

LIVARSKI VESTNIK

67/2020

1



DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE
SLOVENIAN FOUNDRYMEN SOCIETY



MELTING

TRANSPORT

StrikoWestofen°

DOSING

HEAT TREATMENT

READY FOR
THE NEXT LEVEL

STRIKOMELTER®

SCHNORKLE®

WESTOMAT®

CONTINUOUS FURNACE

HAGI GmbH, Hauptstraße 14, 3143 Pyhra, Austria,
Phone: +43 2745 24 172-40, johann.hagenauer@hagi.at, www.hagi.at

StrikoWestofen GmbH, Hohe Straße 14, 51643 Gummersbach, Germany,
Phone: +49 2261 70910, 24/7-Hotline: +49 2261 7091129, sales@strikowestofen.com, www.strikowestofen.com



Družba TERMIT je rudarsko podjetje
za pridobivanje kremenovih peskov



NAŠ PROGRAM:

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

www.termmit.si

PRODUCTS FOR FOUNDRIES AND STEELWORKS



COATINGS FOR FOUNDRIES



THERMOINSULATION MATERIALS FOR STEELWORKS AND FOUNDRIES



OTHER PRODUCTS

*ferro alloys, inoculants,
nodulators, recarburisers*



REPRESENTATIVES

*Magma, Tribo - Chemie,
Henschke*

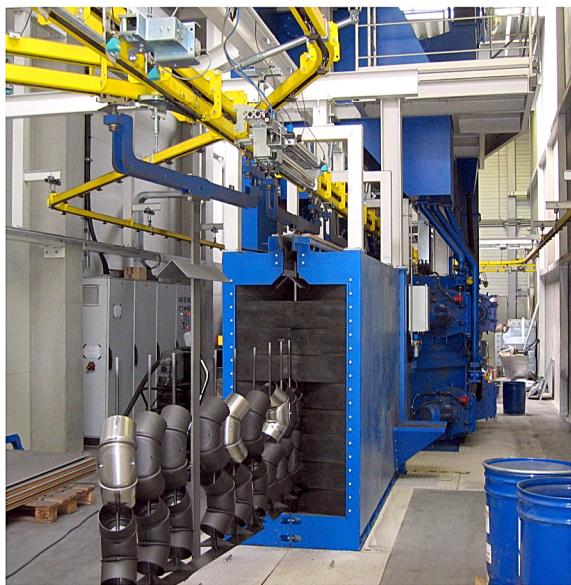


exoterm@exoterm.si



Living d.o.o.
Goriška cesta 66a
5270 Ajdovščina
Slovenija

T.: +386-5-333-38-10
F.: +386-5-333-30-71
info@living.si
www.living.si



LIVARSKI VESTNIK

Izdajatelj / Publisher:

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

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

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

Tehnično urejanje / Technical editing:

mag. Mirjam Jan-Blažić

Uredniški odbor / Editorial board:

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

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

Marvelingua, Aljaž Seničar s.p.

Lektorji / Lectors:

Angleški jezik / English:
Yvonne Rostek, Düsseldorf
Slovenski jezik / Slovene: prof. Janina Šifrer

Tisk / Print:

Fleks d.o.o.

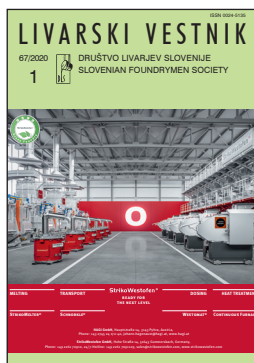
Naklada / Circulation:

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

Letna naročnina: 35 EUR z DDV

Year subscription: 35 EUR (included PP)

Dano v tisk: marec 2020



StrikoWestofen Group
Hohe Str. 14
D-51643 Gummersbach

T: +49 2261 70910
E: sales@strikowestofen.com
www.strikowestofen.com

VSEBINA / CONTENTS

Stran / Page:

C. BLEICHER: Ocena cikličnega ponašanja nepravilnosti v materialu pri debelostenski nodularni litini s pomočjo neporušnih raziskav / Evaluating the cyclic material behaviour of material imperfections in thick-walled nodular cast iron with the help of non-destructive testing 2

K. ASANO: Mikrostruktura in lastnosti litih kovinskih matričnih kompozitov / Microstructure and properties of cast metal matrix composites 17

BADARINATH KALKUNTE, LORENZO VALENTE, CRISTIAN VISCARDI, VLASTIMIL KOLDA: Virtualni nadzor dimenzij za napovedovanje in merjenje končne oblike litih delov / Virtual dimensional control to predict and measure the final shape of the casting part 36

M. PETRIČ, R. CERC KOROŠEC, M. VONČINA, P. MRVAR, S. KASTELIC: Uporaba 3D tiskanih polimernih modelov v livarstvu / Applications of 3D printed polymer patterns in casting technologies 43

AKTUALNO / CURRENT

Pregled svetovne livarske proizvodnje v letu 2018 50
Udeležili smo se sejma Euroguss 2020 v Nuernbergu 52
Seje organov Društva livarjev Slovenije 54
Koledar livarskih prireditvev 2020 60
IN MEMORIAM - dr. Milan Lampič 61

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

Ocena cikličnega ponašanja nepravilnosti v materialu pri debelostenski nodularni litini s pomočjo neporušnih raziskav

Evaluating the cyclic material behaviour of material imperfections in thick-walled nodular cast iron with the help of non-destructive testing

Povzetek

Nepravilnosti v materialu pri velikih ulitkih, izdelanih iz nodularne litine, kot so skrčki in ocvirki, ni mogoče zlahka odkriti z metodami neporušnega testiranja (NDT). S tega vidika se pojavlja vprašanje, ali in do katere mere se zmanjšajo kvazistatična in ciklična nihajna trdnost komponente ob prisotnosti takšnih napak. Ker trenutni standardi in smernice ne omogočajo nedvoumne ocene življenjske dobe komponente, zaznane nepravilnosti livarnam povzročajo precej dela z odstranjevanjem lokalnih nepravilnosti ali zaradi zavrnitve celotne komponente. Do slednjega pride, če ni mogoče zanesljivo oceniti življenjske dobe komponente.

Namen je torej poiskati ustrezne metode neporušnega testiranja za določanje lastnosti nepravilnosti materialov, kot sta togost in gostota, pri debelostenskih ulitkih iz nodularne litine ter določiti koncept določanja življenjske dobe komponent, na katero vplivajo skrčki in ocvirki na podlagi informacij neporušnega testiranja.

V okviru dveh raziskovalnih projektov so bili izdelani veliki liti bloki iz različnih nodularnih litin z velikimi območji ocvirkov in skrčkov. Ti bloki so bili predmet preučevanj z različnimi metodami neporušnega testiranja, kot je ultrazvočno vzorčenje faznih nizov (Sampling Phased Array) in mehansko ultrazvočno preskušanje z namenom pridobitve digitaliziranih informacij o položaju in lastnostih določene napake. Izvedene so bile tudi raziskave s preverjanjem magnetnih delcev, računalniška tomografija in preskusa na žveplo. Nato sta bila iz ulitih blokov odstranjena vzorca utrujenega in napetega materiala ter preverjena z natezanjem in obremenitvijo za določitev vedenja materiala pri ciklični obremenitvi različnih vzorcev z nepravilnostmi in brez njih. Posebna pozornost je bila namenjena oceni togosti materiala ali virtualnih Youngov elastičnih modulov, na kar so pomembno vplivale napake v vsakem vzorcu.

Med preiskavami se je izkazalo, da je mogoče določiti posebne parametre nepravilnosti, kot sta togost in gostota, kar je mogoče digitalno prenesti v številčno analizo, to pa nadalje uporabiti pri oceni utrujenosti posamezne komponente.

Ključne besede: nodularna litina, debelostenska, nepravilnosti v materialu, neporušno testiranje

Abstract

Material imperfections in large castings made of nodular cast iron as shrinkages and Dross are not easy to detect with non-destructive testing (NDT) methods. In this context, the question arises if and to which amount the quasi-static and cyclic fatigue strength of

the component is reduced, if such imperfections are present. Since present standards and guidelines do not offer a possibility for a doubtless component's lifetime assessment, detected imperfections cause a significant amount of work in foundries to remove those local imperfections or to reject the complete component. The latter case occurs, if a secure assessment of the component's lifetime cannot be performed.

The aim is thus to find appropriate NDT methods to determine the characteristics of material imperfections, such as its stiffness and density, in thick-walled nodular cast iron and to set up a concept for the lifetime assessment of components affected by shrinkages and Dross based on information coming from NDT.

During two research projects, large cast blocks made from different nodular cast iron, were cast with large areas of Dross and shrinkages. These blocks were investigated with different NDT methods, such as ultrasonic Sampling Phased Array and mechanised ultrasonic testing, to obtain digitalised information on the position and the characteristics of the specific imperfection. Investigations with magnetic particle inspection, computer tomography and sulphur tests also took place. Afterwards, fatigue and tensile specimens were removed from the cast blocks and tested under strain and stress control to determine the cyclic strain-based material behaviour of the different specimens with and without imperfections. Special attention was paid to the assessment of the material stiffness or the virtual Young's modulus, which is significantly influenced by the imperfection in each specimen.

During the investigations, it could be shown that it is possible to determine specific parameters of the imperfections such a stiffness and density, which can digitally be transferred to numerical analysis and which can furthermore be used for a fatigue assessment of an affected component.

Key words: nodular cast iron, thick-walled, material imperfections, non-destructive testing

1 Uvod

Lite komponente iz železovih in neželezovih materialov ponujajo možnost izjemno močnih in ultra lahkih konstrukcij zaradi zelo raznolikih materialov za ulitke, ki se ponašajo z visoko trdnostjo in duktilnostjo. To omogoča oblikovanje tako majhnih kot velikih večtonskih ulitkov iz litega železa kot tudi litega jekla. Vendar pa to prinaša izzive za strukturno trdnost za natančno oceno življenjske dobe teh velikih komponent zlasti zaradi spreminjanja debeline sten, posledično pa zaradi spreminjanja mikrostruktur in trdnosti materialov. Poleg komponent in na debelino stene vezanih sprememb v mikrostrukturi lahko mestoma

1 Introduction

Cast components made of iron and non-iron materials offer a possibility for high strength and light-weight constructions due to the high variety of different cast materials with high material strength and ductility. Therefore, small but also large casting with several tons made from cast iron and cast steel can be designed. However, this creates challenges for structural durability to perform a precise lifetime assessment of such large components especially due to changing wall thicknesses and thus also changing microstructures and material strength. Besides, component and wall thickness specific changes in microstructure

pride tudi do nepravilnosti v materialu, ki jih je treba natančno oceniti glede na njihov vpliv na zasnovo, pa tudi na življenjsko dobo in nihajno trdnost - za karakterizacijo in oceno na debelino stene vezanih mikrostruktur ter napak v materialu skupaj z analognimi in digitalnimi metodami za pridobitev ponovljivih parametrov za oceno utrujenosti tudi v smislu povezovanja informacij. To pomeni vključevanje simulacije litja skupaj z metodologijo digitalnih neporušnega testiranja pri zasnovi in oceni komponent za izvedbo ocene življenjske dobe komponente, vezane na specifično mikrostrukturo, še pred samo izvedbo procesa litja. Pozneje digitalne meritve dejansko prikažejo napake v materialu na uliti komponenti z neporušnim testiranjem, kot je ultrazvočno vzorčenje faznih nizov (Sampling Phased Array) ali rentgenska računalniška tomografija, ki bi lahko nato omogočila ponovno oceno življenjske dobe komponente. V tem smislu lahko medsebojna povezava digitalnih metod za izvedbo simulacije, ocena življenjske dobe, neporušno testiranje in simulacija litja zmanjšajo prizadevanja za doseg zanesljive in lahke lite komponente.

Trenutni standardi [1, 2] zlasti za oceno življenjske dobe litih komponent z napakami v materialu na nekaterih mestih in območjih z mikrostrukturami, ki se mestoma razlikujejo, ne ponujajo metod ali pa zgolj osnovno metodo za oceno vpliva na nihajno trdnost, vezano na ravni resnosti in referenčne kataloge za nepravilnosti [3, 4]. Kljub temu pa ti standardi ne omogočajo natančne ocene nihajne trdnosti z zmanjševanjem učinkov, ki izhajajo iz različnih mikrostruktur in nepravilnosti, kajti nanašajo se zgolj na vizualno primerjavo nepravilnosti, najdenih z npr. rentgensko analizo in referenčnimi katalogi [3, 4], npr. Slika 1.

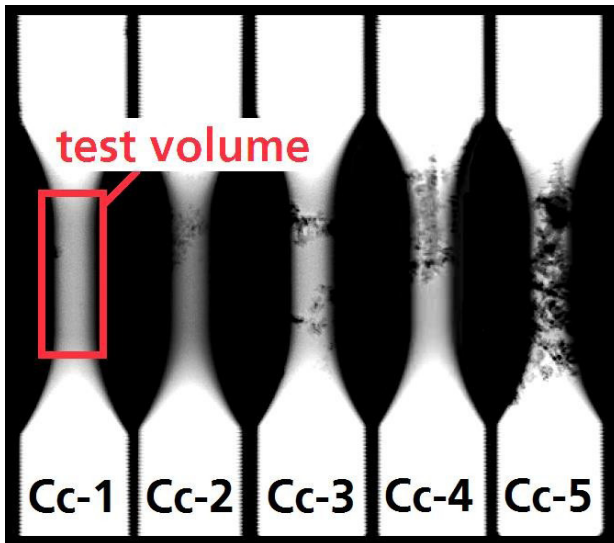
Po tej vizualni določitvi stopnje krčenja nadaljnji standardi ta razred razvrstijo

also local material defects might occur, that need to be assessed precisely concerning their effect on design and also on lifetime and fatigue strength.

For a characterization and estimation of wall thickness, specific microstructures and material defects analog and also digital methods should be applied to gain reproducible parameters for the fatigue assessment also in view of linking-up information. This implies the integration of cast simulation and also digital non-destructive test methods in component design and assessment, to conduct a component and microstructure specific lifetime assessment also beforehand to the cast process itself. Later on, a digital measurement of the actually present material defects at the cast component with non-destructive testing like ultrasonic sampling phased array or X-ray computer tomography might then allow a reassessment of the component's lifetime. In this context an interconnection of digital methods for simulation, lifetime assessment, non-destructive testing and cast simulation can reduce the effort to achieve a reliable and light cast component.

Especially for the lifetime assessment of cast components with local material defects and area by area differing microstructures present standards [1, 2] offer no or only a simple method for assessing this influence on fatigue strength in relation to severity levels and reference catalogues for defects [3, 4]. Nevertheless, these standards are not able to assess the fatigue strength reducing effects coming from different microstructures and defects precisely, since they only refer to a visual comparison of defects found by e.g. X-ray analysis and the reference catalogues [3, 4], e.g. Figure 1.

After this visual based determination of a shrinkage class, further standards compile this class into a severity level



Slika 1. Različni tipi krčenja v vzorcih nodularne litine

Figure 1. Different classes of shrinkages in nodular cast iron specimens

glede na raven resnosti na podlagi ustrezne debeline stene, kjer je bila odkrita nepravilnost [5]. Sicer je ta postopek standardiziran, vendar pa njegovi rezultati niso ponovljivi in zanemarljive pomembne točke in informacije glede lokalnih napetosti, do katere prihaja med uporabo, pa tudi geometrijo, obseg in položaj nepravilnosti v komponenti. Kljub vsemu standardi, kot so smernice DNV GL [2] za oceno življenjske dobe velikih komponent za vetrne turbine, izdelanih iz nodularne litine, to raven resnosti uporabljajo za izračun oslavljenja za zmanjšanje krivulje S-N za ponovno oceno komponente. Vendar pa je pri tem potreben natančen opis lokalne mikrostrukture, lokalnih napetosti in lastnosti lokalnih nepravilnosti, kot so geometrija, velikost in položaj na komponenti, ki ga je treba preložiti že med neporušnim testiranjem. Na splošno gledano manjkajo informacije iz faze zasnove, katere lokalne napetosti se pojavljajo na območju zaznane nepravilnosti v materialu. Na podlagi standardov ni predvidena primerjava med položajem nepravilnosti in napetostmi ter izmenjava informacij med zasnovo,

based on the corresponding wall thickness, where the defect was found [5]. While this procedure is standardized, its results are not reproducible and it neglects important points and information of the local stresses, that occur during usage, as well as the defect's geometry, size and position in the component. Nevertheless, standards like the DNV GL guideline [2] for the lifetime assessment of large wind energy components made of nodular cast iron use this severity level to calculate attenuation factors to reduce the S-N curve for the component reassessment. But, to perform this, a precise description of the local microstructure, of the local stresses and of the local defect characteristic like geometry, size and position on the component needs to be performed already during non-destructive testing. Generally, information from the design phase, which local stresses occur in the area of the detected material defect are missing. And based on standards a comparison between defect position and stresses as well as an information exchange between design, structural durability, cast simulation and

strukturno trdnostjo, simulacijo ulitka in neporušnim testiranjem. To vodi do pomanjkanja informacij v vseh disciplinah, ki so vključene v zasnovo litih komponent ter proizvodni proces.

Zlasti za hitro zasnovo, proizvodnjo in tudi postopek zagotavljanja kakovosti pri obremenitvenih in lahkih optimiziranih litih komponentah je treba poenotiti in razviti usklajene postopke odobritve ob upoštevanju potreb po zasnovi, razvoju izdelka, strukturni trdnosti, neporušnem testiranju, livarski tehnologiji in simulaciji. Vendar pa do tega trenutka izmenjave med disciplinami še vedno ne potekajo, ko pridemo do vzpostavitve ulitka, pa tudi do določanja velikosti litih komponent glede na preglede. Manjka tudi integracija simulacije, ki mora oceniti življenjsko dobo komponente, ko je med postopkom zagotavljanja kakovosti odkrita nepravilnost.

Če bo mogoče doseči digitalno izmenjavo podatkov med vsemi vključenimi disciplinami, zlasti v zvezi z nepravilnostmi ter območnim spreminjanjem mikrostrukture, bo mogoča izvedba mnogo natančnejše ocene litih komponent še pred samo izvedbo procesa litja.

2 Vključevanje digitalnih podatkov o merjenju iz neporušnega testiranja v oceno življenjske dobe

Ukrepe za združevanje simulacije, ocenjevanja in neporušnega testiranja za oceno življenjske dobe in nihajne trdnosti pri velikih litoželeznih komponentah inštitut Fraunhofer LBF izvaja že več let [6, 7, 8, 9]. Na primer, med izvajanjem raziskovalnih projektov MABIFF in LEA je bilo več prizadevanj za določitev nihajne trdnosti na podlagi grafita in okoliške mikrostrukture pri različnih materialih iz nodularne litine. To je

non-destructive testing is not intended. This leads to missing information in all disciplines taking part in the cast component's design and production process.

Especially for a fast design, production and also the quality assurance process of load and lightweight optimized cast components need to be standardised and concerted approval processes need to be developed, taking into account the needs of design, product development, structural durability, non-destructive testing, foundry technology and simulation. However, so far this exchange between the disciplines is often still missing, when it comes to establish a cast and also inspection-oriented dimensioning of cast components. Also, the integration of simulation is missing, that needs to assess the component's lifetime, when a defect has been detected during quality assurance.

If it will be possible to have a digital data interchange between all the involved disciplines especially in terms of defects and area by area changing microstructures, a much more precise assessment of cast components can be performed even before hand to the casting process itself.

2 Including digital measurement data from non-destructive testing in the lifetime assessment

Measures to combine worlds from simulation, assessment and non-destructive testing for a lifetime and a fatigue strength assessment for large cast iron components have been performed at Fraunhofer LBF since many years [6, 7, 8, 9]. For instance, during the research projects MABIFF and LEA attempts were made to determine a fatigue strength based on an analysis of the graphite and the surrounding microstructure for different nodular cast

bilo izvedeno zlasti pri feritnih stopnjah in ADI z vključevanjem simulacije ulitka.

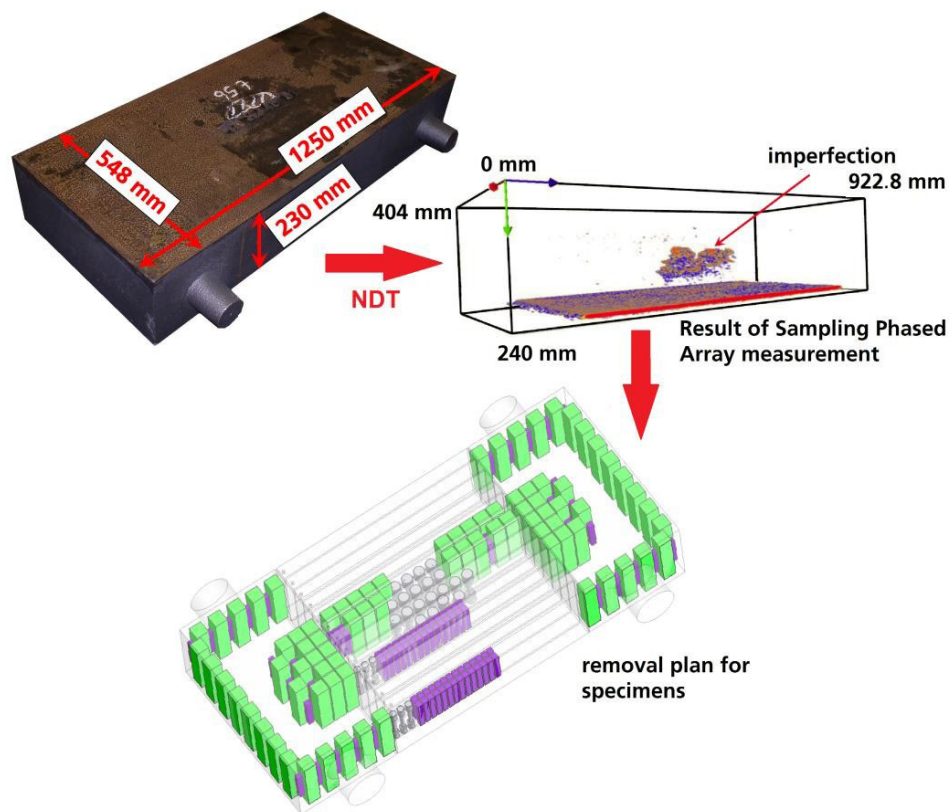
Nadaljnji projekti so privedli tudi do ocene lokalnih nepravilnosti v materialu, kot sta krčenje in penjenje. Pri raziskovalnih projektih »Lunkerfest« [6] in »unverDROSSen« [7] so sodelujoči s področij livarske tehnologije, simulacije, zasnove, strukturne trdnosti in neporušnega testiranja razvijali metode za opis krčenja in penjenja glede na geometrijo, velikost in položaj s pomočjo rentgenske računalniške tomografije, preverjanja magnetnih delcev ter mehaniziranim ultrazvočnim pregledovanjem za kakovostnejše določanje življenjske dobe prizadetih komponent. Uporabljene so bile dodatne merilne tehnike, kot ultrazvočno vzorčenje faznih nizov (Sampling Phased Array) [8] za določitev natančnih in ponovljivih parametrov, vezanih na položaj, gostoto in geometrijo določene nepravilnosti na litih komponentah za numerično oceno življenjske dobe, Slika 2. V prvem koraku so pridobljeni parametri služili kot osnova za odstranitev okroglih, Slika 3, in ploskih vzorcev, Slika 4, od litih blokov in preiskovanih komponent med potekom raziskovalnih projektov, Slika 2. Poleg tega je ta postopek omogočal sledljivost nihajne trdnosti specifične količine materiala nazaj do položaja odstranitve s komponente.

Poleg določanja lastnosti krčenja in penjenja komponent smo pri odstranjenih vzorcih raziskovali tudi neporušne in ciklične obremenitve. Neporušna testiranja smo izvedli s preverjanjem magnetnih delcev, preskusi na žveplo ter radiografskimi in radioskopskimi preiskavami za prepoznavanje razlik pri opisovanju teh nepravilnosti z neporušnim testiranjem. To omogoča kakovostnejše in hitrejše določanje najdenih nepravilnosti na komponentah, pa tudi prvo dodelitev

iron materials. This was especially done for ferritic grades and also ADI involving cast simulation.

