

Numerical simulation in optimization of thin-walled EN-GJL-200 casting

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

Source / Izvornik: **Livarski vestnik, 2022, 69, 29 - 42**

Journal article, Published version

Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:115:031381>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-11**



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

69/2022

1



DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE
SLOVENIAN FOUNDRYMEN SOCIETY

Instro d.o.o., Stegne 7, 1000 Ljubljana, Slovenija
email: info@instro.si, Tel. +386 (0)40 243 755 www.instro.si



Elementna analiza



Vakuum

Neporušitvene
preiskave



Tehnična diaagnostika:
ultrazvok, vibracije in
termografija



Meritve sevanja in
kontaminacije

LIVARSKI VESTNIK

Izdajatelj / Publisher:

Društvo livarjev Slovenije
Lepi pot 6, P.P. 424, SI-1001 Ljubljana
Tel.: + 386 1 252 24 88
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-Blažič

Uredniški odbor / Editorial board:

prof. dr. Alojz Križman, Univerza v Mariboru
prof. dr. Primož Mrvar, Univerza v Ljubljani
prof. dr. Jožef Medved, Univerza v Ljubljani
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: marec 2022



INSTRO d.o.o.

Sedež: Preglov trg 11, 1000 Ljubljana
Pisarna: Stegne 7, 1000 Ljubljana

Direktor: Jovan JOVANOVIČ

Tel.: +386 (4) 0 243 755

e-mail: info@instro.si

spletna stran: www.instro.si

VSEBINA / CONTENTS

Stran / Page:

Baitiang, Chinnadit: Napovedovanje mehanskih lastnosti litoželeznega dela in analiza napak med litjem z uporabo proizvodnih podatkov iz avtomatske livarne s peščenimi formami / **Prediction of Mechanical Properties of Cast Iron Part and Analysis of Casting Defects Using Production Data from an Automatic Sand Moulding Foundry** 2

Brodarac, Zovko: Numerične simulacije za optimizacijo tankostenskega ulitka EN-GJL-200 / **Numerical Simulation In Optimization Of Thin-Walled EN-GJL-200 Casting** 29

Ferčec, J.: Karakterizacija napak v ulitkih iz aluminija, proizvedenih z nagibnim gravitacijskim litjem, v povezavi s procesnimi parametri / **Characterization of Defects in Aluminum Castings Produced by Tilt Gravity Casting in Relation to Process Parameters** 43

Kirbiš, Peter: Kontinuirno litje visokoogljčnega nanostrukturiranega bainitnega jekla / **Continuous Casting of High Carbon Nanostructured Bainitic Steel** 53

AKTUALNO / CURRENT

Pregled svetovne livarske proizvodnje v letu 2020 60

Seje organov Društva livarjev Slovenije 62

STEM D.O.O. bogatejši za nove proizvodne prostore 65

62. IFC Portorož 2022 66

Livarski vestnik je vpisan v razvid medijev Ministrstva za kulturo pod zaporedno številko 588

Numerične simulacije za optimizacijo tankostenskega ulitka EN-GJL-200

Numerical Simulation In Optimization Of Thin-Walled EN-GJL-200 Casting

Povzetek

Uvedba novih strategij in konceptov, kot so »ulitki skoraj končne oblike« in »takoj v prvem poskusu,« je danes ključnega pomena za livarsko proizvodnjo. Visok izkoristek materialov pri kar najmanjšem številu formarskih opravil in izogibanje napakam sta glavna cilja proizvajalcev ulitkov. Zato predstavljajo numerične simulacije kot del tehnologij CAD/CAE nepogrešljivo orodje za zagotavljanje konkurenčnosti na globalnem trgu.

Numerična simulacija litja in strjevanja predstavlja opis fizičnega pojava na podlagi matematičnega modela. Uporaba računalniških numeričnih simulacij, ki temeljijo na kompleksnih in celovitih matematičnih modelih, kot je Fourierov zakon, se pogosto uporablja pri ocenjevanju termičnih procesov v livarstvu. Numerična simulacija omogoča analogno prikazovanje metalurških procesov z izračunavanjem in grafično dispozicijo procesov od litja pa vse do končnega strjevanja ulitka. Postopek strjevanja je izredno kompleksen proces, razumevanje katerega predvideva obsežno poznavanje vedenja in interakcij materialov in tehnologij. Kompleksnost kovinskih ulitkov sestavljajo interakcije elementov in masni prenos med strjevanjem ter tehnološki razvoj, vključno s prenosom toplote. Najkoristnejša numerična metoda je metoda končnih razlik, in sicer zaradi njene enostavnosti, vendar pa je metoda končnih elementov natančnejša in ni povezana z omejitvami v smislu kompleksnosti geometrijskih oblik.

Ta raziskava se je osredotočala na optimizacijo litja in strjevanja tankostenskih ulitkov EN-GJL-200 s pomočjo numerične simulacije. Kompleksna geometrija tankostenskega ulitka predstavlja izziv zaradi skorjastih delov in upogibanja ulitka pod obremenitvijo v trenutni tehnološki konfiguraciji. Optimizacija numerične simulacije razkriva spremembe tehnoloških parametrov pri ulivnih sistemih, prežračevalnih sistemih in podpornih sistemih. Optimizacija omogoča tudi polnjenje ulitkov z namenom preprečitve izdatne toplotne preobremenitve in posledično obremenitve konkretnih delov ulitka.

