

Efficiency of numerical simulation in optimization of casting production

Zovko Brodarac, Zdenka; Mahmutović, Almir; Zeljko, Snježana; Zeljko, Luka

Source / Izvornik: **Livarski vestnik, 2023, 70, 79 - 91**

Journal article, Published version

Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:115:198600>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-17**



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET
UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF METALLURGY

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb](#)



LIVARSKI VESTNIK

70/2023

2



DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE
SLOVENIAN FOUNDRYMEN SOCIETY



30
YEARS

Novo v ponudbi Siapro grupe

**AVTOMATSKI JEDRARSKI STROJ ZA
IZDELAVO JEDER VELIKOSTI 1-150L PO
POSTOPKU COLD BOX**



Siapro d.o.o.
Postaja 9
5216 Most na Soči
Slovenija
info@siapro.si

www.siapro.eu
www.strojrem.hr

- V kooperaciji z Lauds Foundry Equipment GmbH izdelujemo opremo za izdelavo jeder z lastnim sistemom za plinifikacijo in ogrevanje.
- Sistem je od strojnega in elektro načrtovanja, do proizvodnje in končnega preizkusa opreme plod znanja Siapro in podjetja iz Nemčije.
- Zasnova opreme je enostavna za vzdrževanje, uporabniku prijazna, poraba rezervnih delov je majhna. Servis je zagotovljen. CE standard.
- **V letu 2022 smo kupili podjetje Strojrem iz Hrvaške in povečali lastne proizvodne kapacitete.**

LIVARSKI VESTNIK

Izdajatelj / Publisher:

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

Glavni in odgovorni urednik / Chief and responsible editor:

prof. dr. Alojz Krizman
E-mail: alozj.krizman@um.si

Tehnično urejanje / Technical editing:

mag. Mirjam Jan-Blažič

Uredniški odbor / Editorial board:

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

Prevod v angleški jezik / Translation into English:

Marvelingua, Aljaž Seničar s.p.

Lektorji / Lectors:

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

Tisk / Print:

Fleks d.o.o.

Naklada / Circulation:

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

Letna naročnina: 35 EUR z DDV

Year subscription: 35 EUR (included PP)

Dano v tisk: junij 2023



SIAPRO d.o.o.
Postaja 9
SI-5216 MOST NA SOČI

Direktor: Franc Jezeršek

T: +386 5 38 41 638
E: info@siapro.si
W: www.siapro.eu

VSEBINA / CONTENTS

Stran / Page:

- C. Pittel, C. Bleicher, H. Kaufmann: Ocena lokalne trdnosti sestavnega dela na podlagi virtualnega mejnega vzorca ob upoštevanju nihajne trdnosti, na katero vplivajo napake med litjem / **Assessment of Local Component Strength Based on the Virtual Limiting Sample Considering the Fatigue Strength Influenced by Casting Imperfections** 60
- Z. Zovko Brodarac, A. Mahmutović, S. Zeljko, L. Zeljko: Uspešnost numeričnih simulacij pri optimizaciji proizvodnje ulitkov / **Efficiency of Numerical Simulation in Optimization of Casting Production** 79
- M. Vončina, T. Balaško, K. Rudolf, J. Medved: Vpliv specifične površine in deleža recikliranega aluminija na kakovost zlitine AISi10Mg(Fe) / **Influence of Specific Surface and Recycling Aluminium Content on Quality of AISi10Mg(Fe) Alloy** 92

AKTUALNO / CURRENT

- Seminar za tlačne livarne v ÖGI Leoben, Avstrija 108
65. Avstrijsko livarsko posvetovanje 109
- Pregled livarskih prireditev v letu 2023 117
63. IFC PORTOROŽ 2023 118

Uspešnost numeričnih simulacij pri optimizaciji proizvodnje ulitkov

Efficiency of Numerical Simulation in Optimization of Casting Production

Povzetek

Siva litina se v industriji pogosto uporablja zaradi dobre toplotne prevodnosti, nizke cene kot tudi ugodnih mehanskih lastnosti. Kemijske lastnosti in pogoji strjevanja pomembno vplivajo na razvoj mikrostrukture in mehanskih lastnosti. Siva litina se najpogosteje uporablja v avtomobilski industriji in grelnih elementih. Uporaba v primeru litja tankostenskih ulitkov zahteva natančno pripravo parametrov tehnološkega procesa litja, in sicer zaradi nagnjenosti k ukrivljanju in videza pripečenosti peska. Prednost numeričnih simulacij je v učinkovitem in hitrem izračunavanju litja in strjevanja ulitkov. Gospodarska prednost je v hitri zamenjavi različic izdelkov v kratkem času. Eksperimentalni del prispevka obsega več različic numerične simulacije postopka litja. Prva različica je izvirna geometrija, ki smo jo uporabili pri običajnem postopku litja tankostenskega ogrodja za vrata kamina. Izdelali smo še druge različice ulitkov z optimizirano geometrijo. Izvedli smo postopek litja vseh različic ulitka kakovosti EN GJL-200, litju pa je sledila raziskava medsebojnega vpliva kakovosti ulitka in procesnih parametrov. Ugotavljali smo vpliv položaja vpenjal, velikosti zračnikov in temperaturnega polja med strjevanjem ulitka na razvoj mikrostrukture, trdoto in natezno trdnost vzorcev ulitkov iz sive litine EN GJL-200 ter jih primerjali z rezultati, ki smo jih pridobili z numerično simulacijo.

Ključne besede: siva litina, numerična simulacija, mikrostruktura, mehanske lastnosti, optimizacija

Abstract

Grey cast iron is frequently used in industry, due to its good thermal conductivity, low price, and good mechanical properties. Chemical properties and solidification conditions have a significant influence on microstructure and mechanical properties development. The most common use of grey cast iron is in the automotive industry and heating elements. The application in the casting of thin-walled castings requires careful elaboration of the technological casting process parameters due to the curving tendency and the appearance of the burn. The advantage of numerical simulations is ineffective and fast calculation of pouring and solidification of castings. Economic advantage lies in the fast change of more different product variations in a short time. The experimental part of this paper has several versions of the numerical simulation of the casting process. The first one is the original geometry, which has been used in the regular casting process of thin-walled castings framework for fireplace doors. Other versions with optimizing the geometry of the castings have been elaborated. The pouring process of all casting versions of EN GJL-200 quality

was performed followed by an investigation of casting quality and process parameters interaction. The influence of clamp position, ingates size, and temperature distribution during casting solidification on microstructure development, hardness, and tensile strength of grey cast iron EN GJL-200 casting samples was determined and compared with the results obtained by numerical simulation.