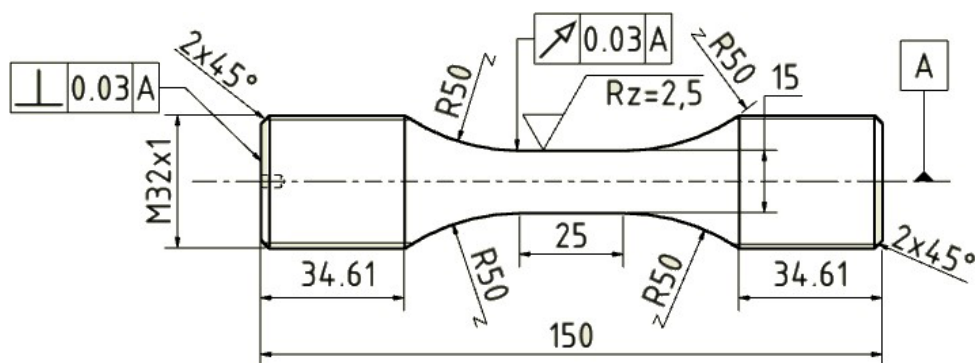
Further projects lead also to the assessment of local material defects like shrinkages and Dross. So, in the research projects "Lunkerfest" [6] and "unverDROSSen" [7] people from the disciplines foundry technology, simulation, design, structural durability and non-destructive testing worked on methods to describe shrinkages and Dross in geometry, size and position by means of X-ray computer tomography, magnetic particle inspection and mechanized ultrasonic inspection for a better lifetime assessment of affected components. Additionally digital measurement techniques like ultrasonic Sampling Phased Array [8] were used, to gain precise and reproducible parameters of position, density and geometry of the specific defect on cast components for the numerical lifetime assessment, Figure 2. In a first step, the gained parameters founded the basis for the removal of round, Figure 3, and flat specimens, Figure 4, from the cast blocks and components investigated during the research projects, Figure 2. Additionally, this procedure allowed a traceability of the fatigue strength of a specific material volume back to the position where it has been removed from at the component.

Besides the characterization of shrinkages and Dross on the components, the removed specimens were also investigated non-destructively and under cyclic loading. The non-destructive tests were conducted by magnet particle inspection, Sulphur tests as well as radiographic and radiosopic investigations to identify the differences in describing those defects non-destructively. This allows a better and faster determination of found defects on components in the foundry as well as a first assignment of those defects to



Slika 2. Izgradnja prve povezave med digitalnim posnetkom nepravilnosti in načrtom za digitalno odstranitev pri preskusnih vzorcih z nepravilnostmi in brez njih kot metoda sledljivosti

Figure 2. Building a first connection between a digital image of the defect and a digital removal plan for fatigue specimens with and without defects as a method of traceability



Slika 3. Okrogli preskusni vzorec, uporabljen v postopku »Lunkerfest« [6]

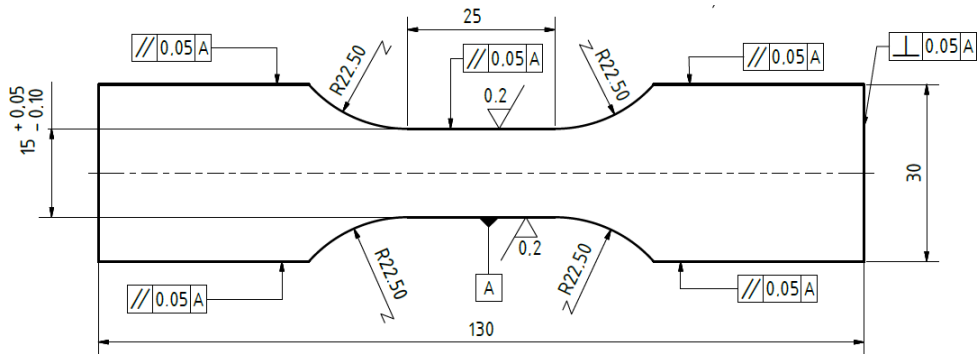
Figure 3. Fatigue round specimen used in "Lunkerfest" [6]

teh nepravilnosti glede na maksimalno ali kvazistatično nihajno trdnost, Slika 5.

Po neporušnih testiranjih smo opravili destruktivna testiranja utrujenosti na ploskih in okroglih vzorcih tako pri vzorcih z nepravilnostmi kot vzorcih brez njih,

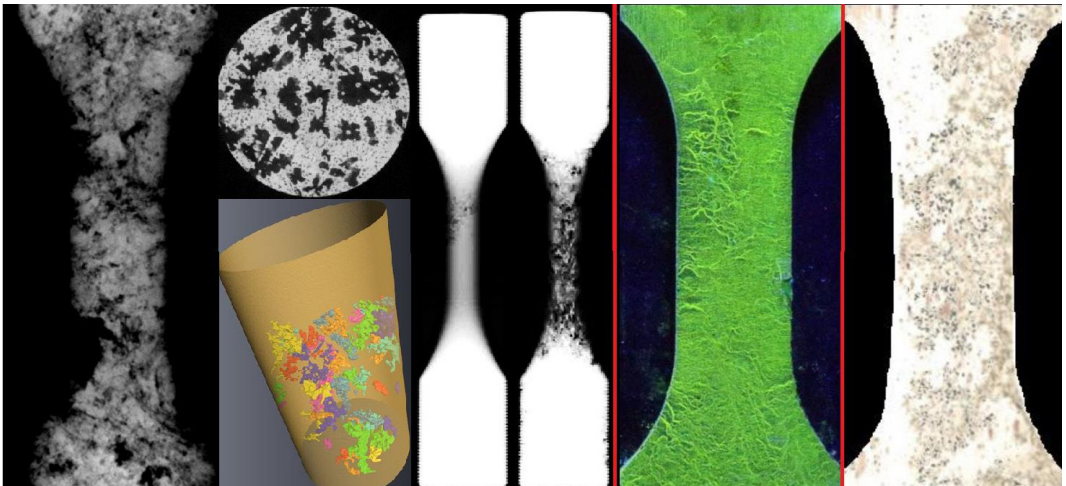
a maximum fatigue or quasi-static strength, Figure 5.

After the non-destructive investigations, destructive fatigue tests were conducted on the flat and round specimens both for defect and defect-free specimens, [6, 7]. In case of



Slika 4. Ploščati preskusni vzorec, uporabljen v postopku »unverDROSSen« [7]

Figure 4. Fatigue flat specimen used in "unverDROSSen" [7]



Slika 5. Karakterizacija preskusnih vzorcev s pomočjo nedestruktivnega testiranja z digitalno rentgensko računalniško tomografijo, radiografijo za zaznavanje sprememb v gostoti, preverjanjem magnetnih delcev za zaznavanje razpok in razpokam podobnih struktur v kovinskih oksidih, pa tudi s pomočjo testiranja na žveplo

Figure 5. Characterization of fatigue specimens with the help of non-destructive testing by digital X-ray computer tomography, radiography to detect density changes, by magnetic particle inspection to detect cracks and crack like structures in Dross as well as by Sulphur tests

[6, 7]. Pri vzorcih s preizkusi utrujenosti pri krčenju so bili testi pod nadzorom napetosti do končnega zloma vzorcev ali omejenega števila ciklov N_{lim} $1 \cdot 10^7$ izvedeni pri sobni temperaturi s spreminjajočimi se obremenitvami, $R_\sigma = -1$. Enako so bili obdelani tudi vzorci s peno, a pod strožjim nadzorom za pridobitev več informacij o cikličnem prehajanju vedenja materiala ter spremembah Youngovega elastičnega modula ali togosti materiala vzorcev s peno med cikličnimi obremenitvami. Za ta namen so bili vzorci s peno preizkušeni na servohidravlični opremi za preizkušanje utrujenosti z dvema ekstenzometroma. En se uporablja za želeno amplitudno deformacijo, drugi pa meri nastalo deformacijo na drugi strani vzorca, Slika 6. Zaradi raznolike porazdelitve pene na več mestih so lahko na vzorcih prisotne različne stopnje togosti. Na podlagi uporabe dveh ekstenzometrov je mogoče povprečne vrednosti dveh meritev E_f uporabiti za nadaljnje raziskave.

Za prejem istih informacij o spremembah togosti tudi pri vzorcih s krčenjem je bila togost pri teh vzorcih pred izvedbo dejanskih preizkusov utrujenosti

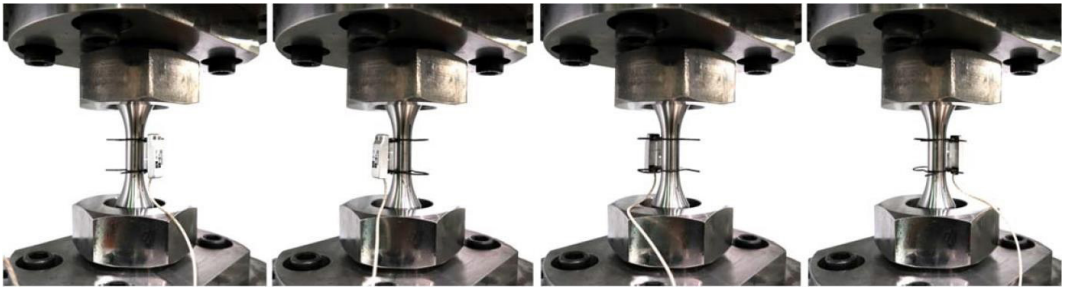
the specimens with shrinkages fatigue tests under stress-control until the final fracture of the specimens or until the limit number of cycles N_{lim} of $1 \cdot 10^7$ were performed under room temperature for alternating loading, $R_\sigma = -1$. In the same manner also the specimens with Dross were treated but under strain control to receive more information about the cyclic transient material behaviour and the changing Young's modulus or stiffness of the Dross specimens during cyclic loading. For this purpose, the specimens with Dross were tested on servo-hydraulic fatigue test rigs with two extensometers. While one applies the desired strain amplitude, the second one measures the resulting strain on the other side of the specimen, Figure 6. Due to a heterogeneous distribution of the Dross locally different stiffnesses in the specimens might be present. By using two extensometers a mean value from two measurements of E_f can be used for further investigations.

To receive the same information about stiffness changes also for the shrinkage affected specimens the stiffness of those were measured by quasi-static, strain



Slika 6. Preizkusi utrujenosti z dvema ekstenzometroma na vzorcih s peno za določitev cikličnega vedenja materiala in virtualnega prožnostnega modula po Youngu E_f

Figure 6. Fatigue tests with two extensometers on specimens with Dross to determine the cyclic material behaviour and the virtual Young's modulus E_f



Slika 7. Določanje togosti vzorcev/virtualnega prožnostnega modula po Youngu E_f izvedbo štirih zaporednih kvazistatičnih meritev za vsak vzorec s krčenjem z 90-stopinjskimi premiki ekstenzometra okrog preizkusne prostornine

Figure 7. Determining the specimen's stiffness / virtual Young's modulus E_f by performing four quasi-static measurements sequentially for each specimen with shrinkages by moving an extensometer in 90° steps around the specimen's test volume

opravljeno tudi merjenje s kvazistatičnimi in utrujenostnimi preizkusi, Slika 7.

Na podlagi meritev bi bilo mogoče delno določiti velike izgube zaradi togosti pri vzorcih z nepravilnostmi v materialu, od vzorca do vzorca pa bi bilo mogoče izračunati samo virtualni Youngov elastični modul v višini nekaj GPa, [6, 7].

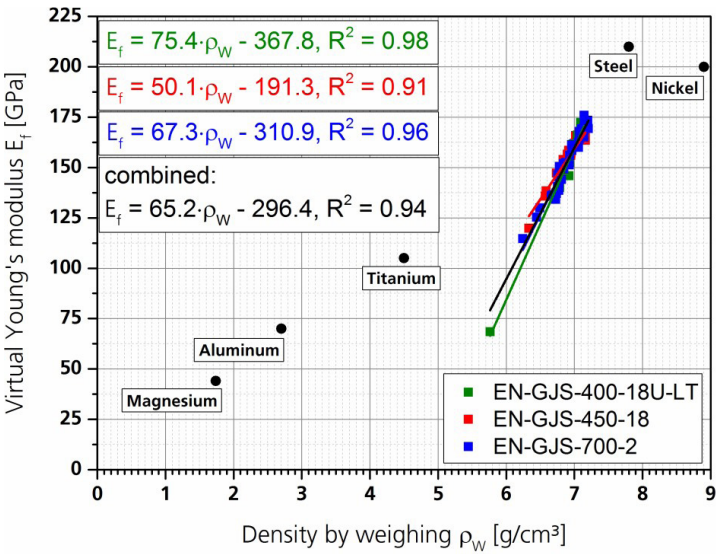
Glavna naloga pri destruktivnem kvazistatičnem in cikličnem preizkušanju je določitev mehanskih lastnosti, kot je faktor zarezne učinka K_f za različne nepravilnosti v materialu, ki jih je mogoče korelacijsko povezati s parametrom neporušnega testiranja. Pri prvem koraku je bila takšna povezava odkrita pri neporušnem določanju gostote in virtualnega Youngovega elastičnega modula E_f v povezavi z na novo opredeljenim faktorjem zarezne učinka K_{fs} za krčenje in K_{fd} za peno. Gostota, ocenjena z rentgenskim [6] ali mehanskim ultrazvočnim preizkušanjem [7, 8], je pokazala precej močno korelacijo z Youngovim elastičnim modulom, medtem ko sta bila tako gostota kot virtualni Youngov elastični modul izmerjena za isto velik obseg napetosti pri preskusnih vzorcih, Slika 8.

controlled tests beforehand to the actual fatigue test, Figure 7.

Based on the measurements partly large losses in stiffness could be determined for the specimens with material defects and from specimen to specimen only a virtual Young's' modulus of a few GPa could be calculated [6, 7].

The main focus of the destructive quasi-static and cyclic investigations is to define mechanical proper- ties like the fatigue notch factor K_f for the different material defects that can be correlated to a parame- ter of non-destructive testing. In a first step such a correlation was found in the non-destructively de- termined density and the virtual Young's modulus E_f in connection with a newly defined fatigue notch factor K_{fs} for shrinkages and K_{fd} for Dross. The density assessed with X-ray [6] or mechanised ultra- sonic testing [7, 8] showed a fairly good correlation to the virtual Young's modulus, while both density and virtual Young's modulus were measured for the same highly stressed volume of the fatigue spec- imens, Figure 8.

Correlating density measured on a cast component with stiffness as well as

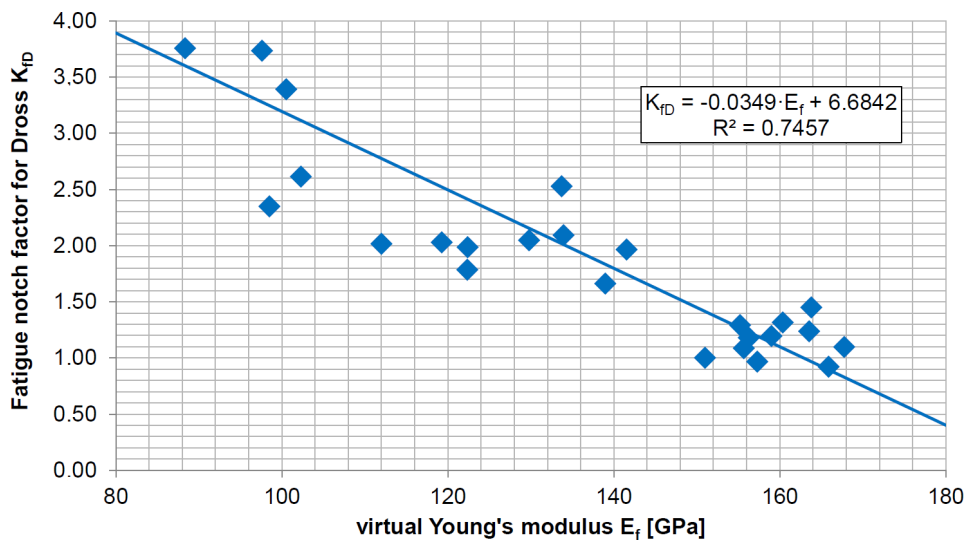


Slika 8. Povezava med gostoto in virtualnim prožnostnim modulom po Youngu za krčenje pri nodularni litini

Figure 8. Relation between density and virtual Young's modulus for shrinkages in nodular cast iron

Korelacijska gostota, izmerjena na togi uliti komponenti, pa tudi določitev velikosti nepravilnosti, njen položaj in porazdelitev zdaj omogočata prenos digitalno izmerjenih

the determination of the defects size, its position and distribution now enables a transfer of digitally measured parameters into numerical analysis. Furthermore, now a



Slika 9. Faktor zarezne učinka za kovinske okside K_{fD} in virtualni Youngov elastični modul E_f za EN-GJS-400-15

Figure 9. Fatigue notch factor for Dross K_{fD} and virtual Young's modulus E_f for EN-GJS-400-15

parametrov v številsko analizo. Zdaj je mogoče tudi ponovno oceno lokalnih napetosti in deformacij pri prostornini nepravilnosti ter okoliški material brez nepravilnosti uporabiti za natančnejše preučevanje vplivov krčenja ali količine pene.

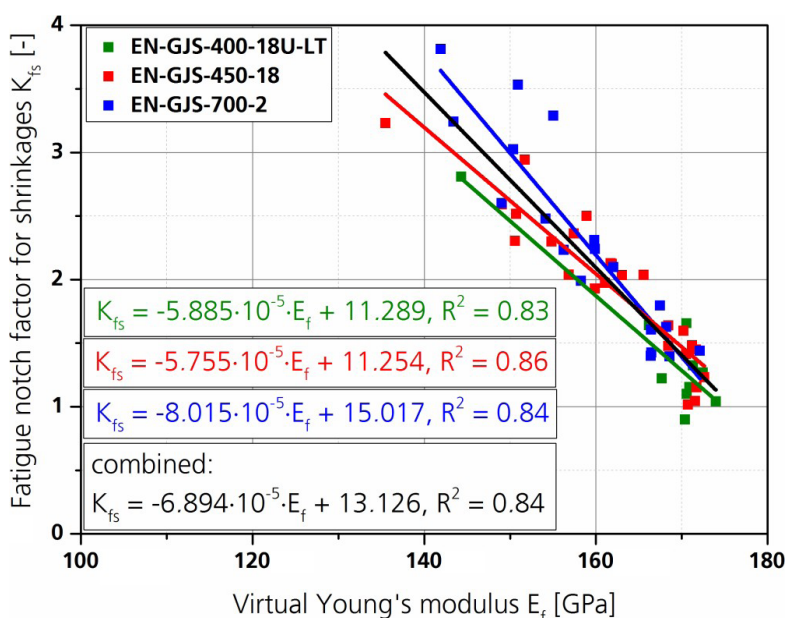
Poleg ocene virtualnega Youngovega elastičnega modula in lokalnih napetosti na podlagi pridobljenih podatkov digitalnih meritev in številske analize je treba odgovoriti tudi na vprašanje o nastali lokalni nihajni trdnosti pri prostornini nepravilnosti. Za ta namen je mogoče Youngov elastični modul E_f in faktor zarezne učinka K_{fs} in K_{fd} , določen v projektih »Lunkerfest« [6] in »unverDROSSen« [7] povezati. Ta korelacija pri obeh nepravilnostih v materialu vodi do linearne regresije proti E_f , Slika 9 in Slika 10.

S tem pristopom je lokalno nihajno trdnost mogoče določiti s pomočjo neporušnega testiranja Slika 11. Na podlagi referenčne krivulje S-N za material brez nepravilnosti in lokalno neporušno oceno

reassessment of local stresses and strains in the defect volume and the surrounding defect-free material can be conducted to discuss the effects of the shrinkage or Dross volume more precisely.

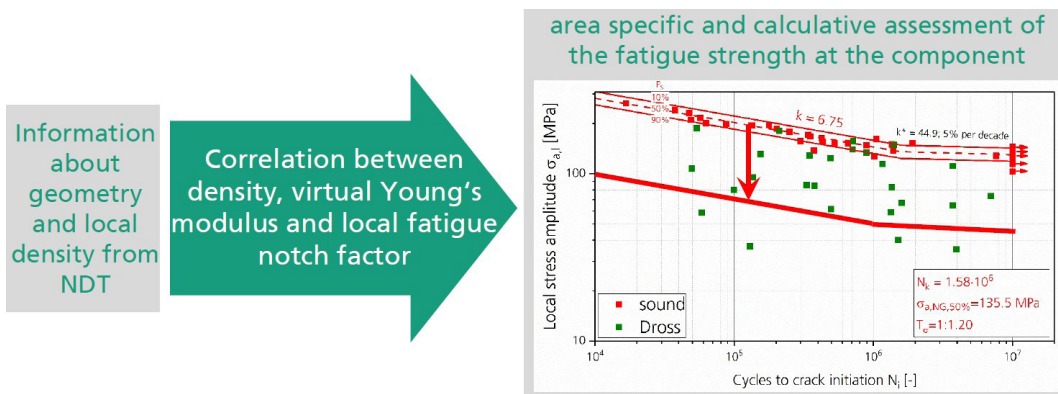
Besides an assessment of the virtual Young's modulus and local stresses by the gained digital measurement data and numerical analysis also the question of the resulting local fatigue strength in the defect volume needs to be answered. For this purpose, the virtual Young's modulus E_f and the fatigue notch factor K_{fs} and K_{fd} developed in the project »Lunkerfest« [6] and »unverDROSSen« [7] can be correlated. For both material defects this correlation leads to linear regression towards E_f , Figure 9 and Figure 10.

With this approach a local fatigue strength can be determined based on non-destructive testing, Figure 11. Based on a reference S-N curve for the defect free material condition and a local, non-destructive assessment of density, size and geometry of the material defect, an



Slika 10. Faktor zarezne učinka za peno K_{fs} in virtualni prožnostni modul po Youngu E_f za različne materiala iz nodularne litine [6]

Figure 10. Fatigue notch factor for Dross K_{fs} and virtual Young's modulus E_f for different nodular cast iron materials [6]



Slika 11. Ocena komponente in na območje vezanih krivulj S-N s parametri neporušnega testiranja

Figure 11. Assessment of component and area by area specific S-N curves with parameters of non-destructive testing

gostote, velikosti in geometrije nepravilnosti materialov, je mogoče določiti individualni, računski in ponovljivi faktor oslajenja, K_{IS}/K_{ID} , za izračun krivulje S-N, vezane na nepravilnost, Slika 11.

Preučevani pristop za oceno življenjske dobe ulite komponente z nepravilnostjo ponuja še večji potencial za optimizacijo geometrije in življenjske dobe komponente. V tem smislu je mogoče vključiti simulacijo litja in zasnovo litih komponent, mogoče pa bi bilo tudi oceniti komponento in na debelino stene vezane mikrostrukture in nepravilnosti z oceno pred litjem, izvedeno s simulacijo litja. Poleg tega ta vidik podrobno raziskujejo na inštitutu Fraunhofer LBF skupaj s sodelavci s področja mehanskega inženiringa, simulacije, neporušnega testiranja, simulacije litja in livarske tehnologije v okviru projekta »GrenzQualifizierung« [10]. Cilj je vzpostaviti dejanske mejne vzorce za serijske velike ulitke, izdelane iz nodularne litine, pri katerih se vse nepravilnosti, ki se lahko pojavijo pri materialu, ocenijo ob upoštevanju nihajne trdnosti, kvazistatičnih parametrov ali izgube togosti pred samim

individual, calculative and reproducible attenuation factor, K_{IS}/K_{ID} , can be determined enabling the calculation of a defect specific S-N curve, Figure 11.