Ključne besede: numerična simulacija, EN-GJL-200, tankostenski ulitek, strjevanje

Abstract

Implementation of new strategies and concepts such as "Near net shape castings" and "Right for the first time" represents an imperative for nowadays foundry production. High material utilization, with a minimal number of forming operations and defects avoiding, is the main goal for casting producers. Therefore, numerical simulation as a part of CAD/CAE technologies represents an indispensable tool for achieving competitiveness in the global market.

Numerical simulation of casting poring and solidification represents a description of physical phenomena based on a mathematical model. The application of computer numerical

simulations, which are based on complex and comprehensive mathematical models such as Fourier law, found its significant application in consideration of thermal processes in the foundry. Numerical simulation enables the analogical display of metallurgical processes by calculation and graphical disposition of the process from the pouring to the final casting solidification. The solidification process is a very complex process that comprehends knowledge related to material and technology behaviour and interactions. The complexity of metal casting consists of element interactions and mass transfer during solidification, and technological development including heat transfer. The most useful numerical method is the finite difference method due to its simplicity, but the finite element method is more accurate and does not have any limitation concerning the complexity of geometric shapes.

The focus of this investigation was the optimization of pouring and solidification process of thin-walled EN-GJL-200 casting using numerical simulation. The complex geometry of thin-walled casting represents the challenge due to crusted parts and stress bending of casting in the existing technological setup. Numerical simulation optimization reveals changes in technological parameters of the gating system, venting system, and support. Optimization enables even filling with castings to prevent an extensive thermal overload and consequently stress of particular parts of castings.

Keywords: numerical simulation, EN-GJL-200, thin-wall casting, solidification

1 Uvod

Numerične simulacije se vse pogosteje uporabljajo za upravljanje metalurških procesov, kot sta litje in strjevanje. Glede na čas obdelave, ki je potreben za posamezno nalogo, lahko simulacije razdelimo v dve skupini: povezane procese (numerične operacije v zelo kratkem času, kot so vodenje procesa, priprava peska za formo, odmerjanje v peči, pihanje belega grodja v pretvornikih, način delovanja gorilnika itd.) in nepovezani procesi (reševanje numeričnih operacij v zelo dolgem obdobju, kot so litje, strjevanje, pretok toplote, pretok tekočine, deformacija materiala itd.).

Obstajajo različni pristopi reševanja zgoraj navedenih problemov, npr. eksperimentalni, teoretični in numerični. Zaradi natančnosti, uporabnosti in stroškov je najbolj sprejemljiv numerični pristop. Splošni problem prevodnosti toplote je v določanju temperature na vsaki točki togega telesa, za katerega sta znana začetna temperatura in porazdelitev toplotnega toka z določenimi omejenimi in

1 Introduction

Numerical simulations are increasingly used to control metallurgical processes such as pouring and solidification. Depending on the time processing required for each task, the simulations can be divided into two groups: online processes (numerical operations in a very short time such as process management, preparations of mold sand, dosing of furnaces, blowing of whitepig iron in converters, burner operation mode, etc.) and off-line processes (solving numerical operations over a very long period such as casting, solidification, heat flow, fluid flow, material deformation, etc.)

There are different approaches to solving the above problems, such as experimental, theoretical, and numerical. The most acceptable approach is numerical due to its accuracy, applicability, and costs. 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 are known with defined limited and boundary

mejnimi pogoji po Fourierjevem zakonu. Odvisnost geometrijskih in fizikalnih količin v mehaniki kontinuuma je vzpostavljena na podlagi diferencialnega elementa. Rešitev diferencialnih enačb se z ustrežno diskretizacijo zmanjša na rešitev sistema linearnih algebraičnih enačb z neznankami vozlišča. Najpogosteje uporabljene metode diskretizacije diferencialnih enačb prenosa toplote in mase so numerične metode [2]: metoda končnih diferenc (FDM), metoda končnih elementov (FEM), metoda kontrolnega volumna, metoda robnih elementov.

Najpogosteje uporabljene numerične metode so: metode končnih razlik zaradi njihove preprostosti in metode končnih elementov zaradi pomanjkanja omejitev v povezavi s kompleksnostjo geometrijskih oblik [2].

Glede na potrebo zastavljenega problema se ustrezna numerična metoda izbere z uporabo ustrezne programske opreme za numerično simulacijo.

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. Pri numerični analizi toplotne prevodnosti se uporabljata metodi utežnih ostankov in variacijska metoda. Za vsak končni element je značilna oblika elementa, število vozlišč, število in vrsta neznanih količin (parametrov) v posameznih vozliščih. Iz oblike in neznane velikosti izhajajo različni tipi končnih elementov, in sicer enodimenzionalni (linearni),

conditions according to the *Fourierlaw*. 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 [2]: finite difference method (FDM), finite element method (FEM), control volume method, edge element method.

The most commonly used numerical methods are: finite difference methods due to their simplicity and finite element methods due to lack of limitation regarding the complexity of geometric shapes [2].

Depending on the requirement of the posed problem being, an appropriate numerical method is selected, using appropriate numerical simulation software.

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. In the numerical analysis of heat conduction, the weight residue methods and the variation method are used. Each finite element is characterized by the shape of the element, the number of nodes, the number and type of unknown quantities (parameters) in individual nodes. Depending on the shape and unknown sizes, different types of finite elements

dvodimenzionalni (trikotni in štirikotni) in tridimenzionalni (tetraedrski in prizmatični) elementi. V geometrijah z ukrivljenimi površinami se najpogosteje uporabljajo dvodimenzionalni trikotni in tridimenzionalni tetraedrski elementi [3].

