

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: probatu@triera.net

Tehnično urejanje / Technical editing:

mag. Mirjam Jan-Blažić

Uredniški odbor / Editorial board:

prof. dr. Alojz Križman, Univerza v Mariboru
prof. dr. Primož Mrvar, Univerza v Ljubljani
prof. dr. Jožef Medved, Univerza v Ljubljani
doc. dr. Gorazd Lojen, Univerza v Mariboru
prof. dr. Andreas Bührig-Polaczek, Giesserei
Institut RWTH Aachen
prof. dr. Peter Schumacher, Montanuniversität
Leoben
prof. dr. Reinhard Döpp, TU Clausthal
prof. dr. Jozef Suchy, AGH Krakov
prof. dr. Jaromir Roučka, Institut Brno
prof. dr. Branko Bauer, Univerza v Zagrebu
dr. Milan Lampič, Fritz Winter, Stadtallendorf

Prevod v angleški jezik / Translation into English:

Marvelingua, Aljaž Seničar s.p.

Lektorji / Lectors:

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

Tisk / Print:

Fleks d.o.o.

Naklada / Circulation:

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

Letna naročnina: 35 EUR z DDV

Year subscription: 35 EUR (included PP)

Dano v tisk: junij 2017



Calderys Deutschland, GmbH
Büro Austria
IZ Nö-Süd, Straße 16, Objekt 69
A-2355 Wiener Neudorf
SI-5000 Nova Gorica

T: +43 2236 677090 + DW
F: +43 2236 677093 - 11
E: austria@calderys.com
<http://www.calderys.at>

VSEBINA / CONTENTS

Stran / Page:

- Bernhard J. Stauder, Hubert Kerber, Peter Schumacher: **Ocena jeder iz peska v livarski industriji s 3-točkovnim upogibnim testom / Foundry sand core property assessment by 3-point bending test evaluation** 66
- Franck Gigez: **Inovacije na področju vakuumskega litja / Innovations in Vacuum Die Casting** 91
- Jožef Medved, Primož Mrvar, Janko Čevka, Maja Vončina, Dominik Jagodic: **Določanje toplotnih lastnosti eksotermno - izolacijskih materialov / Determination of thermal properties of exothermic-insulating materials** 102
- U. Klančnik, M. Drobne, I. Kogovšek, J. Mastnak, P. Fajfar, P. Mrvar, J. Medved: **Visoko in nizko legirana indefinitna železova litina: vpliv na mehanske lastnosti in mikrostrukturo / High and low alloyed indefinite chill cast iron: impact on mechanical and microstructural properties** 111

AKTUALNO / CURRENT

61. Avstrijsko livarsko posvetovanje 124
- Razgovor z direktorico Kovis-Livarna d.o.o., Jerico Vranc dipl. ing. 128
- Program / Programme: 57. Mednarodno livarsko posvetovanje Portorož 2017 / 57th International Foundry Conference Portorož 2017 134

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

Bernhard J. Stauder¹, Hubert Kerber², Peter Schumacher³,

¹ Nemak Linz GmbH; A-4030 Linz, Austria / Austrija

² Austrian Foundry Research Institute ÖGI / Avstrijski livarski raziskovalni inš.; A-8700 Leoben, Austria / Austrija

³ Montanuniversität Leoben, Chair of Casting Research, / Univerza v Leobnu, Oddelek za raziskave litja; A-8700 Leoben, Austria / Austrija

Ocena jeder iz peska v livarski industriji s 3-točkovnim upogibnim testom

Foundry sand core property assessment by 3-point bending test evaluation

Povzetek

Izboljšano razumevanje lastnosti jeder iz peska v livarski industriji je ključna zahteva za razvoj visoko natančnih postopkov ulivanja. Ta članek opisuje potencial ocene mehanskih in funkcionalnih lastnosti jeder iz peska z uporabo natančno pridobljenih krivulj podatkov iz 3-točkovnega upogibnega testa ob upoštevanju standardnih geometrij za upogibne preizkuse.

Preučili smo štiri sisteme organskih vezivnih sredstev. Poleg upogibne trdnosti in modula elastičnosti, ki izhajata neposredno iz krivulj obremenitve, je bila za odpravo učinkov usedanja vzorca krivulja obremenitve predobdelana za potrebe pravilne analize odklona in togosti. Porabljeno mehansko delo je razdeljeno na značilne elastične in plastične deleže dela do zloma, ki so ob upoštevanju zadevnih pogojev specifični za različna peščena jedra. Na podlagi krivulje in parametrov dela so bili razviti indikatorji brez dimenzij za namene kvantifikacije krhkosti jeder.

Na splošno je treba z vidika mehanske ocene peščenih jeder z umetnimi vezivi pretehtati viskoplastične učinke; pri sistemih vezivnih sredstev, ki niso popolnoma strjena, se zniža trdnost, zato so bili odklon in delo zloma opaženi pri nižjih hitrostih obremenitve.

Primerjalna analiza rezultatov je pokazala, da je koncept krivulje obremenitve primerno orodje za natančnejšo analizo lastnosti peščenih jeder.

Ključne besede: ulitek; preizkušanje peščenih jeder; ocena krivulje obremenitve; delo zloma; deformacija jedra; nadzor kakovosti.

Abstract

Improved understanding of foundry sand core properties is a key requirement for high precision casting process development. The present work demonstrates the potential to evaluate mechanical and functional sand core properties using precisely acquired 3-point bending test load curve data applying standard bending test geometries.

Four organic binder systems have been investigated. Further to bending strength and the elastic modulus, which can be directly derived from the load curves, a load curve pre-treatment to eliminate sample settlement effects was applied for a correct deflection and stiffness analysis. The consumed mechanical work shows characteristic elastic and plastic work portions until fracture, which are specific for different sand cores, respectively their condition. Dimensionless indicators to quantify core brittleness have been developed based on curve and on work parameters.

In general for mechanical evaluations of resin bonded sand cores, visco-plastic effects need to be considered, as for not fully hardened binder systems decreased strength, deflection and work of fracture were observed at lower load speeds.

The benchmark results show that the load curve evaluation concept is a suitable tool to analyse foundry sand core properties more sensitively.

Keywords: casting; sand core testing; load curve evaluation; work of fracture; core deformation; quality control

1 Uvod

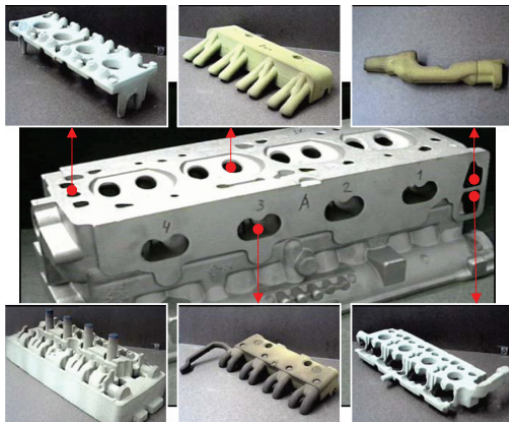
Izdelava kovinskih ulitkov z uporabo peščenih jeder omogoča produkcijo velikih serij kompleksnih komponent z internimi geometrijami. Primer takšnih komponent so glave valjev in bloki motorjev na notranje izgorevanje. Sliki 1 je prikazan ulitek glave valja iz aluminija ter potrebna peščena jedra za izdelavo notranjih površin, na Sliki 2 pa je prikazan sestavljen komplet peščenih jeder pred ulivanjem.

Vpliv tehnologije, materialov in procesnih parametrov na dimenzijsko

1 Introduction

Metal casting using sand cores allows to produce complex components with internal geometries in high volumes. Examples therefore are combustion engine cylinder heads and blocks. Figure 1 shows a cylinder head cast from Al and the required sand cores for the internal surfaces, while in Figure 2 a preassembled sand core package is shown prior to casting.

The influence of technology, materials and process parameters on dimensional accuracy of near-net-shaped castings has been systematically compiled by (Campbell, 2000). The foundry industry is forced to steadily improve process capabilities to



Slika 1: Prikaz ulitka zmerno kompleksne glave avtomobilskega valja iz aluminija ter potrebnih peščenih jeder za oblikovanje notranjosti (Sobczyk, 2008).

Figure 1: Illustration of a medium complexity car cylinder head in cast Al and the required sand cores to shape its cavities (Sobczyk, 2008).



Slika 2: Komplet peščenih jeder za kompleksno glavo valja, izdelan s procesom Rotacast (Gosch in Stika, 2005).

Figure 2: Sand core package for an intricately shaped cylinder head prepared for casting by the Rotacast process (Gosch and Stika, 2005).

natančnost kompleksnih strojnih delov je sistematično pregledal Cambell (Campbell, 2000). Livarska industrija je prisiljena v stalne izboljšave postopkov z namenom proizvodnje lahkih ulitkov s tankimi stenami, ki morajo prav tako ustrezati vedno strožjim zahtevam zakonodaje glede izpustov v okolje (Lellig in sod., 2010). V nadaljevanju je poudarjen pomen razvoja tehnologije peščenih jeder.

1.1 Tehnologija peščenih jeder v livarstvu in njen razvoj

Razvoj novih sistemov vezivnih sredstev, npr. kemično spajanje peščenih jeder, je temeljito raziskal Bindernagel (Bindernagel, 1983). Celovita zbirka o jedrih iz peska in sistemih vezivnih sredstev sta pripravila Flemming in Tilch (Flemming in Tilch, 1993). Mehanske lastnosti peščenih jeder so opisane predvsem s kvalitativnega vidika, podanih pa ni nobenih zakonov, povezanih z lastnostmi materialov.

V livarnah za avtomobilsko industrijo se za proizvodnjo jeder najpogosteje uporabljajo organski postopki Coldbox, Warmbox in Hotbox. Opise procesov so podali Langer, Dunnivant in Brown (Langer in Dunnivant, 2011) ter (Brown, 2010). Trenutno poteka postopek zamenjave organskih vezivnih sredstev z anorganskimi, pri katerih se tvori manj vonjav. Vendar pa je treba zaradi drugačnih lastnosti takšnih novih vezivnih sredstev dodatno pozornost nameniti kontroli procesov (Weissenbek in sod., 2011). Nedavno je Czerwinski s sodelavci (Czerwinski in sod., 2015) pripravil pregled najnovejše tehnologije jeder v livarski industriji v povezavi z več najpomembnejšimi organskimi in anorganskimi sistemi vezivnih sredstev, ki se uporabljajo v različnih livarskih panogah.

facilitate light-weight, respectively thin-walled castings, to contribute to ever tightening emission legislation requirements (Lellig et al., 2010). The importance of sand core technology development is highlighted there.

1.1 Foundry sand core technology and developments

The development of new binder systems, such as chemically bond sand cores was intensively characterized by (Bindernagel, 1983). A comprehensive collection about sand and binder systems was given by (Flemming and Tilch, 1993). Mechanical properties of sand cores are mainly qualitatively described and no property related material laws are proposed.

In automotive foundries the most widely applied core manufacturing processes are the organic Coldbox, Warmbox, and Hotbox core production processes. Process descriptions are given by (Langer and Dunnivant, 2011) and (Brown, 2010). Currently a substitution process of organic by inorganic binders having less odour development is ongoing. However, because of different properties, process relationships for such new binder types require increased attention on the process control (Weissenbek et al., 2011). Recently (Czerwinski et al., 2015) reviewed the state of the art of foundry core technology for several relevant organic and inorganic binder systems used in various foundry applications.

Summarized, fundamental requirements into sand core properties are:

- Sufficient strength to allow handling and manipulation operations;
- High resistance against humidity during core storage.
- High erosion and penetration resistance

Spodaj so povzete nujno potrebne glavne lastnosti peščenih jeder:

- zadostna trdnost, ki omogoča rokovanje in manipulacijo,
- visoka odpornost proti vlagi med skladiščenjem jedra,
- visoka odpornost proti eroziji in penetraciji ter odsotnost kemičnih reakcij z lito kovino zagotavlja dobro kakovost površine ulitka,
- nizka stopnja nastajanja plina in visoka stopnja prehajanja plinov, kar preprečuje napake,
- visoka upogibna trdnost: upogibanje je najpomembnejša vrsta obremenitve peščenih jeder med ulivanjem. Nastaja lahko zaradi sil stiskanja, termalne obremenitve, upora zaradi pretoka in obremenitev zaradi vzgona.
- enostavno otresanje po ulivanju, ki zagotavlja ulitke brez peska,
- primernost uporabljenega livarskega peska za regeneracijo,
- okolju prijazen sistem jeder, pri katerem ne nastaja veliko vonjav.

1.2 Raziskave peščenih jeder pod toplotnimi obremenitvami

Na splošno na voljo ni prav veliko literature o vedenju peščenih jeder med ulivanjem. V nadaljevanju je podanih nekaj primerov raziskav peščenih jeder za livarsko industrijo pod realističnimi obremenitvami skupaj z uporabljenimi tipi podatkov za modeliranje.

Deformacijo jedra za ulivanje kompleksne glave valja je preučil Dong s sodelavci (Dong in sod., 2010). Pri tem so uporabili podatke iz upogibnih testov in validacije z uporabo čašastega jedra za poskusno ulivanje. Predvideti je mogoče kritične regije ulitka kot posledico upogibanja jedra. Motoyama s sodelavci (Motoyama in sod., 2013) je raziskal zaostalo napetost

and no chemical interaction with the cast metal to deliver a good casting surface quality.

- Low gas evolution and high gas permeability to avoid casting defects.
- High bending strength: bending is the most critical load type for sand cores under casting conditions. It can be imposed by clamping forces, thermal load, flow drag and buoyancy loads.
- Easy shake-out after casting to obtain sand-free cast parts.
- A good recycling ability of used foundry sand.
- Environmentally friendly core systems with low odour development.

1.2 Research on sand cores under thermal load

Generally only little research on sand core behaviour under casting conditions can be found in literature. Some examples of foundry sand core investigations under realistic loading conditions and the applied types of modelling data are given here.

Deformation of a complex cylinder head water-jacket core has been studied by (Dong et al., 2010). Their used material data were based upon bending tests and upon validations using a cup type core for casting trials. Critical regions in the casting due to core bending could be predicted. (Motoyama et al., 2013) investigated residual stresses of castings influenced by counter forces from furanic moulds applying specifically developed in-situ measurement of the transmitted loads. The material properties for modelling were obtained by compressive tests.

(Stachowicz et al., 2011) have described cohesive and adhesive fracture mechanisms of inorganically bonded cores. Even sand grain cracking was observed,

ulitkov, na katere v nasprotni smeri delujejo sile furanskih kalupov, posebej razvitih za meritve prenesenih obremenitev *in situ*. Lastnosti materialov za modeliranje so pridobili iz tlačnih testov.

Stachowicz s sodelavci (Stachowicz in sod., 2011) je opisal kohezivne in adhezivne mehanizme lomov za jedra, izdelana z uporabo anorganskih vezivnih sredstev. Opazili so celo lomljenje peščenih zrn, vendar ne pri termalnih obremenitvah pod 1100 °C. Z upogibnimi testi pri visokih temperaturah je lastnosti novih škrobnih vezivnih sredstev za livarsko industrijo opisal Zhou (Zhou in sod., 2009). Poročali so o poškodbah peščenih jeder zaradi pokanja in razslojevanja vezivnega sredstva.

1.3 Preizkušanje peščenih jeder in drugih zrnatih materialov z vezivnimi sredstvi

Sledi diskusija o preizkusnih metodah za peščena jedra v livarski industriji in druge relevantne vrste materialov, za katere je značilna nizka stopnja plastične deformacije.

V livarski industriji so bili standardi preizkušanja peščenih jeder uvedeni sredi prejšnjega stoletja, kot potrjujejo tudi zapisi Društva livarjev Združenih držav Amerike (American Foundrymen's Society – AFS) - (Dietert, 1950). Upogibni testi so najpogostejše uporabljena metoda nadzora kakovosti zapeščenajedra v livarski industriji, opisuje pa jih standard AFS (AFS, 1962) ter podobno tudi nemški standard (VDG, 1999). Noben ne predvideva pridobitve krivulje obremenitve, odklon snopa pa je mogoče določiti ročno. Hitrost obremenitve ni kvantificirana, vendar mora biti kljub temu konstantna ter delovati postopno. Upogibna trdnost se iz maksimalne obremenitve

but not below a thermal load of 1100 °C. High temperature bending tests to describe the properties of a novel starch binder for foundries were performed by (Zhou et al., 2009). They observed sand core damage through binder cracking and delamination.

1.3 Testing of sand cores and other bonded granular materials

Testing methods for foundry sand cores and other relevant material types with low plastic deformation will be discussed in the following.

Within the foundry industry the standards of sand core testing have been established in the middle of the last century, as documented by American Foundrymen's Society – AFS - (Dietert, 1950). Bending tests are the most widely applied quality control for foundry sand cores, described by AFS (AFS, 1962) and similarly by the German standard (VDG, 1999). In both, no load curve acquisition is required and the beam deflection can be manually driven. The loading velocity is not quantified, but should be constant and smoothly applied. The bending strength is calculated from the maximum load based upon linear elastic continuum mechanical relations.

To enable sand core deformation studies additional information from load-deflection curves is required. (Kerber et al., 2014) reviewed the conventional testing methods and standards for foundry sand cores. They demonstrated the improvement potentials by applying modern testing technology with precise load-displacement acquisition. A load velocity of 5 mm/min has been determined to achieve comparable conditions to existing bending test practice.

(Ratke and Brück, 2006) analysed load displacement curves from bending and compression tests to investigate the

izračuna na podlagi mehanskih razmerij linearnega elastičnega kontinuuma.

Za nadaljnje študije na področju deformacije peščenih jeder so potrebne dodatne informacije iz krivulj obremenitve in odklona. Kerber s sodelavci (Kerber in sod., 2014) je pripravil pregled preizkusnih metod in standardov za peščena jedra v livarski industriji. Dokazali so potencial izboljšav skozi uporabo moderne tehnologije preizkušanja s pridobitvijo natančne krivulje obremenitve in raztezka. Hitrost obremenitve 5 mm/min je bila določena za doseganje primerljivih pogojev z obstoječo prakso na področju upogibnih testov.

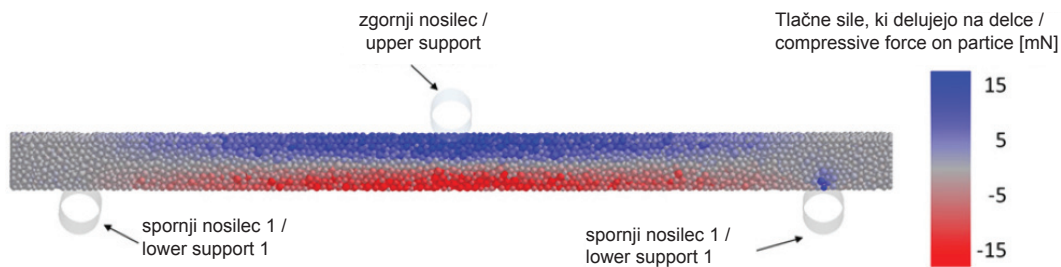
Ratke in Brück (Ratke in Brück, 2006) sta analizirala krivulje obremenitve in raztezka z upogibnimi ter tlačnimi testi z namenom raziskave vpliva zrnivosti in vsebnosti vezivnih sredstev na kompozite iz kremenčevega peska, spojene z aerogelom. Thole in Beckermann (Thole in Beckermann, 2009) sta na podlagi standardov za tritočkovne upogibne teste, značilne za preizkušanje kovin, raziskala deformacijo fenolno-uretanskih jeder, ki se strjujejo sama in jih ni treba žgati. Izmerila sta module elastičnosti blizu vrednosti 4 Gpa pri proizvedenih vzorcih ter približno 1 Gpa po izpostavljenosti termičnemu sevanju.

Schacht in Hayes (Schacht, 2004, pogl. Schacht in Hayes, Lastnosti materialov silika-opek) sta opisala krivuljo obremenitve za tlačne teste ognjevarnih silika-opek. Razmerje med maksimalnih smernim koeficientom tangente in sekante od ničle do točke maksimalne obremenitve je predstavljeno kot primerno merilo za opisovanje plastičnosti. Bradt (Schacht, 2004, pogl. Bradt, Fracture of Refractories) je opozoril na omejitve uporabe linearne mehanike kontinuuma za zrnaste materiale z vezivnimi sredstvi, ki imajo plastične lastnosti. Izboljšave je prikazal Wolf (Wolf in sod., 2013), in sicer na podlagi modela

influence of granulometry and binder content on silica-Aerogel bond composites. (Thole and Beckermann, 2009) researched the deformation of phenolic-urethane no-bake self-setting cores applying three-point bending test standards from metal testing. Elastic moduli close to 4 GPa in the as-produced samples and about 1 GPa after thermal exposure were determined.

(Schacht, 2004, chap. Schacht&Hayes, Silica brick material properties) described the load-displacement curve evaluation for compression tests on refractory silica bricks. The relation between the maximum slope tangent and the secant from zero to the maximum load point was presented as a suitable criteria to describe plasticity. (Schacht, 2004, chap. Bradt, Fracture of Refractories) pointed out the limitation of using linear continuum mechanics for bonded granular materials when having plasticity. Improvements were shown by (Wolff et al., 2013), applying "Discrete Element Method (DEM)" – simulations for a ceramic-polymer composite material under different bending test conditions. For small loads they have shown that visco-elastic effects could be neglected for the used acrylic binder. Moreover, initial settling against the load points are important and must be considered. They illustrated the performance of DEM simulations to investigate bonded particle compounds. A three-point bending DEM-setup is shown in Figure 3.

Tarokh and Fakhimi, 2014) compared measured and simulated bending test curves of siltstones. A satisfyingly good agreement was given identifying the initial deformation of the physical specimen. That early portion of the curve was influenced by closure of the space between the specimen and the loading platen and furthermore a postulated closure of micro-cracks in the specimen.



Slika 3: Natezne in tlačne sile, ki delujejo na delce med 3-točkovnim upogibnim testom (Wolff in sod., 2013).

Figure 3: Tensile and compressive forces on particles during 3-point bending (Wolff et al., 2013).

diskretnih elementov »Discrete Element Method (DEM)« – simulacije za keramično-polimerne kompozite pod različnimi pogoji upogibnih testov. Dokazali so, da je mogoče v primeru uporabljenih akrilnih vezivnih sredstev viskoelastične učinke zanemariti. Prav tako je treba upoštevati začetno usedanje na točke obremenitve. Dokazali so učinkovitost simulacij DEM za preučevanje spojin iz delcev. Na Sliki 3 je prikazan tritočkovni test DEM.

Tarokh in Fakhimi (Tarokh in Fakhimi, 2014) sta primerjala izmerjene in simulirane rezultate krivulj upogibnih testov za skril. Pri identifikaciji začetne deformacije fizičnega vzorca sta zabeležila izredno veliko stopnjo ujemanja. Na začetni del krivulje vpliva zapora prostora med vzorcem ter bremenom ter dodatno še predvidene zapore mikrorazpok v vzorcu.

Na podlagi krivulj obremenitve je mogoče analizirati tudi delo, dovedeno v vzorec. Rice (Rice, 1968) je za opisovanje plastičnosti vrha razpoke predstavil metodo »J-integral«. To načelo je v tem članku upoštevano. Namen je kvantificirati delo, ki ga dovede preizkusni stroj, ter oceniti elastično in plastično komponento dela.

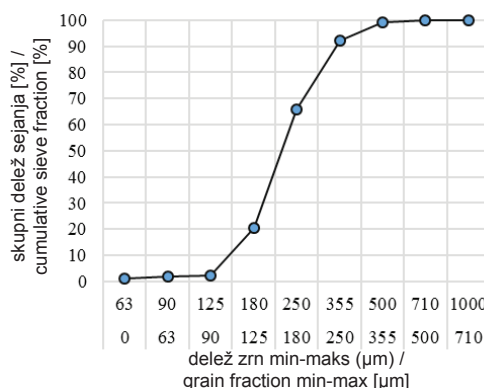
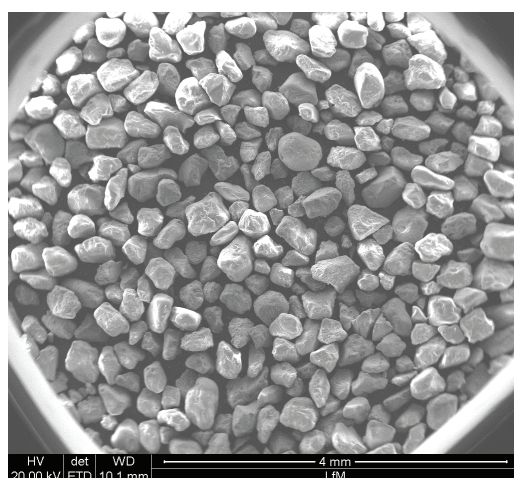
Further to load curves, the introduced work into the sample can be analysed also. (Rice, 1968) presented the "J-integral"-method to describe crack tip plasticity. An adoption of that principle will be used in this work. The goal is to quantify the introduced work from the testing machine and evaluate the elastic and plastic work portions.

2 Experimental methods

2.1 Used Materials

The sand used for all samples was silica sand "H32" according to the technical datasheet (Quarzwerke, 2009), being a widely used reference for binder testing purposes. Figure 4 shows its grain morphology and the grain size distribution.

Experiments are based upon one sand type and four different organic binder additions ranging from 1.2 – 1.9 wt.%. Table 1 defines the used binder systems and the hardening parameters, which are similar to typical serial applications used for Al-castings.



Slika 4: Morfologija peščenih zrn uporabljenega kremenčevega peska H32 in izhajajoče sejalne analize

Figure 4: Sand grain morphology of the used H32 silica sand and the according sieve analysis

2. Preizkusne metode

2.1 Uporabljeni materiali

Za izdelavo vzorcev je bil uporabljen pesek »H32« glede na podatke na podatkovnem listu (Quarzwerte, 2009), ki se kot referenca pogosto uporablja za namene preizkušanja vezivnih sredstev. Slika 4 prikazuje morfologijo peščenih zrn ter porazdelitev velikosti zrn.

Preizkusi so osnovani na eni vrsti peska in štirih različnih vezivnih sredstev v različnih količinah med 1,2 in 1,9 % teže jedra. V Preglednici 1 so opredeljeni uporabljeni sistemi vezivnih sredstev ter parametri strjevanja, ki so podobni tipičnim uporabam v serijski proizvodnji ulitkov iz aluminija.

2.2 Proizvodnja vzorcev

Mešanica peska in vezivnega sredstva je bila pripravljena v 5-kilogramskih serijah z laboratorijskim mešalnikom, nato pa je bila

2.2 Sample production

The sand-binder mixtures were prepared in 5 kg batches using a laboratory stir mixer and then immediately used for core production. A conventional 5 l core blowing machine (Roeper H5) and a core box for three test bars per shot according to (VDG, 1974) were used. The effectively obtained test bar dimensions were 22,7 x 22,7 x 180 mm³. The samples were stored and tested in standard room conditions with 30 – 50 % relative humidity.

Bending tests were conducted after storage times of 0, 1h, 4h and 24 h. The storage times were chosen as they are representative for high volume engine casting production. The "0 h"-condition describes the handling strength of the sand cores, which is important for their first manipulation after the core production. Testing was performed 5 min after core production. The results after 1h and 24 h represent the core properties at the

Preglednica 1: Uporabljena vezivna sredstva za poskuse ter glavne parametre strjevanja.

Table 1: Used binder systems for the experiments and main hardening parameters.

Sistem vezivnih sredstev / Binder System	Mešalna razmerja / Mixture ratios	Parametri strjevanja / Hardening parameters
Cold-box (CB)	Raztopina fenolne smole in izocianata v razmerju 1:1. Dimetiletilamin (DMEA) / Phenolic resin and isocyanate solution in 1:1 ratio. Di-Methyl-Ethyl-Amine (DMEA)	Naplinjenje s hlapi DMEA / DMEA vapour gassing 15 s
Hot-box (HB)	Fenol formaldehidna smola in vodna raztopina amonijevega nitrata v razmerju 5:1. / Phenol formaldehyde resin and aqueous ammonium nitrate solution in 5:1 ratio.	Segreto orodje / Heated tool: 220 °C / 30 s
Warm-box type 1 (WB1)	Furanska smola in vodna raztopina fenolne-sulfonske kisline, njenih aluminijevih soli in žveplene kisline v razmerju 5,5:1. / Furanic resin and aqueous phenol-sulfonic acid solution, its Al-salts and sulphuric acid in 5.5:1 ratio.	Segreto orodje / Heated tool: 220 °C / 30 s
Warm-box type 2 (WB2)	Modificirana sečnina in furanska smola ter vodna raztopina fenolne-sulfonske kisline in njenih aluminijevih soli v razmerju 4:1. / Modified urea-furanic resin and aqueous phenol-sulfonic acid solution and its Al-salts in 4:1 ratio.	Segreto orodje / Heated tool: 220 °C / 30 s

nemudoma uporabljena za izdelavo jeder. Uporabljen je bil običajen stroj za vpihovanje jeder s prostornino 5 l (Roepel H5) ter jedrniki za tri preizkusne plošče na vpih skladno z VDG (VDG, 1974). Dimenzije proizvedene preizkusne plošče so merile 22,7 x 22,7 x 180 mm³. Vzorci so bili skladiščeni in preizkušeni pri običajnih sobnih pogojih ter 30–50 % relativne vlažnosti.

