitine, ki vsebujejo nikelj. Pri zlitinah brez homogenizacije

added, the best recorded static mechanical properties are obtained. A limitation of the elongation at fracture can only be determined due to the presence of pearlite. Higher wall thicknesses or the addition of graphitizing elements have a positive effect at this point. A combined use of aluminum and nickel results in high strengths on the one hand, but no elongation at fracture can be measured for any investigated thermal modulus that meets the minimum requirements. For all alloy systems, an above-average amount of microporosities is found in the microstructure. Reasons for this could be inadequate inoculation of the melt or unfavourable solidification morphologies which reduce the feeding capacity.

Regarding the micro segregation analyses it can be observed that alloying with 0.3 mas. % Al results in a homogenization of the silicon micro segregation profile. This could be shown by both etchings according to Klemm and EDX measurements. The impact energy of alloy 1 tends to show a moderate increase, which is assumed to be due to a more homogenous Si micro segregation profile. When the Al content is increased to 0.6 mas. %, however, no homogenization effect on the silicon micro segregation can be detected. Alloys with 1 and 2 mas. % Ni show only a low tendency towards homogenization. This is attributed to a change in kinetics during eutectic solidification, resulting in more intense segregation profiles. In preliminary work, the segregation behavior of aluminum could be predicted by numerical simulation [18]. However, since the model used could not yet take pearlite formation into account, no results could be calculated for nickel-containing alloys. In alloys with no homogenization of the silicon micro segregation profile no significant effect on the mechanical properties such as impact energy can be observed.

mikrosegregacijskega profila silicija ni mogoče opaziti pomembnega vpliva na mehanske lastnosti, kot je udarna energija.

5 Zaključek

Cilj tega dela je bil spremeniti mikrosegregacijo silicija na mikrostrukturni ravni s prilagoditvijo koncepta legiranja. Rezultate lahko povzamemo, kot sledi:

Izkazalo se je, da se z legiranjem z 0,3 mas. % Al mikrosegregacijski profil Si homogenizira, kar povzroči zmerno povečanje udarne energije po Charpyju.

Barvno jedkanje kaže na obratno mikrosegregacijo silicija ob dodatku Ni. Vendar tega učinka ni mogoče dokončno potrditi z meritvami EDX. Ker se žilavost ni izboljšala, domnevamo, da nikelj vpliva na rezultate jedkanja.

Za celostno oceno je treba opraviti podobne preskuse z nelegiranimi vzorci. Poleg tega bi bilo priporočljivo izvesti preiskave TEM, da bi preučili vpliv mikrosegregacije silicija na nastanek superstruktur FeSi.

Zahvala

Avtorji se zahvaljujejo Ingu Braunu, Dietmarju Lembrechtu in Dirku Freudenbergu, ki so sodelovali pri izdelavi vzorcev. Elke Schaberger-Zimmermann za pomoč z metalografskimi analizami in Jessici Frieß za pomoč pri preiskavah z elektronskim mikroskopom.

Izjava o razkritju

Avtorji niso poročali o morebitnem navzkrižju interesov.

Financiranje

Predstavljeni rezultati izhajajo iz projekta IGF 20290 N, ki ga je opravilo »Raziskovalno združenje FVG za livarsko

5 Conclusion

The aim of the present work was to modify silicon micro segregation on a microstructural level by adapting the alloying concept. The results can be summarized as follows:

It was shown that by alloying with 0.3 mas. % Al the micro segregation profile of Si tends to be homogenized resulting in a moderate increase in Charpy impact energy.

Colour etching indicates a reversal of silicon micro segregation when Ni is added. However, this effect cannot finally be confirmed by EDX measurements. Due to the lack of improvement in toughness, an influence of nickel on etching results is suspected.

For a holistic evaluation, similar tests for unalloyed samples should be carried out. In addition, it is recommended to carry out TEM investigations to study the effect of silicon micro segregation on the formation of the FeSi superstructures.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the support of Ingo Braun, Dietmar Lembrecht and Dirk Freudenberg who attended the specimen production. Elke Schaberger-Zimmermann for assisting the metallographic analyses and Jessica Frieß for managing the electron microscope investigations.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

Funding

The presented results are derived from IGF project 20290 N of the 'FVG Research Association of the Foundry Industry' which was funded within the scope of the

industrijo», ki je bilo ustanovljeno v sklopu skupnega sodelovalnega programa IGF s strani Zveznega ministrstva za gospodarske zadeve in energetiko na odločitev nemškega parlamenta.

joint collaborative program 'IGF' by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, following a decision of the German Bundestag.

Reference

- Larker, R. *Solution strengthened ferritic ductile iron ISO 1083/JS/500-10 provides superior consistent properties in hydraulic rotators*. in *Proc. 2008 Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron*, Las Vegas, Nevada. 2008.
- Weiß, P., et al., *Influence of nickel and cobalt on microstructure of silicon solution strengthened ductile iron*. *Materials Science and Technology*, 2015. **31**(12): p. 1479-1485.
- Löblich, H. and W. Stets, *Werkstoff- und fertigungstechnische Grundlagen der Herstellung und Anwendung von hochsiliciumhaltigem Gusseisen mit Kugelgraphit - Teil 1*. Giesserei, 2013. **101-07**: p. 30-47.
- Huyan, F., et al., *Effect of Solute Silicon on the Lattice Parameter of Ferrite in Ductile Irons*. *ISIJ International*, 2014. **54**(1): p. 248-250.
- Bleicher, C., et al., *SiWind - neuer Werkstoff für Offshore-Windenergieanlagen - Teil 2*. Giesserei, 2014. **101-09**: p. 70-79.
- EGGE, J. and J. Meyer, *SiWind - neuer Werkstoff für Offshore-Windenergieanlagen - Teil 3*. Giesserei, 2014. **101-10**: p. 48-53.
- Mikolezik, P. and G. Geier, *SiWind - Werkstoffentwicklung für Offshore-Windenergieanlagen im Multi-Megawatt-Bereich*. Giesserei, 2014. **9**(101): p. 64-69.
- Seidel, S. *Machbarkeitsstudie zur Herstellung von mischkristallverfestigtem ferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit im Großguss*. in *Deutscher Gießereitag*. 2016. Magdeburg.
- Werner, H., I. Lappat, and B. Aurich, *Mischkristallverfestigte EN-GJS-Werkstoffe für Groß- und Schwergussteile*. Giesserei, 2016. **103**(02): p. 38-42.
- Stets, W., et al., *Solution strengthened ferritic ductile cast iron properties, production and application*. *International Journal of Metalcasting*, 2014. **8**(2): p. 35-40.
- Goroncy, J., *Neues Gusseisen wiegt Leichtbaudefizite auf*. *VDI Nachrichten*, 2012: p. 1-4.
- Güll, A., A. Hecker, and W. Menk, *Sinnvolles Zusammenspiel-Moderne Werkstoffe und Verfahren für hochbeanspruchte Eisengussteile*. *Konstruieren + Gießen*, 2006. **31**: p. 6-9.
- Prukner, S. and W. Menk, *Neue Perspektiven für Gusseisen mit Kugelgraphit - Gegossene Bauteile als Alternative zu geschmiedeten*. *Giesserei-Rundschau*, 2007. **54**(9): p. 170-173.
- DIN EN 1563:2016-12: Gießereiwesen - Gusseisen mit Kugelgraphit*. 2016. p. 101.
- Löblich, H., *Gusseisen mit Kugelgraphit profitiert vom hohen Siliziumgehalt*. *MaschinenMarkt*, 2011. **41**: p. 42-46.
- Tekavcic, A., *Study of the Embrittlement Phenomenon in High Silicon Ductile Iron*, in *Gießerei-Institut*. 2016, RWTH Aachen University.

- Hasse, S., *Duktiles Gusseisen: Handbuch für Gusserzeuger und Gussverwender*. 1996: Fachverlag Schiele & Schoen.
- Franzen, D., et al., *Influence of aluminium on silicon microsegregation in solution strengthened ductile iron*. Materials Science and Technology, 2019.
- Björkegren, L.E., K. Hamberg, and B. Johannesson, *Mechanische Eigenschaften von Silicium verfestigten ferritischen Gußeisen mit Kugelgraphit*. Gießerei-Praxis, 1999. **1**: p. 11-17.
- Banszerus, P., *Aluminium als mischkristallverfestigendes Element in hochsiliziumhaltigem Gusseisen mit Kugelgraphit*, in *Gießerei-Institut*. 2015, RWTH Aachen University.
- Muhammad Muhmond, H. and H. Fredriksson, *Graphite growth control analysis in high Al cast iron*. International Journal of Cast Metals Research, 2016. **29**(5): p. 272-278.
- Shayesteh-Zeraati, A., et al., *The effect of aluminium content on morphology, size, volume fraction, and number of graphite nodules in ductile cast iron*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2010. **224**(3): p. 117-122.

Računalniška simulacija strjevanja in modifikacije vključkov v velikih ulitkih krmil za navtiko

The computer simulation of solidification and modification of the inclusions in large-scale rudder horn steel casting

Izvleček

Simulacija strjevanja velikih ulitih krmil za navtiko iz jekla je izvedena z računalniško simulacijo strjevanja. Potek strjevanja in učinkovito napajanje je bilo izvedeno s pomočjo tehnološke optimizacije z uporabo izolativnih napajalnikov, železnih kokil in prilagoditvijo izkoristka, kar vodi v izdelavo popolnih ulitkov. Preučili smo učinke redke zemlje (RE) na pogoje oblike, velikosti in porazdelitve vključkov. Dokazali smo, da je mogoče obliko in distribucijo vključkov izboljšati in da je mogoče bistveno povečati plastičnost in žilavost jekla z modifikacijo z redko zemljo.

Ključne besede: litje, numerična simulacija, porazdelitev obremenitev, vključki

Abstract

The solidification simulation for the large-scale rudder horn steel casting has been made by means of solidification simulation in computer. The order of solidification and efficient feeding were maintained through technological optimization, design of insulated risers, iron chill and yield, therefore the perfect castings are produced. The effects of rare earth (RE) on shape, size and distribution condition of inclusions were investigated. It was proved that the shape and distribution of inclusions could be improved and the plastic and toughness of the steel can be increased obviously by the rare earth modification.

Keywords: Casting; Numerical simulation; Stress distribution; Inclusions

1 Uvod

Proizvajalci opreme se spopadajo z nacionalno varnostno, vprašanji glede nacionalne ekonomske življenjske dobe in so pomemben vidik za merjenje razvoja težke industrije. Ulitki iz težke kovine, ki so osnova v industriji proizvodnje opreme, se zelo pogosto uporabljajo v metalurški, rudarski, električni, ladjarski industriji, pri izdelavi gradbenih materialov, v opremi in industriji proizvodnje strojev. Pri vsem tem so pomembni kakovost, varnost in napredek. Kitajska je postala pomemben

1 Introduction

Equipment manufacturing industry is related to national security, concerns of national economic life and an important mark to measure a country's development of heavy industry. Heavy steel castings are the basis of the equipment manufacturing industry, it is widely used in metallurgy, mine, electricity, ships, building materials, equipment and equipment manufacturing industry. It is relation to state the project quality, safety and progress. China has become a power country for steel casting manufacturing, but

igralec na področju proizvodnje jeklenih ulitkov, vendar pa ostaja odprto vprašanje glede kakovosti proizvedenih ulitkov. Zlasti ulitki iz težkih kovin težka zadostijo obsegu nacionalnega povpraševanja, zato je del dragih ulitkov iz težke kovine odvisen od uvoza [1, 2].

Če za primer vzamemo proces strjevanja ulitkov krmil za navtiko, naletimo pri proizvodnji na več težav, kot so: a) sestava krmila za navtiko je v območju peritektске, mikroporoznost je mogoče zlahka doseči; b) pri ulitkih: debelina prereзов se zelo spreminja, skoraj vse površine so zaobljene, oblika je poenostavljena, velikost prereзов se močno razlikuje; c) ker je teža ulitka približna (od 100 do 500 ton), če je mogoče doseči stanje stalnega litja, je treba raztaljeno jeklo iz več peči oblikovati naenkrat. d) Treba je zmanjšati vsebnost vključkov in plinov v raztaljenem jeklu, da med procesom strjevanja ne pride do napak pri litju; e) pri zasnovi logičnega sistema delovanja mora tekoča kovina nemoteno prehajati v ulitek brez vpihavanja zraka in dodatnih vključkov; f) potrebno je dobro ohranjanje toplote v napajalniku, tako da se lahko raztaljeno jeklo strjuje usmerjeno in da je mogoče zagotoviti brezhiben potek napajanja [3, 4].

Pri tej študiji je bil zasnovan začetni proces litja velikega krmila. Numerična simulacija razpona temperature strjevanja je bila izdelana za napovedovanje mest in velikosti napak ter za optimizacijo procesa litja. Prav tako smo simulirali postopek polnjenja in prenos toplote. Izračunali smo območje primerjalne napetosti okrog vključkov in matrice. Opravili smo analizo tehnologije in spreminjanja sestavin mehanizma RE.

there is distinct insufficient in the casting products quality. Especially heavy steel casting products hardly meet domestic demand, part of the high-end heavy steel castings depend on imports [1,2].

Taking into account the solidification process of rudder horn for example, there are the following several difficulties in manufacturing: a) Composition of the rudder horn is in the peritectic area the microporosity could be formed easily; b) For the Casting: Section thickness is changed greatly, almost all faces are curved, the shape is streamlined, and the section size is the different remarkably; c) Because the weight of the casting is about (100-500 t), if the condition to achieve continuous pouring can be achieved, the molten steel from multi-furnaces must be qualified at one time. d) It is demanded to decline the content of inclusions and gas in molten steels so that foundry defects are not formed during the process of solidification. e) Designing a reasonable running system, it is certain that the metal liquid is filled into mould smoothly, without inspired air and second inclusions; f) Good heat preservation performance of the riser is required, so that the molten steel could solidify in order and the excellent feeding function could be got [3,4].

In this study, the initial casting process of the large rudder arm was designed. The numerical simulation of the solidification temperature field was made for prediction of the location and size of the defects and optimizing the casting process. We also simulated the filling and heat transfer process. The equivalent stress field around inclusions and matrix has been calculated. The technology and mechanism of RE compound modification has been analyzed.

2 Metode in materiali

Pri tej raziskavi je bil zasnovan in izveden začetni proces litja velikega krmila. Zunanje mere velikega krmila za navtiko znašajo $8.405 \times 2.029 \times 5.935$ mm, uporabljeni material je KSC49, kemijska sestava pa je prikazana v Pregl. 1. Dejanski postopek taljenja je: električna obločna peč z alkalnim medijem primarno taljenje → rafinacija v talilnem loncu (LF) → vpihovanje argona v talilni lonec od spodaj → vpihovanje argona v livno votlino → litje. Med postopkom toplotne obdelave dosega temperatura $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ (postopek normaliziranja) in $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ (postopek kaljenja).

Za simulacijo postopka litja in porazdelitev mest obremenitev vključkov smo uporabili analizo končnih elementov ANSYS in programsko opremo Pro/Engineer.

2 Methods and Materials

In this research, the initial casting process of the large rudder arm was designed and produced. The outline dimensions of the large rudder arm are $8405 \times 2029 \times 5935$ mm, the material is KSC49 and the chemical constitution is showed in Tab.1. The concrete smelting process is as follows: alkaline electric arc furnace primary melting → LF ladle refining → bottom blowing argon in ladle → mold cavity blowing argon → pouring. The heat treatment process is $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ normalizing and $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ tempering.

The ANSYS finite element analysis and Pro/Engineer software have been used to simulate the casting process and the distribution of the inclusions stress field.

Preglednica 1. Kemijska sestava

Table 1. Chemical constitution

Material	C	Si	Mn	P	S	Preostali elementi (skupaj ≤ 1) / Residual elements (≤ 1 in total)			
						Cr	Ni	Mo	Cu
KSC49	0,20	0,50	0,90	0,023	0,008	0,08	0,46	0,06	0,27

3 Rezultati in razprava

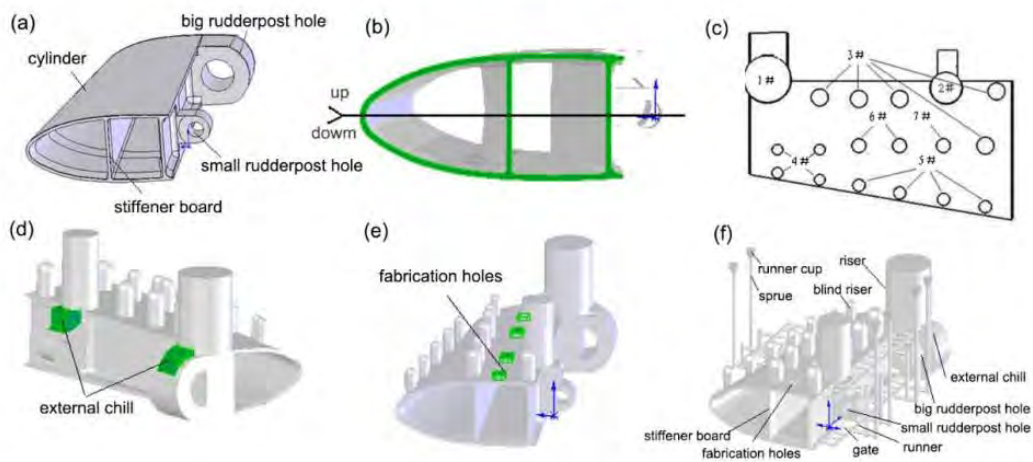
3.1 Postopek oblikovanja začetne tehnologije

Na Sl. 1a je prikazana skica krmila za navtiko. Krmilo je sestavljeno iz več delov, kot so valj, utrjevalna plošča, mala odprtina grodnice krmila in velika odprtina grodnice krmila. Na podlagi strukturnih značilnosti kota odklona krmila je bila zasnovana tipska površina (Sl. 1b). Tipska površina je bila postavljena med valj in odprtino

3 Results and Discussions

3.1 The designing process of the initial technology

Fig. 1a is a sketch map of the rudder horn. The rudder is mainly composed of several parts, such as the cylinder, stiffener board, the small rudder post hole, and big rudder post hole. Basing of the structural characteristics of the rudder angle, the type surface has been designed (Fig. 1b). The type surface was set between the cylinder

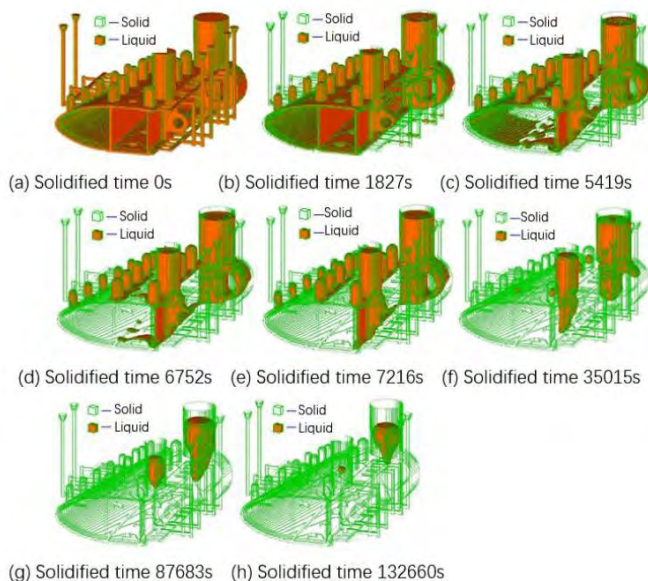


Slika 1. Zasnova začetnega procesa litja velikega krmila za navtika

Figure 1. The design of the initial casting process of the large rudder horn

gradnice krmila. Pri zasnovi dviznega voda je bilo upoštevano učinkovito upravljanje razdalje dovajanja (Sl. 1c). Pri spremenljivki prečnega prereza sta bila uporabljena zmogljivost enakomerne porazdelitve

and rudderpost hole. Effective management of feeding distance was adopted in the design of riser (Fig. 1c). Equal heat capacity subsidy and indirect external chill were used in variable cross-section (Fig. 1d). As



Slika 2. Proces strjevanja z optimizirano tehnologijo

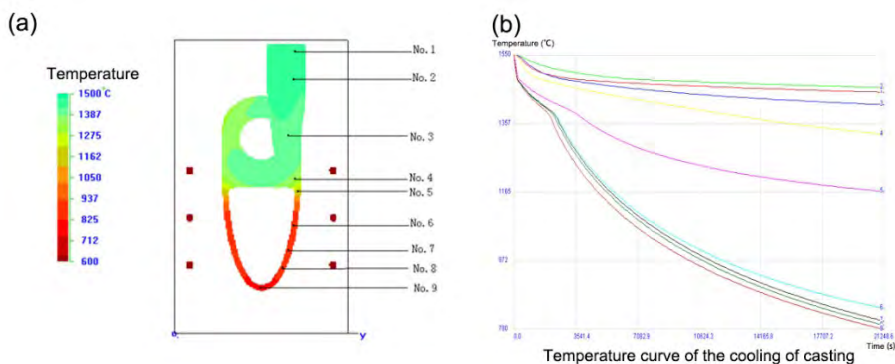
Figure 2. The solidification process of the optimized technology

toplote in neposredno zunanje hlajenje (Sl. 1d). Ker ulitek tekom proizvodnega procesa visi oz. je dvignjen, smo v položaju valja izvedli štiri proizvodne odprtine (Sl. 1e). Pri dovajalnem sistemu je bil uporabljen najkrajši kalup za dovajanje staljenega jekla, pri čemer je tekočina prehajala z dna dviznega voda in potovala do jekla (Sl. 1f).