Keywords: grey cast iron, numerical simulation, microstructure, mechanical properties, optimization

1 Uvod

Danes zahteva optimizacija proizvodnje ulitkov razumevanje strjevanja in medsebojnega delovanja vseh vplivajočih parametrov ter vpliva uporabljene tehnologije litja. Tehnologija litja je močno odvisna od znanja strokovnjakov, ki tehnološki postopek pripravljajo.

Siva litina je še vedno najpomembnejši livarski material in obsega več kot 70 % celotne svetovne proizvodnje. Siva litina ima ob zlomu zaradi grafita v mikrostrukturi, ki je posledica dodatka silicija za stabilizacijo ogljika v obliki grafita v nasprotju z železovim karbidom, temno sivo barvo. Siva litina ima običajno sestavo od 2,5 do 4,0 mas. % ogljika in od 1,0 do 3,0 mas. % silicija [1]. Mikrostruktura sive litine je odvisna od kemijske sestave in jo zaznamujejo grafitne lamele, ki so odvisne od parametrov procesa strjevanja (hitrost ohlajanja). Velikost in vrsta grafitnih lamel pomembno vplivata na želene lastnosti [2-4]. Siva litina je pogosta v številnih industrijskih in vsakodnevnih potrebah, predvsem kjer so potrebni visoka togost, obdelovalnost, dušenje vibracij, visoka toplotna kapaciteta in visoka toplotna prevodnost. Zelo razširjeni so izdelki, kot so grelni elementi (peči in kamini) v armaturah za vodovodne sisteme, procesna industrija, energetika, avtomobilska industrija (cilindri, bati, zavorni diski, ohišja menjalnikov, bloki valjev motorjev z notranjim izgorevanjem) in dekorativni ulitki ter kuhinjska posoda.

1 Introduction

Optimizing the production of castings today implies an understanding of solidification and the interaction of all influential parameters, as well as the influence of applied casting technology. Casting technology is highly dependent on the knowledge of experts working out the technological process.

Grey cast iron is still the most important casting material with over 70% of the total world production. Grey cast iron has a dark grey colour at fracture due to a graphite segregation microstructure based on silicon addition in order to stabilize carbon in the form of graphite as opposed to iron carbide. Grey cast iron typically has a composition of 2.5 wt.% – 4.0 wt.% carbon and 1.0 wt.% – 3.0 wt.% silicon [1]. The microstructure of grey cast depends on chemical composition and is characterized by graphite lamellae that depend on the solidification process parameters (cooling rate). The size and type of graphite lamellae significantly affect the desired properties [2-4]. Grey cast iron found its application in many industrial and everyday purposes mainly where high stiffness, machinability, vibration dampening, high heat capacity, and high thermal conductivity are needed. Products such as heating elements (stoves and fireplaces) in fittings for water systems, the process industry, energy, automotive industry (cylinders, pistons, brake discs, gearbox cases, internal combustion engine

Napake v ulitkih imajo lahko en vzrok ali več, ki lahko privedejo do najrazličnejših napak. Vsaka napaka poslabša kakovost ulitka v estetskem smislu ali v pomembnejšem funkcionalnem smislu; poslabšajo se lahko mehanske, fizikalne, kemijske ali druge lastnosti. Napake pri litju na splošno delimo na: erozijo forme, ki povzroči vključke žlindre ali peska v ulitku, vroča mesta, mikroporoznost ali »pinholes«, plinske pore, nezalitost, krčilna poroznost, itd. [5]. Večino napak je mogoče preprečiti s pravilno tehnološko pripravo postopka litja, ki upošteva razporeditev komponent litja ter termodinamično in mehansko interakcijo med zlitino in materialom forme. Najpogostejša napaka pri serijsko izdelanih tankostenskih ulitkih iz sive litine sta ukivljenost in pojav mest pripečenosti peska.

Pravilen izračun litja, polnjenja votlin, velikosti in položaja dovodnega kanala, napajalnika, oddušnikov je potreben, da lahko v prvo zagotovimo kakovosten ulitek. Prednost numeričnih simulacij je v učinkovitem in hitrem izračunavanju litja in strjevanja ulitkov. Gospodarska prednost je v hitri zamenjavi različic izdelkov v kratkem času. Programska zbirka za numerično simulacijo omogoča simulacijo celotnega postopka litja od začetka polnjenja votline kalupa do strjevanja, vključno z napovedovanjem napak. Modeliranje procesov strjevanja je zelo kompleksen niz termičnih procesov, ki potekajo v mikro/makro merilu in so opisani s številnimi parcialnimi diferencialnimi enačbami (energijske enačbe), ki jih dopolnjujejo geometrijski, fizikalni, robni in začetni pogoji [6]. V procesu strjevanja na vedenje zlitine vplivajo številni pojavi, ki temeljijo na Fourier-Kirchhoffovih enačbah, konvekciji toplote v staljeni kovini in vplivu konstitucijskega podhlajevanja, ki povzroči

cylinder blocks), and decorative castings and cookware are very well-known.

Defects in castings can have a single or multiple causes that resulted in many different casting defects. Any mistake impairs the quality of the casting in the aesthetic sense or in a more important functional sense such as mechanical, physical, chemical, or other properties. Casting defects are generally divided into: mold erosion resulting in the slag or sand inclusion in casting, hot spots, microporosity or pinholes, blowholes, misrun, shrinkage cavities, etc. [5]. Most of them are preventable by correct technological elaboration of the casting process taking into account the distribution of casting components and thermodynamic and mechanic interaction between alloy and mould material. The most common defect in serially produced thin-walled casting from grey cast iron is curvature tendency and the appearance of the burn.

The correct calculation of pouring, cavity filling, and the size and position of ingate, risers, and vents is necessary in order to obtain the sound casting "for the first time". The advantage of numerical simulations is in the effective and fast calculation of pouring and solidification of castings. Economic advantage lays in the fast change of more different product variations in a short time. Numerical simulation packages enable simulation of the entire casting process from the beginning of filling the mold cavity to solidification including defects prediction. The subject matter of solidification process modeling is a very complex range of thermal processes proceeding on a micro/macro scale described by a number of partial differential equations (energy equations) supplemented by the geometrical, physical, boundary, and initial conditions [6]. In solidification, processes number of phenomena have an impact on

lokalne spremembe kemijske sestave zaradi poteka procesa strjevanja.