Upogibni testi so bili izvedeni po 0, 1, 4 in 24 urah. Takšni časi skladiščenja so bili izbrani, ker so reprezentativni za serijsko proizvodnjo ulitkov motorjev. Pogoj »0 ur« opisuje trdnost med rokovanjem peščenih jeder, ki je ključna z vidika prve manipulacije z jedrom po njegovi izdelavi. Testiranje je bilo izvedeno 5 minut po proizvodnji jedra. Rezultati po 1 uri in po 24 urah predstavljajo lastnosti jeder ob začetku ter ob koncu običajnega zaključka uporabe jedra, kot je v praksi v livarstvu.

Povprečne vrednosti in standardni odkloni so določeni z vsaj tremi vzorci.

beginning and end of a typical core usage in foundry practice.

Mean values and standard deviations were determined for a minimum of three samples.

2.3 Three-Point-Bending-Tests

The bending tests were performed on a 5 kN universal testing machine (Zwick_Roell, 2015) with a precise load-displacement measurement. A load velocity of 5 mm/min and a data acquisition rate of 10 Hz were set for the benchmarking.

The lower support distance l is 150 mm and the cross section side length a is 22.7 mm. The bending stress calculation from the measured load F [N] according to continuum mechanics is shown by Equation 1.

$$\sigma = F - \frac{3l}{2a^3} \quad (1)$$

2.3 Tritočkovni upogibni testi

Upogibni testi so bili izvedeni na univerzalni napravi za preizkušanje 5 kN (Zwick in Roell, 2015), ki omogoča natančno merjenje obremenitve in raztezka. Za primerjalno analizo sta uporabila hitrost obremenitve 5 mm/min in frekvenco pridobivanja podatkov 10 Hz.

Razdalja med spodnjima nosilcema l meri 150 mm, prerez nosilca pa a 22,7 mm. Izračun upogibne napetosti iz izmerjene obremenitve F [N] skladno z mehaniko kontinuuma prikazuje Enačbo 1.

$$\sigma = F - \frac{3l}{2a^3} \quad (1)$$

Tritočkovni upogibni test vzorcev na nosilcih naprave skladno s standardi testiranja VDG je prikazan na Sliki 5.

3 Rezultati

Razdelek z rezultati je strukturiran tako, da prikazuje novo pridobljene podatke ter izhajajočo metodo za ocenjevanje, ki se uporabi za ocenitev krhkosti vzorca.

A three-point bending test sample put on the machine supports according to the VDG-testing standard is shown in Figure 5.

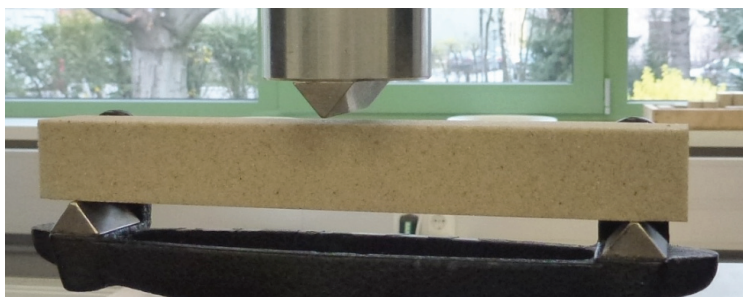
3 Results

The result section is structured to show the novel data acquisition and the subsequent evaluation method leading to evaluation of the sample brittleness. A final sequence will show the influence of load velocity on the properties.

3.1 Data acquisition and bending strength evaluation

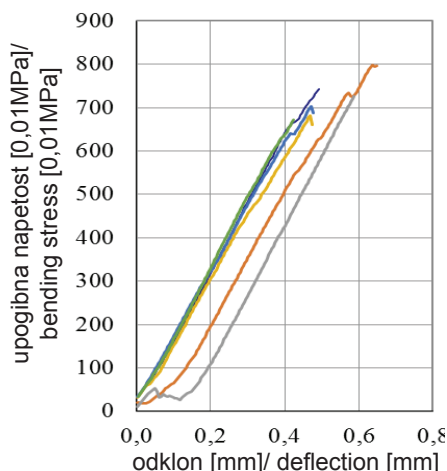
A typical example of acquired load curves is shown in Figure 6 (WB1 binder system after 4h storage time). The acquired bending strength results are visualized for all tested conditions in Figure 7.

The different curve onsets in Figure 6 are caused by settlement effects at the start of loading. However, the inclining curve shape is similar for all tested samples, and highly linear. Some irregularities due to the granular nature of the sand cores



Slika 5: Vzorec pečena jedra za livarsko industrijo med upogibnim testom. Premer zgornjega nosilnega dela treh nosilcev meri 3 mm skladno s standardi Društva livarjev Nemčije.

Figure 5: Foundry sand core sample at bending test. The three supports are line supports with a top radius of 3mm according to the German Foundrymen's Standards



Slika 6: Neobdelana obremenitev v visoki ločljivosti – krivulje odklonov. Jedro z vezivnim sredstvom WB1 preizkušeno po 4 urah skladiščenja

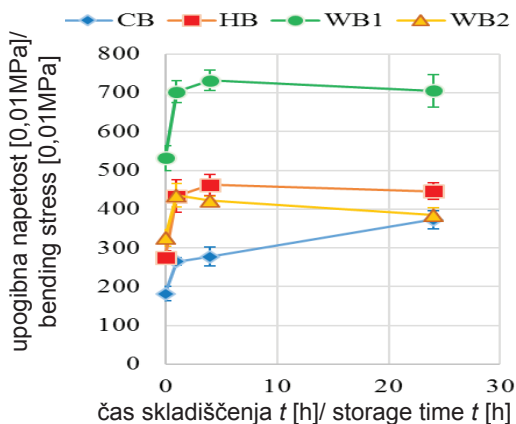
Figure 6: Untreated high resolution stress – deflection curves. Core binder WB1 tested after 4 h storage time

Končno zaporedje prikazuje vpliv hitrosti obremenitve na lastnosti.

3.1 Pridobivanje podatkov in ocena upogibne trdnosti

Tipičen primeru pridobljene krivulje obremenitve je prikazan na Sliki 6 (sistem vezivnih sredstev WB1 po 4 urah skladiščenja). Pridobljeni rezultati upogibne trdnosti za vse preizkušene pogoje so prikazani na Sliki 7.

Različni začetni deli krivulj s Slike 6 so posledica učinkov usedanja ob začetku obremenitve. Vendar pa je nagnjena in visoko linearna krivulja značilna za vse preizkušene vzorce. Opaziti je mogoče nekaj nepravilnosti, ki so posledica zrnivosti peščenih jeder. Do zloma vzorca pride spontano, ko je dosežena maksimalna trdnost.



Slika 7: Rezultati upogibne trdnosti za vsa preizkušena jedra v odvisnosti od časa skladiščenja

Figure 7: Bending strength results for all tested cores over storage time

can be observed. Sample fracture occurs spontaneously after reaching the maximum strength.

From Figure 7 it can be seen, that HB- and WB-cores reach their maximum bending strength at 1 to 4 h. After 24 h of storage, the bending strength of WB1- and HB-cores is decreased by about 3 %, and for WB2-cores more significant, by 12 %. The effect is generally associated to humidity take-up after the samples are cooled down, leading to softened bonds.

In contrast to that, CB cores show much lower bending strength but a continuous increase over time due to ongoing polymerisation. However, after 24 h the strength of CB cores is only similar to that of WB2. A summary of the bending strength results is presented by Table 2, including absolute and relative standard deviations.

The typical standard deviation is 6 % of the bending strength. Testing 10 samples for CB and HB-cores at the 24 h storage condition could confirm this typical scatter.

Preglednica 2: Povprečne vrednosti upogibne trdnosti in standardni odklon**Table 2:** Bending strength average values and standard deviation

t [h]	CB			HB			WB1			WB2		
	σ_B [0,01 MPa]	s [MPa]	s/ σ_B [%]	σ_B [0,01 MPa]	s [MPa]	s/ σ_B [%]	σ_B [0,01 MPa]	s [MPa]	s/ σ_B [%]	σ_B [0,01 MPa]	s [MPa]	s/ σ_B [%]
0	182	18,9	10	275	16,5	6	532	32,6	6	326	22,3	7
1	265	9,7	4	434	41,6	10	703	27,7	4	435	30,6	7
4	278	24,2	9	462	27,6	6	732	25,4	3	421	12,0	3
24	372	22,6	6	446	21,7	5	705	42,1	6	385	17,9	5

S Slike 7 je razvidno, da jedra HB in WB dosežejo svojo najvišjo upogibno trdnost pri 1 do 4 urah. Po 24 urah skladiščenja se je upogibna trdnost WB1-jeder in HB-jeder zmanjšala za pribl. 3 %, upogibna trdnost WB-2 jeder pa se je zmanjšala bolj znatno, in sicer za 12 %. Učinek se v glavnem povezuje z povečanjem vlage po ohlaiditvi vzorcev, posledica česar so manj trdne vezi.

Nasprotno pa so CB-jedra izkazala mnogo nižjo upogibno trdnost, ki pa se je zaradi potekajoče polimerizacije večala v odvisnosti od časa. Kljub temu je bila trdnost CB-jeder po 24 urah podobna zgolj trdnosti WB2-jeder. Povzetek rezultatov upogibnih trdnosti je predstavljen v Preglednici 2, vključno z absolutnimi in relativnimi standardnimi odkloni.

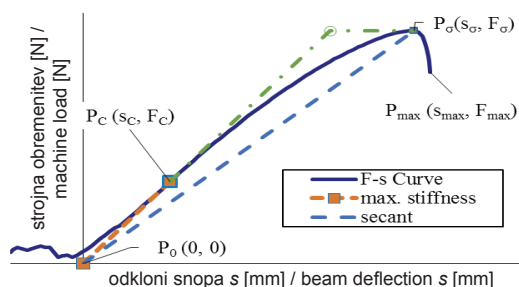
Tipičen standardni odklon znaša 6 % upogibne trdnosti. Preizkušanje 10 vzorcev CB-jeder in HB-jeder po 24-urnem skladiščenju bi lahko potrdil takšen tipičen raztros.

3.2 Krivulja obremenitve, togost in deformacije

Zaradi nadaljnje ocene je treba predobdelati krivulje obremenitve in izločiti začetne učinke usedanja. Značilne točke na krivulji so točka največje togosti (P_c), točka največje trdnosti (P_σ) ter končna točka krivulje obremenitve

3.2 Load curve stiffness and deformation

To permit further evaluations, a load curve pre-treatment to eliminate the observed initial settling effects is required. Characteristic curve points are the point of maximum stiffness (P_c), the point of maximum strength (P_σ) and the load curve end point (P_{max}). P_c meets the condition $(d^2s)/(ds^2)=0$. At P_σ the first derivative of the load curve is zero: $(d\sigma)/(ds)=0$. The load curve correction is conducted by shifting the curve with the intersection of the maximum stiffness tangent through P_c



Slika 8: Prikaz metode popravka oz. predobdelave krivulje obremenitve na podlagi tangente na točko največje togosti. Dodatno je označena sekanta na točko maksimalno trdnost

Figure 8: Illustration of the load curve settlement correction pre-treatment method based upon the maximum stiffness tangent. Additionally the secant to the maximum strength is indicated

($P_{\max}$). P_c ustreza pogojem $(d^2s)/(ds^2)=0$. Pri P_σ znaša prva izpeljanka iz krivulje obremenitve nič: $(d\sigma)/(ds)=0$. Korekcija krivulje obremenitve se izvede s premikom krivulje pri presečišču tangente na točko največje togosti skozi P_c ter vodoravno os skozi izhodišče (Slika 8).

Tipične predobdelane krivulje obremenitve in deformacije za vse sisteme vezivnih sredstev s po enim značilnim primerom za vsak čas skladiščenja (0/1/4/24 ur) so prikazane na Sliki 9 (a, b, c, d).

V glavnem se je pri CB-sistemih pokazala izrazita krivulja z nižjo togostjo v primerjavi z drugimi sistemi za vroče strjevanje. Krivulje CB-jeder dokazujejo tudi značilno odvisnost oblike krivulj obremenitve in odklona vse do 24 ur skladiščenja. Za vse sisteme vročega strjevanja so značilne predvsem linearne lastnosti obremenitve. Njihova togost je vse od 1 ure skladiščenja naprej primerljiva in nespremenjena kljub različnim upogibnim silam.

Kvantitativna parametra krivulje sta odklon pri maksimalni obremenitvi ter skladnost (primerjava na Sliki 8). V začetni fazi obremenitve se dodano delo elastično shrani v notranjosti vzorca. Predpostavlja se, da se, dokler ni dosežena vrednost P_c , energija preloma ne porabi. Na podlagi mehanskih razmerij linearnega elastičnega kontinuuma je mogoče oceniti modul elastičnosti ob upoštevanju maksimalne togosti $C_{\max} = F_c/s_c$ skladno z Enačbo 2:

$$E = \frac{\sigma_b}{\varepsilon} = \frac{l^3}{4a^4} C_{\max} \quad (2)$$

Slika 10 prikazuje rezultate odklona snopa pri maksimalnih stopnjah obremenitve (s_σ) in Slika 11 rezultate modula elastičnosti.

Odklon snopa iz predobdelanih krivulj obremenitve je lahko prvi indikator preoblikovalnosti jeder. V primeru sistemov z vročim strjevanjem so rezultati odklona

and the horizontal axis through the origin (Fig. 8).

Typical pre-treated load-deformation curves for all binder systems with one representative example for each storage time (0/1/4/24 hours) are shown in Figure 9 (a, b, c, d).

Generally, the CB-system shows a pronounced curvature and a lower stiffness compared to all other hot hardening systems. The curves for CB also show a distinct time dependency of the load-deflection curve shape up to 24 h storage time. All hot setting systems show a rather linear loading characteristic. Their stiffness is comparable and unchanged from 1 h storage time onward, despite their different bending strength levels.

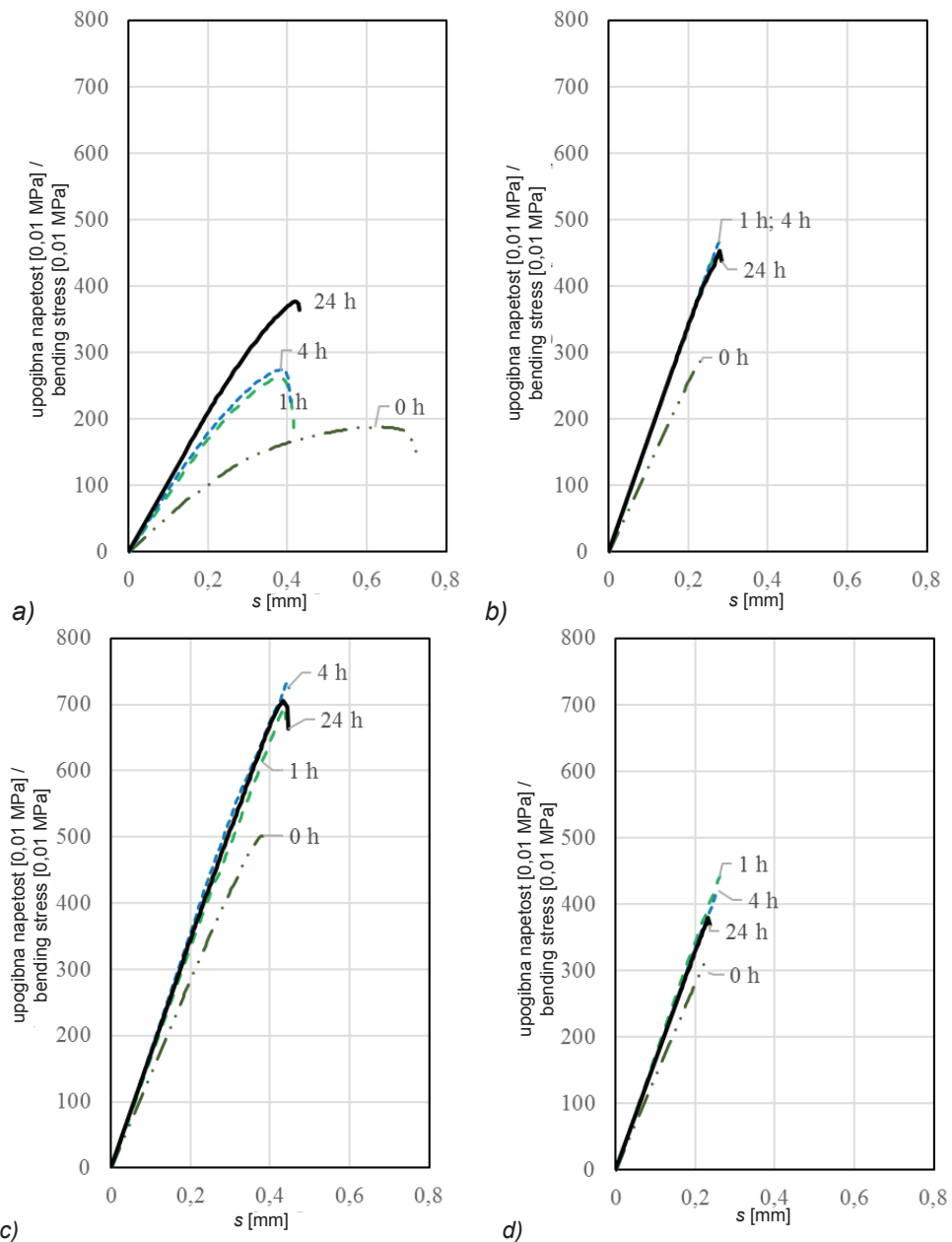
Quantitative curve parameters are deflection at maximum load and the compliance (compare Figure 8). In the initial load phase the introduced work is elastically stored in the sample volume. It is postulated that until P_c is reached no fracture energy is consumed. Based upon linear elastic continuum mechanical relations the elastic modulus can be evaluated using the maximum stiffness $C_{\max} = F_c/s_c$ according to Equation 2:

$$E = \frac{\sigma_b}{\varepsilon} = \frac{l^3}{4a^4} C_{\max} \quad (2)$$

Figure 10 shows beam deflection results at the maximum load level (s_σ) and Figure 11 the elastic modulus results.

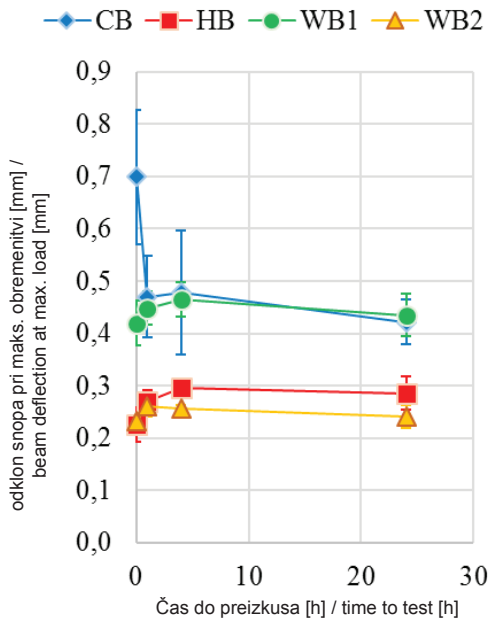
Beam deflection from pre-treated load-curves can be used as a first indicator for core deformability. For hot hardening systems the deflection results are significantly below that of CB-cores, except for WB1-cores, developing the highest strength.

Interestingly, the elastic moduli of the different HB- and WB-systems are very similar to each other. After 1 hour storage time E is about 2.7 GPa. The CB-cores exhibit about 30 – 50 % lower elastic moduli.



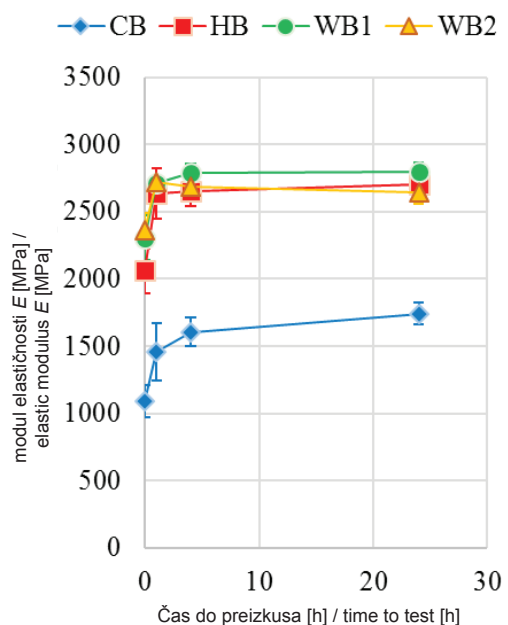
Slika 9: Krivulje upogibne napetosti kot funkcije odklona snopa po 0 h, 1 h, 4 h in 24 h skladiščenja. Sistemi vezivnih sredstev: a) Coldbox CB, b) Hotbox - HB; c) Warmbox-1 – WB1, d) Warmbox-2 – WB2

Figure 9: Bending stress curves as function of beam deflection after 0 h, 1 h, 4 h and 24 h storage time. The binder systems are: a) Cold-box - CB; b) Hotbox - HB; c) Warmbox-1 – WB1; d) Warmbox-2 – WB2



Slika 10: Skupni rezultati odklona snopa za vsa preizkušena jedra v odvisnosti od časa skladiščenja

Figure 10: Total beam deflection results for all tested cores over storage time



Slika 11: Rezultati modula elastičnosti za vsa preizkušena jedra v odvisnosti od časa skladiščenja

Figure 11: Elastic modulus results for all tested cores over storage time

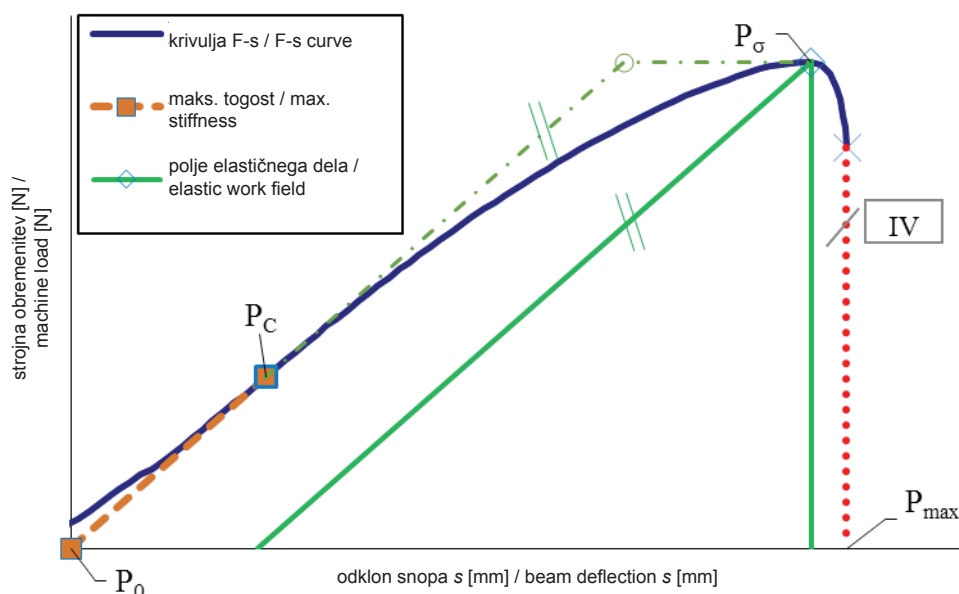
bistveno nižji kot v primeru CB-jedr, razen pri WB1-jedrih, za katere je značilna najvišja trdnost.

Zanimivo je, da so moduli elastičnosti precej različnih HB-sistemov in WB-sistemov med seboj izredno podobni. Po 1 uri skladiščenja znaša vrednost E pribl. 2,7 GPa. Pri CB-jedrih je bil izmerjen pribl. 30–50 % nižji modul elastičnosti. Po 24 urah je razen CB-vzorcev znašala 1,7 GPa. Vrednosti vseh sistemov so bile pri 0 h 20 % nižje v primerjavi z rezultati po 1h. To skupaj z večjo začetno preoblikovalnostjo dokazuje pomembnost ustreznega rokovanja in pogojev skladiščenja za novo proizvedena peščena jedra.

After 24 hours the CB-samples obtained a level of 1.7 GPa. All systems exhibited 20 % lower values at the 0 h condition compared to the 1 h results. This, combined with initially higher deformability underlines the importance of proper handling and storage conditions for newly produced sand cores.

3.3 Mechanical Work Evaluations

The totally introduced work W_M into the testing setup is displayed by the area below the untreated load-displacement curve. In Figure 12 an exemplary pre-treated load curve is shown. The characteristic points and the distinguishable elastic and plastic work areas I, II, III and IV are illustrated.



Slika 12: Grafična opredelitev regij I–IV, ki se uporabljajo za oceno mehanskega dela na podlagi primera krivulje obremenitve in odklona iz upogibnega testa

Figure 12: Graphical definition of the regions I–IV used for the mechanical work evaluation upon an exemplary bending test stress-deflection curve

3.3 Ocena mehanskega dela

Skupno dovedeno delo W_M v postopku preizkušanja prikazuje površina pod neobdelano krivuljo obremenitve in odklona. Na Sliki 12 je prikazan primer predobdelane krivulje obremenitve. Prikazani so značilne točke ter polja elastičnega in plastičnega dela I, II, III in IV.

Površina dela I (W_{pl}^i : začetno plastično delo) opredeljuje površino nad tangento na točko maksimalne togosti (P_0 do P_C) ter krivuljo obremenitve. Ta površina označuje učinke usedanja vzorca proti nosilcem. Ta delež dela ne vpliva na zlom vzorca.

Površina dela II (W_{pl}^σ : plastično delo do maks. obremenitve) opredeljuje površino med korigirano krivuljo obremenitve ter linearni nagib do P_σ pri krivulji maksimalne togosti. Predstavlja delež plastičnega dela do maksimalne obremenitve.

Work area I (W_{pl}^i : initial plastic work) defines the area above the maximum stiffness tangent (P_0 to P_C) and the load curve. This area is dedicated to settlement effects of the sample towards the supports. This work portion is not contributing to the sample fracture.

Work area II (W_{pl}^σ : plastic work until max. stress) defines the area between the corrected load curve and the linear incline to P_σ with the maximum stiffness slope. It represents the plastic work portion until the maximum load.

Work area III (W_{el}^σ : elastic work until max. stress) defines the area below the maximum stiffness incline to P_σ and thus describes the elastic work stored in the sample volume at the maximum stress. It depends on the geometric relations and the mechanical properties. At fracture W_{el}^σ

Površina dela III (W_{el}^{σ} : elastično delo do maks. obremenitve) opredeljuje površino pod nagibom maksimalne togosti do P_{σ} in tako opisuje elastično delo, ki se shrani v notranjosti vzorca pri maksimalni napetosti. Odvisna je od geometrijskih razmerij ter od mehanskih lastnosti. Pri zlomu se sprostí W_{el}^{σ} . Pretvori se v površinsko energijo preloma ter v neizmerjeno energijo elastične povračljivosti ob trenutku zloma vzorca.

Površina dela IV (W_{pl}^f : plastično delo do končnega zloma) opredeljuje površino pod krivuljo obremenitve od P_{σ} do zloma vzorca. Ta delež dela, kadar je sploh izmerljiv, odraža delo v povezavi s širjenjem razpoke. Običajno je mogoče pri tritočkovnih upogibnih testih razmeroma krhkih peščenih jeder opaziti širjenje nadkritičnih razpok, posledica česar so izredno nizke vrednosti W_{pl}^f .

V Preglednici 3 so podani pogoji v povezavi z regijami dela I–IV, ki so bile

is released. It is transformed to fracture surface energy and into non-measured kinetic spring back energy at the moment of sample fracture.

Work area IV (W_{pl}^f : plastic work until final breakage) defines the area below the load curve from P_{σ} until sample breakage. This work portion, if measurable at all, reflects the crack propagation work. Typically for three point bending tests of rather brittle sand cores an overcritical crack propagation can be observed, resulting in very low values of W_{pl}^f .

Table 3 gives the terms for the work-regions I–IV applied to evaluate the acquired load-displacement curves. The whole irreversible energy input is defined by the regions II and IV: $W_{pl} = W_{pl}^{\sigma} + W_{pl}^f$. The irreversible, or plastic, work acts on the highest stressed regions. Having discrete load-displacement data points from a testing

Preglednica 3: Matematične opredelitve regij mehanskega dela I–IV

Table 3: Mathematical definition of the mechanical work regions I–IV

Skupno dovedeno delo preizkusnega stroja (W_M) / Totally introduced work by the testing machine (W_M)	$W_M = \int_0^{s_{maks.}} F(s) ds \approx \sum_{s=0}^{s_{maks.}} F \Delta s$			
Regija / Region	I	II	III	IV
Vrednost / Denomination	W_{pl}^i	W_{pl}^{σ}	W_{el}^{σ}	W_{pl}^f
Delež energije krivulje / Curve energy portion	$\int_0^{s_c} F(s) ds$	$\int_{s_c}^{s_{\sigma}} F(s) ds$	-	$\int_{s_{\sigma}}^{s_{maks.}} F(s) ds$
Dodani (+) oz. odstranjeni (-) pogoji za elastično energijo / Added (+) or subtracted (-) elastic energy terms	$-\frac{F_c \cdot s_c}{2}$	$+\frac{F_c \cdot s_c}{2}$ $-\frac{F_{maks.}^2}{2C_{maks.}}$	$+\frac{F_{maks.}^2}{2C_{maks.}}$	-
W_s				

uporabljene za oceno pridobljenih krivulj obremenitve in odklona.