The discussed approach for the lifetime assessment of defect affected cast components offers even more potentials for an optimisation of the component's geometry and lifetime. In this context, the cast simulation and the design of cast components can be included and it might be possible to assess the component and wall thickness specific microstructures and defects by a pre-cast assessment conducted with cast simulation. In addition, this aspect is closely investigated at Fraunhofer LBF together with partners from mechanical engineering, simulation, non-destructive testing, cast simulation and foundry technology in the framework of the project "GrenzQualifizierung" [10]. The aim is thus to establish virtual limiting samples for serial, large castings made of nodular cast iron in which all possibly occurring material defects are assessed concerning fatigue strength, quasi-static parameters or a loss in stiffness beforehand to the cast itself based

litjem na podlagi številskih analiz in podatkov iz simulacije litja. Vzporedno so komponente in mere pri na debelino stene vezanem neporušnem testiranju opredeljene za zaznavanje ocenjenih nepravilnosti po postopku litja. Glavna prednost temelju na dejstvu, da je zasnova lite komponente že preverjena glede na vpliv morebitno nastalih nepravilnosti na podlagi omejujočih nepravilnosti, ki so v vseh primerih kritične za uporabo komponente. Na vprašanje, ali bodo nepravilnosti v materialu zaznane med preverjanjem kakovosti, je mogoče odgovoriti s hitro oceno najdenih nepravilnosti brez kakršnih koli dodatnih izračunov in postopkov za potrditev.

Ta pristop lahko privede tudi do izbire komponent: Če so odkrite lokalne nepravilnosti v materialu in komponente ni več mogoče uporabiti za prenašanje velikih obremenitev, bo komponenta mogoče še vedno uporabna za prenašanje manjših obremenitev. Na primer, tovrstni pristop bi bilo mogoče uporabiti pri komponentah za vetrne turbine, kjer se lahko ista vrsta komponente uporabi na različnih področjih z različnimi jakostmi vetra in posledično različnimi obremenitvami.

3 Sklep

Rezultati študije kažejo, da je mogoče raziskave strukturne trdnosti in neporušnega testiranja združevati, zlasti digitalno. Tudi druga področja, ki so vključena v proces ocenjevanja življenjske dobe, lahko prispevajo več informacij za izvedbo mnogo natančnejše ocene. V tem smislu je potrebna večja izmenjava znanja, izkušenj, pa tudi potreb med različnimi področji, kar bo prispevalo k uspešnim, lahkim in stroškovno učinkovitim litim komponentam ne glede na njihovo velikost in material.

on numerical analysis and information from cast simulation. In parallel, component and wall thickness specific non-destructive testing measures are defined to detect the assessed defects after the casting process. The main advantage is based on the fact, that the design of the cast component is already checked against the effect of possibly occurring defects based on limiting defects, which are under any circumstances under critical for the usage of the component. Will material defects be detected during quality assurance a fast assessment of the found defects can be conducted without any further calculation and approval processes.

This approach can also lead to a selection of components: If local material defects are detected and a component is then no longer usable for high loads, it might still be applicable for usage under lower loads. An example for such an approach could be wind energy application, where the same component type might be used in different areas with different wind and thus load situation.

3 Conclusion

The discussed results show, that investigations of structural durability and non-destructive testing can be combined and especially also digitally. Moreover, further disciplines are involved in the process of lifetime assessment, being able to contribute more information to perform a much more precise assessment. In this context, it is necessary, to exchange more knowledge, experience as well as necessities among the different disciplines contributing to successful, light and cost efficient cast components of any size and material.

Viri / References

- [1] FKM-Richtlinie – Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss und Aluminiumwerkstoffen, 6., überarbeitete Ausgabe, Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM), Frankfurt na Majni, 2012
- [2] DNV GL: Machinery for Wind Turbines, Standard DNVGL-ST-0361, DNV GL AS, Oslo, Norveška, 2016
- [3] Adjunct to E446 Reference Radiographs for Steel Castings Up to 2 in. (51 mm) in Thickness. ASTM International, 2010
- [4] Institut für Gießereitechnik GmbH (IfG), Gesellschaft für Radiographie (GfR) GmbH: VDG- Merkblatt P-541, Fehlervergleichskatalog für die Bewertung von Durchstrahlungsprüfungen an dickwandigen Gußstücken aus unlegierten EN-GJS-Werkstoffen. Verein Deutscher Gießereifachleute e.V. VDG, 2001
- [5] Normenausschuss Eisen und Stahl (FES) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; Normenausschuss Gießereiwesen (GINA) im DIN: DIN 1690 Teil 2 – Technische Lieferbedingungen für Gußstücke aus metallischen Werkstoffen – Stahlgußstücke; Einteilung nach Gütestufen aufgrund zerstörungsfreier Prüfungen. Juni, 1985
- [6] C. Bleicher: Ein Beitrag zur Beurteilung der Schwingfestigkeit von Gusseisen mit Kugelgraphit mit besonderer Berücksichtigung der Auswirkungen von Lunkern auf die Bauteillebensdauer, Disertacija, Tehniška univerza v Darmstadtu, Fraunhofer LBF, Darmstadt, LBF-Bericht FB- 246, 2016
- [7] C. Bleicher et al.: Schlussbericht zum BMWi-Vorhaben unverDROSSen – Detektion, Prüfung und Bewertung von Dross im Großgussbereich, FKZ 0325802A, Darmstadt, 19. 12. 2018
- [8] Kurz, J. et al.: Untersuchungen von Schwindungsporositäten mittels mechanisierter Ultras- challprüfung mit Sampling Phased Array Technik an Sphäroguss von Windkraftanlagenkomponenten zur Abschätzung ihrer Schwingfestigkeit. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Potsdam, 26–28. Maja, 2014
- [9] Bleicher, C. et al.: Evaluation of fatigue of thick-walled nodular cast iron components with special regard to shrinkages, Proceedings CastTec »The world of cast iron materials – Diversity for the future«, 3. mednarodna konferenca, 24.–25. novembra 2016, Darmstadt
- [10] GrenzQualifizierung – Rechnergestützte Beurteilung der Bauteilfestigkeiten auf Basis virtueller Grenzmuster, Förderkennzeichen FKZ 0324271, od 1. 7. 2018

Stik / Contact:

Dr.-Ing. Christoph Bleicher Gießerei-Fachingenieur (VDG)

Gruppe Qualifizierung gegossener Komponenten Abteilung Werkstoffe und Bauteile

Bereich Betriebsfestigkeit

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF Bartningstraße 47 · D-64289

Darmstadt · Nemčija

Tel. +49 6151 705-8359, faks: +49 6151 705-214

christoph.bleicher@lbf.fraunhofer.de www.lbf.fraunhofer.de

Mikrostruktura in lastnosti litih kovinskih matričnih kompozitov

Microstructure and properties of cast metal matrix composites

Izvleček

Mikrostruktura in lastnosti kompozitov s kovinsko osnovo, zlasti kompozitov iz aluminijeve zlitine, ojačene s kratkimi ogljikovimi vlakni, izdelani s stiskalnim litjem. Pri kompozitih z osnovo iz čistega aluminija, ojačenih z ogljikovimi vlakni na osnovi poliakrilonitril (PAN), se je na fazni meji vlakno/matrica sprožil produkt reakcije (Al_4C_3). Ko je bila za ojačenje matrice in/ali ogljikovo vlakno na smolni osnovi uporabljena zlitina Al-Si, produkta reakcije ni bilo mogoče opaziti. Toplotna prevodnost zlitine Al-Si se je povečala zaradi ojačitve vlakna na smolni osnovi, zmanjšala pa se je pri ojačitvi vlakna na osnovi PAN. Tlačna trdnost kompozita z vlakni na osnovi PAN je bila večja kot pri kompozitu z vlakni na smolni osnovi. Obraba zlitine Al-Si pri suhem drsenju je bila bistveno manjša zaradi ogljikovih vlaken. Pri pogojih hude obrabe, kot sta visoka hitrost drsenja in velika obremenitev, je bila obraba manjša pri kompozitu z vlakni na smolni osnovi kot pri kompozitu z vlakni na osnovi PAN.

Ključne besede: kompozit, aluminij, ogljikovo vlakno, litje v testastem stanju

Abstract

Microstructure and properties of the metal matrix composites, mainly the short carbon fibre-reinforced aluminium composites fabricated by squeeze casting, were focused on. For the Polyacrylonitrile (PAN)- based carbon fibre-reinforced pure aluminium matrix composite, the reaction product (Al_4C_3) was formed at the fibre/matrix interface. When the Al-Si alloy was used for the matrix and/or the pitch-based carbon fibre was used for the reinforcement, the reaction product was not observed. Thermal conductivity of the Al-Si alloy increased due to the pitch-based fibre reinforcement, while that decreased due to the PAN-based fibre reinforcement. Compressive strength of the PAN-based fibre composite was greater than that of the pitch-based fibre composite. Wear loss of the Al-Si alloy under dry sliding wear was drastically decreased due to the carbon fibres. Under severe wear condition such as high sliding speed and high applied load, the wear loss of the pitch-based fibre composite was less than that of the PAN-based fibre composite.

Key words: composite, aluminium, carbon fibre, squeeze casting

1 Uvod

Ker se aluminij in njegove zlitine ponašajo z nizko gostoto in dobro odpornostjo proti oksidaciji, se zelo pogosto uporabljajo v industrijah, kot sta letalska

1 Introduction

Aluminium and its alloys, having a low density and good oxidation resistance, have been widely used for industrial applications such as in the aerospace,

in avtomobilska industrija ter elektronika. Vendar pa je uporaba še zmeraj omejena zaradi nezadostne trdnosti pri visokih temperaturah, togosti in odpornosti proti obrabi. Jačanje zlitin z nekovinskimi materiali, kot so keramična vlakna ali lasasti kristali, je ena od metod za izboljšavo teh lastnosti aluminija. Ogljikova vlakna so lahko ena od najboljših rešitev za ojačenje aluminija in izboljšavo njegovih lastnosti, ker imajo nizko gostoto, so zelo trdna in toga ter imajo majhen toplotni raztezek [1–3]. Ogljikova vlakna se na grobo delijo na vlakna na osnovi poliakrilnitrila (PAN) in vlakna na osnovi smole. Ogljikova vlakna na osnovi smole je mogoče pridobiti iz pekline ali naftne smole. Pri mezofaznih ogljikovih vlaknih na osnovi smole sta modul elastični in toplotna prevodnost zaradi višja kot pri ogljikovih vlaknih na osnovi PAN zaradi strukture, v kateri so planarne grafitne module močno usmerjene v vzdolžni smeri [4]. Livne tehnike, kot je proces infiltracije v talino, se pogosto uporabljajo pri izdelavi aluminijevih kompozitov, ojačenih z ogljikovimi vlakni [5–9]. Nekateri raziskovalci [8–12] so poročali, da so ogljikova vlakna na osnovi PAN zlahka dosegla aluminijevo talino ter ustvarila mehansko in kemično nestabilen Al_4C_3 na fazni meji vlakno/osnova med procesom litja. Na podlagi teh poročanj so ogljikova vlakna na osnovi smole v aluminijevi talini stabilnejša od ogljikovih vlaken na osnovi PAN. Predvidoma ogljikova vlakna na osnovi smole manj reagirajo zaradi nastanka visokega števila grafitnih kristalitov [10]; heterogen nastanek Al_4C_3 je povezan s površinskimi napakami na ogljikovih vlaknih, kot so izpostavljeni robovi osnovne grafitne ravnine, na kateri so prisotni vezi med ogljikovi atomi z nekompenziranimi visokoenergijskimi elektroni [13, 14]. Poleg tega stopnja grafitizacije vlaken določa reaktivnost vlaken na nastanek Al_4C_3 [15].

automobile and electronics sectors. However, the application is still limited due to the insufficient high-temperature strength, rigidity and wear resistance. Reinforcing the alloys with the nonmetallic materials, such as the ceramic fibres or whiskers, is one of the methods for improving these properties of the aluminium. Carbon fibres can be one of the best reinforcements for improving the properties because they have a low density, high strength, high rigidity and low thermal expansion [1–3]. Carbon fibres are roughly divided into the polyacrylonitrile (PAN)-based one and the pitch-based one. Pitch-based carbon fibres can be produced from either coal tar or petroleum pitch. Mesophase pitch-based carbon fibres have a higher elastic modulus and thermal conductivity than the PAN-based carbon fibres due to the structure in which the planar graphite molecules are highly oriented in the longitudinal direction [4]. Casting techniques, such as the melt infiltration process, have been widely used for fabricating the carbon fibre-reinforced aluminium composites [5–9]. Some researchers [8–12] reported that the PAN-based carbon fibre easily reacted with the aluminium melt and produced a mechanically and chemically unstable Al_4C_3 at the fibre-matrix interface during the casting process. According to these reports, the pitch-based carbon fibre was more stable than the PAN-based carbon fibre in the aluminium melt. The less reactivity of the pitch-based carbon fibre is considered to be due to its highly-developed graphite crystallites [10]; the heterogeneous nucleation of the Al_4C_3 is associated with surface defects on carbon fibres, such as exposed edges of graphite basal planes that exhibit carbon atoms with uncompensated high-energy electron bonds [13,14]. In addition, the degree of graphitization of the fibres determines the fibre's reactivity to nucleation of the Al_4C_3 .

Zato so vlakna z visoko stopnjo grafitizacije (ki vsebujejo visoko usmerjene osnovne ravnine z nekaj izpostavljenimi robovi) in gladka površina z malo topografije idealna za zaviranje nukleacije karbidov zaradi odsotnosti površinskih napak [11]. Prav tako so poročali, da dodatek silicija k aluminiju zavira reakcijo na mejni površini med ogljikom (grafitom) in osnovo [11, 12]. Ta reakcija ne more poteči samo med infiltracijo v talino, pač pa tudi med poznejšo toplotno obdelavo (ko je osnova ojačena s toplotno obdelavo) in/ali uporabo v okolju z visoko temperaturo. Li in drugi [8] so poročali, da je toplotna obdelava po litju v testastem stanju spodbudila tvorbo Al_4C_3 in degradirala mehanske lastnosti čistih aluminijevih kompozitov ali vlaken na osnovi PAN. Za razliko od vlaken na osnovi PAN so redki raziskovalci preiskovali lastnosti ogljikovih vlaken na osnovi smole, uporabljenih za ojačitev aluminijevega kompozita. Zato vplivi ogljikovih vlaken (na osnovi PAN ali smole), sestave osnove na mehanske lastnosti aluminija niso bili preučeni v zadostni meri.

V tem članku so predstavljene mikrostruktura, toplotne, mehanske in obrabne lastnosti kompozitov na aluminijevi osnovi, ojačenih s karbonskimi vlakni z litjem v testastem stanju [16–18].

2 Izdelava kompozitov in vrednotenje njihovih lastnosti

Kot osnovni kovini sta bila uporabljena čisti aluminij z 99,99 mas % in aluminijeva zlitina JIS-AC8A (Al-12Si-1Mg-1Cu-1Ni).

Kot ojačitev so bila uporabljena rezkana vlakna na osnovi PAN in na osnovi smole. Lastnosti vlaken so navedene v Preglednici 1 [1–3]. Pomembno razliko med temi vlakni je mogoče opaziti pri vrednostih toplotne prevodnosti in modula elastičnosti.

[15]. Thus, fibres with a high degree of graphitization (containing highly oriented basal planes with few exposed edges) and a smooth surface with little topography are ideal for hindering the nucleation of carbides, due to their lack of surface defects [11]. It has also been reported that the addition of silicon to aluminium suppresses the interfacial reaction between the carbon (graphite) and matrix [11, 12]. This reaction could occur not only during the melt infiltration, but also during the subsequent heat treatment (when the matrix is the heat treatment strengthened type) and/or in use under a high temperature environment. Li et al. [8] reported that the heat treatment after the squeeze casting promoted the Al_4C_3 formation and degraded the mechanical properties of the PAN-based fibre/pure aluminium composites. Unlike the PAN-based fibre, not many researchers have considered the properties of the pitch-based carbon fibre-reinforced aluminium composite. Therefore, the effects of the carbon fibre types (PAN-based or pitch-based), matrix composition on the mechanical properties of the aluminium have not been sufficiently discussed.

In this paper, the microstructure, thermal, mechanical and wear properties of the carbon fibre-reinforced aluminium matrix composites fabricated by the squeeze casting [16-18] are introduced.

2 Fabrication of composites and evaluation of their properties

The 99.99 mass% pure aluminium and JIS-AC8A aluminium alloy (Al-12Si-1Mg-1Cu-1Ni) were used as the matrix metals.

The PAN-based and the pitch-based milled fibres were used as reinforcements. The properties of the fibres are listed in Table 1 [1-3]. The significant difference

Pred izdelavo kompozita so bili vlakenski predoblikovanci izdelani na naslednji način: vlakna so se razpršila s pomočjo previdne agitacije v vodnem mediju z dodanim polivinil alkoholom (PVA) kot organskim vezivom in materialom silica sol kot anorganskim vezivom. Razvodnjavanje smo odpravili z oblikovanjem s stiskanjem, čemur je sledilo sušenje za odpravo vse preostale proste vode ter zagotovitev močne vezi med vlakni zaradi PVA. Predoblikovanec je v premer meril 50 mm, debelina pa je bila 15 mm. Volumski delež vlakna v kompozitu je bil nadziran pri 30 vol%. Pri predoblikovancu so bila vlakna zaradi oblikovanja s stiskanjem usmerjena v naključno ravninsko-dimenzionalni postavitvi.

Kompoziti so bili izdelani z litjem v testastem stanju. Predoblikovanec smo vodoravno položili v trajno kokilo in hkrati segrevali na 673 K. V kokilo smo ulili talino čistega aluminija pri 1063 K ali talino zlitine AC8A pri 973 K (oz. 130 K višje kot pri tekočin temperaturah), nato smo hitro vzpostavili tlak 40 MPa in ga ohranjali, dokler se postopek strjevanja taline ni zaključil. Med procesom litja v testastem stanju (segrevanja kokile in/ali infiltracije v talino) se je preostali PVA v predoblikovancu razgradil zaradi uplinjanja, preostalo silikatno vezivo pa v predoblikovancu deluje kot sredstvo za ohranjanje oblike.

Porazdelitev ogljikovih vlaken v kompozitih smo preučevali z optično mikroskopijo. Mikrostrukturo v bližini fazne meje smo opazovali s transmissijsko elektronsko mikroskopijo. Trdoto aluminija in kompozitov smo merili s pomočjo merilnika trdote po Vickersu. Trdoto vlaken v kompozitih smo izmerili s pomočjo nanovtisnega elementa z obremenitvijo 20 mN, s katerim smo ocenili trdnost fazne meje med vlaknom in osnovo.

between these fibres can be seen in the thermal conductivity and elastic modulus values.

Prior to the fabrication of the composite, the fibre preforms were fabricated as follows. The fibres were dispersed using careful agitation in an aqueous medium containing polyvinyl alcohol (PVA) as an organic binder and silica sol as an inorganic binder. Dewatering was conducted by press forming, followed by drying to drive off any residual free water and to obtain the bond strength among the fibres due to the PVA. The preform had a 50-mm diameter and was 15-mm thickness. The fibre volume fraction in the composite was controlled at 30 vol%. In the preform, the fibres were oriented in a randomly planar-dimensional arrangement due to the press forming.

The composites were fabricated by squeeze casting. The preform was horizontally placed in the permanent mould, and simultaneously heated at 673 K. The pure aluminium melt at 1063 K or the AC8A alloy melt at 973 K (respectively 130 K higher than liquidus temperatures) was poured into the mould, then a pressure of 40 MPa was quickly applied and maintained until the solidification of the melt was complete. During the squeeze casting process (mould heating and/or melt infiltration), the residual PVA in the preform is decomposed due to gasification and the residual silica binder acts as the shape retaining agent in the preform.

The distribution of the carbon fibres in the composites was examined by optical microscopy. The microstructure in the vicinity of the interface was observed by transmission electron microscopy. The hardness of the aluminium and composites was measured using a Vickers hardness tester. Hardness of the fibres in the composites was measured using a nano-

Diskaste preizkušance za meritve toplotne prevodnosti smo izdelali iz kompozitov. Po merjenju toplotne prevodnosti s pomočjo tehnike z laserskim bliskom smo toplotno razprševalnost za izračun toplotne prevodnosti spremenili v enačbo (1):

$$\lambda = a \cdot C_p \cdot \rho \quad (1),$$

pri čemer λ predstavlja toplotno prevodnost, a je toplotna razprševalnost, C_p je specifična toplota, ρ pa je gostota. Specifično toplotno kompozita smo izmerili z mešano metodo pri 370 K. ρ smo izmerili s pomočjo Arhimedovega načela.

Preizkus cikličnih sprememb temperature smo za oceno vedenja pri toplotnem raztezanju opravili v razponu od 333 K do 673 K s pomočjo horizontalnega potisnega dilatometra. Preizkus smo opravili pri atmosferskem tlaku, segrevanje in ohlajanje je potekalo s hitrostjo 10 K/min, uporabljena obremenitev je znašala $4,9 \times 10^{-2}$ N.

Tlačni preskušanci s premerom 8 mm in višino 12 mm so bili izdelani iz kompozitov. Tlačni preizkus je bil izveden pri temperaturi prostora in temperaturi 523 K.

Kompozite smo izpostavili preizkusu uporabe na podlagi metode valjček-disk. Zlitino AC8A in kompozite brez kompozita smo izrezali v konico na disku s premerom 5 mm in dolžino 15 mm. Za izdelavo ustreznika smo kromovo ležajno jeklo z visoko zalogo ogljika (JIS-SUJ2) oblikovali v disk. Preizkuse obrabe smo izvedli pod kontaktnimi obremenitvami (P) 17, 27 in 37 N ter pri drsnih hitrostih (v) 0,3, 1,5 in 3,0 m/s. Postopek smo odpravili v suhih pogojih brez prisotnosti drsenja in brez uporabe mazanja. Izgubo mase smo izmerili po čiščenju vzorca v acetonu s pomočjo precizne tehtnice. Koeficient trenja (μ) smo med preizkusom obrabe prav tako izmerili s pomočjo naprave za izvajanje preizkusov obrabe, opremljene z

indenter with a load of 20 mN in order to evaluate the fibre-matrix interfacial strength.

The disc test pieces for the thermal diffusivity measurements were machined from the composites. After measuring the thermal diffusivity using the laser flash technique, the thermal diffusivity was substituted into equation (1) to calculate the thermal conductivity:

$$\lambda = a \cdot C_p \cdot \rho \quad (1),$$

where λ is the thermal conductivity a is the thermal diffusivity, C_p is the specific heat and ρ is the density. The specific heat of the composite was measured by a mixing method at 370 K. ρ was measured using the Archimedian principle.

The thermal cycling test was carried out from 333 K to 673 K using a horizontal pushrod dilatometer in order to evaluate the thermal expansion behaviour. The test was performed at atmospheric pressure, the heating and cooling rates were 10 K/min, and the applied load was 4.9×10^{-2} N.

Compressive test pieces of 8-mm diameter and 12-mm height were machined from the composites. A compressive test was performed at ambient temperature and 523 K.

The composites were subjected to a wear test using the pin-on-disk method. The unreinforced AC8A alloy and composites were cut into the pin specimen of 5-mm diameter and 15-mm length. High carbon chromium bearing steel (JIS-SUJ2) was formed into a disk shape for the counterpart. The wear tests were carried out under contact loads (P) of 17, 27 and 37 N and at the sliding speeds (v) of 0.3, 1.5 and 3.0 m/s. It was carried out under a dry sliding condition and no lubrication was used. The mass loss was measured after cleaning the specimen in acetone using a precision balance. The coefficient of friction (μ) during the wear test was also measured using the wear test machine equipped with a load

Preglednica 1. Lastnosti ogljikovih vlaken [1–3].

Table 1. Properties of carbon fibres [1-3].

	Gostota / Density (mg/m ³)	Dolžina / Length (μm)	Premier / Diameter (μm)	CTE (×10 ⁻⁶ /K)	Toplotna prevodnost / Thermal Conductivity (W/(mK))	Modul elastičnosti / Elastic Modulus (GPa)
PAN	1,76	130	7	-0,4	10	230
Smola / Pitch	2,20	150	9,7	-1,2~0	900	940

merilno celico. Temperaturo vzorca z obliko konice med preizkusom obrabe smo merili s termočlenom tipa K, ki smo ga vdelali v vzorec.

cell. The temperature of the pin specimen during the wear test was measured by a type K-thermocouple, which was embedded in the specimen.