Splošni problem prevoda toplote je v določanju temperature na vsaki točki togega telesa, za katerega sta znana začetna temperatura in porazdelitev toplotnega toka z določenimi omejenimi in mejnimi pogoji po Fourierjevem zakonu. Odvisnost geometrijskih in fizikalnih količin v mehaniki kontinuuma je vzpostavljena na podlagi diferencialnega elementa. Rešitev diferencialnih enačb se z ustrezno diskretizacijo zmanjša na rešitev sistema linearnih algebrskih enačb z neznankami vozlišča. Najpogosteje uporabljene metode diskretizacije diferencialnih enačb prenosa toplote in mase so numerične metode [7]: metoda končnih diferenc (FDM), metoda končnih elementov (FEM), metoda kontrolnega volumna, metoda robnih elementov.

Metoda končnih elementov spada med metode diskretne analize in temelji na fizični diskretizaciji obravnavane domene kontinuuma. Osnova za izračun je del domene končnih dimenzij, tj. končni element, kontinuum pa je mreža končnih elementov. Glede na način izpeljave in oblikovanja enačb, ki opisujejo stanje elementa, obstajajo štiri osnovni vidiki metode končnih elementov: neposredne metode, variacijske metode, metoda utežnih ostankov in metoda energijske bilance. [8]

Prednost numeričnih simulacij je v učinkovitem in hitrem izračunavanju litja in strjevanja ulitkov. Gospodarska prednost je v hitri zamenjavi različic izdelkov v kratkem času. Tehnološka priprava ciljnega ulitka obsega vpliv položaja vpenjal, velikosti zračnikov in temperaturnega polja med strjevanjem ulitka na razvoj mikrostrukture, trdoto in natezno trdnost vzorcev ulitkov iz EN GJL-200.

alloy behaviour based on Fourier-Kirchhoff equations, heat convection in molten metal, and the influence of constitutional undercooling resulting in local chemical composition changes due to the progress of the solidification process.

The general problem of heat conduction lies down in the determination of the temperature at each point of a rigid body, for which the initial temperature and heat flux distribution is known with defined limited and boundary conditions according to the Fourier law. The dependence of geometric and physical quantities in continuum mechanics is established on the differential element. The solution of differential equations is reduced through appropriate discretization to the solution of a system of linear algebraic equations with nodal unknowns. The most commonly applied method of discretization of differential equations of heat and mass transfer are numerical methods [7]: finite difference method (FDM), finite element method (FEM), control volume method, and edge element method.

The finite element method belongs to the methods of discrete analysis and is based on the physical discretization of the considered continuum domain. The basis for the calculation is a part of the domain of finite dimensions, i.e., the finite element, and the continuum is a network of finite elements. According to the way of deriving and formulating equations that describe the state of an element, there are four basic aspects of the finite element method: direct methods, variation methods, the weight residue method, and the energy balance method. [8].

The advantage of numerical simulations is in the effective and fast calculation of pouring and solidification of castings. Economic advantage lies in the fast change of more different product variations in

2 Materiali in metode

Kakovost sive litine EN-GJL-200 ima zaradi lamelne oblike grafita nizko natezno trdnost, trdoto, žilavost, raztezek in elastični modul [9-12]. Ena glavnih pomanjkljivosti tega materiala je občutljivost na debelino stene (velikost preseka), kar lahko povzroči znatne razlike v mehanskih lastnostih znotraj ulitka. Ciljni tankostenski ulitek s kompleksno geometrijo je prikazan na Sliki 1.

Za numerično simulacijo postopka litja smo uporabili napredno programsko opremo ProCAST. Obsega uporabo tehnik generiranja mrež, modeliranje prenosa toplote (toplotni tok), sevanja, toplotna prevodnost materialov, toka taline, polnjenja forme in napetosti, povezanih s talino (termo-mehanika). Poleg tega vključuje modeliranje mikrostrukture, toplotno obdelavo, modeliranje strukture zrn in modeliranje poroznosti. Vključeni so posebni modeli, ki upoštevajo lastnosti formarskih materialov in jedro [13]. Koraki, ki so bili izvedeni med simulacijo litja, so sledili naslednjemu shematskemu prikazu: priprava 3D-modela, izbira materiala za litje in formo, konfiguracija začetnih in robnih

a short time. Technological elaboration of target casting included the clamp position, ingates size, and temperature distribution during casting solidification on microstructure development, hardness, and tensile strength of EN GJL-200 casting.

2 Materials and Methods

Grey iron quality EN-GJL-200 due to the flaky structure of graphite, possess low tensile strength, hardness, toughness, elongation, and modulus of elasticity [9-12]. One of the main disadvantages of this material is the sensitivity to wall thickness (cross-sectional size), which can result in significant variations in mechanical properties within the casting. Target thin-walled complex geometry casting is shown in Figure 1.

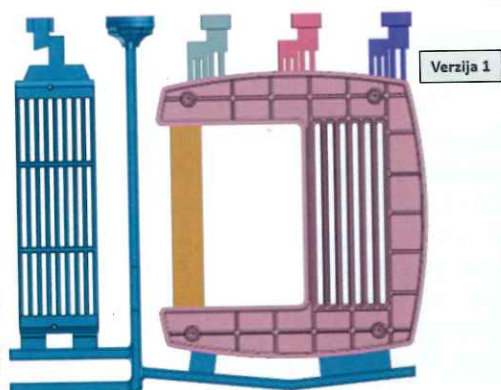
The advanced software ProCAST is used for numerical simulation of the casting process. It involves the use of mesh generation techniques, modeling of heat transfer (heat flow), radiation, thermal conductivity of materials, melt flow, mold filling, and melt-related stresses (thermo-mechanics). In addition, it includes microstructure modeling, heat treatment,



Slika 1. Kompleksna geometrija preiskovanega ulitka (zgornja in spodnja stran)

Figure 1. The complex geometry of investigated casting (top and bottom side)

pogojev; nastavitve parametrov procesa in simulacije, numerična simulacija, analiza rezultatov in odločitev o sprejemljivosti ali popravku. Glavna naloga programa ProCAST je zagotoviti celovito industrijsko rešitev za livarne ter realistične in podrobne napovedi vsakega segmenta postopka litja. V tej preiskavi smo simulirali različne različice izdelave tehnoloških ulitkov (v primerjavi z izvirnikom V1), da bi ugotovili vpliv na kakovost ulitkov. Ciljni opazovani pojavi so bili deformacija ulitka, lastnosti in izgorevanje. Spremembe so se nanašale predvsem na velikost oddušnikov, velikost dovodnega kanala, položaj vpenjala in temperaturo litja, kot je prikazano na Sliki 2.