Nereverzibilni vnos energije v celoti opredeljujeta regiji II in IV: $W_{pl} = W_{pl}^{\sigma} + W_{pl}^f$. Nereverzibilno ali plastično delo deluje na najbolj obremenjene regije. Po pridobitvi diskretnih podatkov o obremenitvi in odklonu iz preizkusne naprave je treba oceniti W_s skladno z Enačbo 3:

$$W_s = W_M - W_{pl}^i =$$

$$= W_{el}^{\sigma} + W_{pl} = \frac{F_C \cdot S_C}{2} + \sum_{s=s_C}^{s_{maks.}} F \Delta s \quad (3)$$

Enačba 3 prikazuje pomembnost natančne opredelitev točke maksimalne togosti za pridobitev F_C in S_C na pravilen način.

Če povzamemo, je mogoče celotno dovedeno energijo zloma oceniti na podlagi neprekinjeno pridobljenih krivulj obremenitev, dokler ne pride do zloma še zadnje stične točke. Pri standardnem upogibnem testu peščenih jeder za livarsko industrijo tega ni bilo mogoče izvesti zaradi nestabilnih zlomov.

Slika 13 prikazuje rezultate mehanskega dela W_s na preizkušnem sistemu vezivnih sredstev za jedra, razdeljene na različne deleže dela.

Razvidno je, da je za CB-vzorke značilen največji delež plastičnega dela. Zanje je značilen upad plastične preoblikovalnosti v odvisnosti od časa. Za jedra z vezivnimi sredstvi HB in WB se večina dela elastično shrani v vzorcu. Prav tako ni očitnega končnega deleža plastičnega dela. Za CB-jedra je v primerjavi s HB-jedri in WB2-jedri značilna nižja upogibna trdnost, vendar potrebujejo več dela zaradi znatno večjega deleža plastičnega dela. To je lahko prednost, ki pomaga pri preprečevanju

machine, W_s has to be evaluated according to Equation 3:

$$W_s = W_M - W_{pl}^i =$$

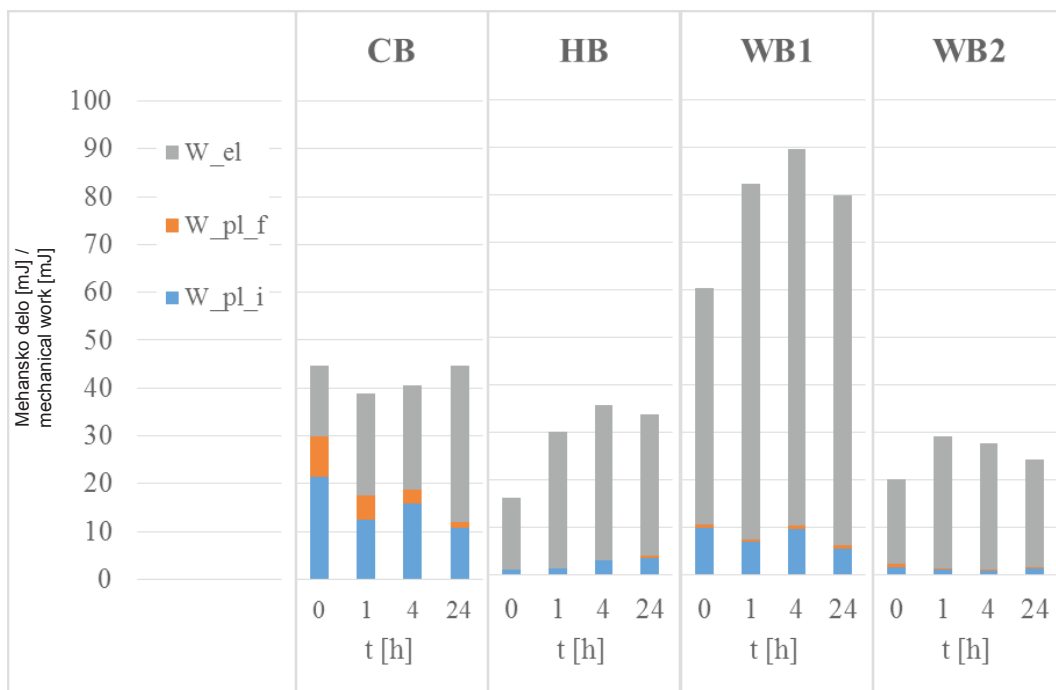
$$= W_{el}^{\sigma} + W_{pl} = \frac{F_C \cdot S_C}{2} + \sum_{s=s_C}^{s_{maks.}} F \Delta s \quad (3)$$

Equation 3 shows the importance of a precise maximum stiffness point definition in order to obtain F_C and S_C properly.

Summarized, the whole introduced fracture energy could be only evaluated from continuously acquired load curves until the last contact point broke. For the given standard foundry sand core bending test setup this was not achievable due to the observed non-stable fracturing.

It can be seen, that the CB-samples consume the highest plastic work portions. They show a plastic deformability with a decreasing trend over time. For HB and WB-bond cores the majority of work is elastically stored in the sample. Moreover, a distinct final plastic work portion is not visible. Compared to HB- and WB2-cores, CB-cores present lower bending strength but exhibit higher work consumption due to significantly higher plastic work portions. This can be an advantage to avoid core breakage but also implies a higher plastic deformation risk.

The absolute numbers reflect, that the WB1 samples take up the highest total work. The second highest work consumption is given by CB-cores, with their higher plastic work portions. HB and WB2-samples show lower consumed work than CB-cores.



Slika 13: Mehansko delo za vzorce v upogibnem testu. Začetno in končno plastično delo (W_{pl}^i , W_{pl}^f) in elastično delo (W_{el}) so posebej označeni za vsako vrst vezivnega sredstva v odvisnosti od časa shranjevanja

Figure 13: Mechanical work of bending test samples. Initial and final plastic work (W_{pl}^i , W_{pl}^f) and elastic work (W_{el}) are separately indicated for each binder type over the storage time t

zloma jeder, vendar pa hkrati predstavlja tudi večje tveganje plastične deformacije.

Iz absolutnih vrednosti je jasno, da potrebujejo vzorci WB1 največ skupnega dela. Sledijo CB-jedra, za katera je značilen velik delež plastičnega dela. HB-jedra in WB2-jedra potrebujejo manj dela od CB-jeder.

3.4 Ocena krhkosti vzorca

Predstavljena sta dva pristopa za opisovanje krhkosti peščenih jeder, prvi na podlagi oblike krivulje obremenitve in drugi na podlagi ocene dela.

3.4 Sample brittleness evaluation

Two approaches, one based on load curve shape and the other on the work evaluation, to describe sand core brittleness are presented.

For the load curve approach, stiffness and deformability are correlated. As illustrated in Figure 8, the relation between the secant stiffness $C_{sec} = F_{\sigma} / s_{\sigma}$ and the maximum stiffness C_{max} leads to the modulus based brittleness index B_M (Equation 4):

$$B_M = C_{sec} / C_{max} \quad (4)$$

V primeru pristopa na podlagi oblike krivulje obremenitve sta togost in preoblikovalnost soodnosni. Kot je prikazano na Sliki 8 pripelje razmerje med togostjo sekante $C_{sec} = F_{\sigma} / s_{\sigma}$ ter maksimalno togostjo C_{max} do indeksa krhkosti, osnovanega na modulu B_M (Enačba 4):

$$B_M = C_{sec} / C_{max} \quad (4)$$

Za oceno na podlagi dela opredeljuje elastično delo (Regija III na Sliki 12) v povezavi s celotnim delom na delu osnovan indeks elastičnosti B_W (Enačba 5):

$$B_W = W_{el}^{\sigma} / W_S \quad (5)$$

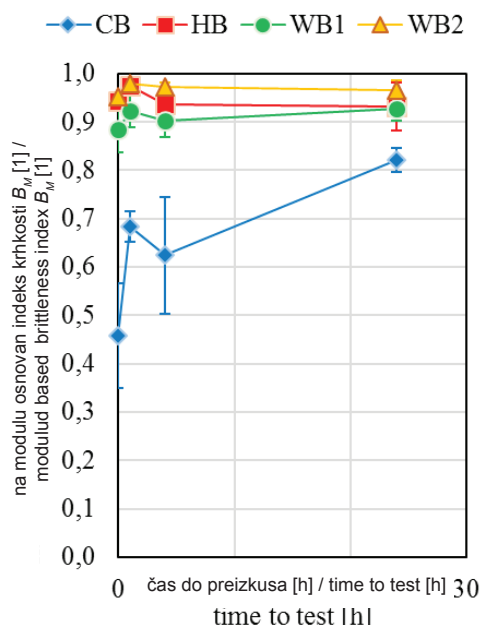
Tako vrednost B_M kot B_W sta brez dimenzij ter sta neodvisni od absolutne ravni trdnosti. Rezultate je mogoče primerjati z drugimi podobnimi upogibnimi testi, saj so vključeni tudi od velikosti odvisni parametri.

For the work based evaluation, the elastic work (Region III in Figure 12) related to the total work defines the work-based elasticity index B_M (Equation 5):

$$B_W = W_{el}^{\sigma} / W_S \quad (5)$$

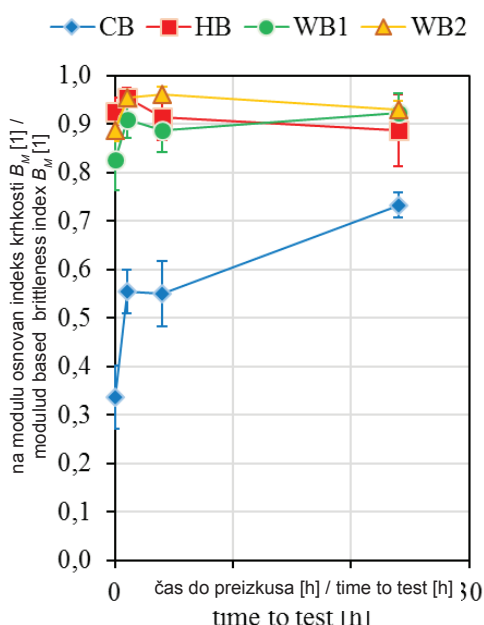
Both, B_M and B_W , are dimensionless and independent from the absolute strength level. Results may be compared among similar bending test setups, because size dependent parameters are incorporated.

Generally, the more a load curve is bowed, the lower is the brittleness index. For a completely linear load curve it would reach unity. Results for B_M are shown in Figure 14 and for B_W in Figure 15.



Slika 14: Rezultati na modulu osnovanega indeksa krhkosti za vsa preizkušena jedra v odvisnosti od časa skladiščenja

Figure 14: Modulus based brittleness index results for all tested cores over storage time



Slika 15: Rezultati na energiji osnovanega indeksa krhkosti za vsa preizkušena jedra v odvisnosti od časa skladiščenja

Figure 15: Energy based brittleness index results for all tested cores over storage time

Na splošno velja, da bolj, kot je krivulja izbočena, nižji je indeks krhkosti. Pri popolnoma linearni krivulji obremenitve bi bili krivulji enaki. Rezultati za B_M so prikazani na Sliki 14 in za B_W na Sliki 15.

Indeksi krhkosti na podlagi dela so malce nižji od tistih, osnovanih na modulu. Za Gb-jedra in WB-jedra so podani visoki indeksi krhkosti nad 0,85. V obeh ocenjevanjih se je za najbolj krhek sistem izkazal WB2. Izbočena oblika krivulje in višji delež plastičnega dela vodijo v nižje indekse krhkosti CB-sistema. Še posebej ob času 0 ur in vrednostih pod 0,5, ki so zanesljiv dokaz visoke stopnje preoblikovalnosti takšnih jeder. Iz teh ocen pa je očitna tudi potreba po previdni manipulaciji z jedri, da bi se izognili deformacijam.

V primeru CB-jeder končni delež plastičnega dela W_{pl}^f (Slika 13) znatno vpliva na vrednost W_s . Rezultati za B_W so prav tako nižji kot za B_M . Razlika za krhkejšie sisteme jeder z vročim strjevanjem ni bila opažena. Pri raziskavi materialov z določeno mero plastičnosti se je treba odločiti za delovni pristop, ki v oceni upošteva tudi končni del krivulje. Na modulu osnovana ocena odraža razmerja izključno do ravni maksimalne trdnosti.

3.5 Vpliv hitrosti obremenitve

Zaradi njihove visoke plastičnosti in časovne odvisnosti rezultatov so bila za preučevanje vpliva hitrosti obremenitve uporabljena CB-jedra. Nanje so delovale sile med 0,5–5 in 50 mm/min. V Preglednici 4 so prikazani rezultati v povezavi s hitrostjo obremenitve 0,5 mm/min, ki je bila pri prikazanih rezultatih konstantna.

Pri nizki hitrosti obremenitve 0,5 mm/min in posledičnem času upogibnega testa 1 min se trdnost in skupno delo zmanjšata za 20–25 % v povezavi z nazivno hitrostjo obremenitve 5 mm/min. Odklon

The work based brittleness indices are slightly lower than the modulus based ones. High brittleness indices of above 0.85 are given for HB- and WB-cores. The most brittle system from both evaluations is the WB2-system. The bent curve shape and the higher plastic work fraction lead to lower brittleness indices for the CB-system. Especially at the 0 hour-condition the values are below 0.5, giving evidence for a high deformability of those cores. Practically the need of a careful core manipulation to avoid deformations is obvious also from these evaluations.

For CB-cores the final plastic work portion W_{pl}^f (Figure 13) contributes significantly to W_s . The results for B_W are also lower than for B_M . Such a difference has not been observed as distinct for the more brittle hot hardened core systems. Investigating materials with some plasticity, the work based approach should be chosen, to include the final curve part also into the evaluation. The modulus based evaluation is reflecting the relations only until the maximum strength level.

3.5 Influence of load velocity

Due to their high plasticity and time dependency of the results, CB cores have been chosen to study the influence of load velocity. Load rates of 0.5 – 5 and 50 mm/min have been applied. In Table 4 the results are shown in relation to 0.5 mm/min load velocity, which was constant for the previously shown results.

For the low load velocity of 0.5 mm/min, resulting in about 1 min, bending test time, strength and total work are significantly decreased by 20 – 25 % related to the nominal load velocity of 5 mm/min. Deflection is decreased by about 10 %. However, the

Preglednica 4: Odvisnost lastnosti CB-jeder od hitrosti obremenitve (nizka: 0,5 mm/min, in visoka: 50 mm/min). Vrednosti so podane kot odstotki hitrosti 5 mm/min – referenčni rezultati. Vrednosti za 0 h, 1 h in 24 h so bile ocenjene za najmanj 5 vzorcev na podatek.

Table 4: Dependence of CB properties on the load velocity (low: 0.5 mm/min and high: 50 mm/min). Values are given as percentage of the 5 mm/min reference results. Values for 0, 1 and 24 h storage time were evaluated for a minimum of 5 samples per data point.

rezultati v [%] za vrednosti 0,5 mm/min / results in [%] of 0.5 mm/min values	upogibna trdnost / bending strength		odklon / deflection		modul elastičnosti / elastic modulus		skupno delo ob zlomu / total work at fracture		na modulu osnovan indeks krhkosti / mod. based br. index		na delu osnovan indeks krhkosti / work based br. index	
čas skladiščenja / storage time	nizka / low	visoka / high	nizka / low	visoka / high	nizka / low	visoka / high	nizka / low	visoka / high	nizka / low	visoka / high	nizka / low	visoka / high
0 h	78	114	93	109	97	116	77	113	99	112	102	115
1 h	80	112	90	90	95	110	75	108	94	111	92	109
24 h	83	100	87	91	100	107	76	99	97	106	97	96

se zmanjša za pribl. 10 %. Vendar pa so moduli elastičnosti ter indeksi krhkosti blizu referenčnih vrednosti.

Pri visoki hitrosti obremenitve 50 mm/min in posledičnemu času upogibnega testa pod 1 s so povprečne vrednosti upogibne trdnosti, modul elastičnosti, delo preloma in krhkost merili nad 100 %, povprečni odklon pa se je malce zmanjšal.

Na kratko to pomeni, da nizke hitrosti obremenitve omogočajo plastično deformacijo vezi vezivnih sredstev skozi čas ter so posledično krivec za določeno mero plastičnosti peščenih jeder. To vodi v zmanjšano trdnost in delo zloma.

Pričakuje se, da bodo imeli takšni viskozni učinki manjši vpliv na bolj krhka peščena jedra s popolnoma strjenimi sistemi vezivnih sredstev Hotbox in Warmbox.

elastic modulus and the brittleness indices are close to the reference values.

For the high load velocity of 50 mm/min, resulting in a testing time below 1 s, mean values of bending strength, elastic modulus, work of fracture and the brittleness are above 100 % and average deflection is slightly decreased.

Summarized, very low load velocities permit plastic deformation over time of binder bridges and thereby permits a degree of plasticity in sand cores. This leads to decreased strength and work of fracture.

Such viscous effects are expected to have less effect for more brittle sand cores with fully hardened Hotbox and Warm-box binder systems.

4 Conclusions

The here presented study has demonstrated the potential to significantly enhance the evaluation of standard foundry sand core bending tests. Benchmarking of Cold-box-, Hot-box- and Warm-box bonded sand cores

4 Sklepi

V tem članku predstavljena študija je dokazala potencial za znatno izboljšanje ocenjevanje standardnih upogibnih testov

za peščena jedra v livarstvu. Primerjalna analiza spojenih peščenih jeder Coldbox, Hotbox in Warmbox je potrdila uspešno aplikacijo koncepta.

- Poleg obstoječih standardov v livarstvu je potrebno pridobiti tudi natančno krivulje obremenitve in odklona.
- Upogibno trdnost in modul elastičnosti je mogoče oceniti neposredno na podlagi neobdelanih krivulj obremenitev.
- Predobdelava krivulje obremenitve je ključna za odpravo začetnih učinkov usedanja vzorcev v smeri proti testnim nosilcem pred nadaljnjimi analizami, še posebej v primeru mehkih zrnatih materialov z vezivnimi sredstvi, kot so peščena jedra.
- Na podlagi predobdelanih krivulj obremenitve je mogoče oceniti odklon in mehansko delo, razdeljeno na elastično in plastično komponento.
- Krhkost je izražena s konceptom, osnovanim na podlagi modula oz. dela. Razmerja obeh konceptov so primerljiva.
- V primeru materialov z večjo plastičnostjo je bolje uporabiti na delu osnovan pristop.
- Pri nizkih stopnjah obremenitve se lahko zaradi viskoplastičnih učinkov trdnost in preoblikovalnost zmanjšata.

Omejitev koncepta predstavljajo nadkritični zlom vzorcev, podvrženih upogibnim testom skladno s standardi v livarski industriji, kar vodi v nestabilno širjenje razpok. Zato se priporoča raziskava specifičnega dela preloma, npr. preizkus cepljenja s klinom, ki sta ga razvila Harmuth in Tschegg (Harmuth in Tschegg, 1997). Ta se je izkazal za primeren koncept, s katerim je mogoče opredeliti heterogene materiale, kot so ognjevarne opeke ali betonski vzorci, kar je posledica izboljšane razmerja med površino preloma v primerjavi s prostornino vzorca.

proved the successful application of this concept.

- In addition to existing foundry standards the acquisition of a precise load-deflection curve is required.
- Bending strength and elastic modulus can be directly evaluated from non-treated load curves.
- A load curve pre-treatment is essential to eliminate initial settling effects of the samples towards the testing supports prior to further analyses in particular for soft bonded granular materials like sand cores.
- From pre-treated load curves deflection and mechanical work, divided into elastic and plastic portions can be evaluated.
- Brittleness has been expressed by a modulus based and a work based concept. Both deliver comparable relationships.
- For materials with higher plasticity the work based approach should be preferably applied.
- At low load rates strength and deformability may be reduced due to visco-plastic effects.

Limitations of the concept are given by the overcritical sample fracture of samples at bending test setups according to foundry standards, promoting instable crack propagation. Therefore it is proposed to investigate the specific work of fracture, e.g. by wedge split tests as developed by (Harmuth and Tschegg, 1997). This has been proven as a suitable concept to characterize heterogeneous materials like refractory bricks or concrete samples, due to an improved ratio of fracture surface to sample volume.

Future research should address sand core properties during the casting process, investigating the impact of thermal

Prihodnje raziskave bi se morale osredotočiti na vprašanje lastnosti peščenih jeder v postopku ulivanja ter na preučevanje učinka termalne izpostavljenosti ter na izhajajoče visokotemperaturne lastnosti. Prav tako bi se bilo treba osredotočiti na jedra z anorganskimi vezivnimi sredstvi. Takšna jedra predvidevajo kompleksnejši nadzor procesov, vendar nudijo prednosti na področju okoljevarstva in varnosti pri delu.

exposure and the resulting high temperature properties. Moreover, focus should also be put on inorganically bonded cores. These require a more complex process control while giving environmental and work hazard benefits.

Viri / Literature

- AFS, 1962. *Molding Methods and Materials*, 1st ed. American Foundrymen's Society, Des Plaines, Illinois.
- Bindernagel, I., 1983. *Formstoffe und Formverfahren in der Gießereitechnik.pdf*, VDG-Taschenbuch. Verein Deutscher Gießereifachleute; Giesserei-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- Brown, J.R. (Ed.), 2010. *Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook*, 11th ed. Butterworth-Heinemann. doi:10.1016/B978-075064284-2/50001-6
- Campbell, J., 2000. The concept of net shape for castings. *Mater. Des.* 21, 373–380. doi:10.1016/S0261-3069(99)00072-2
- Czerwinski, F., Mir, M., Kasprzak, W., 2015. Application of cores and binders in metalcasting. *Int. J. Cast Met. Res.* 28, 129–139. doi:10.1179/1743133614Y.0000000140
- Dietert, H.W., 1950. *Foundry Core Practice*. American Foundrymen's Society, Chicago, IL.
- Dong, S., Iwata, Y., Hohjo, H., Iwahori, H., Yamashita, T., Hirano, H., 2010. Shell Mold Cracking and Its Prediction during Casting of AC4C Aluminum Alloy. *Mater. Trans.* 51, 1420–1427. doi:10.2320/matertrans.F-M2010815
- Flemming, E., Tilch, W., 1993. *Formstoffe und Formverfahren*, 1st ed. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, Stuttgart.
- Gosch, R., Stika, P., 2005. Das ROTACAST-Gießverfahren - millionenfach für Aluminiumzylinderköpfe in der Serie bewährt. *Giesserei-Rundschau* 52, 170–173.
- Harmuth, H., Tschegg, E.K., 1997. A Fracture mechanics approach for the development of refractory materials with reduced brittleness. *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.* 20, 1585–1603. doi:10.1111/j.1460-2695.1997.tb01513.x
- Kerber, H., Riegler, M., Schindelbacher, G., Schumacher, P., 2014. New possibilities with improved green sand testing facilities, in: Jan-Blažič, M. (Ed.), 54th International Foundry Conference. Slovenian Foundrymen Society, Portorož, Slovenia, p. 10.
- Langer, H.J., Dunnavant, W.R., 2011. Foundry resins. *Polym. Sci. Technol.*
- Lellig, K., Nolte, M., Kube, D., Gosch, R., Gröschel, A., Ragus, D., 2010. Neue Leichtbaukonzepte in Motorenkonstruktion und -bau: Antworten auf die veränderten Herausforderungen im modernen Fahrzeugbau, in: 37. Internationales Wiener Motorensymposium. Verein Deutscher Gießereifachleute; Giesserei-Verlag GmbH,

pp. 213–231.

- Motoyama, Y., Inoue, Y., Saito, G., Yoshida, M., 2013. A verification of the thermal stress analysis, including the furan sand mold, used to predict the thermal stress in castings. *J. Mater. Process. Technol.* 213, 2270–2277. doi:10.1016/j.jmatprotec.2013.06.024
- Quarzwerte, 2009. Quarzsand Haltern H 31 bis H 35, Quarzwerte Stoffdaten. D-50207 Frechen.
- Ratke, L., Brück, S., 2006. Mechanical properties of aerogel composites for casting purposes. *J. Mater. Sci.* 41, 1019–1024. doi:10.1007/s10853-005-3152-8
- Rice, J.R., 1968. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. *J. Appl. Mech.* 35, 379–386.
- Schacht, C.A. (Ed.), 2004. *Refractories Handbook*. Marcel Dekker, Inc., New York, Basel.
- Sobczyk, M., 2008. Untersuchung zur Nutzung der Vakuumtrocknungshärtung für die Herstellung und den Einsatz magnesiumsulfatgebundener Kerne für den Leichtmetallguss. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.
- Stachowicz, M., Granat, K., Nowak, D., 2011. Influence of water-glass grade and quantity on residual strength of microwave-hardened moulding sands. Part 2 11, 93–98.
- Tarokh, A., Fakhimi, A., 2014. Discrete element simulation of the effect of particle size on the size of fracture process zone in quasi-brittle materials. *Comput. Geotech.* 62, 51–60. doi:10.1016/j.compgeo.2014.07.002
- Thole, J., Beckermann, C., 2009. Measurement of Elastic Modulus of PUNB Bonded Sand as a Function of Temperature, in: 63rd SFSA Technical and Operating Conference. Steel Founders Society of America, Chicago, IL, p. 22.
- VDG, 1999. Biegefestigkeit von warmhärtenden, kunstharzgebundenen feuchten Formstoffen. (No. P 71), VDG-Merkblatt. Düsseldorf.
- VDG, 1974. Beheizbares Formwerkzeug für die Herstellung von Biegestäben (No. M 11), VDG-Merkblatt. Düsseldorf.
- Weissenbek, E., Kautz, T., Brotzki, J., Müller, J., 2011. Zylinderkopffertigung der Zukunft - Ökologie, Ökonomie und Werkstoffoptimierung im Einklang. *Mot. Zeitschrift* 72, 484–489.
- Wolff, M.F.H., Salikov, V., Antonyuk, S., Heinrich, S., Schneider, G. a., 2013. Three-dimensional discrete element modeling of micromechanical bending tests of ceramic-polymer composite materials. *Powder Technol.* 248, 77–83. doi:10.1016/j.powtec.2013.07.009
- Zhou, X., Yang, J., Su, D., Qu, G., 2009. The high-temperature resistant mechanism of α -starch composite binder for foundry. *J. Mater. Process. Technol.* 209, 5394–5398. doi:10.1016/j.jmatprotec.2009.04.010
- Zwick_Roell, 2015. ProLine Tischprüfmaschinen Z005 bis Z100, Produktinformationen.

Inovacije na področju vakuumskega litja

Innovations in Vacuum Die Casting

Povzetek

V zadnjih 20 letih smo priča velikemu napredku na področju proizvodnje tankostenskih konstrukcijskih delov za avtomobilsko industrijo. Danes je tehnologija vakuumskega litja posodobljena in prilagojena sodobnim zahtevam.

Različni konstrukcijski deli, kot so mostovi amortizerjev, okvirji vrat, dvizna vrata, armaturne plošče, prečni nosilci in stebrički, neposredno vplivajo na maso avtomobila, s tem pa tudi na porabo goriva in izpuste CO₂. Lahki sestavni deli novih oblik morajo imeti takšne lastnosti, da jih je mogoče toplotno obdelovati, variti in oblikovati. Vodilne svetovne livarne, ki proizvajajo zahtevne konstrukcijske dele za avtomobilsko industrijo, danes uporabljajo dovršeno tehnologijo vakuumskega litja.

Vsaka livarna ima svoj pristop in lastno filozofijo. Fondarex je zavezan k iskanju najboljših celovitih rešitev za vsako livarno. Strankam nudimo optimalne rešitve za doseganje najboljših vakuumskih lastnosti v povezavi z ustreznim vakuumskim sistemom in zahtevanim vodenjem postopka. Za pravilno integracijo vakuumskega sistema sta tehnična podpora in usposabljanje bistvenega pomena.

Podjetje Fondarex nudi različne velikosti hladilnih blokov (Chill-Block) z aerodinamičnimi profili ter celovit spekter vakuumskih ventilov Supervac. Ti ventili se zapirajo s kinetično energijo kovine in imajo odlično zmogljivost praznjenja, ki jamči najnižjo raven vakuumu v najkrajšem času.

Z novo serijo Highvac imajo livarne na izbiro široko ponudbo vakuumskih sistemov. Postopek vsebuje integrirane, inovativne možnosti nadzora, kot npr. merjenje vakuumu v livni votlini, regulacijo vakuumu, nadzor onesnaževanja in profila, preizkus tesnosti, merjenje prostornine odsesanega zraka in nadzor vlage odsesanega zraka. Proizvodni podatki vakuumske tehnologije se lahko prenašajo s komunikacijskimi vodili Ethernet, Profinet in Profibus, krivulje vakuumu pa prek analognega signala ter s komunikacijskimi vodili Profinet in Profibus.

Z zaostrovanjem zahtev v livarstvu se povečujejo tudi možnosti za nadzor proizvodnje. Podjetje Fondarex se prilagaja potrebam strank in zahtevam v proizvodnji, zato je razvilo tipalo, ki natančno zaznava zračno vlago, ki se odvaja iz livne votline. Fondarex bo v kratkem predstavil patentirano novost za seriji Highvac Premium 2C in Highvac Ultimate 4C – že preizkušeno tehnologijo za izdelavo visokokakovostnih ulitkov. Hitra, zanesljiva in natančna oprema meri in obdeluje analitične podatke posameznih vakuumskih kanalov in vbrizgov.

