

LIVARSKI VESTNIK

Izdajatelj / Publisher:

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

Glavni in odgovorni urednik / Chief and responsible editor:

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

Tehnično urejanje / Technical editing:

mag. Mirjam Jan-Blažič

Uredniški odbor / Editorial board:

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

Prevod v angleški jezik / Translation into English:

Marvelingua, Aljaž Seničar s.p.

Lektorji / Lectors:

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

Tisk / Print:

Fleks d.o.o.

Naklada / Circulation:

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

Letna naročnina: 35 EUR z DDV

Year subscription: 35 EUR (included PP)

Dano v tisk: oktober 2018



Naslov/adress:

CALDERYS Deutschland GmbH
Office Austria
IZ Nö-Süd, StraÙe 16, Objekt 69/7
A-2351 Wiener Neudorf

T: +43 2236 677090 +DW
F: +43 2236 677093 - 11
E: austria@calderys.com
www.calderys.com

VSEBINA / CONTENTS

Stran / Page:

Ingo Hahn, Jörg C. Sturm: **Vpeljava simulacije v avtonomno optimizacijo / Simulation evolves to autonomous optimization** 122

Moritz Riebisch, Björn Pustal, Andreas Bührig-Polaczek: **Kumulativni vpliv legiranih elementov na mikrostrukturo s trdno raztopino legirane nodularne litine / Accumulative impact of alloying elements on the microstructure of solid solution strengthened ductile iron** 140

Rebeka Rudolf, Mohammed Shariq, Urban Ferčec, Alojz Križman, Peter Majerič: **Nanotehnologija v metalurgiji: analiza stanja in napoved razvoja / Nanotechnology in metallurgy: Status analysis and prediction of development** 159

B. Betik C. Wilding: **Sekundarna tehnologija regeneracije peska no-bake za zmanjšanje stroškov in izboljšanje livarskega okolja / Secondary no-bake sand reclamation technology to reduce the cost and improve the foundry environment** 170

AKTUALNO / CURRENT

58. mednarodno livarska konferenca – IFC Portorož 2018 176

Koledar livarskih prireditev 2018 in 2019 194

WFO-TECHNICAL FORUM and 59th IFC PORTOROZ 2019 195

Vpeljava simulacije v avtonomno optimizacijo

Simulation evolves to autonomous optimization

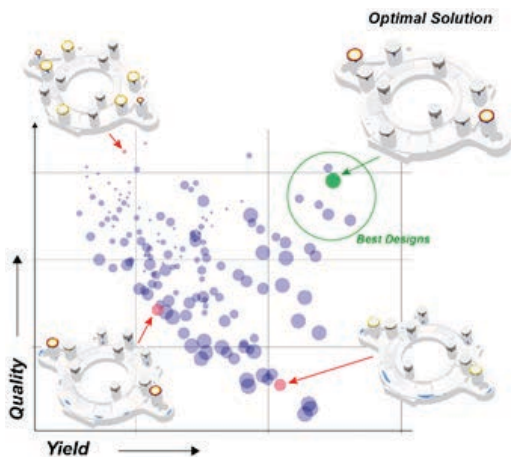
Po skoraj 30 letih, odkar je prisotna v industriji litja kovin, je simulacija procesa litja splošno sprejeto orodje tako v inženirskih oddelkih livarjev kovin kot pri oblikovanju orodja in ulitkov. Simulacije navadno izvajajo izkušeni tehniki – v rezultatih simulacije se zato zrcalijo njihove izkušnje s področja litja kovin kot tudi strokovno znanje. Vsako posamezno simulacijo lahko primerjamo z virtualnim poskusom. Na podlagi rezultatov simulacij ti inženirji na primer ocenijo, ali izbrani dovajalni sistem ali konfiguracija procesnih parametrov zagotavljajo sprejemljive kakovosti ulitka ob sprejemljivih stroških in nato predlagajo spremembe za iskanje boljših rešitev.

Pri postopku litja kovin se hkrati odvija mnogo med seboj tesno povezanih procesov. To je po eni strani sicer ključna prednost litja kovin v primerjavi z drugimi proizvodnimi procesi, vendar pa zahteva

Almost 30 years after its introduction into the metal casting industry, casting process simulation is a widely accepted tool in the engineering department of metal casters as well as in the design of tooling and castings. Simulations are typically performed by experienced technicians – the simulation results, therefore, reflect their metal casting experience, considerations and know-how. Each individual simulation is comparable to a virtual experiment. Based on the simulation results, these engineers evaluate e. g. whether a chosen rigging system or process parameter configuration leads to acceptable casting quality at acceptable costs and then propose changes to find improved solutions.

In the metal casting process, everything happens at the same time and is closely coupled. While this can be seen as a key advantage of metal casting over other manufacturing processes, it also makes decisions regarding the best, or at least an adequate, layout for a casting complex. Changing one process parameter, due to its interaction with other parameters, can have a multitude of impacts on the rest of the process and can influence the final casting quality in many different ways. This makes it challenging to manually optimize a casting process by evaluating the casting quality based on real-world trials and pursuing quality and economic objectives simultaneously.

Today's requirements on the development of a casting and the corresponding metal casting process



sprejemanje odločitev za zagotavljanje najboljših ali vsaj primernih načrtov v primeru izdelavi kompleksnih ulitkov. Izbira enega procesnega parametra zaradi njegove interakcije z drugimi parametri ima lahko večstranski vpliv na preostanek procesa ter na številne načine vpliva na končno kakovost ulitkov. Zato je ročna optimizacija procesa litja skozi oceno kakovosti ulitka na podlagi realnih preizkusov in hkratno prizadevanje za izpolnjevanje ciljev v zvezi s kakovostjo in gospodarnostjo še dodaten izziv.

Danes zahteve glede razvoja ulitkov in s tem povezani procesi litja kovin narekujejo metodologije in orodja, ki omogočajo največji izkoristek robustnosti in dobičkonosnosti procesa že v najzgodnejših fazah. Običajno se izvajanje izboljšav v praksi zmanjša na malo število dejanskih preizkusov v fazi razvoja, omejuje pa ga napor, povezan s spreminjanjem procesnih parametrov v serijski proizvodnji. Kvantitativno vrednotenje dejanske kakovosti ulitka na podlagi preizkusov litja ob zmanjšanem številu potrebnih preizkusov za optimizacijo procesa litja ostaja izziv.

Za razliko od preizkusov v praksi je avtonomna optimizacija s pomočjo simulacijskih orodij mnogo bolj prilagodljiva. Avtonomna optimizacija inženirjem omogoča sočasno in med seboj neodvisno spreminjanje več parametrov, npr. v zasnovi ulitka in načrtovanju procesa litja, individualno in kvantitativno pa je mogoče ovrednotiti tudi merila kakovosti. V kombinaciji z uveljavljenimi orodji za statistično načrtovanje preizkusov se lahko simulacija procesa litja uporablja za avtonomno optimizacijo procesov in zasnov litja [1]. Programska oprema hkrati upošteva več ciljev in je najboljši kompromis med njimi na podlagi temeljnih načel. Samodejna ocena vseh simuliranih meril kakovosti omogoča hitro in preprosto

demand methodologies and tools which allow a maximization of process robustness and profitability at the earliest possible point in time. Typically, the freedom to make improvements is in practice reduced to a small number of real trials during the development phase and is limited by the effort connected with changing process parameters in series production. A quantitative estimate of real casting quality based on casting trials and a reduction of the required number of experiments to optimize the casting process remains a challenge.

Opposed to real-world trials, autonomous optimization using simulation tools provides significantly more flexibility. Autonomous optimization enables engineers to modify several parameters, i.e. in the casting design and in the casting process layout, simultaneously and independently from each other, and quality criteria can be individually and quantitatively evaluated. Combined with established tools from statistical design of experiments, casting process simulation can be used to autonomously optimize casting processes and designs [1]. The software follows several targets simultaneously and finds the best compromise between them based on first principles. The automated assessment of all simulated quality criteria can be used to quickly and easily find the optimal route to achieve the desired objectives. In addition, the number of real-world trials can be reduced and the impact various process parameters have on reaching a robust process window can be assessed in early phases of casting, tooling and process development [2].

The new methodology of autonomous optimization is not a replacement for process knowledge and expertise. Based on the technical and economical boundary conditions for his process, the

iskanje optimalnih rešitev za uresničitev želenih ciljev. Prav tako je mogoče zmanjšati število preizkusov v realnem svetu, vpliv, ki ga imajo različni procesni parametri na doseganje okvirnega procesnega okna, pa je mogoče ovrednotiti v zgodnjih fazah litja, oblikovanja orodij in razvoja procesa [2].

Nova metodologija avtonomne optimizacije ne nadomešča znanja in izkušenj s procesi. Na podlagi tehničnih in gospodarskih mejnih pogojev za ta proces mora livarski inženir določiti, katere parametre lahko spreminja in v kolikšnem obsegu v kombinaciji z zahtevami glede litja ter cilji, ki jih mora doseči. Te cilje je mogoče izmeriti s povezovanjem z ustreznimi merili kakovosti. Vprašanja, ki jih je treba upoštevati pri programski opremi, so preprosta: Kaj pomeni dober odvajalni sistem? Kako dosežem robustno procesno okno? Kako izberem procesne pogoje, ki zagotavljajo zahtevano kakovost litja? Da bi lahko odgovorili na ta vprašanja, moramo razpolagati s kvantitativnimi opisi pomembnih vplivnih dejavnikov, izmerljivimi kazalniki kakovosti in stroškov ter cilji, ki jih je treba doseči. Tako kot optimizacija procesa litja v praksi je tudi avtonomna optimizacija osnovana na treh temeljnih komponentah (Slika 1):

- Spremenljivi procesni parametri (na zasnovo vezane spremenljivke)
- Izbrana merila kakovosti (izhodne vrednosti) kot izračunani kvantitativni rezultati
- Različni cilji