3. Mikrostruktura in trdota

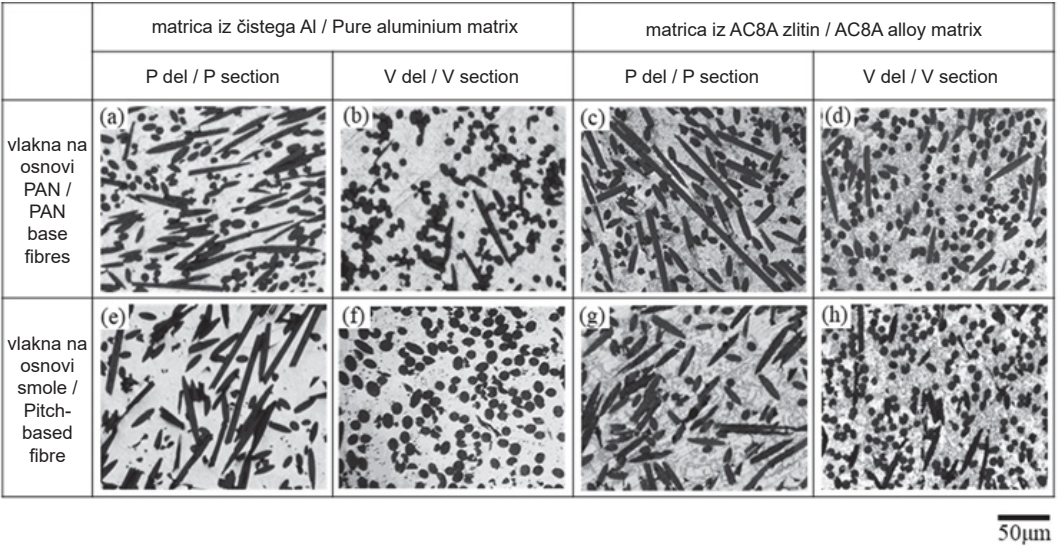
Na Sl. 1 je prikazan optični mikroposnetek paralelnih (P) in vertikalnih območij kompozitov (območje P leži vzporedno s stiskano ravnino pri litju v testastem stanju). Vlakna so na mikroposnetku vidna kot temni deli. Vlakna so bila na ravnini razporejena naključno, pomembne razlike med razporeditvijo vlaken pri obeh kompozitih pa nismo opazili. To razporeditev vlaken v kompozitih bi bilo mogoče prepisati razporeditvi v predoblikovancu.

Na Sl. 2 je prikazana transmissijska elektronska mikrostruktura v bližini fazne meje vlakno/osnova. Fazna meja med osnovo iz čistega aluminija in vlaknom na osnovi PAN je bila groba, opazili pa smo fazo, ki ni bila niti osnova niti vlakno (Sl. 2(a)). Energijskodisperzijska spektroskopija v tej fazi je pokazala, da se ta faza sestoji iz C in Al. Na podlagi teh rezultatov in poročanj drugih raziskovalcev [8, 10–12] je bila ta faza Al₄C₃, ki je nastala z reakcijo taline čistega aluminija in vlaken na osnovi PAN med litjem v testastem stanju. Al₄C₃ ni bila jasno prisotna v bližini fazne meje med osnovo in vlakni na osnovi smole, fazna meja pa je bila gladka (Sl. 2(b)). Produkti

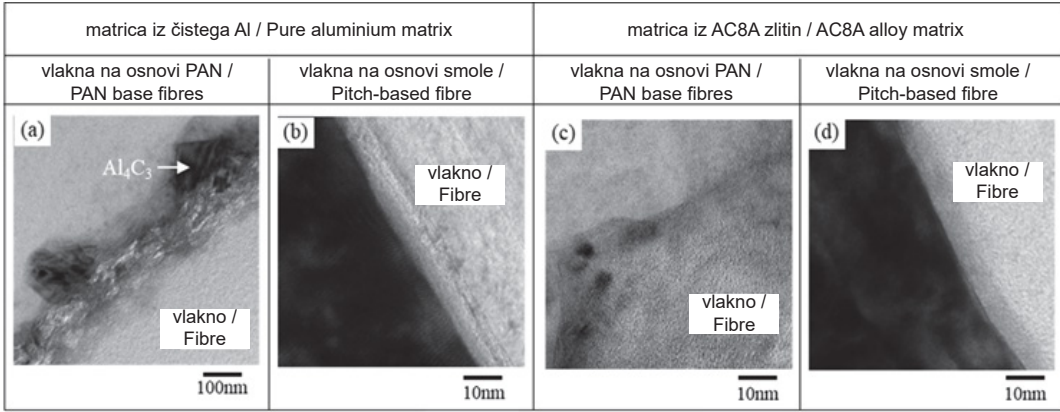
3. Microstructure and Hardness

Fig. 1 shows the optical micrographs of the parallel (P) and vertical (V) sections of the composites (P section is parallel to the pressed plane in the squeeze casting). The fibres were observed as a dark phase in the micrographs. The fibres were in a planar-dimensionally random arrangement and significant difference in the fibre-arrangement between the two composites was not observed. This fibre arrangement in the composites would be attributed to that in the preform.

Fig. 2 shows the transmission electron microstructure in the vicinity of the fibre-matrix interface. The interface between the pure aluminium matrix and PAN-based fibre was rough and a phase other than the matrix and fibre was observed (Fig. 2(a)). The EDX spectra in this phase showed that this phase consisted of C and Al. Based on this result and the reports by the other researchers [8, 10-12], this phase was Al₄C₃ which was formed by the reaction between the pure aluminium melt and the PAN-based fibre during the squeeze casting. The Al₄C₃ was not clearly observed in the vicinity of the interface between the matrix and the



Slika 1. Optični mikroposnetki kompozitov
Figure 1. Optical micrographs of composites



Slika 2. Transmisijska elektronska mikrofografija v bližini fazne meje med osnovo in vlakni v kompozitih
Figure 2. Transmission electron micrographs in the vicinity of interface between matrix and fibres in composites

reakcije pri zlitini AC8A v bližini fazne meje niso bili jasno opazni (Sl. 2(c) in (d)).
V Preglednici 2 so navedene trdote osnovnih kovin in kompozitov. Trdota čistega aluminija se je po ojačenju z vlakni

pitch-based fibre and the interface was smooth (Fig. 2(b)). The reaction products were not clearly observed in the vicinity of the interface in the AC8A alloy (Figs. 2(c) and (d)).

zvečala, trdota zlitine AC8A pa se je po ojačenju zmanjšala.

Na Sl. 3 so predstavljeni rezultati meritev trdote vlaken v kompozitih. Povprečne vrednosti trdote vlaken na osnovi PAN v kompozitih so bile mnogo višje kot pri tistih z vlakni na osnovi smole pri obeh osnovah. Raztros v vrednosti trdnosti vlaken na osnovi PAN je bil večji kot pri vlaken na osnovi smole. Čeprav vrednosti v Preglednici 2 kažejo, da vlakna niso imela zelo visoke trdote, so bile povprečne vrednosti trdote vlaken na osnovi PAN pri kompozitih večje od 300 HV. Bestercia in drugi [19] so poročali, da je bila trdota Al_4C_3 1.000–1.400 HV. To vodi do dejstva, da se razlog visoke trdote vlaken na osnovi PAN pri kompozitu skriva v tvorbi Al_4C_3 in/ ali da bi tvorba povzročila »učinek sidranja«

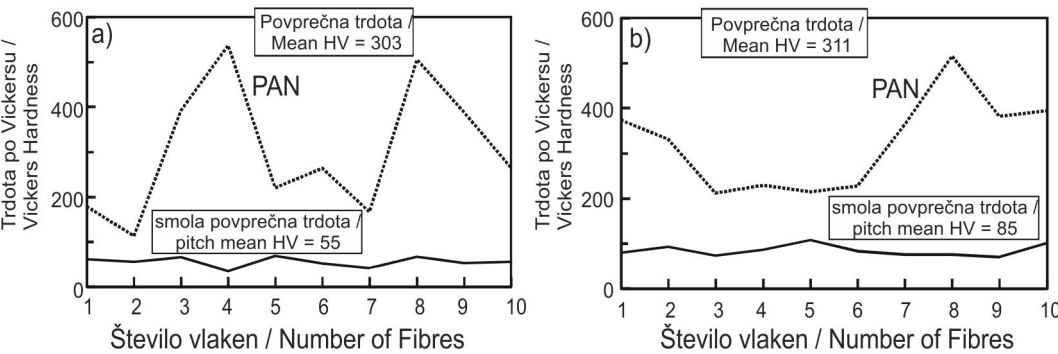
Table 2 lists the hardness of the matrix metals and composites. The hardness of the pure aluminium increased by the fibre reinforcement, while that of the AC8A alloy decreased by the reinforcement.

Fig. 3 shows the results of the hardness measurements on the fibres in the composites. The mean values of the hardness of the PAN-based fibre in the composites were much higher than those of the pitch-based fibre for both matrices. The scatter in the hardness values of the PAN-based fibres was greater than that of the pitch-based fibres. Although the values in the Table 2 indicates that the hardness of the fibres was not very high, the mean values of the hardness of the PAN-based fibre in the composites were greater than

Preglednica 2. Trdota matric in kompozitov (HV)

Table 2. Hardness of matrices and composites (HV)

Čisti Al / Pure Al	PAN-čisti Al / PAN-pure Al	Smola čisti Al / Pitch-pure Al	AC8A	PAN-AC8A	AC8A na osnovi smole / Pitch-AC8A
17	48	27	98	61	52



Slika 3. Spremembe vrednosti v trdoti vlaken, porazdeljeno v (a) kompozitih z matrico iz čistega aluminija in (b) kompozitih z matrico iz zlitine AC8A

Figure 3. Variation of hardness-value of fibres distributed in (a) pure aluminium matrix and (b) AC8A alloy matrix composites

za povečanje trdnosti fazne meje. Ker se Al_4C_3 ni homogeno tvorila v bližini fazne meje (Sl. 2), bi bila disperzija v vrednosti trdot pri vlaknih na osnovi PAN izredna (Sl. 3). Čeprav pri kompozitu z osnovo zlitine AC8A nismo opazili (Sl. 2), je bila trdota vlaken na osnovi PAN večja kot pri vlaknih na osnovi smole večja tudi pri zlitini AC8A; trdnost fazne meje med vlakni na osnovi PAN in osnovo zlitine AC8A večja kot med vlakni na osnovi smole in zlitino. Povprečna vrednost trdote vlaken na osnovi smole pri kompozitih zlitine AC8A (85 HV) je bila večja kot pri osnovi iz čistega aluminija (55 HV). Razlog za to bi bila kristalizacija trdnega evtektičnega silicija v bližini vlaken.

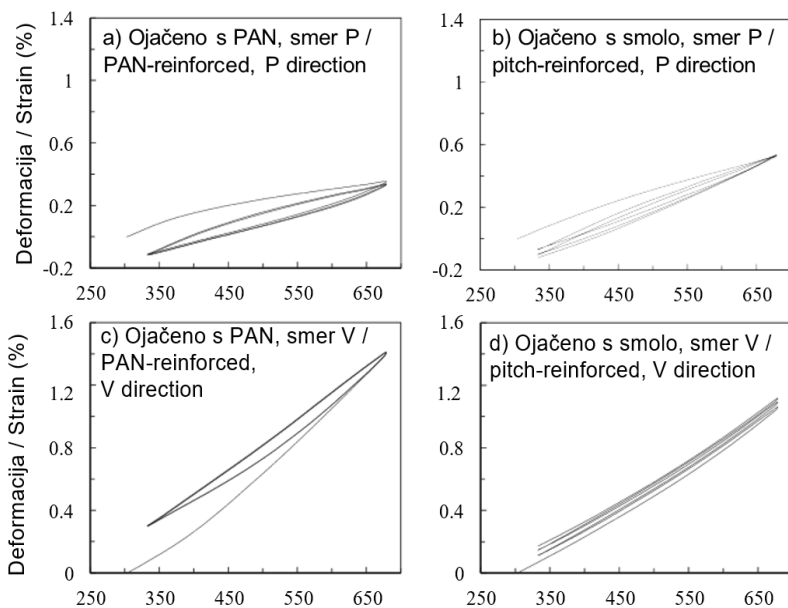
4. Toplotne lastnosti

Pri krivuljah odzivastoplotnimideformacijami kompozitov z osnovo iz čistega aluminija in iz zlitine AC8A je bila deformacija skorajda proporcionalna s temperaturo. Po drugi strani pa so krivulje kompozitov pokazale popolnoma drugačno vedenje. Sl. 4 kaže krivulje odziva s toplotnimi deformacijami kompozitov z osnovo iz čistega aluminija. Negativno preostalo deformacijo smo opazili po prvem ciklu za smer P tako pri kompozitih na osnovi PAN kot smole. Histerezo zanko smo opazili pri kompozitu na osnovi PAN, krivulji segrevanja in ohlajanja gresta po približno enaki poti kot pri prvi krivulji segrevanja (Sl. 4(a)). Čeprav smo histerezo zanko opazili pri kompozitu na osnovi PAN, ne gre po isti poti; s številom ciklov se je krivulja pomaknila v smeri proti negativni deformaciji (Sl. 4(b)). Po drugi strani smo po prvem ciklu v smeri V pozitivno preostalo deformacijo opazili pri obeh kompozitih. Histerezo zanka je bila jasno izražena pri kompozitu na osnovi PAN (Sl. 4(c)), z rastjo števila ciklov pri kompozitu na osnovi smole pa nismo opazili premikanja

300 HV. Bestercia et al. [19] reported that the hardness of Al_4C_3 was 1000-1400 HV. These things lead to the fact that the high hardness of PAN-based fibre in the composite would be due to the formation of Al_4C_3 and/or the formation would promote the "anchor effect" to increase the interfacial strength. Since the Al_4C_3 was not formed homogeneously near the interface (Fig. 2), the scatter in the hardness values of the PAN-based fibres would be remarkable (Fig. 3). Although the reaction products were not observed for the AC8A alloy matrix composites (Fig. 2), the hardness of the PAN-based fibre was greater than that of the pitch-based fibre also in the AC8A alloy; interfacial strength between the PAN-based fibre and AC8A alloy matrix would be greater than that between the pitch-based fibre and the alloy. The mean value of the hardness of the pitch-based fibre in the AC8A alloy composites (85 HV) was higher than that for the pure aluminium matrix (55 HV). This would be due to the crystallization of the hard-eutectic silicon near the fibre.

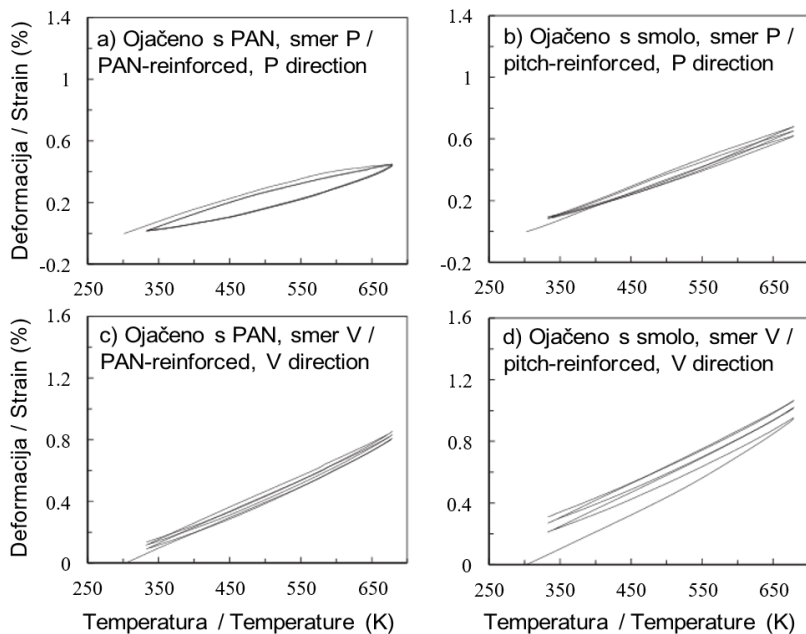
4. Thermal properties

In the thermal strain response curves of the unreinforced pure aluminium and AC8A alloy, the strain was almost proportional to the temperature. On the other hand, the curves of the composites showed a totally different behaviour. Fig. 4 shows the thermal strain response curves of the pure aluminium matrix composites. The negative residual strain was observed after the first cycle for the P direction of both the PAN- and pitch-based composites. A hysteresis loop was clearly observed in the PAN-based composite and the heating and cooling curve approximately traced the same paths other than the first heating curve (Fig. 4(a)). Although the hysteresis loop was



Slika 4. Krivulje odziva s toplotnimi deformacijami kompozitov z osnovo iz čistega aluminija

Figure 4. Thermal strain response curves of pure aluminium matrix composites

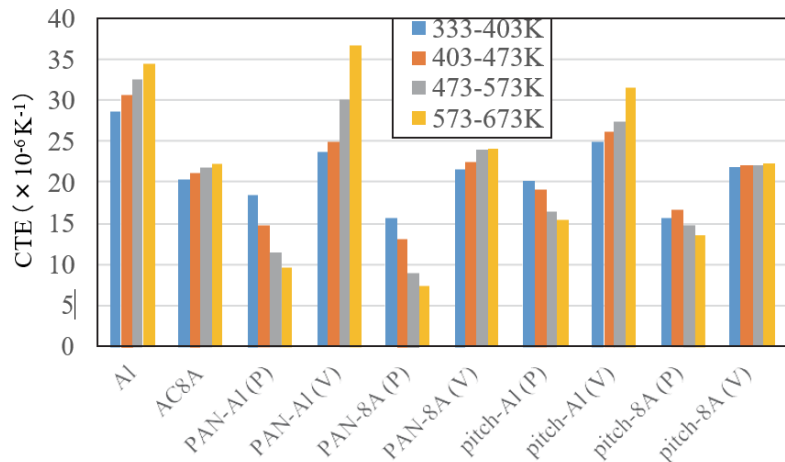


Slika 5. Krivulje odziva s toplotnimi deformacijami kompozitov z osnovo iz zlitine AC8A

Figure 5. Thermal strain response curves of AC8A alloy matrix composites

Slika 6. Koeficient toplotne razteznosti neojačenih kovin in kompozitov

Figure 6. CTE of the unreinforced metals and composites



krivulje v pozitivno smeri deformacij (Sl. 4(d)). Čeprav smo podobno težnjo opazili pri kompozitih z osnovo iz zlitine AC8A (Sl. 5), se zdi premikanje krivulj v pozitivno smer obremenitev z rastjo števila ciklov bolj zaostreno kot pri kompozitih z osnovo iz čistega aluminija v smeri V (Sl. 5(d)).

Na Sl. 6 je prikazan koeficient toplotne razteznosti neojačenih kovin kompozitov, izmerjen med drugim segrevanjem. Na splošno se je koeficient toplotne razteznosti povečeval v smeri P, z rastjo temperature pa se je povečeval v smeri V.

Ta anizotropija kompozita bi bila zaradi porazdelitve vlaken v kompozitih; vlakna so bila ravninsko gledano razporejena naključno, kar je kazalo na to, da je bila večina vlaken usmerjenih pravokotno na smer meritev toplotnega raztezanja v smeri V. Čista zanka, opažena pri kompozitu na osnovi PAN, kaže, da je to težko doseči pri drseči fazni meji med toplotnim ciklom zaradi povečanja trdnosti fazne meje zaradi tvorbe Al_4C_3 (Sl. 2 in 3). Nasprotno smo pri kompozitu na osnovi smole pri vsakem ciklu opazil zamik položaja krivulj, kar kaže, da se to zlahka zgodi pri drsenju fazne meje. Preostala deformacija, opažena pri prvem segrevanju, bi bila posledica

observed in the pitch-based composite, it does not trace the same path; it moved in the negative strain direction with increasing the number of cycles (Fig. 4(b)). On the other hand, the positive residual strain was observed after the first cycle in the V direction of both composites. A hysteresis loop was clearly observed for the PAN-based composite (Fig. 4(c)), while it was not observed and the movement of the curve in the positive strain direction with increasing the number of cycles for the pitch-based composite (Fig. 4(d)). Although a similar tendency was observed for the AC8A alloy matrix composites (Fig. 5), the movement of the curves in the positive strain direction with increasing the number of cycles looks severer than those for the pure aluminium matrix composites in the V direction (Fig. 5(d)).

Fig. 6 shows the coefficient of thermal elongation (CTE) of the unreinforced metals and composites measured during the second heating. Overall, the CTE decreased as the temperature increased in the P direction, while it increased as the temperature increased in the V direction.

This anisotropy of the composite would be due to the fibre arrangement

sprostitve obremenitve, ki je nastala zaradi neujemanja v koeficient toplotne razteznosti (CTE) med vlaknom in osnovo med strjevanjem osnove.

Na Sl. 7 je prikazana toplotna prevodnost neojačenih kovin in kompozitov. Pri vsaki osnovi je ojačitev pri vlaknu na osnovi smole z visoko toplotno prevodnostjo povečala toplotno prevodnost v smeri P, povečanja pa nismo opazili v smeri V. Toplotna prevodnost vlakna, navedenega v Preglednici 1, poteka v vzdolžni smeri vlaken; toplotna prevodnost v prečni smeri bi bila precej manjša. Toplotna upornost pri fazni meji med vlakni/osnovo bi zavirala tudi pretok toplote zlasti v smeri V kompozita.

5. Mehanske lastnosti

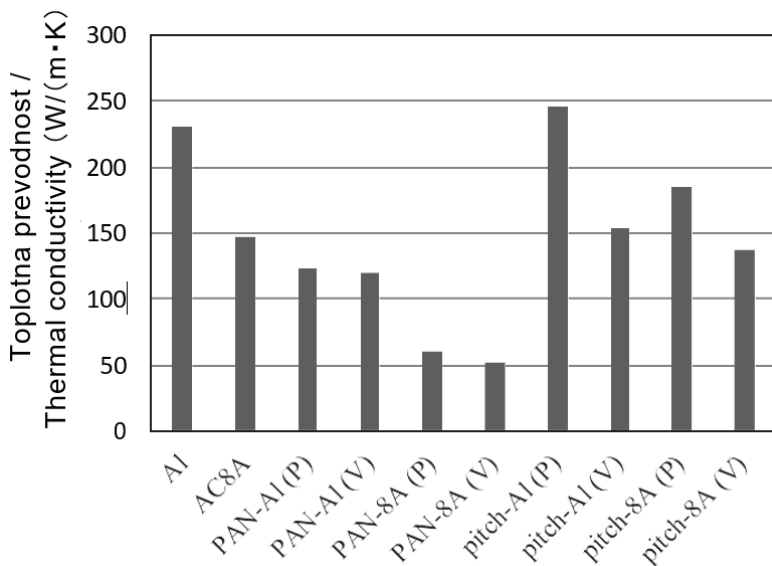
Krivulje tlačne napetosti in deformacije osnovnih kovin in kompozitov so prikazane na Sl. 8. Pri prostorski temperaturi se je upornost deformacije povečala zaradi ojačenja z vlakni (Sl. 8(a) in (e)) pri osnovi iz čistega aluminija, jasnega povečanja

in the composites; the fibres were in a planar-dimensionally random arrangement, indicating that most of fibres were oriented perpendicular to the direction of the thermal expansion measurement in the V direction. Clear loop observed for the PAN-based composite indicates that it is difficult to occur the interfacial sliding during the thermal cycle owing to the increase in the interfacial strength due to the formation of Al_4C_3 (Figs. 2 and 3). In contrast, the position displacement of the curves every cycle observed for the pitch-based composite indicates that it is easy to occur the interfacial sliding. Residual strain observed in the first heating would be a consequence of the release of stress which was induced due to the mismatch in the CTE between the fibre and matrix during the solidification of the matrix.