Tlačno litje konstrukcijskih delov se nenehno izpopolnjuje. V čast nam je, da smo z nenehnimi inovacijami na področju vakuumske tehnologije za nove aplikacije in projekte vodilni v industriji.

Abstract

In the past 20 years the thin-walled body structural parts in the automotive industry have been developed significantly. Meanwhile, the vacuum die casting process has been upgraded and adapted to the latest requirements.

A large variety of structural parts, such as shock towers, door frames, hatchbacks, dashboards, crossbeams and pillars have a direct impact on car weight thus fuel consumption and CO₂ emissions. These new designs and lightweight components have to be heat treatable, weld-capable and ductile. Today, the world-leading foundries are using the high-end vacuum technology for their challenging automotive productions of structural parts.

Each foundry has its own approach and philosophy. Thus, Fondarex is committed to find the best overall setup for each die caster. We take care of defining the optimal layout for the best vacuum characteristics, in combination with the most suitable vacuum system having the required process control. Furthermore, the technical support and training are essential for the proper integration of a vacuum system.

Fondarex proposes different sizes of steel Chill-Blocks with aerodynamic profiles, as well as a complete range of Supervac vacuum valves. Those valves are closed by the kinetic energy of the metal with the best evacuation capacity, which guarantees the lowest vacuum level in shortest time.

With the new Highvac series, a wide range of vacuum systems are proposed to the die caster. Innovative control possibilities, such as vacuum measurement in the cavity, vacuum regulation, pollution and profile control, leak test, evacuated air volume measurement and evacuated air humidity control, are integrated in the process. The transfer of the vacuum production data can be made by Ethernet, Profinet and Profibus while the vacuum curves through analog signal, Profinet and Profibus.

As the casting requirements keep getting more stringent, so do the necessary production control capabilities. By listening to the needs of our clientele and to the industry's requirements, Fondarex has developed a sensor capable of accurately determine the humidity content from the air evacuated out of the cavity. Equipped with the patents, Fondarex is ready to unveil its newest partner for the Highvac Premium 2C and the Highvac Ultimate 4C series; already proven companions in successful high-integrity castings. Fast, reliable and accurate, it measures and processes analytical data per vacuum channel and per shot.

Die castings of structural parts develop continuously. It is our challenge and honor to lead the industry by regularly innovating the vacuum technology for new applications and projects.

1 Uvod

Vakuumska tehnologija se je sprva uporabljala za praznjenje livnih votlin med postopkom polnjenja kot sredstvo proti poroznosti in za odpravljanje težav pri zapolnjevanju delov neobičajnih velikosti

1 Introduction

Vacuum implementation in die casting started as mean to empty the die cavity during the injection process to counter porosity and filling difficulties on parts of extraordinary sizes and geometries.

in geometrijskih oblik. Danes je koncept v osnovi enak, vendar se je vakuumski postopek zaradi zahtev industrije po sledljivosti in nenehnega zaostrovanja meril kakovosti razvil do te mere, da vključuje več nadzora nad postopkom in analitične funkcije.

Primer: največji izziv v livarstvu so konstrukcijski deli. Med prizadevanja za zmanjšanje izpustov CO₂ sodi tudi zmanjševanje mase avtomobilov. Če dele iz običajnega jekla ali sestavljene sklope iz več varjenih delov nadomestimo z velikimi ulitki, lahko občutno zmanjšamo maso šasije. S tem lahko sorazmerno zmanjšamo porabo goriva in izpuste CO₂. Visoke zahteve za ulitke (daljši deli, tanke stene, zagotovitev lastnosti za oblikovanje, varjenje in toplotno obdelavo, npr. T5, T6 ali T7) seveda zahtevajo najvišjo raven integritete v proizvodnji delov. Vse to je mogoče doseči le pri zelo nizkem notranjem tlaku brizganja (~60 mbar), kar zahteva postopek s podporo vakuumu.

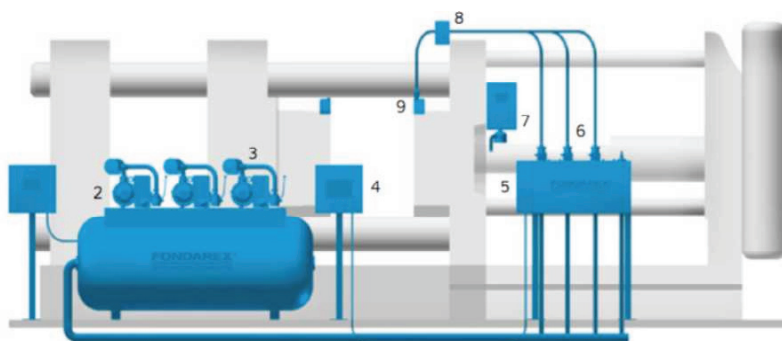
Uporaba vakuumske tehnologije združuje tako razumevanje zahtev industrije, kot tudi izkušnje.

Nowadays the concept is essentially the same but by the demands for the industry's need for traceability and ever-increasing quality standards, the vacuum process has evolved simultaneously to include greater control regulation and analytical features.

For instance, the industry's most demanding castings are structural parts. Part of the campaign to decrease CO₂ emissions in light vehicles is weight reduction. By replacing ordinary steel or components composed of multiple welded pieces by large castings, the chassis mass can be greatly reduced. This has a proportional effect on fuel consumption and therefore CO₂ emissions. However, the strict casting requirements (elongated sections, thin-walls, ductility, weldability, and heat-treatability such as T5, T6 or T7) demand the highest level of integrity in the part production. This can only be achieved with a very low cavity pressure (~60 mbar) and thus require a vacuum-assisted process.

Using vacuum technology is a story of both industrial philosophy and experience.

- 1 sistem za upravljanje črpalke / pump management system
- 2 vakuumski rezervoar / vacuum tank 3000 l
- 3 vakuumske črpalke / vacuum pumps 3 x 160 m³/h
- 4 nadzorna plošča / control panel
- 5 HIGHVAC ULTIMATE4C
- 6 tipalo vlage / humidity sensor
- 7 HIGHVAC EXVAC
- 8 napredna vakuumska enota / advanced vacuum unit
- 9 vakuumski ventil / vacuum valve SUPERVAC MACRO



Slika 1: Celovita rešitev za konstrukcijske dele

Figure 1: The total solution for structural parts

2 Študija uporabe vakuumske tehnologije

Osnova rešitve je v študiji uporabe vakuumske tehnologije, zlasti zasnove razdelilnega in vakuumskega kanala, časa polnjenja in časa vakuuma med prvo in drugo fazo. V tem večkomponentnem postopku pa je želen rezultat uresničljiv le z usklajenim delovanjem vseh korakov. V teku proizvodnega cikla je tesnost bistvenega pomena. Izguba vzporednosti zaradi toplotne deformacije, zrahljanih drsnikov ali degradacije tesnila zaradi odvečnega nalivanja ali nerednega vzdrževanja so dejavniki, ki lahko znatno poslabšajo učinkovitost vakuuma.

Nadzorovati je treba tudi obnašanje kovine v livni komori. Turbulence, ki jih povzroča bat, ustvarjajo zajemanje zraka v livni komori in na livni reži, ki že sama po sebi omogoča nastanek poroznost. To je mogoče preprečiti z ustvarjanjem vakuuma v livni komori, izogibanjem nasprotnemu batu, dinamično zasnovo razdelilnega kanala in izbiro ustreznega ulivnega sistema.

Turbulence taline in brizganje je treba iz različnih razlogov čim bolj omejiti. Kovina, ki pod visokim tlakom vstopa v livno votlino, že sama po sebi obrablja kokilo in skrajšuje njeno življenjsko dobo. Manj prelivanja (pogostost in intenzivnost) pomeni manjšo prostornino zlitine, ki vstopa v livno votlino. Posledično je treba odvesti sorazmerno manj zraka, s čimer je mogoče doseči tudi optimalen notranji tlak livne votline ali vakuum.

Ob predpostavki, da imamo opraviti s kocko popolne oblike, bi razmerje med površino in prostornino znašalo 6 proti 1. S tem se za vsako enoto prostornine načrtovana površina poveča za šestkratnik. To povzroča sorazmerno napetost na delilno ravnino in lahko povzroča nastanek srhov. Nastanek srhov ima negativen vpliv tako na

2 The Vacuum Application Study

At the root of the solution lies the vacuum application study, in particular the runner and vacuum channel design, the filling time and the vacuum timing during the first and second phase. But in this multi-component process, all aspects must simultaneously work together to obtain the results desired. Die tightness is essential especially over the course of a production cycle. Loss of parallelism due to thermal deformation, loose sliders or seal degradation by flash or lack of maintenance are all factors that can greatly decrease vacuum performance.

Metal behaviour in the shot sleeve must also be controlled. Turbulences caused by the piston create air entrapment via wave-cresting at the gate which itself yields porosity. This can be circumvented with vacuum generation in the shot sleeve, avoiding a counter-piston, using a dynamic runner design and choosing the right evacuation system.

Overflows should also be kept to a minimum for a variety of reasons. The metal under great pressure entering the cavity will inherently degrade the die and reduce its lifetime. The lesser the overflow count and size, the lesser the alloy volume entering the cavity. Consequently the volume of air to be evacuated is proportionally smaller and an optimum cavity pressure, or vacuum, can be achieved.

Assuming a perfectly cubic shape, an overflow would have a surface-to-volume ratio of 6. Thus for each unit of volume its projected area increases six-fold. This puts proportional stress on the die part-line and can promote flash formation. Flash formation has both a negative effect on both vacuum generation in the cavity and die lifetime. Thus by keeping overflows volume and number to a minimum lowers

ustvarjanje vakuumu v livni votlini kot tudi na življenjsko dobo. Z omejitvijo prelivov - to je element livne votline, na minimum je mogoče znižati načrtovano območje, doseči optimalno vrednost vakuumu in zmanjšati obrabo.

Oblika vakuumskega kanala mora izpolnjevati ustrezne zahteve, da se lahko pravilno odvaja zrak. Pritrdilne točke morajo biti pravilno sidrane na mestih, ki bodo zapolnjena nazadnje. Neustrezna določitev teh mest lahko povzroči, da se povezava livne votline s prelivom zapolnijo še pred koncem polnjenja, in s tem preprečijo odvajanje. Razen tega mora biti prečni prerez glavnega vakuumskega kanala (vstopna stran) enak prečnemu prerezu naprave za odvajanje (vakuumski ventil). Da se prepreči učinek ozkega grla, mora biti vsaka raven povezave livne votline s prelivom, ki zagotavlja prenos proti zadnji točki polnjenja, večja od predhodne. Zagotoviti je treba tudi optimalno razmerje prostornine in geometrije kanala. Če je to razmerje premajhno, obstaja tveganje, da pride do zloma pri izmetu ulitka. V primeru prevelikega razmerja pa se lahko zlitina strdi še pred dosegom svoje omejitve.

Zelo pomemben dejavnik, ki zahteva pozornost, je deformiranje kokile. Zaradi tega je treba nastavitve izvesti pri delovni temperaturi.

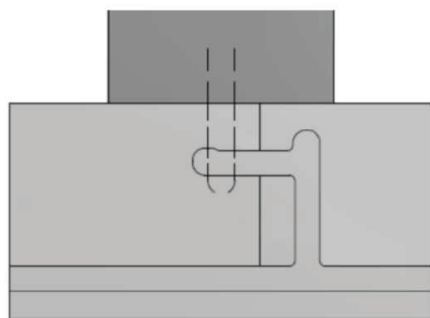
Ker fronta taline v vakuumskem okolju ni kompaktna ampak brizga, je treba to ustrezno upoštevati pri načrtovanju kanala. Pri tem se lahko uporabijo ukrivitve, ki preprečujejo vdor nečistoč v vakuumsko opremo, kondenziranje zlitine in povečanje/zmanjšanje hitrosti kovine.

2 Vakuumski ventil

Odvajanje atmosfere livne votline v zelo kratkem času polnjenja pomeni preprečevanje dejavnikov, ki povzročajo

projected area, yields better vacuum value and decreases die wear.

Vacuum channel design must also follow a proper set of rules to promote adequate air evacuation. The points of attachment should be anchored to the parts last filling points. Improper location would cause gate filling before the end of the injection and stop evacuation. Furthermore, the cross section of the main vacuum channel (inlet) must be that of the evacuation device (i.e. vacuum valve). Each gate level relaying to the last filling point must be greater than the preceding one to avoid a bottleneck effect. Channel volume and geometry must also be successfully balanced. Too small and the risk of breaking during part detachment can occur, but too large and the alloy can freeze before reaching its limit.



Slika 2: Generična oblika glavnega vakuumskega kanala, ki vodi k napravi za odvajanje (tj. vakuumski ventil)

Figure 2: Generic main vacuum channel design leading to the evacuation device (i.e. vacuum valve).

An important factor to observe is die deformation thus adjustments should be done at production temperature.

Finally, because metal in a vacuum environment does not have a compact metal front so one must be considered in channel

upor zapolnjevanja livne votline. Izbira naprave za odvajanje pri tlačnem litju je predmet odločitve podjetja, vendar je hladilni blok sam po sebi zasnovan tako, da ustavi napredovanje kovine, s tem ko fronta s povečevanjem upora zmrzne. Tej poti mora slediti tudi zrak, ki mora premagati enak upor. Izboljšana zasnova je kompromis med pretokom zraka in zastojem kovine (trapezoidni rob proti nazobčanemu robu), vendar se učinkovitost vedno poslabša zaradi oblike. Zato se pri tlačnem litju uporablja vakuumski ventil. Njegova kompaktna oblika in velik prečni prerez omogočata najučinkovitejše odvajanje.

Primerjava podobnih naprav kaže, da se opazovani notranji tlak brizganja pri uporabi ventila izboljša za faktor 2. Izračun je izveden na preklopni točki stroja za tlačno litje, ko je kovina na robu livne votline. Zrak se neposredno odsesava proti majhnemu uporu, ker se ventil aktivira prek signala iz stroja za tlačno litje (sistem z enim batom), ali neposredno s kinetično energijo staljene zlitine (sistem z dvema batoma).

Za vse ulitke (zlasti visokokakovostne), ki zahtevajo visoko raven vakuum, je sistem z dvema batoma primernejši, saj odvajanje lahko poteka vse do konca cikla polnjenja. Ko je potreben električni signal, se sproži »scenarij najboljšega predvidevanja«. Notranji tlak brizganja ima lahko negativen učinek z ustavitvijo popolnega odvajanja. Pri sistemu z dvema batoma se vakuum vzdržuje stalno, neodvisno od stanja polnjenja. Ker aktiviranje ventila določa kovina, je mogoče doseči najnižje možne notranje tlake brizganja. Takšna konfiguracija lahko prepreči neželen učinek nepopolnega odvajanja, ki povzroči mikroporoznost v zadnjih točkah polnjenja.

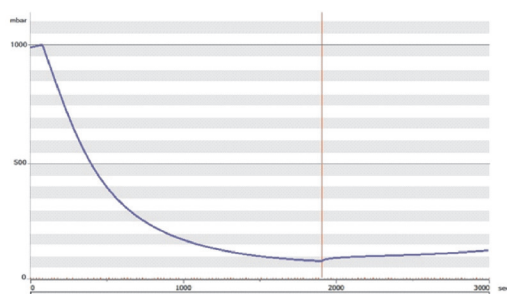
design. This can be done through bends to avoid impurities or particles to enter the vacuum equipment, condensate the alloy and increase or reduce metal velocity.

2 The Vacuum Valve

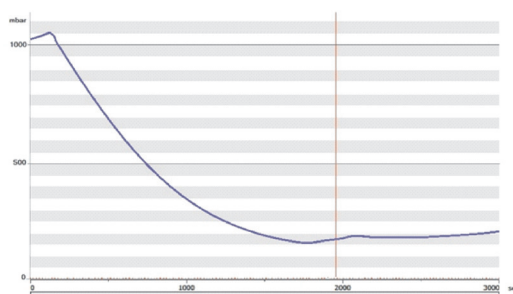
Evacuating the cavity during the very short injection time means avoiding factors creating resistance. The type of evacuation device used in die casting is matter of company philosophy but a chill-block type device is inherently designed to stop metal progression by freezing its profile by increasing resistance. Air must likewise follow this path and encounter the same resistance. Improved design find a compromise between air flow and metal stoppage (trapezoidal versus jagged-edge) but performance will always be impaired by design. Thus vacuum-assisted die casting is promoted by the use of a vacuum valve. Its compact design and large cross-section permit the largest evacuation.

When comparing similar devices, the observed cavity pressure when using a valve is improved by a factor of 2. This is calculated at the switch over point of the die casting machine when the metal is at the edge of the cavity. Air is directly aspirated encountering little resistance because the valve is activated by a signal from the die casting machine (1-piston system) or directly by the kinetic energy of the molten alloy (2-piston system).

For all castings, but especially those of high integrity requiring the optimal vacuum level, a dual-piston system is also superior because the evacuation can be performed until the very end of the injection cycle. When an electric signal is needed, a best-guess scenario is initiated. The pressure cavity is negatively affected by barring a complete evacuation. With a dual-piston



FONDAREX SUPERVAC Maxi (116 mm2), notranji tlak brizganja / cavity pressure 88 mbar at $t = 1,90$ s



FONDAREX SCS-100 Chill-block (112 mm2), notranji tlak brizganja / cavity pressure 176 mbar at $t = 1,94$ s

Slika 3: Primerjalna analiza dveh naprav za odvajanje s podobnim prečnim prerezom pri enaki postavitvi in enakih pogojih

Figure 3: Comparative analysis of two evacuation devices with similar cross section on an identical arrangement and conditions

3 Vakuumski rezervoar

Skupna prostornina, ki jo je treba odvesti, je večja od same livne votline, saj mora vključevati tudi ulivni sistem ter vakuumski kanal. To količino zraka je treba odvesti v kratkem času, ki je odvisen od izvedenih nastavitvev sistema litja in danih pogojev.

Zato je treba izbrati rezervoar bistveno večjih mer, s katerim se v danem času zagotovi nasprotni tlak za ustvarjanje vakuuma. Prostornina rezervoarja, ki omogoča 100-kratnik skupne prostornine volumna brizganja, pokriva najširši spekter aplikacij, vendar ne jamči notranjega tlaka brizganja 60 mbar. Za visokokakovostne ulitke, kot so konstrukcijski deli, je za doseganje optimalnega vakuuma priporočljivo namestiti rezervoar, ki omogoča 150-kratnik skupne prostornine volumna brizganja. S tem namenom so na trgu voljo vakuumski sistemi z rezervoarji s prostornino do 3000 litrov, ki zagotavljajo ustrezno podporo za izpolnitev zgoraj navedenih zahtev za velike ulitke.

Sveda je treba velikost črpalke in učinkovitost prilagoditi tako, da se zagotovi vzpostavitev vakuuma v rezervoarju pred

system, vacuum is continuously applied independently of the state of the injection. Since the metal dictates the activation of the valve, the lowest possible cavity pressures can be reached. An undesirable effect of incomplete evacuation is micro-porosity at the last-filling points and can be avoided by such configuration.

3 The Vacuum Tank

The total volume to be evacuated goes beyond the die cavity to include the shot sleeve, the runner and gate system and the vacuum channel. This amount of air, both at the pressure of the elevation of the foundry and temperature of the die must be cleared in the short time allowed by the casting system settings and conditions.

Thus a tank of significantly larger proportion must be installed to provide the counter pressure to reach vacuum in this period. A tank volume 100 times the total shot volume covers the widest range of applications, but a pressure cavity of 60 mbar is not guaranteed. For high integrity castings such as structural parts, 150 times

naslednjim polnjenjem. Sisteme z več vakuumskimi črpalkami s pretokom 160 m³/h je mogoče načrtovati na osnovi prostornine in stopnje polnjenja tako s tamponskim območjem, kakor tudi z upoštevanjem možnosti za nadgradnjo.

4 Možnosti za nadzor postopka

Sodoben vakuumski sistem mora vsebovati popoln nabor možnosti za nadzor postopka, s katerimi je mogoče izpolniti stroge zahteve litja in potrebe po sledljivosti. Odvisno od vakuumske tehnologije je treba izvajati manjše nastavitve, skupaj s pridobivanjem popolnih podatkov o proizvodnji.

Stalno merjenje vakuuma v livni votlini je bistvenega pomena za pridobivanje informacij o poteku praznjenja. Ustvarjena krivulja zmanjševanja tlaka v posodi označuje zmanjševanje tlaka s časom, medtem ko točka preklopa označuje tlak v livni votlini pred fazo polnjenja. Primerjalna analiza posameznih krivulj in posameznih vrednosti signalizira sprejemljivost in s tem povezan vpliv na kakovost. Vsak vbrizg mora biti standardiziran prek možnosti za nadzora opreme, prav tako pa mora neposredno sporočati rezultate.

Pred brizgom mora oprema sporočiti raven lastnega onesnaževanja prek nadzora profila. Ko je kokila zaprta, se v livno votlino polnjenja stisnjen zrak (6 bar) in izvrši se meritev povečanja tlaka. Nato zrak uide skozi polnilno odprtino ulivnega sistema. Če je vrednost izven dovoljenega odstopanja, to označuje blokado krivulje vakuuma zaradi preostanka kovine in pomeni nepravilno delovanje.

Ker kovina v vakuumskem okolju nima fronte taline, se lahko ostanki kovine odsesajo po vakuumskem vodu in s tem zamašijo opremo. Zato je treba po vsakem vbrizgu nadzorovati onesnaženost. Stisnjen

the total shot weight is recommended to achieve the best vacuum value. For this reason, vacuum systems with tanks up to 3000 l have been introduced to the market to assist large castings in meeting the aforementioned requirements.

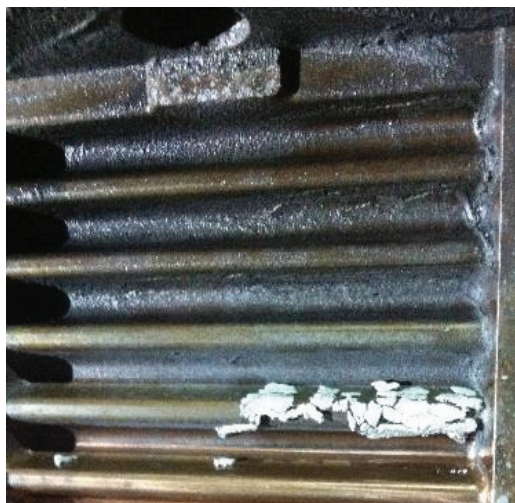
Of course, the pump size and efficiency must be adjusted to allow vacuum recovery in the tank prior to the next injection. Devices with multiple 160 m³/h vacuum pumps can be designed based on the volume and rate of injection with both a buffer zone and upgradability.

4 Process Control Capabilities

To meet the stringent casting requirements and traceability needs, a modern vacuum system must include a complete set of process control capabilities. Minor adjustments must be made based on the vacuum application alongside a full of acquisition of production data.

Continuous measurement of vacuum in the cavity is essential in order to provide information on the behaviour of the evacuation. The decay curve generated indicates the decrease in pressure over time while the switch over point designates the pressure in the cavity before the filling phase. A comparative analysis of each curve and each vacuum value signals variability and thus an impending effect on quality. Each shot must be standardized by the equipment's control capability and directly communicate its results.

Prior to a shot, the equipment must signal its pollution level via a profile control. With the die closed, compressed air (6 bar) is injected into the cavity and the increase in pressure is measured. The air then escapes through the filling hole of the shot sleeve. An out of tolerance value indicates that the



Slika 4: Zmrznjeni kovinski delci v profilu naprave za odvajanja, ki predstavljajo onesnaženje sistema

Figure 4: Frozen metal particulates lodged in the evacuation device profile constituting system pollution

zrak (6 bar) se polni v livno votlino pri odprti kokili z namenom, da se lahko odmašijo končni delci ali da je vsaj mogoče opaziti oviro v kanalih za vakuum sistem. To je zlasti pomembno pri uporabi konfiguracije s hladilnim blokom (Chill-Block). Ker prost material v profilu zmrzne, lahko delci zlahka potujejo mimo filtra in dosežejo vod.

Nizka vrednost vakuuma je tudi znak blokade sistema. Če je kanal za vakuum sistem zamašen, lahko vakuumska oprema izvrši le odvajanje pred oviro. Pri tem je treba upoštevati, da je raven onesnaženja zelo visoka. Zaradi potrebe po povečanem nadzoru postopka je treba ovrednotiti dopolnilno analizo podatkov.

5 Vlaga

Ob izpostavljenosti aluminija vodi poteče hidroliza, zato nastaja aluminijev oksid, iz katerega izhaja vodik v plinasti obliki. Na molekularni ravni se vodik izloča iz taline in ustvarja poroznost katere površina je oksidirana. V strukturi ulitka se lahko pojavljajo oksidne plasti, ki v nano merilu spreminjajo lastnosti ulitkov, zato se lahko

vacuum line is blocked by metal residue and thus will not perform properly.

Because in a vacuum environment metal does not have a compact front, it is possible that metallic residues get aspirated up the vacuum line and clog the equipment. Therefore, after each shot, a pollution control must be performed. Compressed air (6 bar) is injected in the cavity with the die open so finite particles can be dislodged or at least line obstruction can be alerted. This is particularly important when using a chill-block configuration. Since the loose metal freezes in the profile, it is easy for particles to travel past the filter and into the line.

A low vacuum value is also an indicator of system blockage. When the line is clogged, the vacuum equipment will only evacuate prior to the obstruction. However pollution levels will be very high. Thus complementary data analysis must be evaluated hence the need for increased process control capabilities.

5 Moisture

When subjected to water, aluminium causes hydrolysis transforming into aluminium oxide and generating hydrogen gas. At the molecular level, hydrogen gas will be expelled from the lattice yielding oxide porosity. Nanoscale properties of oxide layers will appear in the metal structure and the part ductility can decrease. Residual

poslabša duktilnost ulitka. Do tega pojava lahko pride zaradi preostale emulzije s katero se brizga orodje ali zaradi netesnosti drsnikov kokile. Posledično se kakovost ulitka zmanjša in prestopi dovoljena odstopanja litja.

V izogib temu se uporablja nadzor vlage kot nedavni dosežek napredka v vakuumski tehnologiji. Koncentrirano brizganje, ki se uporablja v okviru prizadevanj za varovanje okolja in povečanje gospodarnosti, je omogočilo ulivanje velikih delov s prostornino le nekaj milimetrov na posamezen vbrizg. Na primer, tanke stene z debelino manj kot 2 mm, so za toplotno obdelavo primerne le, če so brez vsakršne poroznosti. Zato je treba za natančen nadzor vlage zagotoviti zanesljive merilne naprave kot dodaten ukrep v nadzoru proizvodnje. To je mogoče doseči z uporabo tipala, ki izračunava raven vlage za vsak vbrizg z ustrezno analitično ločljivostjo.

6 Sklep

Tlačno litje je podvrženo destruktivnemu razmerju zraka in kovine. Ker se obnašata kot tekočine, je treba vedenje obeh materialov upoštevati in ga razumeti že med načrtovanjem visokokakovostnih ulitkov, npr. za konstrukcijske dele. Trg delov za avtomobilsko industrijo v Evropi raste in bo po pričakovanjih stabilno rasel še naslednjih 5 let. Da bi se industrija tlačnega litja lahko pripravila na potrebe prihodnosti, mora razumeti tehnologijo vakuumskega litja in njenih sestavnih delov, saj bo le tako lahko zadostila potrebam in nadaljevala rast.

Uvajanje tehnologije vakuumskega litja vključuje tehnični premislek z vseh vidikov litja, ki se začnejo z optimalno investicijo v opremo. Vakuumiranje livnih votlin zahteva brezhibno zatesnjen sistem, ki brez kakovostne kokile ni mogoč.

spraying fluid or leakage from the die slides can be the cause of this event. The result is a decrease in part quality outside of casting tolerances.

A recent advance in vacuum technology has been humidity monitoring to counter this additional challenge. Furthermore, concentrated spraying used for environmental and economical consideration has allowed casting of large parts with spraying volumes down to a few millilitres per shot. For instance, thin-walls down to less than 2 mm necessitate a complete lack of internal porosity when subjected to heat-treatment. Thus, precise examination of humidity levels requires reliable instrumentation for an additional level of production control. This can be achieved via the use of a sensor calculating the moisture level for each shot with the adequate analytical resolution.

6 Conclusion

Pressure die casting faces the destructive but unavoidable relationship between air and metal. Both acting as fluids, the behaviour of both materials must be considered and understood when contemplating high integrity castings such as structural parts. The market for automotive parts die casting is on the rise in Europe and is expected to maintain a steady growth for the coming 5 years. As the die casting industry prepares itself for these future needs, it must understand vacuum technology and its constituents to meet demand and continue growth.