Samozadostne livarne se morajo v današnjem času prilagajati strogim zahtevam svetovnega trga in zato poiskati rešitve za njihovo izpolnjevanje na podlagi koncepta takoj v prvem poskusu [4]. V zadnjih desetletjih je najpomembnejše orodje upravljanja, ki se uporablja v livarnah, vitka proizvodnja [5, 6]. Načela takšne proizvodnje so skrajšanje časa do prevzema izdelka, izboljšanje kakovosti in zmožnost prilagajanja zahtevam kupca. Eden gospodarnih načinov proizvodnje ulitkov je koncept procesa proizvodnje ulitkov skoraj končne oblike [7]. Kupcu to predstavlja zmanjšanje sekundarnih postopkov na komponentah, ki imajo manjše tolerance, za proizvajalca pa največji dobiček.

Izpolnjevanje zahtev strank je mogoče doseči samo s celostnim pristopom. To pomeni, da je treba celotno življenjsko dobo komponente obravnavati kot sistem, v katerem je treba posamezne segmente življenjskega cikla preveriti skupaj z vsemi delujočimi dejavniki kot medsebojno odvisne dele celote. Življenjski cikel komponente razlikuje naslednje faze [8]:

- razvoj (ideje, skice, konstrukcije, izbor materialov in postopka, izračun, izdelava prototipa),
- proizvodnja (priprava, litje, strojna obdelava, montaža),
- uporaba (delovanje, vzdrževanje, servisiranje),
- recikliranje (razstavljanje, zbiranje, razvrščanje, uporaba, odlaganje odpadkov).

are derived, namely one-dimensional (linear), two-dimensional (triangular and quadrangular), and three-dimensional (tetrahedral and prismatic) elements. Two-dimensional triangular and three-dimensional tetrahedral elements are most often used in geometries with curved surfaces [3].

Nowadays, self-sustainable foundries must adjust to the high demands of the global market and therefore seek a solution to meet them based on the concept Right for the first time [4]. In the last decades, the most important management tool introduced in foundries is Lean manufacturing [5,6]. The principles of such productions are to shorten the adoption time of the product, improve the quality, and be adaptable to the customer. One of the economical ways of producing cast components is the Near net shape process concept of casting to an almost finite shape / dimension [7]. For the customer, this means a reduction in secondary operations on components that have a narrower tolerance, and for the manufacturer, maximum profit.

Fulfillment of customer requirements can only be achieved with an Integral approach. This means that the total lifetime of a component should be considered as a system in which individual life cycle segments should be reviewed together with all influencing factors as interdependent parts in their entirety. The life cycle of a component distinguishes the following phases [8]:

- development (ideas, sketches, constructions, choice of materials and procedure, calculation, prototyping),
- production (preparation, casting, machining, installation),
- use (operation, maintenance, servicing),
- recycling (dismantling, collection, sorting, utilization, waste disposal).

Najpomembnejši segment je prva faza, torej razvoj komponente, saj določa življenjsko dobo ostalih segmentov in faz. *Sočasni inženiring* močno prispeva k skrajšanju razvojnega časa in izboljšanju kakovosti izdelkov [9, 10]. Ta način spodbuja proizvodnjo ustreznih ulitkov s pravilnim pristopom brez napak že v prvem poskusu (tako v prvem poskusu). S tem pristopom se večina ključnih odločitev sprejme pred izdelavo izdelka, ko je izvajanje sprememb najenostavnejše in najcenejše. Bistveni elementi sočasnega inženiringa so: tehnologije CAD / CAM / CAE, hitra izdelava prototipov, centralno upravljanje proizvodnih podatkov, večfunkcijske ekipe, analitične metode, ekspertni sistemi in zbirke znanja.

Optimizacija procesa litja je dosežena s tehnologijo CAE. Cilj takšne optimizacije je prihranek materiala, zmanjšanje mase, zvečanje dovoljene obremenitve, napetosti, togosti itd. K tej optimizaciji smo pristopili z izdelavo modela na podlagi uporabe različnih računalniško podprtih tehnologij. Za virtualno izdelavo 3D-ulitkov se uporablja tehnologija CAD, na podlagi katere se preverjajo zahtevane lastnosti izdelka: napetosti, deformacije, sposobnost litja itd. [11]. V zadnjih dvajsetih letih je bila uporaba simulacije polnjenja kalupov obvezen segment tehnologije CAE. Numerična simulacija z vključenim termotehničnim izračunom določa prenos toplote z ulitka v formo, grafični prikaz toplotnega polja in razvoja napetosti. Iz pridobljenih rezultatov je mogoče določiti strjevanje, stopnjo polnjenja forme, temperaturno in toplotno porazdelitev napetosti, mikrosegregacijo, vroče točke itd. [12]. Ko virtualno litje izpolnjuje vse predvidene zahteve, je mogoče pristopiti k hitri izdelavi prototipov v različnih razpoložljivih materialih, vključno z originalnim materialom ulitka in ustrezno tehnologijo ulitka [13]. Na izdelanem

The most important segment is the first phase, i.e. the development of the component because it determines the lifespan of other segments and phases. *Simultaneous engineering* contributes significantly to the reduction of development time and the improvement of product quality [9, 10]. This approach encourages the production of correct castings with a zero defect approach in the first attempt first and correctly (*Right for the first time*). With this approach, most key decisions are made before constructing a product, when changes are easiest and cheapest. Essential elements of simultaneous engineering are: CAD / CAM / CAE technologies, rapid prototyping, central production data management, cross-functional teams, analytical methods, expert systems, and knowledge bases.