Do danes so orodja za simulacijo procesa litja inženirji v livarski industriji uporabljali za potrditev sklopa izbranih procesnih parametrov in oceno načrta litja. Inženirji nato izvedejo ročne spremembe v procesnih parametrih ali geometrijah, kot so razdelilniki, kanali ali orodja, da bi se čim bolj približali zastavljenim ciljem, postopek pa ponavljajo, dokler ne najdejo zadovoljive

foundry engineer needs to specify which parameters he has the flexibility to change and by how much, in combination with the requirements placed on the casting and the objectives to be achieved. These objectives are made measurable by relating them to corresponding quality criteria. The questions to be addressed to the software are simple: What characterizes a good gating system? How do I accomplish a robust process window? How do I select process conditions that provide the required casting quality? Quantitative descriptions of the important influencing factors, measurable quality and cost indicators, and the goals to be achieved are required to answer these questions. Just as when optimizing a casting process in the real-world, autonomous optimization uses the same three basic components (Figure 1):

- Variable Process Parameters (design variables)
- Selected Quality Criteria (output values), as calculated quantitative results
- Differing Goals (objectives)

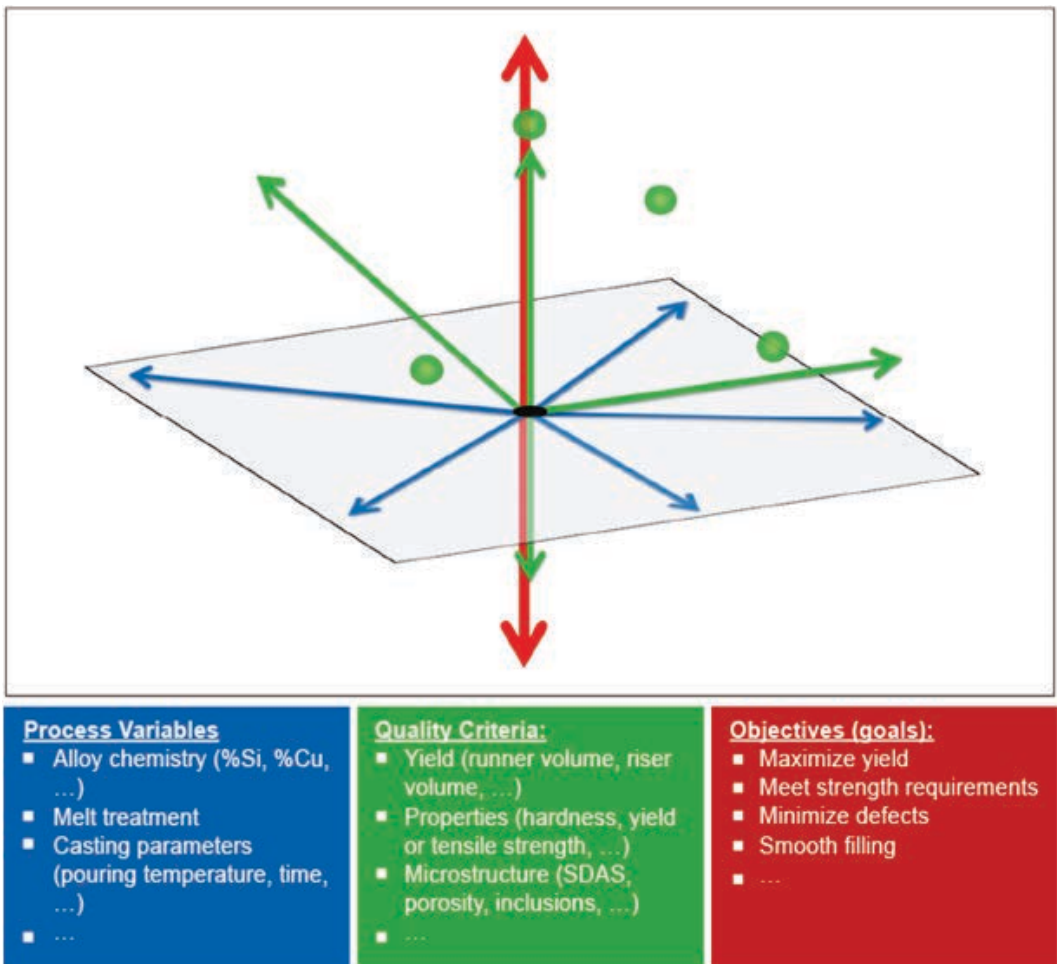
Up to today, casting process simulation tools have been used by metal casting engineers to confirm a set of selected process parameters and evaluate a given casting layout. They then make manual changes to process parameters or geometries, like runners, gates or tooling, to get closer to achieving the objectives they have in mind, and repeat this process until they find a solution with which they are satisfied. This step-by-step approach can be described as 1-dimensional, manual optimization (Figure 2).

In MAGMASOFT®, this internal loop (gray) is now fully automated. It can be expanded by setting up an autonomous design of experiments (autonomous DOE) where variable geometry and process parameters are predefined (blue). This creates a set of designs, which can be run

rešitve. Ta pristop dela po korakih lahko opišemo kot enodimenzionalno ročno optimizacijo (Slika 2).

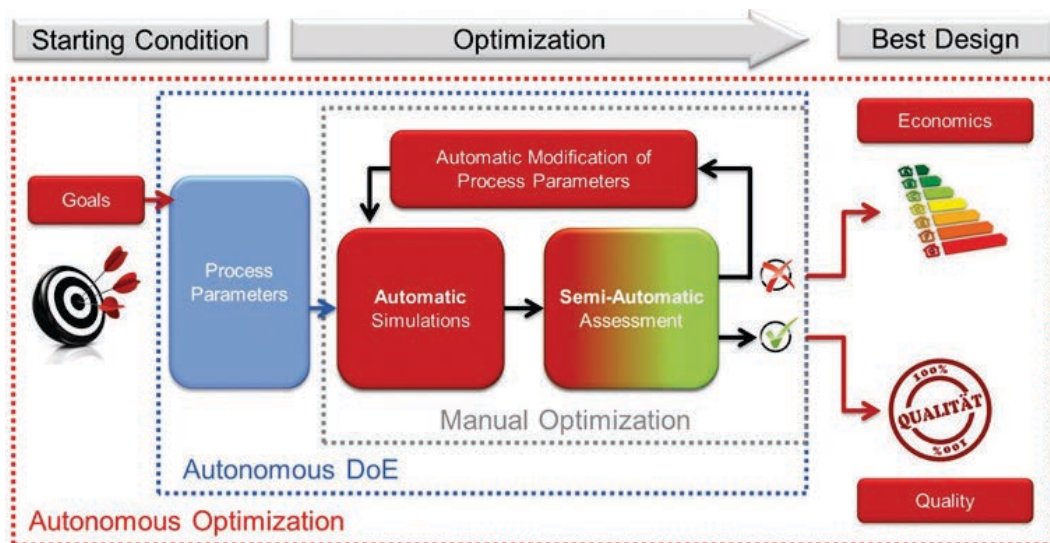
V družbi MAGMASOFT® je ta notranja zanka (siva) zdaj povsem avtomatizirana. Razširiti jo je mogoče z določitvijo avtonomnega načrtovanja eksperimentov (avtonomni DOE), kjer so spremenljiva

avtomatično to e.g. change the number, location and size of risers or change process related parameters or vary metal chemistry. For each virtual casting trial or design, the program automatically evaluates the defined quality criteria. These criteria can be based on any of the results available in MAGMA⁵, i.e. process information like



SI. 1: Virtualni prostor za avtonomno optimizacijo je sestavljen iz različnih procesnih parametrov, izračunanih meril kakovosti in optimizacijskih ciljev, opredeljenih v programski opreml.

Fig. 1: Virtual design space for autonomous optimization composed of varying process parameters, calculated quality criteria, and optimization goals defined in the software.



Sl. 2: Različne metodologije optimizacije za iskanje najboljše rešitve

Fig. 2: Various optimization methodologies for finding the best solution

geometrija in procesni parametri določeni vnaprej (modra). Tako se zagotovi niz zasnov, ki jih je mogoče samodejno zagnati npr. za spremembo števila, mest in velikosti napajalnikov ali spremembo s procesom povezanih parametrov ali za različne kemijske sestave kovin. Program samodejno oceni opredeljeno merilo kakovosti za vsak virtualni preizkus litja ali zasnove. Ta merila so lahko zasnovana na katerem koli rezultatu, ki je na voljo družbi MAGMA⁵, tj. procesni informaciji, kot je čas strjevanja, kakovostni informaciji, npr. o poroznosti ali ujetem zraku, ali opisu značilnosti lokalnih mikrostruktur in lastnosti, kot je razmik med dendritskimi vejami, število vozlov ali natezna trdnost.

Vključevanje ciljev vodi do celovite avtonomne optimizacije (rdeče), kjer so simulirane zasnove samodejno ocenjene glede na podlagi njihovega prispevka k ciljem, ki včasih niso enotni. To pomeni, da mora tako kot livar kovin pri svojem delu tudi program poiskati kompromise med različnimi zahtevami glede litja in

solidification time, quality information like porosity or entrapped air, or characterization of local microstructures and properties such as dendrite arm spacing, nodule count or tensile strength.

Integrating objectives leads to a complete autonomous optimization (red), where simulated designs are automatically assessed with regard to how they contribute to the, sometimes conflicting, objectives. Just like the metal caster in his daily work, this means that the program needs to find compromises between different demands on the casting and process (e.g. avoiding critical porosity while maintaining an acceptable yield). Using genetic algorithms and statistical tools, the program can follow these conflicting goals simultaneously and learn from the results of the virtual casting trials which are carried out.

The following are selected examples of how this new approach supports foundry engineers to systematically develop their process understanding to develop robust

procesa (npr. izogibanje kritični poroznosti ob ohranjanju sprejemljivega izkoristka). Z uporabo genetskih algoritmov in statističnih orodij lahko program hkrati sledi neenotnim ciljem in se uči iz rezultatov izvedenih virtualnih preskusov litja.

Spodaj so navedeni izbrani primeri, kako ta nov pristop podpira inženirje v livarski industriji pri sistematičnem razvoju njihovega znanja za razvoj robustnih načrtov in livnih procesov že pred vsakim litjem.

Ocena in optimizacija čistosti jeklenega ulitka

Čistost je ključno merilo, ki določa kakovost sodobnih jeklenih ulitkov. Aglomeracija vključkov na kritičnih predelih pogosto pomeni predolge čase čiščenja in lahko privede do nesprejemljivega zmanjšanja mehanskih lastnosti. Ulitki se zato pogosto zavržejo zaradi površinskih napak zaradi vključkov, ki se odkrijejo med strojno obdelavo.