Modele, dovodne in razdelilne kanale ter napajalnike smo optimizirali z numerično simulacijo. Simulacija procesa strjevanja z optimizirano tehnologijo je prikazana na Sl. 2. Rdeče-oranžni del pomeni tekočino, prazni deli pa pomenijo strjen material. Približno 36 ur traja, da se celotni model ulitka strdi iz tekočine v trdno snov. Vrata, dvizni vodi, razdelilni kanali in podpora so smiselno razporejeni. Temperaturni gradient smo nadzorovali tako od daleč kot od blizu ter od spodaj v smeri navzgor. Krivulja temperature strjevanja odprtega napajalnika na krajšem delu je prikazana na Sl. 3. Zabeleženje temperaturne krivulje smo določili 9 točk za spremljanje temperature na različnih višinah prečnih prereзов. Iz Sl. 3b je razvidno, da temperatura ulitka počasi pada od odprtine grodnice krmila do valja s

the casting is hoisted in the manufacturing process, 4 fabrication holes were set in the position of the cylinder (Fig. 1e). The shortest mold filling flow of molten steel, where liquid was from the bottom of the riser and downstream into steel, was used in the gating system (Fig. 1f).

Through numerical simulation, the patterns, gates, risers, runners and subsidy were optimized. The solidification process simulation of the optimized technology is shown in Fig. 2. The orange red part is liquid, and the blank part represents the solid. The whole casting model lasts about 36 hours from liquid to solid. The gates, risers, runners and subsidy are set up reasonable. Temperature gradient was controlled from far to near and bottom to top. The solidification temperature curve of the open riser in the small end is shown in Fig. 3. We set 9 temperature monitoring points at the different height of the cross-sections to record the temperature curve. From the Fig. 3b, it can be seen that the temperature of the casting gradually decreases from rudder post hole to cylinder with the decreasing of the height, therefore



Slika 3. Krivulja temperature strjevanja odprtega napajalnika na krajšem delu; a) barvna karta prečnih prereзов; b) graf temperaturnih vrednosti

Figure 3. Solidification temperature curve of the open riser in the small end; a) color map of the cross-sections; b) temperature graph

padanjem višine, s tem ohranjamo ustrezen proces strjevanja ulitka ter zmanjšamo pojav napak pri ulitku. Zagotovljeno je tudi pridobivanje jeklenih ulitkov s primernim temperaturnim razponom polnjenja kalupov ter pozitivnim temperaturnim gradientom med krčenjem zaradi strjevanja.

3.2 Izračun končnih elementov obremenitve, ki ga vključki povzročajo pri litju krmil za navtiko

Oblika in razporeditev vključkov pomembno vplivajo na lastnosti jekla [5–8]. Izračun končnih elementov obremenitve, ki ga vključki povzročajo pri litju krmil za navtiko, je zelo pomemben [9, 10]. Za simulacijo porazdelitve mest obremenitev smo uporabili metodo osnovnega končnega elementa. Morfologija vključkov je poenostavljena za krog, kvadrat, trapez, romb in petkotnik. Parametri materiala matrice in vključkov so predstavljeni v **Pregl. 2**.

Porazdelitev napetosti vključka pri različnih oblikah je prikazana na **Sl. 4**. Vplivi oblike in modula elastičnosti vključkov na največjo obremenitev so prikazani na **Sl. 5**. Razvidno je, da oblika vključkov pomembno vpliva na največjo obremenitev z večanjem razmerja modula elastičnosti. Jakost vplivov si sledi po naslednjem vrstnem redu: peterokotnik > trapez > romb > krog.

the reasonable solidification process casting is maintained, and the occurrence of casting defects is reduced. It is ensured that the steel castings with the reasonable mold filling temperature field and positive temperature gradient field is got during the solidifying contraction.

3.2 Finite element calculation of inclusions stress field in rudder horn casting

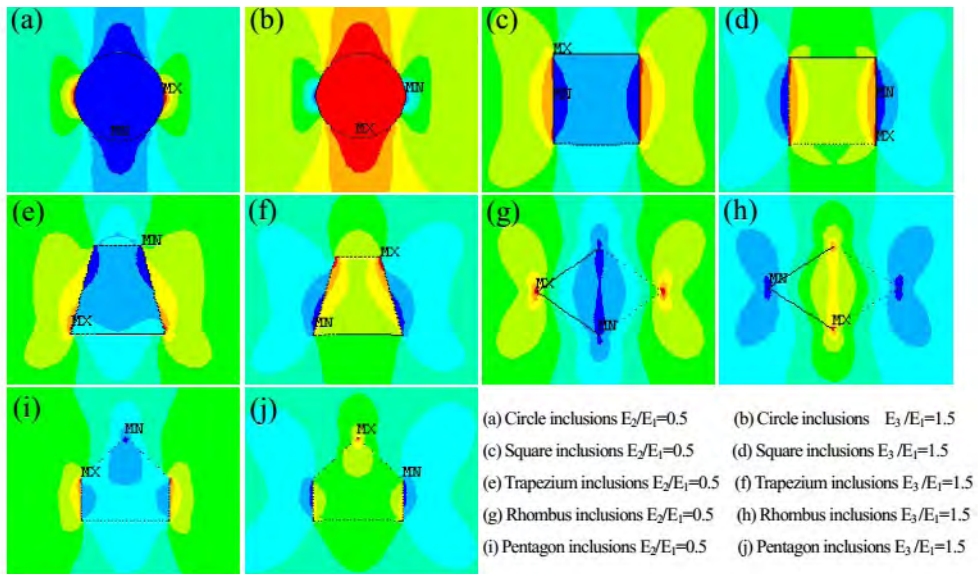
The effects of the shape and distribution of inclusions on the performance of the steel have the decisive significance [5-8]. The finite element calculation of inclusions stress field has great significance in rudder born casting [9,10]. The plane finite element has been used to simulate the distribution of the stress. The morphology of the inclusions are simplified for circle, square, trapezium, rhombus and pentagon. The physical parameters of the matrix material and inclusions can be seen in **Tab. 2**.

The stress distribution of the inclusion with different shapes is shown in **Fig. 4**. The effects of shape and elastic modulus of the inclusions on the maximum stress are shown in **Fig. 5**. It can be seen that the inclusion shape has a significant effect on the maximum stress with increasing of elastic modulus ratio. The effect is in order of Pentagon > Trapezium > Square

Preglednica 2. Fizični parametri materiala matrice in vključkov

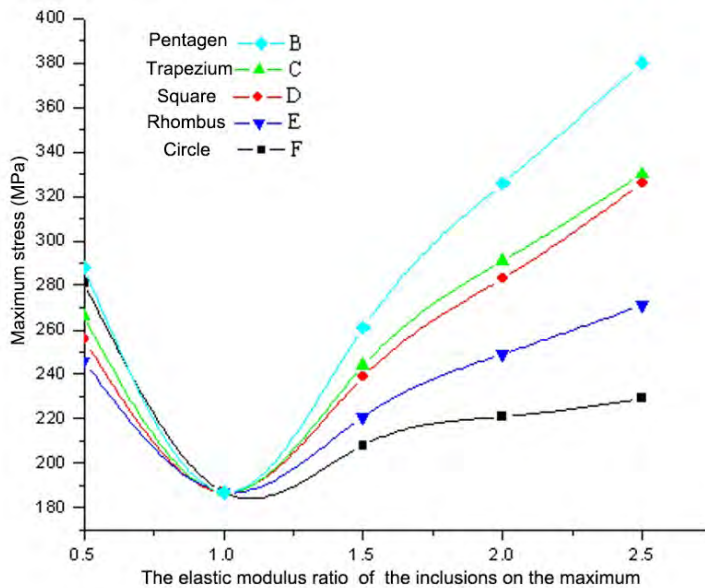
Table 2. The physical parameters of the matrix material and inclusions

		Modul elastičnosti / Elastic modulus E (MPa)	Poissonovo število / Poisson ratio λ	Napetost tečenja / Yield stress σ_s (MPa)
Material matrice / Matrix material		2×10^5	0,26	310
Vključki / Inclusions	Tip 1 / Type 1	1×10^5	0,2	
	Tip 2 / Type 2	3×10^5	0,3	



Slika 4. Porazdelitev napetosti vključka pri različnih oblikah

Figure 4. The stress distribution of the inclusion with different shapes



Slika 5. Vpliv oblike in modula elastičnosti vključkov na največjo obremenitev

Figure 5. Effect of shape and elastic modulus of the inclusions on the maximum stress

Preglednica 3. Največja obremenitev pri nečistočah različnih velikosti**Table 3.** Maximum stress in the impurities with different size

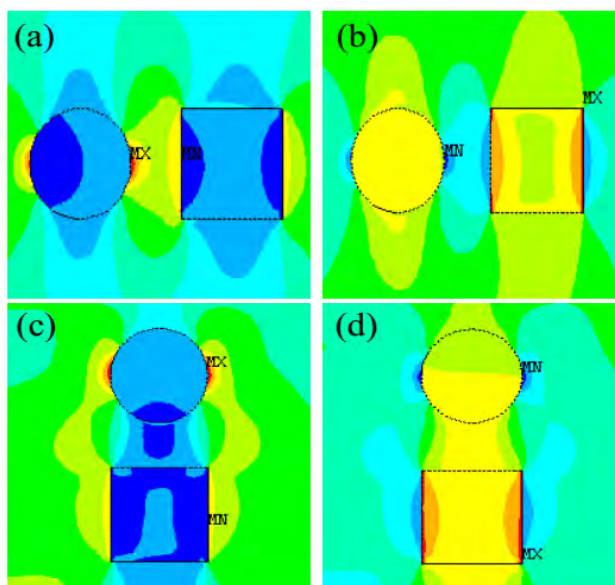
Premer vključkov (μm) / The diameter of inclusions (μm)		5	10	15	20	25	30	35
Največja obremenitev pri vzorcu (MPa) / Maximum stress in the sample (MPa)	$E / E = 1,5$ $3 \rightarrow 1$	209	209	208	208	207	207	207
	$E / E = 0,5$ $2 \rightarrow 1$	266	274	278	281	283	286	289

Vključke pri krogu je mogoče uporabiti za izboljšanje elastičnosti in žilavosti jekla.

Razmerje med največjo obremenitvijo vzorca in premerom vključkov z dvema razmerjema modula elastičnosti je prikazano v Pregl. 3. Razvidno je, da se največja obremenitev rahlo spremeni z večanjem premera vključkov, ko je razmerje modula elastičnosti nastavljeno na vrednost 1,5. Vendar pa se največja obremenitev bistveno spremeni z večanjem premera vključkov, ko je razmerje modula elastičnosti nastavljeno na vrednost 0,5. Ustrezno razmerje modula elastičnosti je pomembno tudi za lastnosti ulitka.

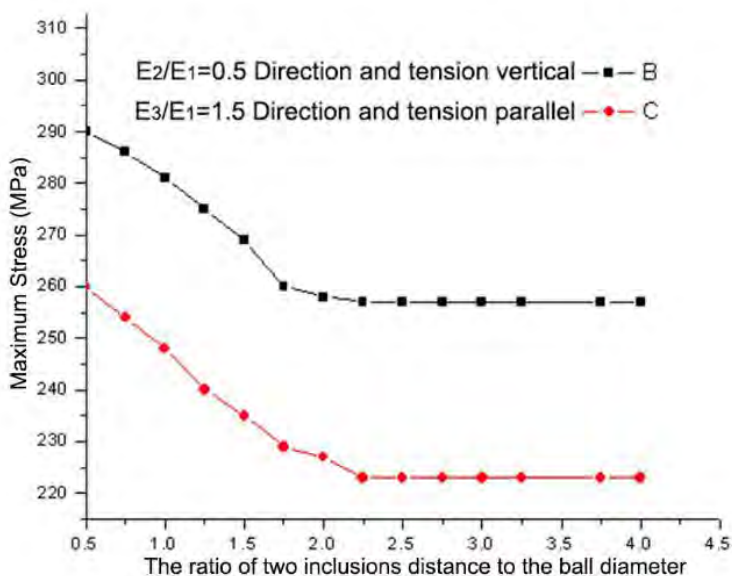
> Rhombus > Circle. The circle inclusions can be used to improve the plastic and toughness of the steel.

The relationship between maximum stress in the sample and the diameter of inclusions with two elastic modulus ratios are shown in Tab. 3. It is shown that the maximum stress has little change with increasing of inclusions diameters when the elastic modulus ratio set as 1.5. However, the maximum stress has a significant increase with increasing of the inclusion diameters when the elastic modulus ratio set as 0.5. The appropriate elastic modulus ratio is also important for the performance of the casting.



Slika 6. Vplivi smeri in oddaljenosti vključkov na porazdelitev obremenitve materiala pri vertikalni napetosti in razdalji: a) $E2 / E1 = 0,5$; b) $E3 / E1 = 1,5$ in vzporedno c) $E2 / E1 = 0,5$; d) $E3 / E1 = 1,5$

Figure 6. Effects of directions and distances of the inclusions on the stress distribution of the material when the tension and distance are vertical a) $E2 / E1 = 0.5$; b) $E3 / E1 = 1.5$ and parallel c) $E2 / E1 = 0.5$; d) $E3 / E1 = 1.5$



Slika 7. Vpliv oddaljenosti vključkov na največjo obremenitev

Figure 7. Effect of the inclusion distances on the maximum stress

Vplivi smeri in oddaljenosti vključkov na porazdelitev obremenitve materiala so razvidni iz Sl. 6 in Sl. 7. Razvidno je, da je največja obremenitev v navpični smeri večja od obremenitve pri vzporedni postavitvi. Največja obremenitev se zmanjša z zmanjšanjem razmerja razdalje dveh vključkov do premera krogle. Pri dvojni razdalji glede na premer krogle je učinek razdalje na največjo obremenitev zelo majhen.

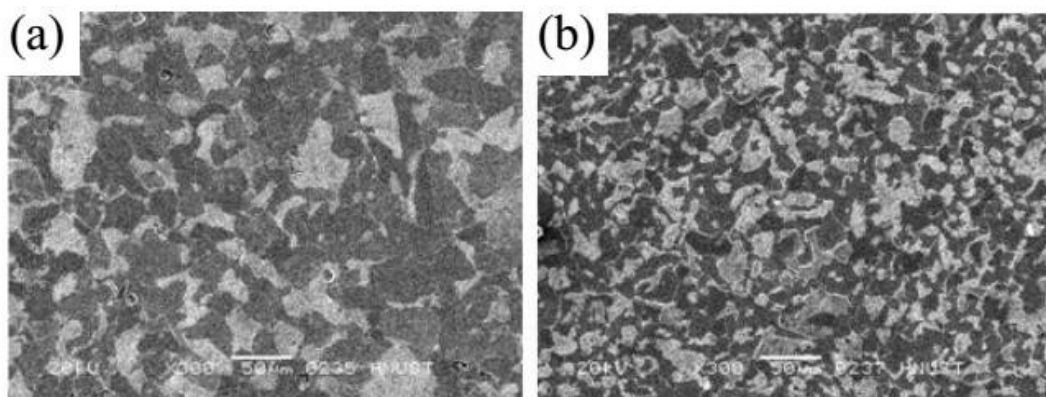
The effects of directions and of inclusions distances on the stress distribution of the material are shown in Fig. 6 and Fig. 7. It can be seen that the maximum stress with vertical direction is higher than that with parallel direction. The maximum stress decreases when the ratio of two inclusions distance to the ball diameter. When the distance is doubled to sphere diameter, the effect of distance on the maximum stress is very small.

3.3 Sprememba RE pri mikrostrukturah

Na podlagi zgornje simulacije so bili za spremembo oblike in velikosti vključkov dodani elementi redke zemlje (RE). Elementi redke zemlje so površinsko aktivni in primarno rastejo na sprednjem delu pri kristalizaciji. V in Ti sta znana kot tuje kati za nastanek heterogene nukleacije. Zrna se

3.3 Modification of RE on the microstructures

Basing on the above simulation, the rare earth (RE) elements were added to changing the shape and size of the inclusions. Because the RE are the surface-active elements and take priority growth on crystallization front. V and Ti are regarded



Slika 8. Učinki RE na mikrostrukture. (a) Brez RE, (b) Z RE

Figure 8. Effects of RE on the microstructures. (a) Without RE; (b) With RE

odrobnijsko s povečevanjem deleža tujih kalijevih vključkov pa so okroglasti.

Mikrostrukture krmil za navtiko z modifikacijo RE in brez nje so prikazane na Sl. 8a in 8b. Zrna je mogoče odrobnijsko, dendritno izcejanje pa zmanjšati z modifikacijo redke zemlje. Mehanske lastnosti ulitkov smo izboljšali z modifikacijo zaradi modificiranih in navedenih vključkov. Kot pri jeklu za krmila za navtiko se je raztezek povečal s 24 % na 28 %, odstotek zmanjšanja območja pa je porasel s 35 % na 50 %.

4 Sklepi

Vzpostavljen je bil koncept »popolnoma odprtega ulivnega sistema« in zasnovana je bila tudi tehnika litja težkih kovin. Med krčenjem zaradi strjevanja smo pridobili jeklene ulitke in pozitivni temperaturni gradient.

Določili smo model mehanskega vedenja pri različnih tipih, oblikah in porazdelitvah vključkov pri ulitkih iz težkih kovin.

as external crystal nucleus. The grains are refined with the increase of the crystal nucleus and the inclusions are spherical.

The microstructures of the rudder horn with and without RE modification are shown in Fig. 8a and Fig. 8b respectively. The grains can be refined, and the dendritic segregation is reduced by rare earth modification. Mechanical properties of the casting are improved by means of modification due to the modified and specified inclusions. Such as rudder horn steel, elongation is increased from 24% to 28% and percentage reduction of area is improved from 35% to 50%.

4 Conclusions

The concept of "the complete open gating system has been set up, and the design principles of the heavy cast steel foundry technique have been established. The steel castings with the reasonable mold filling temperature field and positive temperature gradient field are got during the solidifying contraction.

Razvili smo s tem povezane sestavinske modifikatorje RE. Dosegli smo zmanjšanje zrn ter bistveno izboljšali morfologijo in porazdelitev vključkov ter mehanske lastnosti jeklenih ulitkov.

The mechanical behavior model on the different types, shapes and distributions of the inclusions in the heavy steel castings was established.

Dedicated RE compound modifiers were developed. The grains were refined, and the morphology and distributions of inclusions were improved, and the mechanical properties of the steel castings have been improved remarkably.

