

LIVARSKI VESTNIK

70/2023

1



DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE
SLOVENIAN FOUNDRYMEN SOCIETY



**Weiler. Foundry solutions
that can handle the heat.**

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

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 Krizman
E-mail: alozj.krizman@um.si

Tehnično urejanje / Technical editing:

mag. Mirjam Jan-Blažič

www.termit.si

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: marec 2023



WEILER ABRASIVES d.o.o.
Titova cesta 60
SI-2000 Maribor

Direktor: Jože Kaligaro

T: +386 2 333 16 00
E: Info.slovenia@weilerabrasives.com
www.weilerabrasives.com

VSEBINA / CONTENTS

Stran / Page:

R. Deike: Poseben pomen kovin v krožnem gospodarstvu / The Special Importance of Metals in a Circular Economy	2
D. Molnár: Povratni inženiring artefaktov / Reverse Engineering of Artefacts	16
S. Kastelic, M. Grah, J. Seljak, D. Kogoj, A. Mahmutović, P. Mrvar: Umerjanje numeričnega izračuna za optimizacijo procesa litja grelnih plošč / Numerical Calculation Calibration for Optimization of Foundry Technology of a Heat Plate	35

AKTUALNO / CURRENT

Pregled livarskih prireditev v letu 2023	34
Gospodarska napoved: Pričakuje se, da bo prodaja še naprej rasla	49
Seje organov Društva livarjev Slovenije	51
Seminar Združenja hrvaških livarjev v Varaždinu	54
Seminar o digitalizaciji procesov kakovosti v livarski industriji	56
63. IFC PORTOROŽ 2023	58

Poseben pomen kovin v krožnem gospodarstvu

The Special Importance of Metals in a Circular Economy

1 Uvod

Ko je bilo leta 2015 na Generalni skupščini ZN sprejetih 17 ciljev trajnostnega razvoja [1], so bili še vedno oblikovani kot vizija doseganja boljšega sveta z več blaginje in manjšo porabo virov, zdaj pa vstopamo v čas, ko se deli te vizije spreminjajo v zakone [2]. Akcijski načrt EU za krožno gospodarstvo [3] na primer postavlja pomen trajnosti in razvoja trajnostnih procesov v središče evropske politike. Kaj je trajnostno in kaj ne, je treba opisati, razvrstiti in posebej spodbujati, npr. tudi skozi upravljanje finančnih tokov. Čeprav sta poudarjanje trajnosti in spodbujanje ustreznih načinov pomembna za njeno doseganje, obstajajo določeni pomisleki, ali je to, kar je relativno enostavno opisati, pravno opredeliti in nato odločiti v upravah političnih institucij in podjetij v finančni industriji, vedno tehnično izvedljivo. Navsezadnje ima tudi krožno gospodarstvo znanstvene in tehnične omejitve, ki jih je treba sprejeti z vidika gospodarske učinkovitosti.

Vendar pa je treba trajnost obravnavati tudi v okviru strukturnih sprememb v nacionalnih gospodarstvih. Razvoj na področju kovin [4] kaže, da so v tradicionalnih industrijskih družbah v Evropi in na Japonskem potekle strukturne spremembe iz industrijskih v storitvene družbe, ki so v svetovni jeklarski in livarski industriji začasno več kot očitno privedle do tega, da se poraba jekla in litih izdelkov na prebivalca v obdobju med letoma 1970 in 1995 ni več povečala, v nekaterih primerih pa se je ob naraščanju svetovnega

1 Introduction

When the 17 Sustainable Development Goals [1] were adopted at the UN General Assembly in 2015 they were still formulated as a vision of how to achieve a better world with more prosperity and less resource consumption, we are now entering a time in which parts of this vision are beginning to become law [2]. For example, the EU's Circular Economy Action Plan [3] brings the importance of sustainability and the development of sustainable processes into the focus of European policy. What is sustainable and what is not is to be described, classified, and specifically promoted, e.g. also through the management of financial flows. As important as the emphasis on sustainability and the promotion of appropriate ways to achieve it are, there are certain concerns if what is relatively easily described, legally defined, and then decided upon in the administrations of political institutions and companies in the financial industry is always technically feasible. After all, even a circular economy has scientific and technical limits that have to be accepted in terms of economic efficiency.

However, sustainability must also be considered in the context of structural changes in national economies. Developments in the field of metals [4] show that in the traditional industrial societies in Europe and Japan, structural changes from industrial to service societies have taken place, which have temporarily led very clearly in the global steel and foundry

prebivalstva v absolutnem smislu celo zmanjšala [5]. Na izbranih področjih je torej že prišlo do dematerializacije svetovne gospodarske rasti. Z industrializacijo na Kitajskem se je ta razvoj končal, zlasti na začetku tega stoletja, in ponovno je prišlo do eksponentne rasti z izjemno porabo surovin in rastjo cen. Vendar se bo ta razvoj v naslednjih dveh desetletjih zelo verjetno končal, ko se bo tudi na Kitajskem zgodila strukturna sprememba iz industrijske v storitveno družbo [5].

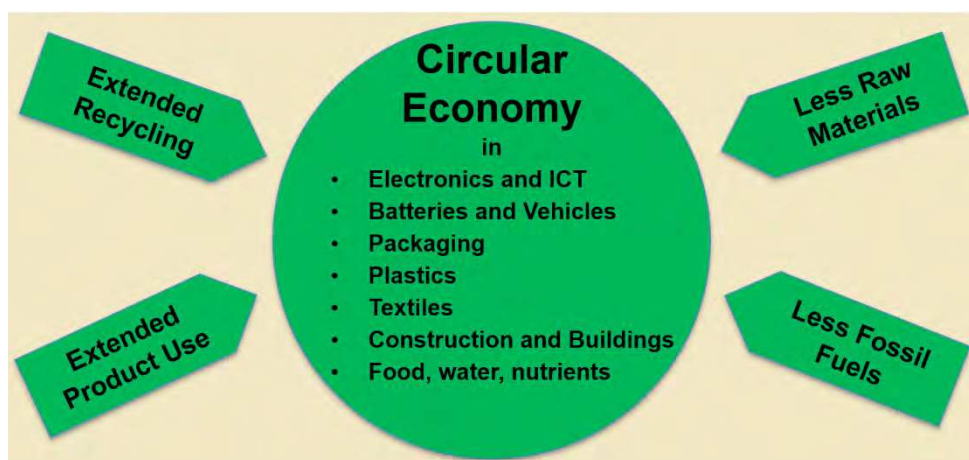
2 Katere so značilnosti krožnega gospodarstva?

V prvi vrsti je cilj ustvariti svetovno blaginjo z gospodarsko rastjo ob čim manjši porabi energetskih in neenergetskih surovin. Slika 1 prikazuje najpomembnejše vrednostne verige, opredeljene v akcijskem načrtu EU za krožno gospodarstvo [3]. V prihodnosti bo treba v teh vrednostnih verigah porabiti manj energije in surovin, kar je mogoče doseči z oblikovanjem trajnostnih izdelkov (Slika 2), ki jih je mogoče uporabljati dlje

industry to the fact that the per capita consumption of steel and cast products in the period between 1970 and 1995 has no longer increased and in some cases, even the absolute consumption has decreased [5] with a growing world population. Here, then, the dematerialization of global economic growth has already taken place in selected areas. With the industrialization in China, this development has ended, especially at the beginning of this century, and exponential growth with extreme raw material consumption and price increases has taken place again. However, this development will very likely end in the next two decades, namely when the structural change from an industrial to a service society will also take place in China [5].

2 What are the Characteristics of a Circular Economy?

Above all, the goal is to generate global prosperity through economic growth while consuming as few energetic and non-energetic raw materials as possible. Figure



Slika 1. Ključne vrednostne verige izdelkov po akcijskem načrtu EU za krožno gospodarstvo [6].

Figure 1. Key product value chains following the EU's Circular Economy Action Plan [6].

časa in jih je mogoče tudi popraviti, kot je bil običaj pred desetletji.

V naslednjih nekaj desetletjih je zato mogoče pričakovati, da bo obseg novih izdelkov rasel manj ali morda celo stagniral, namesto tega pa se bodo proizvajali izdelki z višjo vrednostjo.

Hkrati pa se bodo razvijala nova poslovna področja, na katerih se bodo izdelki z ustreznimi zagotovili za kakovost obnavljali in znova dajali na trg kot obnovljeni izdelki. Pregled na spletu pokaže, da je ta poslovni model že uveljavljen na področju mobilnih telefonov. Rabljeni avtomobili so že desetletja sestavni del avtomobilske industrije, trenutne razmere pa kažejo, da se zaradi dolgih čakalnih dob na nove avtomobile povečuje posel z rabljenimi avtomobili, ki jih je treba prav tako tudi ustrezno popraviti. Takšen razvoj bo povzročil delno nadomestitev izgubljenih delovnih mest na področju nove proizvodnje s podobnimi delovnimi mesti, vendar na področju vzdrževanja in popravil. S tega vidika bodo proizvajalci vse bolj zainteresirani za nadaljnji dostop do svojih visokokakovostnih izdelkov, zato se bodo

1 shows the most important value chains defined in the EU's Circular Economy Action Plan [3]. In the future, less energy and raw materials will have to be consumed in these value chains, which can be achieved by designing sustainable products (Fig. 2) that can be used for longer and can also be repaired, as it was the case decades ago.

In the next few decades, it can therefore be expected that the volume of new products will tend to grow less strongly or possibly even stagnate, but that higher-value products will be produced instead.

At the same time, however, new areas of business will be developed in which products with appropriate quality assurance guarantees will be reconditioned and put back on the market as refurbished products. A look at the internet shows that this business model is already established in the cell phone business. Used cars have been an integral part of the automotive business for decades and the current situation shows that with long waiting times for new cars, the business with used cars is growing, which then also have to be repaired accordingly. Increasing developments of



Slika 2. Temelji za uresničevanje krožnega gospodarstva [6].

Figure 2. Fundamentals to realize a Circular Economy [6].

v prihodnosti verjetno povečali tudi modeli najema in zakupa, kot je že mogoče zaznati v avtomobilski industriji. To bo veljalo tudi za strojne obrate, kjer bodo sodobne tehnike digitalizacije proizvajalcem omogočile spremljanje in stalno vzdrževanje obratov ter celo njihovo izboljšanje z novo razvitimi komponentami z obratovanjem brez prekinitev. To pomeni, da se bo dodana vrednost še naprej ustvarjala, vendar ob bistveno manjši porabi virov.

Pri tem pa je treba zelo jasno poudariti, da je treba v krožnem gospodarstvu nenehno razvijati nove inovativne izdelke z izboljšano funkcionalnostjo in boljšim razmerjem med ceno in zmogljivostjo, saj ti pomembno in odločilno prispevajo k izboljšanju trajnosti. V svetu kovin obstajajo odlični primeri. Sodobna jekla in liti izdelki so res dober primer, saj so zaradi boljših mehanskih lastnosti lažji kot v preteklosti, zato se v proizvodnji porabi manj surovin. Pomembno vprašanje je, ali se bo tak razvoj, ki je rezultat desetletij raziskav in razvoja, zgodil tudi v prihodnosti, če po taksonomiji EU tovrstnega dela ni mogoče neposredno uvrstiti med okoljske cilje iz 9. člena, ki so opredeljeni v Uredbi (EU) 2020/852 Evropskega parlamenta in Sveta iz junija 2020 [2]:

- a) blažitev podnebnih sprememb;
- b) prilagajanje podnebnim spremembam;
- c) trajnostna raba ter varstvo vodnih in morskih virov;
- d) prehod na krožno gospodarstvo;
- e) preprečevanje in nadzorovanje onesnaževanja;
- f) varstvo in ohranjanje biotske raznovrstnosti in ekosistemov.

Za prihodnost je ključnega pomena, da se trajnost in popravljivost ne spodbujata na račun inovacij in novih optimiziranih izdelkov z boljšimi lastnostmi.

this kind will lead to the partial replacement of lost jobs in the area of new production by similar jobs but in the area of maintenance and repair. From this point of view, producers will be increasingly interested in continuing to have access to their high-quality products, so rental and leasing models will presumably also increase in the future, as can already be observed in the automotive industry. This will also be the case for mechanical engineering plants, where modern digitalization techniques will enable the producer to monitor and continuously maintain the plants and even improve them through newly developed components in continuous operation. This means that value will continue to be added, albeit with significantly lower consumption of resources.

In this context, however, it must be very clearly pointed out that in a circular economy, new innovative products with improved functionalities and better price/performance ratios must continuously be developed, as they make an important decisive contribution to improving sustainability. Very good examples we are having in the world of metals. So are modern steels and cast products really good examples, because they are lighter than in the past, due to better mechanical properties and therefore consume fewer raw materials in production. The important question is, if such developments, which are the result of decades of research and development will happen in the future, if following the EU's taxonomy this kind of work cannot be classified directly into the environmental objectives of Article 9 which are defined in the Regulation (EU) 2020/852 of the European Parliament and the Council of June 2020 [2]:

- a) climate change mitigation;
- b) climate change adaptation;
- c) the sustainable use and protection of

3 Znanstveno-tehnične osnove postopkov recikliranja

V prihodnosti bodo izdelki verjetno dosegli konec življenjske dobe veliko pozneje, vendar bodo kljub temu dosegli konec svoje življenjske dobe v življenjskem ciklu izdelka, nato pa jih bo treba reciklirati, da se bodo lahko vrnil v cikel materialov. Vendar je to mogoče samo v podjetjih iz kovinske, jeklarske in livarske industrije [7,8], ki imajo na tem področju že zdaj pomemben položaj, saj imajo te industrije v nekaterih primerih že izrazito zaprte surovinske cikle. Livarska industrija že desetletja počne to, kar EU zahteva za prihodnost: v livarski industriji se iz nečesa starega, tj. iz odpadkov, proizvede nekaj novega z boljšimi lastnostmi (Slika 3). To je mogoče ponavljati skoraj v neskončnost, čeprav je treba pri tem upoštevati tudi izgube materiala zaradi žlindre in praha v filtrih, ki so sicer glede na celotno maso majhne, vendar obstajajo in jih je treba upoštevati, zato surovinski cikli

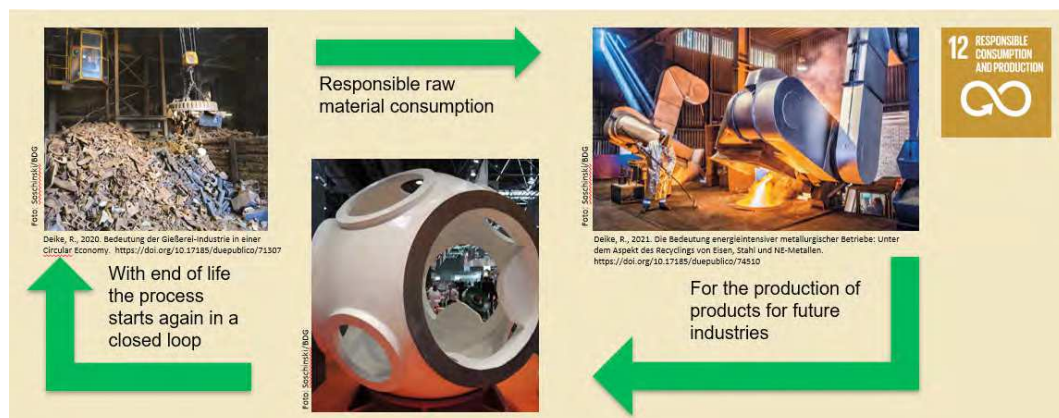
water and marine resources;

- d) the transition to a circular economy;
- e) pollution prevention and control;
- f) the protection and restoration of biodiversity and ecosystems.

It is crucial for the future that durability and reparability are not promoted at the expense of innovations and new optimized products with better properties.

3 Scientific-Technical Basics of Recycling Processes

Nevertheless, in the future, products will presumably reach the end of life (EoL) state much later, but they will reach the end of their life in the product life cycle and then they will have to be recycled so that they can be returned to the materials cycle. However, this can only be done with companies in the metal, steel, and foundry industries [7,8], which already have a prominent position from this point of view, as these industries already have very closed raw material



Slika 3. Železarska industrija že desetletja proizvaja v izrazito zaprtih surovinskih krogih, zato že danes počne to, kar EU želi za prihodnost [6].

Figure 3. The iron foundry industry is producing in highly closed raw materials loops for decades and therefore doing today what the EU wants for the future [6].

ne morejo biti nikoli popolnoma zaprti, tudi če si del družbe to želi in zahteva.

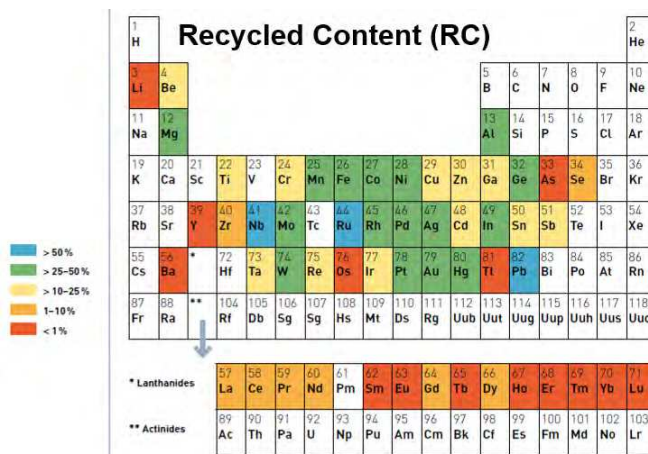
Če upoštevamo stopnje ponovne uporabe odpadnih kovin za proizvodnjo (vsebnost recikliranih kovin) novih kovin (Slika 4), vidimo, da so stopnje vsebnosti recikliranih kovin pri elementih, označenih z modro in zeleno barvo, ki vključujejo tudi železo in druge industrijske kovine, bistveno višje kot pri drugih elementih, kot so zlasti redke zemlje.

Zato je v političnih izjavah pogosto slišati, da se mora to v prihodnosti spremeniti in da je treba tudi tu doseči vrednote, kot so tiste za industrijske kovine. Ta zahteva, ki se zdi na prvi pogled zelo logična, pa se tu sreča z znanstveno in tehnično oviro – entropijo! Kaj to pomeni? Elementi z nizko vsebnostjo recikliranih materialov se pogosto uporabljajo v funkcionalnih materialih, ki se nato uporabljajo za proizvodnjo mobilnih telefonov, zaslonov, elektronskih komponent itd. Pri izdelavi takšnih izdelkov se elementi in spojine v fazi uporabe izdelka porazdelijo zelo razpršeno.

cycles in some cases. The foundry industry has been doing for decades what the EU demands the future, in the foundry industry something new with better properties is produced from something old, namely, scrap (Fig. 3) and this can be repeated almost infinitely, although it must also be taken into account here that there are material losses via slags and filter dust which, although small in relation to the total mass, nevertheless exist and must be mentioned, so that there can never be 100 % closed raw material cycles, even if parts of society wish and demand it.

If the rates of reuse of scrap for the production (recycled content) of new metals are considered (Fig. 4), it is noticeable that there are significantly higher rates of recycled content for the elements marked in blue and green, which include also iron together with other industrial metals, than for other elements, such as rare earth in particular.

Therefore, it is very often heard in political statements that this must change



Slika 4. Vsebnost različnih elementov v reciklaži [9].

Figure 4. The Recycled Content of different elements [9].

V enem samem mobilnem telefonu so te kovine prisotne le v majhnih koncentracijah, kar pomeni, da je entropija že tu razmeroma visoka. Če pa upoštevamo milijarde mobilnih telefonov, ki so razpršeni po vsem svetu, se entropija zaradi razpršene porazdelitve še mnogokrat poveča.

Kaj je entropija in zakaj je pogosto izjemna ovira za učinkovito recikliranje, kot npr. v primeru redkih zemelj? Na to vprašanje lahko morda celovito odgovorimo s pomočjo Slike 5. Na sliki je deset evrov v obliki bankovca in pa v obliki desetih posameznih kovancev. Vprašanje pa je, kakšna je med njimi sploh razlika?



Slika 5. Entropija je pogosto ena največjih ovir pri recikliranju.

Figure 5. Entropy is often one of the biggest barriers to recycling.