Večino vključkov pri jeklenih ulitjih povzroči ponovna oksidacija kovine prek stika z zrakom med postopkom polnjenja form. Splošno znano je, da se livarski inženirji upirajo temu mehanizmu s pametno zasnovanimi odvajalnimi sistemi. Vedo, da vodijo počasen pretok in preprečevanje nastajanja zračnih žepkov med tokom kovine do bistveno večje čistosti.

Čistost realnih ulitkov lahko ocenimo samo s površinsko obdelavo, štetjem vključkov in statističnim ovrednotenjem dvodimenzionalnih vzorcev. Da bi preprečili uničenje vzorca, je treba preiskavo izvesti na posebej ulitih vzorcih, kar pomeni, da je ocenjena samo metalurška kakovost. Pomembni učinki lokalnih vzorcev pretoka znotraj jeklenega ulitka se popolnoma zanemarijo. Ocena preskusnega postopka porazdelitve nekovinskih vključkov je vselej

layouts and casting processes before the first metal is poured.

Assessment and optimization of cleanliness of a steel casting

Cleanliness is a key criterion determining the quality of modern steel castings. The agglomeration of inclusions in critical sections often means excessive cleaning times and can lead to an unacceptable reduction in mechanical properties. Castings are frequently scrapped due to inclusion related surface defects discovered during machining.

Most inclusions in steel castings are caused by re-oxidation of the metal through contact with air during the mold filling process. It is a well-known fact that foundry engineers counteract this mechanism with cleverly designed gating systems. They know that calm flow patterns and avoiding the creation of air pockets in the metal flow lead to significantly better cleanliness.

The cleanliness of a real-world casting can only be evaluated by surface machining, counting inclusions, and a statistical evaluation of two-dimensional samples. To avoid destroying the casting, this investigation may be carried out on separately cast samples, meaning that only the metallurgical quality is evaluated. The important effects of local flow patterns inside the steel casting are completely ignored. The experimental assessment of the distribution of non-metallic inclusions is always time and cost consuming and not practical to implement in production for each casting.

Autonomous DOEs and optimization, however, can be quickly run with minimal effort. They allow for the systematic variation and the quantitative evaluation of different gating layouts (Figure 3). In this example, the impact of gating design on the number and distribution of re-oxidation

zamudna in draga, prav tako pa njena izvedba med proizvodnjo posameznih ulitkov ni praktična.

Avtonomno načrtovanje eksperimentov in optimizacijo pa lahko izvedemo hitro in z minimalnim naporom. Omogočata sistematično spreminjanje in kvantitativno ocenjevanje različnih načrtov odvajanja (Slika 3). V tem primeru smo proučili zasnove odvajalnega sistema na število in distribucijo reoksidiranih vključkov na površini jeklenega ulitka. Programska oprema je obdelala dvanajst različnih predpripravljenih načrtov odvajanja. Vsaka simulacija v sklopu avtonomnega načrtovanja je bila določena in izračunana brez vsake interakcije uporabnika programske opreme, rezultati pa so bili ocenjeni na podlagi zadevnih meril kakovosti. Na Sliki 3 so v paličnem grafikonu prikazane različne zasnove in razvrščene glede na čistost površine. To omogoča hitro izbiro dobrih in slabih zasnov, kajti vezane so na to kakovostno merilo. Dobri (3) in manj učinkoviti (10) odvajalni sistemi so prikazani na Sliki 3, vsak poleg ustreznega simuliranega rezultata čistosti površine.

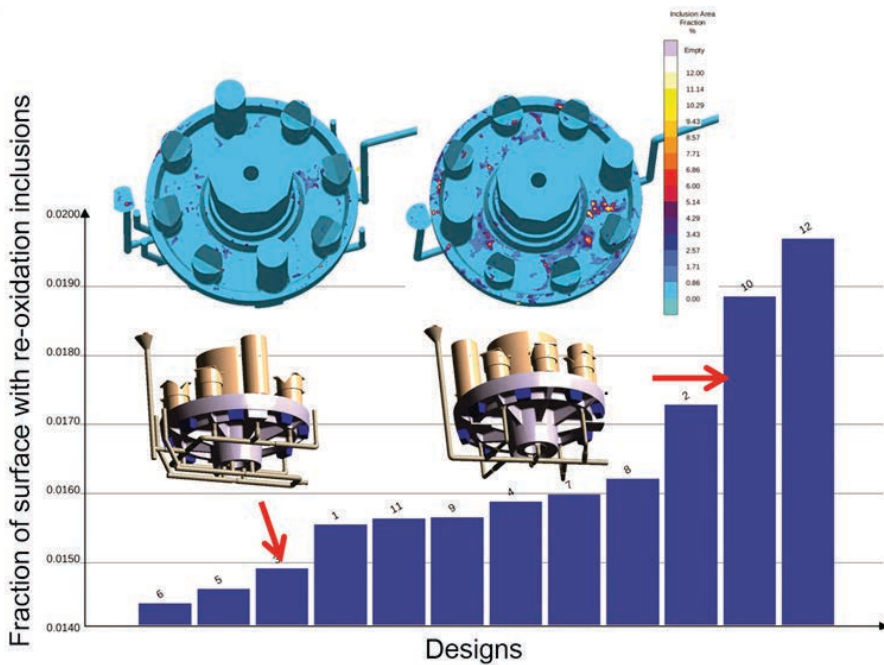
Na Sliki 4 je ocena kakovosti površine štirih izbranih zasnov. Prikazano je dodatno kakovostno merilo, tj. stopnja zvrtničenja med postopkom polnjenja. Zlahka ga je mogoče oceniti na podlagi obsega površine na prednji strani kovine, ki je bila dovzetna za oksidacijo med polnjenjem. Zasnova z največjim številom površinskih vključkov ima tudi najbolj zvrtničen vzorec polnjenja. Ta graf znova potrjuje splošno sprejete soodnosnosti med mirnim vzorcem polnjenja in večjo čistostjo. Avtonomna optimizacija omogoča hitro in varno oceno količinskih meril kakovosti. Primerjalno vrednotenje rezultatov avtonomne optimizacije omogoča določitev soodnosnosti med procesnimi parametri in merili kakovosti.

inclusions on the surface of a steel casting was investigated. The software ran twelve different previously prepared gating designs. Without any interaction of the software user each simulation in the autonomous DOE was set up, calculated, and its results were assessed based on relevant quality criteria. The different designs are shown in the bar chart in Figure 3 and ordered according to their surface cleanliness. This allows for a fast selection of good and bad designs as they relate to this quality criterion. A good (#3) and a less effective (#10) gating system are displayed in Figure 3, each adjacent to its respective simulated surface cleanliness result.

Figure 4 assesses the surface quality of four selected designs. As an additional quality criterion, the degree of turbulence during the filling process is shown. This can be easily evaluated using the amount of surface area on the metal front which was available for oxidation during filling. The design with the most surface inclusions also shows the most turbulent filling pattern. This chart reconfirms the commonly accepted correlation between a quiet filling pattern and better cleanliness. Autonomous optimization provides the opportunity to quickly and safely assess quantitative quality criteria. The comparative evaluation of autonomous optimization results allows the determination of correlations between process parameters and quality criteria.

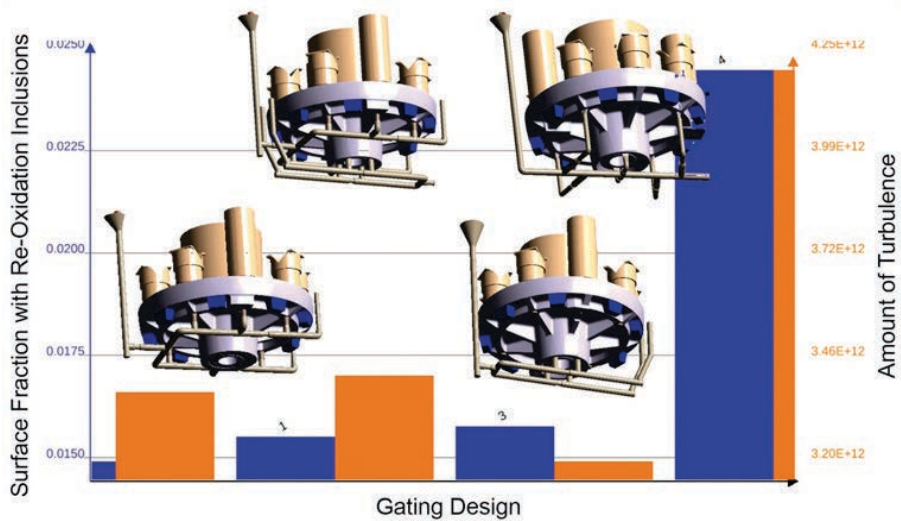
Riser optimization for a planetary gear carrier

Autonomous optimization allows foundry engineers to locally assess casting quality based on any quantitative quality criteria. Combining this with the flexibility to vary almost any casting process and design related parameters opens nearly unlimited



SI. 3: Samodejna in kvantitativna ocena več zasnov ulivnih sistemov v odnosu s kakovostjo površine

Fig. 3: Automatic and quantitative assessment of several gating designs as they relate to surface quality



SI. 4: Ocena kakovosti površine in turbulenc med polnjenjem pri štirih zasnovah odvajanja

Fig. 4: Assessment of surface quality and turbulence during filling for 4 gating designs

Optimizacija napajalnika nosilca planetnega gonila

Avtonomna optimizacija livarskim inženirjem omogoča lokalno oceno kakovosti ulitka na podlagi kvantitativnih meril kakovosti. Skupaj s prilagodljivostjo za prilagajanje skoraj vseh postopkov litja in parametrom v povezavi z načrti se odpre skoraj neomejena paleta možnosti glede ocenjevanja najpomembnejših dejavnikov, ki vplivajo na kakovost litja, in za določitev optimalne konfiguracije za proizvodnjo.