Viri

- [1] Grison J, Remy L. Fatigue failure probability in a powder metallurgy Ni-base superalloy [J]. Eng Fract Mech, 1997, 57(1): 41–45.
- [2] Wang Aiqin, Xie Jingpei, Wang Wenyan, etc. Technological Optimization for Large Grinding Board Steel Casting in Computer [J]. Ming and Processing Equipment, 2002, 33(10): 50–51.
- [3] Hui Xiaohui, Yin Yimin, Han Yanjun. The casting process design and simulation of the large-scale volute of dredge pump. Advanced Materials Research [J], 2011, 154-155: 1767-1770.
- [4] Liu Jingfeng, Li Hongyou, Jiang Kaiyong. Numerical Simulation on Solidification Process of Large Sized Steel Casting [J]. Foundry Technology, 2011, 32(4): 443–445.
- [5] Li Daizhong. Non Metallic Inclusion of Steel [M]. Peking: Science Press, 1983.
- [6] Rocabois P, Lehmann J, Gaye H, et al. Kinetics of precipitation of non-metallic inclusions during solidification of steel [J]. Journal of Crystal Growth, 1999, 198–199 (3): 838–843.
- [7] Domizzi G, Anteri G, Ovejero G J, Influence of sulphur content and inclusion distribution on the hydrogen induced blisten cracking in pressure vessel and pipeline steels [J]. Corrosion Science, 2001, 43(2): 325–332.
- [8] Melendez A J, Carlson K D, Beckermann C. Modelling of reoxidation inclusion formation in steel sand casting [J]. Cast Metals, 2013, 23(5): 278–288.
- [9] Meijie Z, Huazhi G, Ao H, et al. Numerical simulation and industrial practice of inclusion removal from molten steel by gas bottom-blowing in continuous casting tundish [J]. Journal of Mining & Metallurgy, 2011, 47(47): 137–147.
- [10] Javurek M, Gittler P, Rössler R, et al. Simulation of nonmetallic inclusions in a continuous casting strand [J]. Steel Research International, 2005, 76(1): 64–70.

Ultrazvočna preiskava metalurških spojev na kompleksnih ulitkih

Ultrasonic Investigation of Metallurgical Bonding in Complex Castings

Povzetek

Valji za vroče valjanje so v osnovi dvo- ali večplastni ingoti sestavljeni iz obstojnejše zunanje plasti iz legirane železove litine, iz žilavega jedra iz litine s kroglastim grafitom ter v nekaterih primerih še iz t. i. vmesne plasti iz sive litine z lamelnim grafitom. Kot taki se, zaradi različnih sestavnih zlitin, smatrajo za kompleksne ulitke, saj so lastnosti posameznih zlitin med seboj različne.

Ena temeljnih neporušnih preiskav ulitkov je ultrazvočna metoda, kjer z uporabo ultrazvoka lahko zaznamo livarske napake (poroznost, prisotnost večjih nečistoč), z njim pa lahko zaznamo tudi metalurški spoj med različnimi zlitinami ter ocenimo kvaliteto le-tega.

Pričujoča študija prikazuje kako s pomočjo ultrazvoka lahko poleg znanih livarskih napak zaznamo tudi globino plasti posameznih zlitin ter vpliv mikrostrukturnih sestavin, ki nastopajo na mestih metalurških spojev med zlitinami, na odboj ultrazvočnega signala in interpretacijo le-tega.

Ključne besede: ultrazvok, mikrostruktura, delovni valji

Summary

Cast rolls for hot strip rolling are multilayered castings, composed of a harder, more wear resistant outer layer made of alloyed cast iron, a tough core made of nodular cast iron and in some cases also of an intermediate layer made of grey cast iron. As such, they can be considered as complex castings, since the differences between individual alloys comprising such ingots can be significant.

Ultrasonic inspection is one of the most fundamental nondestructive methods for inspecting cast ingots. It is often used for detection of abnormalities such as porosity or large non-metallic inclusions. In the case of multilayered cast rolls, ultrasound can also be used for detection and quality inspection of metallurgical bonding between respective alloys or layers.

The presented paper is focused on the use of ultrasound for centrifugally casted rolls, not only for the detection of casting abnormalities but also on the detection of layer depth and influence of specific microstructural constituents present at the bond on the reflected ultrasound signal.

Key words: ultrasound, microstructure, rolls, centrifugal casting

1 Uvod

Valjanje je ena najpomembnejših metod za proizvodnjo jeklenih izdelkov in polizdelkov, zato morajo biti valji dovolj vzdržni in odporni na morebitne težave na progi. Kot proizvajalci valjev tako vložimo veliko časa in truda v izboljšanje tehnologije izdelave, da končni izdelek zadosti zahtevnim pogojem na posameznih progah v smislu obrabne obstojnosti kot tudi odpornosti na nastanek in napredovanje razpok [1, 2].

Liti valji za vroče valjanje so običajno dvoslojni [3, 4], pri čemer je lahko delovna plast iz različnih zlitin, odvisno od ogrodja na katerem bo valj obratoval. V votel ulitek centrifugalno ulitega delovnega sloja, ki je po svojih lastnostih trši in bolj obstojen na obrabo, se gravitacijsko ulije duktilno jedro iz sive litine s kroglastim grafitom. Med obema zlitinama se ustvari metalurški spoj z nataljevanjem. Tako nastane kompleksen ulitek sestavljen iz dveh zlitin z različnimi lastnostmi.

Metalurški spoj med obema slojema predstavlja kritično točko, kjer lahko zaradi procesa strjevanja nastanejo napake kot so poroznost, vključki, segregacije in ostale livarske napake. K naštetim napakam na spoju so predvsem nagnjeni kompleksni ulitki z visoko legirano delovno plastjo kot npr. HSS (hitrorezo jeklo), semi HSS (prilagojena različica HSS), bela litina z visokim kromom in orodno jeklo z visokim kromom. V kolikor napake na spoju nastopajo v posameznih, omejenih primerih, le-te ne predstavljajo hujšega tveganja med uporabo valja. V nasprotnem primeru, ko so napake gosto porazdeljene po večji površini, pa lahko privede do postopnega popuščanja spoja in posledično do težav na valjovski progi. Postopek toplotne obdelave lahko še dodatno poslabša stanje, saj zaostale natezne napetosti, ki nastanejo kot posledica faznih transformacij in termičnega

1 Introduction

Rolls are one of the most crucial tools in steel production industry. They must be produced in a way to ensure good mill productivity and demanded quality of the mill's final products. Research and development department in roll producing companies dedicate a lot of time and knowledge to investigate how to provide optimal roll performance for each mill in terms of wear resistance as well as other damage resistance that can cause during the roll exploitation [1, 2].

Several types of cast iron are used for work rolls that operate in a hot rolling process. Work rolls which work in hot strip mills are normally double layered [3, 4]. Surface layer is hard and wear resistant and it is cast by using special centrifugal casting machine, while for the ductile core a gravity casting procedure is used. Between those two layers a metallurgical bond is established.

Metallurgical bond between layers is a critical area, where due to the casting procedure porosity, inclusions, segregation and other casting defects could be located. High alloyed work layered roll grades such as HSS (High Speed Steel), semi HSS, High Chromium Iron and High Chromium Steel are prone to fusion zone defects. Isolated defects of this type represent only a minor concern, a pervasive contamination of the flaws on the shell/core interface proportionally weakens the bond line. Further complications of the bonding area are induced by the heat treatment of the roll. Tension residual stresses in this region as a result of the heat treatment with the combination of the incomplete fusion or weak microstructural formations could additionally reduce the endurance of the roll.

To detect all the anomalies, ultrasonic inspection is a suitable method. The

raztezanja-krčenja, lahko prispevajo k popuščanju spoja.

Opisane napake lahko dokaj uspešno zaznamo z ultrazvočno preiskavo. Slab spoj med plastmi, ki je lahko posledica različnih dejavnikov, lahko zaradi vpliva visokih termo-mehanskih obremenitev privede do katastrofalnega loma na valjavski progi: luščenje delovne plasti ali celo popolni zlom po preseku.

Tako proizvajalci kot tudi uporabniki valjev se vedno bolj poslužujejo različnih neporušnih metod preiskav, da bi s tem zajezili število incidentov na progi, ki so povezani s kakovostjo valjev. Poleg ročnih prenosnih ultrazvočnih naprav se uporabljajo tudi avtomatizirani sistemi ultrazvočne meritve, ki so običajno nameščeni na brusilnih strojih. Avtomatizirani ultrazvočni sistemi omogočajo jasno zaznavanje lokacije, globine in velikosti napak na spoju valja.

2 Eksperimentalni del

Valji predstavljeni v tem delu so uliti iz treh različnih zlitin, ki v stiku tvorijo metalurški spoj oz. prehod med delovno plastjo in jedrom. Zunanja, centrifugalno lita delovna plast sestoji iz bele litine z visokim kromom. Vmesna plast, ki je prav tako centrifugalno lita, je siva litina z lamelnim grafitom, jedro pa je gravitacijsko lita perlitna siva litina s krogličastim grafitom. Kemijske sestave posameznih plasti so predstavljene v Tabeli 1.

Mikrostruktura bele litine z visokim kromom (označena kot HCr) sestoji iz 20 – 30 % eutektičnih karbidov tipa M_7C_3 ($M = Cr, Fe$) in matrice iz popuščenega martenzita z nizkim deležem zaostalega avstenita ($< 5 \%$). S prilagojenim postopkom toplotne obdelave dosežemo izločanje sekundarnih karbidov tipa $M_{23}C_6$ bogatih na

presence of weak bonding due to different reasons, could lead to a catastrophic failure of the roll during the exploitation. With the presence of the huge cycling thermo-mechanical loading on the roll during the hot strip rolling and in combination with the weak bonding, rolls can spall or break through the whole section.

Roll producers and on the other hand also roll users are nowadays increasingly using advanced nondestructive testing procedures in their roll shops in order to prevent roll related incidents on the rolling mills. Beside using the hand portable ultrasonic devices, also automated ultrasonic systems are used, normally installed on grinding machines. Scanning the roll with the on-line system could give clear results of the anomalies' location, depth and size.

2 Experiments

Rolls presented in this study are cast out of three different materials where a metallurgical bond is established between them. Outer centrifugally cast shell is made of High Chromium white cast Iron, intermediate layer, still cast on the centrifugal casting machine is made of lamellar graphite cast iron and for the statically cast core a pearlite nodular graphite cast iron is used. Its chemical composition is presented in Table 1.

Microstructure of the High Chromium Iron is composed of 25 – 30 % eutectic carbides M_7C_3 ($M = Cr, Fe$) and the rest is tempered martensite with the low value of the retained austenite ($< 5 \%$). With the use of the special heat treatment process a participation of secondary carbides based on Cr type $M_{23}C_6$ could be detected inside the matrix. This kind of microstructure enables us very good wear properties and

Tabela 1. Kemijska sestava treh različnih plasti**Table 1.** Chemical composition of three different layers

Plast / Layer	Element mas. % / wt. %					
	C	Si	Cr	Ni	Mo	Mg
HCr	2.5 – 3.0	0.5 – 1.0	16.0 – 18.0	1.0 – 1.5	1.0 – 1.5	/
Vmesna / Intermediate	2.8 – 3.4	2.0 – 2.5	< 0.5	0.5 – 1.5	< 0.15	/
Jedro / Core	2.8 – 3.1	2.0 – 2.75	< 0.15	0.1 – 1.0	< 0,15	0.04 – 0.06

Cr, ki se izločajo znotraj matrice. Takšna mikrostruktura je ugodna s stališča obrabne obstojnosti in odpornosti na nastanek termičnih razpok po površini valja.

Področje spoja je bilo pregledano z ročnim ultrazvočnim aparatom Krautkramer USM-32 z uporabo 1 MHz mono-kristalne sonde tipa K, Slika 1a.

Globina prehoda med plastmi se je določila z zaznavo povišanega odboja. Po opravljenem ročnem pregledu je bil valj pregledan tudi z avtomatiziranim sistemom za ultrazvočno preverjanje z 5 MHz mono-kristalno sondo, Slika 1b.

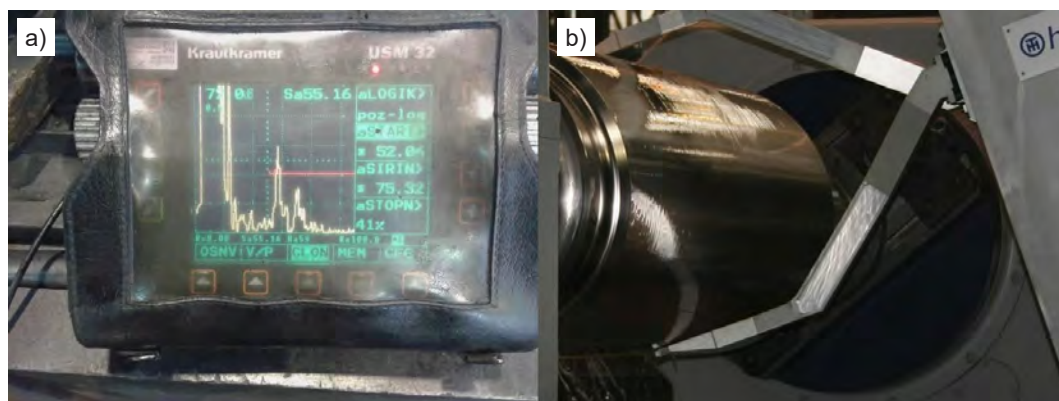
Po ultrazvočnem pregledu so bili na mestih z dobrim spojem in mestih z zaznano morebitno napako odvzeti vzorci v obliki izstruženih segmentov. Vzorci za

good resistance to fire cracking on the surface.

A bonding area was first investigated with the manual portable ultrasonic device Krautkramer USM-32 where 1 MHz mono-crystal probe type K is used, Figure 1a.

By recording the echo from the shell/intermediate/core layer, a depth of the working layer could be determined. Based on this data, the roll was put on the grinder Herkules where an automated ultrasonic test with the mono-crystal 5 MHz probe was performed, Figure 1b.

After the ultrasonic inspection, samples were taken from the ring in the area of a flawless and defected zone. All specimens were cut out of the roll ring segment by using the abrasive water blast technology,

**Slika 1.** a) Ročni ultrazvočni aparat; b) avtomatizirana ultrazvočna naprava Herkules**Figure 1.** a) Manual portable ultrasonic device; b) automated ultrasonic device Herkules

metalografsko preiskavo so bili pripravljene iz teh segmentov s postopkom vodnega razreza, s čimer smo se izognili nastanku morebitnih toplotno vplivanih con.

Na tako pripravljenih vzorcih je bila opravljena metalografska analiza celotne globine delovne plasti valja z območjem spoja. Vzorci so bili pripravljene s standardnim postopkom brušenja in poliranja ter jedkani z 2 % Nitalom za analizo mikrostrukture. Za opazovanje mikrostrukture smo uporabili Olympus mikroskop, model BX51M; posnetki so bili zajeti z Olympus SC50 kamero.

Vzorci za natezno preizkušanje so bili pripravljene na različnih mestih za določanje morebitnih slabših mehanskih lastnosti. Pripravljene so bili iz jedra kot tudi z območja spoja.

3 Rezultati

Na robovih trupa valja so bili zaznani večkratni odboji na območju prehoda plasti. Sliki 2a in 2b kažeta rezultate preiskave z ročnim ultrazvočnim aparatom.

Prvi odboj z ročnim ultrazvočnim aparatom je bil zaznan na globini 56,19 mm, drugi odboj pa na globini 65,26 mm. Meritev s kljunastim merilom je potrdila ultrazvočno zaznane globine plasti. Prvi prehod (plašč / vmesna plast) je bil izmerjen pri 56,31 mm, Sliki 2c in 2d, drugi prehod (vmesna plast / jedro) pa pri 65,77 mm, Sliki 2e in 2f.

Jedkan metalografski vzorec plasti je razkril podobne rezultate globin/debelin plasti. Meritev trdot po Rockwellu je dodatno potrdila že na pogled opazen prehod, Slika 3.

Vizualna analiza plasti kaže, da pojav večkratnih odbojev ne pomeni nujno napake v področju spoja. Za natančnejše razumevanje, zakaj je en odboj višji od drugega ter za potrditev, da na prehodu

in order to prevent the formation of heat-affected zones due to friction upon cutting.

Metallographic analysis was then performed on these samples throughout the entire working layer material. Specimens were prepared with a standard metallographic procedure of grinding and polishing. A 2 % Nital was used to etch the samples in order to reveal the microstructure. Samples were finally inspected by using an Olympus BX51M optical microscope, equipped with an Olympus DP-12 camera.

To be sure where weak mechanical properties are presented, different tensile tests specimen were made. They were taken from the core material and through all three fused layers.

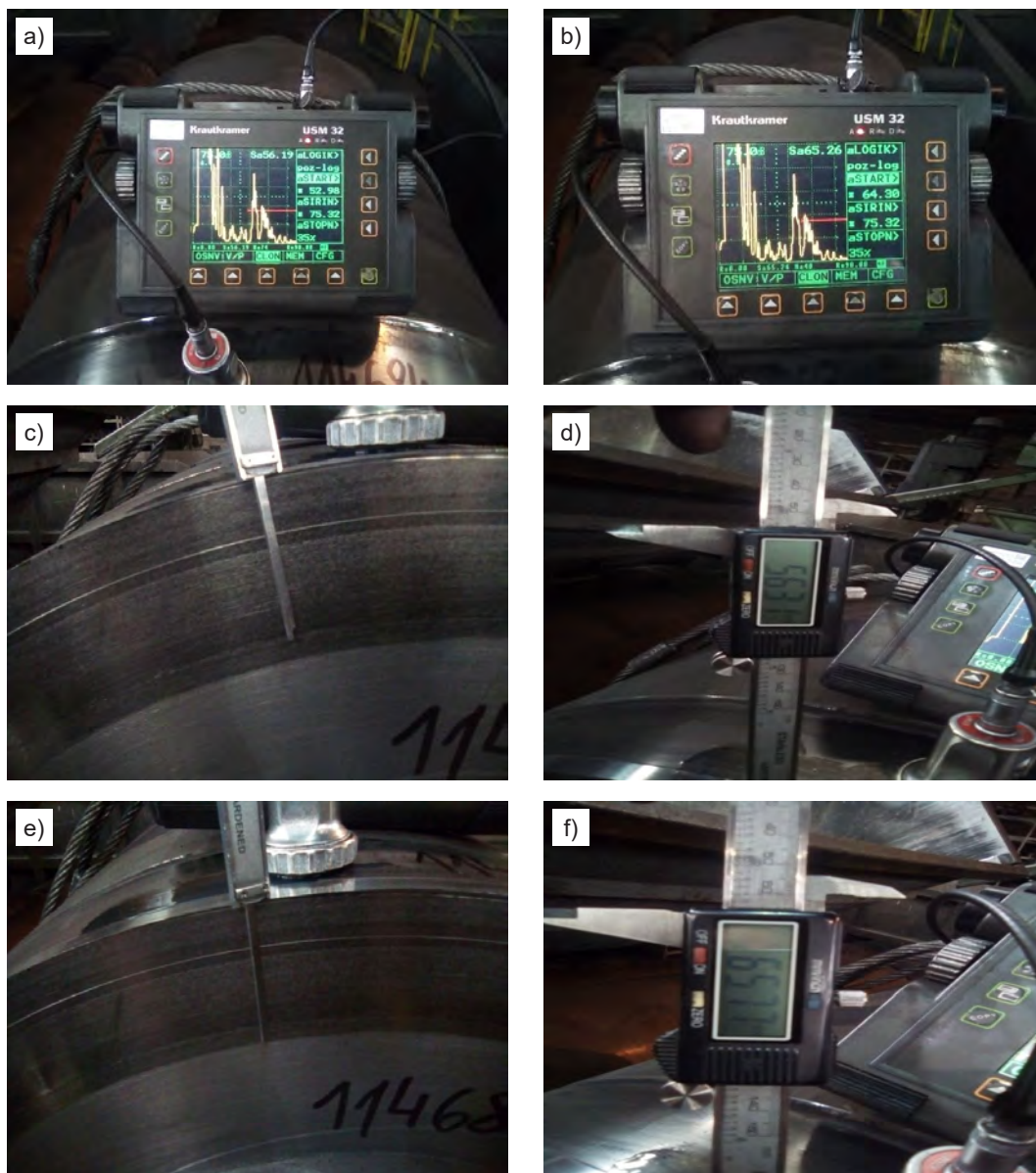
3 Results

Multiple echoes from the bonding area were visible almost through the entire roll body. Figure 2a and 2b presents the results of the hand portable ultrasonic investigation.

It is visible that the first echo is detected at the depth of 56.19 mm, while the second one is at the 65.26 mm depth. Same results were obtained when we measured the value of the depths with the caliper. First interface (shell / intermediate) was visible at the 56.31 mm, Figure 2c and 2d and the second interface (intermediate / core) on 65.77 mm, Figure 2e and 2f.

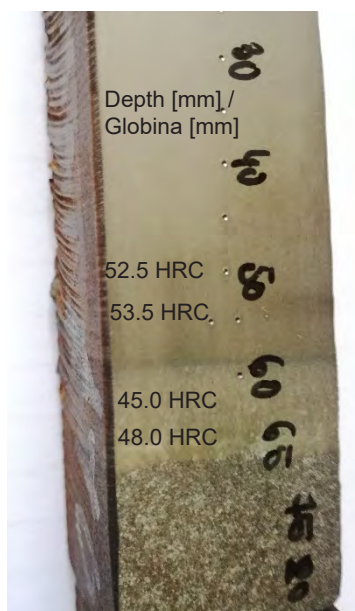
Similar values were obtained when we analyzed the etched sample taken from the roll ring. Visual interfaces were confirmed with the hardness measurement in Rockwell, see Figure 3.