Fig. 7 shows the thermal conductivity of the unreinforced metals and composites. For every matrix, the reinforcement with the pitch-based fibre having the high thermal conductivity increased the thermal conductivity in the P direction, while the

Slika 7. Toplotna prevodnost neojačenih kovin in kompozitov

Figure 7. Thermal conductivity of unreinforced metals and composites



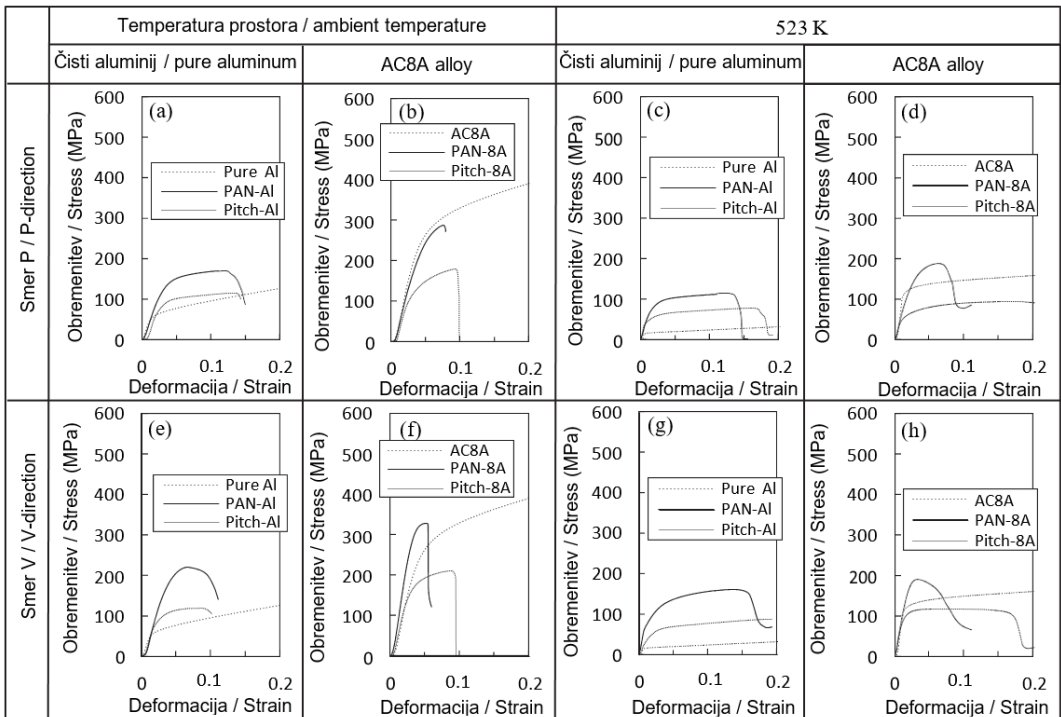
upornosti pa nismo opazili pri osnovi iz zlitine AC8A (Sl. 8(b) in (f)). Pri vsaki temperaturi je bil učinek ojačenja v smeri V večji kot od učinka v smeri P, učinek ojačenja vlaken na osnovi PAN pa je bil večji kot pri vlaknu na osnovi smole. Upornost deformacije pri temperaturi 523 K se je povečala zaradi ojačitve z vlakni na osnovi PAN v obeh smereh in pri obeh osnovah.

Razpoke v diagonalni smeri proti tlačni smeri so bile opažene pri vseh kompozitnih preskušancih. Jamičaste strukture kompozitov so pokazale, da so bile na površinah kompozitov z vlakni na osnovi PAN prisotna številna zlomljena vlakna. Zelo tanka vlakna, ki so verjetno nastala zaradi vzdolžnega razslojevanja vlaken, smo pogosto opazili na jamičastih strukturah

increase was not observed in the V direction. The thermal conductivity of the fibre listed in Table 1 is that in the longitudinal direction of the fibre; the thermal conductivity in the transverse direction would be quite smaller. The fibre/matrix interfacial thermal resistance would also inhibit the heat flow especially in the V direction of the composite.

5. Mechanical properties

Compressive stress-strain curves of the matrix metals and composites are shown in the Fig. 8. At ambient temperature, the deformation resistance increased due to the fibre reinforcement (Figs. 8(a) and



Slika 8. Krivulje tlačne trdnosti in deformacije osnovnih kovin in kompozitov

Figure 8. Compressive stress-strain curves of matrix metals and composites

kompozitov z vlakni na osnovi smole. Ta tanka vlakna bi bila grafitni kristaliti, ki smo jih omenili zgoraj, razslojevanje vlaken pa kaže, da je jakost vlaken v smeri, ki je pravokotna na smer obremenitve, nizka.

6. Lastnosti obrabe

Na Sl. 9 so predstavljeni učinki hitrosti drsenja na stopnjo obrabe zlitine AC8A in kompozitov brez ojačitve. Stopnja obrabe neojačene zlitine se je drastično povečala, ko je hitrost drsenja pri obremenitvi 37 N preseгла 1,5 m/s. Ojačitev z vlakni je drastično zmanjšala obrabo zlasti pri veliki obremenitvi. Posebej je treba omeniti, da ojačitev pri vlaknih na osnovi smole močno vpliva na zmanjševanje izgube zaradi obrabe.

Torni koeficient (μ) vzorcev med preizkusom obrabe je prikazan na Sl. 10. Vrstice z napakami na sliki predstavljajo območje med največjimi in najmanjšimi vrednostmi, in sicer raztros med obrabo. Veliki razpon predstavlja večjo spremembo v vrednostih μ med preizkusom obrabe. Raztros se je nekoliko zmanjšal z ojačitvijo z vlakni pri vsaki hitrosti drsenja, ojačitev pa ni bistveno vplivala na spremembe povprečnih vrednosti μ . Čeprav je bila razlika v povprečnih vrednostih μ med dvema kompozitoma majhna, se zdi, da je raztros pri kompozitih z vlakni na osnovi smole nekoliko manjši kot pa pri vlaknih na osnovi PAN.

Na Sl. 11 so prikazane spremembe vzorca z obliko konice (zlitina AC8A in kompoziti brez ojačitve) med preizkusom obrabe. Ko je vrednost v znašala 3,0 m/s ($P = 17$ N), je temperatura neojačenih zlitin strmo narasla, temperatura kompozitov pa se je samo nekoliko povečala (Sl. 11(a)). Pri večji obremenitvi ($P = 37$ N) smo opazili jasno razliko med obema kompozitoma;

(e)) for the pure aluminium matrix, while the increase in resistance was not clearly observed for the AC8A alloy matrix (Figs. 8(b) and (f)). At every temperature, the reinforcement effect in the V direction was higher than that in the P direction, and the reinforcement effect of the PAN-based fibre was higher than that of the pitch-based fibre. At 523 K, the deformation resistance increased due to the reinforcement with the PAN-based fibre in both directions and for both matrices.

Cracks in the diagonal direction to the compressive direction were observed in all the composite test pieces. Fracture surfaces of the composites showed that the many fractured fibres were observed on the surfaces of the PAN-based fibre composites. Very thin fibres, which were probably formed due to the delamination longitudinally to the fibre, were often observed on the fracture surfaces of the pitch-based fibre composites. These thin fibres would be the graphite crystallites, which were mentioned earlier, and the delamination in the fibre indicates that the fibre-strength in the direction perpendicular to the stress direction is low.

6. Wear properties

Fig. 9 represents the effects of the sliding speed on the wear rate of the unreinforced AC8A alloy and composites. The wear rate of the unreinforced alloy drastically increased when the sliding speed exceeded 1.5 m/s under a load of 37 N. The fibre-reinforcement drastically reduced the wear, especially under a high load. Of particular note is that the reinforcement with the pitch-based fibre has a substantial effect on decreasing the wear loss.

The coefficient of friction (μ) of the specimens during the wear test is shown

temperatura kompozitov z vlakni na osnovi PAN je strmo narasla, temperatura kompozitov z vlakni na osnovi smole pa se je samo blago povečala (Sl. 11(b)). V teh pogojih temperatura neojačene zlitine zaradi hude obrabe vzorca v obliki konice ni bilo mogoče izmeriti.

Rastrski elektronski mikroposnetki in rentgenski preslikavi obrabljenih površin ustreznikov so kazali, da je bila površina ustreznika, združena z neojačeno zlitino, večinoma iz aluminija. Po drugi strani smo na obrabljenih površinah ustreznikov, združenih s kompoziti, opazili železo, ogljik in samo majhno količino aluminija, kar kaže, da ogljikova vlakna močno vplivajo na omejevanje prevzema aluminijeve zlitine z ustreznikom. Porazdelitev ogljika kaže, da se je večina vlaken v bližini obrabljene površine razdrobila v majhne delce. Pri kombinaciji v kompozitu z vlakni na osnovi smole je bila velika površina prekrita z zdrobljenimi vlakni, zadevno območje pri kompozitu z vlakni na osnovi PAN pa je bilo omejeno.

Presečni mikroposnetki obrabljenih površin neojačene zlitine in kompozitov ($v = 3,0$ m/s, $P = 37$ N) so prikazani na Sl. 12. V bližini površine neojačene zlitine (Sl. 12(a)) smo opazili mehansko rezkano plast (MML) z debelino pribl. $40\text{ }\mu\text{m}$, pri kompozitih pa ni jasno izražena (Sl. 12(b) in (c)). V bližini obrabljenih površin obeh kompozitov nismo opazili niti ekstrakcije niti razslojevanja vlaken iz osnove, v bližini površin pa smo opazili drobljenje vlaken. Pri kompozitu z vlakni na osnovi smole smo komajda opazili plastično tečenje, to plastično tečenje z debelino pribl. $10\text{ }\mu\text{m}$ pa je bilo mogoče opaziti v bližini obrabe površine kompozita z vlakni na osnovi PAN.

Ti rezultati so pokazali, da so ogljikova vlakna na obrabljenih površinah oblikovala trdno mazivno plast in tako preprečila zaseg osnove z ustreznikom, o čemer

in Fig. 10. The error bars in the figure represent the range between the maximum and minimum values, namely, the scatter during the wear. The large range represents a greater change in values of the μ during the wear test. The scatter slightly decreased by the fibre-reinforcement under every sliding speed, while the reinforcement did not have a significant role in changing the average values of μ . Although the difference in the average values in μ between the two composites was low, the scatter for the pitch-based fibre composite seems to be slightly lower than those for the PAN-based fibre one.

Fig. 11 shows the change in the temperature of the pin specimens (unreinforced AC8A alloy and composites) during the wear test. When v was 3.0 m/s ($P = 17$ N), the temperature of the unreinforced alloy sharply rose, while that of the composites slightly rose (Fig. 11(a)). Under the higher load ($P = 37$ N), the difference between the two composites was clearly observed; the temperature of the PAN-based fibre composite sharply rose, while that of the pitch-based fibre composite had only slightly increased (Fig. 11(b)). Under this condition, the temperature of the unreinforced alloy was not able to be accurately measured due to the severe wear of the pin specimen.

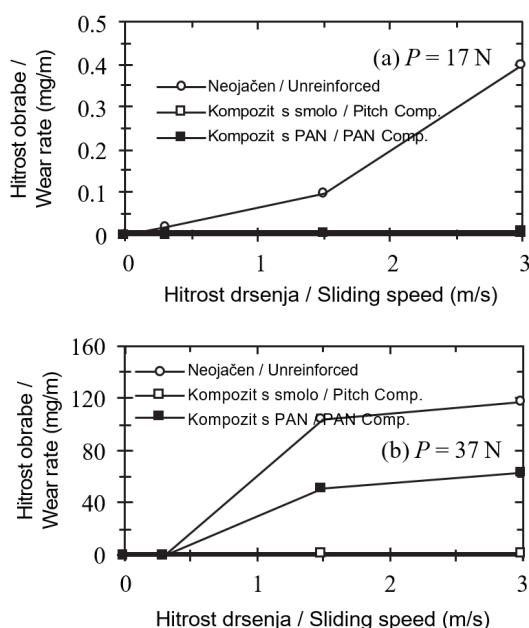
Scanning electron micrographs and the X-ray maps of the worn surfaces of the counterparts indicated that the surface of the counterpart combined with the unreinforced alloy mainly consisted of aluminium. On the other hand, iron, carbon and only a slight amount of aluminium were detected on the worn surfaces of the counterparts combined with the composites, suggesting that the carbon fibre has a strong effect on suppressing the seizure of the aluminium alloy with the counterpart. The distribution of the carbon suggests that most of fibres

smo poročali zgoraj v zvezi z vedenjem aluminijevega kompozita, ojačenega z ogljikovimi vlakni na osnovi PAN, grafitnega vlakna in lističastega grafita pri obrabi [7, 20–23]. Pri pogojih hude obrabe je bila obraba manjša pri kompozitu z vlakni na smolni osnovi kot pri kompozitu z vlakni na osnovi PAN. Preglednica 1 kaže, da toplotni prevodnosti pri vlaknih na osnovi PAN oz. smole znašata 10 W/(mK) pri prvi in 900 W/(mK) pri drugi. Razlika med tema vrednostma je privedla do večje toplotne prevodnosti kompozita z vlakni na osnovi smole, kot je prikazano na Sl. 7. Visoka toplotna prevodnost lahko izboljša sevanje toplote, ki jo je ustvarilo trenje vzorca v obliki konice, kar je prevedlo do manjšega zasega med osnovo iz aluminijeve zlitine in ustreznika. Zmanjšanje zasega bi privedlo

near the worn surface had crumbled into small particles. A wide area of the surface was covered with the crumbled fibres when combined with the pitch-based fibre composite, while the covered area was limited when combined with the PAN-based fibre composite.

Cross-sectional micrographs of the worn surfaces of the unreinforced alloy and composites ($v = 3.0$ m/s, $P = 37$ N) are shown in Fig. 12. The mechanically milled layer (MML) with a thickness of about 40 μm was obviously observed near the worn surface of the unreinforced alloy (Fig. 12(a)), while it cannot be clearly observed for the composites (Figs. 12(b) and (c)). Near the worn surfaces of both composites, neither the extraction nor the delamination of the fibres from the matrix were observed, while the crumbling of the fibres near the surfaces was observed. Plastic flow was hardly observed for the pitch-based fibre composite, while a slight plastic flow with a thickness of about 10 μm can be observed near the worn surface of the PAN-based fibre composite.

These results indicated that the carbon fibres formed a solid lubricant film on the worn surfaces thus preventing seizure of the matrix with the counterpart, as previously reported regarding the wear behaviour of the aluminium composite reinforced with the PAN-based carbon fibre, graphite fibre and graphite flake [7, 20–23]. Under severe wear conditions, the wear loss of the pitch-based fibre composite was lower than that for the PAN-based fibre one. Table 1 shows that the thermal conductivities of the PAN-based and the pitch-based fibre are 10 W/(mK) and 900 W/(mK), respectively. The difference in these values led to the higher thermal conductivity of the pitch-based fibre composite, as shown in Fig. 7. The high thermal conductivity can improve the radiation of heat which was generated by the friction in the pin specimen, leading to

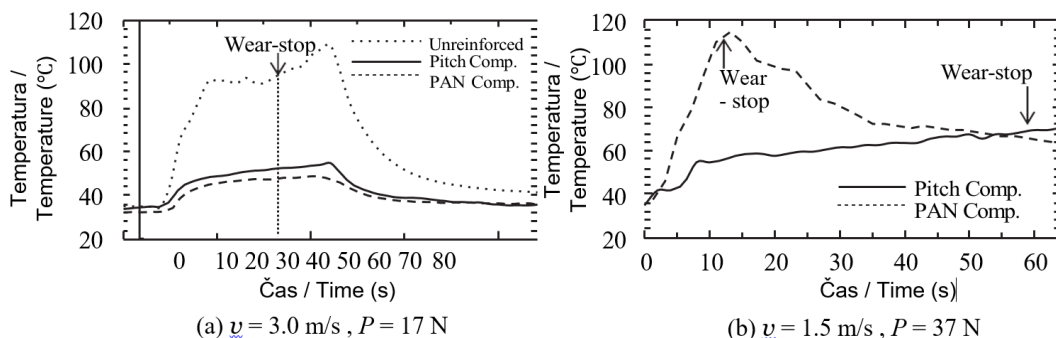
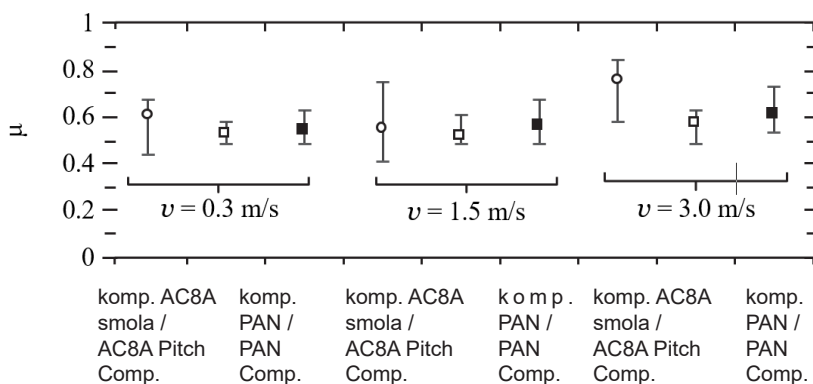


Slika 9. Učinki hitrosti drsenja na stopnjo obrabe neojačene zlitine AC8A in kompozitov

Figure 9. Effects of sliding speed on wear rate of unreinforced AC8A alloy and composites

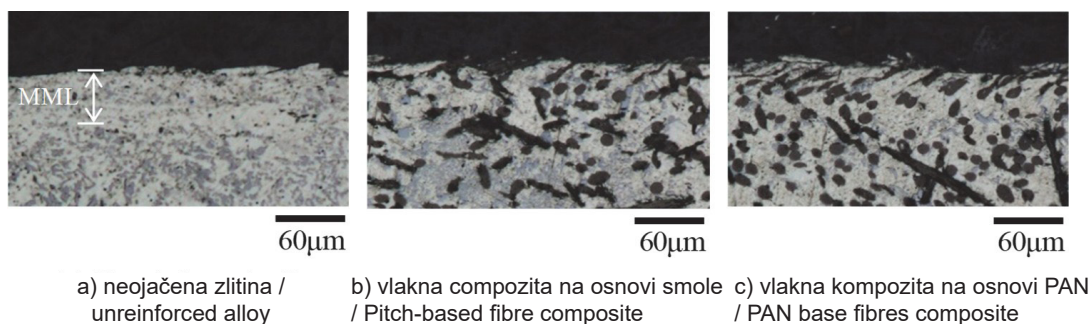
Slika 10. Torni koeficient (μ) vzorcev med preizkusom obrabe ($P = 27 \text{ N}$)

Figure 10. Coefficient of friction (μ) of specimens during wear test ($P=27 \text{ N}$)



Slika 11. Spremembe v temperaturi pri zlitini AC8A in kompozitih brez ojačitve med preizkusom obrabe.

Figure 11. Change in temperature of unreinforced AC8A alloy and composites during wear test.



Slika 12. Presečni mikrografi obrabljenih površin zlitin in kompozitov brez ojačitve ($v = 3.0 \text{ m/s}$, $P = 37 \text{ N}$). MML na Sl. (a) predstavlja mehansko rezkano plast.

Figure 12. Cross-sectional micrographs of worn surfaces of unreinforced alloy and composites ($v = 3.0 \text{ m/s}$, $P = 37 \text{ N}$). MML in the Fig. (a) represents the mechanically milled layer.

do zmanjšanja obrabe in raztrosa pri vrednosti tornega koeficienta med izvedbo preizkusa obrabe. Vlakna na osnovi smole v kompozitu bi delovala kot sevalo toplote v bližini obrabljene površine med obrabo, kar bi privedlo do dušenja torne toplote in zasega, posledično pa do manjše izgube zaradi obrabe.

7. Povzetek

Ojačitev z vlakni na osnovi PAN je učinkovita za izboljšanje trdnosti, vlakna na osnovi smole pa so učinkovita za izboljšanje toplotne prevodnosti in odpornosti proti obrabi. Čeprav do izboljšave trdnosti pri ojačitvi vlakna na osnovi PAN pride zlasti zaradi »učinka sidranja« Al_4C_3 , ki se ustvari na fazni meji, bi ta tvorba degradirala vlakna in bi Al_4C_3 povzročila reakcijo hidratacije, kar bi privedlo do degradacije kompozitov. Cilj v prihodnje je izboljšanje trdnosti brez tvorbe Al_4C_3 . V pogojih suhega drsenja, kot je prikazano v tem članku, zajem in torna toplota vplivata na vedenje kompozitov pri obrabi. Po drugi strani je avtor potrdil tudi, da je kompozit z vlakni na osnovi PAN dobro odporen proti obrabi, kompozit z vlakni na osnovi smole pa je odporen proti obrabi pri dodanem mazivu, v teh pogojih je težko ustvarjati zajem in torno toploto. Kombinacijo ogljikovih vlaken in osnove bi bilo treba določati glede na vrsto uporabe.

the suppression of seizure between the aluminium alloy matrix and the counterpart. The decrease in the seizure would lead to a decrease in the wear and the scatter in the coefficient of friction value during the wear test. The pitch-based fibres in the composite would act as a heat radiator near the worn surface during the wear, leading to the suppression of the frictional heat and seizure, and subsequent decrease in the wear loss.

7. Summary

The reinforcement with the PAN-based fibre is effective for improving the strength, while that with the pitch-based fibre is effective for improving the thermal conductivity and wear resistance. Although the improvement in the strength by the PAN-based fibre reinforcement is mainly due to the "anchor effect" of the Al_4C_3 formed at the interface, this formation would degrade the fibre and the Al_4C_3 would cause the hydration reaction leading to the degradation in the composites. The improvement in the strength without the Al_4C_3 formation would be a future issue. Under the dry sliding conditions as shown in this paper, the seizure and frictional heat affect the wear behaviour of the composites. On the other hand, the author has confirmed that the PAN-based fibre composite also has a good wear resistance as well as the pitch-based fibre composite under the lubricant wear conditions, because it is difficult to generate the seizure and frictional heat under the conditions. The combination of the carbon fibre and matrix should be considered in accordance with the application.

Viri / References

- [1] "Torayca T300 Data Sheet". Toray carbon fibres America, Inc. <http://www.toraycfa.com/pdfs/T300DataSheet.pdf> (accessed 2016-12-29).
- [2] "Product Catalogue". Toray Industries Inc. <http://www.torayca.com/download/pdf/mildfibre.pdf> (accessed 2016-12-29).
- [3] "Data sheet for GRANOC". Nippon Graphite Fibre Corporation. http://www.ngfworld.com/en/en_skill.html (accessed 2016-12-29).
- [4] Y. Arai: Nippon Steel Technical Report 59(1993)66-70.
- [5] J. Gu, X. Zhang, M. Gu, Z. Liu and G. Zhang: Mater. Lett. 58(2004)3170-3174.
- [6] B. Wielage and A. Dorner: Surf. Coat. Technol. 108-109(1988)473-478.
- [7] L. Liu, W. Li, Y. Tang, B. Shen and W. Hu: Wear 266(2009)733-738.
- [8] S. Li and C. Chao: Metall. Mater. Trans. A. 35(2004)2153-2160.
- [9] K. Yamada, S. Sekiguchi, T. Hanamura and T. Inoue: J. Japan Inst. Metals 59 (1995)1108-1117.
- [10] T. Suzuki and H. Umehara: Carbon 37(1999)47-59.
- [11] T. Etter, P. Schulz, M. Weber, J. Metz, M. Wimmmler, J.F. Löffler and P.J. Uggowitzer: Mater. Sci. Eng. A. 448(2007)1-6.
- [12] X. Qu, L. Zhang, M. Wu and S. Ren: Mater. Int. 21(2011)189-197.
- [13] M. Yang and V.D. Scott: J. Mater. Sci. 26(1991)1609-1617.
- [14] M. De Sanctis, S. Pelletier, Y. Bienvenu and M. Guigon: Carbon 32(1994)925-930.
- [15] W. Lacom, H.P. Degischer and P. Schulz: Key Eng. Mater. 127-131 (1997)679-686.
- [16] K. Asano: Mater. Trans. 58(2017) 906-913.
- [17] K. Asano and M. F. Zainuddin: Mater. Trans. 58(2017) 898-905.
- [18] K. Asano: Int. J. Cast Metals Res. 2017(30)365-373.
- [19] M. Bestercia, L. Pešekb, P. Zubkob et al.: Mater Lett. 59(2005) 1971-1975.
- [20] A. Daoud: Mater. Letters 58(2004) 3206-3213.
- [21] C.S. Ramesh, H. Adarsha, S. Pramod and Z. Khan: Mater. Design 50(2013)597-605.
- [22] K. Naplocha and K. Granat: Wear 265(2008)1734-1740.
- [23] A. Ureña, J. Rams, M. Campo and M. Sánchez: Wear 266(2009)1128-1136.