Če je plačilo izvedeno z desetimi kovanci, je treba izvesti več dela! Razumljivo je, da ta izjava naleti na nerazumevanje, saj je dodatno delo v tej porazdelitvi tako majhno, da sploh ne igra nobene vloge. Če bi deset kovancev z vso močjo vrgli skozi okno, še vedno obstajajo, vendar so izjemno razpršeni – entropija, ki je merilo za neurejenost, se je s tem izjemno povečala, tako da kovancev ne bi več začeli zbirati, saj bi bilo potrebno delo bistveno preveliko.

in the future and that values such as those for industrial metals must also be achieved here. This demand, which seems very logical in a first approach, meets here however with a scientific and technical barrier, the entropy! What is to be understood by this? Elements with low recycled content are often used in functional materials, which in turn are used for the production of cell phones, screens, electronic components, etc. By manufacturing such products, the elements and compounds are distributed highly dissipative during the product use phase. In a single cell phone, these metals are only contained in a small concentration, i.e., here the entropy is already relatively high and if we now consider the billions of cell phones that are distributed around the world, then this dissipative distribution increases the entropy again many times over.

What is it about entropy and why is it often an extreme obstacle to effective recycling, as is the case with rare earth? This question can perhaps be answered in a comprehensible way with the help of Figure 5. Here, ten euros can be seen in the form of a banknote and the form of ten individual coins, and the question is, what is the difference now?

If payment is made with the ten coins, more work must be expended! Understandably, this statement now meets with incomprehension because the additional work is so small in this present distribution that it doesn't play any role at all. If the ten coins are thrown now mentally with all strength out of the window, then they are still present, but in an extremely dissipative distribution, i.e., the entropy which is a measure for the disorder has increased thereby extremely, so that one would not begin to collect the coins again since the work expenditure would be much too large. In dissipative distribution, the

V primeru razpršenosti kovanci izgubijo svojo vrednost, čeprav so še vedno prisotni. V takšnih razmerah gospodarno recikliranje pogosto ni več mogoče; tehnično gledano sicer verjetno je, vendar ob veliko večjem vloženem delu in energiji, zaradi česar bi celotna zadeva postala neekonomična.

Pomen te težave je mogoče dobro ponazoriti z naslednjim primerom iz resničnega sveta recikliranja. Pri sežiganju komunalnih odpadkov v Evropi nastaja kot odpadni produkt pri sežiganju pepel, imenovan pepel iz sežigalnic. V Nemčiji se na leto sežge približno 20 milijonov ton odpadkov ter proizvede 6 milijonov ton pepela. Od tega približno 1,5 milijona ton predstavlja drobna frakcija z delci < 3 mm, ki po konservativnem mnenju [10] vsebuje 0,3–0,4 % Cu (približno 4.500–6.000 t/leto), ta količina kovin pa je enaka kot v bakrovi rudi, ki se danes koplje po svetu. S tega vidika bi lahko pepel iz sežigalnic ne glede na nihanje cen kovin predstavljal dragocen material. Poleg tega lahko na podlagi podatkov iz sežigalnice odpadkov v Švici [11] domnevamo, da je zlato, ki je večinoma povezano s frakcijo, bogato z bakrom, v drobni frakciji (približno 25 % celotne žindre MV) prisotno v količini 1–2 ppm. Tako vsebnost zlata v fini frakciji žindre MV ustreza tipični vsebnosti rude v geogenih rudnikih. Tako drobna frakcija pepela, ki se v Nemčiji pretežno reciklira za gradbene namene na odlagališčih, na letni ravni teoretično vsebuje, ob upoštevanju cen kovin, približno 72–144 milijonov EUR [10] bakra, srebra in zlata, ki jih v cikel materialov trenutno ni mogoče vrniti zaradi razpršene porazdelitve, tj. zaradi visoke entropije. Zato je pomembno razviti postopke za recikliranje teh dragocenih sestavin pepela.

S tega vidika ima sežigalnica odpadkov povsem drugačen pomen, in sicer, da s postopkom sežiganja v prvi fazi zgosti

coins lose their value even though they are still present. Under such conditions, an economic recycling is then very often no longer possible, technically probably yes, but even with a much higher work and energy expenditure, which makes then the whole thing uneconomical.

The importance of the problem can be explained very well with the following example from the real world of recycling. If municipal waste is incinerated in Europe, the waste incineration ash, called bottom ash is produced as a waste product from the incineration process. In Germany, approx. 20 million tons of waste are incinerated per year and 6 million tons of bottom ash are produced per year. Of this, approx. 1.5 million t is accounted for by the fine fraction < 3 mm, which, on a conservative view [10], contains 0.3–0.4 % Cu (approx. 4,500–6,000 t/a), as much as is contained in a copper ore mined in the world today. From this point of view, bottom ash can be considered a valuable material regardless of metal price fluctuations. Furthermore, based on data from a waste incineration plant in Switzerland [11], it can be assumed that gold, predominantly associated with the copper-rich fraction, is present in the order of 1–2 ppm in the fine fraction (about 25 % of the total MV slag). Thus, the gold contents in the fine fraction of the MV slag correspond to the typical ore contents of geogenic mines. Thus, in total, the fine fraction of bottom ash, which is predominantly recycled in Germany for construction measures on landfills, theoretically contains, depending on the metal prices, approx. 72–144 million € per year [10] of copper, silver, and gold, which currently cannot be returned to the material cycle due to the dissipative distribution, i.e. due to the high entropy. It is therefore important to develop processes to recycle

elemente, ki so v odpadkih izredno razpršeni. V drugi fazi, tj. pri predelavi pepela, se že danes pridobivajo dragoceni materiali, postopke pa bi lahko v prihodnosti še dodatno optimizirali s predelavo drobne žindre, kot je navedeno zgoraj [12]. Vendar je treba opozoriti, da tisto, kar je smiselno s tehničnega vidika in je tudi gospodarno, glede na trenutno stanje razprav o taksonomiji EU še ne velja za trajnostno in tako predstavlja tipičen primer, da je mogoče postopek popolnoma različno oceniti z vidika tehnologije ter z vidika evropske uprave. Zdaj je edino vprašanje, o katerem odloča družba, katera merila za ocenjevanje bodo v prihodnosti priznana kot pravilna.

4 Gospodarska predvidevanja na področju globalnega sveta kovin

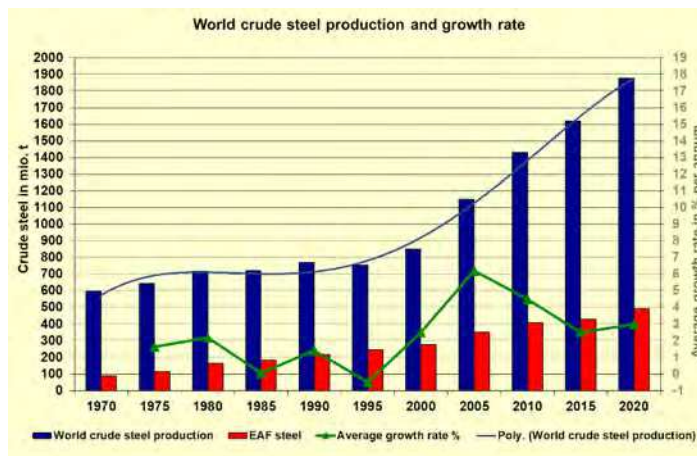
Analize gospodarskega razvoja tradicionalnih industrializiranih držav v Evropi in na Japonskem od začetka sedemdesetih let prejšnjega stoletja kažejo, da je strukturna sprememba iz industrijske v storitveno družbo v teh gospodarstvih povzročila nižje stopnje rasti porabe nekaterih surovin [4, 5] oz., v določenih okoliščinah, porabo nekaterih surovin v absolutno manjših količinah. Na primer, kot smo že omenili zgoraj, so bili učinki nasičenosti v svetovni proizvodnji jekla očitni od začetka sedemdesetih let prejšnjega stoletja, tako da v obdobju od leta 1970 do leta 1995 svetovna proizvodnja jekla skoraj ni rasla (Slika 6). V obdobju med 1990 in 1995 se je svetovna proizvodnja surovega jekla v absolutnem smislu celo zmanjšala, čeprav sta svetovno gospodarstvo in svetovno prebivalstvo v tem obdobju še naprej rasla, kar pomeni, da se je svetovna gospodarska rast na tem področju odvijala brez zvečane porabe jekla.

these valuable components of the bottom ash.

From this point of view, a waste incineration plant has a completely different meaning, namely that through the incineration process, in the first stage, the concentration of the elements distributed extremely dissipative in the waste takes place. In the second stage, in the processing of the bottom ash, the recovery of valuable materials then already takes place today, which can be further optimized in the future by the processing of the fine slag, as mentioned above [12]. However, it should be noted here that what makes sense from a technical point of view and is also economical, is not yet recognized as sustainable according to the current state of the discussion of the EU taxonomy and thus represents a typical example that a process can be evaluated completely differently from the point of view of technology and that of a European administration. Now the only question, taken into the decision by society is, which evaluation criteria will be recognized as correct in the future?

4 Economic Outlook into the Global Metal World

Analyses of the economic developments of the traditional industrialized nations in Europe and Japan since the beginning of the 1970s show that the structural change from an industrial to a service society in the economies concerned has resulted in growth rates for certain raw material consumptions [4,5] becoming lower or, under certain circumstances, in certain raw materials being consumed in lower quantities in absolute terms. For example, as mentioned above, saturation effects have been evident in global steel production since the early 1970s, with the effect that



Slika 6. Svetovna proizvodnja surovega jekla od 1970 do 2020 v petletnih povprečnih vrednostih [6].

Figure 6. Global crude steel production from 1970 to 2020 as five years average values [6].

Podobne logistične funkcije rasti, ki niso tako izrazite kot v primeru svetovne proizvodnje surovega jekla, je mogoče opaziti tudi pri svetovni proizvodnji bakra, niklja in cinka v rudnikih v obdobju od 1970 do približno 1995 [5]. Pri proizvodnji aluminija pa je tak učinek le malo izrazit.

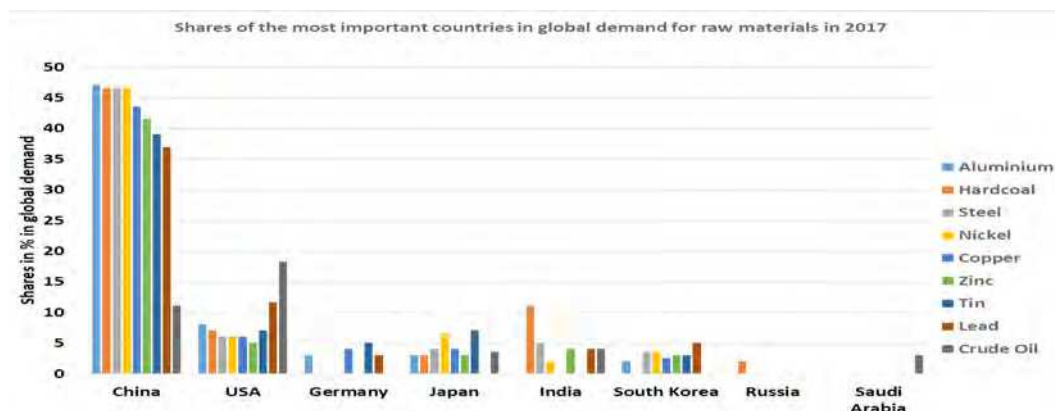
Po letu 1995 je mogoče znova opaziti znatno stopnjo rasti proizvodnje jekla in kovin ter s tem tudi porabe zadevnih surovin, ki jo je povzročil industrijski razvoj na Kitajskem. Zaradi tega razvoja je za trenutne razmere na področju svetovne porabe surovin značilno, da je Kitajska postala prevladujoča država. Na podlagi strukture, prikazane na Sliki 7, bo razvoj na svetovnih trgih surovin v prihodnosti kratkoročno do srednjeročno odvisen od načina gospodarskega razvoja na Kitajskem.

Na Kitajskem je terciarni sektor (Slika 8) leta 2012 prvič močneje prispeval k BDP kot sekundarni sektor. Na tej podlagi je mogoče domnevati, da se bo Kitajska v prihodnjih letih razvila v storitveno družbo [5].

there has been almost no growth in global steel production (Figure 6) in the period from 1970 to 1995. In the period from 1990 to 1995, global crude steel production even declined in absolute terms, although the global economy and the world population continued to grow during this period, i.e. global economic growth took place here without more steel being consumed.

Similar logistic growth functions, but not as pronounced as in the case of world crude steel production, can also be seen in global mine production of copper, nickel, and zinc in the period from 1970 to about 1995 [5]. In the case of aluminum production, however, such an effect is only rudimentarily pronounced.

After 1995, significant growth rates in the production of steel and metals and, accordingly, in the consumption of the corresponding raw materials, caused by the industrial development in China, can be seen again. As a result of this development, the current situation about global consumption of raw materials is characterized by the fact that China has become the dominant



Slika 7. Deleži najpomembnejših držav v svetovnem povpraševanju po surovinah v letu 2017 [5].

Figure 7. Shares of most important countries in global demand for raw materials in 2017 [5].



Slika 8. Struktura BDP na Kitajskem po sektorjih [6].

Figure 8. Structure of GDP in China divided by sectors [6].

Zaradi tega razvoja je mogoče pričakovati podobne učinke na porabo surovin kot v tradicionalnih industrijsko razvitih državah od začetka sedemdesetih let prejšnjega stoletja, kar pomeni, da je mogoče kratkoročno do srednjeročno pričakovati zmerno povečanje porabe

nation. Based on the structure shown in Figure 7, future developments in the global raw material markets will be determined in the short to medium term by how economic development takes place in China.

In China, the tertiary sector (Fig. 8) contributed more to GDP than the

surovin v svetu, ki bo na koncu dolgoročno odvisno od gospodarskega razvoja v Indiji in Afriki. Zaradi povsem različnih političnih struktur v teh državah še vedno ni mogoče sklepati, kako hitro se bodo ta gospodarstva razvijala.

5 Zaključek

Ko je bilo leta 2015 na Generalni skupščini ZN sprejetih 17 ciljev trajnostnega razvoja, so bili še vedno oblikovani kot vizija doseganja boljšega sveta z več blaginje in manjšo porabo virov, zdaj pa vstopamo v čas, ko se deli te vizije spreminjajo v zakone. Ker sta poudarjanje trajnosti in spodbujanje ustreznih načinov za njeno doseganje pomembna, obstajajo določeni pomisleki, ali je to, kar je relativno enostavno opisati, pravno opredeliti in nato odločiti v upravah političnih institucij in podjetij v finančni industriji, vedno tehnično izvedljivo. Navsezadnje ima tudi krožno gospodarstvo znanstvene in tehnične omejitve, ki jih je treba sprejeti z vidika gospodarske učinkovitosti. Razvoj na področju kovin kaže, da so se v tradicionalnih industrijskih družbah v Evropi in na Japonskem zgodile strukturne spremembe iz industrijskih v storitvene družbe, pri čemer je razvidno, da je na izbranih področjih v preteklosti prišlo do dematerializacije globalne gospodarske rasti.

V prvi vrsti je cilj trajnostne prihodnosti ustvariti svetovno blaginjo z gospodarsko rastjo ob čim manjši porabi energetske in neenergetske surovine. Razvijala se bodo nova poslovna področja, na katerih se bodo izdelki z ustreznimi zagotovili za kakovost obnavljali in znova dajali na trg kot obnovljeni izdelki. Razvoj na svetovnih trgih surovine v prihodnosti bo kratkoročno do srednjeročno odvisen od načina gospodarskega razvoja na Kitajskem.

secondary sector for the first time in 2012. It can therefore be assumed that China will develop into a service society [5] in the coming years.

As a result of this development, effects can be expected in terms of raw material consumption similar to those that have taken place in the traditional industrialized nations since the beginning of the 1970s, which would mean that moderate increases in raw material consumption in the world can be expected in the short to medium term, which will then be determined in the longer term by the economic developments in India and Africa. Due to the completely different political structures in these countries, it remains to be seen at what speeds these economies will develop.

5 Conclusion

When the 17 Sustainable Development Goals were adopted at the UN General Assembly in 2015 they were still formulated as a vision of how to achieve a better world with more prosperity and less resource consumption, we are now entering a time in which parts of this vision are beginning to become law. As important as the emphasis on sustainability and the promotion of appropriate ways to achieve it are, there are certain concerns if what is relatively easily described, legally defined, and then decided upon in the administrations of political institutions and companies in the financial industry is always technically feasible. After all, even a circular economy has scientific and technical limits that have to be accepted in terms of economic efficiency. Developments in the field of metals show that in the traditional industrial societies in Europe and Japan, structural changes from industrial to service societies have taken place and it can be seen that

Predvidevamo lahko, da se bo Kitajska v prihodnjih letih razvila v storitveno družbo. Zaradi tega razvoja je mogoče pričakovati podobne učinke na porabo surovin kot v tradicionalnih industrijskih državah od začetka sedemdesetih let prejšnjega stoletja, kar bi pomenilo, da je mogoče kratkoročno do srednjeročno pričakovati zmerno povečanje porabe surovin v svetu.

dematerialization of global economic growth has happened in selected areas in the past.

Above all, the goal for a sustainable future is to generate global prosperity through economic growth while consuming as few energetic and non-energetic raw materials as possible. New areas of business will be developed in which products with appropriate quality assurance guarantees will be reconditioned and put back on the market as refurbished products. Future developments in the global raw material markets will be determined in the short to medium term by how economic development takes place in China. It can be assumed that China will develop into a service society in the coming years. As a result of this development, effects can be expected in terms of raw material consumption similar to those that have taken place in the traditional industrialized nations since the beginning of the 1970s, which would mean moderate increases in raw material consumption in the world can be expected in the short to medium term.

6 Viri / References

- [1] <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/nachhaltigkeitspolitik/die-deutsche-nachhaltigkeitsstrategie-318846>
- [2] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/de/TXT/?uri=CELEX%3A32020R0852>
- [3] https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en
- [4] Deike, R.: *Befinden sich die Rohstoffmärkte in einem erneuten Wandel?*, Chemie-Ingenieur Technik 92, Nr.4, S.331-340, 2020. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cite.201900136>
- [5] Deike, R.: *What is happening on the commodity markets – and what the future holds?*, CASTING PLANT & TECHNOLOGY 3/2021, p.32-43 16. https://duepublico2.uni-due.de/receive/uepublico_mods_00074989
- [6] Deike, R.; Winstermann, P.: *The special importance of metals in an circular economy*, 62nd IFC Portoroz 2022, 15.09.2022. <https://www.uni-due.de/mus/>
- [7] Deike, R.: *Bedeutung der Gießerei-Industrie in einer Circular Economy*, GIESSEREI 107, Nr.1, S.26-31, 2020. <https://doi.org/10.17185/uepublico/71307>

- [8] Deike, R.: Die Bedeutung energieintensiver metallurgischer Betriebe: Unter dem Aspekt des Recyclings von Eisen, Stahl und NE-Metallen. GIESSEREI 104, Nr.6, S.64-73, 2017. <https://doi.org/10.17185/dupublico/74510>
- [9] UNEP International Resource Panel: *Recycling rates of metals*, 2011, <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/8702>
- [10] DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.; *Abfallverbrennung in der Zukunft*, Frankfurt, 2022. <https://dechema.de/abfallverbrennung2022.html>
- [11] Böni, D. und Morf, L.S.: *Thermo-Recycling, Efficient Recovery of Valuable Materials from Dry Bottom Ash*, in: Holm, O. und Thome-Kozmiensky, E. (Hrg.), Removal, Treatment and Utilisation of Waste Incineration Bottom Ash, S. 25-37, TK Verlag: Neuruppin, 2018.
- [12] BMBF-FONA-Forschung für Nachhaltigkeit: *EMSARZEM - Einsatz von MV-Schlacke als Rohstoff für die Zementherstellung*. <https://www.remin-kreislaufwirtschaft.de/projekte/emsarzem>

Povratni inženiring artefaktov

Reverse Engineering of Artefacts

Povzetek

V tem prispevku smo z računalniško simulacijo in nedestruktivnimi metodami določanja lastnosti materialov proučili tehnologijo litja in napake pri litju artefakta – sekire z očesom.