V tem primeru je optimizirana konfiguracija napajalnika za izdelavo nosilca planetnega gonila iz nodularne litine (Slika 5). Napajanje kritičnega območja prirobnice (prekinjena rdeča črta) omogoča kombinacija napajalnikov na zgornji strani in več hladil zunaj tega predela in pod njim. Dodatna spremenljivka je možnost zvečanja debeline predela pod napajalniki (obloga), kar privede do različnih načrtov.

Več parametrov je bilo spremenjenih, da bi lahko ocenili, kateri pomembno vplivajo na poroznost pri krčenju na kritičnem predelu. Proučevali smo zlasti vpliv velikosti napajalnikov, velikosti obloge in konfiguracije hladila zunaj kritičnega območja in pod njim. To je privedlo do avtonomnega načrtovanja eksperimentov (DOE) z 32 avtonomnimi možnostmi zasnove s programsko opremo.

Rezultati načrtovanja eksperimentov (Slika 6) nakazujejo vpliv, ki ga ima vsaka sprememba parametra na ocenjevano merilo kakovosti, tj. obseg poroznosti med krčenjem prirobnice. Vsak označevalec v grafu raztrosa predstavlja eno zasnovo in je rezultat vsake posamezne simulacije.

Rezultati nakazujejo, da je pri vseh spremenjenih parametrih mogoče doseči nizko raven poroznosti. Jasno je razvidno, da konfiguracija hladila bistveno vpliva na poroznost pri krčenju. Načrt z največjim številom hladil na desni strani Slike 6 vselej

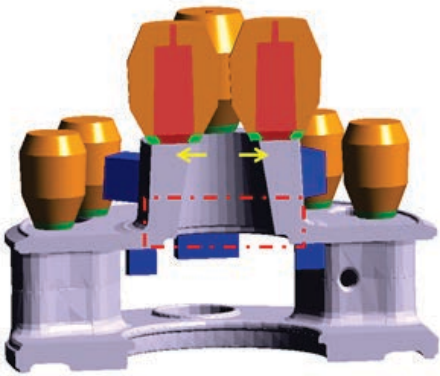
options to evaluate what the most relevant factors influencing casting quality are and to determine the optimal configuration for production.

The risering configuration of a ductile iron planetary gear carrier is optimized in this example (Figure 5). The feeding of the critical flange area (dashed red line) is provided by a combination of top risers and several chills outside and below this area. An additional variable is the option to increase the wall thickness of the area below the risers (padding), leading to several different layouts.

Several parameters were varied to assess which of them has a significant impact on the shrinkage porosity in the critical area. Specifically, the influence of the size of the risers, the size of the padding, and the chill configuration outside and below the critical area were investigated. This led to an autonomous design of experiments (DOE) with 32 designs run autonomously by the software.

The results of this DOE (Figure 6) show the impact each parameter variation has on the evaluated quality criteria, the amount of shrinkage porosity in the flange. Each marker in the scatter diagram represents one design and is the result of an individual simulation.

The results indicate that for all of the varied parameters, a low level of porosity can be achieved. It can be clearly seen that the chill configuration has a significant impact on the shrinkage porosity. The layout with the maximum number of chills on the right of Figure 6, always leads to the least amount of shrinkage defects, regardless which other variations are made. In this respect, this solution is robust to variations in other production conditions. As to expected, increasing the size of the padding also narrows the scatter in the



Sl. 5: Prerez nosilca planetnega gonila iz nodularne litine ter konfiguracija napajalnika in hladilne kokile; rdeča prekinjena črta označuje kritično območje; rumene puščice označujejo mesta, kjer je mogoče zvečati debelino stene ulitka

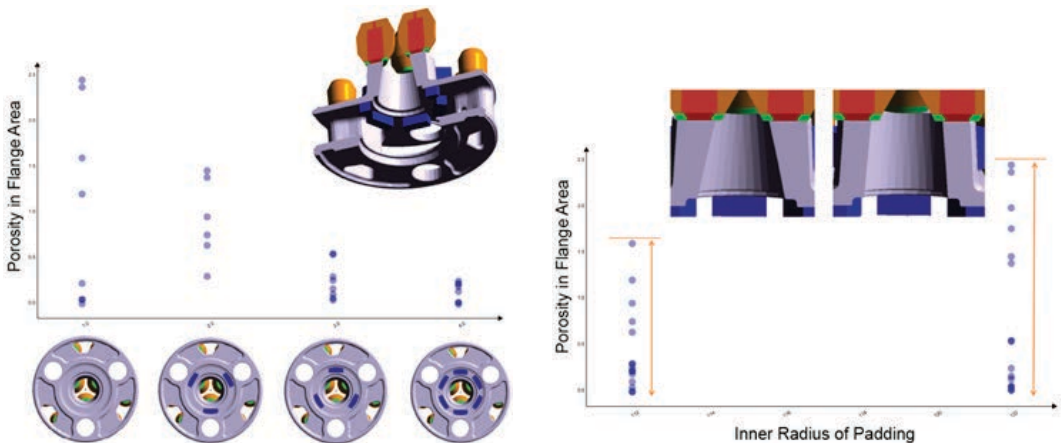
Fig. 5: Cut view of a ductile iron planetary gear carrier and its riser and chill configuration; the red dashed line depicts the critical area; the yellow arrows show where the wall thickness of the casting can be increased

privede do najmanjšega števila okvar pri krčenju ne glede na ostale spremembe. To pomeni, da ta rešitev ni dovoljna za spremembe drugih proizvodnih pogojev. Po pričakovanjih tudi večje število oblog zmanjša raztros v obsegu okvar, vendar pa ima manjši vpliv kot spreminjanje hladil.

Z uporabo avtonomnega načrtovanja eksperimentov (DOE) postane jasno, kateri parametri pomembno vplivajo na kakovost litja in kam mora livarski inženir usmeriti svojo pozornost (v tem primeru na

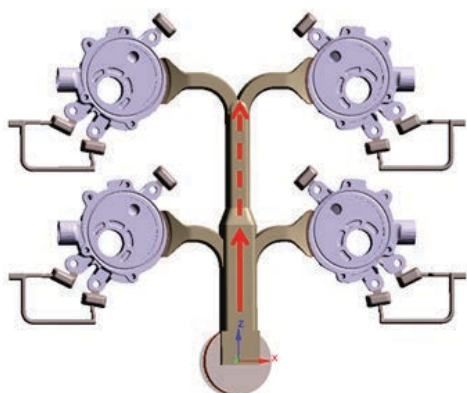
range of defects, but its impact is smaller than that of changing the chills.

Using an autonomous DOE, it becomes clear which parameters have a significant effect on the casting quality and where the foundry engineer should focus in on (in this



Sl. 6: Vpliv konfiguracije hladilne kokile (levo) in obloge (desno) na poroznost pri krčenju v kritičnem predelu

Fig. 6: Impact of chill configuration (left) and padding (right) on shrinkage porosity in the critical area

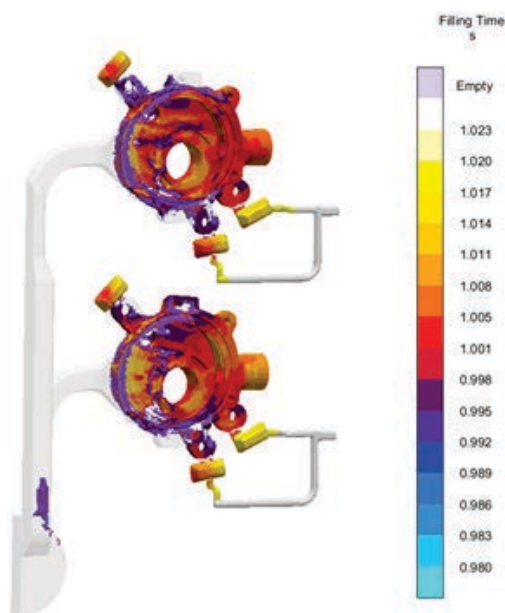
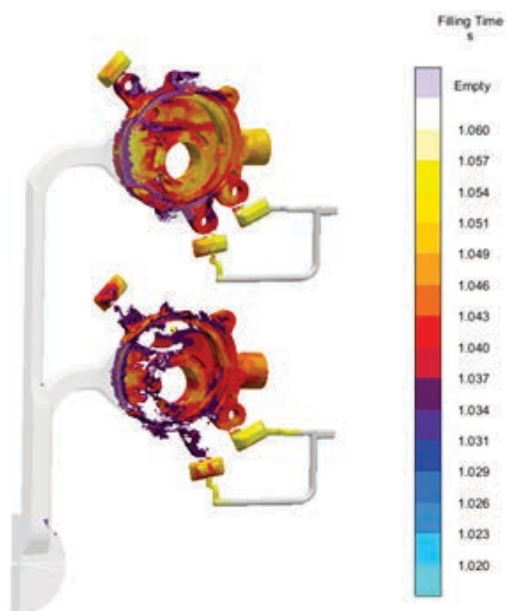


Sl. 7: Spreminjanje presečnega položaja razdelilnega kanala pri visokotlačnem litju

Fig. 7: Variation of the position of the cross-section change in a high pressure die casting runner

Sl. 8: Časi lokalnega polnjenja za dva položaja krčenja razdelilnega kanala. (Ker je ulitek simetričen, je prikazana samo polovica.)

Fig. 8: Local filling times for two different positions of runner contraction. (Due to symmetry only one-half of the casting is shown.)



konfiguracijo hladila), da bi poiskal končno in optimalno konfiguracijo.

Sočasna avtonomna optimizacija zasnove razdelilnega kanala in krivulje litja pri tlačnem litju

Ker sta konceptualna zasnova razdelilnega in odvajalnega sistema ter določitev livnih

case the chill configuration) to find the final and optimal configuration.

Simultaneous autonomous optimization of runner design and shot curve for a die casting

Since the conceptual design of the runner and gating system and the determination of the casting process parameters for a

procesnih parametrov pri tlačnem litju tesno povezana, se morata geometrija razdelilnega kanala in potek polnjenja votline v livnem postopku vselej ujemati. Kot primer smo v tem delu proučili vpliv sočasnega spreminjanja zasnove razdelilnega kanala in krivulje vbrizgavanja na posledično kakovost ulitka pri tlačnem litju v štiri votline.