Optimization of the casting process is achieved using CAE technology. The goal of such optimization is to save material, minimize mass, maximize the allowable load, stress, stiffness, etc. This optimization is approached by creating a model using various computer-aided technologies. CAD technology is used for the virtual production of 3D castings, based on which the required product requirements are examined: stresses, deformations, casting ability, etc. [11]. In the last twenty years, the use of mold filling simulation has been a mandatory segment of CAE technology. Numerical simulation with incorporated thermal- technical calculation determines the heat transfer from the casting to the mold, a graphical representation of the thermal field, and stress development. From the obtained results, it is possible to determine solidification, mold filling rate, temperature, and thermal stress distribution, microsegregation, hot spots, etc. [12]. When the virtual casting meets all the required requirements, rapid prototyping

prototipu je treba opraviti vse zahtevane preskuse, nato pa se začne proizvodnja komponente. V literaturi je na voljo mnogo primerov podobnega pristopa [14, 15].

Ta raziskava se je osredotočala na optimizacijo litja in strjevanja tankostenskih ulitkov EN-GJL-200 s pomočjo numerične simulacije, ki predstavlja pomemben del sočasnega inženiringa. Optimizacija numerične simulacije razkriva spremembe tehnoloških parametrov pri dotočnih sistemih, prezračevalnih sistemih in podpornih sistemih. Optimizacija omogoča tudi polnjeenje ulitkov z namenom preprečevanja izdatne toplotne preobremenitve in posledično obremenitve konkretnih delov ulitka.

2 Poskusni postopek

Livno železo EN-GJL-200 ima zaradi luskaste strukture grafita nizko natezno trdnost, trdoto, žilavost, raztezek in modul elastičnosti [16-19]. Ena glavnih pomanjkljivosti tega materiala je občutljivost na debelino stene (velikost preseka), kar lahko povzroči znatne razlike v mehanskih lastnostih znotraj ulitka. Ciljni ulitek s kompleksno geometrijo je prikazan na Sliki 1.

Običajni proizvodni proces želenega ulitka je bil izveden z linijo za formanje in litje DISAMATIC®. Kompleksna geometrija tankostenskega ulitka predstavlja izziv zaradi skorjastih delov in upogibanja ulitka pod obremenitvijo v trenutni tehnološki konfiguraciji.

Numerična simulacija je bila izvedena z uporabo programske opreme ProCAST na obstoječem materialu in tehnologiji ter z optimiziranimi parametri. Glede na ugotovljene napake se je optimizacija osredotočala na tehnološke parametre, kot so korekcija ulivnega sistema, odzračevalnega sistema in obstoječe

can be approached in various available materials including original casting material and corresponding casting technology [13]. All the required tests should be performed on the obtained prototype, after which the production of the component is started. A number of examples of similar approach is available in the literature [14, 15].

The focus of this investigation was the optimization of pouring and solidification process of thin-walled EN-GJL-200 casting using numerical simulation as an important part of simultaneous engineering. Numerical simulation optimization reveals changes in technological parameters of the gating system, venting system, and support. Optimization enables even filling with castings in order to prevent an extensive thermal overload and consequently stress of particular parts of castings.

2 Experimental

Grey iron quality EN-GJL-200 due to the flaky structure of graphite, possess low tensile strength, hardness, toughness, elongation, and modulus of elasticity [16-19]. 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 complex geometry casting is shown in Figure 1.

The usual production process of target casting was performed using the DISAMATIC® line for molding and casting. The complex geometry of thin-walled casting represents the challenge due to crusted parts of casting and stress bending of casting in the existing technological setup.

Numerical simulation was performed using ProCAST software in existing material and technology set up and with optimized



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

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

podpore. Izvedena sta bila numerična simulacija in tudi proces litja z originalnimi in optimiziranimi parametri z namenom primerjave vpliva spremenjenih parametrov na nastanek napak.

3 Rezultati in razprava

Postopek optimizacije se je začel z oceno celotne teže ulitka in načina polnjenja, kar je privedlo do težnje po zagotovitvi laminarnega in enakomernega pretoka po ulivnem sistemu ter odpravo odvečne teže odzračevalnih delov. Kompleksna geometrija preiskovanega ulitka predvideva uporabo podpore, da bi se izognili ukrivljenosti nepodprtih delov. Ta podpora omogoča tudi dodatno polnjenje, čeprav je odvisno od dotočne zmožnosti podpiranja livne votline. Izvirna (V1) in optimizirana različica (V2) spremenjene geometrije sta predstavljeni na Sliki 2.