V Karpatski kotlini so se bronaste sekire začele širiti v zgodnji bronasti dobi. Bronaste sekire so najštevilčnejše v lokalnih najdbah iz pozne bronaste dobe (1500–900 pr. n. št.). Obstaja več vrst geometrij sekir, najpogostejše pa so tako imenovane sekire z očesom, ki jih najdemo v obrednih zakladih, naključnih najdbah in včasih kot grobne pridatke.

Proučevani artefakt sekire z očesom (Madžarski narodni muzej, prazgodovinska zbirka) je bil fizično analiziran. Kemična sestava je bila analizirana skozi analizo promptne aktivacije žarkov gama, tj. jedrsko analitično tehniko za nedestruktivno določanje elementarne in izotopske sestave. Zunanjo obliko in notranjo strukturo artefakta sekire z očesom smo proučili z nevtronsko radiografijo.

Na podlagi artefakta smo izdelali eksperimentalno repliko ulitka in virtualno geometrijo za podrobne raziskave. Razlog za izdelavo virtualne geometrije je, da so možnosti pregleda originalnega artefakta omejene in je mogoče uporabiti zgolj nedestruktivne metode. Eksperimentalna replika ulitka ni tako zelo omejena z vidika metod preiskav, vendar so lahko rezultati zaradi napak pri litju manj reprezentativni. Po drugi strani pa lahko virtualno geometrijo prosto proučujemo, virtualno lahko izvedemo več litij, možnosti različnih metod preskušanja pa so neomejene.

Z računalniško simulacijo smo preizkusili več primerov polnjenja in strjevanja ter preverili vpliv materiala forme in temperature taline na porazdelitev poroznosti. Analizirali smo pojave litja, povezane z geometrijo (modul), polnjenjem (zasnova ulivnega sistema, tok taline, gibanje taline v votlini, turbulenca, vnašanje zraka in položaj zračnih mehurčkov) in strjevanjem (mehanizem napajanja, nastanek krčilne poroznosti in čas strjevanja).

Rezultate simulacije smo potrdili s slikami nevtronske radiografije in analizo mikrostrukture z analizo mikroskopa s svetlim poljem in analizo diferencialnega interferenčnega kontrasta.

Ključne besede: Litje, bronasta doba, sekira z očesom, računalniška simulacija, povratni inženiring artefakta, povratni inženiring, tehnologija gravitacijskega litja, simulacija

Abstract

In this paper, the casting technology and casting defects of a socketed axe artifact were examined using computer simulation and non-destructive materials characterization methods.

The spread of cast bronze axes in the Carpathian Basin started in the Early Bronze Age. Bronze axes can be found in the highest number and selection in the local findings from the Late Bronze Age (1500-900 B.C.). There are several types of developed axe geometries, while the most common types are the so-called socketed axes, which can be found in ritual bronze treasures, scattered findings, and sometimes as grave annexes.

The examined socketed axe artifact (Hungarian National Museum, Prehistoric Collection) was physically analysed. The chemical composition was analysed by prompt-gamma activation analysis, which is a nuclear analytical technique for the non-destructive determination of elemental and isotopic compositions. The outer shape and the inner structure of the socketed axe artifact were examined by neutron radiography.

Based on the artifact an experimental casting replica and a virtual geometry were created for detailed investigations. The reason for the construction of the virtual geometry is that the examination possibilities of the original artifact are limited, only non-destructive methods can be applied. The experimental casting replica is less limited to examination methods, but because of the casting defects, the results can be less representative. On the other hand, virtual geometry is free to examine, several times can be cast virtually, and the possibilities of different testing methods are unlimited.

By the application of computer simulation, several filling and solidification cases were tested, and the effect of the mould material and melt temperature on the porosity distribution was examined. Casting phenomenon connected to the geometry (modulus), to the filling (gating system design, melt flow, movement of the melt inside the cavity, turbulence, air entrainment, and the position of air bubbles), and to the solidification (feeding mechanism, shrinkage formation and solidification time) were analysed.

The simulation results were validated by neutron radiography images and microstructure analysis using bright-field microscope analysis and differential interference contrast analysis.

Keywords: Casting, Bronze Age, socketed axe, computer simulation, reverse engineering artifact, reverse engineering, gravity casting technology, simulation

1 Zgodovina sekire

Sekira je eno prvih orodij, ki jih je uporabil človek, najstarejše sekire pa so bile znane kot ročne sekire. Ročna sekira je bila hruškasto oblikovano in grobo klesano kamnito orodje s širokim ročajem. Kasneje je sekira dobila lesen ročaj, razvitih je bilo več različnih vrst sekir, ki jih lahko razdelimo v dve glavni skupini: sekire brez očesa ter sekire z očesom. Sekire brez očesa niso imele luknje za ročaj in so bile običajno izdelane iz kremena, žada ali skrilavca ter so se sčasoma razvijale, kot so grobo obdelana sekira, sekira na kamnitih odbitkih, sekira s tankim rezilom, okrogla kamnita sekira in sekira s konkavnim rezilom. Za izdelavo sekir z očesom so uporabljali različne kamnine, vendar ne kremena, verjetno pa so se uporabljale

1 The History of Axes

The axe is one of the oldest tools used by mankind and the oldest axes were known as hand axes. The hand axe was a pear-shaped and roughly chipped stone tool brought to an even point, with a broad handle. Later, the axe was given a wooden handle, and several different types of axes were developed, which may be divided into two main groups: non-shaft-hole axes and shaft-hole axes. The non-shaft-hole axes had no hole for the handle and were generally made from flint, greenstone, or slate in time had an evolution such as core axe, flake axe, thin-butted axe, round stone axe, and hollow-edged axe. The shaft-hole axes were made using various stones, although not flint, and were more likely to be status weapons or ceremonial objects.

ceremonialno in za prikazovanje statusa. Primeri so poligonalna sekira, dvoglava bojna sekira in sekira s čolnasto glavo [1, 2].

1.1 Sekira z očesom

V bronasti dobi so kamnite sekire postopoma zamenjale sekire z glavo iz bakra ali brona, ki so bile sprva pogosto v celoti kopije kamnitih sekir. Ena od vrst bronastodobnih sekir je sekira z očesom, ki ima klinasto obliko glave brez luknje za ročaj. Ročaj je v oko tako pritrjen na končnem delu. Ker je sekira votla in je ročaj vstavljen v glavo, je mogoče z minimalno količino materiala izdelati popolnoma funkcionalno in delujočo sekiro.

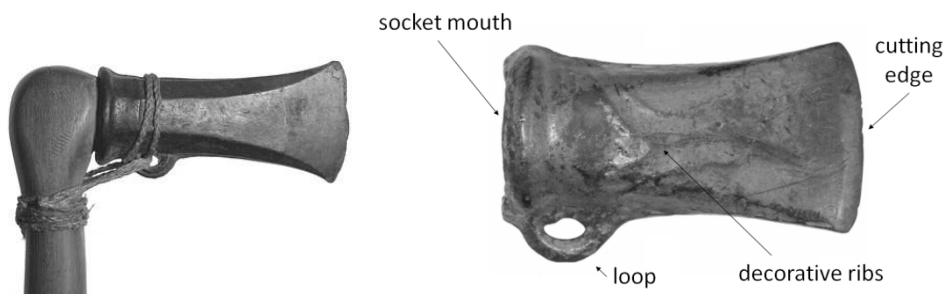
Sekire z očesom so bile v bronasti dobi zelo razširjene in večnamensko orodje. Njihov videz se na nekaterih delih celine sicer razlikuje, vendar pa so glavne tehnike litja med seboj izredno podobne. V arheološkem gradivu so sekire z očesom tiste, pri katerih so jasne najznačilnejše napake pri litju. Nekatere med njimi imajo močno porozno notranjo strukturo, premaknjene dele, nepopolne zanke ali amorfne vzorce. Na Sliki 1 so prikazani

Types are the polygonal axe, double-headed battle-axe, and the boat axe [1, 2].

1.1 The Socketed Axe

During the Bronze Age, stone axes began giving way to axes with a head made of mould cast copper or bronze, which initially were often pure copies of stone axes. One type of Bronze Age axe is the socketed axe a wedge-shaped axe head with no shaft hole. The handle is instead fixed into a socket at the end part. Since the axe is made hollow and the handle is inserted into the head, a perfectly functional working axe can be made with minimal materials.

Socketed axes are widespread multi-functional tools of the Bronze Age world. Their stylistic appearance might differ from each other in certain areas of the continent but their main casting techniques show great similarities. In the archaeological material, the socketed axes are the ones that show the most characteristic casting defect types. Some of them have intensively porous inner structures, shifted parts, incomplete loops, or amorphous patterns. Typical socketed axe geometry with handle reproduction and



Slika 1. Levo: Sekira z očesom iz bakrove zlitine s sodobnim ročajem (1000–700 pr. n. št.). Desno: Elementi sekire z očesom.

Figure 1. Left: Copper alloy socketed axe with modern handle (1000-700 BC). Right: Elements of the socketed axe.

tipična geometrija sekire z očesom in reprodukcijo ročaja kot tudi elementi sekire z očesom. [3].

2 Simulacijski postopek

Sekira z očesom je kovinski predmet, lit z gravitacijskim litjem. V tej raziskavi smo za tehnološko rekonstrukcijo postopka litja uporabili računalniško podprte metode simulacije. Za gravitacijsko litje lahko uporabimo številne metode modeliranja in simulacije, vključno s fizikalnim modeliranjem in numeričnimi metodami. Večina dosedanjega modeliranja in simulacij se izvaja z numeričnimi metodami, ki jih je mogoče uporabiti za reševanje ustreznih parcialnih diferencialnih enačb za toploto in pretok tekočin na podlagi numeričnih algoritmov. Naslednje zahteve veljajo za bistvene dele simulacije litja:

- pravilen geometrijski opis domene,
- natančni termodinamični podatki o fazi,
- natančni mejni pogoji,
- ustrezne lastnosti materiala,
- niz rešljivih enačb, ki opisujejo fizikalne pojave,
- eksperimentalno in numerično preverjanje.

Na splošno modeli rešujejo enačbe za temperature in pretok tekočine. Za pravilen opis zapletenih pojavov je potreben kakovosten vpogled v fiziko konstitutivnega vedenja tekočin, poltrdnih in trdnih snovi pri visokih temperaturah, da se lahko odločimo, katere parcialne diferencialne enačbe so najprimernejše za opis preiskovanih fizikalnih pojavov. Parametri teh modelov morajo biti realni in fizični. To pomeni močno interakcijo med nadzorovanimi poskusi strjevanja ali meritvami napetosti pri visokotemperaturnem plastičnem vedenju in oblikovanjem fizike procesa. Natančni podatki o mejnih pogojih in lastnostih

the elements of a socketed axe can be seen in Figure 1. [3].

2 The Simulation Procedure

A socketed axe is a metal object, where the production method was gravity casting. In this research computer-based simulation methods are used for the technical reconstruction of the casting process. Many modeling and simulation methods can be employed for gravity casting, including physical modeling and numerical methods. Most of the current modeling and simulation work is done using numerical methods that can be used to solve the appropriate partial differential equations for heat and fluid flow, using numerical algorithms. The following requirements are considered essential parts of a casting simulation:

- correct geometric description of the domain,
- accurate thermodynamic phase data,
- accurate boundary conditions,
- proper material properties,
- a set of solvable equations describing the physical phenomena,
- experimental and numerical validation.

Generally, models solve equations for the temperatures and the fluid flow. To describe the complex phenomena correctly, good insight into the physics of liquid, semi-solid, and solid constitutive behavior at high temperatures is required to decide which partial differential equations are best suited to describing the physical phenomena of interest. The parameters of these models should be realistic and physical. This implies a very close interaction between controlled experiments of solidification or stress measurements of the high-temperature plasticity behavior and process physics formulation. Accurate boundary conditions

so ključnega pomena za zagotovitev reprezentativnih rezultatov modela.

Določiti je treba fizikalne pojave za tehnološkim problemom in pripraviti matematični model. Ta matematični model je treba rešiti z analitično ali numerično metodo, za tehnološko rešitev pa je treba izvesti fizikalno interpretacijo te matematične rešitve. Zlasti pri proizvodnih procesih, kot je litje, lahko napačna razlaga sicer pravih matematičnih rezultatov privede do napačnih sklepov, na podlagi katerih ni mogoče razrešiti izvirnega problema [4,5].

V tem raziskovalnem članku smo za reševanje procesov prenosa materiala in toplote uporabili komercialno dostopno programsko opremo NovaFlow & Solid. Metoda poskusov s simulacijo je razvidna iz Slike 2.

Med predobdelavo je prvi korak opredelitev geometrije sistema ulitka v diskretno število segmentiranih prostorninskih elementov za nadaljnje izračune.

Preden lahko rešimo enačbe, ki urejajo procese polnjenja in strjevanja, moramo imeti na voljo potrebne termofizikalne podatke o materialu. Poleg samih podatkov

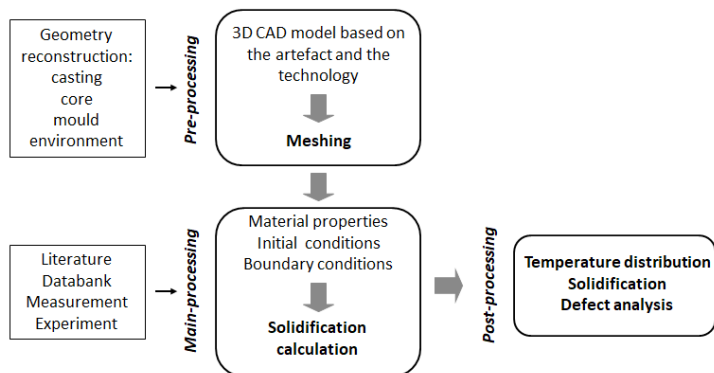
and property data are essential if model results are to be representative.

The physical phenomena behind a technological problem should be identified and a mathematical model must be written. This mathematical model must be solved using an analytical or a numerical solution and the physical interpretation of this mathematical solution should be done for the technological solution. Especially in manufacturing processes such as casting, the misinterpretation of otherwise correct mathematical results could lead to wrong conclusions, and hence to no solution to the originating problem [4,5].

In this research paper, the commercial software NovaFlow & Solid is used to solve the material- and heat transport processes. The method of simulation experiments can be seen in Figure 2.

During pre-processing the first step is to define the geometry of the casting system into a discrete number of segmented volume elements for the subsequent calculations.

Before the equations that govern the filling and solidification processes can be solved, the necessary thermophysical material data must be available. Apart from the material data themselves, other relevant



Slika 2. Koncept poskusov s simulacijo.

Figure 2. Concept of the simulation experiments.

o materialu je treba opredeliti tudi druge pomembne parametre postopka. Določiti je treba začetne pogoje za neznane količine in mejne pogoje za neznanke. Vnesti je treba tudi druge pomembne informacije, da bi lahko upoštevali vse dejavnike, ki vplivajo na polnjenje in strjevanje ulitka.

Sledi glavna obdelava, ki je najzahtevnejši del numerične simulacije tako z vidika razvoja algoritmov kot v smislu zahtev za računalniško zmogljivost za reševanje vodilnih enačb. Tukaj je najbolj običajen pristop reševanje vseh osnovnih enačb, kar je predpogoj za simulacijo vseh ustreznih tehničnih problemov litja. Jasno je, da je za te izračune, v katerih se določajo primitivna polja, kot so temperature, odkloni, napetosti, hitrosti, tlak itd., potrebna rešitev diferencialnih enačb.

Naknadna obdelava obsega predstavitev rezultatov. Po opravljenih izračunih je treba ustrezno predstaviti osnovna polja (temperature, hitrosti, tlake, odklone, napetosti itd.).

3 Preiskovani artefakt

Proučevani artefakt je geometrija sekire z očesom iz Isaszega na Madžarskem (registracijska št.: Ha B1-B2/3). Kemična sestava sekire je 83 wt. % bakra (Cu), 11 wt. % kositra (Sn) in 6 wt. % antimona (Sb). Kemično sestavo smo analizirali z analizo promptne aktivacije gama žarkov, tj. jedrsko analitično tehniko za nedestruktivno določanje elementarne in izotopske sestave.

Z analizo promptne aktivacije gama žarkov je mogoče nedestruktivno analizirati kemično sestavo voluminoznih vzorcev. Predmet se obseva z nevtronskim snopom, žarke gama, ki nastanejo pri sevalnem zajetju nevtronov, pa hkrati zaznavamo z detektorjem iz germanija visoke čistosti.

process parameters have to be defined. Initial conditions for the unknown quantities and boundary conditions for the unknowns must be defined. Other relevant information also needs to be input, so that all the factors that affect the filling, and solidification of the casting can be accounted for.

Main processing is the most demanding part of the numerical simulation follows in respect of both the algorithmic development and the requirements for computer capacity, and the solution of the governing equations. The most usual approach here is to solve all the basic equations, this being a prerequisite for simulating all relevant casting problems of a technical nature. It is clear that these calculations, in which primitive fields such as temperatures, displacements, stresses, velocities, pressure, etc. are determined, require the solution of the governing differential equations.

Post-processing is the presentation of the results. After the computations, the resulting basic fields (temperatures, velocities, pressure, displacements, stresses, etc.) should be presented appropriately.

3 The Examined Artifact

The examined artifact is a socketed axe geometry from Isaszeg, Hungary (registration number: Ha B1-B2/3). The chemical composition of the axe is 83 wt % copper (Cu), 11 wt % tin (Sn), and 6 wt % antimony (Sb). The chemical composition is analysed using prompt-gamma activation analysis, which is a nuclear analytical technique for the non-destructive determination of elemental and isotopic compositions.

Prompt-gamma activation analysis is capable to analyse the chemical composition of voluminous samples non-destructively.

Večina elementov ima izotope, pri katerih poteka reakcija (n,γ) , zato je s PGAA teoretično mogoče vse elemente razen helija analizirati brez predhodnih informacij o analitu. Temenske energije žarkov so značilne za elemente, ki so prisotni v vzorcu, medtem ko so intenzitete sorazmerne z njihovo količino. Vrednotenje spektra smo opravili s programsko opremo HYPERMET-PC, identifikacijo elementov in izračun koncentracije pa smo osnovali na katalogu spektroskopskih jedrskih podatkov in programski opremi ProSpeRo [6–8].

Notranjo strukturo artefakta sekire z očesom in poskusne replike ulitka smo proučili z nevtronskim slikanjem, ki predstavlja učinkovito metodo za analizo dragocenih primerkov in artefaktov. Tako 2-D nevtronska radiografija kot 3-D nevtronska tomografija s pomočjo transmisijskega slikanja dajeta informacije o notranji strukturi vzorca, pri čemer se meri oslabitev prehajajočega žarka. Tomografija je nadgradnja radiografije, pri kateri se preiskovani predmet vrti pod majhnimi koti, na podlagi serije projekcij pa je mogoče z matematičnim rekonstrukcijskim algoritmom izračunati tridimenzionalne informacije. S prikazom nabora 3-D podatkov je mogoče skozi digitalno obdelavo slik ustvariti tako imenovani prikaz virtualne resničnosti (karta). Karta prikazuje koeficient slabljenja nevtronov v materialu od točke do točke neodvisno od globine prodora. Meritve smo izvedli na fotogrametrični postaji RAD nevtronskega centra v Budimpešti s prostorsko ločljivostjo približno $250\ \mu\text{m}$ [9].

Skupna količina poroznosti je 3,06 %. Geometrija artefakta in iz nje izhajajoče slike nevtronske radiografije so prikazane na Sliki 3.

Na podlagi artefakta smo s pomočjo računalniško podprtega oblikovanja ustvarili 3-D virtualni model. Za tehnološko analizo mora biti 3-D model sestavljen iz sekire,

The object is irradiated in a neutron beam, and the gamma rays from the radiative neutron capture are detected with a high-purity germanium detector, simultaneously. Most elements have isotopes that undergo the (n,γ) reaction, thus, in theory, all elements can be analysed with PGAA, except helium, without any prior information on the analyte. The gamma-peak energies are characteristic of the elements present in the sample, while the intensities are proportional to their quantity. The spectrum evaluation was done with the HYPERMET-PC software, the element identification and concentration calculation were performed based on the spectroscopic nuclear data catalog and the ProSpeRo software [6–8].