Presek razdelilnih sistemov pri ulitkih, izvedenih z visokotlačnim litjem, se navadno z oddaljevanjem od livnega ostanka manjša. Zasnova razdelilnega kanala za ta primer (Slika 7) je avtonomno optimizirana s spreminjanem mesta presečnega krčenja razdelilnega kanala med spodnjo in zgornjo votlino (oglejte si neprekinjeno in prekinjeno rdečo črto na Sliki 7). Položaj presečnega krčenja pomembno vpliva na vedenje ulitka med polnjenjem, še posebej na enakomerno polnjenje votlin. To je pomemben predpogoj za ponovljivo proizvodnjo visokokakovostnih ulitkov.

Slika 8 prikazuje lokalni čas polnjenja pri dveh spremembah presečnega območja razdelilnega kanala. Ulitek je simetričen, zato je prikazana samo njegova desna stran. Načrt na levi prikazuje bistveno spremenjene čase polnjenja zgornjih in spodnjih votlin. Načrt na desni strani je v tem smislu očitno boljši, kajti pri obeh votlinah lahko opazimo skoraj identično vedenje.

Za sočasno preiskovanje vpliva na posledično polnjenje pri spremembah geometrije razdelilnega kanala in pospeševanje bata med vbrizgavanjem smo spreminjali tako položaj krčenja razdelilnega kanala kot čas pospeševanja vbrizga od počasnega do hitrega.

Izvedli smo avtonomno načrtovanje eksperimentov z 98 različnimi zasnovami, vse spremembe geometrij in krivulj litja so bile avtonomno ustvarjene, simulirane in nato ocenjene.

die casting are closely coupled, the runner geometry and the progress of cavity filling for a given casting always have to match. As an example, here the simultaneous variation of the runner design and the shot curve on resulting casting quality for a four-cavity die is investigated.

The section size of runner systems for high pressure die castings is usually smaller, the farther it is from the biscuit. The runner design for this example (Figure 7) is autonomously optimized by varying the location of the runner cross-sectional contraction between the bottom and top cavities (see solid and dashed red lines in Figure 7). The position of the cross-section reduction has a significant influence on the filling behavior of the castings, in particular whether the four cavities are filled uniformly. This is an important pre-condition for the reproducible production of high quality castings.

Figure 8 shows the local filling times for two different variations of the runner cross-section area change. Utilizing the symmetry, only the right side is shown. The layout on left shows significantly different filling times in the top and bottom cavities. The layout on the right is obviously better in this respect, as the cavities show a nearly identical filling behavior.

In order to simultaneously investigate the influence on the resulting filling of variations in runner geometry and the acceleration of the piston during the shot, both the position of the runner contraction and the time for acceleration of the shot from slow to fast speeds were varied.

An autonomous DOE with 98 distinct designs was performed, where all geometry and shot curve variations were autonomously generated, simulated, and then assessed.

The piston velocity profile versus piston travel is shown in the upper section of Figure

Profil hitrosti bata v primerjavi s potjo bata je prikazan v zgornjem delu Slike 9. Čas začetka faze pospeševanja za proučevane zasnove je bil vselej med navpično zeleno in modro črto. V spodnjem delu Slike 9 je graf z glavnimi učinki, ki prikazuje vpliv spreminjanja začetka faze pospeševanja (zgornji graf) in vpliv spreminjanja mesta krčenja razdelilnega kanala (spodnji graf) na razlike med časi polnjenja livnih votlin. Manjša kot je razlika, enakomernejše je polnjenje votlin. Vsak označevalec v grafu z glavnimi učinki prikazuje eno povprečno vrednost vseh simulacij avtonomnega načrtovanja preizkusov za določeno točko pospeševanja ali mesto krčenja razdelilnega kanala. Naklon črt predstavlja pomembnost zadevnih procesnih parametrov za izbrano merilo kakovosti. Večji kot je naklon, večji je vpliv.

Ti rezultati pomenijo, da vodi poznejši začetek pospeševanja do večje razlike pri polnjenju votlin. Učinek mesta krčenja razdelilnega kanala je v primerjavi s tem relativno šibak. Večje kot je krčenje, bolj enakomerno poteka polnjenje votline. Ta primer kaže, da spreminjanje enega procesnega parametra vselej vpliva na druge procesne pogoje ali odločitve, vezane na zasnovo litja in orodja.

Avtonomna optimizacija nosilnega okvirja za toplotno obdelavo konstrukcijskega litja [3]

Orodja za simulacijo livnega procesa lahko predvidijo preostanek obremenitev in posledično deformacijo ulitkov skozi celotni proizvodni proces, vključno s procesom toplotne obdelave. Ta primer prikazuje, kako lahko avtonomno načrtovanje eksperimentov in optimizacijo uporabimo za preprečevanje deformacij tudi pri kompleksnih konstrukcijah tlačno litih delov.

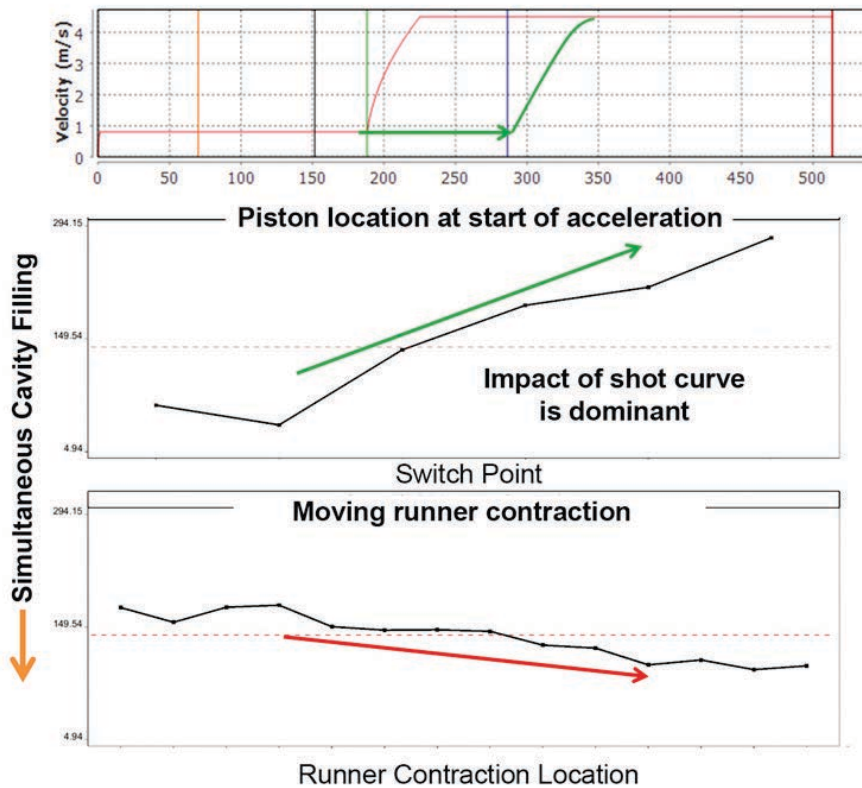
9. The time of the start of the acceleration phase for the investigated designs was always between the vertical green and blue lines. The lower section of Figure 9 shows main effect diagrams, depicting the impact of changing the start of the acceleration phase (upper diagram) and the impact of moving the runner contraction location (lower diagram) on the differences between the filling times of the casting cavities. The smaller this difference, the more uniformly the cavities are filled. Each marker in a main effect diagram represents one average value of all simulations of the autonomous DOE for a specific acceleration point or runner contraction location. The incline of the lines represents the significance of the respective process parameter on the selected quality measure. The steeper the incline, the greater the impact is.

These results show that starting the acceleration at a later point in time leads to increasing difference in the filling of the cavities. In comparison, the effect of the runner contraction location is relatively weak. The higher the contraction is the more uniform the filling of the cavity.

This example shows that changing one process parameter always has an impact on other process conditions or on decisions regarding casting and tooling design.

Autonomous optimization of a support frame for the heat treatment of a structural casting [3]

Casting process simulation tools can predict residual stresses and the resulting distortion of castings over their entire manufacturing process, also including the heat treatment process. This example illustrates how an autonomous DOE and optimization can be used to minimize the distortion of even complex die-cast structural part.

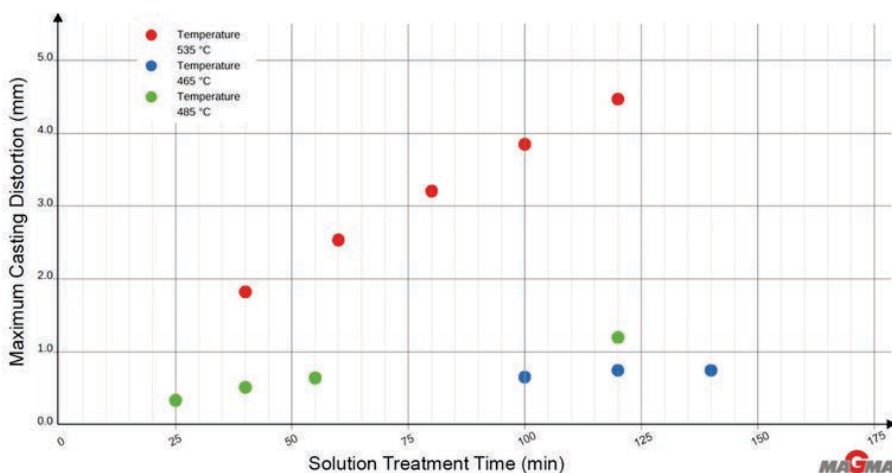


SI. 9: Spreminjanje krivulje polnjenja (zgoraj) in grafi z glavnimi učinki za vpliv v točki preklopa (med dvema fazama) v krivulji strela (sredi) ter višino krčenja razdelilnega kanala (spodaj) na enakomerno polnjenje vseh votlin

Fig. 9: Variation of the shot curve (top) and main effect diagrams for the influence of switch-over time in the shot curve (middle) and height of the runner contraction (bottom) on the uniform filling of all the cavities

Obdelava v raztopini je prvi korak toplotne obdelave aluminijastih ulitkov T6/T7. Zaradi nizke trdnosti materiala blizu temperature solidusa in na podlagi vpliva gravitacijskega učinka na litje pri tem proizvodnem koraku vselej obstaja nevarnost trajne plastične deformacije pri tankostenskih konstrukcijskih ulitkih. Slika 10 kvantificira razmerje med različnimi temperaturami obdelave v raztopini in časi z izračunano deformacijo konstrukcijskega avtomobilskega ulitka. Očitno je nagibanje