Based on the results it is obvious that the multiple echo phenomena itself does not actually represent a flaw in the bonding area. To understand why one echo is bigger than another one and to prove that there are no anomalies on the bonding



Slika 2. Določanje globine plasti z ročnim ultrazvočnim aparatom: a) detekcija in intenziteta prvega odboja; b) detekcija in intenziteta drugega odboja; c) meritev prvega prehoda (plašč / vmesna plast); d) globina prvega prehoda (plašč / vmesna plast); e) meritev drugega prehoda (vmesna plast / jedro); f) globina drugega prehoda (vmesna plast / jedro)

Figure 2. Manual depth investigation: a) detection of the first echo and its intensity; b) detection of the second echo and its intensity; c) measuring the first interface (shell / intermediate); d) depth value of the first interface (shell / intermediate); e) measuring the second interface (intermediate / core); f) depth value of the second interface (intermediate / core)

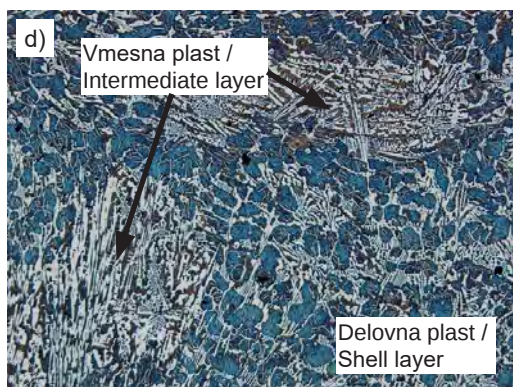
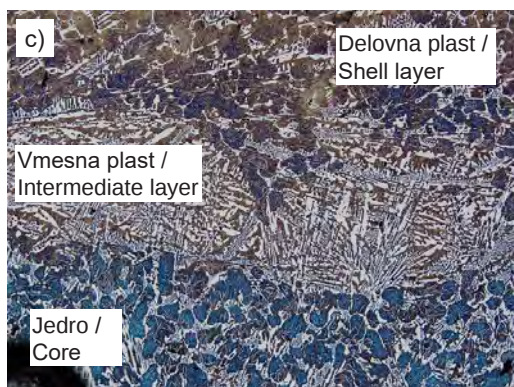
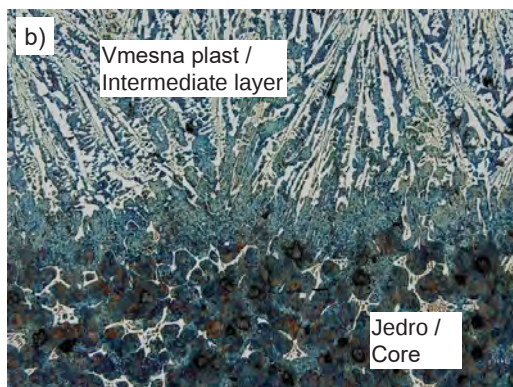
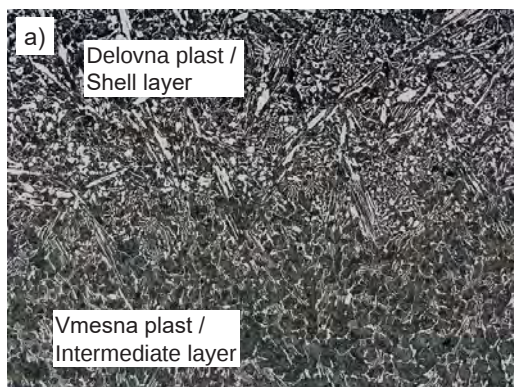


Slika 3. Metalografski vzorec delovne plasti valja z dvema žema na pogled opaznima prehodoma. Na prehodu v vmesni plasti je izmerjen znaten padec trdote

Figure 3. Depth of the working layer with two visual interfaces. Hardness drops in intermediate layer

Slika 4. Mikrostruktura na območjih prehoda: a) prvo območje: delovna plast / vmesna plast; b) drugo območje: vmesna plast / jedro; c) obe območji prehoda; d) mešanje plasti - možen vzrok za pojav treh odbojev

Figure 4: Difference in microstructure in the interfaces zones: a) Shell / intermediate; b) intermediate / core; c) both zones; d) possible cause for three echoes observation



ne prihaja do napak, je bila izvedena podrobnejša analiza mikrostrukture. Mikrostruktura prvega prehoda je prikazana na Sliki 4a. Prehodno območje na prvem spoju je zelo enakomerno za razliko od drugega prehoda med vmesno plastjo in jedrom. Na tem mestu groba mikrostruktura z večjimi bloki cementita preide v perlitno matrico z grafitom in posameznimi otoki ledeburita, Sliki 4b in 4c. Opisani ostri prehodi bi lahko bili razlog zakaj na določenih mestih zaznamo višje ultrazvočne odboje; hitrost širjenja zvoka med močno karbidno mikrostrukturo in perlitno matrico z grafitom je različna.

V redkih primerih je moč zaznati tudi tretji odboj. Slika 4d kaže del vmesne plasti, ki se je ujela v delovno plast. Tako mešanje plasti, do katerega lahko pride na različnih globinah prehoda, lahko privede do pojava tretjega ultrazvočnega odboja. Posledica omenjenega pojava je tudi neenakomerna porazdelitev trdote preko prehoda. Prav tako lahko na takih mestih pride do nastanka razpok, ki so posledica visokih kontaktnih napetosti po Hertzju med delovnim in podpornim valjem, ko se valj med obratovanjem približuje končnemu premeru.

zone, a microstructure analysis was made. Microstructure of the first interface between the shell and intermediate material is presented on the Figure 4a. It can be observed that the transition zone is quite smooth, and it is totally different as is in the case of second interface zone between intermediate layer and the core. In Figure 4b and 4c, it is observed that within 1 mm of the depth a coarse huge ladder shape carbide area is transformed into the pearlite microstructure with the cementite and graphite phase. These rough transitions could be the reason why in some instances a high echo is detected. Carbide nets have different sound velocity properties as the matrix and graphite.

In some rare cases also a third echo could be detected. A layer can be trapped around another one at different depths, what could lead to a third echo participation. This phenomenon is clearly visible in Figure 4d. Hardness distribution inside the transition section is consequently not equal and can cause a crack initiation problem when a roll is near scrap diameter due to the high Hertzian contact fatigue stresses between work and back up roll.



Slika 5. Mikropore v vmesni plasti

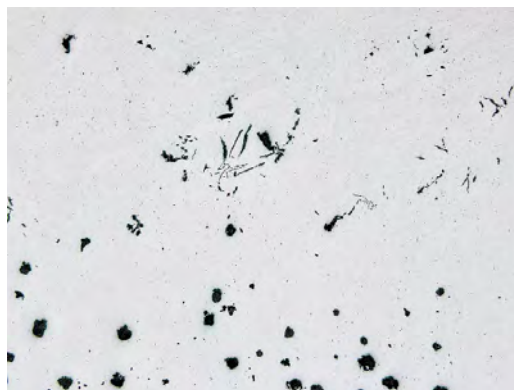
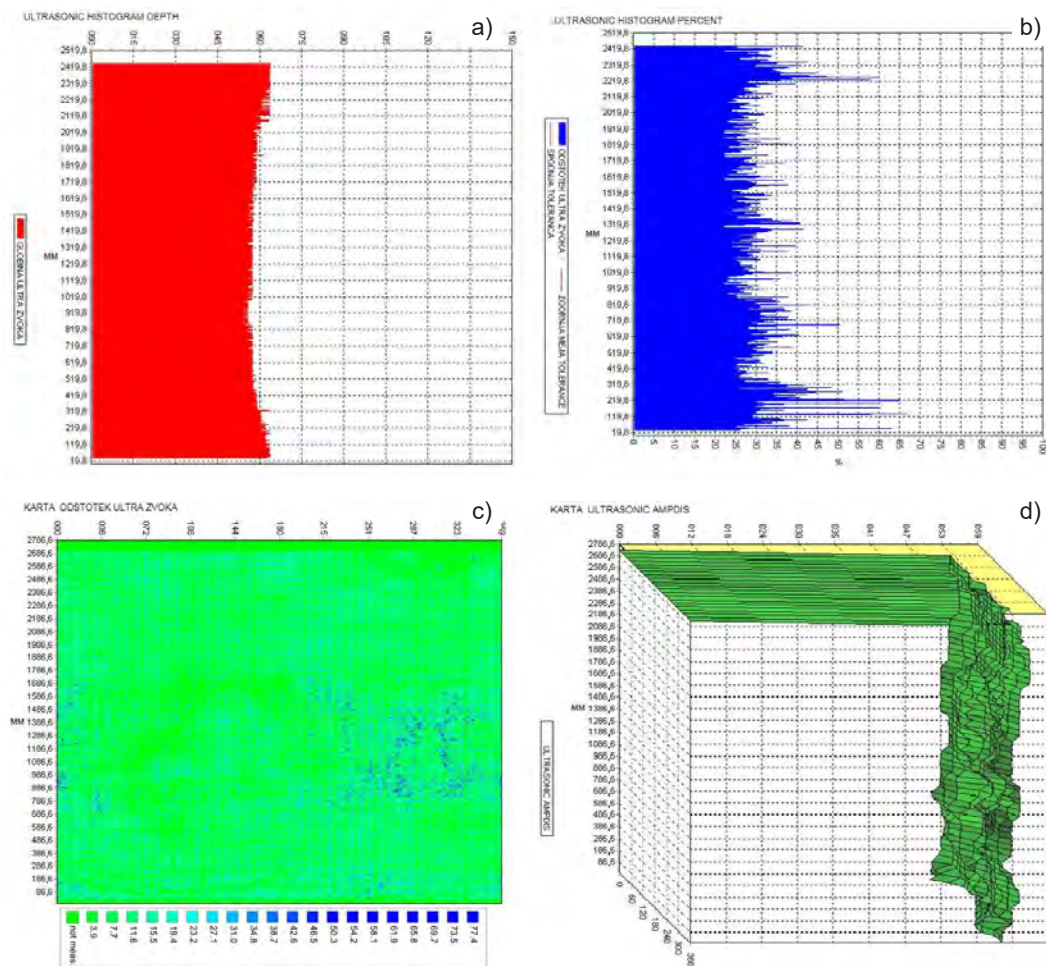


Figure 5. Micropores in the intermediate layer



Slika 6. Izpisi ultrazvočne preiskave opravljene z avtomatiziranim sistemom Herkules: a) globina plasti; b) jakost odbojev; c) ploskovna preslikava odbojev; d) tridimenzionalen prikaz globine plasti in magnitude odboja

Figure 6. Reports from automated on-line ultrasonic system Herkules: a) depth; b) Z-chart; c) C – scan; d) flat pattern view of depth and echo

Na poliranih metalografskih vzorcih se je razkrila mikroporoznost na obeh prehodnih območjih, Slika 5. Z ultrazvočno preiskavo ni mogoče nedvoumno potrditi prisotnost tako majhnih por, saj je širina ultrazvočnega snopa na tej globini preširoka, da bi jasno zaznala posamezne mikro-napake prikazanih velikosti.

Polished samples reveal micropores in both interface areas, Figure 5. With the ultrasonic method, a detection of presented small defects cannot be confirmed. We assume that the ultrasonic beam is too wide at these depths, to be able to clearly detect micro porosity.

Izpisi iz avtomatiziranega sistema ultrazvočne analize so prikazani na Sliki 6. Slika 6a potrjuje prisotnost dvojnih odbojev na robu trupa, medtem ko je na sredini trupa zaznan samo en odboj. Sklepamo lahko, da na mestih z enim odbojem, zaznamo zgolj eno prehodno območje. Na mestu z enim odbojem je jedro v celoti natalilo vmesno plast, medtem ko je bila na robovih trupa debelina vmesne plasti rahlo debelejša zaradi izrivanja mase navzven kot posledica delovanja centrifugalne sile. Slika 6b prikazuje jakost odbojev od prehoda plasti. Prekomerno povišani odboji (preko 100 % skale) niso bili zaznani, kar potrjuje rezultate preiskave z ročnim ultrazvočnim aparatom. Na mestih, kjer so zaznani nekoliko povišani odboji, smo potrdili prisotnost blokastih karbidov cementita na prehodu med vmesno plastjo in jedrom. Sliki 6c in 6d prikazujeta drugačen način izpisa preiskave. Na Sliki 6c je prikazana ploskovna preslikava povišanih odbojev, ki se uporablja za natančno določanje lege morebitnih napak v plasti valja.

Reports from automated ultrasonic system are presented in Figure 6. From Figure 6a it is visible that double echoes are presented on the edges of the roll barrel, while in the middle part only one echo is detected. We can conclude that in case of one echo, only one interface zone could be noticed. This could explain that the intermediate layer was fully fused with the core during the static casting and that the centrifugal force moves the intermediate layer to the position of the end cores of the roll shell. Figure 6b represents the Z-chart of the echoes. No high echoes from the interface zone are detected, what was already confirmed with the manual ultrasonic device. Where higher echo is detected, a layer of ladder shape carbides in the area of intermediate / core interface was observed. Figures 4c and 4d represent another possibility how to print the report. Figure 4c is a C-scan image and it is very useful to get the exact location of the possible anomaly presented inside the roll.

Tabela 2. Natezna trdnost na mestu spoja in jedra

Table 2. Tensile strength of the intermediate and core layer

Plast / Layer	Natezna trdnost, MPa / Tensile strength, MPa
Spoj / Intermediate	405
Jedro / Core	486

Izmerili smo natezni trdnosti na mestu spoja in jedra, da bi preverili razliko med obema območjema. Rezultati so zbrani v Tabeli 2. Natezna trdnost prehoda plasti je nekoliko nižja od natezne trdnosti jedra. Ker je razlika med obema nateznima trdnostnima relativno majhna, lahko sklepamo, da je spoj dober.

A tensile test from the bonding area and the core was performed in order to see the difference in the tensile strengths of the material. Results are presented in Table 2. The results show that the tensile strength is a little bit lower in comparison to the core value. Based on the results where small differences between both values are measured, we can conclude that the bonding area is good.

4 Zaključki

Predstavljena študija predstavlja ultrazvočne preiskave metalurških spojev. Zaradi postopka centrifugalnega ulivanja lahko zaznamo več odbojev na mestu spoja. Ta pojav je posledica dveh zaznanih prehodnih območij. Prvi odboj se sklada s preходом med delovnim slojem in vmesno plastjo, drugi odboj pa prehod med vmesno plastjo in jedrom. Nekoliko povišane odboje na mestu spoja povezujemo s pojavom blokastih karbidov cementita, ki se zgoščeno pojavijo na mestu prehoda plasti. V nekaterih primerih lahko zaznamo tudi trojne odboje. Ti so posledica mešanja plasti, ko se vmesna plast ujame v delovno plast. Če na teh mestih pride do povišanih kontaktnih napetosti po Hertzu, lahko na teh mestih nastanejo razpoke zaradi občutnih razlik med trdotami in strukturo posameznih plasti. Slednje lahko privede do luščenja delovne plasti.

Avtomatiziran sistem ultrazvočne analize potrjuje izsledke opravljene z ročnim ultrazvočnim aparatom. S pomočjo grafičnih tridimenzionalnih prikazov odboja lahko natančno določimo lokacijo morebitnih napak na prehodu plasti za potrebe nadaljnjih preiskav.

Mikrostrukturna analiza spoja je potrdila prisotnost mikroporoznosti. V kolikor je območje mikroporoznosti majhno, se le-ta ne more nedvoumno potrditi z ultrazvočno preiskavo zaradi širine ultrazvočnega snopa na tej globini. V nasprotnem primeru, ko je območje poroznosti širše od širine snopa, ne zaznamo več odboja od t.i. zadnje stene, kar nakazuje na nesprijetost plasti.

Natezni trdnosti območja spoja in jedra sta si zelo podobni, na podlagi česar lahko sklepamo na dobro kvaliteto spoja.

4 Conclusion

Ultrasonic investigation of the metallurgical bonds is presented in this study. Due to the complex centrifugal casting procedure a multiple echo from the bonding area could be seen. This phenomenon could be explained with the two different interface regions. The first echo represents the interface between shell and intermediate layer while the second one is detected on the place where interface between intermediate layer and the core is located. Higher echoes in the mentioned area relate to the coarse ladder shape carbides segregated there. In some cases, a triple echo could be seen. This is related to the entrapment of the intermediate layer inside the shell material. If the Hertzian contact stresses are high near this area, a small crack could initiate due to the different hardness and structure of the material itself. This can then lead into the full delamination of the roll.

The results of the automated ultrasonic system confirm the manual report. With the advanced graphic presentation flaws could be easily located for further investigation.

Microstructure of the bonding areas reveals a micro porosity. In case of a small micro porosity region, a clear detection of it cannot be performed due to the wide ultrasonic beam. If the area is larger no echo from the roll backwall could be detected which means that the bonding there is no longer presented.

Mechanical properties of the core and intermediate layer have quite similar value of the tensile strength which prove good bonding.

Literatura / Reference

- M. Drobne, N. Gubeljak and S. Glodež, Experimental determination of fatigue parameters of high chromium steel under different loading and temperature conditions, Technical Gazette (2014), p.853
- M. Drobne, T. Vuherer, I. Samardžič and S. Glodež, Fatigue crack growth and fracture mechanics analysis of a working roll surface layer material, Metallurgy (2014), p.481
- K.H. Schröder, Frequently Asked Questions about Hot Strip Mill Work Roll Surface, WMSP, 2004, New Orleans
- U. Klančnik, J. Habjan, M. Drobne, P. Mrvar, J. Medved, Characterization of a modified indefinite chill cast iron working layer in rolls, 55th international foundry conference Portorož (2015)

Mehanizem obrabe kotalnega dleta

Roller cone wear mechanism

Povzetek

Kotalna dleta se množično uporabljajo pri izdelavi hidroloških, naftnih, plinskih in drugih vrtin, za katere pridobivanje jedra ni bistvenega pomena. Odpoved delovanja dleta med vrtnjem ima za posledico zmanjšanje napredka vrtnja, zaradi česar je potrebno poškodovano ali izrabljeno kotalno dleto odstraniti iz vrtnice. Zaradi tega dejstva se znanstveniki in inženirji v čedalje večji meri posvečajo raziskavam, katerih rezultati bi pripeljali k podaljšanju efektivnega časa delovanja dleta in k povečanju napredka v efektivnem času delovanja dleta.

V delu so bile izvedene „in situ“ spremljave vrtnih parametrov med izvajanjem vrtnih del s kotalnim dletom Smith SB117PS premera 215.9 mm, ki je namenjeno za vrtnje v mehkejših hribinah. Po izvedenem vrtnju je bilo dleto temeljito preiskano za ugotovitev poškodb in obrabe, ki je nastala med vrtnjem.

Pri preiskavah smo uporabili naslednje sodobne in standardizirane preiskovalne metode: analizo mikro in makrostrukture hribine in materialov kotalnih dlet, ki je bila izvedena z optično in elektronsko mikroskopijo, simultano termično analizo materialov kotalnih dlet, analizo kemijske sestave hribine in materialov kotalnih dlet ter določitev geomehanskih parametrov hribine. Nastalo obrabo, lokalne porušitve in razpoke smo kvantitativno in kvalitativno opredelili in povezali z režimom vrtnja in mineraloško sestavo hribine.

Na podlagi metalografskega pregleda kotalnih dlet in geofizikalnih lastnosti kamnin so se ugotovile strukturne spremembe materiala kotalnih dlet ter način in potek njihove obrabe.

Ključne besede: vrtnje, kotalno dleto, mehanizem obrabe, karbidni oplast, HV trdota, visoka temperatura

Summary

Roller cone drill bits are widely used for drilling the hydro geological, oil, gas and other wells, for which the acquisition of the core is not essential. The breakdown of the drill bit or rapidly decreasing of rate of penetration during the drilling process results in a reduction in the progress of the drilling, which makes it necessary to remove the damaged or worn roller cone bit from the well. Due to this fact, scientists and engineers are increasingly focusing on research, the results of which would lead to an extension of the effective time of the drill bit and to increase the rate of penetration.