The inner structure of the socketed axe artifact and the experimental casting replica was examined by neutron imaging, which is an efficient method for analysing valuable artifacts. With the help of transmission imaging, both 2D neutron radiography and 3D neutron tomography give information about the inner structure of the sample measuring the attenuation of the passing beam. Tomography is the extension of radiography when the examined object is rotated at small angles, and based on the projection series the three-dimensional information can be calculated by a mathematical reconstruction algorithm. Displaying the 3D data set, using digital image processing, a so-called virtual reality representation (map) can be established. The map shows the neutron attenuation coefficient of the material from point to point independently from the depth of penetration. The measurements were implemented at the RAD imaging station of the Budapest Neutron Centre, with prox. $250\ \mu\text{m}$ spatial resolution [9].

The overall amount of porosity is determined as 3,06 %. The artifact geometry



Slika 3. Geometrija artefakta in rezultat nevtronske radiografije.

Figure 3. The geometry of the artifact and the result of the neutron radiography.

jedra, ulivnega sistema, forme in okolja. Na podlagi nevtronske radiografske analize smo ustvarili poenostavljeno geometrijo sekire (43 cm^3) brez ulivnega sistema, medtem ko smo jedro in formo ustvarili s pomočjo raznih funkcij v CAD programu. Na podlagi pregleda literature in poskusnih poskusov smo oblikovali dva ulivna sistema, ki lahko na realističen način zapolnita votlino brez večje turbulence: asimetrični ulivni sistem, kjer se ulivni sistem stika na eni strani geometrije, in simetrični ulivni sistem, kjer se ulivni sistem stika na obeh straneh geometrije.

Alternativno polnjenje v primeru asimetričnega ulivnega sistema v odvisnosti od časa je prikazano na Sliki 4. Čas polnjenja v primeru asimetričnega ulivnega sistema je 1,74 s, v primeru simetričnega ulivnega sistema pa 1,40 s. Lestvica predstavlja hitrost taline med 0,00 m/s in 1,00 m/s. Masni tok taline je bil 0,5 kg/s.

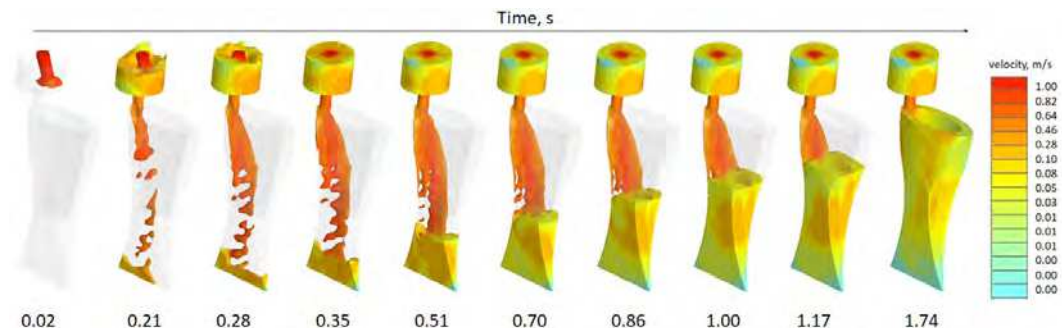
V obeh primerih talina med polnjenjem vstopa v ulivni sistem pod določenim kotom in z opredeljenim premerom curka taline. Iz ulivnega sistema vstopa talina v votlino skozi dovodni kanal in jo zapolni z gibanjem s prostim padom. Najvišja vrednost hitrosti toka je $\sim 1,0 \text{ m/s}$, kar je več

and the resulting figures of the neutron radiography can be seen in Figure 3.

Based on the artifact a virtual model is created in 3D, using Computer-Aided Design. For the technical analysis, the 3D model must consist of the axe, the core, the gating system, the mould, and the environment. Based on the neutron radiography analysis a simplified axe geometry is created (43 cm^3), without a gating system, while the core and the mould are created using Boolean features. Based on a literature survey and trial experiments two gating systems are created which can fill the cavity in a realistic way without significant turbulence: Asymmetrical gating system, where the gating system contacts one side of the geometry, and symmetric gating system, where the gating system contacts both sides of the geometry.

The filling alternative of the asymmetric case can be seen in Figure 4. In the function of time. The filling time of the asymmetric case is 1.74 s, while the symmetric case is 1.40 s. The scale represents the velocity of the melt, between 0.00 m/s and 1.00 m/s. The pouring flow rate was 0.5 kg/s.

In both cases, during filling, the melt enters the gating system with a defined



Slika 4. Asimetrično polnjenje v odvisnosti od časa.

Figure 4. Asymmetric filling in the function of time.

od kritične hitrosti taline; to pomeni, da je tok turbulenten. Turbulentni tok vmešava nečistoče in oksidno plast v tok taline, kar lahko povzroči napake, imenovane bifilm [10]. Zrak v votlini se vmešava tudi v kovino. V primeru asimetričnega ulivnega sistema je bil čas polnjenja 1,74 s, v primeru simetričnega pa 1,4 s.

4 Proces strjevanja

Na podlagi arheoloških izkopavanj in pregleda literature [11, 12] smo pripravili 3-D model CAD poenostavljene geometrije sekire z ulivnim sistemom in jedrom. Nerešeno ostaja vprašanje o materialu forme, zato smo hkrati proučili dve možnosti:

- Zlitina je bila vlita v peščeno formo. Predpostavlja se uporaba forme za enkratno uporabo, ki jo je mogoče uporabiti samo enkrat.
- Zlitina je bila vlita v kamnito formo. Predpostavlja se uporaba trajne forme, ki jo je mogoče uporabiti večkrat. Pred litjem je bila kamnita forma obdana s peskom, ki ponazarja okolje, glej Sliko 5.

Zasnova eksperimentov (DoE) je razvidna iz Preglednice 1, v kateri je bila

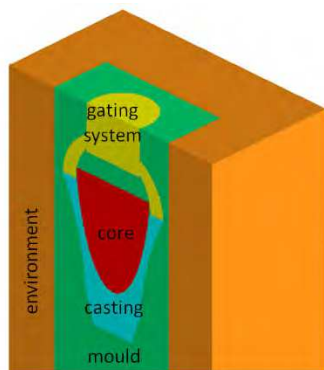
angle and with a defined melt stream diameter. From the gating system, the melt enters the cavity through the gates and fills the cavity with a free-fall movement. The highest value of the flow velocity is ~ 1.0 m/s, which is higher than the critical velocity of the melt, id est (?) the flow is turbulent. The turbulent flow mixes the impurities and the oxide layer of the melt into the metal stream, which can cause bifilm defects [10]. The air inside the cavity is also mixed inside the metal. In the case of asymmetric gating, the filling time was 1.74 s, in the case of symmetric gating, this value was 1.4 s.

4 Solidification Process

Based on archaeological excavations and literature survey [11, 12] the 3D CAD model of the simplified axe geometry with the gating system and the core is prepared. The pending question is the material of the mould, therefore two cases were examined simultaneously:

- The alloy was poured into a sand mould. It supposes a so-called expendable mould where the mould is used only once.
- The alloy was poured into a stone mould.

kemična sestava zlitine izbrana na podlagi artefakta. Temperaturo litja smo preverili v več korakih, pri čemer smo korake opredelili na podlagi možnih najvišjih temperatur starih tehnik taljenja.



Slika 5. Predstavitev proučenih geometrij, prerez 3-D modela.

Figure 5. Representation of the examined geometries, 3D cut.

It supposes a so-called permanent mould where the mould is used several times. Before pouring, the stone mould was surrounded by sand which is symbolized by the environment, see Figure 5.

The Design of Experiments (DoE) can be seen in Table 1. where the chemical composition of the alloy was composed based on the artifact. The pouring temperature was examined in several steps, where the steps were defined based on the possible maximum temperatures of the ancient melting techniques.

The transparent visual representation of the solidification can be seen in Figure 6. in the case of the A1 experiment (expendable mold) and the B6 experiment (permanent mold) as opposite ends of the poles in terms of pouring temperature (1015 vs. 1100 °C). The scale refers to liquid phase 5–95 %.

4.1 Result Analysis

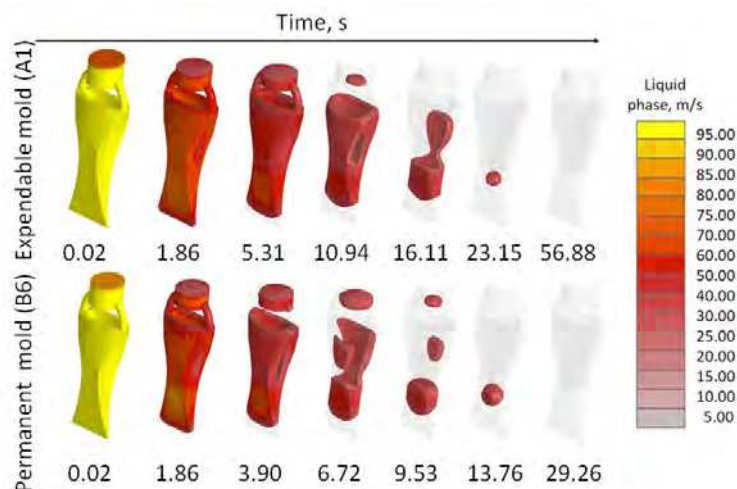
Pregleden vizualni prikaz strjevanja je prikazan na Sliki 6 v primeru poskusa A1 (forma za enkratno uporabo) in poskusa B6 (stalna forma) kot nasprotnih koncev polov

During filling the air inside the cavity must leave. This can be done by venting or by the diffusion of air through the mould, which is called gas permeability. Based on the filling

Preglednica 1. Zasnova eksperimentov.

Table 1. Design of experiments.

	Forma za enkratno uporabo / Expendable mold					
	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Začetna temperatura taline / Initial melt temperature (°C)	1015	1025	1035	1050	1070	1100
Forma / Mold	pesek / sand	pesek / sand	pesek / sand	pesek / sand	pesek / sand	pesek / sand
Okolje / Environment	pesek / sand	pesek / sand	pesek / sand	pesek / sand	pesek / sand	pesek / sand
	Trajna forma / Permanent mold					
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Začetna temperatura taline / Initial melt temperature (°C)	1015	1025	1035	1050	1070	1100
Forma / Mold	peščenjak / sandstone	peščenjak / sandstone	peščenjak / sandstone	peščenjak / sandstone	peščenjak / sandstone	peščenjak / sandstone
Okolje / Environment	pesek / sand	pesek / sand	pesek / sand	pesek / sand	pesek / sand	pesek / sand



Slika 6. Strjevanje ulitka v različnih pogojih.

Figure 6. Solidification of the casting in different conditions.

v smislu temperature litja (1015 proti 1100 °C). Lestvica se nanaša na tekočo fazo 5–95 %.

4.1 Analiza rezultatov

Med polnjenjem se mora zrak odstraniti iz votline. To je mogoče doseči z odzračevanjem ali z difuzijo zraka skozi formo, kar imenujemo prehajanje plina. Na podlagi analize polnjenja je mogoče ugotoviti, da talina blokira dovodni kanal, zato zrak ne more izstopiti skozi ulivni sistem. Brez odzračevanja zrak ne more zapustiti votline. Plinoprepustnost forme je odvisna od materiala, iz katerega je izdelana forma. Peščena forma za enkratno uporabo dobro prepušča pline, medtem ko je plinoprepustnost trajne kamnite forme skoraj ničelna. Te učinke je treba raziskati z analizo rezultatov.

Med strjevanjem se zlitina skrči, kar povzroča krčilno poroznost. Ulitek se strjuje brez napajalnika, čeprav lahko kovina v

analysis it can be determined that melt blocks the gates, so the air cannot leave through the gating system. Without venting the air cannot leave the cavity. The gas permeability of the mould depends on the moulding material. The expandable sand mould has good gas permeability, while the permanent stone mould has nearly zero. By the result analysis, these effects must be investigated.

During solidification the alloy shrinks which causes shrinkage of cavities and porosities. The casting solidifies without a riser, although the metal in the gating system can feed the casting for a limited time. The rest of the metal in the cavity solidifies without feeding.

These effects will result in empty places inside the geometry, which locations can be calculated based on the solidification calculation.

According to the experiments, 6 different melt temperatures were examined in both moulding methods. The question was the amount and the distribution of shrinkages,

ulivnem sistemu omejen čas napaja ulitek. Preostanek kovine v votlini se strdi brez napajanja.

Zaradi teh učinkov se v geometriji pojavijo praznine, ki jih je mogoče izračunati na podlagi izračuna strjevanja.

V skladu s poskusi smo pri obeh načinih formiranja preverili 6 različnih temperatur taline. Odprto je ostalo vprašanje količine in porazdelitve krčenja, na podlagi katerih bi lahko te vrednosti primerjali z analiziranimi rezultati artefakta, kjer je vrednost splošne poroznosti 3,06 %. Rezultati so prikazani v Preglednici 2.

Na podlagi analize poroznosti artefakta z nevtronsko radiografijo lahko skupno količino poroznosti (3,06 %) primerjamo z rezultati simulacije. Izmerjena vrednost je podobna kot pri naslednjih rezultatih simulacije:

- Peščena forma za enkratno uporabo s temperaturo litja 1070 °C.
- Trajna kamnita forma s temperaturo litja 1015 °C.

Da bi se odločili, kateri način formiranja in temperatura vlivanja sta primernejša, je treba raziskati tehnologijo bronaste dobe. Tehnologija zgodnjih peči in taljenja za doseganje višje temperature kovine je bila omejena. Na podlagi preiskav ostankov žilindre in poskusov reprodukcije je jasno, da je treba uporabiti najnižjo temperaturo

to be able to compare these values with the analysed results of the artifact, where the value of the overall porosity is 3.06 %. The results can be seen in Table 2.

Based on the neutron radiography porosity analysis of the artefact the overall amount of porosity (3.06 %) can be compared with the simulation results. The measured value is analogous to the following simulation results:

- Expendable sand mould with 1070 °C pouring temperature.
- Permanent stone mould with 1015 °C pouring temperature.

To decide which moulding method and which pouring temperature is more feasible the technology of the Bronze Age must be investigated. By the early furnace- and melting technology to reach a higher metal temperature was limited. Based on the investigation of the residual slags and the reproduction experiments it is clear that the lowest pouring temperature must be applied, the liquidus temperature of the alloy is 1013 °C.

If the moulding method is examined there are several pieces of evidence that prove, that during the Bronze Age permanent mould was applied since unused and burned out mould fragments are excavated [13–14].

Preglednica 2. Izračunani rezultati.

Table 2. Calculated results.

	Forma za enkratno uporabo / Expendable mold					
	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Začetna temperatura taline / Initial melt temperature (°C)	1015	1025	1035	1050	1070	1100
Krčenje / Shrinkage (vol. %)	2,92	2,977	3,035	3,04	3,069	3,161
	Trajna forma / Permanent mold					
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Začetna temperatura taline / Initial melt temperature (°C)	1015	1025	1035	1050	1070	1100
Krčenje / Shrinkage (vol. %)	3,071	3,128	3,184	3,135	3,244	3,253

litja, tj. temperaturo likvidusa zlitine 1013 °C.

Če proučimo način formanja, obstaja več dokazov, ki pravijo, da so v bronasti dobi uporabljali stalne forme, saj so izkopali neuporabljene in že uporabljene dele form [13–14].

5 Simulacija geometrije artefakta

Na podlagi rezultatov simulacije lahko ugotovimo, da material za formanje (in s tem hitrost strjevanja) ter temperatura litja pomembno vplivata na krčenje ulitka. Težava je, kako rezultate simulacije povezati z dejanskim artefaktom sekire z očesom.

5 Simulation of the Artifact Geometry

Based on the results of the simulation, the molding material (and therefore the solidification velocity) and the pouring temperature have a significant effect on the shrinkage behavior of the casting. The problem is how to feedback on the simulation results to the real socketed axe artifact.

The socketed axe artifact and the experimental casting part are examined with prompt-gamma activation analysis and neutron tomography. Based on the tomography results of the artifact, a 3D CAD geometry was created, which is suitable for the simulation analysis.

Preglednica 3. Zasnova eksperimentov artefakta sekire z očesom.

Table 3. Socketed axe artifact's DoE.

	Expendable mold					
	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Initial melt temperature (°C)	1015	1025	1035	1050	1070	1100
Mold	sand	sand	sand	sand	sand	sand
Environment	sand	sand	sand	sand	sand	sand

	Expendable mold	
	C1	C2
Initial melt temperature (°C)	1015	1100
Mold	sand	sand
Initial mold temperature (°C)	20	20
	Permanent mold	
	D1	D2
Initial melt temperature (°C)	1015	1100
Mold	sandstone	sandstone
Initial mold temperature (°C)	20	20

	Permanent mold					
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Initial melt temperature (°C)	1015	1025	1035	1050	1070	1100
Mold	sandstone	sandstone	sandstone	sandstone	sandstone	sandstone
Environment	sand	sand	sand	sand	sand	sand

Artefakt sekire z očesom in eksperimentalni del ulitka smo pregledali z analizo promptne aktivacije gama žarkov in nevtronsko tomografijo. Na podlagi rezultatov tomografije artefakta smo izdelali 3-D geometrijo CAD, ki je primerna za analizo s simulacijo.

Na podlagi zasnove eksperimentov virtualne geometrije (oglejte si Preglednico 1) smo ustvarili poenostavljeno zasnovo eksperimentov za artefakt sekire z očesom, ki je prikazana v Preglednici 3. V teh poskusih sta bili upoštevani najnižja (1015 °C) in najvišja (1100 °C) temperatura litja.

Proučena geometrija artefakta (prostornina: 20,533 cm³) in 3-D izrez forme z votlino sta prikazana na Sliki 7.

Ulivni sistem sekire ni ustvarjen, predstavljena je zgolj točka litja taline z asimetričnim in simetričnim ulivnim sistemom. Polnjenje in strjevanje geometrije sta prikazana ločeno. Najprej smo preverili, ali forma med polnjenjem prenese ujete plinske mehurčke artefakta. Podrobna analiza polnjenja ni predstavljena. Začetne in mejne pogoje polnjenja forme smo določili, kot sledi:

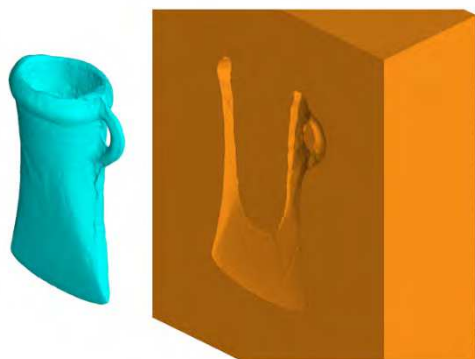
- Kemična sestava taline: 92 ± 0,5 m/m % bakra (Cu), 4,8 ± 0,4 m/m % antimona (Sb), 1,1 ± 0,1 m/m % arzena (As), 1,6 ± 0,07 m/m % niklja (Ni), 0,59 ± 0,03

Based on the DoE of the virtual geometry (see Table 1.) a simplified DoE is created for the socketed axe artifact, which can be seen in Table 3. In these experiments, the lowest (1015 °C) and the highest (1100 °C) pouring temperatures are adverted.

The examined geometry of the artifact (volume: 20,533 cm³) and the 3D cut of the mold with the cavity can be seen in Figure 7.

The gating system of the axe is not created, only the gating point of the melt is represented with asymmetric and symmetrical gating. The filling and solidification of the geometry were handled separately. First, the mold filling is examined to be able to handle the entrapped gas bubbles of the artifact. A detailed analysis of the filling is not presented. The initial and boundary conditions of the mold filling were determined as follows:

- Chemical composition of the melt: 92 ± 0.5 m/m % copper (Cu), 4.8 ± 0.4 m/m % antimony (Sb), 1.1 ± 0.1 m/m % arsenic (As), 1.6 ± 0.07 m/m % nickel (Ni), 0.59 ± 0.03 m/m % silver (Ag) and 0.127 ± 0.006 m/m % cobalt (Co)
- Pouring temperature: 1015 and 1100 °C
- Mold material and temperature: sand, 20 °C
- Entering metal stream diameter: 4.5 mm
- Pouring flow: Σ 0.1 kg/s
- Calculated filling time: 1.67 s



Slika 7. Geometrija artefakta in prerez 3-D modela.