Vacuum implementation includes technical considerations in all aspects of die casting starting from optimal equipment investment. Cavity evacuation demands a tightly sealed system unavoidable without a quality die. Process validation is done

Potrjevanje postopka se izvaja z nadzorom vakuumskega cikla, konsistentnost proizvodnje pa je mogoče doseči le z ustrezno opremo. Nenazadnje prispeva filozofija partnerskega sodelovanja k pridobivanju izkušenj, ki so pri vsakodnevem soočanju z izzivi industrije neizbežne, ob tem pa je treba upoštevati tudi nenehno povečevanje okoljske ozaveščenosti. Podjetje Fondarex, ki deluje že 70 let, ob svoji inovativni vakuumski tehnologiji nenehno predstavlja inovacije na področju opreme in storitev po meri strank. Strokovno znanje podjetja Fondarex obsega celoten spekter aplikacij za uspešen prenos vakuumske tehnologije na področje tlačnega litja.

via the control of the vacuum cycle while production consistency is achieved with the correct equipment. Finally, the philosophy of partnership acquisition will contribute to an experience gain, inevitable when faced with an industry setting challenges daily and with ever-increasing environmental consciousness in mind. For the past 70 years Fondarex has been on the edge of vacuum technology delivering continuous innovations both in equipment and customer-oriented services. Fondarex's know-how spans the entire range of applications for a successful vacuum implementation to the die casting process.

Določanje toplotnih lastnosti eksotermno - izolacijskih materialov

Determination of thermal properties of exothermic-insulating materials

Povzetek

Eksotermno – izolacijski materiali se uporabljajo kot pomožni material v jeklolivarnah, livarnah železovih litin, livarnah neželeznih zlitin in drugod. Materiali z eksotermnim in/ali izolacijskim delovanjem se med seboj razlikujejo po sestavi, eksotermnem učinku, izolacijskih sposobnostih, vžigni temperaturi, načinu izdelave in drugih lastnostih. Za učinkovito uporabo takšnih materialov moramo poznati toplotne lastnosti in eksperimentalne tehnike za doseganje ustreznih lastnosti v procesu izdelave.

Za kontrolo eksotermno - izolacijskih materialov ni predpisanih preiskovalnih metod, ki bi omogočale določanje toplotnih lastnosti, zato tudi ni standardiziranega sistema za njihovo določanje. Načrtovana in izdelana je bila naprava za industrijsko kontrolo preiskovanih materialov. Z diferenčno termično analizo (DTA) podrobno raziskujemo toplotne lastnosti surovin in izdelanih eksotermno - izolacijskih materialov z namenom optimiranja in umeritve industrijske naprave v podjetju Exoterm-IT d.o.o.

Abstract

Exothermic-insulating materials are used as auxiliary materials in steel foundries, cast iron foundries, non-ferrous foundries and elsewhere. Materials with exothermic and/or insulating function differ in composition, exothermic effect, insulating ability, ignition temperature, method of manufacture and other properties. For effective use of such materials, the manufacturer should be familiar with thermal properties and experimental techniques to achieve the appropriate characteristics at the manufacturing process.

To control an exothermic-insulating material no special investigation techniques are prescribed, which allow the determination of thermal properties, so there is no standardized system for their determination. For the industrial control, the device for investigated materials was developed and designed. Using the differential thermal analysis (DTA) the thermal properties of raw materials and manufactured exothermic-insulating materials were investigated, with an aim to optimize and calibrate the industrial device in Exoterm-IT d.o.o.

1 Uvod

Raziskano je bilo področje toplotnih lastnosti eksotermno-izolacijskih materialov, ki se uporabljajo kot pomožni materiali v jeklolivarnah, livarnah železovih litin, livarnah neželeznih zlitin in drugje. Tovrstni materiali imajo lahko eksotermno, izolacijsko ali kombinirano delovanje. Delovanje je odvisno od njihove sestave in eksotermnih reakcij, ki potekajo v materialu ob segrevanju. Za pravilno dimenzioniranje velikosti eksotermnih oziroma izolacijskih oblog, ki omogočajo kontrolirani potek strjevanja, je potrebno določiti sproščeno toploto med eksotermnim delovanjem in izolacijski učinek. Materiali z eksotermno-izolacijskim delovanjem se med seboj razlikujejo po sestavi, eksotermnem učinku, izolacijskih sposobnostih, vžigni temperaturi, načinu izdelave in še v nekaterih drugih lastnostih. Za učinkovito uporabo teh materialov moramo poznati njihove toplotne lastnosti in eksperimentalne tehnike za določanje le-teh. Za doseganje ustreznih toplotnih lastnosti v procesu izdelave je potrebno uvesti procesno kontrolo izdelkov, saj se pri proizvodnji zaradi nehomogenosti in spremembe kakovosti posameznih surovin lahko le-te hitro spremenijo. Za kontrolo eksotermno-izolacijskih materialov ni predpisanih posebnih preiskovalnih metod, ki bi omogočale določitev toplotnih lastnosti, zato tudi ni standardiziranega sistema za njihovo določanje. Z diferenčno termično analizo surovin in izdelanih eksotermno-izolacijskih materialov smo podrobno raziskali toplotne lastnosti materialov in jih med seboj primerjali z namenom umeritve ter optimiranja industrijske kontrolne metode za določanje toplotnih lastnosti v podjetju Exoterm-IT d.o.o.

1 Introduction

The thermal properties of exothermic-insulating materials were investigated, which are used as auxiliary materials in steel foundries, cast iron foundries, non-ferrous foundries and elsewhere. These types of materials can have exothermic, insulating function or combination of both. Its function differs regarding their composition and exothermic reactions, which occur during heating. For accurate design of exothermic or insulating lining, that enables controlled solidification, it is necessary to determine the heat released during the exothermic operation, and the insulating effect. Materials with exothermic-insulating function differ in composition, exothermic effect, insulating ability, ignition temperature, method of manufacture and other properties. For effective use of such materials, the manufacturer should be familiar with thermal properties and experimental techniques to achieve the appropriate characteristics at the manufacturing process. To achieve adequate thermal properties during the manufacturing process the introduction of process control of the products is required due to inhomogeneities and changes in the quality of individual raw material that can quickly change the thermal properties at the manufacture. To control the exothermic-insulating materials no special investigative technique that would allow the determination of thermal properties is prescribed, so there is no standardized system for their determination. Using the differential thermal analysis of raw materials and manufactured exothermic-insulating materials the thermal properties of materials were investigated in depth and compared with each other with the purpose of calibration and optimization of industrial control methods for determining the thermal properties in the company Exoterm-IT d.o.o.

2 Teoretični del

Eksotermno-izolacijski materiali se že dolgo uporabljajo v jeklolivarnah, livarnah železovih litin in drugod. Kombinacija materialov, ki se uporablja za izdelavo eksotermno-izolacijskih materialov lahko deluje eksotermno, izolacijsko ali kombinirano. Toplota, ki se sprošča pri eksotermni reakciji, in izolacijska sposobnost teh materialov zmanjšujeta oziroma upočasnjujeta odvajanje toplote iz taline v okolico in s tem zmanjšujeta hitrost ohlajanja oziroma podaljšujeta čas strjevanja taline. Pri klasičnem litju jekla v ingote tako z uporabo tovrstnih materialov za ogrevanje glav ingotov dosežemo manjšo krčilno poroznost v ingotu. V livarnah se eksotermno-izolacijske materiale uporablja za napajalnike, ki so zaradi večjega izkoristka taline lahko manjši. Eksotermno-izolacijski materiali morajo zadostiti zahtevam na področju eksotermnega učinka, izolacijskih sposobnosti, trdnostnih lastnosti, ognjevarnosti in oblike končnih izdelkov. Za kakovost materiala je potrebno spremljati tudi produkte eksotermnih reakcij kot so: prašni ostanek, nastali plini s prašnimi delci in pripekanje. (1; 2)

Večina eksotermno-izolacijskih materialov je izdelanih iz več sklopov mešanic (3):

- aktivnih komponent (aluminija, fluoridov, nitridov, oksidov),
- veziv (smole, gline, škroba, vodnega stekla),
- različnih polnil (kremenčevega peska, riževih plev, celuloznih vlaken),
- izolacijskih vlaken (tervolnih vlaken, isofax vlaken, mineralna volna).

Eksotermni materiali so sestavljeni iz materialov, ki ob določenih pogojih eksotermno reagirajo. Eksotermni reaktant, običajno aluminij ali magnezij, zgorita delno

2 Theoretical

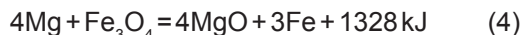
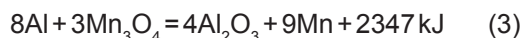
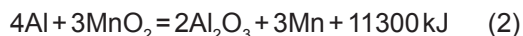
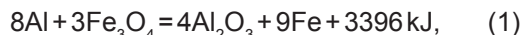
Exothermic-insulating materials are being used in steel foundries, cast iron foundries, and elsewhere. The combination of various materials that are being used for exothermic-insulating materials can have exothermic or insulating function or combination of both. The heat released at the exothermic reaction and the insulating ability of these materials reduce or slower heat release from the melt to the surroundings, and thereby reduce the cooling rate and prolong the solidification time of the melt. At the traditional casting of steel ingots the use of such materials for heating of ingot heads, lower shrinkage porosity in the ingot is achieved. In the foundry the exothermic-insulating materials are used for power supplies, which can be reduced, due to increased utilization of the melt. Exothermic-insulating materials must meet requirements in the field of exothermic effect, the insulating ability, strength properties, refractory properties and to form a finished product. The quality of the material must be accompanied by an exothermic reaction product such as powder residue, resulting gases with dust particles. (1; 2)

Most of the exothermic-insulating materials is produced from more multi-component mixtures: (3)

- active component (aluminium, fluoride, nitrides, oxides),
- binders (resins, clay, starch, water glass),
- different fillers (silica sand, rice husks, cellulose fibres),
- insulating fibres (tervol fibres, isofax fibres, mineral wool).

Exothermic materials are made of materials which under certain conditions react exothermically. Exothermic reactant, usually aluminium or magnesium, burn

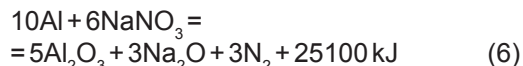
s kisikom iz zraka, delno pa s trdimi nosilci kisika, kot so: Fe_3O_4 , Mn_3O_4 , Fe_2O_3 , Ba_2O , itn. V takem sistemu nastopajo naslednje reakcije:



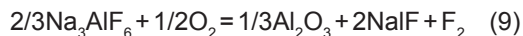
V primerih, ko mešanica vsebuje večji delež aluminija, ga nekaj reagira tudi s kisikom iz zraka:



Za aktivacijo zgornjih reakcij je potrebno dodati dodatke, ki delujejo katalitično in v sistem dovajajo potrebno aktivacijsko energijo. Za ta namen se v mešanico dodaja zmesi nitridov (NaNO_3 in KNO_3) in fluoridov (Na_3AlF_6 , NaF , KF in CaF_2). V temperaturnem območju med 300 – 600 °C nitridi reagirajo z aluminijem in zaradi sproščanja toplote aktivirajo preostalo zmes v skladu z naslednjo reakcijo (3):

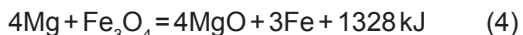
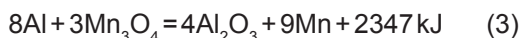
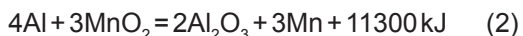
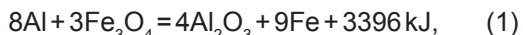


Prisotnost fluoridov pospeši potek reakcij in nekoliko poveča eksotermni učinek mešanice. Ob tem pa potečejo naslednje reakcije (1):



Osnovni namen toplotno izolacijskih materialov je zmanjšanje prehoda toplote iz taline v okolico. To dosežemo z izolacijskimi materiali, ki imajo čim nižjo toplotno prevodnost in so odporni do temperatur, pri katerih se uporabljajo. V mešanice eksotermno-izolacijskih materialov se dodaja različna izolacijska vlakna, kot so

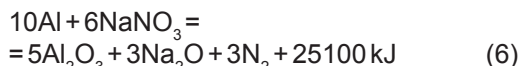
partially with oxygen from the air, and partially with solid carriers of oxygen, such as Fe_3O_4 , Mn_3O_4 , Fe_2O_3 , Ba_2O , etc. In such a system, the following reactions perform:



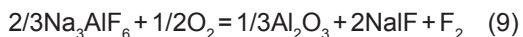
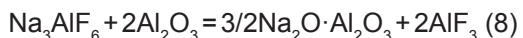
In cases where the mixture contains a major proportion of aluminium, it also reacts with the oxygen from the air:



To activate the above reactions, it is necessary to add additives which act catalytically and supply required activation energy to the system. For this purpose, a mixture of nitrides (NaNO_3 and KNO_3) and fluorides (Na_3AlF_6 , NaF , KF and CaF_2) are added to the mixture. In the temperature range 300–600 °C nitrides react with the aluminium and, due to release of heat, activate the remaining mixture in accordance with the following reaction (3):



The presence of fluoride accelerate the reactions and slightly increases exothermic effect of the mixture. At the same time the following reactions take place (1):

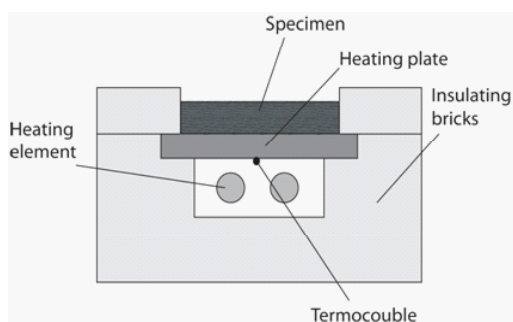


The basic purpose of the thermal insulation material is to reduce heat transfer from the melt to the surroundings. This is achieved by insulating materials having the lowest possible thermal conductivity and by being resistant to the temperatures at which they are used. In a mixture of an exothermic-

tervolna in isofax vlakna. Izolacijska vlakna materialu poleg boljših izolacijskih lastnosti zaradi svoje strukture izboljšajo žilavost in znižajo gostoto izdelkov (4).

3 Opis naprave in meritev

Za doseganje ustreznih toplotnih lastnosti je potrebna kontrola izdelkov, saj se pri proizvodnji zaradi nehomogenosti in spremembe kakovosti posameznih surovin lahko toplotne lastnosti hitro spremenijo. Za kontrolo eksotermno-izolacijskih materialov ni predpisanih posebnih preiskovalnih metod, ki bi omogočale določitev toplotnih lastnosti, zato tudi ni standardiziranega sistema za njihovo določevanje. Namen dela je bil izdelati industrijsko kontrolno metodo EXOPROBE, ki omogoča načrtovanje in razvoj eksotermno-izolacijskih materialov, ter procesno kontrolo izdelkov (slika 1 in 2). Kontrolna metoda deluje na principu vzdrževanja stacionarnega temperaturnega stanja z meritvijo in kontrolo moči grelnih elementov. Iz pridobljenih rezultatov nato izračunamo toplotne lastnosti materialov.



Slika 1: Shema kontrolne metode EXOPROBE

Figure 1: Scheme of control method EXOPROBE

Na sliki 1 je prikazana shema naprave, ki jo sestavljajo grelni elementi, grelna plošča, izolacijske opeke in termoelementa.

insulating material different insulating fibres are added, such as tervol and isofax fibres. Insulating fibres, in addition to the improved insulation properties due to its structure, improve toughness of the material and reduce the density of the product (4).

3 Device and measurement description

To achieve adequate thermal properties a product control is needed. During the manufacture, changes in the quality of individual properties can quickly change the thermal properties due to inhomogeneities of the material. To control the exothermic-insulating materials no special investigative technique, which would allow the determination of thermal properties, is prescribed, whereas no standardized system for their determination exists. The purpose of this work was to create an industrial control method EXOPROBE, allowing the design and development of an exothermic-insulating materials and process control of the products (Figure 1 and 2). The control method operates on the principle of maintaining the stationary state of the temperature measurement and the power control of the heating elements. From the obtained results the thermal properties of the materials are calculated.

Figure 1 shows the scheme of the device, consisted of heating elements, a heating plate, insulating brick, and a thermocouple. The temperature of the heating plate and the power of the heating elements are measured. Measurements are captured and processed by a EXOPRO computer program. For the calculation of the test results the most important is the diagram of power regarding the time (Figure 3).



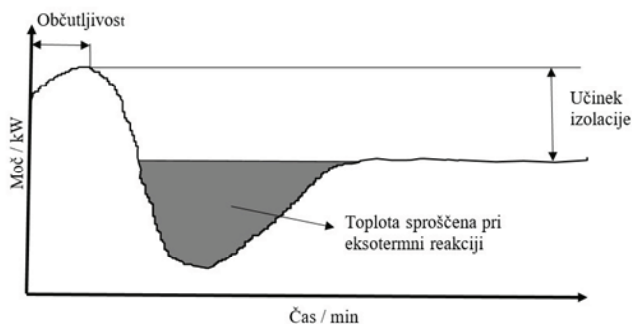
Slika 3: Shema prikaza grafa odvisnosti moči grelnih elementov od časa

Figure 3: The graphic presentation of the correlation between the power of heating elements and time



Slika 2: a) Kontrolna metoda za eksotermno-izolacijske materiale EXOPROBE b) s postavitvijo vzorca

Figure 2: a) The control method for the exothermic-insulating materials EXOPROBE b) and the specimen



Merimo temperaturo grelne plošče in moč grelnih elementov. Meritve zajemamo in obdelamo z računalniškim programom EXOPRO. Za izračune rezultatov preizkusa je najpomembnejši graf odvisnosti moči od časa (slika 3).

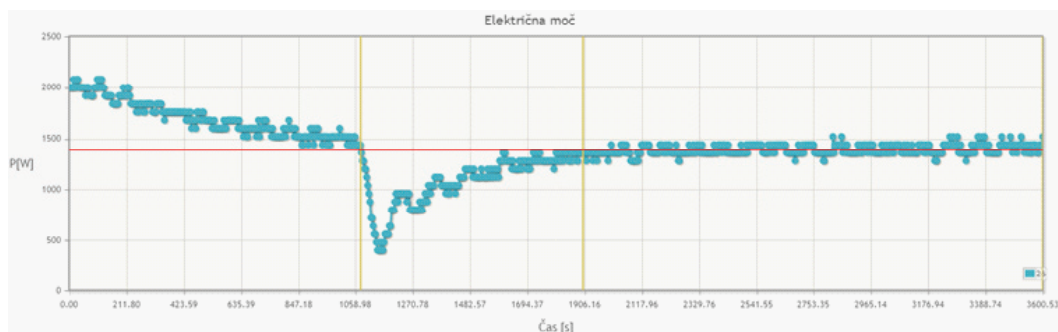
4 Rezultati meritev

Najpomembnejši rezultat analize eksotermno-izolacijskega materiala s kontrolno metodo EXOPROBE in programskim paketom EXOPRO je graf odvisnosti moči od časa (slika 4).

4 Results

The main result of an exothermic-insulating material analysis with the control method EXOPROBE and EXOPRO programme package is a plot of power as a function of time (Figure 4). From the measured results the sensitivity of the exothermic reaction, the burning time, the insulating capability and the energy value of the sample is calculated.

In the diagram (Figure 4) three time zones are shown. The area up to 1060 s (first yellow line) represents heating of the sample and the time until the beginning of



Slika 4: Graf odvisnosti električne moči od časa za analizo eksotermno-izolacijskega materiala EXIPP

Figure 4: The diagram shows the correlation between electrical power and time for the analysis of an exothermic-insulating material EXIPP.

Iz izmerjenih rezultatov izračunamo občutljivost na eksotermno reakcijo, čas gorenja, izolacijsko sposobnost in energijsko vrednost vzorca.

Iz zgornjega grafa so razvidna tri časovna območja. Območje do 1060 s (prva rumena črta) predstavlja ogrevanje vzorca in čas do začetka eksotermnih reakcij. V drugem območju, med 1060 s in 1900 s (med rumenima črtama), potekajo eksotermne reakcije. V tem območju se med krivuljo in rdečo črto izračuna površina eksotermnega vrha in sproščeno toploto vzorca. Zadnje območje v primerjavi z začetnimi pogoji predstavlja učinkovitost izolacije vzorca.

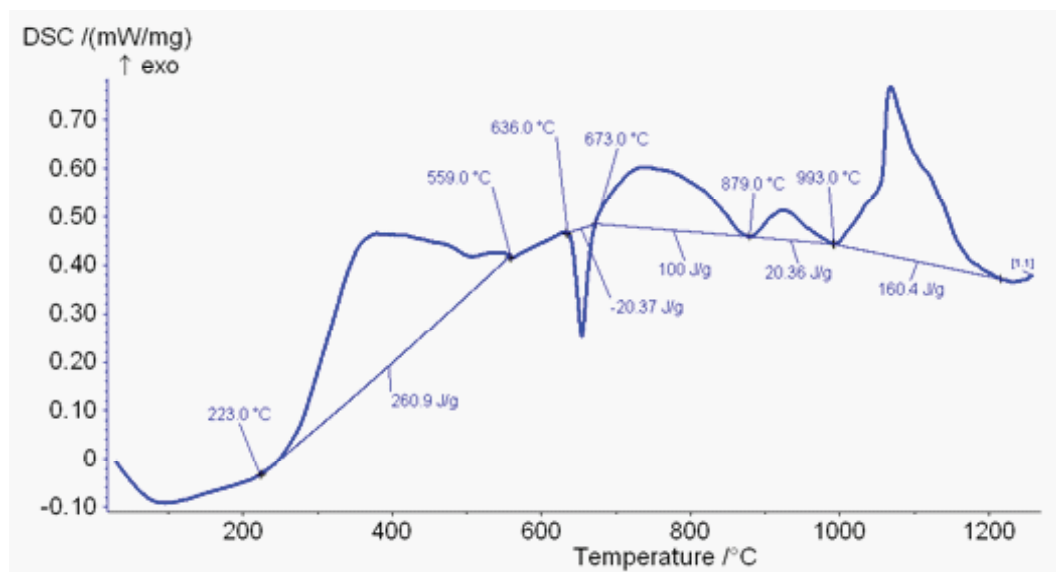
Z diferenčno termično analizo (DTA) smo raziskali toplotne lastnosti surovin in izdelanih eksotermno-izolacijskih materialov. Na sliki 5 je prikazana ogrevalna DTA krivulja eksotermno-izolacijskega materiala EXIPP, ki smo jo opravili na aparaturi STA 449 Jupiter podjetja NETZSCH.

Iz krivulje je razvidno, da v temperaturnem območju med 223 in 559 °C potekajo eksotermne reakcije nitridov in fluoridov ter zgorevanje veziva. Sproščena toplota teh reakcij znaša 260,9 J/g. Pri 636

exothermic reactions. In the second area, from 1060 s to 1900 s (between the yellow lines), the exothermic reaction is taking place. In this area, between the curve and the red line, the surface of exothermic peak and the heat released of the sample is calculated. The last field regarding the initial conditions represents the insulating effect of the sample.

Using the differential thermal analysis (DTA) thermal properties of raw materials and manufactured exothermic-insulating materials were studied. Figure 5 shows the heating DTA curve of exothermic-insulating material EXIPP, which was made on the apparatus STA 449 Jupiter from NETZSCH Company.

From this curve in Figure 5 it is evident that in the temperature range between 223 and 559 °C the exothermic reaction of nitrides, fluorides, and the combustion of the binder are taking place. The released heat of these reactions is 260.9 J/g. At 636 °C the aluminium begins to melt and then at 673 °C reacts with the oxygen from the solid carriers of oxygen and atmosphere. The exothermic reactions of aluminium release 280.8 J/g of heat.



Slika 5: Diferenčna termična analiza eksotermno-izolacijskega materiala EXIPP

Figure 5: Differential thermal analysis of exothermic-insulating material EXIPP

°C se začne taliti aluminij, ki nato pri 673 °C reagira s kisikom iz trdnih nosilcev kisika in atmosfere. Eksotermne reakcije aluminija sprostito 280,8 J/g toplote.

5 Zaključki

Namen je bil izdelati industrijsko kontrolno metodo, ki omogoča načrtovanje in razvoj eksotermno-izolacijskih materialov ter procesno kontrolo izdelkov. Kontrolna metoda EXOPROBE deluje na principu vzdrževanja stacionarnega temperaturnega stanja grelné plošče z meritvijo in kontrolo moči grelnih elementov. Iz pridobljenih rezultatov nato izračunamo toplotne lastnosti materialov.

Eksotermno-izolacijske materiale smo podrobno raziskali z diferenčno termično analizo (DTA). Pri tem smo določili toplotne lastnosti eksotermno-izolacijskih materialov in jih uporabili za umerjanje

5 Conclusions

The purpose of the work was to develop industrial control method that allows planning and development of the exothermic-insulating materials, and the process control of the products. EXOPROBE control method works on the principle of maintaining the fixed temperature state of the heating plate by measuring and controlling the power of the heating elements. From the obtained results the thermal properties of materials are calculated.

Using the differential thermal analysis (DTA) the thermal properties of the exothermic-insulating materials were investigated. The results obtained with the DSC analysis were used for the calibration of the industrial control methods EXOPROBE, which already experimentally runs in the Exoterm-IT d.o.o. company.

industrijske kontrolne metode EXOPROBE,
ki že poskusno deluje v podjetju Exoterm-IT
d.o.o.

Literatura / Reference

1. Thermodynamic properties of exothermic insulating materials. Gontarjev V., Medved J., Čevka J. 1997, Fifth International Conference on Clean Steel.
2. Williams, T.J., Hardin, R.A., and Beckermann, C., "Characterization of the Thermophysical Properties of Riser Sleeve Materials and Analysis of Riser Sleeve Performance," in Proceedings of the 69th SFSA Technical and Operating Conference, Paper No. 5.9, Steel Founders' Society of America, Chicago, IL, 2015.
3. B. Lipowska*, J. Witek, K. Stec. Aluminium dross-based insulating and. Archives of Foundry Engineering. 2010.
4. Brown, John R. Foseco Ferrous Foundryman's Handbook. 2000.

Visoko in nizko legirana indefinitna železova litina: vpliv na mehanske lastnosti in mikrostrukturo

High and low alloyed indefinite chill cast iron: impact on mechanical and microstructural properties

Povzetek

Kljub nenehnemu razvoju novejših, obstojnejših materialov za izdelavo delovnih plasti valjev za vroče valjanje ostaja indefinitna železova litina (ICDP) med bolj priljubljenimi in cenovno ustreznimi zlitinami. Najpogostejša uporaba ICDP litin je v primeru običajnih kontinuirnih valjarskih prog za valjanje v vročem (HSM) ter v primeru bluming in steckel ogrodij. K izboljšanju obstojnih lastnosti ICDP litin pripomore dodatek posebnih karbidotvornih elementov, kot so vanadij, niobij, titan in volfram. V tej raziskavi je predstavljen vpliv dodatka omenjenih elementov na razvoj mikrostrukture in mehanskih lastnosti (obrabna obstojnost, dinamična trdnost in odpornost na termično utrujanje). Rezultati kažejo, da se ob višjem dodatku karbidotvornih elementov (nad 1 mas. %) izboljšajo tako obrabna obstojnost, dinamična trdnost ob nižjih ciklih, kot tudi odpornost na termično utrujanje v smislu zmanjšanja števila in gostote termičnih razpok. Hkrati rezultati natezne trdnosti ne kažejo bistvenih razlik. Po drugi strani lahko visok dodatek karbidotvornih elementov vpliva na manjši delež izločenega grafita kot tudi na nastanek izjemno dolgih razpok, ki lahko vodijo do težav med valjanjem. Valji so po meri izdelani ulitki prilagojeni valjarskim pogojem posameznih naročnikov. Pri izdelavi takih izdelkov moramo upoštevati način in količino dodatka karbidotvornih elementov. Rezultati predstavljene raziskave lahko pomagajo pri doseganju zastavljenih parametrov.

Ključne besede: indefinitna železova litina, mikrostruktura, liti valji, vroče valjanje, obraba, utrujanje

Summary

As newer and improved materials are being constantly developed, indefinite chill cast iron (ICDP) remains one of the most suitable and cost efficient alloys used in cast rolls for last finishing stands of standard HSM, blooming or Steckel mills. Improvements of the ICDP alloy can be made by adding special carbide builders (SCB) such as vanadium, niobium, titanium and tungsten. The impact of these additions on microstructural development and mechanical properties of the ICDP working layer (wear resistance, dynamic strength and thermal fatigue resistance) has been studied. Research shows that by adding a higher amount (> 1 %, mass. fraction) of SCB wear resistance, dynamic strength at low cycles and thermal fatigue resistance in terms of reducing the number and density of cracks improved. Meanwhile tensile strength does not seem to change significantly. On the other hand, high SCB addition can inhibit graphite formation as well as cause severely long thermal cracks which can lead to problems during roll exploitation. As rolls are tailored to meet specific mill

conditions, a decision on the amount of SCB added must be made. Results of the presented study can help choose the appropriate amount in regards to the mill's demands.

Key words: indefinite chill cast iron, microstructure, cast rolls, hot rolling, wear, fatigue

1 Uvod

Pogoji na zadnjih ogrojdih v kontinuirnih valjarnah za vroče valjanje so zahtevnejši od začetnih ogrojdih, zato je potreba po izboljšanju odpornosti na zlepljanje toliko bolj izražena. Melirana hipoevtektška sestava t. i. prilagojene Ni-hard zlitine dopolnjuje sestavo bele železove litine z izločki grafita. Na ta način se zagotovi dobre lastnosti proti zlepljanju kljub zmanjšanju obrabne obstojnosti materiala, ki je posledica prisotnosti mehkejšega grafita [1]. Kroglasti grafit je bistven pri zagotavljanju zadostnega maziva, s katerim se zmanjša koeficient trenja. Hkrati igra pomembno vlogo pri preprečevanju širjenja razpok v vročem. Indefinitna železova litina (angl. Indefinite Chill Double Pour, krajše ICDP) poleg prostega grafita vsebuje tudi visok delež cementita (nad 30 %) večinoma v obliki ledeburita z matrico iz transformiranega in zaostalega avstenita [2, 3]. Med različnimi stehiometričnimi oblikami karbidov ima cementit sorazmerno nizko trdoto, zato se pri izboljšanju obrabne obstojnosti med vročim valjanjem poslužujemo modifikacije običajne ICDP litine s posebnimi karbitvornimi elementi za doseganje trših oblik karbidov.