Solution treatment is the first step in a T6/T7 heat treatment for aluminum castings. Due to the low strength of the material close to the solidus temperature, and through the influence of gravity acting on the casting, there is always the danger of creating a permanent plastic deformation in a thin-walled structural casting during this process step. Figure 10 quantifies the relationship between different solution treatment temperatures and times with the calculated distortion of a structural automotive



SI. 10: Proučevanje največjih deformacij tlačno litega konstrukcijskega dela med toplotno obdelavo pri različnih temperaturah in časih raztopnega žarjenja z virtualno zasnovo poskusov

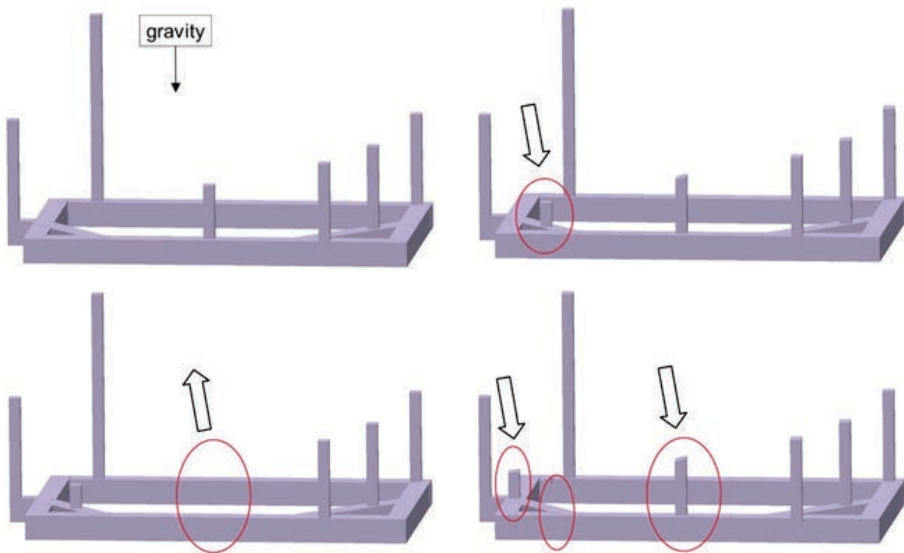
Fig. 10: Virtual Design of Experiments investigating the maximum deformation of a die cast structural part during heat treatment for different solution treatment temperatures and times.

proti večjim deformacijam pri daljših časih obdelave pri isti temperaturi. To pomeni, da virtualno eksperimentiranje ne zagotavlja samo možnosti izvedbe kvantitativne ocene za določitev specifikacij komponente, temveč tudi potencial za vzpostavitev robustnih procesnih pogojev in energijskih prihrankov že med razvojem izdelka.

Ulitek je med toplotno obdelavo na nosilnem okvirju. Določitev ustreznih stičnih točk med okvirjem in ulitkom je za dimenzionalno stabilnost izjemno pomembna. Uresničevanje cilja po dodatnem zmanjšanju obsega deformacij z optimizacijo položajev stičnih točk med ulitkom in nosilnim okvirjem se začne že z izbiro najprimernejše temperature in časa obdelave v raztopini. Za oceno različnih možnosti za položaje stičnih točk smo uporabili avtonomno načrtovanje eksperimentov (Slika 11).

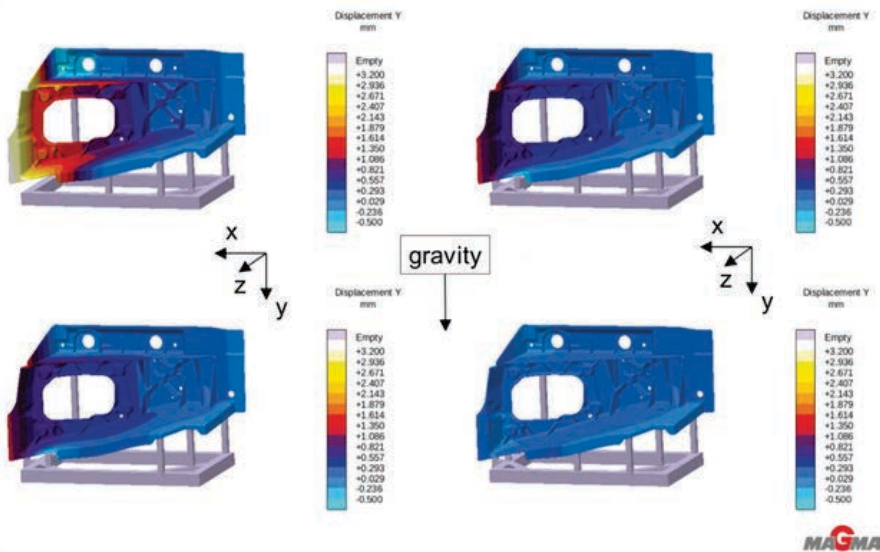
casting. The clear tendency towards higher deformations for longer treatment times at the same temperature level becomes obvious. Hence, virtual experimentation not only provides a means quantitative assessment to realize the component's specifications. It also offers the potential to establish both robust process conditions and energy savings already during product development.

The casting is positioned on a support frame during heat treatment. Finding appropriate contact points between the frame and casting is extremely important for achieving dimensional stability. Starting from the selected best solution treatment temperature and time, the objective was to further reduce the amount of distortion by optimizing the positions of the casting/frame contact points. An autonomous DOE was set up to evaluate different options for the positions of the contact points (Figure 11).



SI. 11: Štiri različne zasnove nosilnih okvirjev za čim manjšo deformacijo pri toplotni obdelavi

Fig. 11: Four different support frame designs for minimizing heat treatment distortion



SI. 12: Deformacija konstrukcijskega tlačnega ulitka med raztopnim žarjenjem, ko je na štirih različnih nosilnih okvirjih, kot je prikazano na Sliki 14

Fig. 12: Distortion of a structural die casting during solution heat treatment when placed on the four different support frames shown in Figure 14

Na Sliki 12 so prikazani rezultati deformacij pri izbranih zasnovah okvirjev. Jasno je razvidna deformacija dela zaradi gravitacije. Pri prvem nosilnem okvirju (zgoraj levo) je vidna deformacija velikosti 3,2 mm na prednjem levem predelu. Ob dodajanju opore v prednjem levem kotu (zgoraj desno na Sliki 12) se pokažejo znaki bistvenega izboljšanja. Naslednja zasnova (spodaj levo) kaže, da odstranitev enega od nosilcev na prednji strani nima skoraj nobenega vpliva. Od prikazanih položajev premik prednjega levega nosilca nazaj in tudi v levo privede do najmanjše deformacije v obsegu pribl. 0,5 mm (spodaj desno).

Povzetek

Več vzorcem smo uporabili, da bi prikazali, kako lahko uporabimo celovito integracijo avtonomne optimizacije v orodju za simulacijo livnega procesa MAGMA⁵ za zagotovitev optimiziranih in robustnih načrtov ulitkov ter procesnih oken pred litjem prve kovine. Programska oprema poišče najboljše možne procesne parametre, optimalni razdelilni kanal, položaje in mere odvoda, pa tudi mesta in velikosti napajalnikov in hladil. Livarski inženirji lahko avtonomno optimizacijo uporabijo kot virtualno okolje za eksperimentiranje, da bi hkrati uresničili različne s kakovostjo in stroški povezane cilje.

Cilj ohranitve uporabniku prijaznega simulacijskega orodja ob integraciji te nove tehnologije smo dosegli z uvedbo zmožnosti ustvarjanja parametričnih oblik in samodejnega spreminjanja parametrov skupaj z orodjem za statistično analizo avtonomnega načrtovanja eksperimentov in genetičnih algoritmov za avtonomno optimizacijo. Sočasna ocena rezultatov livarskim inženirjem omogoča enostavnejšo primerjavo in vrednotenje rezultatov iz

Figure 12 shows the distortion results for some selected frame designs. The distortion of the part due to gravity can be seen clearly. The first support frame (upper left) shows a distortion of 3.2 mm in the left front area of the part. Adding an additional support in the front left corner (upper right in Figure 12) already shows a significant improvement. The next design (lower left) shows that the removal of one of the supports in the front has almost no effect. Of the shown positioning options, moving the left front support backwards and even more to the left leads to the smallest distortion of around 0.5 mm (lower right).

Summary

Several examples have been used to show how the complete integration of autonomous optimization in the casting process simulation tool MAGMA⁵ can be used to ensure optimized and robust casting layouts and process windows before the first metal is poured. The software searches for the best possible process parameters, optimal runner and gate positions and dimensions, as well as locations and sizes of risers and chills. Foundry engineers can use autonomous optimization as a virtual field for experimentation, to simultaneously achieve different quality and cost targets.

The goal to retain the user-friendliness of the simulation tool, while integrating this new methodology, was achieved through the implementation of capabilities for parametric geometry creation and automatic parameter variation, together with tools for statistical analysis of autonomous designs of experiments and genetic algorithms for autonomous optimization. The simultaneous assessment of the derived results enables the foundry engineer to easily compare and evaluate outcomes from numerous

številnih simulacij. Jasno so prikazane odvisnosti med zasnovo in procesnimi spremenljivkami, merili kakovosti in cilji.

Trideset let po uvedbi simulacije procesa litja lahko livarski inženirji kombinirajo posamezne simulacije, avtonomna načrtovanja eksperimentov in avtonomne optimizacije za boljše razumevanje procesov in vzpostavitev robustnih livnih procesov, ki zagotavljajo kakovostne ulitke po najnižji ceni.

simulations. Dependencies between design and process variables, quality criteria and objectives are clearly visualized.

Thirty years after the introduction of casting process simulation, foundry engineers now can combine single simulations, autonomous DOEs and autonomous optimizations to gain better process understanding and to establish robust casting processes making quality castings at the lowest possible cost.