Figure 7. Artifact geometry and the 3D cut of the mold.

m/m % srebra (Ag) in $0,127 \pm 0,006$
m/m % kobalta (Co)

- Temperatura litja: 1015 in 1100 °C
- Material in temperatura forme: pesek, 20 °C
- Premer vhodnega curka kovine: 4,5 mm
- Tok litja: $\Sigma 0,1$ kg/s
- Izračunani čas polnjenja: 1,67 s

Pregleden vizualni prikaz strjevanja je prikazan na Sliki 8 v primeru poskusa C1 (forma za enkratno uporabo) in poskusa D2 (stalna forma) kot nasprotnih koncev polov v smislu temperature litja (1015 proti 1100 °C). Lestvica se nanaša na tekočo fazo 5–95 %.

Vzorci strjevanja so podobni pri obeh načinih formanja. Prvi strjeni del geometrije artefakta je na območju stranske zanke, ki mu sledita rezalni rob in ustje očesa. Zadnji strjeni del je težki del geometrije pod jedrom, ki se vede kot vroče mesto.

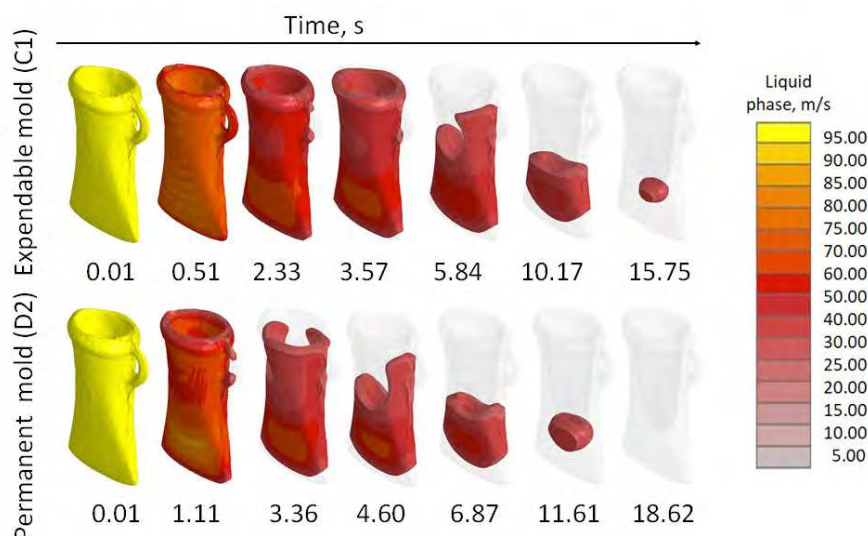
Najkrajši čas strjevanja ima različica D1 (forma iz peščenjaka, temperatura taline

The transparent visual representation of the solidification can be seen in Figure 8. in the case of the C1 experiment (expendable mold) and D2 experiment (permanent mold) as opposite ends of the poles in terms of pouring temperature (1015 vs. 1100 °C). The scale refers to liquid phase 5–95 %.

The solidification patterns are similar in both molding methods. The first solidified part of the artifact geometry is in the area of the side loop, which is followed by the cutting edge and the socket mouth. The latest solidified part is the heavy section of the geometry, under the core, which behaves like a hot spot.

The shortest solidification time belongs to the D1 version (sandstone mold, 1015 °C melt temperature) while the longest solidification time belongs to the C2 version (sand mold, 1100 °C melt temperature).

The empty spaces in the 2D cut mid-line view mean shrink holes. In all cases, at the area of the socket mouth, which has the highest position within the mold, the melt



Slika 8. Strjevanje artefakta sekire z očesom v različnih pogojih.

Figure 8. Solidification of the socketed axe artifact in different conditions.

Preglednica 4. Simulirane in izmerjene vrednosti poroznosti.

Table 4. Simulated and the measured porosity values.

	C1	C2	D1	D2
Simulirana poroznost zaradi krčenja / Simulated shrinkage porosity	2,84 %	3,69 %	2,80 %	3,66 %
S tomografijo izmerjena poroznost in poroznost zaradi plina / Tomography measured shrinkage and gas porosity	min. 3,1 – maks./ max 3,7 wt. % povprečna vrednost / mean value 3,4 wt. %			

1015 °C), najdaljši čas strjevanja pa ima različica C2 (forma iz peska, temperatura taline 1100 °C).

Prazni prostori v 2-D rezu na sredini črte predstavljajo lunke. V vseh primerih se talina na območju ustja očesa, ki leži najvišje v kalupu, strdi brez napajanja, kar povzroči nastanek lunke. Na sredini geometrije, tj. na območju težkega dela, je lunke, geometrija katerega je odvisna od vzorca strjevanja. Pri formah iz peščenjaka je na območju stranske zanke še ena napaka pri strjevanju. Simulirane in izmerjene vrednosti poroznosti so prikazane v Preglednici 4.

Simulirane vrednosti obsegajo samo poroznost zaradi krčenja, medtem ko obsegajo izmerjene vrednosti poroznost zaradi krčenja kot tudi zaradi plina. Za primerjavo ne le številčnih vrednosti krčenja, temveč tudi njegove porazdelitve, je treba simulirane slike primerjati z rezultati tomografije.

Simulacijski algoritem skrbi za krčenje pri strjevanju s pomočjo parametra na neprekinjeni lestvici, ki prikazuje vrednost krčenja zaradi strjevanja znotraj območja. Po drugi strani pa so krčenje in plinske poroznosti s pomočjo tomografije predstavljene kot odsotnost materialov. Ta različna vidika je mogoče približati z grafičnimi orodji.

Skupni prikaz izmerjenih in simuliranih vrednosti je na Slikah 9 in 10 na območju težkega dela geometrije. Zelena črta predstavlja mejo 10-odstotnega krčenja,

solidifies without feeding, which causes shrink holes. In the middle of the geometry, at the area of the heavy section, there is a shrink hole, whose geometry depends on the solidification pattern. In the case of the sandstone molds, there is one further solidification defect in the area of the side loop. The simulated and measured porosity values can be seen in Table 4.

The simulation values contain only the shrinkage porosity, while the measured values contain the shrinkage and the gas porosity. To compare not only the numerical values of the shrinkages but their distribution of them, the simulated images must be compared to the tomography results.

The simulation algorithm handles the solidification shrinkages with the help of a parameter along a continuous scale, which demonstrates the value of solidification shrinkages inside an area. On the other hand, with the help of tomography, the shrinkage and gas porosities are represented as a lack of materials. The two different aspects can be approximated by graphical tools.

The common representation of the measured and simulated values can be seen in Figure 9. and 10. in the area of the heavy section of the geometry. Green lines represent the border of the 10 % of shrinkage, the yellow line represents the border of the 40 % shrinkage and the red circles represent the position of the gas bubbles.

rumena črta predstavlja mejo 40-odstotnega krčenja, rdeči krogi pa položaj plinskih mehurčkov.

1. Simulirano krčenje pri strjevanju.
2. Položaj plinskih mehurčkov.
3. Simulirano krčenje pri strjevanju in plinski mehurčki.
4. Meje krčenja in plinski mehurčkov so nanesene na tomografski posnetek.

Rezultate smo potrdili z analizo mikrostrukture z mikroskopom s svetlim poljem in analizo diferencialnega interferenčnega kontrasta.

1. Simulated solidification shrinkages.
2. Position of the gas bubbles.
3. The simulated solidification shrinkages and the gas bubbles.
4. The borderlines of the shrinkages and the gas bubbles are superposed to the tomography.

The results were validated by microstructure analysis using bright-field microscope analysis and differential interference contrast analysis.



Slika 9. Simulirano in izmerjeno krčenje, 1015 °C (C1).

Figure 9. Simulated and measured shrinkages, 1015 °C (C1).



Slika 10. Simulirano in izmerjeno krčenje, 1100 °C (D2).

Figure 10. Simulated and measured shrinkages, 1100 °C (D2).

6 Sklepi

Uporabljene metode testiranja materialov so primerne za pregled artefaktov, medtem ko je računalniška simulacija ustrezno orodje za reprodukcijo tehnologije litja.

V primeru proučevane geometrije sekire z očesom smo model CAD artefakta izdelali na podlagi rezultatov točkovnih oblakov nevtronske tomografske rekonstrukcije. Vrednosti kemične sestave kot vhodnih parametrov simulacije so bile določene s tehniko analize promptne aktivacije žarkov gama. Ustreznost simulacijskih izračunov je mogoče primerjati in potrditi z rezultati metod analize notranje strukture in metalografije.

Na podlagi rezultatov testiranja materialov in simulacij je verjetno, da je bila sekira z vdolbino ulita z asimetričnim ulivnim sistemom, kar potrjujejo tudi rezultati mikroskopskih posnetkov.

Na podlagi rezultatov simulacij je bila sekira z nastavkom ulita v trajno formo, kar potrjujejo tudi arheološki dokazi.

Vlivanje kovinske taline je potekalo z minimalnim pregrevanjem, kar ustreza znanju o tehnikah taljenja iz bronzne dobe.

6 Conclusions

The applied materials testing methods are suitable for the examination of artifacts, while computer simulation is an adequate tool for the reproduction of the casting technology.

In the case of the examined socketed axe geometry, the CAD model of the artifact was created based on the point clouds results of the neutron tomographic reconstruction. The values of the chemical composition, as input parameters of the simulation, were determined using the prompt-gamma activation analysis technique. The adequacy of the simulation calculations can be compared and validated by the results of the inner structure analysis methods and the metallography.

Based on the results of the materials testing and the simulations it is probable that the socketed axe was cast using an asymmetric gating system, which statement was also confirmed by the results of the microscope images.

Based on the results of the simulations, the socketed axe was cast into a permanent mold, which statement was also confirmed by the archaeological evidence.

The pouring of the metal melt was carried out with a minimal superheat, which statement is based on the melting techniques of the Bronze Age.

7 Viri / References

- [1] Bruce L. Simpson, History of the Metal casting Industry, AFS, 1969.
- [2] www.gransforsbruk.com/en/axe-knowledge/the-history-of-the-axe, 2020.05.
- [3] www.museumoflondonprints.com/image/65134/copper-alloy-socketed-axehead-late-bronze-age, 2020.
- [4] Jesper Hattel, Fundamentals of Numerical modelling of Casting Processes, Polyteknisk, 2005.
- [5] NovaFlow&Solid User Guide, Novacast Systems AB, 2019.
- [6] P. Trebsche: Ein Tüllenbeil mit Holzschäftung und weitere urnenfelderzeitliche Funde aus Enns. Mitteilungen des Museumsvereines Lauriacum-Enns N. F. 40, p. 5-15, 2002.

- [7] B. Roberts, B. S. Ottaway: The Use and Significance of Socketed Axes during the Late Bronze Age. *European Journal of Archaeology* vol. 6/2, 2003, 119-140.
- [8] Tarbay J. G.: A gyermelyi típusú kincsek és koruk, PhD disszertáció, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Régészettudományi Intézet, Budapest, 2018. DOI: 10.15476/ELTE.2018.167
- [9] Z. Kis et al.: Neutron based imaging and element-mapping at the Budapest Neutron Centre, *Physics Procedia*. 69, p.40-47, 2015. DOI: 10.1016/j.phpro.2015.07.005
- [10] J. Campbell: *Complete Casting Handbook*, 2nd ed., p.3–90, Elsevier, Oxford, 2015.
- [11] D. Gruszka et al., The use of experimental and computer aided methods in reconstruction of metal artefacts from the bronze age, 73rd WFC, 2018.
- [12] Aldona Garbacz-Klempka et al., *Badania i wizualizacja technologii*, Metalurduzy znad Kaczawy, 2016.
- [13] Photo of a Bronze Age axe mould, Shrewsbury Museums, 2020.
- [14] R.F. Tylecote: *History of Metallurgy*, Maney, London, 1992.

AKTUALNO / CURRENT

Pregled livarskih prireditiv v letu 2023

Datum dogodka	Ime dogodka	Mesto in država
29.–30. 03. 2023	4 th Molding Material Forum	Clausthal-Zellerfeld, Nemčija
29.–31. 03. 2023	Metals, Extrusion, Foundry (METEF)	Bologna, Italija
27.–28. 04. 2023	65. Österreichische Gießereitagung	Schladming, Avstrija
08.–09. 05. 2023	Gießtechnik im Motorenbau	Magdeburg, Nemčija
16.–18. 05. 2023	New Trends in Metallic Materials Processing	Bukarešta, Romunija
17.–19. 05. 2023	65. Mednarodni sejem tehnike in XV International Mineral Processing and Recycling Conference (IMPRC)	Beograd, Srbija
12.–13. 06. 2023	Industrijski forum IRT 3000	Portorož, Slovenija
12.–16. 06. 2023	Mednarodni sejem metalurgije in livarstva (GIFA)	Düsseldorf, Nemčija
13.–15. 09. 2023	63. IFC Portorož 2023	Portorož, Slovenija

Umerjanje numeričnega izračuna za optimizacijo procesa litja grelne plošče

Numerical Calculation Calibration for Optimization of Foundry Technology of a Heat Plate

Povzetek

Numerični izračuni pri načrtovanju ali optimizaciji livarske tehnologije lahko bistveno pomagajo pri razumevanju problematike, ki na prvi pogled ni najbolj očitna. Numerični izračuni livarskih procesov nam danes nudijo vpogled v posamezno sekvenco litja na način, ki nam pomaga odkriti in razumeti vzroke za nastale napake. Z razumevanjem vzrokov napak se lahko učinkovito lotimo optimizacije procesa in novo tehnologijo preizkusimo najprej v virtualnem okolju, z izračunom z optimiziranimi robnimi pogoji. Na ta način lahko pri razvoju in/ali optimizaciji posamezne tehnologije učinkoviteje porabimo čas in sredstva.

Stopnja zaupanja v pravilnost rezultatov numeričnega izračuna je v veliki meri odvisna od samokritičnosti inženirja, ki rezultate analizira in jih vrednoti. Natančnost izračuna je lahko samo toliko dobra, kolikor so dobri začetni in robni pogoji problema. Sem spadajo tudi zbirke podatkov o lastnostih uporabljenih materialov – zlitin in ostalih pomožnih livarskih materialov. Za določene vhodne parametre pa obstajajo priporočene vrednosti, ki pa jih je treba potem izkustveno kalibrirati in umeriti za določeno tehnologijo litja in glede na specifičnost posameznega proizvodnega procesa v posamezni livarni.

V predstavitvi je predstavljeno umerjanje prestopnostnega koeficienta na meji med peščeno formo in ulitkom. Umerjanje koeficienta je bilo izvedeno tako, da smo na več natančno določenih mestih v peščeni formi izmerili temperaturo med litjem in ohlajanjem ulitka. Izmerjene rezultate smo nato primerjali z numerično izračunanimi. Glede na primerjavo izmerjenih temperatur smo ustrezno kalibrirali prestopnostni koeficient, tako da so se izračunane temperature ujemale z izmerjenimi. Proces umerjanja prestopnostnega koeficienta smo izvedli skupaj z optimizacijo dovodnega kanala na primeru litja grelnih plošč za odpravo poroznosti na mestu pripetja.

Ključne besede: gravitacijsko litje, siva litina, umerjanje prestopnostnega koeficienta, optimizacija livarskega procesa

Abstract

Numerical calculations in the designing and optimization of foundry technologies can contribute significantly to help understand a problem that is not apparent at first glance. Numerical calculation of the foundry process is now able to show us in detail every sequence of the process so that we can discover and understand the root cause of the problem. With an understanding of the root cause of the failure, we can effectively optimize the process. The new technology can then be virtually tested by numerical calculation

using new optimized boundary conditions. In this way, we can significantly reduce the time and cost of developing a new process or optimizing an existing technology.

Confidence in the accuracy of the results of the numerical calculation depends on the self-criticism of the user who analyses the results. The accuracy of the numerical calculation can be as good as the initial and boundary conditions are accurate. The accuracy of the results also depends on the material properties in the database – the alloys used and the properties of other foundry materials. For some of the input parameters, there are only recommended values that need to be calibrated for a particular technology and a particular technology in a particular foundry.

In this presentation, the calibration of the heat transfer coefficient at the boundary between sand mold and casting is presented. The calibration was performed by measuring the temperatures in the sand mold at several points during casting, solidification, and cooling of the casting. The measured temperatures were then compared to the calculated temperatures. The heat transfer coefficient was calibrated so that the calculated temperatures matched the measured temperatures. The process of calibrating the heat transfer coefficient was performed together with the optimization of the gating system of a heat plate to eliminate porosity in the casting.

Keywords: gravity casting, gray iron, heat transfer coefficient calibration, casting technology optimization

1 Uvod

Livarne si pri načrtovanju livarske tehnologije za posamezni ulitek pomagajo z numeričnimi izračuni že v fazi izdelave ponudbe. Na ta način lahko zelo hitro ugotovijo, kje se bodo lahko pojavila kritična mesta, ki bi lahko povzročala težave pri proizvodnji. Livarne, ki začnejo z uporabo numeričnih izračunov, hitro ugotovijo, da prednosti, ki jih prinašajo rezultati numeričnih izračunov, niso samo prednost pred konkurenco, ampak obvezen tehnološki korak za zgodnje odkrivanje morebitnih težav pri izdelavi ulitkov. Razvoj programskih paketov v zadnjem desetletju sledi potrebam livarn, da zagotovijo podporo in računanje vseh livarskih tehnologij. Večina programskih paketov pokriva več ali manj vse livarske tehnologije, posamezni paketi pa lahko omogočajo samo natančno določeno livarsko tehnologijo. Programski paketi za reševanje temeljijo na različnih numeričnih metodah; metodi končnih

1 Introduction

When designing foundry technology, foundries rely on numerical calculations from the early stages of offer preparation. With this approach, they can very quickly discover the critical areas where challenges might arise in the production process. Foundries using numerical analysis are discovering that the benefits of numerical analysis are not only an advantage over the competition but also a must for early detection of the potential challenges in casting production. Software development in the last decade follows the foundries' need to support the analysis of all foundry technologies. Most foundry software can calculate the basic foundry technologies, and some are also able to calculate the special foundry technologies. The software is based on the solution of differential equations using various methods; finite difference method, finite element method, finite volume method, etc. [1, 2]. Basic

diferenc, metodi končnih elementov, metodi končnih volumnov in podobno [1, 2]. Poleg osnovnega izračuna livarskih napak, kot so plinska in krčilna poroznost, analiza toka taline, prikaz temperaturnega polja v ulitku in/ali v kokili oz. formi, lahko izračunamo deformacijo ulitka in izračunamo nastale napetosti. Iz rezultatov lahko predvidimo lokacijo napake, zaostale napetosti, velikost in amplitude deformacije ter napovemo mikrostrukturo in mehanske lastnosti.

Za najbolj optimalne rezultate uporabe numeričnega izračuna je treba numerične simulacije vključiti že na začetku izdelave ali celo že pri samem dizajniranju ulitka [3]. V prvi simulaciji se izračuna samo strjevanje samega ulitka, da bi ugotovili najbolj kritična mesta. Nato sledi izdelava ulivno-napajalnega sistema. Uporaba numeričnega izračuna je zelo uporabna tudi pri reševanju problemov pri obstoječi proizvodnji ulitkov, saj lahko z analizo rezultatov numeričnega izračuna vidimo procese in pojave, na katere brez simulacije na prvi pogled ne bi nikoli pomislili. Analiza simulacije obstoječega stanja proizvodnje ulitka nam lahko zelo hitro in enostavno da odgovore, zakaj je prišlo do določene napake. Še več, zelo hitro lahko opredelimo potrebne spremembe, ki bodo nastalo napako minimizirale ali celo odpravile.

Zanesljivost in točnost numeričnih izračunov je seveda v veliki meri odvisna od uporabljenih robnih in začetnih pogojev kot tudi od izkušenj in znanja inženirja, ki izračun pripravi in analizira. Uporabljene materialne lastnosti za standardne zlitine in pomožne livarske materiale so iz baze podatkov, ki so del simulacijskega programa [4]. Za opredelitev določenih robnih in začetnih pogojev pa so določene priporočene vrednosti, ki pa jih mora nato fino nastaviti sam uporabnik, za kar pa potrebuje precej izkušenj. Primer takih robnih oz. začetnih pogojev je prestopnostni koeficient na

results of numerical calculation include gas and shrinkage porosity, melt flow analysis, temperature distribution in the melt, solid casting, and mold or die. Advanced results also include stress calculation, which allows us to analyze casting deformation and stresses in the casting and mold. From the analysis of numerical results, we can predict the location of defects, residual stresses, magnitude and direction of deformation, microstructure, and mechanical properties.