Slika 2. Pregled prvotne različice (V1) izdelave tehnološkega ulitka

Figure 2. Overview of the original version (V1) of casting technological elaboration

3 Rezultati in razprava

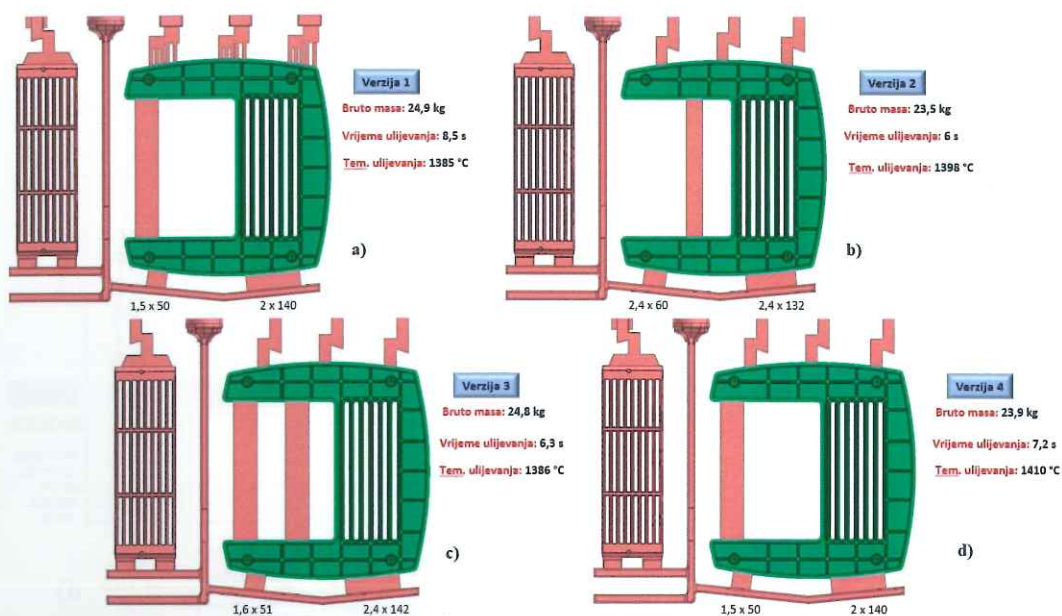
Kemijsko analizo vseh različnih ulitkov smo natančno spremljali z optičnim spektrometrom Leco GDS500A. Rezultati so naslednji: C: 3,58–3,63, Si: 2,02–2,04, Mn: 0,49–0,55, P: 0,33–0,40, S: 0,103–0,117, Cu: 0,138–0,180, Cr: 0,082–0,106. Pri posameznih različicah ni bistvenih

grain structure modeling, and porosity modeling. Special models are included to account for modeling material and core [13]. Steps performed during casting simulation followed the next flow chart: creating the 3D model, casting and mould material selection, configuration of initial and boundary conditions; setting up process and simulation parameters, numerical simulation, analysis of the results, and making a decision on acceptance or correction. The main task of ProCAST is to provide a complete industrial solution for foundries and realistic and detailed predictions of each part of the casting process. In this investigation, a different version of casting technological elaboration (when compared to the original V1) was simulated to determine the impact on the casting quality. The target observed phenomena were casting deformation, properties, and burns out. The changes were focused on vents size, ingate size, the position of the casting clamp, and the pouring temperature as shown in Figure 2.

3 Results and Discussion

Chemical analysis of castings was carefully followed for all versions at the Leco GDS500A optical spectrometer. Results are as follows: C: 3,58-3,63, Si: 2,02-2,04, Mn: 0,49-0,55, P: 0,33-0,40, S: 0,103-0,117, Cu: 0,138-0,180, Cr: 0,082-0,106. There is no significant deviation in the chemical composition of particular versions. The mean value of carbon equivalent (CE): 4,38-4,42 indicates a slightly hypereutectic composition.

Technological elaboration of the casting process differs for all casting versions (V1, V2, V3, and V4). Deviation can be observed in the size of ingates in all versions, different vents for versions V2-V4 when compared to the original one V1, different



Slika 3. Pregled vseh različic (V1–V4) parametara tehnološke priprave ulitkov

Figure 3. Overview of all versions (V1-V4) of casting technological elaboration parameters

odstopanj v kemijski sestavi. Srednja vrednost ogljikovega ekvivalenta (CE): 4,38-4,42 kaže na rahlo nadevetsko sestavo.

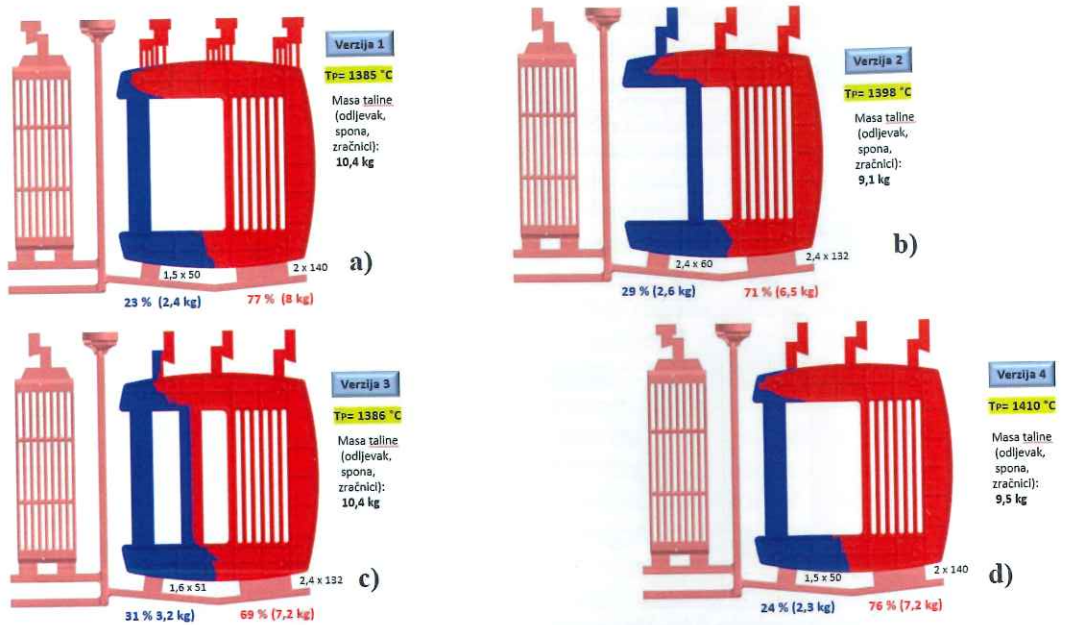
Tehnološka priprava postopka litja se razlikuje med vsemi različicami ulitkov (V1, V2, V3 in V4). Pri vseh različicah je mogoče opaziti odstopanja v velikosti dovodnih kanalov, različne oddušnike za različice V2–V4 v primerjavi z izvirno različico V1, različne položaje vpenjal in različno temperaturo litja. Vsi parametri so prikazani na Sliki 3.