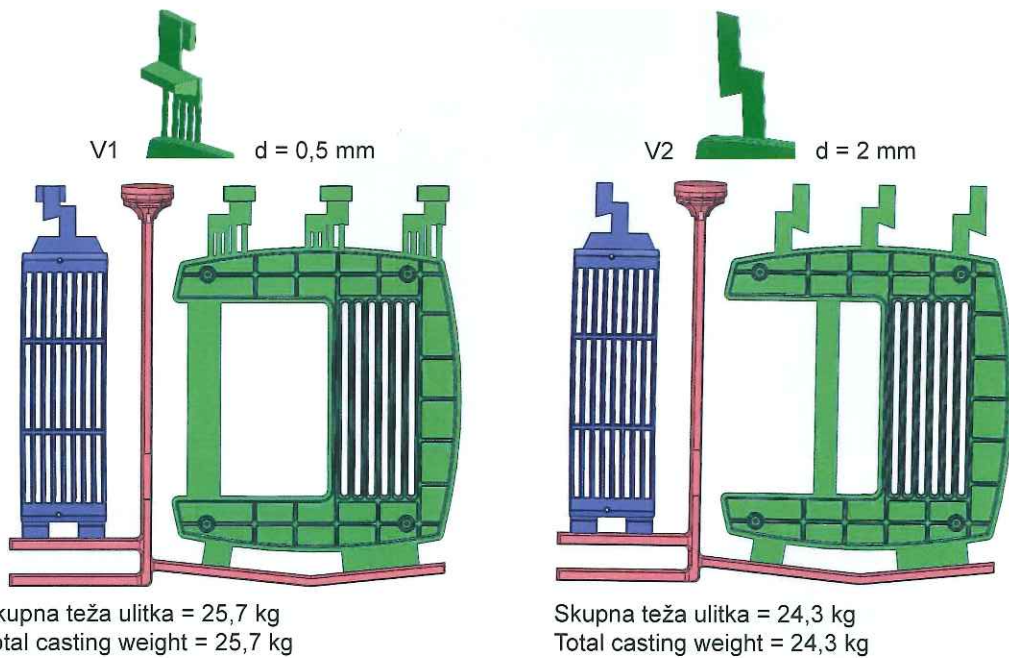
Pomikanje nosilca proti rebro ulitka zagotavlja njegovo aktivno vlogo pri enakomernem polnjenju livne votline, kot je prikazano na Sliki 3. Zmanjšanje velikosti zračnika in sprememba geometrije sta

parameters. According to identified defects, the focus of optimisation was placed on technological parameters such as correction of inflow system, venting system, and existing support. Numerical simulation and also casting process were performed with original and optimized parameters to compare the influence of changed parameters on defect occurrence.

3 Results and discussion

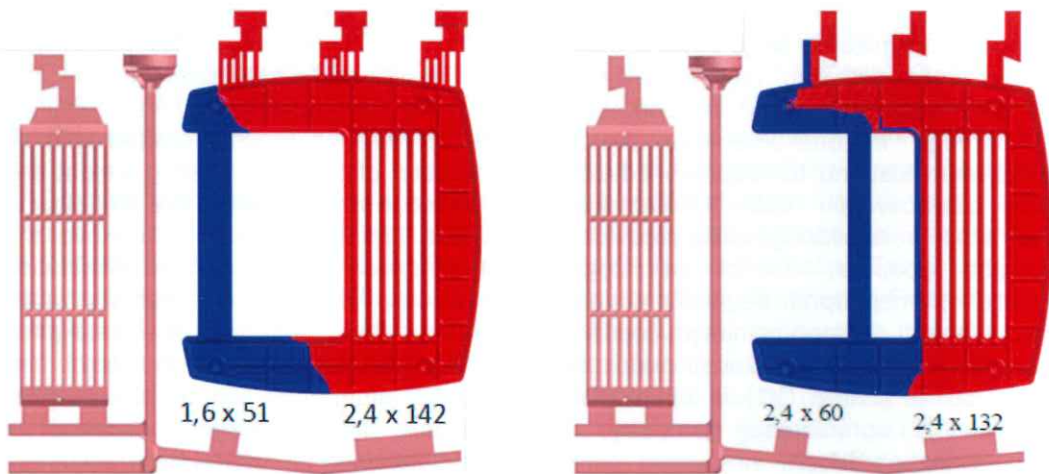
The optimization process started with an evaluation of complete casting weight and filling mode which resulted in a tendency to achieve laminar and uniform flow over the ingate system as well as the elimination of excess weight on the venting parts. The complex geometry of investigated casting requires support to avoid free parts curvature. This support also enables additional filling, although it depends on the ingate ability to support the mold cavity. Original (V1) and optimized version (V2) of changed geometry are presented in Figure 2.

Scrolling the support toward rib part casting enables its active role in the uniform filling of the casting cavity as shown in



Slika 2. Originalna (V1) in optimizirana različica (V2) spremenjene geometrije

Figure 2. Original (V1) and optimized version (V2) of changed geometry



V1 **24 % (2,5 kg) + 76 % (7,9 kg)**
Teža ulitka in odzračevanje = 10,4 kg
Casting and venting weight = 10,4 kg

V2 **35 % (3,2 kg) + 65 % (6 kg)**
Teža ulitka in odzračevanje = 9,2 kg
Casting and venting weight = 9,2 kg

Slika 3. Način polnjenja originalne (V1) in optimizirane (V2) različice

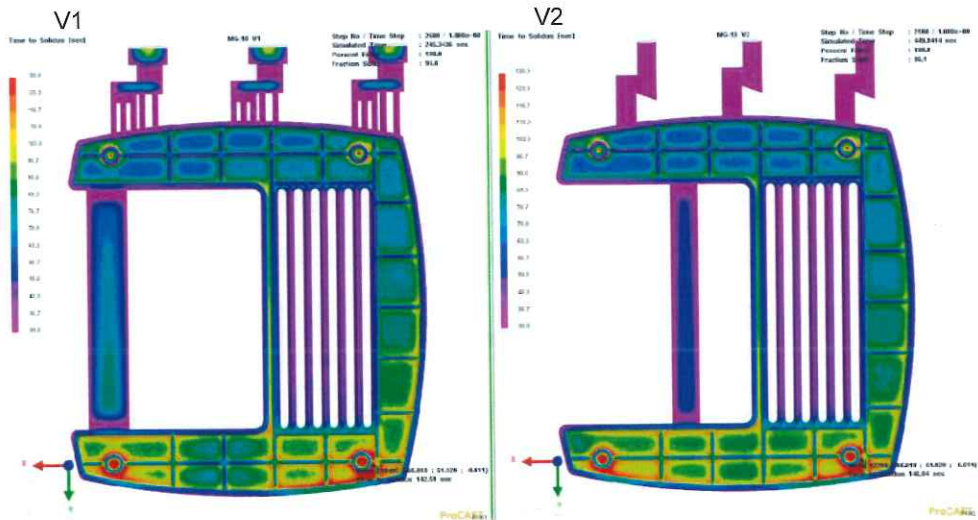
Figure 3. Filling mode for both original (V1) and optimized (V2) version

povzročila zmanjšanje skupne teže, kar je ostala prvotna vloga.