To obtain optimal results from numerical calculations, it is necessary to include the calculations in the early stage of foundry technology preparation or even at the casting design [3]. In the first calculation, only the solidification of the casting without a gating system is calculated to define the critical areas on which we should focus when defining the gating system. Numerical analysis is also very useful to solve problems in existing casting production, because with numerical results we can see the processes and things from a different perspective, and without numerical results, the problem would be more difficult to solve. Analyzing the current production process can give us very quick and easy answers to why some problems occur. Even more, with the right knowledge we can quickly define the right changes that will minimize the error or even eliminate the error.

The accuracy of numerical results depends entirely on the boundary and initial conditions used and, on experience and knowledge of the engineer performing the calculations and analyzing the results. Most of the required material properties for standard casting alloys and foundry auxiliaries are included in the casting simulation software in the standard database [4]. There are some general recommendations for defining some boundaries and initial conditions, which the user must fine-tune based on his technical

kontaktni meji med dvema snovema – konkretno na kontaktni meji med formo iz peščene mešanice in ulitkom iz sive litine. Fina nastavitvev prestopnostnega koeficienta za posamezno tehnologijo v livarni se izvede z referenčno meritvijo temperature v formi in ulitku ter primerjavo numerično izračunanih vrednosti na istih mestih. Z ustreznim spreminjanem prestopnostnega koeficienta je lahko razlika med izmerjenimi in izračunanimi temperaturami minimalna.

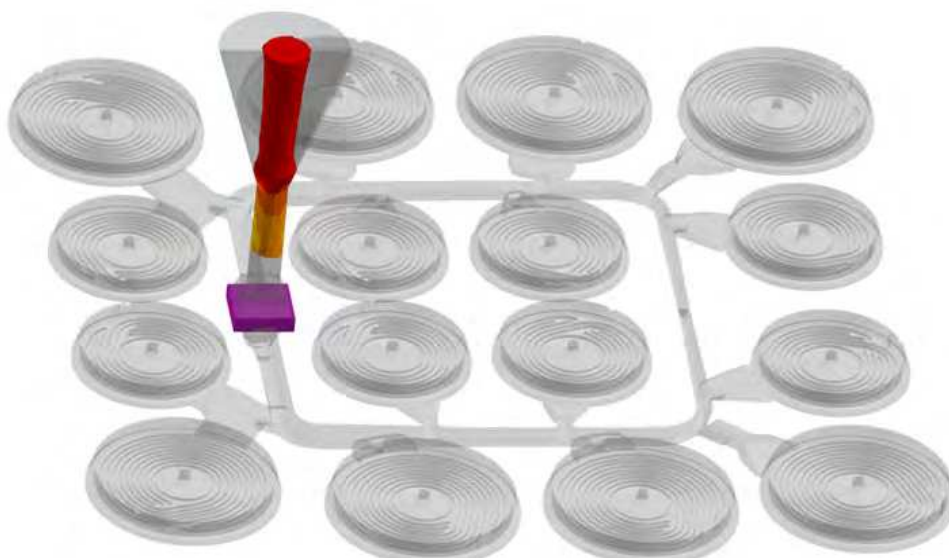
2 Eksperimentalno delo

Umerjanje prestopnostnega koeficienta je bilo izvedeno na primeru optimizacije litja grelne plošče iz sive litine z lamelnim grafitom. Forma je narejena na avtomatski formarski napravi s horizontalno delilno ravnino. Pojavlja se napaka krčilne poroznosti v ulitku, kar prispeva k večjemu izmetu v sami livarni. Napaka je posledica krčilne poroznosti, ki nastane na mestu

experience. An example of such a boundary condition is the heat transfer coefficient at the boundary between two different volumes that are in contact, e.g., at the boundary between sand mold and gray iron casting. Accurate fine-tuning of the heat transfer coefficient for a particular foundry can be done by measuring the temperature during pouring and solidification in the mold and then comparing it to the numerically calculated results at the same location where the measurement was made. The change in the heat transfer coefficient must be made so that the calculated temperature curve matches the measured one.

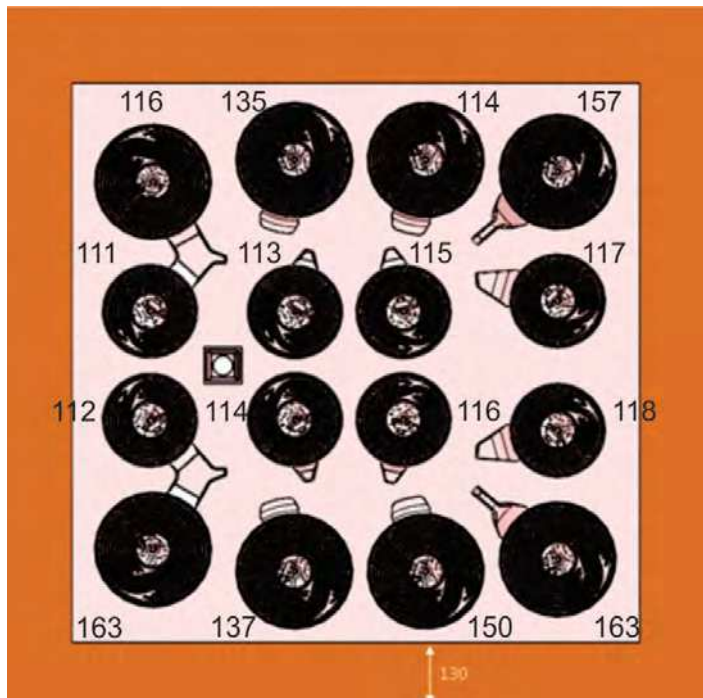
2 Experimental

The calibration of the heat transfer coefficient was carried out using the casting of a heat plate made of lamellar gray iron as an example. The mold was made on an automatic molding machine with a



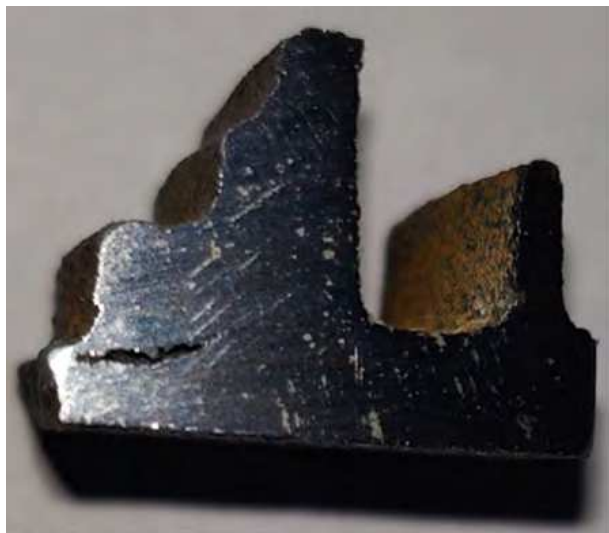
Slika 1. 3-D model z ulitki grelnih plošč in elementi ulivno-napajalnega sistema.

Figure 1. 3D model with heat plates and gating system.



Slika 2. Postavitev in oznaka grelnih plošč v formi.

Figure 2. Position and heating plate marking.



Slika 3. Slika prereza skozi grelno ploščo št. 157 (180 mm), na kateri je vidna krčilna poroznost v bližini dovodnega kanala.

Figure 3. Heating plate no. 157 (180 mm) cross-section where shrinkage porosity at the casting inlet can be seen.

med dovodnim kanalom in ulitkom. V formo se hkrati ulije osem grelnih plošč premera 180 mm in osem grelnih plošč premera 145 mm. Velikost forme je 900 x 900 mm. Na

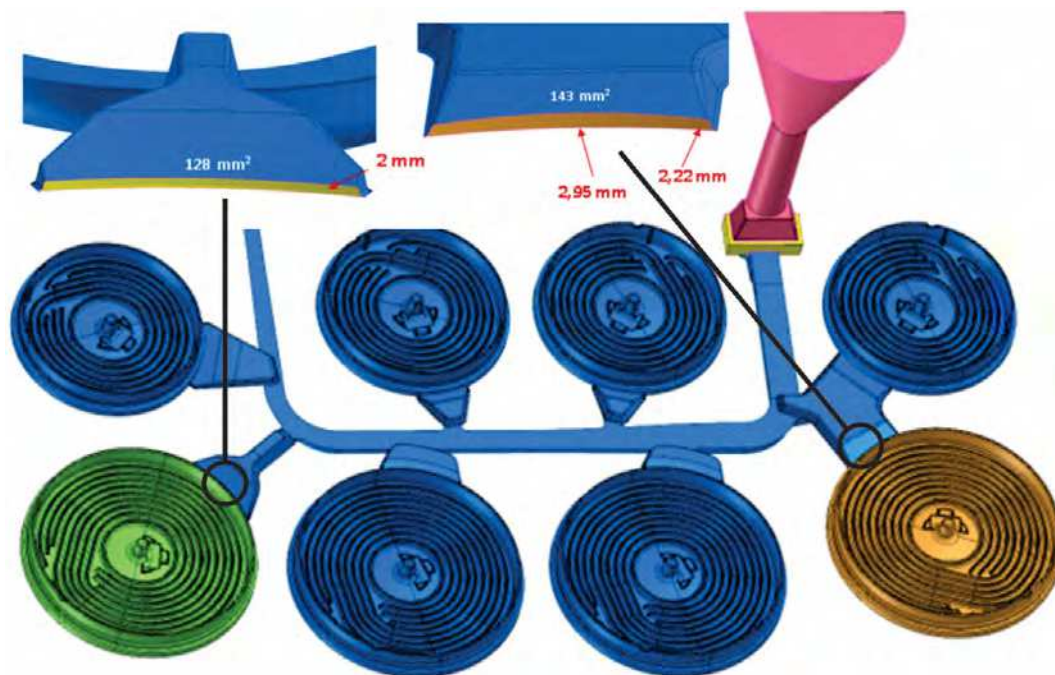
horizontal dividing plane. The defect in the casting is shrinkage porosity, which is the main cause of rejects in the foundry. The defect in the hotplate occurs when the

sliki 1 je 3-D model z ulitki grelnih plošč ter elementi ulivno napajalnega sistema.

Kritična mesta so se pojavljala praktično na vseh modelih plošč obeh premerov, največ napak pa je bilo na mestih, najbolj oddaljenih od ulivne čaše (slika 2 – skrajno desno), t.j. na ulitkih št. 163 ter št. 157. Krčilno poroznost lahko vidimo na Sliki 3. Slika 3 predstavlja prerez ulitka na mestu dovodnega kanala, kjer vidimo, da je krčilna poroznost v ulitku ter se nadaljuje do dovodnega kanala. Dovodni kanal se v nadaljnji obdelavi mehansko obdelava s

casting is connected to the gating system. In the mold, there are a total of eight heating plates with a diameter of 180 mm and eight heating plates with a diameter of 145 mm. The size of the mold is 900 x 900 mm. Figure 1 shows a 3D model with castings and a gating system.

Critical areas for defects are found on all castings of both diameters, but the greatest porosity was on a casting farthest from the spur (Figure 2 – right), labeled 163 and 157. Shrinkage porosity can be seen in Figure 3. Figure 3 shows the cross-



Slika 4. Geometrija in dimenzije dovodnega kanala.

Figure 4. Geometry and dimensions of the inlet.

Preglednica 1. Kemijska sestava uporabljene sive litine.

Table 1. Chemical composition of used gray iron.

C	Si	Cr	Mn	S	P
3,4	2,15	0,41	0,75	0,1	0,3

struženjem, kar odpre krčilno poroznost in se jo lahko opazi s prostim očesom na površini grelne plošče. Taka plošča je kakovostno neustrezna in predstavlja izmetni ulitek.

Na Sliki 4 je prikazana geometrija obstoječega stanja litja skupaj z ustreznimi geometrijami in dimenzijami dovodnega kanala, ki je bila uporabljena tudi za numerični izračun in umerjanje prestopnostnega koeficienta.

Za numerično analizo litja smo uporabili program ProCAST. Materialne lastnosti za obravnavno kemijske sestave sive litine iz Preglednice 1 in bentonitno peščeno mešanico smo izbrali iz standardne zbirke programa. Začetna temperatura za simulacijo je bila opredeljena pri 1400 °C. V realnosti zaradi neogrevanega livnega avtomata temperatura litja variira med 1380 °C in 1470 °C. Vse ostale začetne temperature so bile v simulaciji nastavljene na 30 °C.

section of the casting at the gate where the shrinkage porosity begins in the casting and ends in the inlet. The casting is machined and after machining the porosity can be seen at the inlet. This defect is not suitable and the casting is rejected.

Figure 4 shows the geometry of the inlet for the original casting technique with the corresponding geometry and dimensions. This geometry was used to calibrate the heat transfer coefficient and temperature measurements.

The numerical calculations were performed using ProCAST software. The material properties for the gray iron used with the chemical composition in Table 1 and the bentonite sand were used from the standard database of the program. The pouring temperature for the simulation was set at 1400 °C. In practice, the pouring temperature varies between 1380 °C and 1470 °C because the ladle is not heated. All other initial temperatures were set to 30 °C.

2.1 Merjenje temperature v formi

Za natančno opredelitev prestopnostnega koeficienta, ki pomembno vpliva na natančnost numeričnega izračuna, smo v

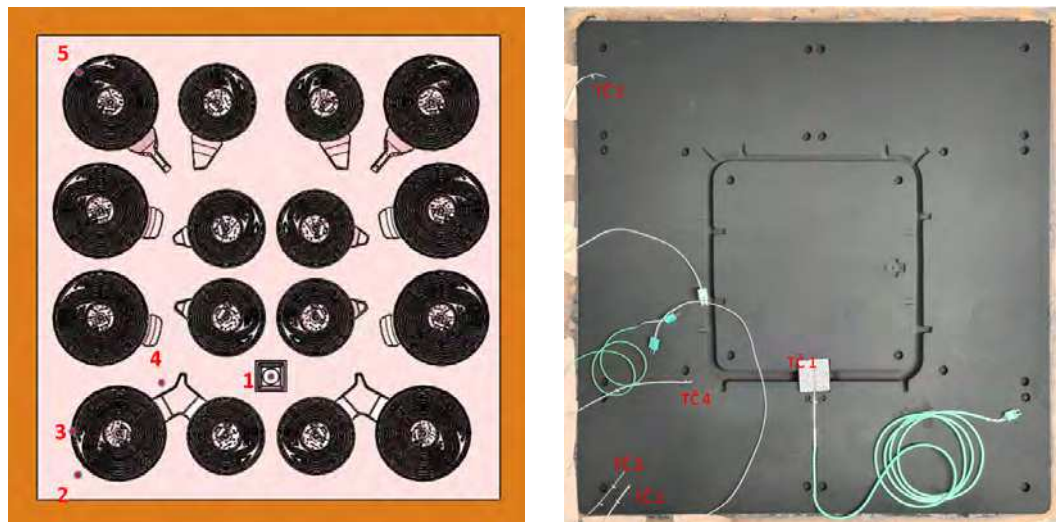
2.1 Measurements in the Mold

To accurately determine and calibrate the heat transfer coefficient, which is an important factor for accurate numerical

Preglednica 2. Položaj termoelementa v formi.

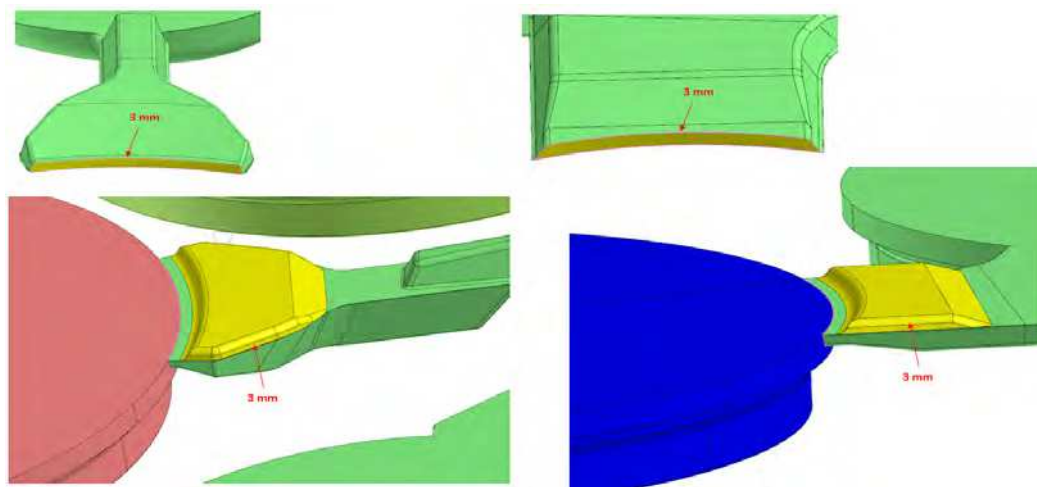
Table 2. Position of thermocouples in the mold.

Št. / No.	Opis položaja termoelementa / Position description
1	Temperatura pod livno čašo, kjer smo izmerili livno temperaturo / The temperature under the spur where the pouring temperature was measured
2	Temperatura v formi, kjer smo določili prestop toplote z ulitka na formo / The temperature in the mold, for heat transfer calibration
3	Temperatura v ulitku / The temperature in the casting
4	Temperatura v formi, kjer smo določili prestop toplote z ulitka na formo / The temperature in the mold, for heat transfer calibration
5	Temperatura v ulitku, da smo izmerili padec temperature / The temperature in the casting, to determine the temperature drop



Slika 5. Postavitev termočlenov v formo: skica (levo), eksperiment (desno).

Figure 5. Thermocouple position in the mold: sketch (left), experiment (right).



Slika 6. Optimiziran dovodni kanal različice 1 za ulitka 157 in 116 (oznake s Slike 2).

Figure 6. Gate optimization version 1 for casting no. 157 and 116 (marked in Figure 2).

formi med rednim proizvodnim procesom namestili termočlene in merili temperature od litja do konca strjevanja. Meritev smo s tremi različnimi termočleni izvedli na petih različnih mestih v formi. Na mestu ena smo

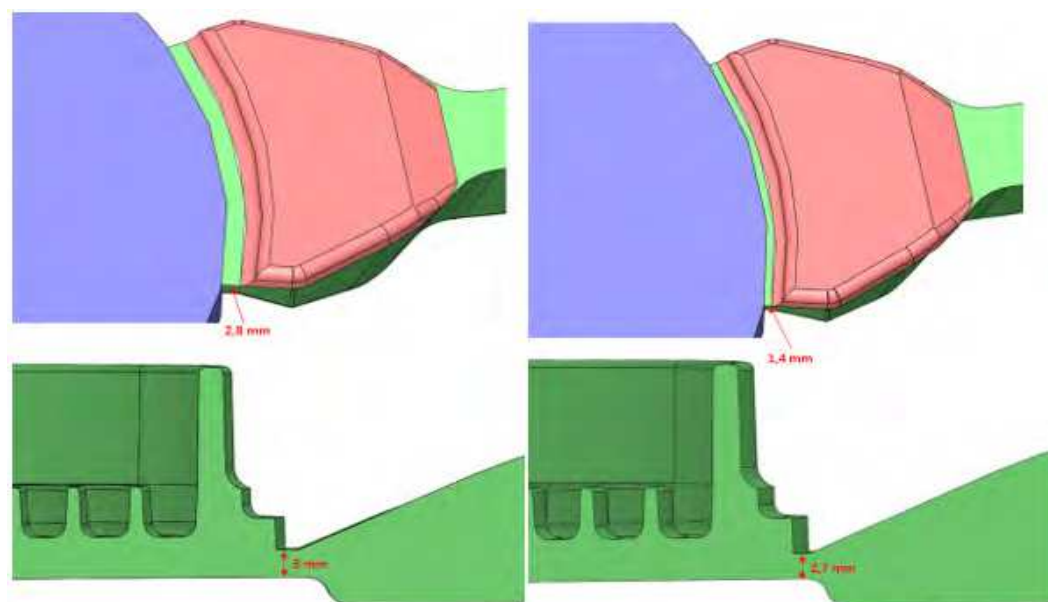
calculation results, temperatures in the mold were measured with thermocouples during the pouring and solidification on the production line. The temperature was measured at five locations in the mold

uporabili termoelement tip K, oploščeni z inoksom premera 3 mm. Na mestu dva in štiri smo uporabili termoelement tip K, oploščeni s steklenimi vlakni premera 1 mm, na mestu tri in pet pa smo uporabili termoelement tip K, oploščeni z inoksom premera 1 mm. Položaji termočlenov so prikazani na Sliki 5. Podatke smo zajemali z analogno-digitalnim pretvornikom proizvajalca National Instruments tip NI9213 in programom Labview. Frekvenca meritev je bila 50 Hz. Položaj termočlenov je opisan v Preglednici 2 in shematsko prikazan na Sliki 5.

using three different thermocouple types. At the first location, a type K thermocouple with a 3 mm diameter stainless steel coat was used. At locations two and four, a fiberglass-coated type K thermocouple with a diameter of 1 mm was used. Type K thermocouples with 1 mm stainless steel coat were used at locations three and five. The location of the thermocouples is marked in Figure 5. The measurement data were recorded using a National Instruments analog-to-digital converter (type NI9210) and a Labview program. The measurement frequency was 50 Hz. The description of the thermocouples can be found in Table 2 and the position of the thermocouples is marked in Figure 5.