Viri / Literature

- [1] Hahn, I., Sturm, J. C.: Versuchspläne in der gießtechnischen Simulation, GIESSEREI 96 (2009), št. 7
- [2] Bramann, H., Pavlak, L.: Innovatives Produktdesign und robuste Prozessauslegung durch virtuelles Experimentieren mit der Gießprozess-Simulation. GIESSEREI 102 (2015), št. 2
- [3] Gaspers, H.J., Thorborg, J.: Design Optimization of Heat Treatment Support Frames for Aluminium Alloy Structural Cast Parts using Virtual Experimentation, European Conference on Heat Treatment (2015), Benetke, Italija, maj 2015.

Kumulativni vpliv legirnih elementov na mikrostrukturo s trdno raztopino legirane nodularne litine

Accumulative impact of alloying elements on the microstructure of solid solution strengthened ductile iron

Povzetek

Odpadno železo je zaradi stroškovnih prihrankov ena najpomembnejših surovin pri izdelavi nodularne litine (DI). Količina elementov v sledovih v odpadnem železu raste. V tem prispevku se osredotočamo na elemente, ki spodbujajo nastajanje perlita in karbida, kot so krom, baker, mangan, molibden, niobij ali vanadij, ki lahko negativno vplivajo na mikrostrukturo in mehanske lastnosti nodularne litine, še posebej feritne tipe. Zato bodo stroški izdelave feritnih tipov s čistim odpadnim železom rasli. Inovativni tipi nodularnih litin, legirani s trdno raztopino (SSDI), so boljše topni v karbidotvornih elementih, kar do določene mere omogoča uporabo mešanega odpadnega železa. Vendar pa mejne koncentracije teh elementov še niso znane. V predstavljeni študiji smo proučili posamezne in skupne učinke elementov, ki spodbujajo nastajanje perlita in karbida SSDI tipa EN-GJS- 500-14 na podlagi načrtovanja dejavnikov pri preizkusu. Kvantitativna razmerja med kemijsko sestavo in mikrostrukturo so bila oblikovana z izračunom regresijskih parametrov. Rezultati predstavljajo osnovo za zanesljivo proizvodnjo SSDI ob upoštevanju prihodnjih sestav odpadnega železa z vse več elementi v sledovih.

Abstract

Steel scrap is one of the most important feedstock for manufacturing ductile iron (DI) for reasons of cost savings. The amount of tramp elements in steel scraps is on the increase. In the work presented we focus on pearlite and carbide promoting elements such as chromium, copper, manganese, molybdenum, niobium or vanadium which can have a negative impact on the microstructure and the mechanical properties of DI, especially ferritic grades. Thus, the costs for producing ferritic grades with clean steel scrap will increase. Innovative solid solution strengthened ductile iron grades (SSDI) have a larger solubility for carbide promoting elements which enables the use of mixed scraps to some extent. However, the limiting concentrations of these elements are unknown. In the study presented, the individual and combined effect of pearlite and carbide promoting elements in the SSDI grade EN-GJS- 500-14 are investigated by means of a factorial design of experiment. Quantitative relations between chemical composition and microstructure were modelled by regression calculations. The results establish a basis for the reliable production of SSDI taking into account future scrap compositions with increasing amounts of tramp elements.

1 Uvod

Nodularna litina (DI) kot livni material obstaja približno 70 let in združuje livnost ter stroškovno učinkovitost sive litine z žilavostjo jekla [1]. Zelo pogosto se uporablja v večini industrijskih panog, kot je izgradnja strojev, avtomobilska industrija ali na področju obnovljivih virov. Odpadno železo je zaradi svoje nizke cene poleg grodlja ena najpomembnejših surovin pri izdelavi nodularne litine. Delež železa v proizvodnji nodularne litine je v zadnjih desetletjih zaradi pritiska cen, s katerimi se soočajo železarne, močno porasla. Po drugi strani jeklarska industrija nenehno razvija nove vrste jekla z vse večjim številom legirnih elementov, ki spreminjajo dolgoročno kakovost in razpoložljivost odpadnega železa za proizvodnjo nodularne litine. Številni legirni elementi v jeklu, kot so krom, baker, mangan, molibden, niobij ali vanadij, v mikrostrukturi nodularne litine povzročajo nastajanje perlita in/ali karbidov. Zato je le vprašanje časa, kako dolgo bo odpadno železo brez primesi za proizvodnjo feritnih vrst jekel na voljo po razumni ceni.

Inovativne vrste nodularnih litin, utrjenih s trdnimi raztopinami (SSDI), ki vsebujejo do 4,3 mas. % silicija, predstavljajo edinstveno kombinacijo trdnosti in voljnosti [2], zanje pa je značilna tudi večja topnost za karbidotvorne elemente [3]. Visoka vsebnost Si spodbuja nastanek popolnoma feritne matrice, ki zagotavlja visoko voljnost in dobro obdelovalnost v primerjavi z enakovrednimi perlitnimi vrstami. Visoka vsebnost silicija povečuje topnost karbidotvornih elementov v avstenitu in feritu. Zato je mogoče ob predpogoju, da je mogoče količinsko opredeliti vpliv na mikrostrukturo, uporabiti cenejše odpadno železo, ki bo na voljo v prihodnosti. Posledično je treba preučiti in količinsko opredeliti posamezne in kombinirane vplive

1 Introduction

The casting material ductile iron (DI) exists since approximately 70 years and combines the castability and cost-efficiency of grey iron with the toughness of steel [1]. It is widely used in the most sectors of industry, such as machine building, automotive industry or renewable energy. Steel scrap is, apart from pig iron, the most important feedstock for the production of DI because of its low cost. The percentage of steel scrap in ductile iron production has increased considerably during the last decades because of the cost pressure cast iron foundries are facing. On the other hand, steel industry constantly develops new steel grades with increasing numbers of alloying elements which changes the long-term quality and availability of steel scrap for the production of DI. Many alloying elements in steel, such as chromium, copper, manganese, molybdenum, niobium or vanadium cause the formation of pearlite and/or carbides in the microstructure of DI. Thus, it is a question of time how long clean steel scrap is available for reasonable costs to produce ferritic grades.

Innovative solid solution strengthened ductile iron (SSDI) grades, which contain up to 4.3 wt. % of silicon, exhibit a unique combination of strength and ductility [2] and furthermore an increased solubility for carbide promoting elements [3]. The high Si content promotes the formation of a fully ferritic matrix, which ensures high ductility and good machinability in comparison with equivalent pearlitic grades. The high silicon content increases the solubility of carbide promoting elements in austenite and ferrite. Thus, less expensive and in future available steel scrap can be used under the precondition that the impact on the microstructure can be quantified. Therefore, the individual and combined impact of these elements on the microstructure has to be

teh elementov na mikrostrukturo. V ta namen je vrsta SSDI EN- GJS-500-14 na podlagi načrtovanja faktorjev pri preizkusu legirana s Cr, Cu, Mn, Mo, Nb in V, prav tako je opravljena analiza mikrostrukture pri vzorcih, proizvedenih pod različnimi pogoji ohlajanja. Kvantitativna razmerja med kemijsko sestavo, pogoji ohlajanja in mikrostrukturo se razvijajo z regresijsko analizo.

2 Pregled virov

Vplivi elementov, ki tvorijo perlit in karbide, na mikrostrukturo in mehanske lastnosti nodularne litine so že nekaj desetletij predmet raziskav. Pregled vpliva različnih elementov v nodularnih litinah podaja Hasse [4], druge objave pa se osredotočajo na vplive posameznih elementov. Učinek dodatka vanadija do 0,5 mas. % na lastnosti feritne nodularne litine je preučil Nechtelberger [5] leta 1969 na vzorcih klinaste oblike Y_2 z debelino stene 25 mm. Odkril je, da se vsebnost perlita z vanadijem povečuje in da cementit tvori dodatke V pri vsebnosti nad 0,3 mas. %. Približno 30 let pozneje so Rezvani et al. proučili učinek podobnih dodatkov V v nodularnih litinah, a z bistveno večjo vsebnostjo Si. Niso našli eutektičnih karbidov, temveč karbidne delce, bogate z vanadijem, ki so jih analizirali z mikroanalizami SEM-EDX in TEM. Glede na obe deli vanadij povečuje natezno trdnost in trdnost teženja, zmanjšuje pa raztezek pri zlomu. Učinek niobija so proučili Riviera et al. [6], pa tudi Souza et al. [7]. Niobij slabo spodbuja tvorbo perlita v nodularni litini in botruje zmernemu zvečanju natezne trdnosti in zmanjšanju raztezka. Niobijevi karbidi se v mikrostrukturi pojavljajo kot majhni poligonalni delci. Manganovi karbidi se zaradi segregacije tega elementa tvorijo na kristalnih mejah, kar so dokazali

investigated and quantified. To achieve this, the SSDI grade EN- GJS-500-14 is alloyed with Cr, Cu, Mn, Mo, Nb and V in a factorial design of experiment and the microstructure is analyzed in samples produced with different cooling conditions. Quantitative relations between chemical composition, cooling conditions and microstructure are developed via regression analysis.

2 Literature review

The impact of pearlite and carbide promoting elements on the microstructure and the mechanical properties of DI have been investigated for several decades. An overview of the impact of different elements in DI is given by Hasse [4], whereas other publications focus on the individual impact of one element. The effect of vanadium additions up to 0.5 wt. % on the properties of ferritic DI was investigated by Nechtelberger [5] in 1969 for Y_2 wedges with a wall thickness of 25 mm. He found that the pearlite content increases with vanadium and that cementite forms for V-additions above 0.3 wt. %. Nearly 30 years later, Rezvani et al. investigated the effect of similar additions of V in DI, but with a considerably higher Si- content. Here no eutectic carbides were found, but vanadium rich carbide particles, which were analyzed via SEM-EDX and TEM. According to both works, vanadium increases tensile and yield strength and decreases the elongation at fracture. The effect of niobium was analyzed by Rivera et al. [6] and also by Souza et al. [7]. Niobium is a weak pearlite promoter in DI and leads to a moderate increase of tensile strength and a decrease of elongation. Niobium carbides appear as small polygonal particles in the microstructure. Manganese carbides form at the grain boundaries due to the segregation of this

Ahmadabadi et al. [8] za nodularne litine z 1 mas. % Mn. Drugi karbidotvorni elementi, kot sta Mo in Cr, kažejo podobno segregacijsko vedenje. Učinek Cr, Cu, Mo in Ni na mikrostrukturo in mehanske lastnosti nodularne litine pri vzorcih klinaste oblike Y_4 (debelina stene 75 mm) so proučili Cho et al. [9], rezultati pa kažejo, da Cr in Cu močno spodbujata tvorbo perlita, Mo pa zgolj malo poveča količino perlita. Cr in Mo spodbujata tudi tvorbo karbidov na kristalnih mejah. Tako perlit kot medcelični karbidi negativno vplivajo na raztezek. O slabi tendenci Mo k spodbujanju tvorbe perlita so poročali tudi Hernandez-Avila et al. [10] pri nodularnih litinah z do 0,38 mas. % Mo.