Vidna je razlika v velikosti dovodnih kanalov, velikosti in postavitvi vpenjal ter zračnikov. Oddušniki v različicah V2–V4 imajo spremenjeno zasnovo v primerjavi s prvotnimi pri različici V1. Vpenjala, ki so namenjena preprečevanju deformacij med strjevanjem, imajo prav tako različna vpenjala, različica V3 ima dve vpenjali. Izračun je razkril, da je bruto masa

clamp positions, and different pouring temperatures. All parameters are shown in Figure 3.

There is a visible difference in the size of the ingates, and the size, and positioning of the clamp and vents. The vents in versions V2-V4 are changed when compared to the original ones in V1. Clamps that serve to predate deformations during solidification also differ in position and V3 has two of them. The calculations reveal that the brutto mass of the original V1 is the largest, while that of the V2 is the smallest. Times behave the same way pouring: V1 is the longest, while for V2 it is the shortest. From the solidification results obtained, V2 seems to be the best version from the aspect of solidification time and brutto casting mass.

Different technological elaboration parameters indicate different filling mode calculations as shown in Figure 4.



Slika 4. Izračun načina polnjenja vseh različic ulitkov (V1–V4)

Figure 4. Calculation of filling mode of all casting versions (V1-V4)

prvotnega ulitka V1 največja, masa ulitka V2 pa najmanjša. Vedenje časov je podobno: pri različici V1 je najdaljši, pri različici V2 pa najkrajši. Na podlagi rezultatov strjevanja se zdi, da je različica V2 z vidika časa strjevanja in skupne mase ulitka najboljša.

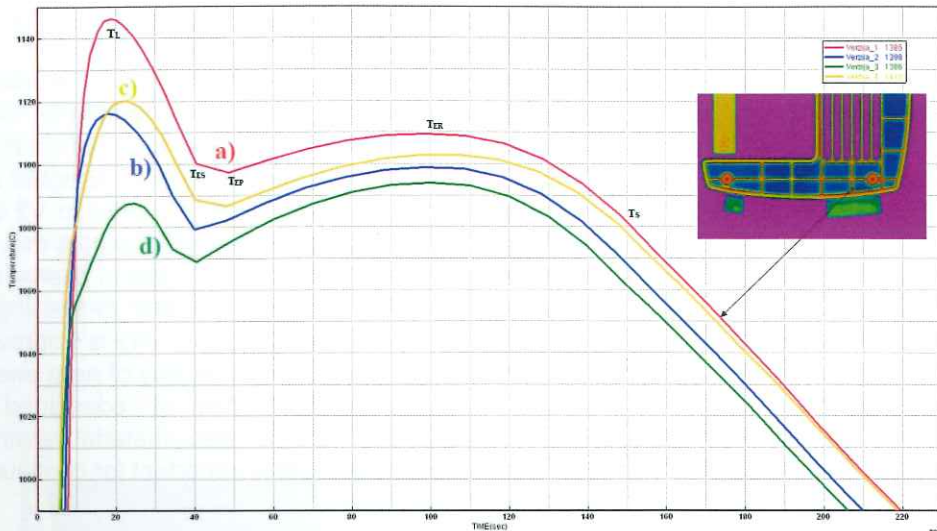
Različni tehnološki parametri izdelave kažejo na različne načine izračuna polnjenja, kot je prikazano na Sliki 4.

Pretek taline skozi manjši dovodni kanal je označen z modro, pretek skozi večji dovodni kanal pa z rdečo. Hitrejši pretek taline, tj. polnjenje livne votline, bo zmanjšal pregrevanje posameznih con in težnjo po zapečenosti peska. Izkazalo se je, da so oddušniki ključnega pomena za optimizacijo proizvodnje ulitkov. Poleg odstranjevanja plinov je njihova naloga pospešiti odstranjevanje toplotne energije in s tem neposredno strjevanje. Tako se prepreči consko pregrevanje litine, ki bi lahko povzročilo zapečenost peska.

The melt flow through the smaller ingate is marked in blue, while the flow through the larger ingate is marked in red color. Faster melt flow i.e., filling of the casting cavity will reduce the overheating of individual zones and reduce the tendency to burn out. The vents proved to be crucial for optimization the casting production. Their task is to, besides gases removal, speed up the removal of thermal energy and thus direct solidification. This prevents zonal overheating of the casting which potentially results in burnouts.

Different pouring temperatures and casting technological elaboration indicate deviation in mould temperature during the casting process as shown in Figure 5.

The cooling curves in Figure 5 follow the solidification sequence with characteristic phase transformations. The first temperature which indicates the beginning of solidification is the liquidus



Slika 5. Krivulja ohlajanja forme (V1-V4)

Figure 5. Mould cooling curve (V1-V4)

Različne temperature litja in tehnološke obdelave litja kažejo na odstopanje temperature v formi med postopkom litja, kot je prikazano na Sliki 5.