2.3 Optimizacija dovodnega sistema

Obstoječe stanje dovodnih kanalov s Slike 4 ni optimalno in ima za posledico krčilno



Slika 7. Geometrija dovodnega kanala optimizacije ena in dva.

Figure 7. Gate geometry used in optimization one and two.

poroznost. Za odpravo te krčilne poroznosti smo v prvi različici dovodni kanal optimizirali tako, da se je geometrijski in termalni modul povečal na način, da se je vsa krčilna poroznost premaknila v dovodni kanal. Geometrija novega dovodnega kanala je prikazana na Sliki 6.

Naknadno smo dovodni kanal optimizirali še za bolj optimalno lomljenje ulitka iz ulivnega sistema. Pri prvi optimizaciji se ulitki niso vedno sami odlomili na iztresalnih rešetkah, kjer pa so se odlomili, je ostal večji srh, ki je povzročal težave pri nadaljnji mehanski obdelavi. Za rešitev tega problema smo optimizacijo dva izvedli tako, da se je zmanjšala debelina pripetja, povečani del dovodnega kanala pa se je prestavil bližje ulitku. Primerjava geometrije med optimizacijo ena in dva je prikazana na Sliki 7.

3. Rezultati

S termoelementi izmerjene temperature so prikazane na Sliki 8. Na Sliki 9 je prikazana primerjava izmerjene temperature in temperature, izračunane z numeričnim izračunom na enakem mestu, kot so bili nameščeni termoelementi. Izmerjene in izračunane temperature se dokaj dobro ujemajo glede na opredeljene začetne in robne pogoje numeričnega izračuna. Upoštevati je treba, da pri numeričnem izračunu ne moremo upoštevati vseh spremenljivk, ki v realnosti vplivajo na proces ohlajanja. Največja neznanka pri vplivu na spreminjanje temperature ulitka in forme je lahko prestopnostni koeficient (HTC) med dvema snovema – v tem primeru med ulitkom iz sive litine in med peščeno formo iz bentonitne peščene mešanice. Ta koeficient lahko glede na specifičnost livarske tehnologije v posamezni livarni med posameznimi livarnami variira. V

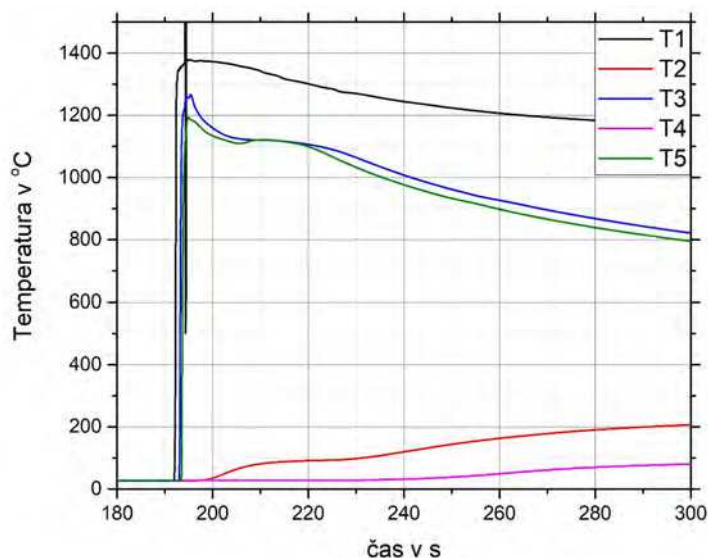
2.3 Gating System Optimization

The gating system shown in Figure 4 is not optimal and causes shrinkage porosity. To eliminate shrinkage porosity, the first optimization of gates was done. In the gates, the geometry and thermal modulus were increased so that the shrinkage porosity is moved to the gate. The geometry of the new gate is shown in Figure 6.

After the first version, the gate was additionally optimized to optimize the braking of the casting by the gating system. In the first optimization, the castings did not break out of the gating system by themselves, and even when the casting was finally broken out of the gating system with manual assistance, there was still extra material left for processing, which was not acceptable. To solve this problem in the second optimization, the thickness of the gate was reduced on one side and the added part on the gate was moved closer to the casting. The geometry of the second optimization is shown in Figure 7.

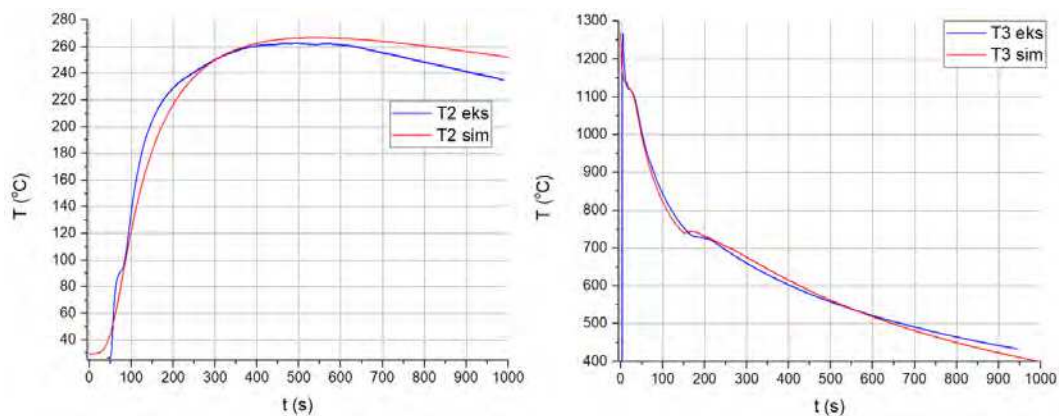
3 Results

The temperatures measured with thermocouples are shown in Figure 8. Figure 9 shows the comparison of the measured temperature with the numerically calculated temperature at the location where the thermocouple was placed. The measured and calculated temperatures are in good correlation with the initial and boundary conditions specified in the numerical calculation. It should be noted that not all variables can be taken into account in the numerical calculation, so the calculated and measured temperatures cannot match 100 %. One of the parameters that have a great influence on the numerical calculations of the casting is the heat transfer coefficient



Slika 8. Izmerjene temperature v formi na označenih mestih (Slika 5).

Figure 8. Measured temperatures in mold at marked locations (Figure 5).



Slika 9. Primerjava izmerjenih in numerično izračunanih temperatur.

Figure 9. Comparison of calculated and measured temperatures.

tem primeru smo glede na priporočila in izkušnje uporabnikov programske opreme HTC opredelili kot funkcijo temperature. Dokler je talina še tekoča, je HTC $550 \text{ W/m}^2\text{K}$, potem pa $400 \text{ W/m}^2\text{K}$. Tak način opredeljevanja HTC se izkaže za boljšega,

(HTC), which can be difficult to set. The heat transfer coefficient at the boundary between the casting and the mold is a boundary condition variable that varies from foundry to foundry due to specific foundry technology. The HTC was defined as a temperature-

kot pa če bi bil opredeljen konstantno. Na ta način upoštevamo spremembo HTC zaradi temperaturne odvisnosti ter zaradi nastanka dodatne reže med ulitkom in formo, ko se ulitek strdi. Izbrane vrednosti HTC glede na minimalno odstopanje izmerjenih in izračunanih temperatur so ustrezne.

Pri prvi optimizaciji dovodnega kanala smo uspešno odpravili krčilno poroznost na samem mestu pripetja. Problem pri prvi optimizaciji se je pojavil v sami proizvodni praksi, in sicer zaradi ulitkov, ki se iz ulivnega sistema na vibracijski mizi niso odlomili. Napaka je nastala zaradi povečanja dovodnih kanalov, ki niso omogočali lomljenja ulitkov iz ulivnega sistema. Na Sliki 10 je primer, kako se ulitki ne odlomijo in ostanejo na ulivnem sistemu, kar pa ni sprejemljivo, saj to pomeni dodatno, predvsem ročno delo. Pri ploščah, ki so se odlomile in ki so bile potem naknadno ročno odlomljene, je ostal tudi večji ostanek dovodnega kanala na obodu plošče, kar je prav tako predstavljalo dodaten problem pri mehanski obdelavi.

Pri drugi optimizaciji smo zmanjšali debelino dovodnih kanalov na meji med dovodnim kanalom ter grelnimi ploščami ter

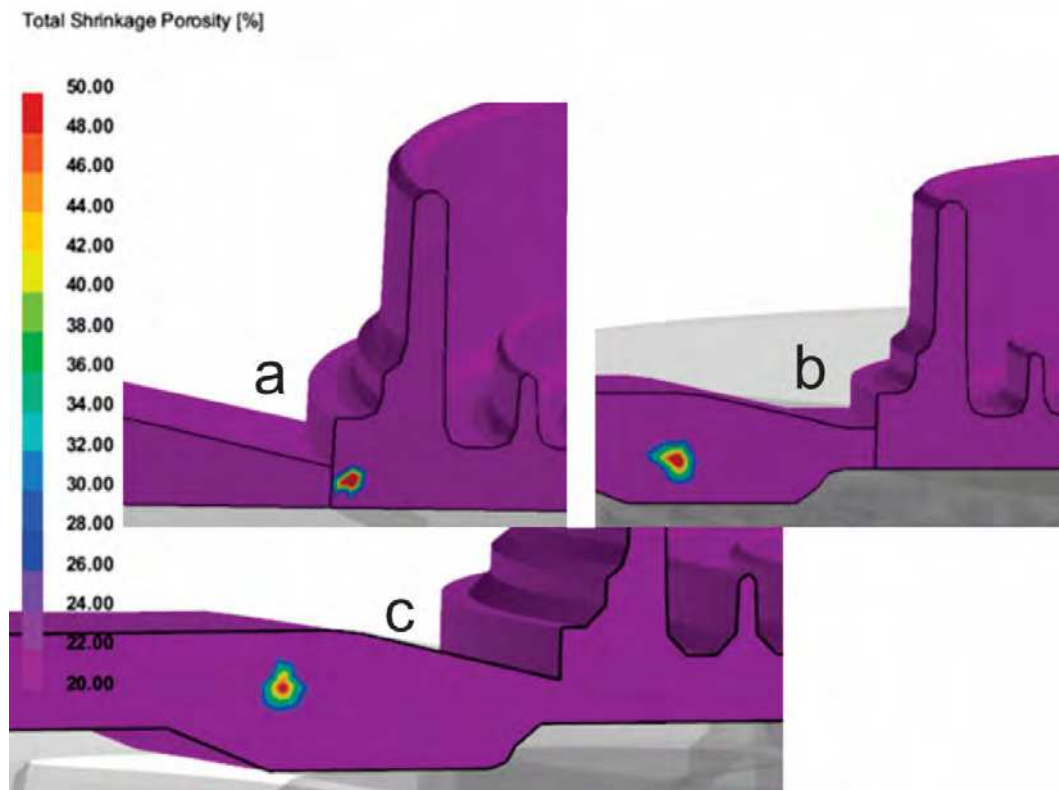
dependent variable in this calculation based on empirical values from software users. The HTC was 550 W/m²K for a liquid melt and when the alloy solidifies, the HTC was 400 W/m²K. This definition of HTC better describes the boundary condition because it accounts for the formation of a gap at the casting and mold boundary as the casting shrinks during solidification and cooling. The defined absolute values of HTC are suitable because of the minimum temperature difference between the measured and calculated temperature.

With the initial optimization of the gates, shrinkage porosity was moved from the critical area into the gating system. However, an additional problem arose during production when the gates were too thick and the castings did not break out of the gating system by themselves. Figure 10 shows castings that did not break out of the gating system by themselves and caused additional manual work, which is not acceptable. An additional problem was also the extra material for machining in the gate area, which was not planned in the existing machining program.



Slika 10. Neodlomljeni ulitki po prvi optimizaciji.

Figure 10. Unbroken castings from the gating system with the first optimization.



Slika 11. Izračunana verjetnost za nastanek poroznosti; a) obstoječe stanje; b) optimizacija ena, c) optimizacija dva.

Figure 11. Calculated probability for shrinkage porosity; a) existing production; b) optimization one, c) optimization two.

približali ojačitev dovodnega kanala bližje meji med dovodnim kanalom ter grelno ploščo kot pomoč pri zmanjšanemu modulu na meji in da bi zagotovimo manjši ostanek dovodnega kanala pri lomljenju ulitka iz ulivno napajalnega sistema – Slika 7.

Z drugo optimizacijo se je mesto poroznosti z območja pripetja ulitka še dodatno premaknilo, tako da je bil osnovni problem odpravljen. Mesto in velikost poroznosti za vse tri različice na podlagi numeričnega izračuna sta prikazana na Sliki 11. Tudi ostanek dovodnega kanala po odlomljenem ulitku iz ulivno-napajalnega

In the second optimization, the thickness of the gates in contact with the casting was reduced and the increasing thermal modulus was moved closer to the heating plate. With this geometry optimization, we achieve a lower thermal modulus at the gate connection to the casting, and the residue on the casting after separation of the casting from the gating system is minimized so that there are no problems when machining the heating plate - Figure 7. In the second optimization, the porosity was additionally removed from the critical area. The location and size of the

sistema je bil po drugi optimizaciji sprejemljiv.

porosity predicted by numerical calculations are shown in Figure 11.

4 Zaključki

Z uporabo numeričnih izračunov smo uspešno ugotovili vzrok za nastanek napak kot tudi preizkusili predlog za optimizacijo, s katero se je mesto poroznosti premaknilo v dovodni sistem, tako da ne predstavlja napake na ulitku. Za zagotovitev natančnosti rezultatov smo med procesom strjevanja in ohlajanja ulitka merili temperaturo in potrdili pravilno opredeljen prestopnostni koeficient, ki ga običajno opredelimo na podlagi izkušenj.

Krčilno poroznost smo odpravili s povečanjem dovodnih kanalov, ki so prevzeli funkcijo napajalnika.

Delež izmeta zaradi poroznosti se je zmanjšali s 3 % na 1,5 %.

4 Conclusion

Numerical calculations were used to determine the cause of the casting defect. The proposed optimization was first analyzed with numerical calculation, in which the shrinkage porosity was moved to the point where it no longer caused problems. The defects calculated with the numerical calculation corresponded with defects from production when the optimized solutions were implemented in production. Using measured temperatures in the mold during solidification of the casting and cooling of the mold, we calibrate the heat transfer coefficient for the foundry to make more accurate calculations for other castings as well.

By optimizing the gates, which now also act as feeders, we reduce the number of defected castings due to shrinkage porosity. The number of defective parts has been reduced from 3 % to 1,5 %.

5 Viri / References

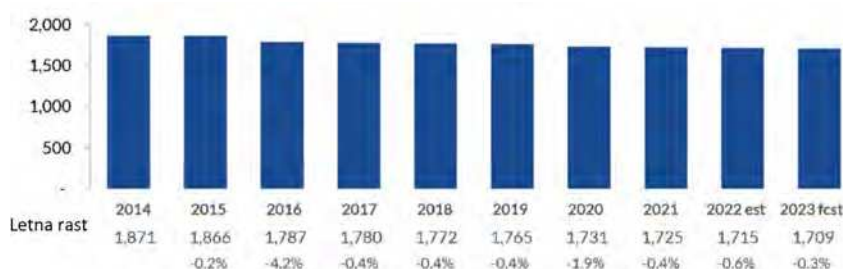
- [1] A. Mahmutović, S. Kastelic, M. Petrič, P. Mrvar, High pressure die casting optimization using numerical simulation, Abstracts proceedings. Ljubljana: Društvo livarjev Slovenije, 2016, str. 76-77.
- [2] I. Vasková, D. Fecko*, L. Eperješi, Comparison of simulation programs Magmasoft and NovaFlow & Solid in terms of results accuracy, Archives of foundry engineering Volume 11, Special 54 Issue 1/2011, 51 – 54.
- [3] E. R. Champio, Finite element analysis in manufacturing engineering; McGraw-Hill Inc., New York, 1992.
- [4] ProCAST 2015.0 User's Guide.

AKTUALNO / CURRENT

Gospodarska napoved: Pričakuje se, da bo prodaja še naprej rasla

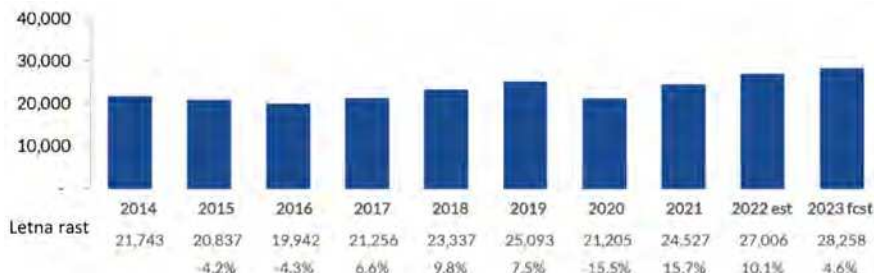
Poročevalci ameriške livarske revije »Modern Casting« obveščajo, da medtem ko večina livarn pričakuje recesijo v letu 2023, redna naročila in polne knjige naročil prinašajo optimizem ameriškim livarjev.

Prodaja ulitkov v ZDA v letu 2022 beleži že drugo uspešno leto rasti. Po upadu prodaje v letu 2020, ko se je skupni industrijski prihodek znižal iz 44.2 milijard US\$ na 36.7 milijard US\$, je ameriška livarska industrija v letu 2021 dosegla prodajo ulitkov v vrednosti 43.3 milijard US\$ in 46.4 milijard US\$ v letu 2022. AFS (Ameriško livarsko združenje) napoveduje še eno leto rasti v letu 2023, čeprav v nekoliko umirjeni obliki v primerjavi z leti okrevanja po pandemiji, to je v letih 2021 in 2022. Pričakovan prihodek za livarstvo v letu 2023 naj bi, po napovedi AFS, znašal 48.3 milijard US\$. To pomeni 4.3 % rast v primerjavi z letom 2022.



Graf 1. Število ameriških livarn (brez vključenih umetniških in izobraževalnih livarn)

V letu 2022 so operativni stroški predstavljali 82.8 % celotnih prihodkov livarn, s prisotno 12.1 % rastjo operativnih stroškov iz leta v leto. Struktura operativnih stroškov livarn pa je bila naslednja: 51.5 % material, 32.8 % zaposleni, 7.3 % vzdrževanje stavb in 8.9 % ostalo. Po poročilu AFS je 89 % livarn dobičkonosnih s povprečnim čistim prihodkom 9,2 % od celotnih prihodkov.



Graf 2. Prihodek na objekt v US\$

Ocenjeno število ameriških livarn (brez vključenih umetniških in izobraževalnih livarn) je 1.715. Prihodek na livarno se je od leta 2021 do leta 2022 povečal za 10.1 %, v letu 2023 pa se pričakuje 4.6 % rast. Ocenjen povprečni letni prihodek livarn naj bi glede na napovedi dosegel 33.7 \$ milijonov do leta 2027.