Ugoden vpliv dodatka posebnih karbidotvornih elementov (angl. Special Carbide Builders, krajše SCB) je predstavljen v mnogih raziskavah [2, 4-6]. Dodajanje vanadija, titana, niobija in volframa povzroča izločanje evtektških MC karbidov znotraj železove matrice [4]. Ti karbidi so poznani po svoji trdoti, majhni velikosti in razpršeni porazdelitvi znotraj materiala. Obstajata dva

1 Introduction

Rolling conditions in the last finishing stands of standard hot strip mills are more demanding compared to earlier stands. As such, the demand for good anti-sticking properties in rolls is highlighted. The mottled hypoeutectic Ni-hard material combining white cast iron microstructure along with free graphite flakes enables good anti-sticking properties despite the decrease in wear resistance due to the softer graphite phase [1]. Nodular graphite is essential in providing sufficient lubrication for lowering friction and has a vital role in heat crack prevention. Besides free graphite flakes, ICDP microstructure consists of a high cementite ratio (above 30 %) mainly in the form of ledeburite, with a matrix consisting of transformed and retained austenite [2, 3]. Cementite has a relatively low hardness amongst carbides, so in order to increase wear resistance during hot rolling, modification of standard ICDP grade is made to obtain harder carbides.

Several studies have reported on the benefits of special carbide builder (SCB) addition [2, 4-6]. Addition of vanadium, titanium, niobium and tungsten enables precipitation of eutectic MC-type carbides inside the iron matrix [4]. These carbides are known for their hardness, small size and dispersed distribution. Two different technologies of adding special carbides into a standard ICDP alloy exist: the first one relies on addition of existing carbides directly into the melt and the second method relies on alloying, controlled solidification and precipitation [3, 7, 8]. Ready-made

načina dodajanja posebnih oblik karbidov v ICDP litino: kot dodajanje že obstoječih karbidov v tekočo zlitino tik pred ulivanjem ali v obliki zlitinskih dodatkov in izločanja preko kontroliranega strjevanja [3, 7, 8]. Že obstoječi posebni karbidi so cenovno zelo neugodni in težko dostopni, zato je doseganje ustrezne porazdelitve le-teh skozi strjevanje in izločanje bolj učinkovita rešitev. Kot smo pokazali v že objavljenem delu [8], dovolj visok dodatek SCB-jev (npr. vanadij in volfram) vodi v strjevanje preko dodatne eutektske reakcije, skozi katero dosežemo izločanje karbidov MC tipa iz taline. Po drugi strani dodajanje SCB-jev lahko vpliva na znižanje deleža izločenega grafita v korist višjega deleža metastabilnega cementita. S prilagojenim cepljenjem taline se doseže izločanje grafita v kroglasti obliki, kar je v primerjavi s kosmičastim grafitom, ki ga običajno najdemo v standardnih ICDP litinah, bolj ugodno s stališča zaustavljanja razpok.

Raziskave opravljene na jeklenih litinah z visoko vsebnostjo kroma kažejo, da širjenje utrujenostnih razpok poteka po meji med matrico in karbidi [9, 10]. Visok delež karbidov v ICDP litinah zato ni ugoden s stališča odpornosti na nastanek in širjenje razpok. Ob tem se pojavi vprašanje: koliko odpornosti na razvoj in širjenje razpok lahko kot proizvajalci valjev žrtvujemo na račun doseganja boljše obrabne obstojnosti ter hkrati obdržimo zahtevano končno trdoto materiala in zadosten delež grafita? Na dveh izboljšanih ICDP litinah za delovne plasti valjev je bila zato opravljena študija, ki se osredotoča na razvoj mikrostrukture, lastnosti natezne trdnosti, dinamične trdnosti, obrabne obstojnosti in odpornosti na termično utrujanje v odvisnosti od deleža dodanih SCB-jev. Cilj predstavljene študije je prepoznati pozitivne in negativne posledice dodatka SCB-jev med proizvodnjo litih valjev.

special carbides are an expensive raw material, so achieving dispersed carbides through solidification and precipitation is a more efficient solution. As we had indicated in previously published work [8] a high enough addition of SCB (i.e. vanadium and tungsten) results in a eutectic reaction, where eutectic MC-type carbides are precipitated from the melt. In turn, SCB alloying can inhibit graphite formation in favour of the metastable cementite eutectic reaction. By adjusting melt inoculation, a more nodular graphite form is achieved. This is in stark contrast to the interdendritic graphite found in a standard ICDP and should work in favour of reducing crack propagation.

Research conducted on fatigue cracking and crack propagation in high chromium steel shows that the most favourable path of crack propagation is via the carbide-matrix boundary [9, 10]. A high carbide ratio in ICDP does not work in its favour and increasing this ratio could worsen the material's crack resistance. This leads to a dilemma: how much crack resistance can the roll designer risk losing in order to achieve a better wear resistance while retaining a high enough hardness and graphite ratio to meet the user's demands? A study of two ICDP alloy grades used in working layers for rolls was conducted to determine microstructural properties, static tensile strength and resistance to fatigue with dynamic loading, wear resistance and resistance to thermal cracking in dependence on the amount of added SCB. The aim of this research is to shed some light on the benefits and downsides of SCB addition in cast roll production.

2 Experimental methodology

A comparison was made between two separate grades of alloyed ICDP to

2 Eksperimentalno delo

Za ugotavljanje vpliva dodatka različnih količin SCB-jev na razvoj mikrostrukture in mehanskih lastnosti je bila opravljena primerjava med dvema izboljšanima ICDP litinama. Nizko legirana ICDP litina nosi oznako CIND in vsebuje manj kot 1 mas. % dodatka SCB, medtem ko ima visoko legirana ICDP (z oznako CINA) dodatek večji od 1 mas. %. Kemijska analiza izbranih zlitin je bila opravljena z emisijskim spektrometrom znamke Spectrolab. Rezultati so predstavljeni v Tabeli 1.

Vzorci, na katerih je bila opravljena metalografska analiza z meritvami mehanskih lastnosti, so bili odvzeti iz segmenta delovne plasti centrifugalno ulitega valja. Razrezani so bili z uporabo vodne abrazije, s čimer se je preprečil morebitni nastanek toplotno vplivanih con na vzorcih.

Metalografska analiza je bila opravljena na brusih, ki so predstavljali presek po celotni globini delovne plasti valja. Obrusi so bili pripravljeni s standardnim postopkom brušenja s SiC brusnim papirjem (granulacije 120, 350 in 500) in polirani s sintetično krpo z 2 μm diamantno pasto. Analiza je potekala z optičnim mikroskopom znamke Olympus BX51M opremljenim z Olympus DP-12 kamero. Kvantitativna metalografska analiza je zahtevala uporabo programa JMicroVision v.1.2.7.

Vzorci za določanje natezne in dinamične trdnosti so bili ravno tako odrezani iz segmenta delovne plasti valja

determine the impact of SCB amount on microstructural development and mechanical properties. The low alloyed ICDP grade is labelled CIND and has an SCB amount less than 1 % mass. fraction while the high alloyed (enhanced) ICDP grade is labelled CINA with an SCB amount greater than 1 %. Chemical composition of the analysed material was measured using a spark ignition spectrometer from the producer Spectrolab (mean results are presented in Table 1).

The samples used for metallographic examination and mechanical testing were taken from a segment of the working layer from a centrifugally cast roll. The samples were cut using abrasive water blast technology to prevent the formation of heat affected zones.

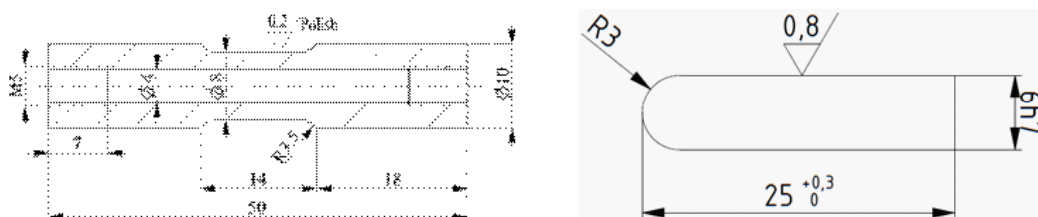
Metallographic analysis was performed on cross sectional samples throughout the working layer thickness. The samples were ground using SiC grinding paper with 120, 350 and 500 grit sizes and polished using a synthetic cloth with 2 μm diamond paste. They were inspected under an Olympus BX51M optical microscope equipped with an Olympus DP-12 camera. Microstructure was evaluated using JMicroVision v.1.2.7 software.

Samples for static tensile strength and fatigue testing were likewise cut from the working layer section and prepared according to the ISO 6892-1 and DIN 50113 standards, respectively [11, 12]. Testing was performed on the Zwick/Roell tester at the Faculty of Mechanical Engineering

Tabela 1: Kemijska sestava izbranih izboljšanih ICDP litin

Table 1: Chemical composition range of the analysed ICDP materials

Oznaka litine / Roll Grade	Element, mas. % / mass fraction %					
	C	Si	Cr	Ni	SCB	Fe
CIND	3.0 – 3.2	0.90 – 1.2	1.50 – 1.70	4.20 – 4.50	0.5 – 1.0	Ost. / Bal.
CINA	3.0 – 3.2	1.30 – 1.6	1.50 – 1.70	4.20 – 4.50	1.0 – 2.0	Ost. / Bal.



Slika 1: a) Oblika in dimenzije preizkušancev za določanje odpornosti na termo-mehansko utrujanje, b) Preizkušanec za določanje odpornosti na obrabo z metodo valjček-plošča

Figure 1: a) Shape and dimensions of the thermal fatigue testing specimen, b) Sample for pin-on-disc wear resistance test

in pripravljeni po ustreznih standardih ISO 6892-1 in DIN 50113 [11, 12]. Samo testiranje je bilo opravljeno na napravi Zwick/Roell na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru v normalni atmosferi pri 20 °C pri obremenitvenem razmerju $R = -1$, ki predstavlja čisto izmenično napetost.

Za namen preiskave odpornosti na termično utrujanje sta bili opravljeni dve seriji testiranj na termo-mehanskem simulatorju Gleeble 1500D [13, 14]. Testiranje je potekalo na Naravoslovnotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani. Na Sliki 1a so prikazane dimenzije preizkušancev.

Test za odpornost na abrazijsko obrabo je bil opravljen v podjetju Valji, d. o. o. z uporabo metode valjček-plošča. Izgradnja naprave kot tudi priprava preizkušancev (Slika 1b) in sama meritev so bili opravljeni po ASTM G99-04 standardu [15]. Disk s 120 μm SiC brusnim papirjem je predstavljal ploščo. Hitrost preizkusa je znašala 0.25 m/s z 1000 m opravljene poti ob obremenitvi 10 N. Preizkus je bil opravljen v normalni atmosferi ($T = 21\text{--}23$ °C; ~ 55 % relativna vlažnost zraka) brez uporabe maziv (prisilno hlajenje z zrakom).

Vsi opisani preizkusi so bili opravljeni na toplotno obdelanih vzorcih.

at University of Maribor under normal atmosphere at 20 °C with a loading ratio of $R = -1$.

To investigate the working roll surface layer material behaviour subjected to thermal fatigue cracking phenomenon, two different tests using the Gleeble 1500D thermo-mechanical simulator were performed [13, 14]. Testing was performed at the Faculty of Natural Sciences and Engineering at University of Ljubljana. The shape and dimensions of the specimens are presented in Figure 1a.

Abrasive wear testing was performed at Valji, d. o. o. using a custom made pin-on-disc tribometer. The design of the machine as well as sample preparation (see Figure 1b) and the measurement itself was done according to the ASTM G99-04 standard [15]. The disc was composed of a 120 μm SiC grinding paper. The testing speed was 0.25 m/s with a 1000 m sliding distance and a testing load of 10 N. The test was conducted under normal atmosphere ($T = 21\text{--}23$ °C; ~ 55 % relative air humidity) without the use of a lubricant (cooled with pressurized air).

All tests were conducted on heat treated specimens.

2 Rezultati in diskusija

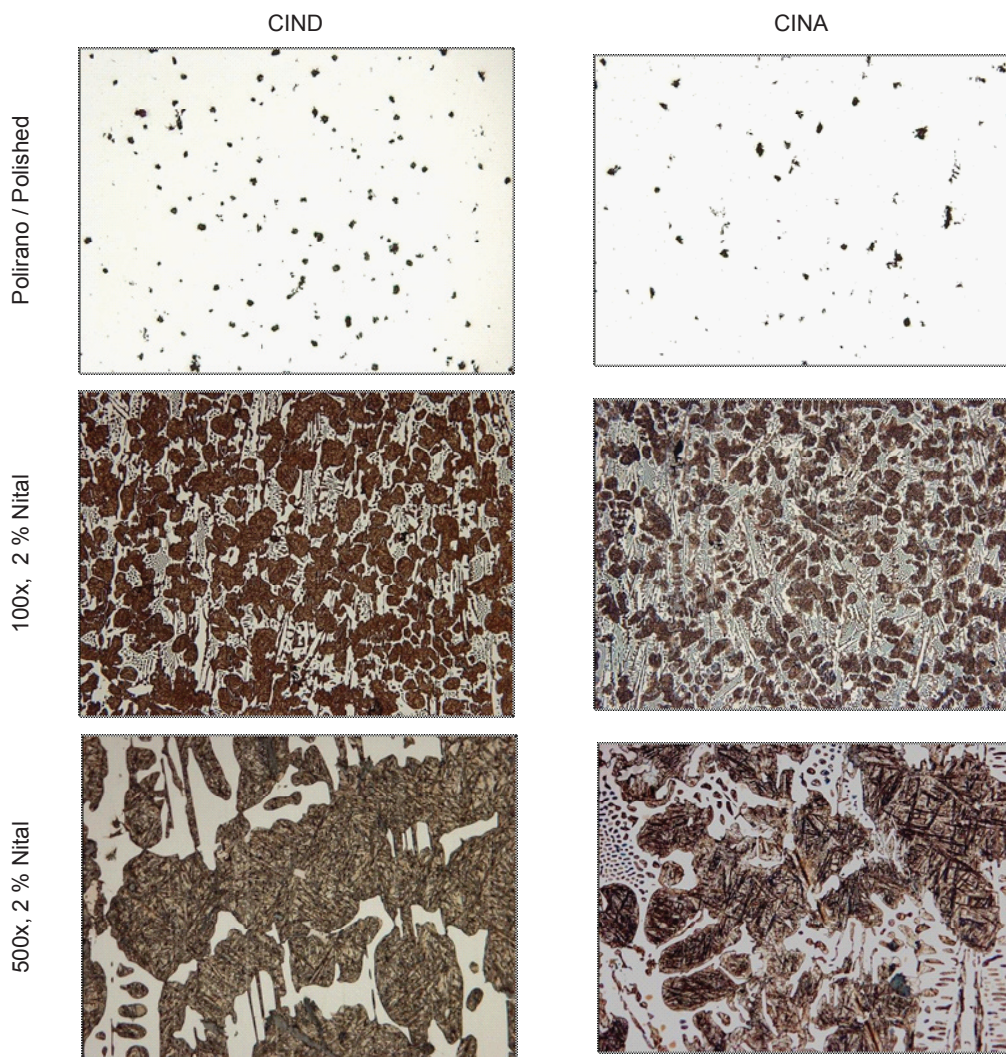
2.1 Metalografska analiza

Na Sliki 2 so prikazani optični mikroposnetki nizko legirane CIND in visoko legirane CINA.

2 Results and discussion

2.1 Metallographic analysis

Figure 2 shows optical microphotographs of heat-treated low alloyed CIND and high alloyed CINA grade.



Slika 2: Primerjava mikrostruktur med nizko (CIND) in visoko legirano ICDP litino (CINA)

Figure 2: Comparison of microstructure between low alloyed (CIND) and high alloyed ICDP grade (CINA)

Opazimo lahko razliko v mikrostrukturi med primerjanima kvalitetama ICDP litin. V obeh primerih prihaja do izločanja kroglastega grafita (oblika V to VI po ISO 945-1-2009 standardu [16]), vendar z višjim dodatkom SCB-jev delež izločenega grafita pade v korist tvorbe cementita. To opažanje potrjuje kvantitativna analiza opravljena na vzorcih (Tabela 2).

Rezultati, prikazani v Tabeli 2, se skladajo z običajno mikrostrukturom ICDP litin; pokaže se povišanje deleža grafita in sočasno znižanje deleža cementita od zunanega roba delovne plasti proti globini. Poleg tega je v primeru nizko legirane CIND delež grafita za 0.5 do 0.7 % višji (približno 30 % povišanje), medtem ko je delež cementita do 4 % nižji. To kaže na zaviralni učinek dodatka visokega deleža SCB-jev na izločanje grafita. Matrica po žarjenju je pri obeh analiziranih kvalitetah martenzitno-bainitna.

2.2 Dinamična trdnost

V primeru nizko legirane CIND izmerjena natezna trdnost znaša 484.6 MPa, pri visoko legirani CINA pa 474.0 MPa. Glede na nizko absolutno razliko med rezultatoma (10 MPa) lahko trdimo, da med litinama ni opaznejših razlik.

Na Sliki 3 sta prikazani Wohlerjevi krivulji za obe analizirani litini.

Rezultati kažejo na podoben trend pri obeh litinah. Pri nizkih ciklih ($N < 105$) visoko legirana CINA doseže nekoliko višje napetosti (~ 30 MPa) v primerjavi z nizko legirano CIND. Trend, ki se kaže na krivuljah na Sliki 3, nakazuje na boljše dinamično trdnost pri nizkih ciklih ob višjem dodatku SCB-jev.

A difference in microstructure between the two ICDP grades is visible, Figure 2. Nodular-type graphite flakes are precipitated in both cases (form V to VI acc. to ISO 945-1-2009) [16]. However, with a higher amount of SCB added, the graphite ratio decreases in favour of cementite formation. A quantitative metallographic examination supports this assumption (shown in Table 2).

Tabela 2: Kvantitativna metalografska analiza nizko in visoko legirane ICDP litine; primerjava med zunanjim robom delovne plasti in 40 mm v globino

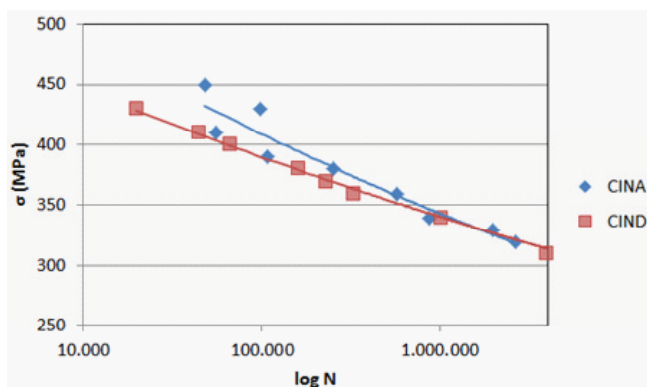
Table 2: Quantitative metallographic analysis of low and high alloyed ICDP grades; comparison between the outer edge of the working layer and 40 mm in depth

	Delež grafita (%) / Graphite ratio (%)		Delež karbidov (%) / Carbide ratio (%)	
	Rob / Edge	40 mm	Rob / Edge	40 mm
CIND	1.53	1.92	30	26
CINA	1.08	1.25	29	30

The results shown in Table 2 are as expected for a standard ICDP microstructure; an increase in graphite ratio and decrease in carbide ratio from the outer edge towards the centre of the roll. Furthermore, low alloyed CIND has a 0.5 to 0.7 % higher ratio of graphite (app. 30 % increase) and up to 4 % less cementite. This shows the inhibitory nature of high SCB addition on graphite precipitation. After annealing, both grades show a matrix microstructure consisting of tempered martensite and bainite.

2.2 Fatigue testing under dynamic loading

The measured static tensile strength is 484.6 MPa for the low alloyed CIND and



Slika 3: Wohlerjevi krivulji za visoko in nizko legirani ICDP litini testirani pod pogoji: 20 °C in obremenitveno razmerje $R = -1$

Figure 3: S-N curves of high and low alloyed ICDP grades under testing conditions: temperature of the test 20 °C and loading ratio $R = -1$

2.3 Odpornost na termično utrujanje

Testiranje na termično utrujanje je bilo načrtovano tako, da simulira specifične pogoje, ki so prisotni na valjarskih progah za vroče valjanje. Testni cikel je tako vključeval: uporovno gretje vzorca s sobne temperature na 600 °C (2 s), držanje na temperaturi (0.2 s), hlajenje z vodo (0.5 s), hlajenje na zraku (0.5 s) in prisilna izpraznitev vzorca z zrakom (0.2 s). Predpisane temperature so bile določene na podlagi industrijskih pogojev. Opravljena je bila serija testov, ki jo je sestavljalo 1000 opisanih ciklov. Na Sliki 4 so prikazane termične razpoke, ki so nastale med serijo testov v obeh litinah.

Slika 4: Optični mikroposnetki razpok, ki so nastale med testiranjem termičnega utrujanja: v nizko legirani CIND (a, b) in visoko legirani CINA (c, d)

Rezultati kažejo, da širjenje razpok poteka skozi ledeburit, večinoma po mejah med karbidom in matrico. Te razpoke so transkristalne po izvoru. V nekaj primerih so bile opažene tudi interkristalne razpoke ob kristalnih mejah. Razpoke so se v nekaterih primerih, ko so naletele na kroglasti grafit, celo zaustavile. V Tabeli 3 so zbrane karakteristične meritve razpok.

Karakteristike razpok kažejo na izboljšanje v odpornosti na termično utrujanje

474.0 MPa for high alloyed CINA. With a difference of 10 MPa we can state that there is no significant difference in the static tensile strength between the two analysed grades.

Figure 3 shows the results of fatigue measurement under dynamic loading for both analysed grades.

Results shown in Figure 3 indicate a similar fatigue trend for both grades. However, at low cycles ($N < 10^5$) the high alloyed CINA reached somewhat higher stress levels (~ 30 MPa) compared to the low alloyed CIND. The trend observed in the S-N curves indicates that increasing the amount of added SCB can improve the material's resistance to fatigue at low cycles.

2.3 Thermal fatigue resistance

The performed thermal fatigue testing cycles were designed to simulate specific conditions that the working layer is subjected to during hot rolling. As such, a cycle comprised of resistance heating from room temperature up to 600 °C (2 s), holding on the prescribed temperature (0.2 s), water cooling (0.5 s), air cooling (0.5 s) and emptying the specimen by using air pressure (0.2 s). The prescribed temperatures and times were evaluated from

v primeru visoko legirane CINA. Skupno število in gostota razpok sta se znižali za 20 %. To je v nasprotju s pričakovanjem, da bo višji delež karbidov poslabšal odpornost na termično utrujanje. Sklepamo lahko, da višji dodatek SCB-jev dodatno utrdi trdno raztopino avstenita (in posledično transformacijska produkta martenzita in bainita), kar poveča odpornost matrice na sam nastanek termičnih razpok.

Čeprav sta se število in gostota razpok zmanjšali, je v primeru visoko legirane CINA izmerjeno največje število ekstremno dolgih razpok (daljših od 0.5 mm). To bi lahko bila posledica nižjega deleža grafita v CINA, če upoštevamo zaviralni učinek kroglastega grafita na širjenje razpok. Nastanek teh ekstremno dolgih razpok med vročim valjanjem vodi do večjih odvzemov pri brušenju med posameznimi vgradnjami v valjarni in posledično do slabše učinkovitosti valja (pogosto merjeno v prevaljanih tonah na milimeter delovne plasti, ton/mm). V kolikor se te dolge razpoke ne odpravijo v celoti, lahko napredujejo globlje v delovno plast, kar vodi v krušenje oz. v najhujšem primeru (v kombinaciji z neugodnimi pogoji na progi) celo do luščenja delovne plasti valja. Zaradi tega se visoko legirana CINA smatra kot nekoliko bolj občutljiva litina in zahteva večjo pozornost operaterja, da temeljito odpravi razpoke, ki se pojavijo na površini valja med obratovanjem.

2.4 Odpornost na abrazijsko obrabo

Na Sliki 5 so predstavljeni rezultati meritev z metodo valček-plošča.

Z diagrama je razvidno, da se odpornost na obrabo povečuje od zunanjega roba delovne plasti proti globini, kar je lahko posledica spremembe v mikrostrukturi. Med strjevanjem pri postopku centrifugalnega ulivanja se tvori dve specifični območji:

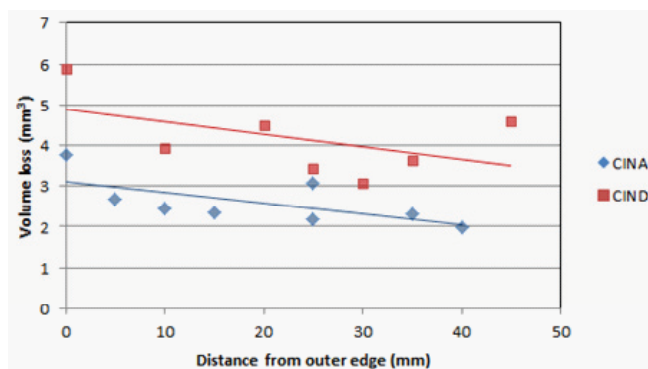
Crack measurements show an improvement in thermal fatigue resistance for the high alloyed CINA. The total number and density of cracks decreased for about 20 %. This contradicts the assumption that a higher carbide ratio would lessen the material's thermal crack resistance. We may assume that through SCB addition, the solid solution of austenite (and therefore martensite and bainite) is enhanced thus increasing the ability of the matrix to withstand crack initiation.

Although the number and density of cracks decreased, the high alloyed CINA showed the highest number of extremely long cracks (longer than 0.5 mm). This may be the result of a lower graphite ratio in CINA, since graphite nodules have been known to halt crack propagation. Formation of these long cracks during hot rolling automatically causes a higher grind rate in the mill and consequently a loss in roll efficiency (often measured in tons rolled per millimetre of working layer, ton/mm). If left unchecked, these long cracks can propagate further into the working layer and may cause chipping or in worst case scenarios, coupled with inappropriate mill settings, even spalling. This can make the high alloyed CINA a somewhat more sensitive material and requires mill operator's care to completely remove any thermal cracks that may have formed during rolling.

2.4 Abrasive wear resistance

Results of the pin-on-disc measurements are presented in Figure 5.

As can be seen in Figure 5, abrasive wear resistance increases from the outer edge towards the centre of the roll. This can be explained with an alteration of microstructure. During the course of centrifugal casting, two distinct zones



Slika 5: Rezultati abrazivne obrabe z metodo valjček-plošča za obe analizirani ICDP kvaliteti

Figure 5: Results of the pin-on-disc abrasive wear measurement for both analysed ICDP grades

dendritno območje tik ob stiku s kokilo in enakoosno območje v globini plasti [17]. Mikrostruktura se zaradi heterogene nukleacije med strjevanjem udobni, zato lahko pričakujemo večje število bolj drobnih MC karbidov v globini plasti. Slednje ravno tako prispeva k izboljšanju obrabne obstojnosti materiala. Ker CINA litina vsebuje višji dodatek SCB-jev, je v splošnem delež MC karbidov pričakovano višji. Rezultati potrjujejo, da je zaradi tega CINA litina bolj obrabno obstojna na abrazijo.

3 Zaključki

Rezultati predstavljene študije kažejo na merljive razlike med primerjanima ICDP litinama za delovne plasti valjev. Na podlagi meritev lahko zaključimo:

- višji dodatek SCB-jev zavira izločanje grafita celo do 20 % v korist višjega deleža cementita. Izločen prosti grafit, ki v standardnih ICDP kvalitetah privzame kosmičasto meddendritno obliko, se v primeru izboljšanih legiranih litin izloča v kroglasti obliki;
- meritev dinamične trdnosti je pokazala trend boljše trdnosti pri nizkih ciklih v primeru visoko legirane ICDP litine. Rezultati natezne trdnosti ne kažejo opaznih razlik med nizko in visoko

are formed: a dendritic zone near the mould-melt interface and an equiaxed zone towards the centre of the roll [17]. As the microstructure is refined through the process of solidification, more refined and distributed MC-type carbides can be expected further into the working layer. This in turn increases the wear resistance of the material. As the CINA grade is highly alloyed the ratio of hard MC-type carbides is therefore higher, making it the more wear resistant material.

3 Conclusions

Results of this study reveal a difference between high and low alloyed ICDP grades used for working layers in rolls. Based on numerous analyses and testing several conclusions can be made:

- Higher SCB addition inhibits graphitization for up to 20 % in favour of the cementite phase. Free graphite flakes, commonly interdendritic in standard ICDP grades, take a more nodular form in alloyed ICDP.
- Fatigue measurement under dynamic loading shows a trend of increasing fatigue resistance at low cycles for high alloyed ICDP compared to low alloyed ICDP. No significant difference

- legirano litino;
- visoko legirana ICDP litina je pokazala boljšo odpornost na razvoj termičnih razpok v primerjavi z nizko legirano litino (nižje skupno število in nižja gostota razpok). Po drugi strani se je pokazala nagnjenost k tvorbi ekstremno dolgih razpok (daljših od 0.5 mm), ki lahko povzročajo težave med valjanjem;
- odpornost na abrazijsko obrabo se povečuje od zunanje roba delovne plasti proti globini najverjetneje zaradi spremembe (udrobnitve) v mikrostrukturi. Visoko legirana ICDP litina je pokazala do 35 % boljšo odpornost na obrabo kot nizko legirana.