In our work, was monitored “in situ” drilling parameters during the drilling process with the Smith SB117PS

215.9 mm diameter roller cone drill bit, intended for drilling in soft rock materials. After drilling, the bit was thoroughly examined to determine the damage and wear that occurred during drilling.

The following modern and standardized investigative methods were used: analysis of the micro and macrostructure of rock materials and materials of roller cone bits carried out by optical and electronic microscopy, simultaneous thermal analysis of materials of drill bits, analysis of the chemical composition of rock materials and materials of drill bits, and determination of geomechanical parameters of rock materials. The resulting wear, local bursts and cracks were quantitatively and qualitatively defined and linked to the drilling regime and the mineralogical composition of the rock material.

Based on the metallographic examination of materials of drill bits and geophysical properties of rocks, the structural changes in the material of the drill bits and the manner and course of their wear have been identified.

Keywords: drilling, roller cone bit, mechanism of drill bit wear, carbide coating, HV hardness, high temperature

1 Uvod

Rotacijsko vrtanje je najbolj priljubljena metoda vrtanja vrtin. Za rotacijsko vrtanje se uporabljajo vrtni sestavi, ki so sestavljeni iz več kosov posameznih cevi. Na koncu vrtnice cevi je na težek stabilizator ali vrtni venec pritrjeno kotalno dleto. Dodatna teža in večji zunanji premer stabilizatorja tik nad kotalnim dletom pripomoreta k zagotavljanju ravne vrtine. Vrtni sestav je votel, po njem pa kroži vrtna tekočina, bodisi blato bodisi zrak, in se skozi šobe v kotalnem dletu pretaka navzgor po zunanji strani vrtnice sestava. Kotalno dleto z vrtenjem razbije material, vrtna tekočina pa odrezke prenese na površje, kjer se usedajo v rezervoarju za blato. Z vrtnimi stroji je mogoče uporabiti več vrst dlet. Najpogostejše se uporablja vrtno dleto. Vrsta in število rezalnih zob na kotalih dlet se razlikujeta glede na vrsto formacij, ki jih je treba prebiti. Pri vrtanju z blatom se uporablja vrtna tekočina iz bentonitne gline in vode. Blato ima več namenov: iz vrtine odstranjuje odrezke, preprečuje sesedanje vrtine in zmanjšuje izgubo vode v formacije, saj na steni vrtine tvori filtrsko pogačo, zadržuje odrezke ob ustavitvi vrtanja, hladi in čisti vrtni sestav in dleto

1 Introduction

Rotary drilling is the most popular well drilling method. The principle of rotary drilling is based upon a rotating drill stem made of lengths of drill pipe. A bit is attached to a heavy stabilizer or drill collar at the end of the column of drill pipe. The extra weight and larger outside diameter of the stabilizer just above the bit helps to maintain a straight drill hole. The drill stem is hollow and has a drilling fluid of either mud or air circulating down the drill stem out through the nozzles in the bit and up along the outside of the drill stem. The rotating action of the bit breaks up the material and the drilling fluid carries the cuttings to the surface where they settle out in a mud tank. Several types of bits are available to the rotary driller. The bit most generally used is the tricone roller bit. The type and number of cutting teeth on the bit cones vary depending upon the type of formations to be penetrated. Mud rotary utilizes a drilling fluid of bentonite clay and water. The mud serves several purposes: remove cuttings from the well, prevent collapse of the well and reduce water loss to the formations by forming a filter cake on the borehole wall, suspend cuttings when drilling is stopped, cool and clean the drill

ter maže ležaje dleta in dele črpalke za blato.

Življenjska doba kotalnega dleta oz. čas učinkovitega vrtnja sta odvisna od lastnosti materialov, iz katerih so izdelani sestavni deli kotalnega dleta. Kotalno dleto se obrablja zaradi kamnine, skozi katero se vrta, in režima vrtnja.

Učinkovito delovanje dleta je odvisno od njegove odpornosti na dejavnike, ki se pojavljajo med njegovim delovanjem. Med dejavnike, ki zmanjšujejo čas učinkovitega delovanja kotalnega dleta, lahko uvrstimo: material, iz katerega so izdelana kotala in zobje svedra, režim vrtnja, ki obsega obremenitev dleta med vrtnjem, število vrtljajev dleta in količino vrtalnega blata glede na geomehanske lastnosti kamnine, skozi katero vrtamo.



Sika 1. Kotalno dleto Smith ST117

Figure 1. Roller cone drill bit Smith ST117

stem and bit, and lubricate bit bearings and mud pump parts.

The lifetime of the roller cone bit or the time of effective drilling operations depends on the properties of the materials from which the components of the roller cone bit are made. The rolling cone bit becomes worn due to the effects of the rock material through which is drilled and the drilling regime.

The effective operation of the bit depends on its resistance to the factors that occur during its operation. Among the factors that shorten the time of the effective operation of the roller cone bit, we can include: the material from which the rollers and the teeth of the bit are made, the drilling regime, which includes the load on the bit during drilling, the number of bit rotations and the amount of the drilling mud in relation to the geomechanical properties of the rock material, through which we drill.

We analysed the mechanical properties of the steel material of the roller cone bit Smith ST117, diameter 215.9 mm (8 1/2"), which was drilled through 610.70 m of sandstone.

In the investigation of the properties of the steel material of the roller cone drill bit, we inspected the materials of the bit body, rollers and teeth. We examined the method of wear and determined the critical points of erosion effect on the steel material of roller cone bits. For this purpose, we analysed the rock material that the examined roller cone bit drilled through.

The results of our analysis present the mechanisms that result in the wear of the roller cone bit material under the given conditions of the rock material and the drilling regime.

Analizirali smo mehanske lastnosti jeklenega materiala kotalnega dleta Smith ST117 s premerom 215,9 mm (8 ½ palca), ki je prevrtalo skozi 610,70 m peščenjaka.

Pri preiskavi lastnosti jeklenega materiala kotalnega dleta smo pregledali materiale držaja dleta, kotal in zob. Proučili smo mehanizem obrabe in določili kritične točke učinka erozije na jekleni material kotalnih dlet. V ta namen smo analizirali kamnino, skozi katero je vrtalo pregledano kotalno dleto.

Rezultati naše analize prikazujejo mehanizme, ki povzročajo obrabo materiala kotalnega dleta v danih kamninskih pogojih in ob danem režimu vrtnja.

2 Materiali in metode

V toku preiskav za izvedbo karakterizacijo obrabe kotalnega dleta, smo izvedli detaljne preiskave materialov skozi katere je bilo vrtano in preiskave materialov iz katerih je sestavljeno dleto. V ta namen smo v prvi fazi izvedli pregled dleta, ki je zajemal optični pregled stanja dleta po izvedenem vrtnju skozi hribinski masiv po metodologiji IADC (International Association of Drilling Contractors).

Na pridobljenem vzorcu hribinskega materiala, skozi katerega je bilo vrtano, smo izvedli laboratorijske analize za ugotovitev njegovih mehanskih in mineraloških lastnosti.

Na vzorcu hribinskega materiala so bile izvedene naslednje preiskave:

- pregled karakterističnega vzorca hribine skozi katero je bilo vrtano,
- pregled geokemične in mineraloške sestave vzorca hribine skozi katero je bilo vrtano z metodo XRF (X-ray fluorescence), z uporabo Thermo NITON XL3t XRF analizatorja,
- pregled trdnostno deformacijskih

2 Materials and Methods

In the course of the investigations to characterize the wear of the roller cone bit, detailed investigations were carried out on the materials through which it was drilled, drilling parameters and the materials from which the roller cone bit was made. To this end, in the first phase, we carried out a review of the roller cone bit, which included an overview of the condition of the bit after drilling through the rock formation, according to IADC (International Association of Drilling Contractors) methodology.

From the obtained sample of rock material, we carried out laboratory analyses to determine the mechanical and mineralogical properties of the rock through which it was drilled with the considered drill bit.

The following investigations were carried out on a sample of rock material:

- a visual overview of rock material,
- an overview of the geochemical and mineralogical composition of the sample of the rock material through which it was drilled using the XRF (X-ray fluorescence) method, using a Thermo NITON XL3t XRF analyser
- an overview of the strength-deformation properties of the rock material was carried out according to ASTM standard D7012-10

While drilling through the known rock material, drilling parameters were also monitored as follows:

- the load on the drill bit,
- the number of rotations of bit,
- the quantity of the pumped drill mud,
- the pressure of the pumped drill mud,
- the penetration rate,
- the length of the drilling interval.

After a visual inspection of the bit, we cut it apart to perform tests to discover the metallurgical properties of the steel from

lastnosti hribine skozi katero je bilo vrtano po standardu ASTM D7012-10.

V toku izvedbe vrtnja skozi poznani material smo spremljali tudi vrtnalne parametre in sicer naslednje:

- obremenitev na dleto,
- število obratov vrtnalnega drogova,
- količino črpanega izplačnega materiala,
- tlak izpiranja,
- hitrost napredka,
- dolžino izvrtanega intervala.

Po izvedenem vizualnem pregledu kotalnega dleta, se je le to razstavilo za namen ugotavljanja lastnosti jeklenih materialov iz katerih je kotalno dleto sestavljeno in pridobitev kvalitetnih vzorcev za preiskavo poškodb materialov, ki so nastale v toku vrtnja.

V nadaljevanju smo izvedli kompletno analizo jeklenih materialov kotalnega dleta, ki je zajemala naslednje preiskave:

- kemična analiza jekla telesa kotalnega dleta z ARL MA-310 optičnim emisijskim spektrometrom,
- sestavo karbidne obloge zob z XRF (X-Ray fluorescence spektrometry) metodo z uporabo Thermo NITON XL3t XRF analizatorjem,
- pregled prereza zobov z elektronskim mikroskopom Jeol JSM 5610 po metodi EDS/SEM (energy dispersive spectroscopy / scanning electron microscope),
- termalna analiza DSC (differential scanning calorimetry) jekla kotala, telesa dleta in karbidne obloge zob dleta z Netzsch Jupiter STA449C
- dilatometrična analiza jekla zob in karbidne obloge z Bähr DIL 801 nizkotemperaturnim dilatometrom,
- meritev trdote jekla po Vickersu z 100 g obremenitvijo z Shimadzu type M mikro trdotnem testerjem.

which the roller cone drill bit was made and to produce test samples for the investigation of material damage that occurred during the drilling work.

In the following paper, we carried out a complete analysis of the steel materials of the roller cone bit, which covered the following examinations:

- the chemical composition of roller body steel with an ARL MA-310 optical emission spectrometer,
- the composition of the carbide coating of bit teeth with the XRF (X-ray fluorescence) method using a Thermo NITON XL3t XRF analyser,
- a cross-sectional view of the bit teeth with a Jeol JSM 5610 electron microscope using the EDS/SEM analysis (energy dispersive spectroscopy / scanning electron microscope),
- DSC (differential scanning calorimetry) of roller steel and tooth carbide coating with the Netzsch Jupiter STA449C
- a dilatometric analysis of the roller steel and the tooth carbide coating with a Bähr DIL 801 low temperature dilatometer,
- Vickers hardness tests on the roller steel with a 100 g load with a Shimadzu type M microhardness tester.

3 Results

3.1 Rock material

A geological investigation was performed on the rock material. Geologically, the rock material is fine-grained sandstone with a carbonate binder, poorly bonded with grains of mica, hornblende and quartz.

Tabela 1. Rezultati geomehanskih lastnosti hribinskega materiala**Table 1.** Results of the geomechanical properties of rock material

Gostota / Density	Kohezija / Cohesion	Strižni kot / Angle of internal friction	Modul elastičnosti / Elastic module	Enoosna tlačna trdnost iz točkovnega indeksa / Compressive strength from spot strength index test	Točkovni trdnostni indeks / Spot strength index
ρ	c	φ	E	σ_c	I_{s50}
[Mg/m ³]	[MPa]	[°]	[MPa]	[MPa]	[kPa]
2.007	0.361	51.2	3098	1.219	81.3

Tabela 2. Mineraloška sestava hribinskega materiala – geokemična**Table 2.** Mineralogical composition of the sample rock material - geochemical

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	TiO ₂
%	%	%	%	%	%	%
47.49	10.57	3.30	4.63	9.82	2.24	0.54

3 Rezultati

3.1 Hribinski material

Geološko je material, skozi katerega je bilo vrtano, peščenjak s karbonatnim vezivom, slabo vezan, fino zrnat z vsebnostjo zrn sljude, rogovače in kremenca.

3.2 Kotalno dleto

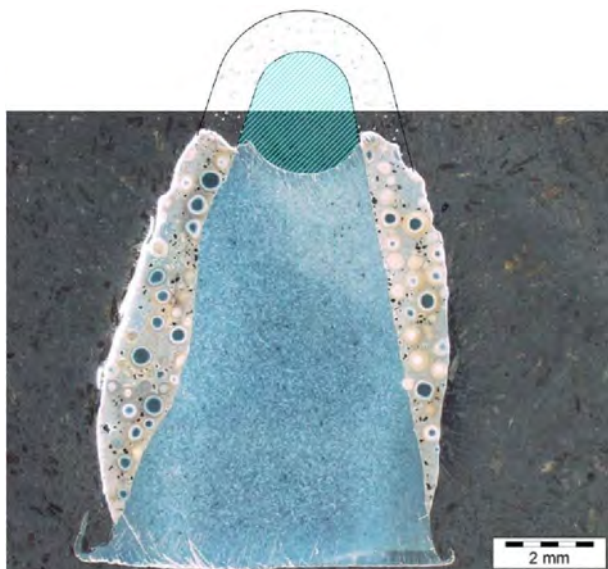
Po izvedenem vrtanju je bilo kotalno dleto makroskopsko pregledano po IADC metodologiji, kjer se je ovrednotilo stanje kotal in zob kotalnega dleta. Ugotovljeno je bilo, da so zobje enakomerno obrabljeni

3.2 Roller Cone Bit

After drilling, the drill bit was macroscopically examined using IADC methodology, where we evaluated the condition of the rolls and the teeth of the drill bit. We found that the teeth of the bit were evenly worn and the formation of erosion channels at the top of the teeth was quite evident. The teeth of the external line were eroded on the side that was not protected by the carbide coating, in contrast to its initial state. On all of the drill bit's teeth, erosion channels were clearly visible. The results of dull inspection of the drill bit can be seen in Table 3.

Tabela 3. Rezultati pregleda obrabe kotalnega dleta skladno z IADC standardom**Table 3.** Results of dull inspection of drill bit according to IADC dull grading system

Rezalna struktura / Cutting structure				Ležaji / tesnila / Bearings / seals	Premer / Gauge	Druge obrade / Other dull char.	Vzrok izvleka dleta / Reason pulled
Notranja vrsta zob / Inner rows	Zunanja vrsta zob / Outer rows	Karakteristična obrada / Dull char.	Lokacija / Location				
T1	T2	SS	A	E	I	ER	TD



Slika 2. Makroskopski prerez zoba kotalnega dleta z rekonstrukcijo prvotne geometrije

Figure 2. Macroscopic cross-sectional view through the teeth of the drill bit, with the reconstruction of the original geometry

ter da je evidenten nastanek erozijskih kanalov na vrhovih zob. Zobje zunanje vrste so bili obrabljeni na straneh, ki niso bile zaščitene s karbidno oblogo. Na vseh zobeh kotalnega dleta je bilo opaziti erozijske kanale. Rezultati pregleda dleta so prikazani v tabeli 3.

3.3 Jeklo kotala

Pregledali smo sestavo jeklenega materiala tako telesa kotalnega dleta z zobmi kot karbidne obloge zob.

Preiskava kemične sestave jekla kotal in telesa zob je bila izvedena z optičnim emisijskim spektrometrom. Rezultati kemične sestave so prikazani v tabeli 4.

Glede na rezultate kemične analize (tabela 4) smo ugotovili, da je v tem primeru, jekleni material iz katerega so izdelana kotala in telesa zob, tako imenovano orodno jeklo z delo v hladnem s povečano žilavostjo.

Pri izvedbi metalografskih preiskav z elektronskim mikroskopom smo analizirali prerez zob, kjer smo pregledali osnovni material, ki sestavlja telo zob, spoj s

3.3 Roller steel material

We examined the roller material for both the steel body with teeth and the carbide coating of the tooth.

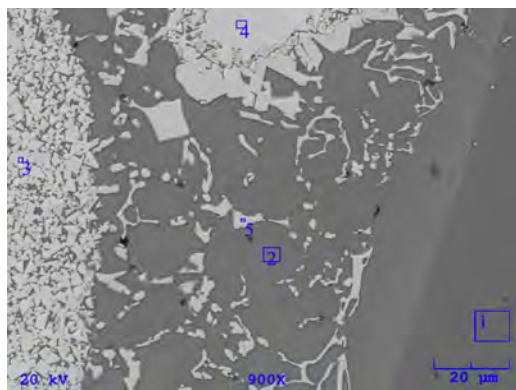
An examination of the chemical composition of the roller steel was carried out on an optical emission spectrometer. The results of the chemical composition of the investigated steel can be seen in Table 4.

Based on the results of the chemical analysis (Table 4), we have found that, in this case, the steel material of the tooth base is the so-called cold work tool steel with increased toughness.

In the execution of the metallographic investigations by scanning electron microscopy, we analysed the tooth section where we examined the basic tooth material – cold work tool steel, the joint with the carbide coating and the carbide coating itself. EDS analyses were also performed, which showed the chemical composition of the involved phases. Figure 3 shows the SEM image of the sample in the area of the

Tabela 4. Rezultati kemične analize jekla kotal in telesa zob**Table 4.** Chemical analysis of the investigated roller steel – tooth body

Element / Element	Enota / Unit	Rezultat / Result
C	mass. %	0.145
Si	mass. %	0.25
Mn	mass. %	0.59
P	mass. %	0.007
S	mass. %	0.002
Cr	mass. %	0.11
Ni	mass. %	3.50
Cu	mass. %	0.18
Mo	mass. %	0.201
V	mass. %	0.01
Ti	mass. %	0.005
Nb	mass. %	0.005
Al	mass. %	0.053
N	mass. %	< 0.003

**Slika 3.** SEM prikaz zoba, od karbidne obloge, cone mešanja do jekla telesa zoba (od levo proti desni): 1 – telo zoba, 2 – matrica karbidne obloge, 3 – karbidni material, 4 – karbidni material, 5 – karbidni material**Figure 3.** SEM image of bit tooth, from carbide coating, mixing zone till steel tooth base (from left to right): 1 – tooth body, 2 – carbide coating matrices, 3 – carbide material, 4 – carbide material, 5 – carbide material

carbide coating, the mixed zone and the steel of the tooth.

Tabela 5. Elementarna sestava telesa zoba (1-slika 3)**Table 5.** The elemental composition of tooth body material (1-fig. 3)

Element / Element	Concentration / Koncentracija	
	at. %	wt. %
Si	0.497	0.250
Mn	0.347	0.342
Fe	95.876	95.958
Ni	3.279	3.450

Tabela 6. Elementarna sestava matrice karbidne obloge (2-slika 3)**Table 6.** The elemental composition of carbide coating - matrix (2-fig. 3)

Element / Element	Concentration / Koncentracija	
	at. %	wt. %
Mn	2.445	2.244
Fe	90.158	84.128
Co	3.397	3.345
Ni	0.958	0.940
W	3.014	9.343

Table 7. The elemental composition of carbide coating (3-fig. 3)**Tabela 7.** Elementarna sestava karbidne obloge (3-slika 3)

Element / Element	Concentration / Koncentracija	
	at. %	wt. %
Fe	2.913	0.903
W	97.087	99.097

Tabela 8. Elementarna sestava karbidne obloge (4-slika 3)**Table 8.** The elemental composition of carbide coating (4-fig. 3)

Element / Element	Concentration / Koncentracija	
	at. %	wt. %
W	100.000	100.000

karbidno oblogo (cona mešanja) in karbidno oblogo. Opravljene so bile tudi analize EDS, ki so pokazale kemijsko sestavo vključenih faz. Slika 3 prikazuje SEM sliko vzorca na območju karbidne obloge, cone mešanja in jekla telesa zoba.

Rezultati simultane termične analize (STA) (slika 4) jekla vzorčenega iz telesa kotala, da se pri temperaturi 695.2 °C začne evtektoidna transformacija v trdnem stanju, ki jo zaznamuje endotermni pik. Ko je le ta zaključena (738 °C) kovinska osnova dobi kristalno strukturo avstenita. Pri temperaturi 1352.1 °C se v preiskovanem jeklu začnejo taliti nizkotemperaturni evtektiki, nato pa pri 1483.5 °C primarni zmesni kristali avstenita. Taljenje je zaključeno pri temperaturi 1524.5 °C.