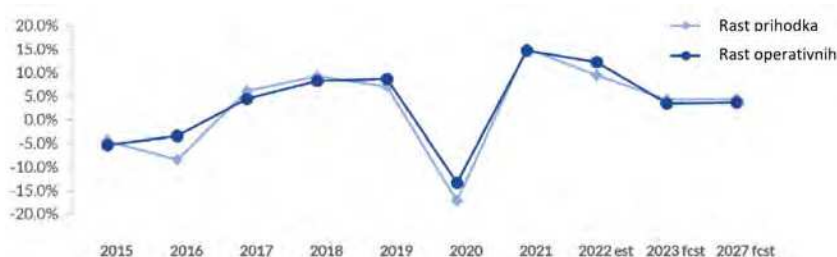
Tabela 1. Trendi v svetovni livarski proizvodnji v letu 2021 (v tonah)

Država	Siva litina	Nodularna litina	Temprana litina	Jeklena litina	Baker	Aluminij	Magnezij	Cink	Druge litine	Skupno
Avstrija	37,100	104,800	-	10,300	-	127,971 ^A	-	-	-	280,171
Belgija	44,500	4,500	-	5,300	-	-	-	-	-	54,300
Brazilija*	1,148,123	468,952	-	269,512	20,524	160,464	4,534	1,064	-	2,073,173
Kanada***	330,841	-	-	90,091	14,237	211,374	-	-	-	646,543
Kitajska	2,550,000	15,950,000	600,000	6,600,000	900,000	7,200,000 ^A	-	-	250,000 ^B	54,050,000
Hrvaška	19,465	6,161	-	120,000	202,000	65,606	-	-	131,000	91,685
Češka	140,000	41,000	-	44,500	18,000	89,000	400,000	900,000	-	333,800
Danska**	28,900	58,100	-	-	1,188	2,224	-	-	112,000	90,524
Finska	20,600	25,500	-	5,700	2,508	3,604 ^A	-	-	-	57,912
Francija	503,900	665,000	-	43,100	17,705	299,016 ^A	-	20,739	2,395	1,551,855
Nemčija	1,873,700	1,140,900	-	143,300	48,425	701,118	15,498	41,095	-	3,964,536
Madžarska	16,300	57,200	-	1,700	701,000	119,026	278,000	1,542	77,000	196,824
Indija	8,623,822	1259,850	50,000	1,049,827	-	1,465,158 ^C	-	-	-	12,448,657
Indonezija	94,680	156,360	-	49,872	-	65,919	-	-	320,800	687,631
Italija	616,200	385,900	-	56,800	51,947	727,254	5,283	95,089	881,000	1,939,354
Japonska	1,831,186	1,339,165	29,834	-	59,585	-	374,042	16,927	904,440	4,555,179
Južna Koreja	850,200	670,100	-	145,400	23,500	620,400	10,000	-	-	2,319,600
Mehika*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,860,000
Norveška**	8,800	22,300	-	-	-	6,526	-	-	-	37,626
Pakistan**	181,000	24,540	-	48,750	14,200	21,200	2,730	-	-	292,420
Pojlska	392,400	135,160	-	43,600	5,232	296,480	-	6,540	2,616	882,028
Portugalska	39,699	76,586	-	4,404	14,699	33,050	-	2,829	-	171,267
Romunija	12,832	1,349	-	2,864	1,143	49,393	2,000	250,000	13,000	69,844
Rusija**	2,184,000	-	1,134,000	-	117,600	588,000	75,600	-	100,800	4,200,000
Slovenija	73,236	44,315	3,100	3,808	1,005	52,692	-	8,187	2,374	188,717
Južna Afrika**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	443,000
Španija	322,800	608,800	-	69,200	12,807	106,185	-	7,973	719,000	1,128,484
Švedska	141,700	47,500	-	21,200	-	-	-	-	-	210,400
Švica	8,600	12,900	-	2,400	2,039	11,726	-	1,054	-	38,719
Tajvan	642,411	212,354	-	69,387	29,997	527,946	5,375	-	-	1,487,470
Turčija	920,700	1,108,100	-	279,300	33,388	578,113	1,011	42,981	-	2,963,593
Ukrajina***	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,560,000
Velika Britanija	128,420	195,600	-	35,373	7,885	97,396	1,900	7,300	-	473,874

*podatki iz leta 2020 | **podatki iz leta 2019 | ***podatki iz leta 2015 | Aaluminij in magnezij | Bpredvsem titan in cink | Cvsbejuje vse neželezne litine

Podrobnosti o gospodarskih napovedih s podatki za pretekla leta so razvidni v Grafih 1, 2 in 3, v Tabeli 1 pa dosežena livarska proizvodnja v letu 2021 po državah, med katerimi so tudi podatki za livarstvo Slovenije. Poročilo za livarsko proizvodnjo po državah je bilo

pripravljeno s strani AFS na podlagi zbranih podatkov od podjetij, Statističnih uradov in vladnih ter drugih agencij in ustanov



Graf 3. Povprečna rast prihodkov v primerjavi s rastjo operativnih stroškov po livarni

Za ta prispevek je bil uporabljen naslednji vir: Livarska revija AFS Modern Casting, januar 2023, članek pod naslovom: »Industry Outlook: Sales Expected to Keep Growing«.

Priredila:
mag. Mirjam Jan-Blažič

AKTUALNO / CURRENT

Seje organov Društva livarjev Slovenije

Društvo livarjev Slovenije (v nadaljevanju Društvo) vsako leto, običajno v februarju, skliče seje vseh organov Društva – to so seje Nadzornega in Izvršnega odbora ter letni Občni zbor, pri eni od svojih članic. Tako je bilo tudi letos. Srečali smo se na lokaciji podjetja Talum d.d. v Kidričevem, dne 23. 02. 2023. Najprej smo izpeljali sejo Nadzornega odbora, po tem je sledila seja Izvršnega odbora, na koncu pa je sledil še redni letni Občni zbor Društva. Vsi člani organov Društva so prejeli pisno poročilo predsednice o delu in finančnem poslovanju Društva v letu 2022, člani Izvršnega odbora in delegati Občnega zbora pa še predlog programa Društva za Leto 2023. Podrobno poročilo o delu Društva v letu 2022 in predlog programa Društva za leto 2023 je na vseh organih podrobno predstavila predsednica Društva, Mirjam Jan-Blažič.

Nadzorni odbor je v zvezi s finančnim poslovanjem Društva v letu 2022 sprejel sklep, da je finančno poslovanje Društva v letu 2022 vodeno v skladu z veljavnimi računovodskimi predpisi za društva, poraba sredstev pa je potekala v skladu s sprejetim programom Društva na Občnem zboru z dne 17. 02. 2022.

Na vseh organih Društva je bilo sprejeto poročilo predsednice o delu in finančnem poslovanju Društva v letu 2022, saj je sprejet program dela Društva za leto 2022 bil v veliki

večini realiziran. Izvršni odbor in Občni zbor sta potrdila predlagan predlog programa dela Društva za leto 2023, ki vključuje v nadaljevanju opisane aktivnosti:

V letu 2023 se načrtujejo nadaljnje izdaje Livarskega vestnika v obsegu štirih izdaj na koncu vsakega kvartala, organizacija 63. IFC Portorož 2023 z livarsko razstavo v času od 13.–15. septembra 2023, udeležba na livarskih dogodkih in sodelovanje s sorodnimi društvi, organizacijami doma in v tujini, nadaljevanje izmenjave Livarskega vestnika s svetovnimi in domačimi livarskimi revijami, priprava statističnih podatkov o livarski proizvodnji v letu 2022 za svetovno statistiko in organizacija naslednjih strokovnih seminarjev:

Skupni seminarji za vse člane Društva livarjev Slovenije

1. Izvajalec: **INDEN d.o.o.**

Lokacija: Gospodarska zbornica Slovenije, Ljubljana, Slovenija

Enodnevni seminar na temo:

Digitalizacija procesov kakovosti v livarski industriji

Predavatelji: Mitja Plos, TÜV SÜD, Ulrich Mangold, direktor iqs, Scott Turley, Robert Bosch GmbH, Peter Korenčan, Inden d.o.o.

Rok izvedbe: 08. 03. 2023

Število udeležencev: Ni omejeno

2. Izvajalec: **Gospodarska zbornica Slovenije**, Strokovna služba za varstvo okolja

Lokacija: Gospodarska zbornica Slovenije, Ljubljana

Enodnevni seminar na temo:

Okoljevarstvena problematika za livarne

Rok izvedbe: 21. 06. 2023

Število udeležencev: Ni omejeno

3. Izvajalec: **Gospodarska zbornica Slovenije**, Strokovna služba za varstvo okolja ali druga inštitucija

Lokacija: Gospodarska zbornica Slovenije, Ljubljana

Enodnevni seminar na temo:

Izračun ogljičnega odtisa

Rok izvedbe: Še nepotrjen

Število udeležencev: Ni omejeno

Seminarji za neželezne livarne

1. Izvajalec: **ÖGI – Avstrijski livarski inštitut**

Lokacija: Leoben, Avstrija

Dvodnevni nadaljevalni seminar s praktičnim delom, pod naslovom:

High-pressure die-casting

Rok izvedbe: 03.–04. 05. 2023

Število udeležencev: Omejeno na 12

2. Izvajalec: **RWP GmbH, Nemčija**

Lokacija: Portorož

Enodnevni nadaljevalni seminar na temo:



Pogled na dvorano pred sejo
Občnega zbora

Heat treatment of Al-parts – ways to achieve better mechanical properties – advanced

Rok izvedbe: 13. 09. 2023

Število udeležencev: Ni omejeno

3. Izvajalec: **Katedra za livarstvo Naravoslovnotehniške fakultete**

Lokacija: Naravoslovnotehniška fakulteta, Ljubljana

Enodnevni seminar na temo:

Vpliv različnih livnih zlitin na vzdržljivost tlačnih orodij

Rok izvedbe: November / december

Seminarji za železne livarne1. Izvajalec: **Hüttenes-Albertus Italija/Nemčija**

Lokacija: Gospodarska zbornica Slovenije, Ljubljana

Enodnevni seminar na temo:

Proizvodne in storitvene možnosti Hüttenes-Albertus za livarne, problematika livarskih peskov, odstranjevanje škodljivega fluora iz peskov in možne rešitve regeneracije livarskih peskov

Rok izvedbe: 06. 07. 2023

Število udeležencev: Ni omejeno

2. Izvajalec: **ÖGI – Avstrijski livarski inštitut**

Lokacija: Leoben, Avstrija

Dvodnevni seminar na temo:

Moulding and core sand materials: Hands-on training

Rok izvedbe: 08.–09. 11. 2023

Število udeležencev: Omejeno na 12

3. Izvajalec: **Katedra za livarstvo Naravoslovnotehniške fakultete**

Lokacija: Naravoslovnotehniška fakulteta, Ljubljana

Enodnevni seminar na temo:

Livarske napake in možne identifikacije le-teh z merilno opremo

Rok izvedbe: November / december

Število udeležencev: Ni omejeno

Na začetku seje Izvršnega odbora je vse prisotne pozdravil direktor Talum d.d. – PE Livarna, mag. Avgust Šibila, pred pričetkom Občnega zbora pa predsednik uprave Talum d.d., g. Marko Drobnič, ki je na kratko predstavil podjetje s proizvodnim programom in dosežki ter v luči enormnega povečanja cen električne energije tudi spremembe v proizvodnem programu, kjer je predvidena ustavitev elektrolize oz. proizvodnje primarnega aluminija. Po seji Občnega zbora nam je gostitelj omogočil ogled obrata elektrolize in livarske proizvodnje v PE Livarna. Obisk v Talumu smo končali še z neformalnim druženjem na kosilu. Društvo se v imenu vseh udeležencev prijazno zahvaljuje vodstvu Taluma za izkazano odlično gostiteljstvo in organizacijo, s katerimi so bili omogočeni vsi potrebni pogoji za uspešno izpeljavo potrebnih aktivnosti Društva in druženje članstva.

Poročala: *mag. Mirjam Jan-Blažić*

AKTUALNO / CURRENT**Seminar Združenja hrvaških livarjev v Varaždinu**

Združenje hrvaških livarjev je 3. marca letos v Varaždinu organiziralo enodnevni mednarodni znanstveno-strokovni seminar pod naslovom: »**Proizvodnja ulitkov iz železovih litin in Al-zlitin v peščenih ali trajnih formah**«.

Seminarja se je udeležilo 108 udeležencev, od katerih je 54 % bilo domačih hrvaških znanstvenikov in strokovnjakov, močno pred ostalimi pa so bili z 29 % udeleženci iz Slovenije. Preostalih 17 % je bilo iz Bosne in Hercegovine (7 %) in iz Srbije (6 %) ter iz Črne Gore, Avstrije, Italije, Anglije, Švedske in Češke Republike. Seminar je spremljala tudi manjša livarska razstava.

Organizator je s programom predavanj in s predstavljeno implementacijo znanj in tehnologij želel pokazati, da livarji prispevamo pomembno dodano vrednost znotraj kovinsko predelovalne industrije. Predstavljena predavanja iz programa seminarja so zbrana v Knjigi izvečkov, katero so vsi udeleženci prejeli ob prihodu na seminar.

V nadaljevanju predstavljamo predavatelje in teme, ki so bile posredovane na seminarju:

Roman Capuder, Maja Žajdela, Termit d.d., Slovenija

Production process and characteristics of sand moulding making

Zala Drešar, mag. kem., Exoterm-IT d.o.o., Slovenija

A new generation of coatings for the foundry industry, based on sol-gel technology

DI J. Hagenauer, K. Schmid-Schmidfelden, Hagi GmbH, Avstrija

Commercial presentation AI brings investments in the foundry – here using the example of 3D sand printing

Jovan Lošić, Bore Rakita, Bentoproduct d.o.o., Bosna in Hercegovina

Alkaline activated bentonite production and application in foundry

Dr. sc. Alen Delić, dipl. ing. Met., NovaCastSystems AB, Švedska

Commercial presentation Casting process simulation and metallurgical process management system



Predsednica Društva, mag. Mirjam Jan-Blažić s predavateljem dr. Alenom Delićem (levo), Nova Cast Systems AB in Josipom Mačkom (desno).



Pogled na dvorano v času seminarja.

Ilija Marić, ing. met., Srećko Tot, dipl. ing. rud., Udruga za promicanje zaštite ljudi u radnoj i životnoj okolini Međimurske županije, Hrvatska

Implementation of occupational safety measures in the foundry industry

Jernej Puglej, Silvin Lesnik, ToGo, Slovenija

Commercial presentation ToGo production

Matej Vurcer, Jernej Šumečnik, PSR, Slovenija

Commercial presentation Finishing of castings in times of labor shortage

Desimir Bobinac, mag. ing. met., Branislav Branković, dipl. ing. met., Ferro-Preiss d.o.o., Hrvatska

Production of moulds and grey and nodular castings in technology of chemically bonded sand mixture

Nenad Drvar, Topomatika, Hrvatska

Commercial presentation Topomatika – overview of services

Zlatko Šincek, MIV d.o.o., Hrvatska

Large moulds for ductile iron castings

Dr. sc. Mario Šercer, Ivana Mihalić, Metalska jezgra, Hrvatska

Commercial presentation Metal core Čakovec – challenges and opportunities

Goran Pavlinić, Vatrostalac, Hrvatska

Commercial presentation Vatrostalac d.o.o. Krapina

Polona Stenovec, mag. inž. strojništva, univ. dipl. rof. Kemije i biologije, Ljiljana Werner-Pavlic, Commerce trgovina d.o.o., Slovenija, Werner Metal-export import d.o.o., Hrvatska

Determination of possible relationships between the quantity of collected slag, the type of solvent used in the refining process of the aluminium melt and measured concentrations of the emissions of selected gases and dust particles in the company Impol d.o.o.

Matko Kolić, mag. dipl. ing., Saint Jean Industries, Hrvaška

Permanent moulds for aluminium alloy castings

Danijel Polc, dipl. ing. met., Tomislav Jakopčić, tehnolog lijevanja i automatizacije Metal Product, Hrvaška

Production automation – robotic chip removal

V današnjih časih zelo hitrega tehnološkega razvoja se kažejo stalne potrebe po modernizaciji obstoječih proizvodnih postopkov in hitro osvajanje in vključevanje novih tehnologij. Zato so v ospredju potreba po nenehnem izobraževanju in izmenjavi izkušenj, ki omogočajo, da so podjetja in livarski strokovnjaki lahko kos tem izzivom. Seminar v Varaždinu je pokazal, da smo v zadnjih treh letih zelo pogrešali strokovne socialne kontakte, ki so bili prekinjeni zaradi pandemije koronavirusa, zato je enodnevno srečanje minilo v odličnem delovnem vzdušju in pogovorih o doseženih rezultatih in pridobljenih izkušnjah v preteklih izgubljenih letih za sodelovanje.

Poročala: *mag. Mirjam Jan-Blažić***AKTUALNO / CURRENT****Seminar o digitalizaciji procesov kakovosti
v livarski industriji**

Društvo livarjev Slovenije (v nadaljevanju Društvo) je kot organizator prvi enodnevni seminar iz programa Društva za leto 2023, pod naslovom: Digitalizacija procesov kakovosti v livarski industriji, izvedlo 8. marca letos, na lokaciji Gospodarske zbornice Slovenije v Ljubljani. Izvajalec seminarja je bilo podjetje Inden d.o.o. – mlado in hitro rastoče podjetje, ki se ukvarja z razvojem naprednih informacijskih rešitev na področju industrije in energetike. Osredotoča se na uvajanje digitalizacije papirnatih procesov v cilju zagotavljanja boljšega nadzora, sledljivosti in transparentnosti proizvodnih procesov. Seminarja se je udeležilo 22 slušateljev. Predavatelji



Scott Turley, Robert Bosch GmbH, na online povezavi.

so bili domači in tuji strokovnjaki. V prvem delu je sodeloval g. Ulrich Mangold, mag. strojništva in poslovni skrbnik iqs (Integrated Quality Systems), ki je v času od 2007–2020 bil zaposlen v poslovnem sistemu Bosch v Nemčiji, Španiji, Nizozemski in Avstraliji. Skupaj z g. Scottom Turleyem iz firme Bosch, ki se je vključil online na seminar, sta predstavila pomen kakovosti za OEM podjetja (Original Equipment Manufacturer) v luči današnjih sprememb in zahtev ter pota potrebne digitalizacije vseh poslovnih in proizvodnih faz, ki morajo zagotoviti uspešno obvladovanje vseh procesov in s tem tudi doseganje odličnosti v kakovosti. Seminar je v tem delu potekal kot panel razprava.

V drugem delu je predavatelj Mitja Plos iz podjetja TÜV SÜD Sava d.o.o., ki se ukvarja s certificiranjem, zagotavljanjem kakovosti in tehničnim nadzorom, predstavil izkušnje pri uvajanju sistemov vodenja kakovosti in z njimi povezanimi metodami. Predavanje je bilo predstavljeno generalno po naslednjih vsebinskih sklopih:

- Standardi sistemov vodenja kakovosti.
- Reference za uporabo metod.
- Metode in povezave med njimi.
- Zahteve standarda ISO 9001 in povezava z metodami.
- Najpogostejše napake pri uporabi metod.
- Splošne izkušnje z uporabo metod.

Zelo pogosto uporabljena kratica v predavanju je bilo že dobro znano orodje kakovosti FMEA (Failure Mode and Effect Analysis), ki ima že dolgo zgodovino svojega razvoja in uporabe. Gre za koristno analizo, ki predvideva rizike in jih tudi eliminira ali zmanjšuje in jih postavlja pod kontrolo oziroma v veliki meri olajša upravljanje z riziki. Tudi v današnjih pogojih se to orodje v novi luči zahtev priporoča.



Pogled na predavalnico v času seminarja.

Funkcijo povezovalca razprav med predavatelji in slušatelji je na seminarju uspešno opravil Peter Korenčan, predstavnik izvajalca seminarja – Inden d.o.o.

Poročala: *mag. Mirjam Jan-Blažić*



DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE

Vabilo za

63. IFC PORTOROŽ 2023

z livarsko razstavo

13. - 15. SEPTEMBER 2023

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



Družba TERMIT je rudarsko podjetje
za pridobivanje kremenovih peskov



NAŠ PROGRAM:

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