Krivulje ohlajanja na Sliki 5 sledijo zaporedju strjevanja z značilnimi faznimi transformacijami. Prva temperatura, ki označuje začetek strjevanja, je likvidus temperatura T_L , pri kateri pride do nukleacije avstenita, ki z nadaljnjim ohlajanjem in rastjo v dendrtini. Nato pride do eutetskega strjevanja T_{ES} . Temperatura taline še naprej pada, v območju med T_{ES} in T_{EP} , nato pa temperatura naraste (T_{ER}), saj toplota, ki se sprošča med strjevanjem, presega toploto, ki jo odvede forma. Krivulja se začne nato spuščati do T_S , ki predstavlja konec strjevanja ulitka. Iz ohlajevalne krivulje je mogoče sklepati, da višja temperatura litja ne pomeni višje temperature v formi, saj na tok taline in potek strjevanja vplivajo tudi masa taline, hitrost pretoka skozi posamezne komponente in celotna tehnološka izdelava ulivnega in napajalnega sistema.

temperature T_L at which nucleation occurs austenite and it grows in dendritic form with further cooling. Then there is cooling and of eutectic solidification T_{ES} and eutectic begin to form. The melt temperature continues to drop, the area between T_{ES} and T_{EP} , and after that the temperature rises T_{ER} because the heat released during of solidification exceeds the heat dissipated by the mold. Then the curve begins to fall to T_S i this marks the end of the solidification of the casting. It can be concluded from the cooling curves that a higher pouring temperature does not result in higher temperature in the mould because the flow of the melt and the sequence of solidification will be affected also by the mass of the melt, flow rate through particular components and complete casting technological elaboration of the pouring and feeding system.

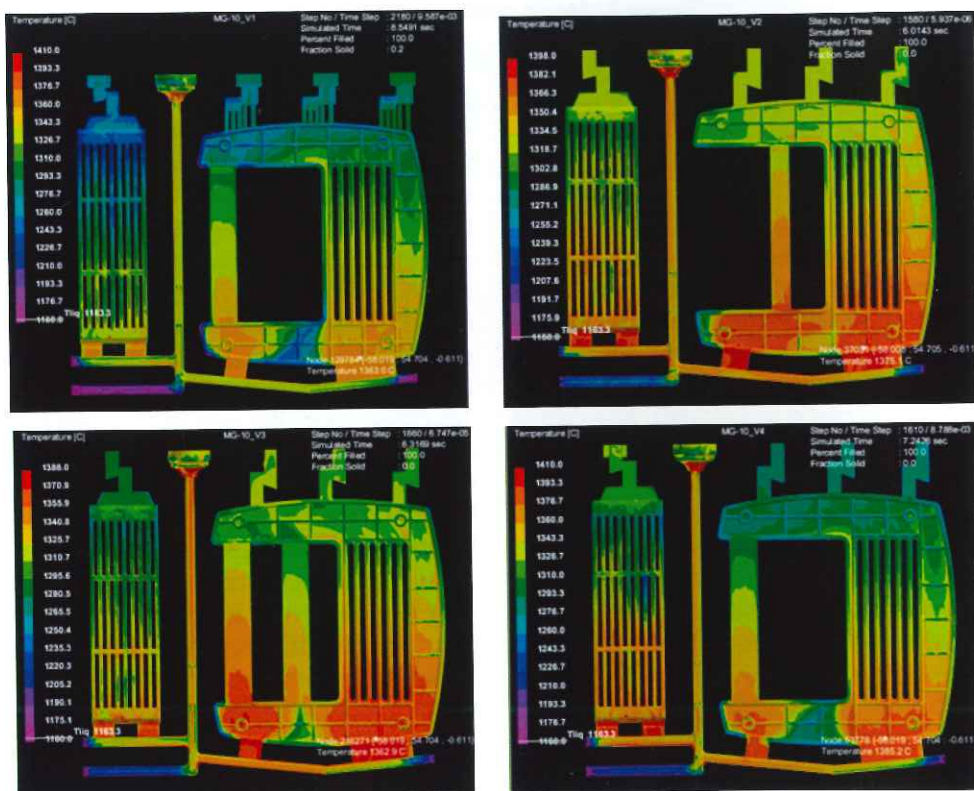
The focus of this investigation, besides lowering the brutto mass of the casting, was to lower the burnouts at the inner lower side of the casting. Burnouts can be calculated on the base of thermal fields at the end

Poleg znižanja bruto mase ulitka se je ta preiskava osredotočala tudi na zmanjšanje zapečenosti peska na notranji spodnji strani ulitka. Zapečenost peska je mogoče izračunati na podlagi toplotnih polj na koncu procesa strjevanja, kot je prikazano na Sliki 6.

Masa ulitka V2 je manjša od mase različice V1, kar lahko povzroči nižjo temperaturo v sami formi. Poleg tega je temperatura litja pri različici V2 višja, čas strjevanja pa je pri različicah V2 in V3 krajši. Temperaturno polje označuje temperaturo v spodnjem delu ulitkov V2, V3 in V4. Izboljšana je geometrija dovodnega kanala ulitka (V2, V3, V4). Z večjo intenziteto

of the solidification process as shown in Figure 6.

The mass of the casting V2 is smaller than V1 and this can result in a lower temperature in the mold itself. In addition, the pouring temperature in V2 is higher and the solidification time is shorter in V2 and V3. The temperature field indicates that the temperature in the lower part of casting V2, V3, and V4. The geometry of the ingate on the casting (V2, V3, V4) is improved. With the increased intensity of heat energy removal with the help of redesigned air ingates, there is also material savings, which is especially important for continuous production.



Slika 6. Primerjava temperaturnih polj ob koncu procesa strjevanja

Figure 6. Comparison of temperature fields at the end of the solidification process