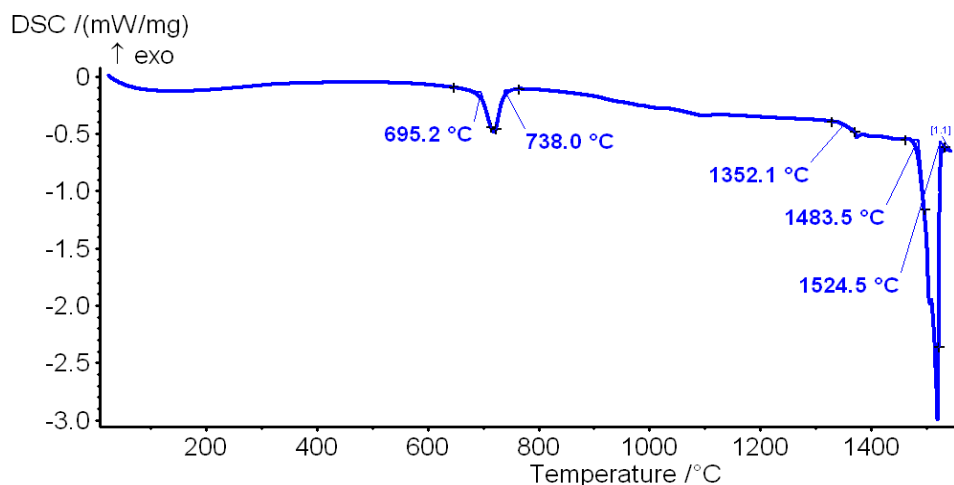
Na sliki 5 je predstavljena ogrevalna krivulja preiskovanega vzorca obloge iz karbidne trdine, ki na površini še vsebuje cono mešanja med jeklom telesa zoba in karbidno oblogo. Pri temperaturi 725.7 °C se začne evtektoidna transformacija ki je nedvomno v zvezi z delom cone mešanja med jeklom in karbidno oblogo. Sicer le ta ni

Tabela 9. Elementarna sestava karbidne obloge (5 - slika 3)

Table 9. The elemental composition of carbide coating (5 - figure 3)

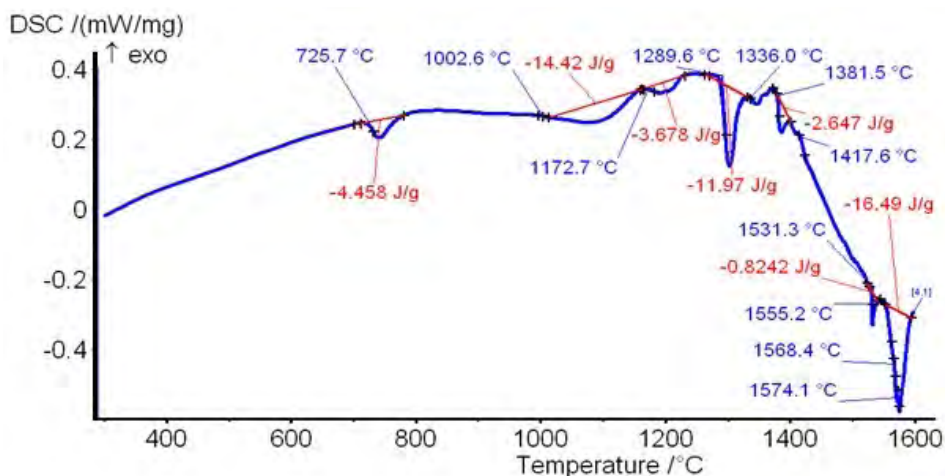
Element / Element	Concentration / Koncentracija	
	at. %	wt. %
Mn	2.503	1.284
Fe	55.166	28.772
Co	2.345	1.291
W	39.986	68.653

The results of simultaneous thermal analysis (STA) (Figure 4) of the steel sample from the body of the roller show that an eutectoid transformation in solid state starts at a temperature of 695.2 °C, which is characterized by an endothermic peak. When this was completed (738 °C), the metal base was transformed into an austenite structure. At a temperature of 1352.1 °C, the low temperature eutectics began to melt into the investigated steel and then, at 1483.5 °C, into the primary



Slika 4. Segrevalna DSC krivulja jekla kotala in telesa zoba

Figure. 4. DSC heating curve of the steel of the roller and body of the bit tooth



Slika 5. Segrevalna DSC krivulja jekla karbidne obloge zoba

Figure 5. DSC heating curve of carbide coating of the bit tooth

značilna za karbidno oblogo. Pri 1002.6 °C se začne raztapljanje elementov iz cone mešanja v kobaltovi osnovi karbidne trdine. Prvo taljenje je registrirano pri 1289.6 °C, zaključí pa se pri temperaturi, ki je višja od 1600 °C.

Dilatometrijska ogrevalna krivulja jekla iz katerega je kotalo in dilatometrijska analiza karbidne obloge je prikazana na sliki 6. Iz meritev je razvidno, da se jeklo pri segrevanju linearno širi do temperatur eutektoidne premene. Naklon krivulje ustreza temperaturno razteznostnemu koeficientu orodnega jekla za delo v hladnem. Nasprotno temu pa krivulja preiskovanega vzorca karbidne trdine, ki vsebuje tanek sloj cone mešanja kaže relativno položnejšo krivuljo. Torej temperaturni razteznostni koeficient karbidne obloge je bistveno manjši. Če pogledamo razliko v področju delovnih temperatur, ki lahko lokalno dosežejo tudi 500 °C, kljub intenzivnemu hlajenju z izplako, je razlika, ki znaša absolutno 0.15 %. Razlika je pomembna, saj ima za posledico močno povečanje notranjih

austenite crystals. The melting process was completed at a temperature of 1524.5 °C.

Figure 5 shows the heating curve of the investigated carbide coating sample, which, on the surface, still contained a mixing zone between the steel of the tooth body and the carbide coating. At a temperature of 725.7 °C, an eutectoid transformation began, which is undoubtedly related to the part of the demisting zone between the steel and the carbide coating. Otherwise, this is not typical for carbide coatings. At 1002.6 °C, the dissolution of the elements from the mixing zone began in the cobalt matrices of the carbide coating. The first melting was registered at 1289.6 °C and was terminated at a temperature of more than 1600 °C.

The dilatometric heating curve of the roller steel and the dilatometric heating curve of the carbide coating is shown in Figure 6. From the measurements, it can be seen that the steel extends linearly to the temperatures of eutectoid transformation during heating. The inclination of the curve corresponds to the linear thermal expansion coefficient of the steel for cold

napetosti predvsem v coni mešanja, ki predstavlja preferentno mesto za iniciacijo in propagacijo razpok. Dilatometrijska krivulja karbidne obloge kaže v področju evtektoidne transformacije tudi odklon, ki je v zvezi z evtektoidno transformacijo tanke plasti na karbidni oblogi, le da so referenčne temperature nekoliko višje. Vzrok za višje temperature je spremenjena kemijska sestava cone mešanja.

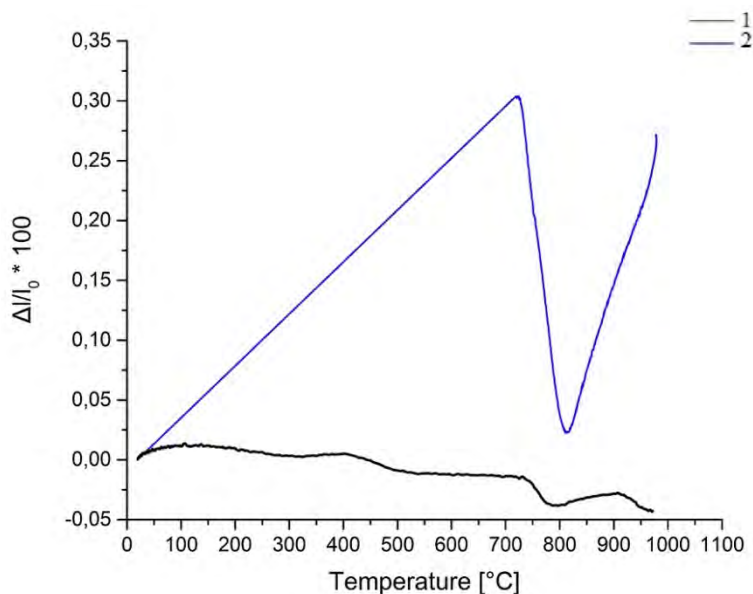
Bile so izvedene tudi meritve mikrotrdot po Vickersu. Iz tabele 10 je razvidno, da ima kotalo nekoliko višje trdote kot zobje, kjer so trdote v povprečju 380.3775 HV in 327.5854 HV. Trdote v karbidni prevleki so pričakovano veliko višje in dosežejo trdoto celo do 2200 HV.

4 Diskusija

Pri izvedbi režima vrtnja lahko ugotovimo, da je bilo kotalno dleto obremenjeno skladno priporočilom proizvajalca kotalnega dleta.

work tool steel. On the contrary, the curve of the investigated sample of carbide coating, which contains a thin layer of the mixing zone, shows a relatively flat curve. Therefore, the temperature expansion coefficient of the carbide coating is considerably lower. If we look at the difference in the zone of working temperatures that can reach a local temperature even at 500°C, despite intense cooling, the absolute difference is 0.15 %. This is important because it results in a strong increase in internal stresses, particularly in the mixing zone, which is the preferred site for the initiation and propagation of cracks. The dilatometric curve of the carbide coating shows a deviation in the field of eutectoid transformation, which is related to the eutectoid transformation of the thin layer of the mixing zone on the carbide coating, except that the reference temperatures are slightly higher. The cause of higher temperatures is the chemical composition of the mixing zone.

We also performed micro hardness tests according to Vickers. In Table 10, it can



Slika 6. Dilatometrijska analiza jekla kotala (telesa zoba) in karbidne prevleke 1 – karbidna obloga, 2 – jeklo telesa zoba

Figure 6. Dilatometric analysis of the steel of the roller and carbide coatings 1 – carbide coating, 2 – tooth steel material

Tabela 10. Rezultati meritev trdote po Vickersu**Table 10.** Vickers hardness test results

d1	d2	HV0,1	
21.97	22.85	369.2692	Kotalo / Roller
21.93	21.89	386.3155	
21.92	22.3	379.3581	
22.26	22.21	375.1048	
21.92	21.59	391.8399	
		380.3775	Povprečje / Average
23.74	23.42	333.5333	Telo zoba / Tooth core
23.74	23.95	326.1611	
23.93	23.62	328.0846	
23.8	23.87	326.4349	
24	23.87	323.7129	
		327.5854	Povprečje / Average
17.65	17.94	585.6402	Karbidna obloga / Carbide coating
9.46	9.41	2083.258	
9.11	9.23	2205.404	
13.24	12.56	1114.416	
16.55	14.98	746.1719	
12.51	11.72	1263.514	
		1482.553	Povprečje / Average

Ko je upadel napredek vrtanja, se je kotalno dleto odstranilo iz vrtine. Izvedel se je vizualni pregled poškodb, ki so privedle do slabšega delovanja dleta. Ugotovilo se je, da so na dletu nastale poškodbe v obliki izrabe materiala zob dleta povsod tam kjer

be seen that the roller has a slightly higher level of hardness than the teeth, where the hardnesses are, on average, 380.3775 HV and 327.5854 HV respectively. The hardness in the carbide coatings were expected to be much higher and reach up to 2200 HV.

4 Discussion

In the implementation of the drilling regime, it can be determined that the drill bit was loaded and rotated in accordance with the recommendations of the manufacturer of the bit.

When the penetration rate started to rapidly decrease, the drill bit was extracted from the well. A visual inspection of the fatigue of the bit, which led to the poorer operation of the bit, was carried out. It was found that the wear on the bit occurred in the form of the loss of tooth materials in places where the teeth were not protected by a carbide coating. Such characteristic wear of the bit is shown in Figure 7.

Figure 7 illustrates the loss of steel material due to the erosion action of the mud, which contained a large proportion of silicate particles (Table 2). The wear was reflected in the reduction of the dimensions of the body of the tooth and the formation of erosion channels at the tip of the tooth. The formation of erosion channels at the top of the tooth can be attributed to the decay of the carbide coating during the drilling process, which allowed the flushing of mud with silicate particles (Table 2) to erode into the newly opened surfaces, as shown in Figure 8.

Due to the considerable differences in the strength and thermal expansion properties between the carbide materials that represents the coating (protection) of the tooth body and the steel material



Slika 7. Karakteristične poškodbe kotalnega dleta

Figure 7. Characteristic wear of roller drill bit

dleto ni bilo zaščiteno s karbidnim ovojem. Karakteristične poškodbe dleta v obliki izrabe materiala so prikazane na sliki 7.

Na sliki 7 lahko opazimo izrabo materiala zaradi erozijskega delovanja navrtanine, ki je vsebovala velik delež silikatnih delcev (tabela 2). Poškodbe se odražajo v zmanjšanju gabaritov telesa zob in v tvorbi erozijskih kanalov na vrhu zob. Tvorbo erozijskih kanalov na vrhu zob lahko pripišemo razpadu karbidne obloge v toku vrtnja, ki je omogočila, da je lahko izplaka z vsebnostjo silikatnih (tabela 2) delcev erozijsko delovala na novo odkrite površine, kot je prikazano na sliki 8.

Zaradi precejšnje razlike v trdnostnih in toplotno razteznostnih lastnostih med karbidnim materialom, ki predstavlja oblogo (zaščito) telesa zoba in jeklenim materialom telesa zoba, je tokom izvajanja vrtnih del, zaradi različnih razteznih oziroma elastičnih materialnih karakteristik, prišlo do tvorjenja razpok med materialoma, kot prikazuje slika



Slika 8. Poenostavljena slika strujenja izplake preko kotal dleta

Figure 8. Simplified sketch of mud flow through the roller of drill bit

of the tooth body and also due to various expansions or elastic material characteristics, cracks formed between the materials as shown at the Figure 9. A consequence of this is the split of the carbide coating from the tooth body. The result of this split between materials was the formation of a new steel surface through which mud containing a large amount of silicate abrasive components flowed. The abrasive components, which eroded the newly opened surfaces at the tips of the teeth, were caused by the formation of erosion channels and consequently the loss of the steel tooth material. The display of the formation of micro cracks resulting from the different elastic properties of the materials is shown in Figure 9. The picture shows the edge of the erosion channel at the top of the tooth. On the left side of the image, we can see a lining of carbide coating and, on the right side, the steel material of the tooth and the formation of a micro crack can be

9, in posledično do odstopanja karbidne obloge. Posledica odstopanja karbidne obloge je bila odprta nova ploskev (erozijski kanal), preko katere je potekalo strujanje izplačnega medija, ki je vseboval veliko količino silikatnih abrazivnih komponent. Abrazivne komponente so erodirale novo odprte ploskve na vrhovih zob in povzročile erozijske kanale in s tem posledično izgubo jeklenega materiala zoba. Prikaz tvorjenja mikro razpok, ki so posledica različnih elastičnih lastnosti materialov je prikazan na sliki 9. Na sliki je prikazan rob erozijskega kanala na vrhu zoba. Na levi strani slike je vidna obloga iz karbidnega materiala, na desni strani slike pa je viden material telesa zoba dleta ter tvorjenje mikro razpok. Ob vrhu zoba so vidni mikro erozijski kanali. Karbidna obloga na vrhu zoba, ki je odpornejša proti obrabi ampak krhka, postopoma razpada pod vplivom obremenitev na dleto v toku vrtnja, ter strižnih sil v kombinaciji z segrevanjem in ohlajanjem zob v toku vrtnja. Ta proces je viden na zgornji levi strani slike 9.

V našem primeru nam ni uspelo nedvomno določiti temperature jekla med vrtnjem. Prepričani smo lahko le, da je bila temperatura na vrhu zob med vrtnjem nižja od temperature prekrizacije jekla dleta. Prekrizacijo lahko določimo s testom trdote po Vickersu skupaj z opazovanjem kristalne strukture jekla z elektronskim mikroskopom. Pri pregledu nismo našli znakov prekrizacije jeklenega materiala. Temperatura prekrizacije jeklenega materiala našega kotalnega dleta je 695.2 °C. To smo ugotovili s toplotno analizo. Zaradi tega lahko z dilatometričnim testom ugotovimo vpliv temperature. S tem poskusom smo ugotovili, da se razlika med materialnimi lastnostmi jekla telesa zob in karbidne obloge izraža pri temperaturi, ki je višja od 100 °C, kot je prikazano na sliki 6. Te temperature so prisotne v

seen. At the top of the tooth, micro erosion channels are visible. The carbide coating at the top of the tooth, which is more resistant to erosion, but fragile, gradually disintegrates due to the effects of pressure (weight on bit) and shear conditions combined with heating and cooling during the drilling process. This process can be seen in the top left side of Figure 9.

In our case, we did not manage to determine the temperature of the steel during the drilling beyond doubt. We can only be sure that the temperature on the top of the teeth, during drilling, was lower than the temperature of the recrystallization of drill bit steel. That recrystallization could be measured by the Vickers hardness test, along with an observation of the crystalline structure of the steel with an electronic microscope. We did not find any signs of recrystallization of steel material. The temperature of the recrystallization of steel material of our drill bit is 695.2 °C. This was determined by simultaneous thermal analysis. Because of this, we could determine the temperature influence by dilatometric test. During this test, we find out that the difference between the material properties of the tooth steel and carbide coating are expressed at a temperature higher than 100 °C as shown in Figure 6. These temperatures are present during the phase when the teeth are in contact with the rock material. During the journey of the tooth around the cone axis, the temperature of tooth steel decreases because of the influence of the mud. If this warming and cooling time is short enough, there is no immediate deviation in the carbide coating, but only in the formation of micro cracks at the contact of the carbide coating and tooth steel. These micro cracks are extended (during this time period) along the contact between the materials, which leads to a deviation of the carbide coating.

fazi, ko so zobje dleta v stiku s hribinskim materialom. Med potovanjem zoba okoli osi kotala se temperatura jekla zob zniža zaradi vpliva izplačnega medija. V kolikor je ta čas segrevanja in ohlajanja dovolj kratek, ne pride do takojšnjega odstopanja karbidne obloge, temveč le do nastanka mikro razpok na stiku karbidne obloge in jekla telesa zob. Te mikro razpoke se v tem časovnem obdobju podaljšajo vzdolž stika med materiali, kar vodi do odstopanja karbidne obloge. Ta pojav je bil zaznan le na vrhu zoba, medtem ko na straneh zob na preiskanem kotalnem dletu ni bilo zaznanega nastanka mikro razpok v karbidni oblogi.

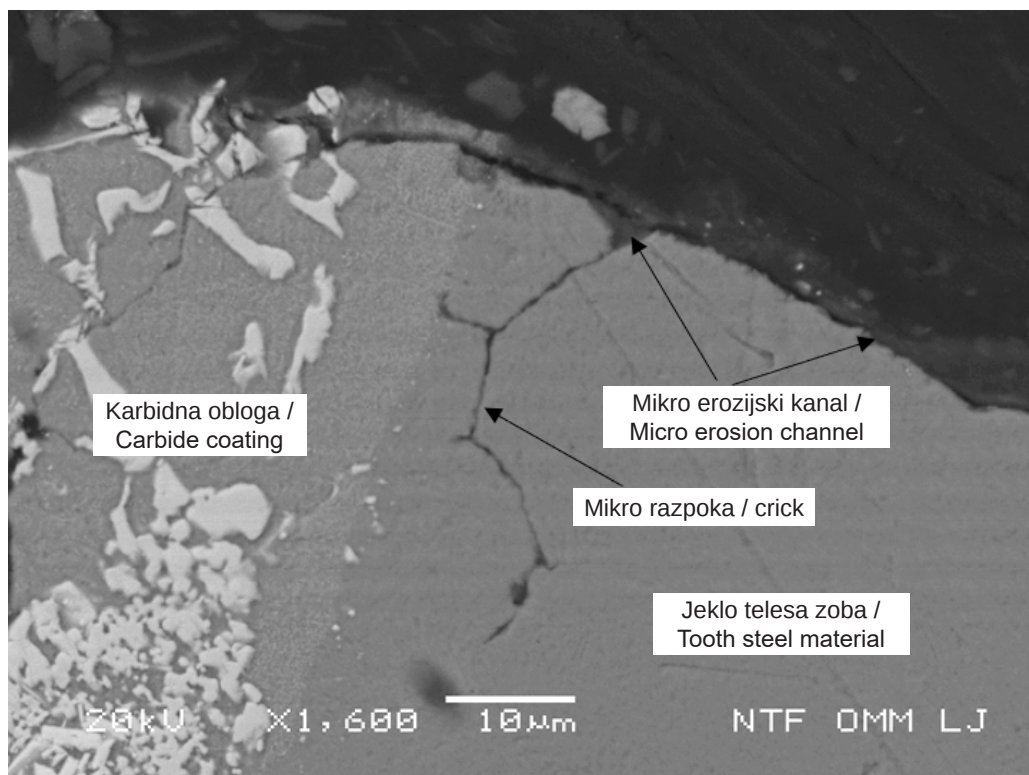
Podobne pojave lahko opazujemo tudi na samem telesu zoba, ki ni v območju

This phenomenon was only observed at the top of the tooth, while on the side of tooth, the formation of micro cracks in the carbide coating was not detected on the investigated drill bit.