V primeru specializiranih valjarn z dobro nastavljenimi parametri valjanja lahko priporočamo visoko legirano izboljšano ICDP litino zaradi boljših mehanskih lastnosti odpornosti na obrabo in termo-mehansko utrujanje. Po drugi strani bi v starejših valjarnah s širokim izborom valjanih kvalitete priporočali nižje legirano izboljšano ICDP litino zaradi višjega deleža grafita in bolj robustnih lastnosti.

was observed in static tensile strength measurement.

- High alloyed ICDP showed a higher resistance to thermal crack formation compared to low alloyed ICDP (lower total number of cracks formed along with a lower crack density). However there is a tendency to form extremely long cracks (longer than 0.5 mm) which can cause problems during the roll's exploitation.
- Abrasive wear resistance increases from the outer edge of the working layer towards the centre of the roll due to microstructure refinement. The high alloyed ICDP showed an increase in wear resistance for about 35 %.

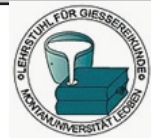
In the case of a highly specialized rolling mill with finely tuned mill settings, a high alloyed ICDP can be recommended for its improved wear and fatigue resistance. In the case of older mills or mills with a wider range of rolled grades, a low alloyed ICDP can be recommended due to its high graphite ratio and robust properties.

4 Viri / References

- [1] J. Asensio-Lozano, J.F. Álvarez-Antolín, Saturated fractional design of experiments: Toughness and graphite phase optimizing in Nihard cast irons, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 17, Nr. 2, 2008, p. 216-23
- [2] G. Huang, Z. Li, J. Tang, Y. Tian, Effect of chemical composition on the microstructure of carbide reinforced indefinite chilled rolls, *ISIJ International*, Vol. 51, Nr. 6, 2011, p. 939-44
- [3] J.B. Mess, G.E. Lee (ed.), *Rolls for the Metalworking industries: The metallurgy of indefinite chill cast iron*, Iron and Steel Society, Warrendale USA, 2002, p. 574
- [4] J. Lecomte-Beckers, J. Tchoufang Tchoundjang, *Structural Investigations of Solidification and Heat Treatments Influence on High Alloyed Cast Irons Grades with Nb-V-Ti Additions*, Defect and Diffusion Forum, Vols. 289-292, 2009, p. 77-86

-
- [5] J. Tinoco, Akers AB, Centrifugally cast roll for last finishing stands in hot strip mills, Patent nr. EP 2 660 344 A1, 2012, Sweden.
 - [6] B.S. Villanueva, K. Yamamoto, K. Ogi, Influence of Nb and V on the microstructure of Ni-hard type cast iron for hot steel strip mill, CAMP-ISIJ, Vol. 17, 2014, p. 718-21
 - [7] D. Wragg, P.H. Hewitt, J. Nutting, Engineering Ferrous Metals and Method of making thereof, Patent nr. 5,720,830, 1998, UK.
 - [8] U. Klančnik, J. Habjan, G. Klančnik, J. Medved, Thermal analysis of indefinite chill cast iron modified with ferrovanadium and ferrotungsten, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, (online) 2016, DOI 10.1007/s10973-016-5434-6
 - [9] M. Drobne, T. Vuherer, I. Samardžič and S. Glodež, Fatigue crack growth and fracture mechanics analysis of a working roll surface layer material, Metallurgy, Vol. 53, Nr. 4, 2014, p. 481-84
 - [10] M. Drobne, N. Gubelj, S. Godež, Experimental determination of fatigue parameters of high chromium steel under different loading and temperature conditions, Technical Gazette Vol. 21, Nr. 4, 2014, p. 853-860
 - [11] ...ISO 6892-1:2016, Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature
 - [12] ...DIN 50113, Testing of metals; Rotating bar bending fatigue test
 - [13] M. Terčelj, M. Fazarinc, P. Mrvar, B. Žužek, P. Fajfar, Modelling surface degradation in hot rolling work rolls, RMZ – Materials and geoenvironment, Vol. 61, Nr. 1, 2014, p.11-17
 - [14] M. Drobne, I. Kogovšek, U. Klančnik, P. Fajfar, Influence of alloying elements on thermal fatigue cracking phenomenon of working rolls, 10th International and 7th European Rolling Conference, Graz, Austria, 2016
 - [15] ...ASTM G99-04, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus
 - [16] ...ISO 945-1:2008, Microstructure of cast irons – Part 1: Graphite classification by visual analysis
 - [17] U. Klančnik, M. Drobne, B. Košec, P. Mrvar, J. Medved, Effect of melt superheat on the microstructural development of centrifugally cast high carbon high speed steel alloy, 15th International Foundrymen Conference, Opatija, Croatia, 2016

AKTUALNO / CURRENT



61. Avstrijsko livarsko posvetovanje

V organizaciji Avstrijskega livarskega inštituta ÖGI, Avstrijskega društva livarskih strokovnjakov VÖG ter Katedre za livarstvo Univerze za montanistiko Leoben LfG MUL, je v času od 27. do 28. aprila v podjetju FILL GmbH v Gurtenu, Avstrija, potekalo 61. Avstrijsko livarsko posvetovanje.

Posvetovanje je potekalo pod geslom: »Sodobni livarski procesi za zahtevo po lahkih elementih«.

Predavatelji iz Avstrije, Nemčije, Švice in Madžarske so podali skupaj 23 predavanj, od tega 9 plenarnih ter po 7 predavanj v sekciji železovih litin ter v sekciji neželeznih zlitin. Skupno se je posvetovanja udeležilo 303 udeležencev iz osmih držav. Na spremljajoči razstavi opreme, tehnologij, izdelkov in razvojnih dosežkov je sodelovalo 40 razstavljalcev iz Nemčije, Avstrije, Švice in Italije. Organizatorji so pripravili zbornik s povzetki vseh predavanj ter seznamom razstavljalcev in udeležencev. Podajamo naslednje kratke povzetke vseh plenarnih ter nekaterih zanimivejših predavanj iz obeh sekcij:

Andreas Fill, iz podjetja **Fill GmbH Gurten, Avstrija** je predstavil aktualno temo: »**Nov digitalen svet dela –princip CORE**«. Industrija 4.0 je v zadnjih letih posebno aktualen pojem. V ospredju je odnos med stroji in sistemi. Prihajamo v obdobje zelo dinamičnega procesa dela. Realen in digitalen svet je potrebno uskladiti in se postavlja vprašanje ali bo človek obvladal tako usklajen sistem. Ne glede na dejavnost je potrebno v ospredje postaviti človeka. Samo tako bo možno izkoristiti vse potencialne in zagotoviti mrežne povezave brez sistemskih napak. Software je osnova za smiselno filozofijo podjetja, kjer se izpostavlja princip Core kot sistem zaupanja v lastne sposobnosti in vrednote, kar je zasnovano na znanju in človeški vztrajnosti doseganja končnih rezultatov.

Thomas Rathner, prav tako iz podjetja **Fill GmbH, Avstrija**, je podal za razvoj livarstva zelo zanimivo predavanje: »**Novi postopki litja in naprave za litje aluminija**«. Izpostavil je ergonomijo kot ključen faktor za učinkovito delo. Izkušnje iz konvencionalnega gravitacijskega litja je podjetje Fill uporabilo tudi v nizkotlačnem in protitlačnem postopku. Pri protitlačnem litju izpostavlja enostavnejše posluževanje naprave in zelo majhno stopnjo mikroporoznosti. Upravljanje procesa je v celoti digitalno in zaradi tega manjša nevarnost napak. Prav tako je na ta način možen nadzor procesa tudi s strani strank in poljubno nastavljanje relevantnih parametrov procesa.

Harald Raupenstrauch iz **Katedre za termoprocese, Montanistične univerze Leoben, Avstrija**, je s soavtorji izpostavil temo: »**Razvoj modela vrednotenja procesa za povečanje energijske učinkovitosti v livarski industriji**«. Namen modela je v enostavnejši in boljši predstavitvi stanja. Pri tem ima predstavljen model dva zorna kota: ekonomski (top-down) in tehniški oz. termodinamični (bottom-up). Pri tem se celotno stanje obrata deli na glavne module npr. taljenje, litje, toplotna obdelava in dodatno še na posamezne naprave. S pomočjo dinamičnih povezav posameznih modulov in naprav je mogoče vrednotiti celoten obrat. Kot rezultat je možno ugotoviti specifične porabe energije in materialov oz. odgovarjajoče stroške na proizvod in celotno

količino. Na osnovi pridobljenih podatkov je nato možno izvršiti nadaljnje analize energijskega stanja podjetja.

Peter Berger, iz podjetja **Key Consult Dunaj, Avstrija** je v svojem predavanju: »**Finančna sredstva za raziskovalno-razvojne projekte, premije za raziskave in optimalna strategija subvencij za livarne in njihovo okolje**«, izpostavil možnosti koriščenja javnih finančnih virov za inovacije v livarnah. Upravičenost za finančno podporo iz javnih sredstev ostaja v livarnah pogosto neizkoriščena. Za livarne je ob tem potrebno upoštevati prav posebne izzive: kako in zakaj se bo uporabljalo raziskovalne premije, kaj so najzanimivejša razvojna vprašanja in kako je možno optimirati strategijo zahtevka, kako utemeljiti zahtevek za dotacije, kako utemeljiti prototipe in prenos v redno proizvodnjo in možnosti adiranja premije in finančne podpore. Za podporo pri pripravi in utemeljitvi zahtevkov je potrebno vključevati eksperte iz tega področja.

Marta Maria Sipos, iz podjetja **Furtenbach GmbH, Avstrija** je predstavila razvojne dosežke podjetja Furtenbach: »**Multifunkcionalna plastificirana vezivna sredstva**«. Na osnovi novjših spoznanj in interdependence med molekularno zgradbo, makroskopskimi lastnostmi in izkoristkom so ob ciljanem namenu uporabe razvili nova, zelo učinkovita cold-box vezivna sredstva. Predstavljene so bili dosežki z multifunkcionalnimi vezivnimi sredstvi ter karakterizacija: viskoelastičnost, plastičnost, upogibna trdnost, razvoj plinov ter visoka obstojnost zaščitne plasti.

Martin Bednarz iz podjetja **Ex-One GmbH Gersthofen, Nemčija** je s soavtorjem podal predavanje: »**Lastnosti in potenciali hladno utrjevalnih fenolnih veziv za 3D tiskanje**«. 3D tiskanje peščenih form in jeder je sčasoma postal razširjen postopek izdelave za prototipe in manjše serije. Najpogosteje se danes za to uporabljajo vezivni sistemi na osnovi furana. Zaradi tehnoloških prednosti pa se vse pogosteje uporabljajo veziva na osnovi fenola. Pri tem je odločilna prednost, da je strošek finiiranja delov bistveno nižji. V kombinaciji z višjo trdnostjo v hladnem in vročem ter večjo doseženo ostrino robov, je postopek še posebej primeren za tehnološko zahtevnejšo uporabo.

Udo Kreuzek iz podjetja **Georg Fischer Automotive AG Schaffhausen, Švica** je v svojem predavanju: »**Izzivi in potenciali za ulite dele v kontekstu e-mobilnosti**«, izpostavil razvoj lažjih ulitih komponent za avtomobilsko industrijo, kar izraža tudi slogan podjetja: »**Sla po vaši lažji prihodnosti**«. Avtomobilska industrija je pred velikimi spremembami in s tem povezanimi zahtevami. Predvsem to velja za CO₂ odtis, ki naj bi iz današnjih 130g/km do leta 2020 padel na 95g/km in do leta 2025 na 70g/km. Kazni za prekoračitev bodo 95 EUR za vsak gram prekoračitve. Torej bo zahteva za vse učinkovitejši motorji z notranjim zgorevanjem ter po hibridnih in električnih pogonih. Ob zmanjšani porabi goriva bo tako tudi tendenca po zmanjšanju teže in s tem lažjimi sestavnimi deli. Potrebne bodo nove sistemske komponente, npr. nova konstrukcija ročičnih gredi, karoserijskih elementov, ohišij za baterije, e-motorji, močnostna elektronika. Ob tem bodo kot materiali v prednosti lahke kovine. Potenciali za znižanje teže so veliki in predstavljajo kar 50% vseh potencialov, ki bodo omogočali doseganje zahtev CO₂ odtisa. Predvideno je, da bo leta 2025 25% vseh vozil z hibridnim ali E-pogonom.

Heinz-Jürgen Gaspers s soavtorji, iz podjetja **Magma GmbH, Aachen, Nemčija** je predstavil temo: »**Stoškovna in načrtovalna učinkovitost s celovito virtualno interpretacijo kompleksnih ulitih komponent od procesa litja do toplotne obdelave**«. Izdelava kompleksnih strukturnih konstrukcijskih delov iz lahkih kovin za področje avtomobilske industrije je na osnovi števila elementov povezana z velikimi investicijami v naprave, orodja in obratna sredstva. Napovedovanju napetostnega stanja, predvsem zaostalih napetosti je lahko v veliko pomoč virtualno načrtovanje in preizkušanje. S programom MagmaSoft lahko predvidevamo napetostna stanja in zaostale napetosti v vsakem delu procesne verige, kar nam omogoča predčasno identifikacijo možnih rizikov že v fazi načrtovanja. Na ta način so možne spremembe

v načrtovanju ulitka, prilagoditev orodij ter modifikacija procesnih parametrov. Prikazan je bil primer ležaja nagibne glave iz visokotrdnostene železove litine (ADI).

Harald Spiegel, iz podjetja **Westcam Datentechnik GmbH Mils, Avstrija** je podal predavanje: **»Učinkovito povečanje zmogljivosti konstrukcijskih delov-optimiranje in izdelava s 3D-tiskanjem«**. Z generativnimi izdelovalnimi metodami je možno reducirati izdelovalne čase konstrukcijskih elementov ter povečati njihovo funkcionalnost. Prikazan je bil praktičen primer mostišča vilic motornega kolesa. Na modelu so bili simulirani najpomembnejši primeri obremenitev. Po optimiranju so inženirji dobili konstrukcijski del, ki je ob enaki Al-zlitini predstavljal novo konstrukcijo. Nato je sledilo 3D tiskanje forme za litje optimiranega konstrukcijskega elementa. Na ta način so bili prihranjeni stroški in čas izdelave. Prikazan je bil tudi primer optimiranja topologije držala kamere in zmanjšanje njegove teže od 110g na samo 35g.

Od sedmih predavanj iz področja železovih litin izpostavljam tri najzanimivejša: **Babette Tonn**, iz **Inštituta za metalurgijo Tehniške univerze Clausthal, Nemčija** je s sodelavci predstavila predavanje: **»Lito železo z dobro žilavostjo v hladnem za ekstremna področja uporabe«**. Vetrne elektrarne delujejo ponekod v ekstremnih področjih. Pesta, osi in ohišja ležajev so izdelana iz nodularne sive litine. Pri tem se v ekstremnih razmerah pri -40°C zahteva tako visoka trdnost kot tudi visoka žilavost, kar so diametralno nasprotni zahteve. Tako je bil potreben nov razvoj materiala. Na osnovi načrtovanih preizkušanj in računalniškega načrtovanja kombinacij sestave se je iskala optimalna kemijska sestava litine. Raziskan je bil vpliv Si, Co, Ni in Cu na trdnostne in žilavostne lastnosti. Predstavljene so bile kemijske sestave, ki pri zelo nizkih temperaturah zagotavljajo tako zahtevane trdnostne lastnosti kot tudi žilavost.

Rüdiger Deike iz **Inštituta za tehnologijo kovin Univerze iz Duisburg, Nemčija** je s sodelavci podal predavanje pod naslovom: **»Nova spoznanja pri tvorbi kali v nodularni litini - GJS«**. Nastanek kali pri izdelavi nodularne litine še vedno ni v celoti raziskan. V zlitini Fe-Si so uporabljena cepiva na osnovi različnih elementov, katerim pa je skupno, da tvorijo okside in sulfide. Ob izločanju silicija iz FeSi-zlitin se lokalno poviša aktivnost ogljika v talini in nastajo različni vplivi med raztopljenim kisikom, raztopljenim žveplom in določenimi elementi, na kinetiko nastajanja kali. Z raziskavami v laboratoriju lahko izdelajo litine z velikostjo grafitnih krogel $< 2\ \mu\text{m}$ in te strukture so bile raziskane. Na osnovi nanoanalitskih metod so prišli do nekaterih novih dognanj glede tvorbe kali.

Jessica Fries iz **Inštituta za livarstvo Univerze RWTH Aachen, Nemčija** je skupaj s sodelavci instituta predstavila temo: **»Potenciali materiala na osnovi utrjanja zmesnega kristala litega železa s kroglastim grafitom«**. Možnost, da bi ob višjem deležu Si imeli tudi višje deleže spremljevalnih elementov, bi omogočala uporabo višjega deleža odpadkov visokolegiranih vrst jekla. Da bi izboljšali mehanske lastnosti, predvsem žilavost GJS litin z utrjanjem zmesnega kristala, so raziskovali vpliv Co, Ni in Al na mikrostrukturo in mehanske lastnosti. Zaradi visoke cene Co ter zelo slabo zaznavnega učinka so raziskave s Co opustili in se omejili na Ni in Al. Pri dodatkih do 1,5 ut. % Ni in tudi do 1,5 ut. % Al, so ugotovili dodatno utrjevanje, pri čemer je še vedno ostala matrika popolnoma feritna. Pri višjem deležu silicija ter ob dodatku Ni ter Al, prihaja do višjih trdnosti GJS in s tem se nakazuje GJS kot še bolj atraktiven in v prihodnosti zanimiv material.

Iz sedmih predavna iz področja zlitin neželeznih kovin prav tako izpostavljam tri najzanimivejša: **Klaus-Peter Tucan** iz podjetja **BMW Group Landshut, Nemčija**, je predstavil zelo aktualno temo: **»Inovativno kolilno litje na osnovi prednosti anorganskih peščenih jeder«**. Od leta 2008 je livarna BMW izdelavo jeder za kokilno litje v celoti usmerila v anorganska veziva. Ta usmeritev je pokazala močno zmanjšanje emisij, prav tako, da anorganska izdelana jedra v celoti izpolnjujejo tudi vse zahteve glede stroškov, kakovosti in funkcije tudi pri visokoserijski

proizvodnji zahtevnih ulitkov kot so: ohišja cilindra zaganjalnika ali glave cilindra. S tem so bile odprte nove možnosti razvoja procesa. Za serijsko proizvodnjo štiri cilindrskih Otto-motorjev sedaj v livarni BMW izdelajo dva ulitka v enem livnem sistemu. Z inovativnim »Injektorskim litjem« pri katerem brez ločenega pretočnega sistema lijejo neposredno v gravuro izdelka in dosežejo s tem ciljano usmerjeno strjevanje, so dosegli bistveno zmanjšanje časa takta litja, dvojni izplen na livno mesto, zmanjšanje krožnega materiala ter bistveno povečanje produktivnosti.

Franz Joseph Feikus je skupaj s soavtorji iz podjetja **Nemak Europe GmbH Frankfurt, Nemčija** in **Nemak Linz GmbH Linz, Avstrija** predstavil temo prihodnosti: »**Komponente za elektromobilnost – izzivi in livarsko tehniške rešitve**«. Aktualne tržne analize kažejo na enormen potencial rasti avtomobilov z električnim pogonom. Bistveno večje deleže bodo imeli tudi hibridni pogoni s kombinacijo motorjev z notranjim zgorevanjem in elektromotornim pogonom. V letu 2016 je celotna svetovna proizvodnja avtomobilov bila ca. 90 mio. Ta proizvodnja bi do leta 2025 porastla predvidoma na ca. 120 mio. Ob tem bo delež avtomobilov z električnim pogonom od sedanjih ca. 2% porastel na ca. 25%. Zaradi zahtev okolja bo prišlo do sprememb tudi pri motorjih z notranjim zgorevanjem. Tudi komponente za avtomobile z električnim pogonom bodo oblikovane zelo kompleksno z notranjimi konfiguracijami hlajenja. Na primeru dvodelnih rešitev bo možna proizvodnja na osnovi tlačnega litja. Enodelne konfiguracije bo možno reševati s kompleksno oblikovanimi jedri. V tem primeru imajo prednost postopki gravitacijskega kokilnega litja. Za rotacijsko simetrično ohišje elektromotorja je rešitev v nizkotlačnem litju. Nova možnost za ulitke iz Al-zlitin bo na področju ohišij baterij, ki jih bo možno reševati tako s tlačnim kot z nizkotlačnim litjem. Bistvena pa je v prihodnjem obdobju usmeritev v zmanjšanje teže.

Georg Wilhelm Dickhues iz podjetja **Ohm&Haener Metallwerk GmbH Wenden, Nemčija** je podal predavanje: »**Razvoj dinamično visoko obremenjenega konstrukcijskega elementa iz visokotrdnostne zlitine AlCu4Ti**«. Tudi v klasični strojogradnji postaja teža elementov vse pomembnejša. Zamenjava dosedanjih delov iz jekel oz. Fe-litin z visokotrdnostnimi Al-materiali je zadeva prihodnosti. Prikazan je primer ohišja stresalne celice za lafeto težke vrtnalke naprave. Zaradi velikih mehanskih obremenitev je za ulitek možen le izbor visokotrdnostne zlitine AlCu4Ti. Zaradi velikega strjevalnega intervala ter s tem neugodne strjevalne morfologije je bilo potrebno razviti primerno tehnologijo litja. S pomočjo numeričnih simulacij strjevanja in trdnostnih lastnosti je bilo izvršeno optimiranje geometrije, ki bi odgovarjala zahtevam uporabe ter možnostim litja. Izbrana je bila tehnika napajanja, ki je omogočila usmerjeno strjevanje ter modifikacijo zlitine s predzlitino AlZrSc. Izdelan ulitek je po termični in mehanski obdelavi imel težo 58 kg ter primerljive mehanske lastnosti, v primerjavi z jeklenim elementom, ki je imel težo 162 kg. Vrtni stroj z vgrajenim elementom iz AlCu4Ti je v praktični uporabi že tretje leto ter odgovarja vsem zahtevam visokih mehanskih obremenitev.

Tudi 61. Avstrijsko livarsko posvetovanje je dokazalo visoko raven predstavljenih prispevkov in organizacije posveta. Ob tem je potrebno poudariti, da je zaradi dobrih povezav Montanistične univerze v Leobnu z gospodarstvom predstavljenih veliko zelo kakovostnih predavanj, ki so neposredno povezana z razvojem v gospodarskih družbah. Katedra za livarstvo na univerzi ter Avstrijski livarski inštitut, ki deluje v prostorih univerze, sta ob svoji mednarodno uveljavljeni strokovnosti v veliki meri nosilca razvoja livarske industrije.

Na podlagi dogovora o sodelovanju med Društvom livarjev Slovenije ter Avstrijskim društvom livarskih strokovnjakov VÖG, sta se posvetovanja udeležila predsednica Društva livarjev Slovenije, mag. Mirjam JAN-BLAŽIČ ter glavni in odgovorni urednik Livarskega vestnika, zasl. prof. dr. Alojz KRIŽMAN.

Glavni in odgovorni urednik Livarskega vestnika
zasl. prof. dr. Alojz Križman

AKTUALNO / CURRENT

Razgovor z direktorico Kavis-Livarna d.o.o., Jerico Vranc dipl. ing.



Direktorica Kavis-livarne,
Jerica Vranc dipl. ing.

Po letošnjem februarjem Občnem zboru Društva livarjev Slovenije, ki je potekal pri dolgoletni članici Društva, podjetju Kavis livarna d.o.o. v Štorah, ko so udeleženci lahko tudi skozi ogled proizvodnih obratov malo bolje spoznali to našo uspešno livarno, smo se odločili še za razgovor s njeno direktorico Jerico Vranc, dipl.ing. kemijske tehnologije. Direktorica Vranc je diplomirala leta 2001 na Fakulteti za kemijo in kemijsko tehnologijo v Mariboru in se še istega leta zaposlila v družbi Kavis-livarna d. o. o., kjer je delala od leta 2001 do 2004 kot vodja talilnice, od leta 2005 do 2007 kot vodja kontrole in v tem času tudi vodila pripravo in postopek za pridobitev okoljevarstvenega soglasja IPPC. V obdobju 2008 do 2011 je opravljala funkcijo namestnika direktorja in pooblaščenca za varstvo okolja in predstavnika vodstva za sisteme ISO 9001, ISO 14001, OHSAS 18001. Vodenje podjetja pa je prevzela leta 2011.

Livarstvo ima v Štorah zelo dolgo tradicijo in seže vse v sredino 19. stoletja. V obdobju od leta 1995 postane štorska livarna del podjetja Kavis d. o. o. in leta 2000 se ustanovi današnje podjetje KOVIS-LIVARNA d.o.o.. Tradicija ima seveda prednosti in slabosti. Tako je verjetno bilo tudi ob združitvi in nastanku samostojnega podjetja, ki danes deluje v skupini Kavis-group.

Prednosti, ki so se ohranile do dandanašnjih dni se predvsem še vedno odražajo na kakovosti, organiziranosti proizvodnega procesa in v znanju ljudi, saj je bila na tej lokaciji tudi metalurška srednja šola. Dobro ime, ki si ga je livarna postavila še v času ko je bila del Železarne Štore se je ohranilo pri kupcih do danes. V preteklosti je bila livarna zasnovana za potrebe traktorske industrije na lokaciji Štor in je še danes prisotna v segmentu kmetijske mehanizacije, proizvodni program pa se je še razširil na železniško, gradbeno, strojno in ladijsko industrijo. Železarna Štore je dajala velik poudarek na vodenju dokumentacije - vsa podjetja so imela skupen arhiv, zelo dobro so bili napisani in izvajani postopki kontrole, precej pa so se tudi posvečali identifikaciji proizvoda. Vse te dobre prakse so ostale v postopkih poslovanja tudi potem, ko je livarno kupil g. Anton Pangrčič. Seveda pa so ostala tudi bremena dveh stečajev, ki so se leta 1995 odražala predvsem na proizvodni opremi, ki je bila takrat v zelo slabem stanju, na delovni klimi zaposlenih in na sami okolici podjetja, kjer so pred nastankom industrijske cone odlagali odpadke plavža.

Kavis-livarna v zadnjem obdobju povečuje svojo proizvodnjo ulitkov iz sive in nodularne litine in postaja poslovno vse uspešnejša.

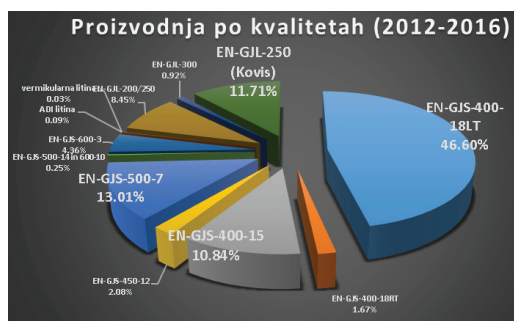
Tako glede količinske rasti, kot glede finančnih pokazateljev podjetje dosega iz leta v leto višje vrednosti. Predvsem smo zadovoljni, da je v rasti dodana vrednost na zaposlenega, kar nam seveda omogoča razvoj.

Tabela 1: Pregled osnovnih pokazateljev proizvodnje v obdobju 2012-2016

Leto	Količinska proizvodnja v kg	Finančni prihodki v EUR	Število zaposlenih	Dodana vrednost na zapos- lenega v EUR
2012	9.769.021	15.203.958,94	139	31.189
2013	9.661.539	15.009.234,52	150	30.982
2014	12.704.342	20.337.952,33	158	38.491
2015	12.153.944	20.451.545,41	155	42.370
2016	13.068.886	21.680.869,84	157	43.723

Katere kakovosti sive litine in nodularne litine je v izraženih deležih posameznih litin proizvajala livarna v zadnjem petletnem obdobju. Ali so ob tem bili premiki v smeri visoko kakovostnih litin?

Proizvajamo zelo širok spekter zelo kakovostnih sivih in nodularnih litin. Izbor litin prilagajamo zahtevam kupcev. Prav tako smo za specifične zahteve razvili vermikularno litino (EN-16079) , ADI litino (EN-17804) , EN-GJS-400-18LT(za temperature do -40°C) ter feritne nodularne litine z visoko duktilnostjo.

**Grafikon 1:** Deleži posameznih litin v proizvodnji v preteklem petletnem obdobju

Glede na trenutno stanje povpraševanj načrtujemo uvedbo vrste novih izdelkov – ulitkov v kvaliteti EN-GJS-400-18-LT v surovem stanju, kar je naša konkurenčna prednost. Glede na to da proizvodnjo tovrstne kvalitete konstantno povečujemo in jo tudi obvladujemo in s tem dokazujemo da je ta material povsem primerljiv po mehanskih lastnostih z jeklenimi proizvodi, bomo še naprej vse razvojne aktivnosti izvajali na tej kvaliteti in na vermikularni litini, kjer vidimo velik tržni potencial.

vrednosti skupnih vlaganj ter ločeno vlaganja v posodobitev in novo opremo v zadnjem obdobju in izpostavite najpomembnejša vlaganja?