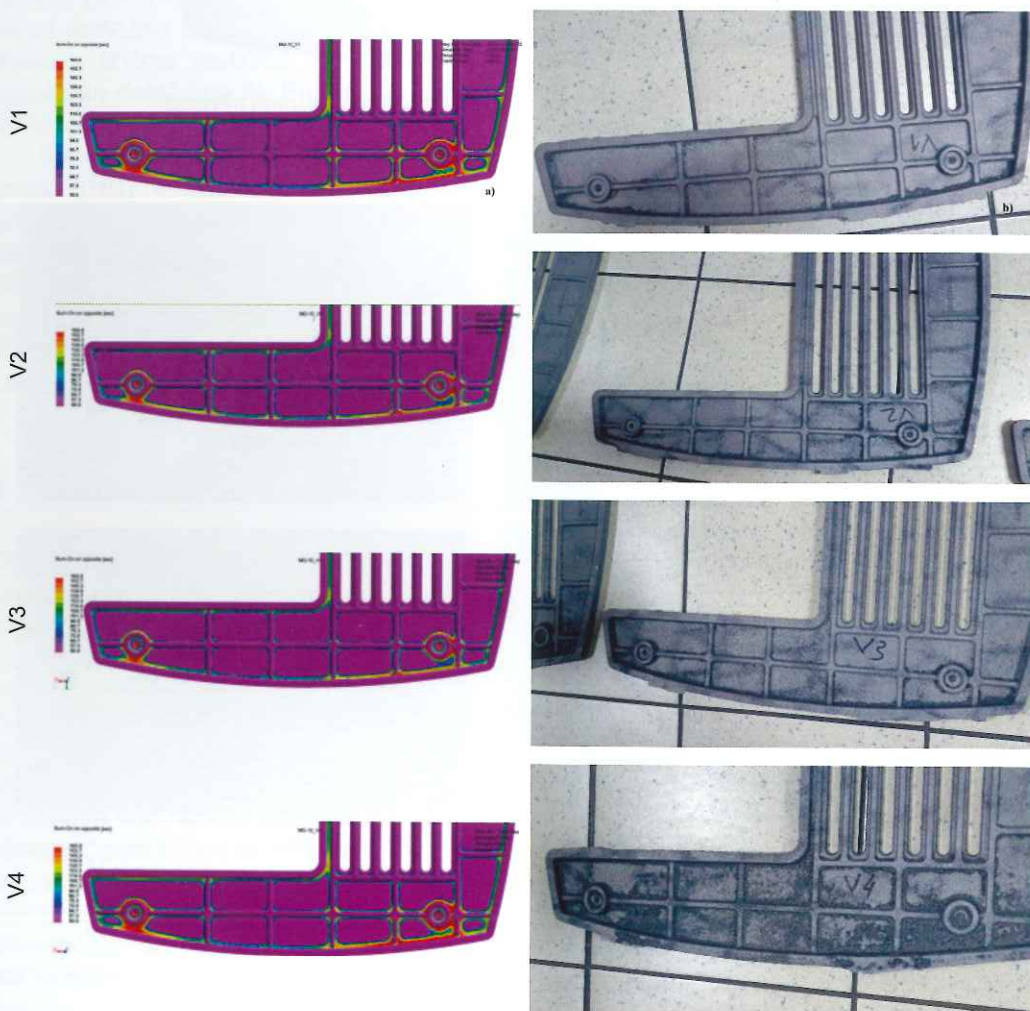
odvajanja toplotne energije s pomočjo preoblikovanih zračnih dovodnih kanalov se prihrani tudi material, kar je še posebej pomembno pri neprekinjeni proizvodnji.

Rezultat postopka litja vseh različic so bili naslednji izdelki, kot je prikazano na Sliki 7.

Zvišanje temperature litja poveča nagnjenost k zapečenosti peska kljub optimiziranim oddušnikom in dovodnim

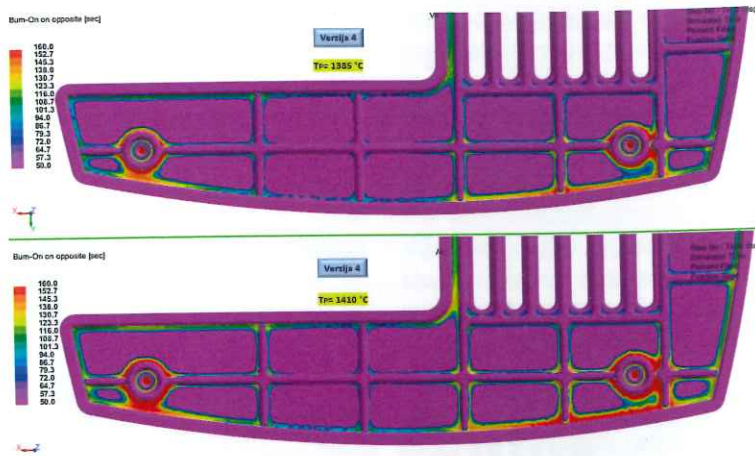
The casting process of all versions resulted in the following products as shown in Figure 7.

The increase of pouring temperature increases the tendency to burnouts occurrence despite the optimized vents and ingates. The pouring temperature should be constantly controlled in order to avoid extreme deviations that can occur and lead to degradation of the melt flow,

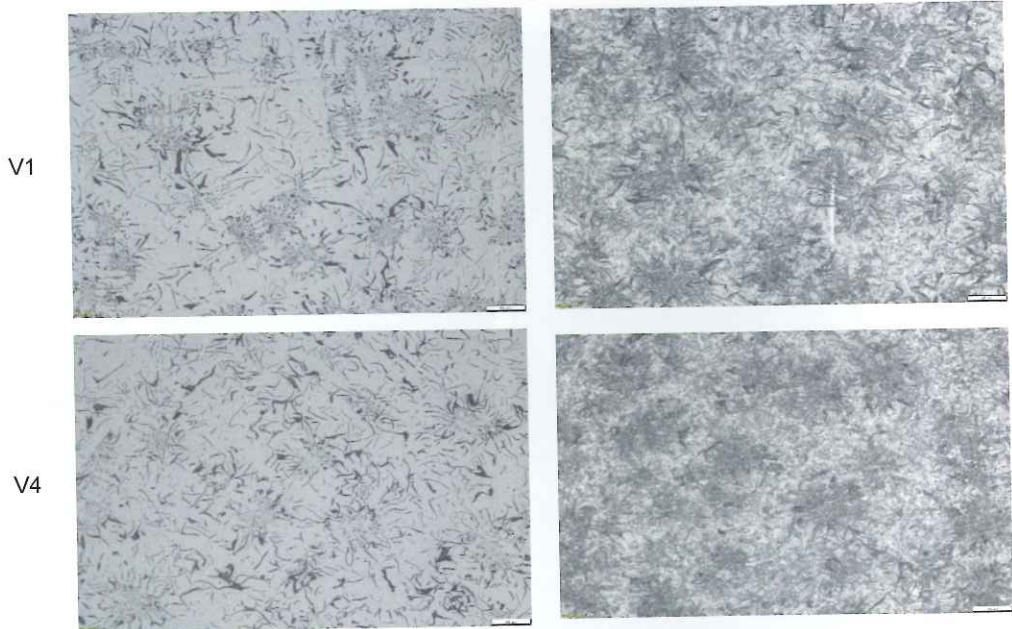


Slika 7. Primerjava simuliranih izgorevanj in dejanskega litja s prilagojenim parametrom

Figure 7. Comparison of simulated burnouts and real casting with adjusted parameter



Slika 8. Primerjava različice V4 z različnimi temperaturami ulivanja
Figure 8. Comparison of V4 with different pouring temperatures



Slika 9. Primerjava mikrostrukture V1 in V4
Figure 9. Comparison of the microstructure of V1 and V4

kanalom. Da bi se izognili ekstremnim odstopanjem, ki lahko povzročijo poslabšanje pretoka taline, temperature in zahtevanih lastnosti ulitka, je treba

temperature, and required properties of the casting. A comparison of the same casting parameters as in V4 but lower pouring temperature enable a lower amount of

temperaturo litja neprekinjeno nadzorovati. Primerjava enakih parametrov litja kot pri različici V4, vendar pri nižji temperaturi litja, omogoča manjšo količino zapečenega peska na kritičnem območju, kot je prikazano na Sliki 8.