Badarinath Kalkunte¹, Lorenzo Valente², Cristian Viscardi², Vlastimil Kolda³

¹Calcom ESI SA (Switzerland / Švica), ²Ecotre Valente SRL (Italy / Italija),

³Mecas ESI SRO (Czech Republic / Češka republika)

Virtualni nadzor dimenzij za napovedovanje in merjenje končne oblike litih delov

Virtual dimensional control to predict and measure the final shape of the casting part

Izvleček

Avtomobilska tehnologija je izredno tekmovalna in vedno pogostejše zahteva visoko kakovostne ulitke visoke strukturne trdnosti z dobrimi mehanskimi lastnostmi in nadzorom dimenzij v mejah toleranc za vgradnjo v podsestave in sestave.

Na lite komponente delujejo stalne in spreminjajoče se toplotno-mehanske obremenitve med celotnim proizvodnim procesom, tj. tako med postopkom litja kot tudi, kadar obstaja potreba po toplotni obdelavi. Posledica je nastanek vedno novih obremenitev. Obremenitve se kopičijo še posebej, ko je ulitek v kokili med polnjenjem in strjevanjem, ter se sprostijo in vnovič porazdelijo med odpiranjem kokile, izmetom dela in naknadnih obdelavah, npr. med obrezovanjem in toplotno obdelavo. Njihova posledica so dimenzijske variacije v okviru proizvodnega procesa. Zato je pomembno proučiti takšne variacije med procesom, da bi jih lahko premostili v primeru neskladnosti geometrije končnega ulitka z želenimi dimenzijami, ki jih zahtevajo lastniki delov.

Modeliranje procesa se neprestano razvija in čeprav se je o modeliranju preostale napetosti govorilo že v preteklosti, je vedno obstajal izziv, kako napovedati in primerjati dimenzijske variacije med simulacijami in resničnostjo. Celoten proces modeliranja z namenom čim bolj natančnega mapiranja temperatur in obvladovanje vseh vidikov simuliranega procesa se proučuje vedno temeljiteje.

To vodi v možnost virtualnega dimenzijskega nadzora z namenom napovedovanja končne geometrije dela skozi simulacijo in nato primerjavo z dejanskim ulitkom ali ciljnim dimenzijami dela. Natanko na takšen način se v obratih v zadnjih letih izvaja dimenzijsko zagotavljanje kakovosti delov, kjer se 3-D sken ulitega dela primerja s ciljnim dimenzijami dela.

Takšna vrsta integriranih orodij v okviru razvoja omogoča oblikovalcem tako pravočasno izvedbo nujnih ukrepov kot tudi znatno krajši čas, potreben za izvedbo meritev s strani oddelkov zagotavljanja kakovosti. Tukaj je predstavljen nov napredek za premostitev propada med razvojem, proizvodnjo in zagotavljanjem kakovosti.

Ključne besede: Simulacija litja, kokilno litje, HPDC, toplotna obremenitev, mazanje kokile, nadzor dimenzij

Abstract

The automotive industry is brutally competitive and increasingly requires high performance castings with high structural integrity, good mechanical properties and intolerance dimensional control to go further into the sub-assemblies and assembly.

Casting components are subjected to continuous and varying thermo-mechanical loading during the entire manufacturing process; casting process and also in cases where heat treatment need to be applied. These result in evolving stresses through the process. They accumulate especially while the casting is inside the die during filling & solidification, and are released and re-distributed during die opening, part ejection, and subsequent post operations like trimming and heat treatment. These result in continuous dimensional variation during the manufacturing process. It is thus important to study these variations through the process and be able to overcome in case of a mismatch in the final cast geometry as opposed to the desired dimensions prescribed by the part owner.

Process modelling has continuously evolved, and though residual stress modelling has always been talked about in the past, there has always been challenges to predict and compare the dimensional variations between simulation and reality. The entire modelling process itself to map the die temperatures as closely as possible and master every aspect of the process in the simulation have always been studied more deeper and deeper.

All these lead to the possibility to have a virtual dimensional control to predict first the final part geometry from simulation and compare it with the actual cast part or the target part dimensions. This is exactly a manner in which the part dimensional quality assurance is done on shop floor in the recent years, comparing 3D scan of the as-cast part with the target part dimensions.

Such kind of integrated tools during the development stage allows the die designers to take necessary action early on and allows radically shortening of the metrological activities in the QA department. This is another effort to bridge the gap between design, manufacturing and QA.

Keywords: Casting simulation, die castings, HPDC, thermal stresses, die lubrication, dimensional control

1 Predvidevanje in preprečevanje izmetnih ulitkov

Glavni izziv livarski industriji že več kot dve desetletji predstavlja potreba po predvidevanju tipičnih nepravilnosti (krčenje in poroznost zaradi plina, razpoke in vse druge pogoste metalurške nepravilnosti) v določenem procesu litja z največjo možno natančnostjo predvidevanja, da je mogoče ukrepanje in odpravljanje nepravilnosti že pred proizvodno fazo/omejeno na ponovno vzorčenje. Izračuni na podlagi simulacijskih programov sicer niso izdelani na podlagi velikih podatkovnih zbirk za napovedovanje rezultata po bolj ali manj empirični metodi, kljub vsemu pa omogočajo objektivno napoved, kaj se bo dogajalo s kovino med

1 Predict and prevent defective castings

For over 2 decades now, the main challenge for the foundry industry was linked to the need to predict the typical defects (shrinkage and gas porosity, cracks and all other common metallurgical defects) within a given casting process at the highest possible accuracy in advance, so as to be able to intervene and rectify defects before the production stage / limiting re-sampling. The calculations at the basis of the simulation programs are not drawn from a large database in order to predict the result in a more or less empirical manner, but instead provide an objective forecast of what happens to the metal during the process.

procesom. Glede na modele izračunov, ki jih uporabljajo različni programi, in ob upoštevanju mejnih pogojev je možno pridobiti zelo zanesljive simulacije, zaradi katerih lahko upravljavci izberejo najboljšo možno rešitev z najnižjimi stroški.

V preteklosti so znanje in izkušnje temeljili na tem, kako učinkovito odpraviti najpogostejše napake s pomočjo simulacije, zdaj pa se bolj osredotočamo na razsežnostni vidik, ki je bil prvotno postranskega pomena. Povedano z drugimi besedami: glede na spoznanje, da numerična simulacija zagotavlja zanesljive rezultate in omogoča preprečevanje nepravilnosti pri ulitkih še pred začetkom procesa, ali je mogoče oceniti – na enako zanesljiv način – vedenje obdelovanca med procesom strjevanja s posledičnim boljšim razumevanjem pojava krčenja in kontrakcij?

2 Ustvarjanje virtualnih vzorcev za preverjanje dimenzij

Osnovna zahteva za to je zmožnost podrobnega pregleda celotnega procesa litja, začeni z doziranjem pri tlačnem litju, nato pa s sledenjem razvoju temperature in mehanskemu vedenju kokile iz aluminijeve zlitine in jekla, vključno z odprtjem kokile, izmetom dela ter postopki po zaključku procesa za natančno predvidevanje preostale napetosti, ki privede do nepravilnosti. S postopkom ESI ProCAST je tovrstno analizo mogoče izvesti z vsestranskim postopkom, s simulacijo stroja, ki proizvaja virtualne kose, kot bi bili v fizični obliki; preverjanje dimenzij je mogoče pozneje oceniti z modelom CAD na ciljnem delu, ki bo proizveden ali preverjen retrospektivno s primerjavo fizičnih meritev prototipa.

Nato nastopi potreba po uvedbi preverjanja dimenzij za simulirani/virtualni

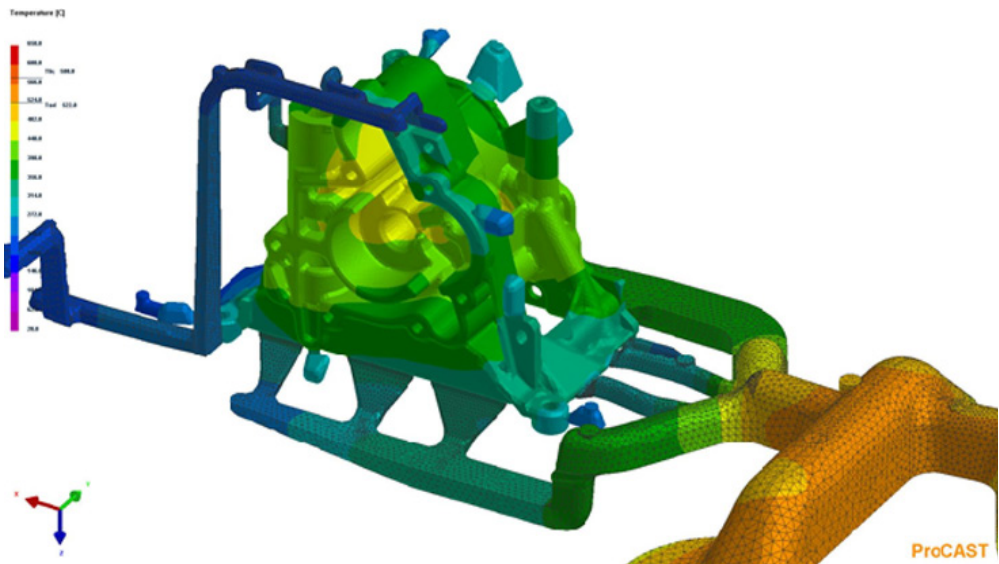
Depending on the models of calculation used by the various programs, and on the boundary conditions it is possible to obtain very reliable simulations, thanks to which operators are able to choose the best solution for the lowest cost.

With the know-how having been built on how to tackle the common defects effectively through simulation, there has been recently a higher focus on the dimensional aspect, which was initially of secondary importance. In other words: having noted that the numerical simulation provides a reliable result and allows to rectify casting defects before starting the process, is it possible to evaluate – in an equally reliable manner – the behavior of the workpiece during solidification, so as to better understand shrinkage and contractions?

2 Creating virtual samples for dimensional check

A pre-requisite for this is to be able to consider in the detail the entire casting process, starting from dosing in high pressure die casting, and following the evolution of temperature and mechanical behavior of the aluminium alloy and steel die, including die opening, part ejection, and post-operations to predict accurately residual stresses which result in deformation. With the ESI ProCAST, this type of analysis can be performed using a very comprehensive process, simulating a machine that produces virtual pieces as if they were physical ones; the dimensional verification can later be either assessed with the CAD of the target part to be produced or proven in retrospect, by the comparing to the physical measurement of the prototype.

The need then arises to implement a dimensional check for the simulated / virtual



Slika 1. Simulacija krčenje in deformacije v celotnem orodju in ulitku med postopki polnjenja, strjevanja in ohlajanja

Figure 1. Simulation of shrinkage and deformation over the entire mold and casting during filling, solidification and cooling

model, pri čemer mora to preverjanje zagotoviti zanesljive rezultate ter biti preprosto za izvedbo. Hkrati tudi velja, da je program GOM Inspect Professional dobro sredstvo za ocenjevanje dimenzij. Združitev teh dveh elementov prinese željeno vrednost. Pristop se precej razlikuje od klasičnega pristopa, pri katerem simulaciji sledi primerjava rezultatov z rezultati fizičnega prototipa. Ta integracija preverjanje dimenzij uvaja v cikel načrtovanja in industrializacije, s čimer prinaša možnost prestrezanja in odprave vseh težav še pred dosegom proizvodne faze.

3 Virtualno preverjanje dimenzij enako kot v realnosti

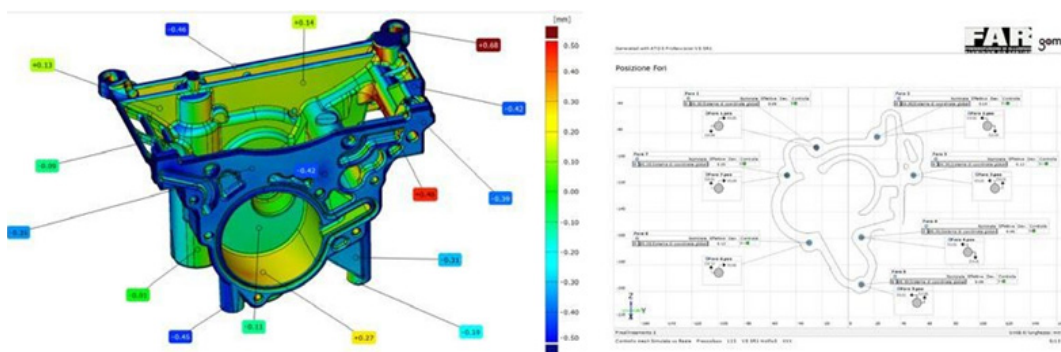
En vidik te interakcije, ki je zagotovo revolucionaren – poleg zanesljivosti

model, whereby this check must provide reliable results and be easy to perform. At the same time, it was understood GOM Inspect Professional provides a good means for dimensional assessment. An integration between these two promised the required value. The approach is quite different from the classical approach whereby the simulation is followed by a comparison of results with those of the physical prototype. This integration introduces dimensional verification into the cycle of planning and industrialization, thus providing the possibility of intercepting and resolving any problem before even reaching the production stage.

postopka – je metodologija preverjanja, ki ostaja nespremenjena glede na metodologijo v delovišču obrata. V praksi uporabnik izvede simulacijo ulitka s programom ProCAST (polnjenje, strjevanje, obremenitve in toplotna obdelava) v točkovnem oblaku v obliki, ki je sprejemljiva za ogled v programu GOM Inspect, ki predstavlja virtualni kos po njegovi odstranitvi in deformaciji. To omogoča prepoznavanje in odpravljanje vseh slabosti teh podatkov na isti način kot pri obdelavi oblaka pri optičnem skeniranju prototipa. Pravzaprav lahko tisti, ki se na delovišču obrata ukvarjajo s preverjanjem dimenzij, lahko ta postopek še vedno obravnavajo kot črno skrinjico cikla ter še naprej delajo na popolnoma enak način kot prej. Uvedba virtualnega preverjanja dimenzij neposredno za numerično simulacijo je velika prednost, ker ne vpliva na delovni načrt ter omogoča ohranitev istih delovnih metod, vendar pa optimizira razvojni cikel izdelka, pa tudi čase izvajanja posameznih korakov. Pravzaprav ta integracija bistveno skrajša skupni čas procesa, ker skrajša čas, potreben za izdelavo prototipov in vzorčenje, na minimum.

3 Virtual dimensional check as in Reality

One aspect of this interaction, which is certainly revolutionary, aside from the reliability of the procedure, is the verification methodology, which is unchanged with regard to the shop floor methodology. In practice, the user performs the casting simulation with ProCAST (filling, solidification, stress, and heat treatment) resulting in a point cloud in the form acceptable to view inside GOM Inspect, representing the virtual piece once it has been withdrawn and deformed. This enables identification and resolving any weaknesses of this data in the same way as it would treat a cloud obtained from the optical scanning of a prototype. In fact, for those working on shop floor with dimensional verification, can treat this still as a black box within the cycle, and continue to operate, exactly in the same way as they did previously. The introduction of virtual dimensional check right after the numerical simulation is a huge benefit, because it does not disrupt the work plan and permits the maintenance of the same operating methods, optimizing



Slika 2. Predvidljivo preverjanje dimenzij: Primerjava med rezultatom ProCAST in nominalnim CAD (na levi), preverjanje položaja odprtine (na desni)

Figure 2. Predictive dimensional control: Comparison between ProCAST output and nominal CAD (on left), Verification of hole position (on right)

Oblikovalska zanka in celovito virtualno preverjanje

Ker si industrija si prizadeva stopiti proti generaciji 4.0, smo priča pomembne delitve vlog: oblikovalske ekipe si prizadevajo za neposredni dialog z oddelki za zagotavljanje kakovosti do končnih faz, pri čemer pa ne uporabljajo istih delovnih metod. Pravzaprav se pogosto tehnična ekipa in ekipa za preverjanje kakovosti srečata šele po proizvodnji fizičnega kosa. S prihodom rešitev, ki temeljijo na sistemih CAD in aplikacijah ERP, se poenostavlja komunikacija med sistemom CAD/tehničnim oddelkom in drugimi vejami družbe, s čimer družba pridobiva na konkurenčnosti. Integracija simulacije in preverjanja dimenzij za podporo načrtovanja procesa litja je ustvarila virtualni most med delom tehnične ekipe, ki obdeluje simulacijo, in ekipe za preverjanje kakovosti, ki lahko zdaj svoj del prispeva brez potrebe po prisotnosti fizičnega prototipa, na podlagi katerega bi podala svoje mnenje. Obe ekipi zdaj sodelujeta v procesu za fino usklajevanje še pred izdelavo izdelka. Tako integracija pomeni, da zanka za oblikovanje in preverjanje postaja v celoti virtualna in jo je mogoče izvajati brez stroškov, saj ni več odvisna od izdelave prototipov. Tako faza oblikovanja kot načrt za preverjanje se zaključita skupaj, kar omogoči virtualno preverjanje dimenzij s strani ekipe za preverjanje kakovosti, ki je najbolj usposobljena za razlaganje in ocenjevanje simuliranih dimenzij. To končno prinaša odpravo vseh nevidnih preprek, ki so postavljene med različnimi ekipami.

Podlaga vsega tega je bistvena pridobitev zanesljive simulacije procesov, kot se izvajajo v resničnosti. Simulacije bi morale omogočati preučevanje kompleksnih geometrij s sorazmerno preprostim postopki, hkrati pa predvidevati podrobno

the product development cycle, right down to the execution times for individual steps. Indeed, this integration significantly shortens the overall process time because it reduces the prototyping and sampling steps to a minimum.

Design loop and complete virtual verification

As the Industry wishes to move towards 4.0, there is a division of roles marked today: the design team struggles to have a direct dialog with Quality Control, until the final stages, not having the same working methods. Indeed, a lot of times the technical and quality teams meet only once the physical piece has been produced. The advent of solutions based on CAD systems and on ERP applications has facilitated communication between the CAD/technical department and other areas of the business, thereby improving competitiveness. The integration of simulation & dimensional check to support the planning of the casting process, have forged a virtual bridge between the work of the technical team, which processes the simulation, and Quality Control, which can now contribute without needing a physical prototype to work with. The two offices work together to fine-tune the process even before the product is made. So, the integration means that the design-verification loop becomes entirely virtual and can be done at zero cost, as it does not depend on prototyping. Both the design phase and the plan for the verification are completed together, enabling virtual dimensional checks by the quality staff who are the best to interpret and validate simulated dimensions. This finally allows break down of the invisible barriers between the different teams.

vedenje materialov prek elastoplastične formulacije. Natančne simulacije so pomembne za dosledno preverjanje dimenzij. Nato se lahko po končni virtualni validaciji, kamor spada tudi preverjanje dimenzij, izdela prototip.

Zahvala

Zahvaljujemo se g. Lorenzu Valenteju, generalnemu direktorju družbe ECOTRE, g. Gabrieleju Graziosiju, direktorju družbe GOM Italia, in celotnim ekipam družba ECOTRE in GOM za njihovo odlično opravljeno delo ter sodelovanje pri tej integraciji.

The background to all of this, is essential to obtain reliable simulation of the process as it happens in reality. The simulations should be able to consider complex geometries, but manage with relative simplicity, yet account for detailed behavior of materials through elasto-plastic formulation. Accurate simulations are important for consistent dimensional checks. The prototype can then be made after final virtual validation including dimensional checks.

Acknowledgement

We thank Mr. Lorenzo Valente, CEO ECOTRE, Mr. Gabriele Graziosi, GOM Italia Managing Director and the entire teams at ECOTRE & GOM for their excellent work and co-operation in this integration.

Viri / References

- [1] Dantzig, Jonathan; Rappaz, Michel (2009): Solidification. EPFL Press: Lausanne.
- [2] Samonds, Mark; Zhu, J.Z. (2003): Coupled Thermal-fluids-stress Analysis of Castings. MCWASP 2003
- [3] Sholapurwalla, Adi; Scott, Sam (2006): Integration of Advanced Simulation Techniques
- [4] Köser, Ole; Kaltöfen, Jürgen (2009): Casting Simulation Drives Component Development for HPDC. Casting Plant & Technology 3/2009
- [5] Chabod, Amaury; Longa, Yves; Dracon, Jean Marie; Chailler, Kévin; Hairy, Patrick; Da Silva, Antonio (2012); Simulating the deformation of dies in the foundry. MCWASP 2012
- [6] ProCAST 2018.0 User Manual, ESI Group

M. PETRIČ¹, R. CERC KOROŠEC², M. VONČINA¹, P. MRVAR¹, S. KASTELIC¹

¹ Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta (SI)

² Univerza v Ljubljani, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo (SI)

Uporaba 3D tiskanih polimernih modelov v livarstvu

Applications of 3D printed polymer patterns in casting technologies

Povzetek

Delo opisuje raziskave različnih materialov za 3D tisk in natisnjenih modelov za uporabo pri različnih livarskih tehnologijah. Za izdelavo modelov in vzorcev sta bili uporabljeni dve tehnologiji 3D tiska, in sicer tehnologija ciljnega nalaganja materiala (FDM) ter stereolitografska tehnika (SLA). Natisnili so se trije različni materiali, kot so material na osnovi polilaktične kisline (PLA), polivinil alkohola (PVA) ter akrilatne fotosenzitivne smole (Castable). Natisnjeni vzorci so bili analizirani z metodami, kot so diferenčna vrstična kalorimetrija (DSC), dilatometrijska analiza ter določevanje vsebnosti pepela. S temi analizami smo okarakterizirali materiale za uporabnost pri tehnologiji precizijskega litja, kjer je temperatura tališča modela, temperaturna razteznost ter ostanek pepela po izžiganju modela ključnega pomena za uspešno izdelavo ulitka.

Rezultati so pokazali, da so temperaturi tališča PLA in PVA materialov nižji kot pri smoli Castable in znašajo med 140 in 180 °C, kar je primerno za proces izžiganja modela. Podobno je temperaturna razteznost omenjenih materialov ugodna, saj pri segrevanju do 120 °C ne izkazujejo znatnega širjenja, nasprotno pa se smola Castable med segrevanjem do 120 °C širi, kar lahko povzroči pokanje školjk med segrevanjem. Delež pepela je bil največji pri PLA materialu, pri PVA in Castable pa je bil najmanjši. Iz rezultatov je moč zaključiti, da je za proizvodnjo modelov za precizijsko litje najugodnejši material PVA.

Ključne besede: 3D tisk, polimerni materiali, precizijsko litje

Abstract

This paper describes a research of different 3D printing materials and printed models used for different casting technologies. In the research the Fused Deposition Modelling (FDM) and Stereolithography (SLA) 3D printing techniques were used with different printing materials such as Polylactic Acid based material (PLA), Poly Vinyl Alcohol based material (PVA) and Acrylate Photopolymer resin (Castable). Printed models were characterised by dilatometric analysis, Differential Scanning Calorimetry (DSC) and by ash content determination in order to evaluate the possibilities of such produced models being used at investment casting technology. The analysed properties such as thermal expansion, melting point of polymer material and ash content after burnout process are crucial at achieving good quality of cast parts.

Results showed that the melting points of PVA and PLA materials are at 140 to 180 °C which is suitable for the burnout process. Thermal expansion is the most suitable for PVA and PLA materials since they are not expanding during the heating of the samples. The Castable resin has the highest melting point and is expanding until 120 °C which makes it

less interesting for investment casting models production. The ash content was the highest at PLA material and the lowest at PVA and Castable resin. According to presented results the PVA material is the most suitable for use in investment casting technology.

Keywords: 3D-printing, polymeric materials, investment casting

1 Uvod

3D tisk je tehnologija, ki je vse bolj v uporabi za proizvodnjo različnih delov iz različnih materialov. Ta tehnologija je veliko hitrejša pri izdelavi omejenih, majhnih serij proizvedenih kosov v primerjavi z konvencionalnimi tehnologijami, ni pa še primerna za proizvodnjo velikoserijskih izdelkov. Največkrat je uporabljena za proizvodnjo prototipnih izdelkov. Poznanih je veliko aditivnih 3D tehnologij, najbolj uporabljeni materiali pa so polimerni. V zadnjem času se pojavljajo tudi tehnologije tiskanja kovinskih izdelkov, a v omejenem obsegu zaradi lastnosti kovin, kot je krčenje, ki vodijo v krivljenje, notranje napetosti, fazne transformacije itn.