Similar phenomena can also be observed on the tooth body itself, which is not in the area of the carbide coating. Figure 10 shows the formation of micro cracks and erosion channels along the edge of the tooth.

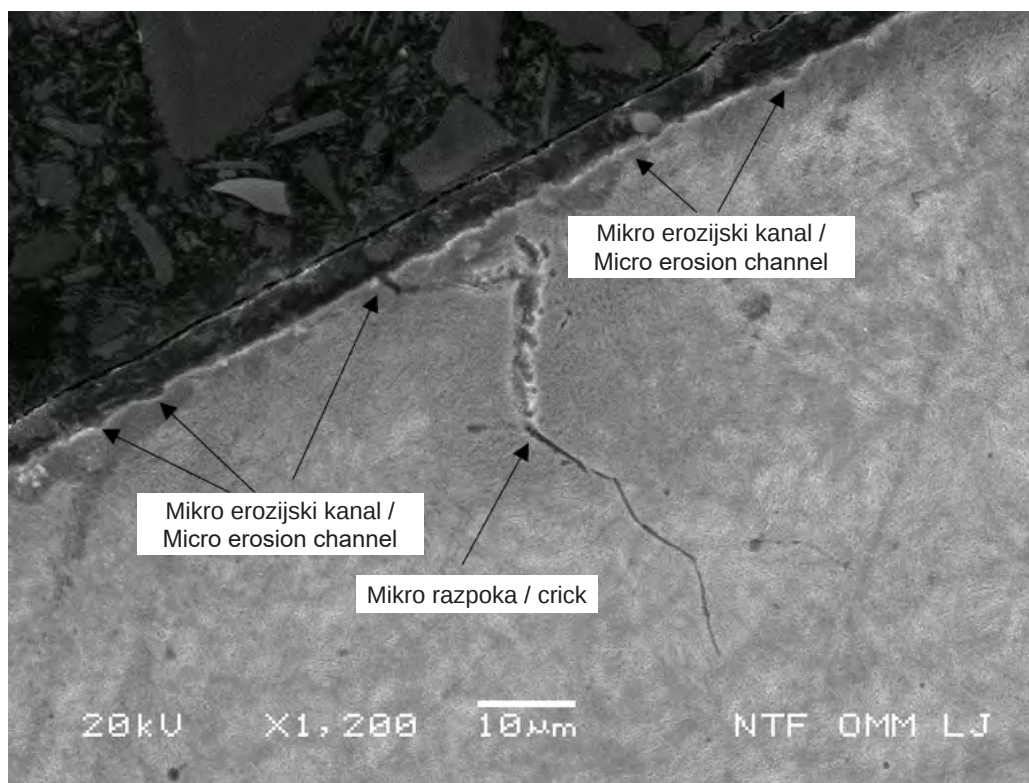
5 Conclusion

The results of our research, which included investigations of rock and steel material, represent the wear investigated in the



Slika 9. Tvorba mikro razpok kot posledica različnih elastičnih lastnosti materialov

Figure 9. The formation of micro cracks as a result of various elastic properties of materials



Slika 10. Mikro razpoka in erozijski kanali

Figure 10. Micro cracks and erosion channels on the tooth body

karbidne obloge. Na sliki 10 lahko opazimo tvorjenje mikro razpok in erozijskih kanalov na robu zoba.

5 Zaključek

Rezultati naših raziskav, ki so vključevale preiskave kamnin in jeklenih materialov, predstavljajo ugotovljeno obrabo kotalnega dleta v peščenjaku. Z opisanimi preiskovalnimi metodami smo odkrili mehanizem obrabe jeklene osnove kot tudi karbidne obloge zob glede na vpliv vrtnja skozi peščenjak, ki vsebuje veliko vsebnost abrazivnih delcev.

roller cone drill bit in sandstone. With the described investigation methods, we discovered the mechanism of wear of the teeth steel basis as well as in the carbide coating according to influence of sandstone which contains a large content of abrasive particles.

The characterization of the wear of the roller drill bit, which is described in our work, is a complex analysis of several factors. On the one hand, the interaction between the rock material and the drill bit is closely connected to the drilling regime. In this case, we dealt with the action of the steel material of the drill bit on the rock material - sandstone. During the drilling process, the drill bit was heated while in contact with the

Karakterizacija obrabe kotalnega dleta, ki je opisana v našem delu, je kompleksna analiza več dejavnikov. Na eni strani nastopa interakcija med hribinskim materialom in dletom, ki je tesno povezana z režimom vrtnja. V tem primeru imamo opravka z stikom materiala dleta na hribinski material. V toku vrtnja se zobovje dleta segreva na stiku s hribinskim materialom in nato ohlaja zaradi vpliva izplačnega medija. V tej fazi prihaja do izražanja deformabilnostnih lastnosti jekla iz katerega je narejeno kotalo dleta in zobovje ter na drugi strani deformabilnostnih lastnosti karbidne obloge. V tem primeru zaradi različnih temperaturnih razteznostnih koeficijentov pojavlja tvorba mikro razpok na jeklenem materialu zoba, ki omogoča prodiranje izplačnega medija, ki vsebuje erozijske mikrodolce, v novo tvorjene razpoke. Karbidna obloga zoba je erozijsko odpornejša vendar krhka, zaradi česar v toku vrtnja, zaradi vplivov tlačnih in strižnih razmer, postopoma odpada.

Med raziskavo smo odkrili, da je obraba jekla zob bolj progresivna kot obraba karbidne obloge. Površine zob, ki niso prekrite s karbidno oblogo, so bolj izpostavljene vplivu erozije. Erozijski učinek predstavlja nastajanje erozijskih kanalov, v katere vteka izplačni medij, ki vsebuje velik odstotek agresivnih delcev. Razpad karbidne prevleke, ki poteka počasneje od obrabe jekla telesa zob, je posledica obremenitev dleta med vrtnjem in temperaturnih razlik, ki se pojavijo med vrtnjem kotal. Zaradi različne stopnje obrabe obeh materialov se spremeni geometrija zob in s tem učinkovitost kotalnega dleta.

Izboljšave odpornosti jekla zoba, ki je v osnovi obravnavanega vzorca, precej žilavo, se ponujajo v površinski obdelavi le tega. Površinska obdelava jekla zoba, v smislu povečanja erozijske odpornosti, se lahko izvede z metalurškimi postopki ali kasnejšo obdelavo površine celotnega zoba pred nanašanjem karbidne obloge.

rock material and then cooled due to the influence of the drilling mud. At this stage, the differences between the deformability properties of the steel material of the rollers and the teeth, and, on the other hand, the deformability properties of the carbide coating become evident. In this case, due to the different temperature expansion coefficients, the formation of micro cracks on the steel material of the tooth causes the penetration of a dispersed medium containing erosion microparticles in the newly created cracks. The carbide coating of the tooth is more resistant to erosion, but fragile, which causes it to gradually disintegrate during the drilling process due to the effects of pressure and shear conditions combined with the heating and cooling.

During our research, we discovered that the wear on the tooth steel is more progressive than the wear on the carbide coating. The surfaces of the teeth, which are not covered with a carbide coating, are more exposed to the influence of erosion. The erosion effect is represented by the formation of erosion channels into which the mud, which contains a large percentage of aggressive particles, flows in. The disintegration of the carbide coating, which is a slower process than the steel wear, is a consequence of the bit load during drilling and the temperature differences, which occur during the roller rotation. Because of the different rate of wear of both materials, the geometry of the teeth changes and, thus, the effectiveness of the drill bit.

The improvement of the resistance of tooth steel, which is rather tough, is offered in the surface treatment of this. The surface treatment of tooth steel, in terms of increased erosion resistance, can be carried out by means of metallurgical processes or the subsequent treatment of the surface of the entire tooth prior to the application of the carbide coating.

V zadnjem času pa se za zaščito pred erozijsko odpornostjo pričanja z eksperimentiranjem z nano materiali, ki že kažejo morebiten novi trend v razvoju erozijske odpornosti materiala kotalnih dlet.

As such, the protection against erosion resistance begins with experiments in nano materials, which already show a potential new trend in the development of erosion resistance in the rollers and tooth material of roller cone drill bits.

Reference / References

- Abbas, R.K., 2018, A review on the wear of oil drill bits (conventional and state of the art approaches for wear reduction and quantification), *Engineering Failure Analysis*, Volume 90, pp. 554 – 584, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.03.026>
- Al-Sudani, J. A., 2017, Real-time monitoring of mechanical specific energy and bit wear using control engineering systems, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Issue 149, pp. 171 – 182, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.10.038>
- Besson, A. & others, 2000, On the cutting edge, *Oilfield Review*, Volume 12, Issue 3, pp. 36 – 57, https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors00/aut00/p36_57.pdf
- Cotler, R.A., Goodman, E.C., Hendrickson, R.R., Leslie, W.C., 1981, Elevated temperature fracture toughness and fatigue testing of steels for geothermal applications, Final report, University of Michigan, p. 140, <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1114108/>
- Geoffroy H., Nguyen Minh D., 1997, Study on interaction between rock and worn PDC's cutter, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Volume 34, Paper No. 095, [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)00036-1](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)00036-1)
- Günen, A., 2016, Micro-Abrasion Wear Behavior of Thermal-Spray-Coated Steel Tooth Drill Bits, *Acta physica Polonica A*, Volume 130, p. 217 – 222, <http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/PDF/130/a130z1p056.pdf>
- He, W., Chen, Y., He, J., Xiong, W., Tang, T., Yang, H.O., 2016, Spherical contact mechanical analysis of roller cone drill bits journal bearing, *Petroleum*, Volume 2, Issue 2, pp. 208 – 214, <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2016.03.002>
- Jones, H.G., Norgren, S.M., Kritikos, M., Mingard, K.P., Gee, M.G., 2017, Examination of wear damage to rock-mining hardmetal drill bits, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Volume 66, p. 1–10, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2017.01.013>
- Karasawa, H., Ohno, T., Miyazaki, K., Eko, A., 2016, Experimental results on the effect of Bit wear on torque response, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Volume 84, p. 1–9, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.01.013>
- Mancini, P., 1996, New mechanisms of rock – bit wear in geothermal wells, 21 workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford University, California USA, January 22 – 24, p. 8, <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc884890/>
- Momeni, S., Moseley, S., Ante, M., Allaart, J., 2017, The wear of WC-Co drill bits during rotary-percussive drilling of reinforced concrete, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Volume 62, pp. 202 – 209, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2016.08.006>

- Naganawa, S., 2012, Feasibility study on roller-cone bit wear detection from axial bit vibration, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 82-83, p. 140–150, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.01.014>
- Neville, A., & Hodgkiess, T., 1999, Characterisation of high-grade alloy behaviour in severe erosion-corrosion conditions, *Wear*, Volume 233–235, p 596–607, [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00220-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00220-3)
- Njobuenwu, D.O., Wobo, C.A., 2007, Effect of drilled solids on drilling rate and performance, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 55, p. 271–276, DOI: 10.1016/j.petrol.2006.08.012
- Olsson, M., Yvell, K., Heinrichs, J., Bengtsson, M., Jacobson, S., 2017, Surface degradation mechanisms of cemented carbide drill buttons in iron ore rock drilling, *Wear*, Volume 388 - 389, pp. 81 – 92, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.03.004>
- Pang, B., Wang, S., Wang, Q., Yang, K., Lu, H., Hassan, M., Jiang, X., 2018, Numerical prediction of cuttings transport behaviour in well drilling using kinetic theory of granular flow, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 161, p. 190 – 203, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.11.028>
- Peter, W., 2010, Wear – resistant nanocomposite stainless steel coating and bits for geothermal drilling, Oak ridge national laboratory, p. 12, https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/02/f7/high_peter_nanocomposite_bits_0.pdf
- Rashidi, B., Hareland, G., Nygaard, R., 2008, Real-Time Drill Bit Wear Prediction by Combining Rock Energy and Drilling Strength Concepts, paper for presentation at the Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE [3rd – 6th November 2008], <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-117109-MS>
- Rashidi, B., Hareland, G., Wu, Z., 2015, Performance, simulation and field application modelling of rollercone bits, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 133, p. 507 – 517, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.06.003>
- Romana, M., 1999, Correlation between uniaxial compressive and point-load (Franklin test) strengths for different rock classes, *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering*, 9th ISRM Congress, 25-28 August, Paris, France, <https://www.onepetro.org/conference-paper/ISRM-9CONGRESS-1999-136>
- Timonin, VV. et al, 2017, Causes of wear of PDC bits and ways of improving their wear resistance, *Conference Series: Earth and Environmental Science* 53, p. 5, <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/53/1/012027>
- Yahiaoui, M., Paris, J.-Y., Delbé, K., Denape, J., Gerbaud, L., Dourfaye, A., 2016, Independent analyses of cutting and friction forces applied on a single polycrystalline diamond compact cutter, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Volume 85, p. 20 – 26, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.03.002>
- Zhao, J., Zhang, G., Xu, Y., Wang, R., Zhou, W., Yang, D., 2018, Experimental and theoretical evaluation of solid particle erosion in an internal flow passage within a drilling bit, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 160, p. 582–596, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.10.068>.

AKTUALNO / CURRENT



Detajl iz vrta kulturnega centra Georgios

Poročilo o 61. IFC Portorož 2021 (Prvi del)

Društvo livarjev Slovenije je skupaj s soorganizatorjema Univerzo v Ljubljani in Univerzo v Mariboru tudi letos organiziralo že 61. IFC – Mednarodno livarsko konferenco v Portorožu z motom »Inovativne rešitve za prihodnost livarstva«. S tem nadaljujemo že 61-letno tradicijo Portoroža kot stičišča livarske znanosti in stroke. Letošnje konference se je udeležilo skupaj 240 udeležencev iz kar 19 držav. Na konferenci je bilo predstavljenih 43 predavanj in 5 plakatnih predstavitev. V skupnem delu za vse udeležence prvega dne je bilo na konferenci predstavljenih 10 plenarnih predavanj, drugega dne pa so bila predavanja razdeljena v štiri sekcije: Sekcijo A – Lito železo in livarske tehnologije (skupaj 10 predavanj); Sekcijo B – Neželezne zlitine (skupaj 10 predavanj); Sekcijo C – Tehnika in tehnologija za livarstvo (skupaj 8

predavanj); ter Sekcijo D – Mladi študenti-doktoranti (skupaj 5 predavanj). Vsi udeleženci konference in razstave so ob registraciji prejeli Zbornik izvlečkov predavanj v tiskani obliki in širše predstavitev predavanj v digitalni obliki na USB-ključku.

Na predvečer pričetka konference in razstave je bilo na vrtu Kulturnega centra Georgios ob cerkvi Sv. Jurija v Piranu organizirano tradicionalno pozdravno-spoznavno srečanje vseh udeležencev. Vse prisotne je v imenu organizatorjev pozdravila predsednica Organizacijskega odbora mag. Mirjam Jan-Blažič in že tradicionalno tudi predstavnik županstva Občine Piran. To pot je bil to podžupan Robert Fakin.

Konferenco je naslednji dan v imenu organizatorjev s pozdravnim nagovorom otvorila predsednica Društva livarjev Slovenije mag. Mirjam Jan-Blažič.

Predsednik Programskega odbora konference ter glavni in odgovorni



Podžupan Občine Piran, Robert Fakin s predsednico Mirjam Jan-Blažič, na levi strani



Pogled na plenarno dvorano

urednik Livarskega vestnika Em. Prof. dr. Alojz Križman je skupaj z organizatorji konference ocenil, da lahko kakovostno in celovito strokovno poročilo o predstavljenih predavanjih s tega osrednjega livarskega dogodka Društva livarjev Slovenije zagotovimo samo, če ga pripravimo v dveh delih. Prvi del tako objavljamo v tej številki Livarskega vestnika in vključuje povzetke vseh desetih plenarnih predavanj ter večino splošnih informacij v zvezi s dogodkom, na koncu pa tudi slikovno predstavitev vseh razstavljalcev na livarski razstavi. V drugem delu, ki bo pripravljen za 4. letošnjo številko Livarskega vestnika, bomo predstavili povzetke ostalih predavanj po sekcijah in pa zaključno oceno o dogodku.

V nadaljevanju predstavljamo povzetke plenarnih predavanj, ki so bila podana prvi dan konference.



Otvoritev konference in razstave, predsednica mag. Mirjam Jan-Blažič

1. F.W. LOHE, T. van de SAND, CAEF - Evropsko livarsko združenje (D): »Vedrite nevihte, ampak še ne v varnem zavetju-zakaj livarska industrija še vedno pluje po razburkanem morju«.

Vpogled v različne livarske sektorje razkriva velike razlike v proizvodnji in naročilih kot tudi usmeritve kazalnika gospodarske klime. Strojni sektor in letalski promet sta zaradi napovedanih naročil in omejitev potovanj v letu 2020 doživela močan pretres, so livarne kot dobavitelji doživele manjši upad. Gospodarske napovedi za leto 2021 napovedujejo naraščanje naročil v vseh panogah. Delež avtomobilov in tovornih vozil, ki globalno predstavlja več kot 50% prihodov livarske industrije, se bo v veliki meri preusmeril v smeri električne mobilnosti. Tudi za livarsko industrijo je zelo pomembno, da se načrtuje preusmeritev v proizvodnjo, shranjevanje in prenos obnovljivih virov energije, kar bo oblikovalo industrijsko okolje v prihodnosti. Evropska komisija sooblikuje ta razvoj na osnovi kot je zeleni dogovor, trajnostna strategija in program »Pripravljeni na 55« (Fit for 55, Zmanjšanje emisij do leta 2030 za 55%, CBAM (Ogljična prilagoditev) in CCfD(pogodbe za razliko na ogljik). Livarne so podjetja, ki razumejo krožno gospodarstvo in verjetno s tem ne bodo imele težav. Za celotno industrijo pomenijo ti ukrepi velik izziv in seveda zahtevne naloge prilagajanja.



Dr. Fynn-Willem Lohe, CAEF (D)



Tillman van de Sand, CAEF (D)

2. E. KOPPENSTEINER¹, M. BRAIT¹, G. SCHINDELBACHER¹, P. SCHUMACHER^{1,2}, ¹Avstrijski raziskovalni inštitut za livarstvo (A), ²Katedra za livarsko raziskovanje, Univerza za montanistiko, Leoben (A): »Hitra izdelava prototipov z uporabo inovativnih metod z namenom optimiziranja ulitkov v enem tednu«.

Litje kot postopek popolnoma sovпада z izdelavo komponent z geometrijami, ki so optimizirane za pretok sil (primer lahkih gradenj). Novi 3-D tiskalnik peska v Avstrijskem livarskem inštitutu (ÖGI) je idealen za hitro izdelavo ulitkov kompleksnih geometrij, ki jih je sicer mogoče z običajnimi postopki oblikovanja izdelati le s težavo. V predstavljenem primeru je bila



Prof. dr. Peter Schumacher, ÖGI Leoben (A)

trdnostne lastnosti. Preizkušanje materiala in dodelava sta nato potekali v naslednjih dveh dneh. Omogočeno je bilo za ca. 35% zmanjšanje teže ulitka in usmerjeno vplivanje na trdnostne lastnosti. Ugotovljeno je bilo, da je mogoče s kombiniranjem teh inovativnih orodij v enem tednu izdelati optimizirane ulitke, ki omogočajo inovativne rešitve, kar je prihodnost livarske industrije.