Izgorevanje pri simulirani nižji temperaturi 1385 °C je manjše kot pri različici V1, s prihrankom materiala pa smo dosegli tudi krajši čas litja.

Mikrostruktura vseh optimiziranih različic (V2–V4) je sestavljena iz grafitnih lamel pretežno tipa I in II s feritno-perlitno matrico. Izvirna različica V1 vsebuje tudi precejšen delež tipa III. Primerjava različic V1 in V4 je prikazana na Sliki 9.

Mehanske lastnosti nakazujejo znižanje trdote (HB) v optimiziranih različicah v primerjavi z izvirno (230 HB), vendar še vedno v okviru zahtevanega območja (210–227 HB). Razpon natezne trdnosti za optimizirane različice je V2–V4 je $R_m = 121,57\text{--}166,66$ MPa. Izvirna različica V1 je zagotovila vrednost $R_m = 152,80$ MPa.

4 Sklepi

Optimizacija postopka litja je kompleksen proces, ki ga sestavljajo modeliranje materialov, tehnološki razvoj procesa in termodinamični parametri. Prednost uporabe numeričnih simulacij pri optimizaciji je ključna za hitro in učinkovito uvedbo proizvodnje. Učinkovitost numerične simulacije v optimizaciji v posebni preiskavi je razkrila več različic izdelave tehnoloških ulitkov. Optimizirane različice imajo različne odprtine, ki omogočajo zmanjšanje skupne mase ulitka. Modificirani dovodni kanali omogočajo laminarno in bolj enakomerno polnjenje livne votline. Sprememba števila, velikosti in položaja vpenjal niso zagotovili izboljšanja kakovosti ulitka. Odstopanje temperature litja kaže na

burnouts at critical area, as shown in Figure 8.

The burnouts at a simulated lower temperature of 1385 °C are lower than for V1, and with the saving of material it is also lower casting time achieved casting improvement goal.

The microstructure of all optimized versions (V2–V4) consists of the graphite lamellae mostly type I and II with the ferrite-perlite matrix. Original version V1 also consists significant ratio of type III. A comparison of V1 and V4 is shown in Figure 9.

Mechanical properties indicate lowering the hardness (HB) in optimized versions when compared to the original one (230HB), but still maintaining the requested range (210–227 HB). The tensile strength range V2–V4 is $R_m = 121,57\text{--}166,66$ MPa for optimized versions. The original one V1 resulted in $R_m = 152,80$ MPa.

4 Conclusions

Optimization of the casting process is a complex process consisting form modeling of materials, technological elaboration of process and thermodynamic parameters. The advantage of numerical simulation application in optimization is the imperative of fast and effective production adoption. The efficiency of numerical simulation in optimization in particular investigation indicated several versions of technological casting elaboration. Optimized versions have different vents which comprehend to the lowering of the total casting mass. Modified ingates enable laminar and more evenly distributed filling of the casting cavity. Changes of clamp number, size, and position did not enable improvement in casting quality. Deviation in pouring temperature indicates matching in the

ujemanje v izračunu pojava napak pri litju. Dandanes numerična simulacija omogoča natančnejše napovedovanje pojavov med postopkom litja v primerjavi z drugimi simulacijami. Določili smo vpliv položaja vpenjal, oddušnikov, dovodnih kanalov in porazdelitve temperature med strjevanjem ulitka na razvoj mikrostrukture, trdoto in natezno trdnost vzorcev ulitka iz sive litine EN GJL-200 ter jih primerjali z rezultati, pridobljenimi z numerično simulacijo. Izračunani dogodek je bil potrjen z dejansko proizvodnjo ulitkov.

calculation of casting defects occurrence. Numerical simulation enables nowadays more accurate prediction of phenomena during the casting process when compared. The influence of clamp position, vents, ingates size, and temperature distribution during casting solidification on microstructure development, hardness, and tensile strength of grey cast iron EN GJL-200 casting samples was determined and compared with the results obtained by numerical simulation. The calculated event was confirmed with real casting production.

Viri / References

1. R. Elliott, Cast Iron Technology. Butterworths, 1988, str. 1
2. D. M. Stefanescu, A History of Cast Iron, The Ohio State University and The University of Alabama, ZDA, 2017,
3. L. Collini, G. Nicoletto, R. Konečna, Microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron, Department of Industrial Engineering, University of Parma, Parma, Italija, 2017,
4. M. M. Jababri Behnam, P. Davami, N. Varaharm, Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of gray cast iron, Department of Materials Engineering, Sharif University of Tehnology, Tehran, Iran, 2017
5. S. Hasse, Pogreške na odljevcima, Hrvatsko udruženje za ljevarstvo, Zagreb, 2003
6. B. Mochnacki, Numerical Modeling of Solidification Process in Computational Simulations and Applications, 2011, DOI: 10.13140/2.1.4581.2160
7. J. H. Lienhard IV, J. H. Lienhard V, A heat transfer textbook (3rd edition), Phlogiston Press, Chambridge, Massachusetts, 2003.
8. E. R. Champio, Finite element analysis in manufacturing engineering; McGraw-Hill Inc., New York, 1992
9. D. B. Craig, M. J. Hornung, T. K. McCluhan, Gray Iron, in Metals Handbook, Volume 15, Casting, ed. ASM International Handbook Committee, ASM International, Metals Park, Ohio, 1988., 629-646.;
10. HRN EN ISO 945-1:2018, Mikrostruktura željeznih lijevova -- 1. dio: Razredba grafita vizualnom analizom (ISO 945-1:2008; EN ISO 945-1:2008), Državni zavod za normizaciju i mjeriteljstvo, Zagreb.,
11. HRN EN 1560:2012, Ljevarstvo -- Sustav označivanja željeznog lijeva -- Simboli materijala i odbrojčavanje materijala (EN 1560:2011), Državni zavod za normizaciju i mjeriteljstvo, Zagreb.,
12. HRN EN 1561:2011, Ljevarstvo -- Sivi željezni lijevovi (EN 1561:2011), Državni zavod za normizaciju i mjeriteljstvo, Zagreb
13. ProCAST 2015.0 User's Guide