Možnost uporabe 3D tiska je pri tehnologiji precizijskega litja. Konvencionalni postopki precizijskega litja uporabljajo voščene modele, ki so sestavljeni v drevo, s pomočjo katerega se izdelava keramična školjka. Danes so na voljo različni materiali, ki bi se lahko uporabili namesto voska in se lahko natisnejo. Taka tehnologija je lahko primerna za izdelavo prototipnih kovinskih izdelkov preko precizijskega litja.

Tehnologija precizijskega litja zahteva materiale, ki so dobro iztaljivi in izgorljivi, kjer je delež pepela zelo nizek ter širjenje in krčenje pri izžiganju čim manjše. Take lastnosti lahko zagotavljajo samo polimerni natisnjeni materiali. Polimerni materiali so najpogostejše natisnjeni s tehnologijo ciljnega nalaganja materiala (FDM), kjer je filament potisnjen skozi segreto šobo in se odlaga na prej natisnjenih slojih, s stereolitografsko tehniko (SLA), kjer se

1 Introduction

3D printing is a more and more used technology for production of various parts from various materials. This technology can be much faster at small batch series than conventional technologies, but it is not yet appropriate for large scale productions. It is often used for production of prototype parts. There are many 3D technologies known and the most used materials are different polymers. Recently also metal powders can be used for 3D printing but with limited capabilities due to material properties such as contraction factors leading to distortions and stresses, phase transformations, etc.

One option to use 3D printing technology is in the field of investment casting. Conventional investment casting technology uses wax patterns assembled together in a tree to produce ceramic shells used for casting. Nowadays different materials are available which can be used instead of wax and could be printed instead of poured or injection moulded. Such technologies would be very suitable for rapid prototyping of real metal cast parts.

Investment casting technology has demands for pattern materials such as good burnout with low ash content and low contraction or expansion at burnout process. In the case of such use of 3D printed models only polymeric materials are suitable. Polymeric materials are usually printed by Fused Deposition Method technology (FDM) where filament is pushed through a heated nozzle and deposited layer by layer in order to build a model, by Stereolithography (SLA) where photo

fotosenzitivna smola utrjuje z laserskim žarkom, z brizganimi polimeri itd [1].

Delo predstavlja karakterizacijo različnih 3D natisnjenih materialov z namenom izbire najustrežnejšega materiala za uporabo v tehnologiji precizijskega litja.

2 Eksperimentalno delo

Analizirani so bili trije različni materiali, natisnjeni z dvema metodama. Dva sta bila natisnjena s FDM metodo, eden pa s SLA metodo. Prva dva sta bila polilaktična kislina (PLA) in polivinil alkohol (PVA), tretji pa je bila akrilatna fotosenzitivna smola (Castable)[2]. Vzorci so bili natisnjeni v različne oblike, primerne za določevanje pepela, za dilatometrijsko analizo ter diferenčno vrstično kalorimetrijo (DSC). Za dilatometrijsko analizo so bile natisnjene kvadratne palice z robom 5 mm in dolžino 50 mm. V primeru PLA in PVA materialov so bile notranjosti palic različno zapolnjene, ena je bila polna, dve pa sta bili zapolnjeni 20-odstotno, enkrat z rombično in enkrat s heksagonalno strukturo. Za določanje deleža pepela so bile natisnjene kocke z robom 10 mm in z maso med 2 in 3 g. Za DSC analizo pa so bili natisnjeni valjčki premera 4 mm in višino 3 mm. Dilatometrijska analiza je bila izvedena na napravi Bähr DIL 801, do temperature 120 °C. Delež pepela je bil določen z žganjem materiala v keramičnih lončkih pri temperaturi 600 °C 2 uri. Delež pepela je bil nato izračunan po enačbi:

$$\% \text{ ash} = \frac{(N_{\text{cup+ach}} - N_{\text{cup}}) \cdot 100 \%}{N_{\text{SAMPLE}}}.$$

DSC analiza je bila izvedena z namenom določitve likvidus in solidus temperature na napravi Mettler Toledo DSC1 do temperature 250°C s segrevalno hitrostjo 10 K/min v zračni atmosferi.

polymeric resins are used and cured by laser, Jetted photopolymer etc. [1].

The presented study deals with the characterization of different 3D printing materials in order to determine most suitable material and technology of production of patterns used for investment casting technology.

2 Experimental

Three different materials were test printed by two different methods. Two materials were printed by the FDM method and one by the SLA method. First two were Polylactic Acid (PLA) and Poly Vinyl Alcohol (PVA) and the third one was Acrylate Photopolymer resin Castable [2]. Samples were printed in different shapes suitable for different testing such as dilatometry, ash determination and Differential Scanning Calorimetry (DSC). For dilatometric analysis the square rods with dimensions of 5 mm × 5 mm × 50 mm were printed. In case of PLA and PVA the inner structure of rods was in one case full in one it was rhombic and in one it was faceted with 20 % of fill. For ash content determination a cube with mas from 2 to 3 g were printed and for DSC analysis the discs with diameter of 4 mm and height of 3 mm were printed.

Dilatometric analysis was made using a Bähr DIL 801 dilatometer up to 120 °C. Ash content was determined by burning the samples in ceramic cups at temperature of 600 °C for 2 hours. The ash content was then calculated by equation:

$$\% \text{ ash} = \frac{(N_{\text{cup+ach}} - N_{\text{cup}}) \cdot 100 \%}{N_{\text{SAMPLE}}}.$$

A DSC analysis was made in order to determine the melting point of sample using a Mettler Toledo DSC1 device up to

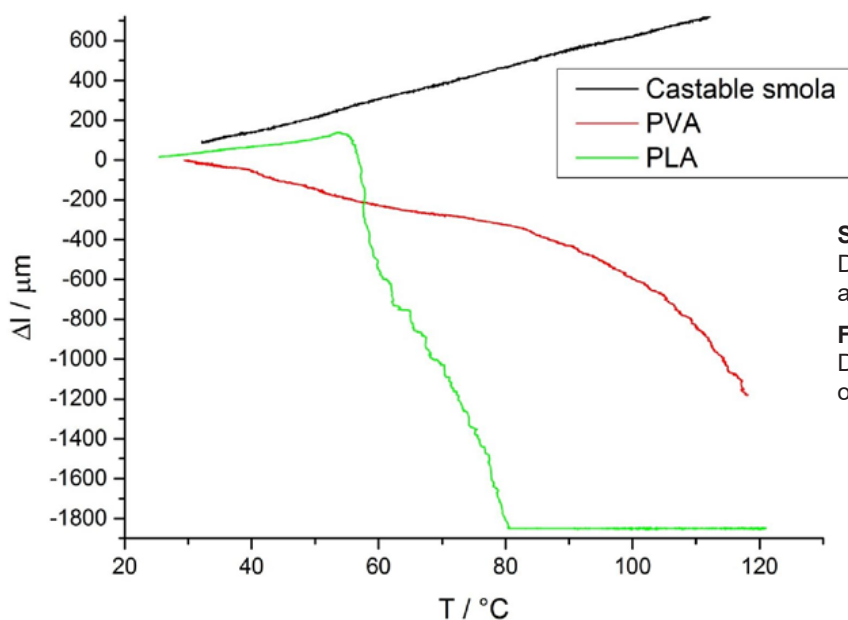
3 Rezultati in diskusija

Rezultati dilatometrijske analize polnih vzorcev so prikazani na sliki 1. Opazi se, da se PLA in PVA materiala ne širita veliko med segrevanjem. PVA se sploh ne širi, kar pomeni, da je pri 30 °C že plastičen in se krči zaradi vzmeti dilatometrijskega senzorja, ki stiska vzorec. V primeru PLA pa se vzorec razširi za približno 200 μm do temperature 55 °C. Širjenje je linearno s temperaturnim razteznostnim koeficientom α 0,000067 /K, po doseženi temperature pa se zmehča in se začne krčiti zelo hitro. Vzorec iz smole Castable pa kaže linearen trend širjenja cel čas segrevanja do temperature 120 °C in kaže, da bi se ob dodatnem segrevanju še širil. Temperaturni razteznostni koeficient α je v tem primeru 0,000156 /K. Iz predstavljenih ugotovitev se lahko zaključi, da material Castable ni primeren za uporabo v tehnologiji precizijskega litja, ker se preveč širi, kar bi predstavljalo nevarnost za nastanek razpok na školjki med žganjem le-teh.

temperatures of 250 °C with heating rate of 10 K/s in air atmosphere.

3 Results and Discussion

The results of dilatometric analyses of fully filled samples are presented in Figure 1. It can be noticed that PLA and PVA material do not expand much during heating. PVA is not expanding at all which means that at the 30 °C material is already soft and is shrinking due to a spring of dilatometric sensor which compresses the sample. In the case of PLA, it expands for about 200 μm until temperature of 55 °C with a linear thermal expansion coefficient α 0,000067 /K and then it gets soft and starts to compress very fast. The Castable resin sample is showing constant expansion during the whole range of heating up to 120 °C and it seems it would expand some more. The α is 0,000156 /K. From this we could conclude that Castable resin is expanding too much and would not be suitable for investment



Slika 1.
Dilatometrijska
analiza vzorcev

Figure 1.
Dilatometric analysis
of samples

Določitev deleža pepela je predstavljena v tabeli 1. Izvedene so bile tri ponovitve eksperimenta in izračunane povprečne vrednosti. Najvišji delež pepela ima vzorec PLA, ki ima skoraj 1 mas. %. V vzorcih Castable in PVA sta deleža pepela desetkrat manjša in znašata okoli 0,1 mas. %. Visok delež pepela v PLA vzorci pomeni, da tudi PLA ni najbolj primeren material za uporabo pri tehnologiji precizijskega litja. Smola Castable je razvita za uporabo v zlatarski industriji za precizijsko litje nakita, kjer se za formarski material uporablja mavčne forme. To je razlog, da je delež pepela v tem materialu najnižji.

Tabela 1. Delež pepela v vzorcih

Material	Delež pepela (mas. %)
Castable	0,095
PVA	0,090
PLA	0,980

Na sliki 2 so prikazane segrevalne DSC krivulje vseh treh testiranih materialov. Krivulja PLA vzorca kaže prvi negativni vrh pri 56 °C, ki najverjetneje predstavlja temperaturo steklastega prehoda TG [3, 4]. Ta temperatura je opazna tudi pri dilatometrijski krivulji (slika 1), kjer material postane plastičen in se začne krčiti zaradi delovanja vzmeti dilatometrijskega senzorja. Pri temperaturi 140 °C se pojavi drugi negativni vrh, ki pa predstavlja začetek taljenje PLA materiala.

Pri PVA vzorcu ni izrazitih vrhov, le pri temperaturi 170 °C se začne pojavljati negativen vrh, ki doseže najnižjo vrednost pri 205 °C in najverjetneje predstavlja taljenje.

Castable material na segrevalni DSC krivulji kaže velik negativen vrh, ki pa je najverjetneje vpliv nehomogenosti

casting technology since there would be a danger for cracking of the shells during the burnout process.

The ash content determination is presented in Table 1. There were three repetitions made and average values calculated. The highest ash content is in PLA sample and is nearly 1 wt. %. In Castable and in PVA samples the ash content is ten times lower and is around 0,1 wt. %. This would make PLA material unappropriated for investment casting patterns production. Castable material is intended for investment casting patterns production for jewellery purposes, where investment is usually plaster based that is why the ash content is low.

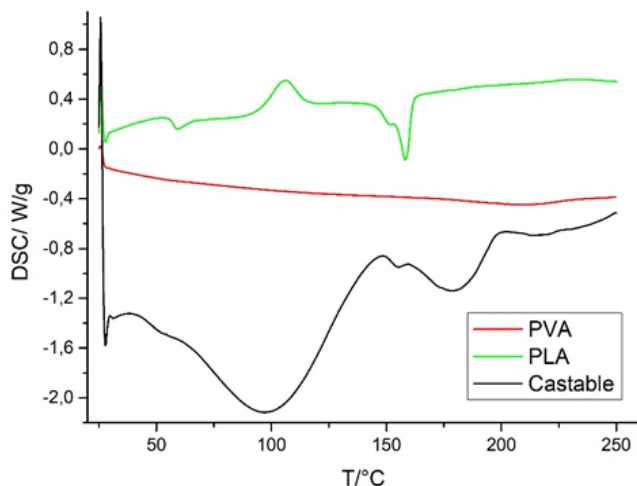
Table 1. Ash content in samples

Material	Ash content (wt. %)
Castable	0,095
PVA	0,090
PLA	0,980

Figure 2 is presenting DSC heating curves of all three materials. The curve of PLA material is showing first negative peak at 56 °C, which should correspond to glass transition TG [3, 4]. This temperature is visible also on dilatometric curve where material becomes soft and starts to shrink due to a spring of a dilatometric sensor. At temperature of around 140 °C another negative peak appears which corresponds to melting of a PLA.

PVA material is showing no significant peaks only at 170 °C a negative peak is visible which is presenting solidification.

Castable material is showing a heating DSC curve with large negative peak but it seems to be an influence of non-homogenous material, first negative peak



Slika 2. DSC segrevalne krivulje vseh treh vzorcev

Figure 2. DSC heating curves of all three samples

materiala. Prvi, bolj izraziti, negativni vrh se pojavi pri 150 °C in traja do 200 °C, kar predstavlja taljenje vzorca.

appears at 150 °C and lasts until 200 °C and it represents the melting of a sample.

4 Zaključki

Delo predstavlja rezultate analiziranih materialov. Dilatometrijska analiza je pokazala, da material Castable ni primeren za uporabo pri klasičnem postopku precizijskega litja s keramičnimi školjkami, ker ima prevelik temperaturni razteznostni koeficient. PLA in PVA materiala kažeta boljše rezultate glede raztezanja. Delež pepela je v materialu Castable in PVA nizek, je pa v PLA materialu kar 1 mas. %. Temperature začetka taljenja so v vseh materialih podobne in so v območju med 140 in 200 °C, kar je glede na temperaturo taljenja voska visoko, so pa temperature žganja keramičnih školjk tudi do 1000 °C, kar pomeni, da so omenjeni materiali še vedno primerni za uporabo v ta namen.

Zaključek je, da je najprimernejši material za uporabo v tehnologiji precizijskega litja, glede na izvedene analize, PVA. V prihodnje pa je potrebno

4 Conclusions

The research is presenting results of analysed materials. Dilatometric analysis showed that Castable material is not very suitable for use at classical investment casting technology with ceramic shells, since it expands too much during heating. PLA and PVA are showing promising results in this way. Ash content is good at Castable and PVA material, but it is nearly 1 wt. % at PLA material. Melting points for all materials are approximately the same and they are in the range between 140 to 200 °C, which is higher than for usual waxes but still acceptable for the investment casting technology where firing temperatures for shells can reach over 1000 °C.

Conclusion is that the most suitable analysed material is PVA but, the research should be also expanded and dedicated to dimensional stability of printed patterns and 3D printability of investigated materials.

preveriti ustreznost materialov tudi z vidika dimenzijskih točnosti 3D natisnjenih modelov.

5 Literatura / Literature

- [1] [online]: <<https://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>>
- [2] Formlabs appplication guide, Recommended Burnout Process and Casting Guide[online] Založba Formlabs, 2018. Dostopno na svetovnem spletu: <<https://formlabs.com/media/upload/Recommended-Burnout-Process.pdf>>.
- [3] ŠTURM, R. GRADIVA - Polimeri [online]: <<http://lab.fs.uni-lj.si/latem/IZPITI-IN-PREDAV/STURM/Slike%20s%20predavanj/19-Polimeri.pdf>>.
- [4] ROGERS, T. Everything You Need To Know About Polylactic Acid (PLA) [online]. ZDA, 2015. Dostopno na svetovnem spletu: <<https://www.creativemechanisms.com/blog/learn-about-polylactic-acid-pla-prototypes>>.

AKTUALNO / CURRENT**Pregled svetovne livarske proizvodnje v letu 2018**

Glavno sporočilo poročevalcev Ameriške livarske revije Modern Casting je: Dosežena celotna svetovna livarska proizvodnja v letu 2018 je skoraj 113 milijonov ton, kar v primerjavi s letom 2017 pomeni 2,6% rast

Po letošnjih navedbah iz popisa svetovne livarske revije Modern Cating se je v letu 2018 globalna livarska proizvodnja povzpela na 112.74 ton. V primerjavi z letom 2017 se je le-ta povečala za 2,5 milijonov ton, kar predstavlja 2,6% rast. Ob tem pa je evidentno, da v letu 2018 Kitajska kot svetovno največji proizvajalec ulitkov beleži 0,1%-ni padec svoje livarske proizvodnje.

Izmed 28 držav, ki so poslale podatke o svoji livarski proizvodnji v letih 2018 in 2017, jih je 19 poročalo o rasti livarske proizvodnje v letu 2018 v primerjavi z letom 2017. V tabeli v nadaljevanju je predstavljeno 10 največjih svetovnih proizvajalcev ulitkov. Na vrhu so ponovno Kitajska, Indija in ZDA. V tem pregledu je vključeno 45.945 livarnah iz celega sveta, od tega največji delež odpade na železove, aluminijeve in jeklo livarne. Podatki v popisu svetovne livarske proizvodnje so pridobljeni od livarskih asociacij posameznih držav, ali podobnih predstavnikov, kot tudi od WFO-World Foundry Organization in CAEF – The European Foundry Association.

Največjih 10 proizvajalcev ulitkov		
Država	Proizvodnja v tonah	Gibanje na leto 2017
Kitajska	49.350.00	-0,1%
Indija	13.388.682	11,1%
ZDA	10.756.492	10,6%
Japonska	5.575.417	2,2%
Nemčija	5.432.999	-0,9%
Rusija	4.200.000	-0,6%
Mehika	2.909.461	podatki iz 2017
Koreja	2.516.800	-0,8%
Brazilija	2.283.379	3,1%
Italija	2.261.196	0,8%

Proizvodnja ulitkov v 2018 (v tonah)

Država	Siva litina	Nodularna litina	Temprana litina	Jeklo litina	Baker	Aluminij	Magnezij	Cink	Druge neželezne	Skupno
Avstrija	43.000	109.700	-	11.400	-	144.695	-	-	-	308.795
Belorusija	-	-	-	-	-	-	-	-	-	247.000
Belgija	69.900	7.800	-	7.500	-	2.200	-	-	-	87.400
Bosna in Hercegovina ^A	17.500	9.100	-	1.350	-	10.500	-	-	-	38.450
Brazilijska	1.305.036	535.116	-	244.008	20.945	172.076	5.040	1.158	-	2.283.379
Bolgarija ^B	30.300	9200C	-	10.400	292	5.540	-	42	-	55.774
Kanada	330.841	-	-	90.091	14.237	211.374	-	-	-	646.543
Kitajska	20.650.000	14.150.000	600.000	5.750.000	800.000	7.150.000	-	-	250.000	49.350.000
Hrvaška ^A	31.100	11.800	-	50	221	25.174	-	25	15	68.385
Češka Republika	176.500	57.000	-	62.000	20.500	101.000	300	1.200	-	418.500
Danska	29.600	61.900	-	-	1.285	-	-	-	89	92.874
Egipt ^B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	200.000
Finska	18.400	36.200	-	10.100	3.031	2.395	-	100	-	70.226
Francija	597.400	682.100	-	60.400	19.307	394.727	-	24.854	2.424	1.781.212
Nemčija	2.435.600	1.636.000	-	184.700	79.278	1.020.013	18.198	59.205	5	5.432.999
Madžarska	22.000	63.400	-	2.800	705	136.518	273	1.610	93	227.399
Indija	9.413.164	1.313.104	50.000	1.215.636	-	1396778E	-	-	-	13.388.682
Italija	767.600	428.600	-	56.900	69.729	856.016	8.065	73.303	983	2.261.196
Japonska	2.070.301	1.689.391	39.940	171.860	74.559	1.505.499	-	19.085	4.782	5.575.417
Koreja	989.200	700.200	1.000	158.300	25.100	630.000	13000F	-	-	2.516.800
Mehika ^B	892.188	526.897	-	373.965	217.200	817.911	-	81.300	-	2.909.461
Norveška	8.800	22.300	-	-	-	6.525	-	-	-	37.625
Pakistan	181.000	24.540	-	48.750	14.200	21.200	-	-	2.730	292.420
Poljska	480.000	160.000	-	50.000	6.100	330.000	-	7.500	2.900	1.036.500
Portugalska	43.400	96.800	-	5.300	16.496	37.612	-	2.440	-	202.048
Romunija	19.500	2.000	20	9.000	2.900	66.000	5.000	400	116	104.936
Rusija	2184000G	-	-	1.134.000	117.600	588.000	75.600	-	100.800	4.200.000
Srbija	26.300	3.100	-	18.150	3.100	10.120	1	30	-	60.801
Slovenija	62.501	43.538	3.100	27.801	755	52.050	-	8.510	-	198.255
Južna Afrika ^B	140.000	157.000	-	93.500	14.000	38.000	-	500	-	443.000
Španija	357.600	711.600	-	66.600	14.400	127.159	-	9.020	2.516	1.288.895
Švedska	161.700	64.000	-	22.900	8.792	48.000	-	-	-	305.392
Švica	36.700	22.100	-	2.300	2.086	13.790	-	1.118	-	78.094
Tajvan	641.178	215.796	-	68.577	31.202	421.283	-	-	-	1.378.036
Turčija	603.000	912.900	-	192.400	30.709	475.003	1.250	40.025	-	2.255.287
Ukrajina ^D	400.000	120.000	30.000	580.000	60.000	280.000	15.000	25.000	50.000	1.560.000
Velika Britanija	144.900	219.500	-	49.200	8.670	146.900	2.640	8.085	-	579.895
ZDA	4.062.373	3.325.740	37.195	931.679	288.485	1.609.346	140.614	313.886	47.174	10.756.492
Skupna svetovna proizvodnja	49.442.582	28.128.422	761.255	11.711.617	1.965.884	18.853.404	284.981	678.396	464.627	112.738.168

A - podatki iz 2016

B - podatki iz 2017

D - podatki iz 2015

Vir: Podatki in tabeli iz Ameriške livarske revije odern Casting.

mag. Mirjam Jan-Blažič

AKTUALNO / CURRENT**Udeležili smo se sejma Euroguss 2020 v Nürnbergu**

V Nürnbergu, Nemčija, se je od 14.1. do 16.1.2020 odvijal mednarodni sejem EUROGUSS, ki je specializiran za litje v trajne forme predvsem pod tlakom. Največji tovrstni sejem v Evropi je bil tokrat prirejen že trinajstič, proizvajalci najrazličnejših ulitkov iz industrije in iz pomožnih industrij pa se na tem dogodku lahko predstavijo le vsaki dve leti. EUROGUSS, ki privablja predvsem pripadnike livarske tehnologije tlačnega litja, pa tudi nizkotlačnega, gravitacijskega, nagibnega litja v trajne forme itn., je letos gostil kar 754 razstavljalcev iz 36 držav, ki so najnovejše trende in svoje inovativne procese in/ali izdelke predstavljali obiskovalcem. Slednjih je bilo približno 15.000.

Na sejmu so se predstavljala tudi nekatera uspešna slovenska podjetja, ki pripadajo tej industriji in sicer Blisk casting d.o.o., DIFA d.o.o., Hidria d.o.o., HTS IC d.o.o. ISKRA-ISD d.o.o., Iskra mehanizmi d.o.o., Kovinoplastika Lož d.o.o., LTH-Castings d.o.o., MLM d.d., Orodjarna Gorjak, SIJ Metal Ravne d.o.o., Talum group d.d. in Titus Technologies d.o.o.

Novost na sejmu so bile letos prvič razpisane in podeljene nagrade EUROGUSS za talente. Za nagrade se je potegovalo 16 finalistov iz petih držav, katerih članki so bili

natančno evalvirani iz strani petih članov komisije (raziskovalci in strokovnjaki iz industrije). Član komisije Franz-Josef Wöstmann, Foundry Technology and Lightweight Design Department, Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Advanced Materials, je izjavil: "Namen podeljevanja nagrad za talente je povezati študente različnih držav, kot tudi olajšati koristno povezovanje študentov z industrijo. Zelo smo zadovoljni s kakovostjo člankov in navdušeni nad številom sodelujočih, ki so članke oddali."