Glede na enake začetne parametre litja: temperatura litja $T_p = 1400\text{ }^\circ\text{C}$ in čas polnjenja $t = 5\text{ s}$ v mešanico svežega peska in bentonita, je numerična simulacija litja

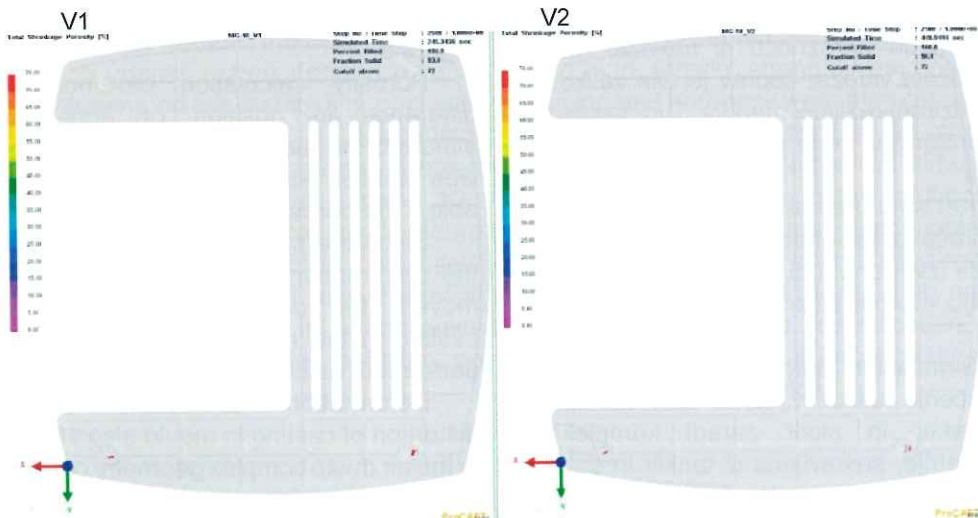
Figure 3. Reduction in the vent size and changing the geometry resulted in total weight reduction remaining in its original role.

According to the identical initial casting parameters: pouring temperature $T_p = 1400$



Slika 4. Čas do distribucije solidusa originalne (V1) in optimizirane (V2) različice

Figure 4. Time to solidus distribution for both original (V1) and optimized (V2) version



Slika 5. Izračun pojavnosti poroznosti originalne (V1) in optimizirane (V2) različice

Figure 5. Porosity occurrence calculation for both original (V1) and optimized (V2) version

in strjevanja pokazala različno toplotno porazdelitev pri litju, kar je vodilo v razlike v času do solidusa v pomembnih kritičnih vozliščih, kot je prikazano na Sliki 4.

Območje v spodnjem delu ulitka je na splošno povezano s krajšanjem časa strjevanja. Čas do solidusa je najdaljši, a še vedno precej enakomeren, tj. 80–110 s, saj je to območje v neposrednem stiku z dovodnim kanalom. Vendar pa je bilo zabeleženo skrajšanje časa strjevanja za 2 s v kritičnih debelostenskih odsekih. Rebra in podpora so povezana s časom 30–60 s do konca strjevanja. Zgornji del ulitka je prav tako povezan s krajšim časom strjevanja, kar razkriva širše površine, za katere je značilna časovna oznaka pribl. 60 s. Na splošno omogoča hitrejše strjevanje krajši čas segrevanja in prepreči nastanek skorje. Zmanjšanje velikosti in volumna odzračevalnih odprtin ter razširitev velikosti dotoka in pomikanje opore v smeri proti rebrom omogočajo znižanje volumna taline in s tem teže ulitka kot tudi hitrejše polnjenje in strjevanje.

Vroče točke so pokazale pojav poroznosti, kar je bilo potrjeno s simulacijo v grafični predstavitvi na Sliki 5.

Izračun poroznosti ni nakazal razlike v položaju videza, čeprav je bila velikost v optimizirani različici manjša. Tudi ta položaj je sprejemljiv, če je poroznost v notranjosti ulitka.

Ker smo premaknili oporo, potrebno za preprečevanje deformacije prosto litih delov, je bila izvedena tudi simulacija deformacije pri litju v formo ali zrak, kot je prikazano na Sliki 5.

Simulacija deformacije je pokazala popačenje ulitka v formi tudi naknadno v zraku, in sicer zaradi kompleksne geometrije, sestavljene iz tankih in debelih sten ter reber. Ker je ta ulitek del celotnega izdelka, popačenje ni sprejemljivo in ga je treba zmanjšati na najmanjšo raven. Čeprav se popačenju ni mogoče popolnoma izogniti,

°C and filling time $t=5$ s in green sand bentonite mixture, numerical simulation of pouring and solidification revealed different thermal distribution in casting and therefore resulted in a different time to solidus in critical nodes as presented in Figure 4.