V oddelku jedrarne smo vgradili 30 litrski jedrarski stroj z obračalno mizo, povečali smo mešalec jedrarskega peska iz 100 na 200 kilogramov, posodobili smo sistem za doziranje smol v jedrarski pesek, izboljšali - zamenjali sistem doziranja amina v jedrarske stroje, ter zamenjali depurator za odsesavanje plinov iz oddelka jedrarne. V oddelku talilnice smo v sklopu investicijskega vzdrževanja zamenjali dotrajan žerjav za prenos taline z novim 16 tonskim, posodobili sistem za hlajenje kupolnih peči, ter investirali v zamenjavo stare dogrevalne elektro indukcijske peči. Na oddelku avtomatske formarske linije in priprave peska smo investirali v nov 5t mostni žerjav za prenos modelnih plošč in nosilcev modelnih plošč, prav tako smo posodobili potisne naprave na hladilni liniji avtomatske formarske linije. V oddelku čistilnice smo investirali v robotsko roko, ki nam služi kot obdelovalni center za brušenje ulitkov, v dva obdelovalna centra, v opremo za brušenje ulitkov z ročnim visokofrekvenčnim električnim orodjem, s katerim smo zamenjali pnevmatsko orodje, ter ustvarili prihranke na komprimiranem zraku.

V celotni proizvodnji smo zamenjali staro razsvetljavo z LED tehnologijo s katero smo povečali svetilnost za 300% in zmanjšali porabo za 70%. Veliko smo vložili v obnovo energetskega sistema in v sistem nadzora nad porabo različnih energentov (preko 50 merilnikov). Oddelek kontrole je posodobljen z elektronskim mikroskopom, merilno dvižno mizo, merilnikom trdote ter 3D skenerjem za kontrolo dimenzij. V oddelku lesne in strojne obdelave in izdelave modelnih plošč smo v zadnjih

Za vse te spremembe so bila potrebna tudi vlaganja finančnih sredstev. Lahko podate



Slika 1: Stroj za izdelavo jeder po postopku Cold-Box



Slika 2: CNC brusilna stroja za čiščenje ulitkov

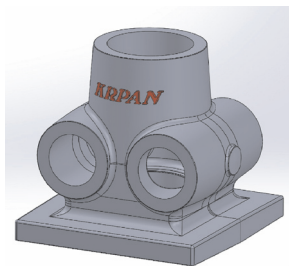


Slika 3: Avtomatska linija za litje v forme (dimenzije forme v mm 1190x990x(300+300))

treh letih investirali v štiri nove CNC centre, s katerimi lahko zagotavljamo izredno hiter proces izdelave modela ter s tem ulitka za končnega kupca. Zaradi premišljenih posodobitev in investicij vsako leto izboljšujemo energetske kazalce na kilogram litega izdelka, kar je še dodaten dokaz kvalitetnega dela zaposlenih, ter pravilne usmeritve celotnega podjetja na področju prihranka energentov.

Kovis-group.com je danes ugleden dobavitelj zavornih diskov, osnih in kolesnih diskov, ležajnih ohišij in drugih strojnih elementov za svetovno železniško industrijo. To zahteva zelo kakovostno mehansko obdelavo in seveda končne mehanske lastnosti. Ali livarna sledi vsem tem zahtevam ter kako je s spremljanjem lastnosti in struktur ulitkov?

Z razvojem novih oz. poboljšanih litin se srečujemo predvsem pri zavornih ploščah za železniški program, kjer sopomembne lastnosti obrabnost in pa toplotna prevodnost. Pri tem upoštevamo, da je potrebno zmanjševanje emisij ogljika in porabe energije ter omejujemo potrebo po tistih elementih-surovinah, ki so v Evropi redke. Pri razvoju novih litin iščemo predvsem nove tehnologije izdelave litine, s katerimi optimiziramo proizvodne procese, ki v nadaljevanju omogočajo boljšo obdelovalnost. Sočasno pa seveda razvijamo ulitek, ki je čim bližje končni obliki, zmanjšujemo potrebo po dodatni mehanski in termični obdelavi.



Slika 4: Nosilno ohišje, nodularna litina EN-GJS-400-18

Načrtovanje zahtevnih ulitkov, priprava modelov, form in jeder ter sama metalurška izdelava ter tehnologija litja zahtevajo visoko strokoven inženirski kader ter kvalificiran

kader v sami proizvodnji. Kako uspete zagotoviti ta kader ter kako ocenjujete šolski sistem, ki naj bi vzgajal ta kader?

Kot vse slovenske livarne se tudi mi srečujemo s pomanjkanjem ustreznega kadra. Tako smo se odločili da z interaktivnimi delavnicami predstavljamo način dela v livarni že osnovnošolcem in na ta način mladim omogočimo, da prepoznajo potencial, da ima delo v livarni tudi perspektivo in da se pri nastanku ulitka uporablja tudi visoka tehnologija kot so roboti in podobno. S kontinuiranimi investicijami je poleg notranjega izobraževanja potreben tudi prenos znanja med generacijami, pri čemer mladi potrebujejo praktične izkušnje starejših v stroki, starejši pa morajo razbiti tabuje pred digitalizacijo samega procesa. Seveda pa zdajšnji sistem izobraževanja ne vzpodbuja mladih k čim hitrejši zaposlitvi in pridobivanju praktičnih izkušenj, temveč jih vzpodbuja k čim daljšemu šolanju. Zaposleni in organizacijska kultura so postali ključni dejavnik konkurenčnosti. Motiviranosti ni mogoče doseči z ukazovanjem in kontrolo, temveč z decentralizacijo vodenja, pooblaščenjem sodelavcev

Tabela 2: Sedanja izobrazba zaposlenih po stopnjah

Stopnja izobrazbe	I.	II.	III.	IV.	V.	VI./1	VI./2	VII.
Število zaposlenih	29	7	18	64	23	5	7	10

in timskim delom. V zadnjem obdobju smo tako dvignili izobrazbeno strukturo zaposlenih, v svoje vrste smo pridobili pet inženirjev in dva magistra, trenutno imamo tudi sedem štipendistov iz smeri orodjarstva in strojništva.

Tehnološki razvoj ter zahteve po kakovosti zahtevajo računalniško načrtovanje ter spremljanje proizvodnje, prav tako laboratorijske analize ter preiskave. Katere računalniške programe uporabljate za načrtovanje in spremljanje proizvodnje ter katera pomembnejša laboratorijska oprema je na razpolago za vse analize, ateste, preizkuse, meritve in raziskave.

V preteklosti je bil v podjetju prepoznan potencial pomena digitalizacije, zato smo proizvodni proces podprli s pametnimi mrežami in pametnimi sistemi. Tako nam je danes pri razvoju novih materialov in ulitkov omogočena visoka sledljivost, kakor tudi širok nabor proizvodnih parametrov. Pri snovanju izdelkov si pomagamo s programi Solidworks, Mastercam, Magma simulation. Za spremljanje poslovnih procesov pa uporabljamo Trace solutions in program Largo. Izvajamo celosten in tehnološko dovršen nadzor kontrole kakovosti v vseh fazah procesa. Na vходу izvajamo spektralno analizo in vizualno kontrolo skladno z internimi dobavnimi pogoji. Med procesom pa vršimo: nadzor temperature merjenja C-ekvivalenta, nadzor taline z ATAS-om, spektralno kemijsko analizo z ARL 4360, kontrolo mikrostrukture proizvedenih materialov s ZEISS Axiomager A2m mikroskopom z aplikacijo AxioVision za programsko prepoznavo in analizo mikrostrukture. Nadalje izvajamo kontrolo trdote s PROCEQ EQUOTIP 3 za več različnih področij (HLD, HRC, HV, in HB) in celotno izvedbo DT preiskav: natezni preizkus z možnostjo preizkušanja od 0 do 250 kN s ZWICK Roel Z250Red nateznim strojem, Charpy preizkus z V-preizkušancem od +20°C do max -40°C ter NDT preiskave: vizualne (VT1+VT2 Level), penetrantske preiskave (PT1+PT2 Level), ultrazvočne preiskave (UT1 Level) ter dimenzijsko kontrolo po 2D in 3D načinu: GOM ATOS COMPACT Scan 5M, FARO Arm Platinum in revers engineering-a z Geomagic programskim paketom. Ob koncu še zadnja faza končne kontrole: kontrola pakiranja ter priprava končne dokumentacije za vse opravljene postopke z vključno 3.1 certifikatom o skladnosti materiala po EN standardih in naročnikovih specifikacijah.



Slika 4: 3D skener za kontrolo dimenzij GOM

Livarska proizvodnja zahteva tudi stalno analizo pogojev dela v proizvodnih obratih ter nadzor emisij. Kako je z izpolnjevanjem teh pogojev ter standardov in kako z vsemi okoljevarstvenimi soglasji.

Kovis-Livarna je upravljalca naprav, ki lahko povzročajo onesnaževanje okolja večjega obsega in so podvržene »Uredbi o vrsti dejavnosti in naprav«. Skladnost z direktivo IED preverjamo z rednimi monitoringi velikosti emisij in hrupa v okolje, na nekaterih odvodnikih imamo tudi trajne meritve. Redno izvajamo tudi meritve v samem delovnem okolju ter izvajamo investicije za izboljšanje delovnih pogojev, kakor tudi investicije v zmanjšano rabo energentov. Določene imamo ukrepe za preprečevanje onesnaževanja tal in podzemnih vod ter smo v fazi izdelave izhodiščnega poročila. V letu 2015 smo izvedli celovit energetski pregled in postavili smernice za prihajajoči investicijski cikelj. Za celovito

obvladovanje okoljskih vidikov proizvodnje in uresničitev okoljevarstvenih načel svoje okoljske politike, imamo certifikat ISO 14001. Etični in ekonomski razlogi, zadovoljstvo zaposlenih in ugled organizacije so bili razlog za uvedbo BS OHSAS 18001 sistema vodenja varnosti in zdravja pri delu, ki nam pomaga da temu namenjamo primerno pozornost in dopolnjuje izpolnjevanje zakonodaje na tem področju.

Koliko tehnoloških izboljšav, inovacij ali patentov je bilo uradno priznanih v zadnjem petletnem obdobju. Katero med temi smatrate kot najuspešnejšo in najkoristnejšo za sam razvoj proizvodov, tehnologije in poslovanja?

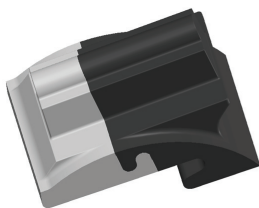
Za sam razvoj proizvodov, kot najuspešnejšo izboljšavo smatramo vpeljavo 3D tiskanja, kar nam omogoča hitrejši prehod od ideje do izdelka. Sposobnost tiskanja izdelka že isti dan, ko je bil zasnovan, skrči razvojni proces, ki bi v načelu lahko trajal nekaj tednov na nekaj dni. To nam omogoča ostati korak pred konkurenco. Izdelava orodij ter proizvodna testiranja po klasičnih postopkih so zelo draga ter dolgotrajna, proces 3D tiskanja pa omogoča proizvod sestavnih delov ali komponent orodij po precej nižjih stroških. V prvi fazi smo za prototipno izdelavo zavorne plošče pridobili ter testirali peščeno jedro, izdelano s postopkom 3D tiska, kar nam je zelo pospešilo cikel razvoja ter prihranilo strošek materiala. Ker se je pridobitev pokazala za zelo koristno, ta primer ni ostal osamljen. Kasneje smo kot komponente v livarska orodja pričeli integrirati tiskane vložke iz ABS materiala.

Zaradi izdelave ulitkov visokega varnostnega razreda smo v livarni razvili svoj sistem zagotavljanja sledljivosti, ki nam omogoča sledljivost do nivoja forme. V tem primeru ulitek pridobi poleg šaržne številke (datum litja) tudi zaporedno št. forme, katera natančno opredeli iz katere peči ali tone je izdelek odlit. Na ta način ima vsak ulitek svojo identifikacijsko oz. serijsko številko s katero lahko v primeru potrebe po kasnejših podatkih le te zagotovimo. Za zagotavljanje sledljivosti smo uspešno dodelali sam program proizvodnje, ki podatke povezuje ter samostojno izdela certifikat o ustreznosti materiala. Označevanje izdelkov je odvisno od zahtev kupca ter namena uporabe samega izdelka

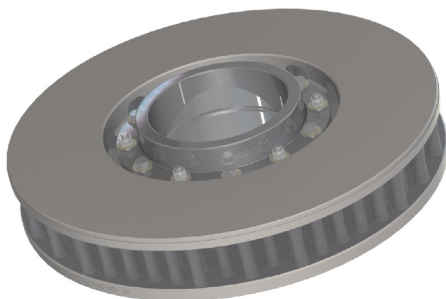
V okviru skupine Kovis-group.com načrtujete tudi svoj razvoj. Kateri bodo osnovni elementi v srednjeročnem razvoju Kovis-Livarne d. o. o: obseg proizvodnje, tehnološki razvoj in predvidena finančna realizacija poslovanja v naslednjem petletnem obdobju?



Slika 5: Ulitek pokrova motorja za ladjedelnštvo, nodularna litina EN-GJS-400-15



Slika 6: Primer izdelave 3D tiskanih vložkov za integracijo v livarska orodja



Slika 7: Zavorna plošča oz. 640/350/110 TSK, Siva litina EN-GJL-250 KOVIS (kupci:, Alstom, Siemens, Bombardier)

Danes je Kovis Livarna d.o.o. v tem delu Evrope vodilna pri proizvodnji ulitkov iz litine EN-GJS-400-LT v surovem stanju – brez termične obdelave. Livarna se je specializirala za proizvodnjo ulitkov za železniški program, pri čimer tehnološko znanje vlagamo predvsem v razvoj kvalitetne litine in povečanje izplena na formo. Za proizvodnjo ležajnih ohišji in zavornih plošč ima podjetje certifikat od nemških železnice – DB, s čimer smo že vključeni v nekatere projekte evropskih železnice (Alstom, Bombardier, Siemens), ki bodo trajali do leta 2025. Z načrtovano investicijo v novo linijo in spremembo tehnologije litja pa načrtujemo povečanje prihodkov za 40%, pri čemer načrtujemo tudi 20% povečanje prodaje obdelanih ulitkov.

Kakšno je vaše sodelovanje z univerzami, raziskovalnimi inštituti ter pri skupnih prijavah raziskovalnih in razvojnih projektov. Ali ob tem uspete zagotoviti tudi del nepovratnih javnih sredstev ali celo evropskih sredstev za svoj razvoj?

V sam razvoj vključujemo domače in tuje fakultete za materiale, kakor tudi tuja podjetja, ki so vodilna na področju razvoja vhodnih surovin in domače ponudnike IT opreme. Uspešni smo bili tudi pri pridobivanju nepovratnih sredstev za posodobitev razsvetljave, za izobraževanja starejših delavcev, pri sofinanciranju obrestne mere, vključeni pa smo tudi v Kovisov projekt Futura, ki je financiran iz sredstev Obzorja 2020.

Razgovor vodil glavni in odgovorni urednik Livarskega vestnika
zasl. prof. dr. Alojz KRIŽMAN

AKTUALNO / CURRENT

PROGRAM / PROGRAMME

57. Mednarodno livarsko posvetovanje Portorož 2017/ 57th International Foundry Conference Portorož 2017

Sreda / Wednesday, 13. 09. 2017

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

Četrtek / Thursday, 14. 09. 2017 Dvorana / Hall Cristoforo Colombo

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

Dvorana / Hall Cristoforo Colombo
Plenarna predavanja / **Plenary Lectures**

9.45-10.15:	E. FLENDER, <i>Bundesverband der Deutschen Giesserei Industrie-BDG, Düsseldorf (D)</i> : What are successful small and middle size foundries in Europe doing right? / Kaj uspešne majhne in srednje velike evropske livarne delajo prav?
10.15-10.45:	R. DEIKE, <i>University Duisburg-Essen, Institut of Metal Engineering, Duisburg-Essen (D)</i> : The importance of the foundry industry in a circular economy / Pomembnost livarske industrije v krožnem gospodarstvu
10.45-11.15:	A. KRIŽMAN ¹ , P. MRVAR ² , M. JAN-BLAŽIČ ³ , ¹ <i>Univerza v Mariboru (SI)</i> , ² <i>Univerza v Ljubljani (SI)</i> , ³ <i>Društvo livarjev Slovenije (SI)</i> : Transition to Industry 4.0-challenge and future for Slovenian foundries / Prehod v industrijo 4.0 – izziv in prihodnost za slovenske livarne
11.15-11.30:	Odmor / Break

11.30-12.00:	C. HEISELBETZ, Nemak Europe GmbH (D): Challenges E Drive components - solutions in casting technology / Izzivi E pogonskih komponent – rešitve v livarskih tehnologijah
12.00-12.30:	N. ERHARD, Oskar Frech GmbH + Co. KG (D): Future demands on die casting and technical requirements for its profitability / Prihodnje zahteve pri litju v trajne forme in tehnične zahteve za donosnost
12.30-13.00:	R. DÖPP, TU Clausthal, Institute for Metallurgy (D): Contribution to structure and properties of malleable cast iron / Prispevek k strukturi in lastnostim temprane litine
13.00-15.00:	Odmor za kosilo / Lunch Break
15.00-15.30:	P. SCHUMACHER, ÖGI, Leoben (A): Novel developments for the characterisation of foundry sands and cores / Nov razvoj karakterizacije livarskih peskov in jeder
15.30-16.00:	R. BÄHR, Otto von Guericke Universität Magdeburg, Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung (D): Research activities regarding additive manufacturing techniques of the foundry / Raziskovalne aktivnosti o tehnikah aditivne proizvodnje v livarstvu
16.00-16.15:	Odmor / Break
16.15-16.45:	K. WEIß, C. BAITIANG, RWP Gesellschaft beratender Ingenieure für Berechnung und rechnergestützte Simulation GmbH (D): Part design as part of technique in the age of industry 4.0 / Načrtovanje izdelka kot del tehniškega razvoja v dobi industrije 4.0
16.45-17.15:	P. MRVAR¹, A. KRIŽMAN², G. GORŠE³, M. PETRIČ¹, ¹University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Department of Materials and Metallurgy, Ljubljana, ²University of Maribor, ³LTH Castings Ljubljana (SI): Complete planning and master of the complex casting in the technology of high-pressure die-casting / Celovito načrtovanje in obvladovanje kompleksnih ulitkov v tehnologiji tlačnega litja

Četrtek zvečer / Thursday evening, 14. 09. 2017

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

Petek / Friday, 15. 09. 2017

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

Železove litine in livarska tehnologija / Cast iron and casting technology

9.00 - 9.20:	M. RIEBISCH, B. PUSTAL, A. BÜHRIG-POLACZEK, <i>Foundry Institute, Universität-RWTH Aachen (D)</i> : Effect of carbide promoting elements on the microstructure and mechanical properties of solid solution strengthened ductile iron / Vpliv karbidotvornih elementov na mikrostrukturo in mehanske lastnosti utrjenih zmesnih kristalov sive litine s kroglastim grafitom
9.20-9.40:	A. DROLC ¹ , J. PRISTAVEC ² , ¹ ETA Cerkno d.o.o., ² Exoterm-IT d.o.o. (SI): Upgrade of gating system for thin walled castings from grey cast iron in sand moulds / Posodobitev livnega sistema za litje tankostenskih ulitkov iz sive litine v peščene forme
9.40-10.00:	A. KUMP ¹ , P. E. PERSSON ¹ , R. ANDERSSON ¹ , H. SPOOK ¹ , S. ALJASIM ² ¹ Novacast Systems AB (SE), ² Kovis Livarna d.o.o. (SI): Process manager as a complete metallurgical production tool for guiding and organizing the gray/ductile melt from charge to pouring / Procesni manager, kot celoviti metalurško proizvodnji pripomoček za vodenje in organiziranje sive/nodularne litine od vložka do litja
10.00-10.15:	Odmor / Brake
10.15-10.35:	R.RUDOLF ^{1,2} , M. SHARIQ ^{1,3} , U. FERČEC ⁴ , A. KRIŽMAN ¹ , P. MAJERIČ ¹ , ¹ Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo (SI), ² Zlatarna Celje d.o.o. (SI), ³ Indian Institute of Technology (ISM) Dhanbad, Jharkhand (India), ⁴ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo (SI): Nanotechnologies in metallurgy: state analysis and development prediction / Nanotehnologija v metalurgiji: analiza stanja in napoved razvoja
10.35-10.55:	Ž. POGAČNIK, <i>Labena d.o.o. (SI)</i> : Novelties in industrial microscopy / Novosti v industrijski mikroskopiji
10.55-11.15:	M. BODENBURG, <i>Magma GmbH (D)</i> : Supporting manufacturing ramp-up and robust processes by means of optimization simulation / Podpora proizvodnemu napredku in stabilnosti procesov s pomočjo simulacijske optimizacije
11.15-11.30:	Odmor / Brake
11.30-11.50:	S. ALJASIM, D. ŽVEGLIČ, A. TEKAVČIČ, S. FEKONJA, <i>Kovis Livarna d.o.o. (SI)</i> : Cast iron defects; diagnosis and remedies (Case study: grey iron gas porosity/fissures) / Defekti pri sivih litinah; prepoznavanje in ukrepi (Primer: plinska poroznost/razpoke pri sivih litinah)
11.50-12.10:	J. PRISTAVEC ¹ , M. ARZENŠEK ² , D. ŽVEGLIČ ² , R. ZAGAJŠEK ² , ¹ Exoterm-IT d.o.o. (SI), ² Kovis Livarna d.o.o. (SI): Design optimization of brake disk pillars with a goal to attain better compaction of sand cores / Optimizacija oblike nosilnih čepov zavornega diska s ciljem doseganja čim boljše zbitosti peščenih jeder
12.10-12.30:	B. BETIK, <i>Omega Foundry Machinery Ltd (UK)</i> : Secondary no-bake sand reclamation technology to reduce the cost and improve the foundry environment / Sekundarna No-bake tehnologija regeneracija peska za zmanjšanje stroškov in izboljšanje livarskega okolja

12.30-12.45:	Odmor / Brake
12.45-13.05:	R. DAŃKO, AGH University of Science and Technology, Faculty of Foundry Engineering, Krakow (PL): The state of art and foresight of casting production in Poland, The role of the Faculty of foundry engineering in educating engineers for casting industry / Pregled stanja in vpogled v prihodnost proizvodnje ulitkov na Poljskem, Vloga Fakultete za livarstvo pri izobraževanju inženirjev za livarsko industrijo
13.05-13.25:	M. KOLBEZEN, B. ČRTALIČ, M. TRAJKOVSKI, Ferro Črtalič d.o.o. (SI): Cleaning castings with UHP water and abrasive media / Čiščenje ulitkov z visokim pritiskom vode in abrazivnimi mediji
13.25-13.45:	F. CAVADINI ¹ , I. PIŠLAR ² , ¹ Insertec Italia Srl (I), ² Ingas d.o.o. (SI): Plasma pour technology / Uporaba plazme v livarstvu

Sekcija B / Section B: Dvorana/ Hall: Roald Amundsen
Neželezne zlitine / Non-ferrous alloys

9.00-9.20:	I. TODARO ¹ , R. SQUATRITO ¹ , L. TOMESANI ¹ , S. ESSEL ² , H. ZEIDLER ³ , ¹ CIRI-MAM, Interdepartmental center of industrial research, University of Bologna (I), ² IIT, Technion, Israel institute of technology (Israel), ³ TUC, Technische universität Chemnitz (D): Smart thermal conductive Al MMCs by casting / Pameten toplotno prevoden aluminijev kompozit izdelan z litjem
9.20-9.40:	F. ZUPANIČ, G. LOJEN, T. BONČINA, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo (SI): Application of a focussed ion beam by characterization of casting Al-alloys / Uporaba fokusiranega ionskega snopa pri karakterizaciji livnih Al-zlitin
9.40-10.00:	S. KASTELIC ² , A. MAHMUTOVIĆ ¹ , M. PETRIČ ² , V. BUDA ³ , P. MRVAR ² , ¹ TC Livarstvo d.o.o., ² Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, ³ MAHLE Letrika Komen d.o.o. (SI): Process and tool development of HPDC using FEM analyses / Načrtovanje orodja in procesa tlačnega litja s pomočjo FEM analize
10.00-10.15:	Odmor / Brake
10.15-10.35:	B. JUNG, Heck + Becker GmbH & Co. KG (D): K1- Prototyping-HPDC prototypes within 12 weeks / Izdelava prototipov tlačnih ulitkov v 12 tednih
10.35-10.55:	M. VONČINA ¹ , J. MEDVED ¹ , S. KORES ² , P. XIE ³ , A. CZIEGLER ⁴ , P. SCHUMACHER ⁴ , ¹ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, (SI), ² Talum d.d. (SI), ³ Center of high Resolution Electron Microscopy, College of Materials Science and Engineering, Hunan University (China), ⁴ Montanuniversität Leoben (A): Effect of Molybdenum and Zirconium on Aluminium Casting Alloys / Vpliv molibdena in cirkonija na aluminijeve livarske zlitine
10.55-11.15:	M. MAILE, Wollin GmbH (D): Minimum quantity spray application / Aplikacije minimalnega brizganja
11.15-11.30:	Odmor / Brake
11.30 - 11.50	Z. ZOVKO BRODARAC ¹ , D. STANIĆ ² , ¹ University of Zagreb, Faculty of metallurgy, ² CIMOS-P.P.C. Buzet, d.o.o. (CRO): Influence of heat treatment on AlSi7Mg (Cu) alloy properties development / Vpliv toplotne obdelave na razvoj lastnosti pri zlitini AlSi7Mg (Cu)

11.50-12.10:	N. ŠTRBAC, D. MANASIJEVIĆ, S. MLADENović, I. MARKović, <i>University of Belgrade, Technical Faculty in Bor (SRB)</i> : Investigation of solidification behaviour of the Sn-Zn-(Bi, Sb) ternary alloys / Raziskava poteka strjevanja ternernih zlitin iz sistema Sn-Zn-(Bi, Sb)
12.10-12.30:	A. GERMAN, <i>AED Automation GmbH (D)</i> : Micro spray application for high-pressure die casting-Technology + potential and challenges / Aplikacije mikro brizganja pri tehnologiji tlačnega litja + potenciali in izzivi
12.30-12.45:	Odmor / Brake
12.45-13.05:	M. ACARER, S. AKSOY, <i>Selcuk University, Technology Faculty, Konya (TR)</i> : Mould design in high pressure die-casting of AISi12 alloy / Načrtovanje orodja pri tlačnem litju zlitine AISi12
13.05-13.25:	J. SHI, <i>Institute of joining and welding, Technische Universität Braunschweig (D)</i> : Surface characterisation and adhesion evaluation of high-pressure die cast Al alloys / Karakterizacija površine in ocena adhezije pri Al-zlitinah za tlačno litje
13.25-13.45:	V. KOLDA, B. KALKUNTE, <i>Mecas ESI s.r.o. (CZ)</i> : Implementation of numerical simulation in early stage of HPDC die development / Implementacija numerične simulacije v začetni fazi razvoja orodja za tlačno litje

Posterske predstavitve / Poster presentations

1.	T. BALAŠKO, M. PETRIČ, J. MEDVED, P. MRVAR, <i>Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta (SI)</i> : Influence of thermal conductivity of different mould materials on solidification of AISi9Cu3 alloy / Vpliv toplotne prevodnosti različnih materialov orodij na strjevanje zlitine AISi9Cu3
2.	M. PETRIČ, S. KASTELIC, A. BRANISELJ, P. MRVAR, <i>Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta (SI)</i> : Dilatometric analysis of AISi12 alloy during solidification / Dilatometrijska analiza zlitine AISi12 med strjevanjem
3.	B. LESKOVAR, I. NAGLIČ, B. MARKOLI, <i>Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta (SI)</i> : Controllable formation of quasicrystals in aluminium alloys / Kontrolirana tvorba kvazikristalov v aluminijevih zlitinah
4.	F. KOZINA ¹ , Z. ZOVKO BRODARAC ¹ , P. MRVAR ² , M. PETRIČ ² , <i>¹University of Zagreb Faculty of metallurgy (CRO), ²University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering (SI)</i> : The Al-2.5wt%Mg-0.7wt%Li alloy mechanical properties / Mehanske lastnosti zlitine Al-2,5wt.%Mg, 0,7wt.%Li
5.	D. PIHURA ¹ , D. MUJAGIĆ ² , D. NOVIĆ ³ , <i>¹Bosnia Foundrymen's Association, ²University of Zenica, Metallurgical institute, ³Energoinvest (BIH)</i> : Changing elements contents during pig iron treatment / Spreminjanje vsebnosti elementov med obdelavo grodlja
6.	V. VESELINOVIĆ ¹ , V. LAZIĆ ² , L. TIHAČEK ŠOJIĆ ² , R. RUDOLF ^{3,4} , <i>¹University of Banja Luka, Medical Faculty (BIH), ²University of Belgrade, High School of Dental Medicine (SRB), ³University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering (SI), ⁴Zlatarna Celje d.o.o. (SI)</i> : NiTi based memory shape alloys for orthodontic applications / Zlitine na osnovi NiTi z oblikovnim spominom za ortodontsko prakso

The Slovenian Foundrymen Society / DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE

Chairman of Programme Committee:
Alojz Križman, Prof. PhD

Madam Chair of Organising Committee:
Mirjam Jan-Blažič, MSc