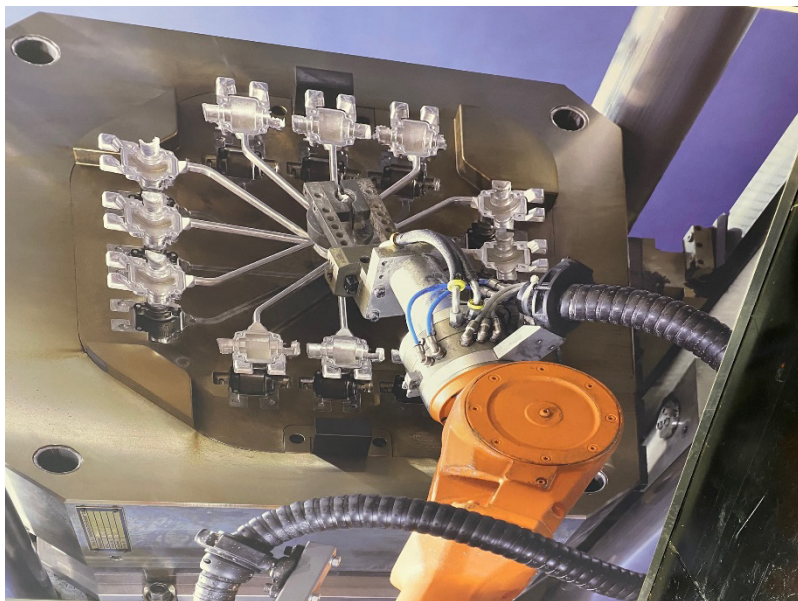
V okviru mednarodnega sejma je potekala tudi livarska konferenca (20. Druckgusstag/ 20th Die Casting Conference) na kateri je predavalo kar nekaj predstavnikov vodilnih podjetij iz področja livarstva (Nemak Europe GmbH, Oskar Frech GmbH + Co. KG, Bühler AG, StrikoWestofen GmbH, Chem-Trend GmbH, ÖGI in ostali).

Člani Katedre za livarstvo, Oddelka za materiale in metalurgijo pod vodstvom

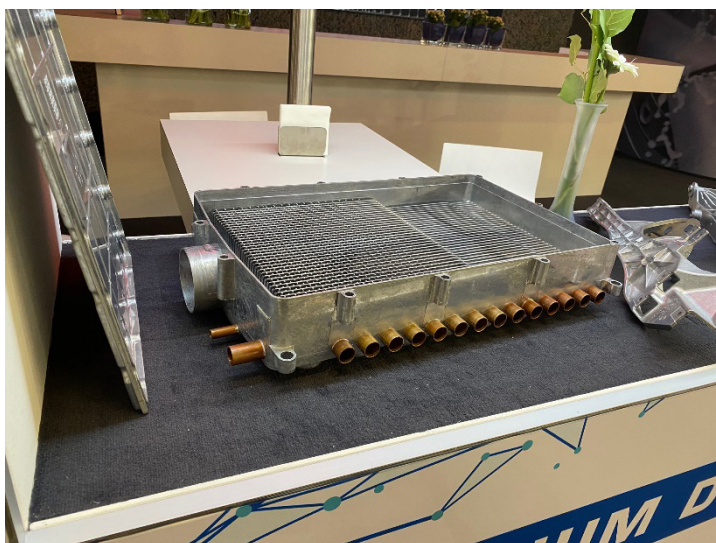


Predstavitev opreme za degazacijo Al zlitin

prof. dr. Primoža Mrvarja smo tudi letos z zanimanjem spogledovali z novostmi, pri čemer smo diskutirali lastne rešitve na področju opreme, tehnologij in materialov. Veselimo se že naslednjega EUROGUSS-a 2022, ki je načrtovan v terminu od 18.1. do 20.1.2022.



Predstavitev
transporta ulitkov
po izvedenem
izmetovanju iz
pomične strani orodja;
Inovativni ulivno
napajalni sistem



Primer kompleksnih
sestavljjenih ulitkov iz Cu in Al
s kompleksno geometrijo

*mag. Matic Žbontar
Katedra za livarstvo NTF*

AKTUALNO / CURRENT**Seje organov Društva livarjev Slovenije**

Vsako leto v februarju ali začetku marca se članstvo Društva livarjev Slovenije (v nadaljevanju Društva) sreča na rednem letnem Občnem zboru Društva in to na lokaciji enega od članov Društva. Letos smo bili 4-marca v Kamniku v Livarni TITAN, kjer sta pred občnim zborom potekali, kot običajno, najprej seja Nadzornega odbora in zatem še seja Izvršnega odbora Društva.

Nadzorni odbor Društva je obravnaval podano pisno Poročilo predsednice Društva o delu in finančnem poslovanju v letu 2019 in Spremembe in dopolnitve Statuta Društva s čistopisom. Društvo mora slednjega uskladiti s novo sprejetim Zakonom o nevladnih organizacijah iz leta 2018. Nadzorni odbor je brez pripomb sprejel poročilo predsednice Društva s ugotovitvami, da je finančno poslovanje Društva vođeno v skladu z veljavnimi računovodskimi standardi in da je poraba sredstev potekala v skladu s sprejetim programom dela Društva za leto 2019, ki je bil sprejet na Občnem zboru Društva 7.03.2019. Nadzorni odbor je podal tudi soglasje za vse predlagane spremembe in dopolnitve statuta Društva.

Izvršni odbor in za tem še Občni zbor Društva sta obravnavala naslednje vsebinske točke dnevnega reda:



Seja Nadzornega odbora



Seja Izvršnega odbora

- Pisno poročilo predsednice o delu in finančnem poslovanju v letu 2019 s stališči Nadzornega odbora
- Predložen pisni program dela Društva za leto 2020 in Predlog Sprememb in dopolnitev Statuta s čistopisom

Po ustni podrobni predstavitvi vseh dokumentov s strani predsednice Društva in po razpravi po vseh dokumentih sta Izvršni odbor in Občni zbor soglasno sprejela potrdilne sklepe za vse tri dokumente.

V nadaljevanju pa želimo podati nekaj glavnih poudarkov najprej iz Poročila o delu in finančnem poslovanju Društva v letu 2018 in zatem še iz sprejetega programa dela Društva za leto 2020.

Programsko leto 2019 zajema aktivnosti Društva v obdobju od februarja 2019 do februarja 2020, ki pa so glede na bistveno večji in organizacijsko ter programsko zahtevnejši livarski dogodek v Portorožu – t.j. WFO Technical Forum in 59. IFC Portorož 2019, bile za vodstvo in operativni kader Društva v pisarni zelo zahtevne in obremenilne. Vodstvo Društvo si je postavilo za cilj da to veliko svetovno livarsko priredit izpelje z kar se da nizkimi stroški, in z minimalnimi dodatnimi obremenitvami članov Društva. Na tej podlagi, smo v pisarni Društva zaposlili samo enega dodatnega študenta od marca do oktobra 2019. Delo obeh študentov je nekje do sredine julija potekalo približno samo po 4 ure na dan, naprej do pričetka dogodka pa smo časovni obseg povečali na 8 ali po potrebi več ur.

Na podlagi sprejetega programa za leto 2019, so naše aktivnosti po posameznih področjih programa potekale kot sledi:

1. Izdali smo štiri redne številke Livarskega vestnika na koncu vsakega tromesečja
2. Po domačih in tujih ocenah sodeč smo izpeljali vzorno za Društvo in Slovenijo osrednji livarski dogodek WFO-Technical Forum in 59. IFC Portorož 2019 s spremljajočo livarsko razstavo. V Portorožu smo imeli v primerjavi z leto 2018 preko 400 udeležencev, preko 100 znanstvenih in strokovnih predstavitev v programu konference in več kot podvojeno število razstavljalcev.
Večje število medijskih pokroviteljev je zagotovilo tudi to, da je bil dogodek v svetovni strokovni javnosti dokaj dobro predstavljen. Da smo vse lahko tako dobro pripravili in izvedli je velika zasluga naših članic, ki so se vključile v pokroviteljstvo dogodka. Naj jih še enkrat omenimo in se prav prijazno zahvalimo za visoko vreden prispevek k našemu uspehu: LTH Castings d.o.o. kot zlatemu pokrovitelju, EXOTERM d.d., Livar d.d., Siapro d.d., Calderys GmbH kot srebrnim pokroviteljem, DIFA d.o.o., KOVIS Livarna d.o.o., Livarna Gorica d.o.o., Livarna Titan d.o.o. in Weiler d.o.o. kot bronastim pokroviteljem. In nenazadnje velika zahvala gre vsem pokroviteljem, ki niso člani Društva, v prvi vrsti HA group kot generalnem pokrovitelju in ostalim: Omega Sinto kot srebrnemu pokrovitelju, TCT Tesic kot bronastem pokrovitelju ter Noricam Group kot posebnem pokrovitelju.
3. Izpeljali smo naslednje seminarje:
 - **Enodnevni seminar za livarne visoko tlačnega litja (HPDC2)** - nadaljevalni na lokaciji Gospodarske zbornice Slovenije v Ljubljani, dne 21.11.2019, v izvedbi Avstrijskega livarskega inštituta (ÖGI). Število udeležencev je bilo, na podlagi že znanih normativov, ki jih postavlja ÖGI, omejeno samo na 12 slušateljev. Seminarja so se udeležili predstavniki iz DIFA d.o.o., Hidria d.o.o., Iskra ISD d.o.o., LTH Castings d.o.o., Mariborska livarna Maribor d.d., Talum d.d., Telcom d.o.o., TC Livarstvo d.o.o.



Predstavitev Livarne Titan na začetku Občnega zbora

in Naravoslovnotehniške fakultete v Ljubljani.

- **Enodnevni seminar pod naslovom »Heat treatment Non ferrous – the base to achieve mechanical properties** (Toplotna obdelava kot osnova za doseganje mehanskih lastnosti)«, v izvedbi RWP GmbH (predavatelj dr. Konrad Weiss). dne 18.9.2019, v Portorožu. Seminarja so se udeležili predstavniki iz naslednjih livarn: CIMOS d.d. - Tovarna Maribor, CIMOS d.d. - Tovarna Vuzenica, Hidria d.o.o., LTH Castings d.o.o., Mariborska Livarna d.d., TALUM d.d.
 - **Tridnevni seminar na lokaciji fm. Bühler v Uzvilu v Švici** je potekal od 11.11 do 15.11 2019, za najbolj usposobljene na področju tehnologije tlačnega litja (HPDC). Seminar je potekal po predlaganem razrezu tem, ki ga je pripravila komisija za izbor seminarских tem. Seminarja so se udeležili predstavniki iz naslednjih livarn: DIFA d.o.o., Hidria d.o.o., LTH Castings d.o.o., Mariborska Livarna d.d., TALUM d.d.
 - Enodnevni seminar na temo **»Formanje in materiali za peščena jedra«**, na lokaciji Gospodarske zbornice v Ljubljani, dne 24.10.2019 in v izvedbi Avstrijskega livarskega inštituta (ÖGI) s skupino 12 udeležencev – članov Društva. Seminarja so se udeležili predstavniki iz naslednjih livarn: CIMOS d.d. - Tovarna Maribor, CIMOS d.d. - Tovarna Vuzenica, ETA Cerklje d.o.o., KOVIS Livarna d.o.o., Livar d.d., Livarna Gorica d.o.o., OMCO Metals Slovenia d.o.o.
 - Seminar pod naslovom **»Varnost in varovanje zdravja delavcev«** za vse člane Društva in v skupni organizaciji z Gospodarsko zbornico Slovenije, Združenjem kovinskih materialov in nekovin in Združenjem kemijske industrije, na lokaciji Gospodarske zbornice, dne 04.04.2019.
4. Tekom celega leta so vsi člani Društva ažurno prejemali kazala vseh svetovnih livarskih revij s katerimi sodeluje Društvo
 5. Udeleževali smo se livarskih dogodkov in sodelovali s sorodnimi društvi po svetu in o teh kontaktih smo redno poročali v Livarskem vestniku
 6. Skupaj s Gospodarsko zbornico Slovenije smo pripravili statistične podatke o doseženi slovenski livarski proizvodnji v letu 2018 za WFO- Svetovno livarsko organizacijo in CAEF- Evropsko združenje livarn ter svetovno livarsko statistiko, ki jo pripravlja Ameriška livarska revija Modern Casting.
 7. Glede na spremembo zakonodaje (Zakon o nevladnih organizacijah iz leta 2018), smo pripravili spremembe Statuta Društva livarjev Slovenije, ki omogočajo ponovno potrditev statusa Društva, ki deluje v javnem interesu. Ta postopek sprejemanja sprememb in dopolnitev Statuta je bil zaključen s sprejemom noveliranega Statuta na tem občnem zboru.

V sprejetem programu Društva za leto 2020 pa načrtujemo predvsem naslednje aktivnosti:

1. Izdajo štirih rednih števil **Livarskega vestnika**
2. Organizacijo jubilejnega **60. IFC Portorož 2020** v času od 16.-18.09.2020 z motom; **»TRADICIJA IN PRIHODNOST«**

3. Načrtovani seminarji; po predlogu strokovnih komisij za izbor seminarskih tem:

- **Dvodnevni seminar za železove livarne s poudarkom na napakah v ulitkih**, v izvedbi Avstrijskega inštituta v Leobnu (ÖGI), ki je strukturiran po naslednjih okvirnih temah:
 - Metalurške osnove in osnove o litnem železu kot materialu ter standardizacija
 - Metalografska struktura in struktura napak
 - Praktične vaje (metalografija)
 - Osnove procesa formanja in materiali
 - Preizkusi materialov in analiza napak
 - Zaključni razgovor, vprašanja

Izvedba seminarja je predvidena za konec oktobra ali v novembru. Glede na omejitve števila udeležencev na samo 12 slušateljev, je komisija za izbor seminarskih tem pripravila tudi razrez možnih udeležencev po posameznih livarnah (iz vsake po 1 udeleženec): CIMOS d.d., Tovarna Maribor; CIMOS d.d., Tovarna Vuzenica; Croning livarna d.o.o.; Eta Cerkljevo d.o.o.; Kovis Livarna d.o.o.; Livar d.d.; Livarna Gorica d.o.o.; Livarna Titan d.o.o.; Omco Metals Slovenia d.o.o.; Valji d.o.o., Bentoproduct; Termit d.d.

V primeru, da katera od livarn ni pripravljena dati svojega udeleženca, mora to najaviti vsaj 2 meseca prej, da v pisarni Društva zagotovimo zapolnitev praznega mesta.

- Enodnevni seminar pod naslovom »**Ekološki napajalniki za nodularno in jeklo litino brez vsebnosti fluora**«, v izvedbi nemškega podjetja GTP Schaefer, Naravoslovnotehniške fakultete v Ljubljani z nosilcem prof. Jožefom Medvedom in EXOTERM-IT d.o.o.



Na ogledu podjetja

Komisija za izbor seminarskih tem za letošnje leto je ocenila, da je tema odpadnih livarskih peskov zelo pereča in stalno aktualna. Vsebnost fluora v odpadnih peskih bistveno vpliva na status odpadka in na njegovo možnost oddaje za odlaganje. V zaključnem delu seminarja bi bila tudi okrogla miza, kjer bi potekal razgovor o praksah z livarskimi peski v sosednjih državah. Predvidena lokacija seminarja je predavalnica Naravoslovnotehniške fakultete, Lepi pot 11 v Ljubljani. Izvajalci ne postavljajo omejitve pri številu udeležencev. Termin izvedbe seminarja pa je zaradi korona virusa še ni znan

- **Dvodnevni seminar za livarne tlačnega litja z praktičnim delom (HPDC)**, ki bo potekal v Avstrijskem livarskem inštitutu (ÖGI) v Leobnu.

Seminar se bo osredotočil izključno na tehnologijo mazanja oz. na udeležence - tehnologe za tlačno litje. Program vključuje naslednje vsebine:

- Tehnično predpripravo tlačnih orodij in pred tem optimizacijo hladilnih kanalov (konstrukcija optimalnih hladilnih kanalov),
- uporabo raznih temperilnikov za gretje in hlajenje orodij, (oljni oz. vodni temperilniki – prednosti / slabosti, kam kažejo trendi v svetu)
- spremljanje procesa s simulacijami, termo-kamerami ali nadzornimi sistemi za spremljanje temperature,
- vplivi na vzdržljivost tlačnih orodij.

Seminar bo potekal v času od 11. do 13.11.2020 (odhod v Leoben popoldne, 11.11.2020). Glede na omejitev števila slušateljev na samo 12, ki jo postavlja ÖGI, je predlog udeležencev po podjetjih naslednji: Cimos -1; DIFA -1; Hidria -2; Iskra ISD -1 ; LTH -2 ; Mahle -1; MLM -2; TALUM -1; TELKOM -1;

V primeru, da katera od livarn ni pripravljena dati svojega udeleženca, mora to najaviti vsaj 2 meseca prej, da v pisarni Društva zagotovimo zapolnitev praznega mesta.

- **Enodnevni seminar »Elektro-mobilnost z vidika novih tehnologij in priložnosti za livarsko industrijo«**, v izvedbi RWP GmbH (predavatelj Dr. Konrad Weiss). Predviden datum izvedbe seminarja je 16.9.2020, v kongresnem centru hotela Slovenija v Portorožu.

Seminar bo primeren predvsem za razvojnike ali verjetno tudi prodajnike v naših livarskih podjetjih, kjer bi dobili predvsem informacije o:

- izboru najbolj primernih materialov za litje, s poudarkom na korozijsko odpornost le-teh,
- bodočih zahtevanih preizkusih na tesnost,
- velikosti baterij, glede na opaženo tendenco stalnega večanja,
- načinih spajanja Al-livnih zlitin (npr. FSW - Friction Stir welding),
- drugih bodočih zahtevanih preizkusih (npr. porušitveni testi, slane komore in podobno).

Število slušateljev ni omejeno.

- **Enodnevni seminar na temo okoljevarstvene problematike za livarne** s soorganizatorjem Gospodarsko zbornico Slovenije, ki se bo osredotočil na
 - novi zeleni evropski dogovor – kaj prinaša, kaj pomeni za industrijo?
 - BREF za livarne – kaj se dogaja – kako sodelovati?
 - plastika in okolje – pregled dogajanj v EU in pri nas.

Prvotni že dogovorjeni termin 19.3.2020, je bil odpovedan zaradi korona virusa, novi termin še ni znan,

4. Izmenjava Livarskega vestnika s svetovnimi in domačimi livarskimi revijami
5. Udeležba na livarskih dogodkih in sodelovanje s sorodnimi društvi in združenji (vse kar je načrtovano v prvem polletju je zaradi koronavirusa vprašljivo)
6. Priprava statističnih podatkov o slovenski livarski proizvodnji v letu 2019 za WFO, CAEF in svetovno statistiko Modern Casting
7. Delovanje Društva v javnem interesu vključuje izvajanje nalog po zakonu in skrb za uveljavljanje pravic pri razpisih državnih agencij za nepovratna sredstva.

Po končanem Občnem zboru je naš gostitelj poskrbel še za kar nekaj ur prijetnega druženja, kjer smo v neformalnih razgovorih lahko medsebojno izmenjali kar nekaj informacij in izkušenj. Livarni Titan in direktorju, mag. Dragu Brencetu se še enkrat prav lepo zahvaljujemo, da smo letos vse seje organov Društva livarjev Slovenije lahko imeli v Kamniku, da smo se lahko seznanili s dosežki in načrti podjetja in si podjetje tudi ogledali. Livarno Titan boste bralci Livarskega vestnika lahko bolje spoznali v 2.št. Livarskega vestnika, kjer bomo objavili intervju s direktorjem, mag. Dragom Brencetom. Omenimo na koncu še to, da Livarna TITAN praznuje letos svoj 100- letni jubilej.

Iskrene čestitke in srečno in uspešno naprej !

Poročala:
mag. Mirjam Jan-Blažič

AKTUALNO / CURRENT

Koledar livarskih prireditev 2020

Datum dogodka	Ime dogodka	Lokacija
08.-09.06. 2020	Industrijski forum IRT	Portorož, Slovenija
16.-18.06.2020	CastForge 2020	Stuttgart, Nemčija
15.-19.06. 2020	AMB-Internationale Ausstellung für Metallbearbeitung	Stuttgart, Nemčija
15.-17.07. 2020	CHINA DIECASTING	Šanghaj, Kitajska
15.-19.09.2020	AMB-Internationale Ausstellung für Metallbearbeitung	Stuttgart, Nemčija
16.-18.09.2020	60. IFC Portorož 2019	Portorož, Slovenija
18.-22.10. 2020	74 th World Foundry Congress in generalna skupščina WFO	Busan, Južna Koreja

IN MEMORIAM

IM MEMORIAM, Dr.-Ing. Milan Lampič Opländer

Z veliko žalostjo smo sprejeli vest, da nas je v starosti 79 let meseca marca za vedno zapustil metalurški kolega prijatelj in dolgoletni član uredniškega odbora Livarskega vestnika, Dr. Ing. Milan Lampič Opländer. Znameniti francoski pisatelj Paul Gauguin je življenje plastično ponazoril v svoji sliki: "Od kod prihajamo? Kaj smo? Kam gremo?"

Študiral je metalurgijo na univerzi v Ljubljani in svoj študij zaključil z diplomskim izpitom na RWTH –Aachen. Kot dipl.ing se je zaposlil v livarni železovih litin Fritz Winter v Stadtalendorfu v takratni Zahodni Nemčiji. Svojo strokovno pot je pričel kot vodja oddelka za preizkušanje materialov. Leta 1969 je prekinil delo v tej livarni in po dogovoru z Industrijsko razvojno korporacijo uradno sodeloval v Južni Afriki pri gradnji in zagonu poskusne livarne za izdelavo blokov cilindra po postopku precizijskega litja v keramične

maske. Po zaključku tega projekta se je leta 1971 vrnil v Zahodno Nemčijo in se zaposlil v Združenju nemških livarskih strokovnjakov in bil sodelavec vodstva strokovnega časopisa in strokovni referent v odboru za izobraževanje. Sočasno je bil sekretar takratne strokovne komisije 7a "Lito železo z lamelastim grafitom" pod vodstvom Dr.-Ing. Kurt Orthsa. Od leta 1973 do leta 1980 je vodil delovno skupino za področje »lito železo« na inštitutu za livarsko tehniko v Düsseldorfu. V tem času je promoviral na Inštitutu za livarstvo Tehniške univerze v Berlinu. Leta 1980 se je vrnil v livarno železovih litin Fritz Winter in v letih 1981 do 2005 vodil področje raziskav in razvoja. V obdobju 1993 do 1996 je dodatno prevzel mesto pogodbenega predavatelja za področji »Materiali iz litega železa« in »Zagotavljanje kakovosti«, na Visoki strokovni šoli Gießen-Friedberg.

Dr.-Ing. Milan Lampič Opländer je bil izjemen strokovnjak na področju litja sive litine in je iz tega področja objavil številne strokovne prispevke v uglednih strokovnih revijah. Prav tako ima številne patente iz področja tehnologije litja glav cilindra motorjev iz sive litine.

V Društvu livarjev Slovenije nam je bilo v veliko čast, da je v uredniškem odboru Livarskega vestnika sodeloval Dr. Ing. Milan Lampič Opländer, mednarodno ugleden strokovnjak livarske stroke in naš rojak, ki je tudi večji del visokošolskega izobraževanja pridobil na oddelku za metalurgijo naše univerze v Ljubljani.

J. P. Sartre je nekoč zapisal, da je spomin edini paradiž iz katerega nas ne morejo izgnati. Milan, hvala za sodelovanje in skupno ustvarjanje številnih izdaj naše strokovne revije. Počivaj v miru.

Podatki o njegovem delu so povzeti iz revije Giesserei 107 03/2020.

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



STEM d.o.o.

Vipavska cesta 67
5000 Nova Gorica
Slovenija

tel.: +386 5 33 52 100

fax: +386 5 30 01 558

e-mail: info@stem.si

www.stem.si



2019



Platinasta odličnost

STEM d.o.o.

Matična št.: 5306779
Bisnode d.o.o., 4.2.2020

PESKALNA TEHNIKA