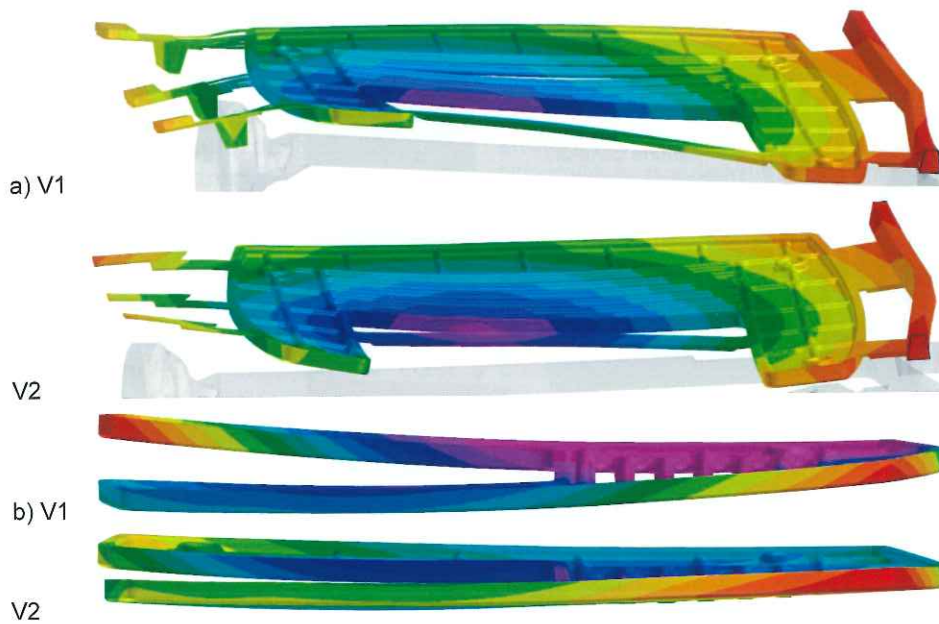
The area in the lower part of casting indicated shortening of solidification time in general. Time to solidus is the longest but still rather uniform 80-110 s since this area is in direct junction to inflow. Although, shortening of solidification time for 2 s has been noticed in critical thick-walled sections. Ribs and support indicated 30-60 s to solidification end. The upper part of casting also shows shortening of solidification time revealing wider areas dedicated to cca 60 s time mark. In general, faster solidification enables shorter time of heating avoiding crust appearance. Lowering the vents size and volume and widening the inflow size as well as scrolling the support toward ribs enable lowering the melt volume, and therefore casting weight and also faster filling and solidification

The hot spots indicated porosity occurrence which has been confirmed with simulation in graphical representation in Figure 5.

Porosity calculation did not show difference in position of appearance, although the size in the optimized version was smaller. Also, this position is acceptable if the porosity is inside the casting.

Since the support needed for avoiding the deformation of free casting parts was moved, the deformation simulation for casting in the mold and the air was also performed, as shown in Figure 5.

Deformation simulation indicated distortion of casting in mould also afterward in the air due to complex geometry consisting from thin and thick-walled sections and ribs. Since this casting is one part of the complete product distortion is not acceptable and should be lowered to minimum. Although,



Slika 6. Numerična simulacija deformacije v različnih časih; a) v formi (50 min po vlivanju), b) v zraku
Figure 6. Numerical simulation of deformation in different time marks; a) in mold (50 min after pouring), b) in the air

je njegov videz maksimalno zmanjšan, kot je prikazano na Sliki 6.

Poleg predstavljenih rezultatov so bili izračunani tudi feritna frakcija, izkoristek in natezna trdnost, razmik dendritnih vej in trdota. Nobena od teh lastnosti ni pokazala bistvenega odstopanja. Numerična simulacija omogoča uporaben pregled delovanja sistema talina/litje – forma. Ker so pridobljeni rezultati zagotovili dobro optimizacijo v zvezi z litjem in polnjenjem forme, vendar pa niso bili tako zanesljivi v povezavi s strjevanjem in pridobljenimi deformacijami, je nastala potreba po dodatni optimizaciji.

4 Zaključki

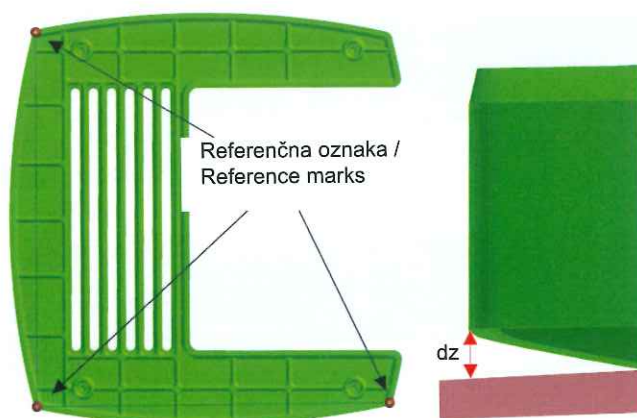
S to preiskavo smo potrdili pomen nove strategije in konceptov. Čas izračuna ter

the distortion is not completely avoided its appearance is minimized as shown in Figure 6.

Beside presented results ferrite fraction, yield and tensile strength, dendrite arm spacing and hardness were also calculated. Neither of those properties did show a significant deviation. Numerical simulation enables useful review in the melt/casting – mold system behaviour. Since obtained results achieved good optimisation relating to pouring and mold filling, but not so satisfying relating to solidification and obtained deformations, it imposed the need for additional optimization.