Em. Prof. dr. Alojz Križman, Univerza v Mariboru (SI)-predsednik Programskega odbora IFC in avtor plenarnega predavanja

litini 9%. Proizvodnji ulitkov iz sive litine in temprane litine sta ostali na isti ravni, proizvodnja ulitkov iz bakrovih zlitin je bila za 14 % višja. Podatki proizvodnje ulitkov v zelo neugodnem

varjena jeklena konstrukcija namenjena kmetijstvu v enem tednu zamenjana s topološko optimiziranim ulitkom. Geometrijski podatki konstrukcije so bili digitalizirani v CAD sistem. Izvedene so bile osnovne raziskave z FEM računom in samo preskušanje komponent. Na osnovi osnovnih raziskav je bila optimizirana topologija. Naslednji korak je bil priprava tehnologije litja in podatkov za 3d-tiskanje peska. Že po 3 delovnih dneh je bilo mogoče litje v 3-D forme. Z zračnim hlajenjem 3D-tiskanih form je bilo mogoče usmerjeno vplivati na lokalne

3. A. KRIŽMAN^{1,3}, P. MRVAR^{2,3}, M. JAN-BLAŽIČ³, ¹ Univerza v Mariboru (SI), ²Univerza v Ljubljani, ³Društvo livarjev Slovenije: «Znanje in inovativne usmeritve-prihodnost slovenskega livarstva».

Slovensko livarstvo je v letu 2020 kljub pandemiji Covid-19 v primerjavi z letom 2019 v količinski proizvodnji zaostalo le za 12 %. Celoten obseg proizvodnje je bil skupno 172.840 ton proizvedenih ulitkov. Največji padec je bil pri jekleni litini in granulatu 30%, pri cinkovih zlitinah je znašal padec 23 %, pri Al-zlitinah 18% in pri duktilni sivi

času so rezultat dveh bistvenih prednosti, ki so se uveljavile v tej veji industrije: hitra prilagodljivost in stalno generiranje lastnega znanja in veščin, kar omogoča tudi vključevanje v širše poslovne sisteme in verige. Prikazana sta dva primera izdelave ulitkov, ki izhajata iz znanja in večletnih strokovnih izkušenj: Mariborska livarna Maribor s primerom ulitka ohišja avtomobilskega pogonskega sklopa SP PTU Gen 3 iz zlitine AlSi9Cu3, kjer se je izmet, ki je pri prejšnjem tujem proizvajalcu znašal kar 30% , z razvitim novim livnim sistemom v Mariborski livarni zmanjšal na 2%. Podjetje ETA Cerkno, ki je v sestavi velike svetovne korporacije E.G.O. in je največji svetovni proizvajalec grelnih plošč iz sive litine, pa je z računalniško podprto spremembo livnega sistema ter natančnimi meritvami koeficientov prenosa toplote izvedla korekcijo napajalnega sistema in optimizacijo samega postopka ter s tem izboljšala storilnost in zanesljivost izdelave ulitkov.

4. D. LEHMUS¹, C. PILLE¹, D. BORCHECK¹, F. BUMBU², T. SCHWEGLER², J. LEE³, P. LUTZE⁴, K. WEISS⁵, R. VOMHOF⁵, ¹Fraunhofer IFAM (D), ²Schaufler Tooling GmbH & CO, ³MH Technologies (KOR), ⁴ae group AG (D), ⁵RWP GmbH (D): »Nova generacija tlačno ulitih komponent ohišij brez puščanja za aplikacije E-mobilnosti«

Rezultati projekta CoolCast dokazujejo izvedljivost in predvsem predvidljivost tehnologije ZLeak Tube, kar pomeni, da omogočajo ciljno uporabo te nove rešitve za izvedbo kanalov za prenašanje medija iz aluminijevskih cevi in votlih odsekov v tlačno litih komponentah. To odpira obetavne nove vidike za proizvodnjo ključnih komponent električnih pogonskih sklopov, ki predvidevajo natančno upravljanje temperature. Simulacije izveden



Dr. Ing. Dirk Lehmus, Fraunhofer IFAM (D)

s programsko opremo Win Cast ® avtorja RWP, so bile kvalificirane in uporabljene za pridobivanje informacij na področjih, kjer meritve niso mogoče. Temperature, napetosti in deformacije so izredno natančne, natančnost je v primerjavi z meritvami v območju 3%. V primeru konstrukcij z nizko maso je pomembno, da stabilnost cevi znotraj omejitev ni signifikantno odvisna od debeline stene. Obstajajo seveda nadaljnje možnosti za optimizacijo v smislu termične povezave hladilnih kanalov z ulitkom.

5. M. CHISAMERA, E. STEFAN, I. RIPOSAN, S. STAN, Politechnica University of Bucharest (RO): »Novosti o grafitnih kaleh v komercialnih sivih litinah«.

Za počasnejše eutektično strjevanje s podohlajanjem sta potrebna dva bistvena ukrepa: a) zagotavljanje mikrooksidov, primernih za nukleacijo spojin MnS in b) zagotavljanje prehoda iz preproste spojine MnS v kompleksno spojino (MnX)S, kar zagotavlja zmožnost

nukleacije grafita. Obstajajo že novi raziskovalni programi (0,035 % S, 4,0 % CE), ki se osredotočajo na odsotnost legiranja in različne recepture legirnih elementov. Rezultati novih raziskovalnih programov potrjujejo vlogo kompleksnih spojin (MnX)S na ravni mikronov (1 do 10 μ), z vidnim jedrom ali brez njega, ki predstavlja izvor oksida (0,1 do 3 μ), kar je glavna kal. Identificirani so bili dolgi nizi elementov, kot so: O, S, Mn, Si, Al, Zr, Ca, Ba, La, Mg. Za spojine (MnX)S z vidnim jedrom na osnovi



Prof. dr. Iulian Riposan, University of Bucharest (RO)

oksida ali brez njega so značilna različna razmerja vrednosti Mn/S na preseku. Kisik se nahaja pretežno v mikro spojini, ki nastane prva in predstavlja jedro delca (MnX)S, kot tudi na fazni meji sulfid-grafit[tanka plast (na nano ravni) elementov, ki tvorijo okside]. Predpostavlja se, da prisotnost te plasti povečuje zmožnost spojin (MnX)S za nukleacijo grafita [boljša kristalografska združljivost (heksagonalni sistem, kot npr. za grafit, v primerjavi s kubičnim sistemom, ki je tipičen za sulfid)].

6. I. VASKOVA, P. DELIMANOVA, M. HRUBOVŠČAKOVA, Tehniška univerza Košice (SK): »Stanje in perspektive livarna na Slovaškem«.

Livarne oskrbujejo vse sektorje sodobne industrije, med drugim avtomobilsko, letalsko, vesoljsko, petrokemično, medicinsko, elektroenergetsko, obrambno in pomorsko. Pravzaprav so od litja odvisni vsi vidiki sodobnega življenja, pa naj gre za zavorne kotle ali pa medicinske implantate, ladijske motorje ali lopatice turbin za letala. Litje je nujno potrebno v avtomobilski industriji in sicer zaradi široke palete ulitkov, ki se uporabljajo v proizvodnji osebnih in tovornih vozil. Lite komponente se uporabljajo ne samo za motorje,



Prof. dr. Iveta Vaskova, Technical University of Košice (SK)

šasije, pogone, temveč tudi za karoserije. Na Slovaškem ima proizvodnja ulitkov bogato tradicijo. Razmere v livarski industriji na Slovaškem so podobne trendom v Evropi, vendar obstajajo manjše razlike. Dandanes upad proizvodnje osebnih in tovornih vozil močno vpliva na svetovno proizvodnjo ulitkov. Leta 2020 se je zgodil najizrazitejši upad svetovne gospodarske proizvodnje po koncu druge svetovne vojne. Medtem, ko je bilo na začetku leta 2020 pričakovati razmeroma običajno povečanje svetovne trgovine in globalnega bruto domačega proizvoda (BDP), je izbruh pandemije Covid-19 na Kitajskem v začetku leta 2020 poskrbel ravno za nasprotno učinke.



Dr. Ing. Vladimír Krutiš, Brno University of Technology (CZ)

7. V. KRUTIŠ¹, V. KANA¹, A. ZADERA¹, L. TOMEK², J. SEDLAČEK², ¹Institute of Manufacturing Technology, Brno University of Technology (CZ), ²LANIK s.r.o., Boskovice (CZ): »Ocena lastnosti keramičnih jeder pri precizijskem litju«.

Prispevek obravnava lastnosti keramičnih jeder, ki so ključne v povezavi z izpostavljenostjo toploti v sistemu kovina-jedro-lupina. Preizkušena so bila keramična jedra z dvema različnima recepturama na

osnovi taljenega silicijevega dioksida in ocenjene osnovne lastnosti. Prvi del je namenjen opisu kemijske in fazne sestave uporabljenih keramičnih zmesi ter njihovih sprememb po izpostavljenosti temperaturi 1.550°C. Endotermni in eksotermni procesi med termično obremenitvijo jeder so ovrednoteni z analizami DTA. Velik del opravljenih meritev se osredotoča na termofizikalne podatke, ki so nujna podlaga, za numerične simulacije sistema, vključno z oceno koeficienta toplotnega raztezanja, ki je pomemben za izračun dimenzijskih sprememb in deformacij jedra. Zaradi določanja sprememb mehanskih lastnosti v odvisnosti od temperature so bile izvedene meritve modulu do razpada (MOR), ki so bile nato primerjane in ovrednotene za obe recepturi. S simulacijskim programom ProCAST so določili pogoje izpostavljenosti toploti in analizirali temperaturne gradientne ter porazdelitev znotraj nadzorovanega sistema. Izmerjene podatke so uporabili za določitev simulacijskega modela.

8. H. AVDUŠINOVIĆ¹, A. GIGOVIĆ - GEGKIĆ¹, N. ČAIPIČEVIĆ², ¹Univerza v Zenici (BIH), ²Univerza v Splitu (CRO): Vpliv povišanih temperatur na mikrostrukturo, mehanske lastnosti in korozijske lastnosti austemprane sive litine s kroglastim grafitom

Austemprana siva litina (ADI) že spada v razred toplotno obdelanega nodularnega železa. ADI ima dobro natezno trdnost, odpornost proti obrabi ter žilavost v kombinaciji



Prof. dr. Hasan Avdušinović, University of Zenica

nasičenega avstenita različno vplivala na preskušene lastnosti obdelanih vzorcev ADI. Vzorci ADI obdelani v temperaturnem območju med 450 in 550°C so imeli najvišje vrednosti natezne trdnosti in trdote. Razgradnja začetne avsfertne mikrostrukture je negativno vplivala na splošno korozijsko vedenje preskušanih vzorcev.

z dobro duktilnostjo. Mikrostruktura ADI je sestavljena iz igličastega ferita, z ogljikom nasičenega zadržanega avstenita in grafitnih nodulov, razpršenih in vdelanih v kovinsko matriko. V prispevku je predstavljen vpliv povišane temperature na razgradnjo mikrostrukture, mehanske lastnosti in splošno korozijsko vedenje vzorcev ADI. Raziskave so bile izvedene v temperaturnem območju med 250 in 700 °C. Za preizkušanje obdelanega materiala so bile uporabljene različne tehnike, kot so optična in vrstična elektronska mikroskopija, dilatometer, diferencialna termična analiza (DTA), preizkušanje mehanskih lastnosti, splošno korozijsko preizkušanje in drugo. Dognano je bilo, da se je transformacija avsfertne mikrostrukture (razgradnja z ogljikom nasičenega avstenita) začela v temperaturnem območju nad 450°C. Glede na rezultate preiskav je razgradnja z ogljikom



Vlastimir Kolda, MECAS ESI s.r.o. (CZ)

9. V. KOLDA, Mecas ESI (CZ): Pametno orodje za tlačno litje – prihodnost kakovosti ulitkov in kontrola utrujenosti orodja

Med številnimi dejavniki vpliva na življenjsko dobo orodja za tlačno litje od številnih dejavnikov pomembno vpliva tudi toplotno ravnovesje orodja. Tlačna orodja morajo imeti življenjsko dobo več deset, do več sto tisoč proizvodnih ciklov. Običajne vrste obrabe teh orodij, ki zmanjšujejo njihovo življenjsko dobo so: toplotna utrujenost, obraba

zaradi erozije, reakcije med kovino in orodjem (spajanje matrice) in korozijska obraba. Ta prispevek obravnava predvsem toplotno utrujenost, ki je eden glavnih vzrokov okvar

posameznih delov orodja za tlačno litje. Med postopkom litja je matrica izpostavljena cikličnim toplotnim obremenitvam, kar vodi v prelome zaradi utrujenosti na izpostavljenih delih orodja. Na to vplivajo predvsem: potek temperaturnega cikla med postopkom litja, izbira materiala in njegova obdelava ter pravilna konstrukcija orodja. Numerične simulacije se danes uporabljajo praktično izključno za oblikovanje ulivnega in prezračevalnega sistema. Z zasnovo matrice se ne ukvarjajo z vidika trpežnosti. Podan prispevek predstavlja projekt z nazivom »SMARTDIE«, s katerim strokovnjaki za tehnologijo HPDC in simulacijo postopkov litja, skušajo razviti novo vrsto visokotlačnega orodja, ki na podlagi predhodne simulacije celotnega postopka litja določi najboljša mesta tlačnega orodja z vidika življenjske dobe v povezavi z utrujanjem orodja. Ta mesta bodo proučevana z merilno opremo, ki bo omogočila negovanje orodja in podaljšanje življenjske dobe. Namen pa je tudi napovedovanje življenjske dobe orodja na podlagi podatkov zbranih med dejansko proizvodnjo.

10. P. MRVAR¹, D. MITROVIĆ², M. PETRIČ¹, S. KASTELIC¹, M. TERČELJ¹, ¹Univerza v Ljubljani, NTF-OMM (SI), ²SIJ (SI): Analiza poškodb sive litine s kroglastim grafitom zaradi ulivanja aluminijeve zlitine.

V prispevku je opisan razvoj izboljšanega kompleta za transport staljenih Al-zliti narejen iz sive litine s kroglastim in vermikularnim grafitom-SI-Mo za aplikacijo pri tlačnem litju (HPDC). Razvit, izdelan in preizkušen je bil nov material na osnovi sive litine s kroglastim

grafitom, dodano legirane s SI in MO. Analiza poškodb kompletov hladne komore je bila opravljena ob koncu življenjske dobe livarskega kompleta. V zaporedju karakterizacije je bilo ugotovljeno, da je raziskana siva litina (SGI-SiMo) v primerjavi s tradicionalnimi orodnimi jekli, ki se za te aplikacije uporabljajo, izboljšala toplotno prevodnost in ima sprejemljive mehanske lastnosti. Opravljena je bila študija napredovanja mehanskih napak, ki je bila tudi natančno opisana in pojasnjena. Opažen je nastanek razpok na ostro izoblikovanih delih grafita in zmanjšanje trdnosti na mejah zrn ter napredovanje teh posebej blizu vstopa Al-zlitine. To lahko pripišemo naravi utrujanja s toplotnimi in mehanskimi obremenitvami kot posledice medsebojnih učinkov toplotnih napetosti na površini ter različnih toplotno razteznostnih koeficientov med delci grafita in matričnim materialom ter pojavu koncentracije napetosti na ostro izoblikovanih delcih grafita. Predstavljen je bil tudi nov lasten test za določanje toplotne utrujenosti in metodologija poškodb preiskane zlitine SGI – SiMo.



Prof. dr. Primož Mrvar, Univerza v Ljubljani (SI)

AKTUALNO / CURRENT

V okviru prvega dela poročila o 61. IFC Portorož 2021 v nadaljevanju predstavljamo udeležence livarske razstave oz. njihove razstavne prostore, kot jih je s svojim fotografskim aparatom zabeležil fotograf Božidar Šumić iz Portoroža.

Galerija slik vseh sponzorjev razstavljalcev na 61. IFC Portorož 2021



ALU-ONTO Ltd, (HU)



CARL ZEISS d.o.o., (SI)



EDC Protection SA, (F)



ELKEM ASA, (NO)



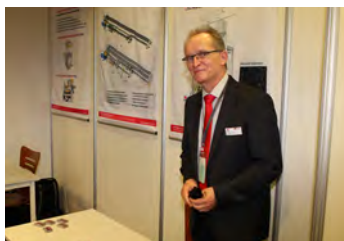
EXOTERM-IT d.o.o., (SI)



FEAL-INŽENIRING d.o.o., (SI)



HAGI GmbH, (A)



HEINRICH WAGNER SINTO GmbH,
(D)



INDUCTOTHERM Europe Ltd., (UK)



KOSMEK Europe GmbH, (A)



LABTIM d.o.o., (SI)



MAZZON, (IT)



MEC Ind Srl, (IT)



OTTO JUNKER GmbH, (D)



PRIMAKEM d.o.o., (SI)



PSR d.o.o., (SI)



SIAPRO d.o.o., (SI)



STEM d.o.o. (SI)



RWP GmbH., (D)



TC Livarstvo d.o.o. + MECAS ESI s.r.o.,
(SI / CZ)



TERMIT d.d., (SI)



VOLUME GRAPHICS GmbH (D)



WEILER ABRASIVES d.o.o., (SI)

Galerija slik vseh razstavljalcev na 61. IFC Portorož 2021



ABRASIV MUTA d.o.o., (SI)



AVL List, (A)



BENTOPRODUCT d.o.o., (BIH)



BL Metal Bogdan Lovšin s.p., (SI)



Commerce Trgovina d.o.o. (SI)



EKW-KREMEN d.o.o., (SI)



FAPROSID Srl (IT)



IDEF d.o.o., (CRO)



INSTRO d.o.o., (SI)



IRT 3000, (SI)



LIVING d.o.o., (SI)

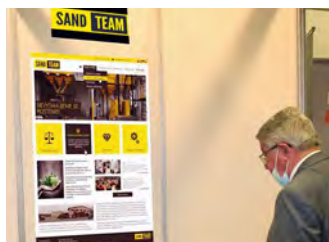
MAHLE Electric Drives Komen d.o.o.,
(SI)



Naravoslovno Tehnična Fakulteta, (SI)



NOVACAST SYSTEMS AB, (SE)



Sand Team, spol.s.r.o. (CZ)



Strokovna literatura Livarski vestnik (SI)



TCT Tesci GmbH, (D)

Poročilo pripravila:

Predsednik Programskega odbora konference
Em. Prof. dr. Alojz Križman

Predsednica Organizacijskega odbora konference
Mag. Mirjam Jan-Blažič

AKTUALNO / CURRENT

Pregled livarskih prireditev v letih 2021 in 2022

Datum dogodka	Ime dogodka	Mesto in država
27. - 28.10.2021	VDI-Fachtagung »Gießtechnik im Motorenbau« 2021	Magdeburg, Nemčija
10. - 11.11.2021	7. Meister - forum Giesserei 2021	Leipzig, Nemčija
11.11.2021	Gussfehler in Leichtmetallguss-Bauteilen analysieren und richtig bewerten	Nußloch, Nemčija
02. - 03.12.2021	Formstoffbedingte Gussfehler	Düsseldorf, Nemčija
07.12.2021	Eigenschaften und Schmelztechnik der Aluminium-Gusswerkstoffe	Düsseldorf, Nemčija
07. - 08.12.2021	Prozessoptimierung in Gießereien	Bad Dürkheim, Nemčija
09. - 10.12.2021	Metallurgisch bedingte Gussfehler in Eisengusswerkstoffen	Düsseldorf, Nemčija
18. - 20.01.2022	EUROGUSS	Nuernberg, Nemčija

Pokrovitelji 61. IFC Portorož 2021**SREBRNI POKROVITELJ****LTH Castings****SREBRNI POKROVITELJ****BRONASTI POKROVITELJ****BRONASTI POKROVITELJ****BRONASTI POKROVITELJ**



DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE

Vabilo za

62. IFC PORTOROŽ 2022

z livarsko razstavo

14. - 16. SEPTEMBER 2022

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

- High and Stable Quality
- Professional Technical Support
- On-time Delivery

ISO 9001:2015

ISO 14001:2015

ISO 45001:2018



BENTOPRODUCT Ltd. is a regional leader in the processing and supply of high-quality bentonite binders



BENTOPRO-A

High-quality bentonite binders



BENTOPROCARBO

High-quality bentonite binders with lustrous carbon formers



Bulevar Vojvode Stepe Stepanovića 181c
78000 Banja Luka, BiH



+ 387 51 225 214



www.bentoproduct.ba



+ 387 51 225 212



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** 



TERMIT



Družba TERMIT je rudarsko podjetje
za pridobivanje kremenovih peskov

NAŠ PROGRAM:

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

www.termit.si