4 Conclusions

The importance of new strategies and concepts was confirmed through this



Slika 7. Numerična simulacija popačenja med litjem po referenčnih točkah

Figure 7. Numerical simulation of casting distortion in reference points



V1



V2

inženirsko znanje in uporaba numerične simulacije kot del tehnologij CAD/CAE lahko pojasnijo znižanje razmerja napak in naredijo izdelek bolj konkurenčen na svetovnem trgu. V tej raziskavi je bila numerična simulacija obstoječega tankostenskega ulitka EN-GJL-200 optimizirana s programsko opremo

investigation. Calculation time and engineer knowledge and effort using numerical simulation as a part of CAD/CAE technologies can comprehend the lowering of defects ratio and make the product more competitive on the global market. In this investigation numerical simulation of existing thin-walled EN-GJL-200 casting

ProCAST. Poudarek je bil na optimizaciji procesa litja in strjevanja z modeliranjem ulivnega sistema, zračnikov in podpore. Optimizacija nakazuje enakomerno polnjenje z boljšo porazdelitvijo dovodne aktivnosti in zmanjšano toplotno preobremenitev na posameznih položajih ulitka. Teža ulitka se je znatno zmanjšala in celoten čas strjevanja se je skrajšal. Kompleksna geometrija tankostenskega ulitka predstavlja izziv zaradi nagnjenosti k deformacijam. Optimizacija ni v celoti uresničila cilja preprečevanja deformacij, vendar razkriva pozitivne povratne informacije za pomembne položaje (referenčne oznake). Čeprav predstavlja optimizirano litje izboljšanje, zahteva ta geometrija ulitka večjo optimizacijo tehnološke nastavitve, da bi že v prvem poskusu dosegli pravo rešitev.

was optimized using ProCAST software. The focus was placed toward optimizing the pouring and solidification process through modelling the inflow system, vents, and support. Optimization indicates uniform filling with better distribution of inflow activity and reduced thermal overload in particular positions of the casting. Casting weight was significantly reduced and total solidification time was shortened. The complex geometry of thin-walled casting represents the challenge due to deformation tendency. Optimization did not completely reach the goal of deformation avoidance but it reveals positive feedback for significant positions (reference marks). Although, optimized casting revealed improvement, this casting geometry requires more optimization technological setup to achieve right for the first time.

Viri / References

- [1] J. Črnko, Modeliranje procesnih operacija u metalurgiji, Metalurški fakultet, Sisak 1990.
- [2] J. H. Lienhard IV, J. H. Lienhard V, A heat transfer textbook (3rd edition), Phlogiston Press, Chambridge, Massachusetts, 2003.
- [3] E. R. Champio, Finite element analysis in manufacturing engineering; McGraw-Hill Inc., New York, 1992.
- [4] E. Ambos, I. Behm, Ganzheitliche Entwicklung-Quelle fur innovative Produkte, Prozesse und Werkstoffe, Giesserei (1993)3, 35-39
- [5] I. Hrgović, Temeljne postavke lean proizvodnje, Ljevarstvo 45 (2003)3, 89-92
- [6] G. Engels, H. J. Heine, Shifting Goals for Foundries in German & Worldwide, Foundry Managment & Technology 1995,5, p.34
- [7] P. M. Bralower, Near Net Shape Processes Needed Now, Modern Casting, 1987, 3, 124
- [8] R. Sahm, N. Hansen, Towards Integrated Modelling for Intelligent Casting, Livarski Vestnik 48 (2001)2, 34-44
- [9] E. Ambos, I. Behm, M. Brahmman, T. Hornig, I. Hofmann, Gießerei und Modellbau im Blickfeld der Hoch Technologien, Giesserei 84 (1997)16, 15-18.
- [10] I. Hrgović, Uvod u simultano inženjerstvo, Livarstvo 45 (2003)1, 5-14
- [11] G. Hartmann, P. Bernbeck, V. Kokot, Gießereien als Entwicklungspartner der OEMs, Giesserei 90 (2003)6, 44-55
- [12] M. Scheider, S. Andersen, Use Simulation to Analyze Macrosegregation, Hot tears, Heat Tretmant in Steel Castings, Modern Casting 2000, 5, 39-43.
- [13] I. Pfeifer-Schaller, F. Klein, Zerstorungsfrei Bauteilprufng an Aluminium-und

- Magnesium Druckgussteilen mit Hilfe der Computertomografie, Giesserei-Rundschau 50 (2003)5/6, 109-116.
- [14] Z. Zovko Brodarac, M. Targuš, N. Dolić, M. Radoš, Optimization of grey cast iron casting technology by numerical simulation, 47th International October Conference on Mining and Metallurgy Proceedings, ed. A. Kostov, M. Ljubojev, Bor: Mining and Metallurgy Institute Bor, 2015, 355-358
- [15] Z. Zovko Brodarac, M. Targuš, A. Mahmutović, Optimizacija proizvodnje odljevaka primjenom simultanog inženjerstva, International Conference MATRIB 2015 Materials, Wear, Recycling; Proceedings, ed. D. Ćorić, I. Žmak, Zagreb: Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, 2015, 76-90
- [16] D. B. Craig, M. J. Hornung, T. K. McCluhan, Gray Iron, poglavlje u knjizi Metals Handbook, Volume 15, Casting, ed. ASM International Handbook Committee, ASM International, Metals Park, Ohio, 1988., 629-646.
- [17] 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.
- [18] HRN EN 1560:2012, Ljevarstvo -- Sustav označivanja željeznog lijeva -- Simboli materijala i odbročavanje materijala (EN 1560:2011), Državni zavod za normizaciju i mjeriteljstvo, Zagreb.
- [19] HRN EN 1561:2011, Ljevarstvo -- Sivi željezni lijevovi (EN 1561:2011), Državni zavod za normizaciju i mjeriteljstvo, Zagreb