Za preiskavo kombiniranega učinka več karbidotvornih elementov na lastnosti nodularne litine je potrebno obsežno načrtovanje pri preizkusu. Campomanes in Goller [11] sta v 32 preizkusih litja uporabila načrtovanje faktorjev, da bi proučila učinek Si, Mn, Cr, Ti in V na mikrostrukturo. Rezultate sta uporabila za izračun regresijskih parametrov. Za Cr in Mn sta ugotovila, da močno spodbujata tvorbo perlita, medtem kot Ti in V vplivata predvsem na tvorbo karbida. Večjo vsebnost Si je mogoče uporabiti kot protiučinek negativnemu vplivu drugih elementov. To vodi do večje tolerance proti karbidotvornim elementom pri SSDI [12]. Wolf et al. [13] so uporabili podobni virtualni preizkus litja (DOE) za proučevanje vpliva B, Cr, Mn, Nb in V na feritno železo EN-GJS-400-15. Pri tem so upoštevali tudi vpliv hitrosti ohlajanja, saj so uporabili lite dele različnih debelin. Čas strjevanja močno vpliva na morfologijo grafita in segregacijo elementov, ki spodbujajo tvorbo karbidov, zato je ta dejavnik zajet tudi v tej študiji.

element, as it was shown by Ahmadabadi et al. [8] for DI with 1 wt. % Mn. Other carbide promoting elements, such as Mo and Cr, are showing a similar segregation behaviour. The effect of Cr, Cu, Mo and Ni on the microstructure and the mechanical properties of DI in Y_4 wedges (wall thickness 75 mm) was examined by Cho et al. [9] and their results indicated that Cr and Cu are strong pearlite promoters, whereas Mo only slightly increases the amount of pearlite. Cr and Mo further promote the formation of carbides at the grain boundaries. Both pearlite and intercellular carbides have a negative impact on the elongation. The weak tendency of Mo to promote pearlite formation was also reported by Hernandez-Avila et al. [10] for DI with up to 0.38 wt. % Mo.

To investigate the combined effect of several carbide promoting elements on the properties of DI, an extensive design of experiment is required. Campomanes and Goller [11] used a factorial design of experiment with 32 casting trials to study the effect of the Elements Si, Mn, Cr, Ti and V on the microstructure. The results were used for regression calculations. Cr and Mn were identified as strong pearlite promoters, whereas Ti and V mainly influence the carbide content. An increased Si-content can be used to counteract the negative impact of the other elements. This leads to an increased tolerance against carbide promoters in SSDI [12]. Wolf et al. [13] used a similar DOE to study the impact of B, Cr, Mn, Nb and V on ferritic EN-GJS-400-15. Here the influence of the cooling rate was also taken into account by using cast parts with various thicknesses. The solidification time greatly affects the graphite morphology and the segregation of elements that promotes carbide formation, which is the reason, why this factor is also included in the present study.

3 Preizkusne metode

Zasnova preizkusa

V tej študiji je bila skoraj evtektična EN-GJS-500-14, legirana s trdno raztopino s ciljno vsebnostjo Si v višini 3,8 mas. %, legirana, z različnimi kombinacijami elementov Cr, Cu, Mn, Mo, Nb in V. Za vsak element sta bili na voljo dve različici z najmanjšo in največjo vsebnostjo, kar je prikazano v Preglednici 1. Najmanjše vsebnosti ustrezajo kemijski sestavi referenčne taline brez posebnih dodatkov legirnih elementov.

Preglednica 1: Ciljna najmanjša in največja vsebnost vsake legirne komponente

Table 1: Targeted minimum and maximum content of each alloy component

Element	Min [wt%]	Max [wt%]
Cr	0,045	0,600
Cu	0,060	0,300
Mn	0,170	0,500
Mo	0,005	0,500
Nb	0,003	0,200
V	0,006	0,200

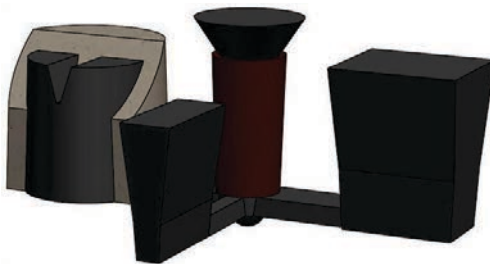
Geometrija ulitka, ki je prikazana v Sl. 1, zajema tri lite dele: en vzorec klinaste Y_2 oblike (debelina stene 25 mm), en vzorec klinaste Y_4 oblike (debelina stene 75 mm) in en valj (premera 140 mm). Valj je bil izoliran z izolacijsko razdelilno oblogo za podaljšanje časa strjevanja. Peščena forma je izdelana iz kremenčevega peska in s furansko smolo. Čas strjevanja vseh treh delov je določen s termoelektričnimi pirometri, ki smo jih pred litjem namestili v livne votline. Čas strjevanja je določen na pribl. 4, 15 in 45 minut za Y_2 element, Y_4 element in valjasti ulitek.

3 Experimental Methods

Design of Experiment

In this study, near-eutectic solid solution strengthened EN-GJS-500-14 with a targeted Si-content of 3.8 wt. % was alloyed with various combinations of the Elements Cr, Cu, Mn, Mo, Nb and V. Each element was varied in a two-stage manner with a minimum and a maximum content, which are listed in table 1. The minimum contents correspond to the chemical composition of the reference melt without extra additions of alloying elements.

The casting geometry, which is shown in fig. 1, includes three cast parts: one Y_2 wedge (wall thickness 25mm), one Y_4 wedge (wall thickness 75 mm) and one cylinder (diameter 140 mm). The cylinder was isolated with an insulating riser sleeve to further increase its solidification time. The sand mold is made of silica sand and furan resin. The solidification time in the three parts is determined with thermocouples that were placed in the mold cavities before casting. The solidification time is determined to be approx. 4, 15 and 45 minutes for the Y_2 , Y_4 and cylindrical casting, respectively.



Sl. 1: Geometrija ulitka

Fig. 1: Casting geometry

Postopek litja

Material smo stopili v grafitnem lončku v srednjefrekvenčni indukcijski talilni peči. Za material za izdelavo taline smo uporabili reciklirano lito železo EN-GJS-400-15 in čisto železo z vsebnostjo 99,7 mas. % in dobili referenčno talino z minimalno vsebnostjo vsake komponente, navedene v Preglednici 1. Vsebnost Si in drugih legirnih elementov smo prilagodili z dodajanjem posebnih ferozlitin v talino, z izjemo bakra, ki je legiran kot čisti material. Talino smo pregreli na temperaturo 1500 °C in jo pri tej temperaturi zadrževali pribl. 5 minut. Žlindro smo odstranili pred obdelavo taline z magnezijem, in sicer s predzlitino FeSiMg brez cerija v zvonu, sledilo je dodatno odstranjevanje žlindre. Talino smo modificirali z 0,2 mas. % modifikatorja na osnovi ferosilicija. Po modifikaciji smo odvzeli vzorce za termalno analizo in proizvodnjo ohlajenega vzorca za kemično analizo s pomočjo iskrne emisijske spektrometrije. Nato smo talino prelili v formo iz peska z livno temperaturo pribl. 1350 °C. Ulitke smo pred odstranitvijo hladili 24 ur.

Priprava vzorca in analiza

Za metalografsko analizo smo za pridobitev vzorcev iz toplotnega središča vsakega ulitka velikosti pribl. 10 × 10 × 10 mm ulitke zrezali z ločno žago in vodno hlajenim rezalnikom. Po vgradnji smo vsak metalografski vzorec obdelali v avtomatiziranem brusilnem stroju najprej s kremenovim brusnim papirjem (velikost zrn: 180, 320, 500 in 1.000), nato pa še z diamantno polirno pasto (9, 3 in 0,25 µm) in polirno krpo. Za metalografske fotografije smo uporabili digitalni mikroskop z ločljivostjo 2.600 × 2.060 slikovnih pik in povečavo 1.000. Za slikovno analizo smo

Casting procedure

The material is melted in a graphite crucible via a medium frequency induction furnace. Recycled cast iron EN-GJS-400-15 and 99.7 wt. % pure iron is used as charging materials to produce the melt, which results in the reference melt with the respective minimum content of each component listed in table 1. The Si-content and the content of the other alloying elements are adjusted by adding particular ferroalloys into the melt, except for copper, which is alloyed as pure metal. The melt is superheated to 1500 °C and held at that temperature for approx. 5 min. Slag is removed before the magnesium treatment of the melt was performed with a cerium-free FeSiMg master alloy in a plunging bell, followed by a second slag removal. Then the melt is inoculated with 0.2 wt. % of a ferrosilicon-based inoculant. After inoculation, specimens are taken for thermal analysis and the production of a chilled sample for chemical analysis via spark emission spectrometry. The melt is poured into the sand mold with a casting temperature of approx. 1350 °C. The castings cooled down for 24 h before unpacking.

Sample preparation and analysis

For metallographic analysis, the cast parts are cut with a bow saw and a water-cooled disk cutter to obtain specimens from the thermal center of each cast parts with approx. 10 x 10 x 10 mm size. After embedding, each metallographic specimen is prepared in an automated buffing machine, first with silica sand paper (respective grain size: 180, 320, 500 and 1000) and then with diamond polish (9, 3 and 0.25 µm, respectively) and a polishing cloth. A digital microscope with a resolution of 2600 x

uporabili sliko, ustvarjeno s programsko opremo Axiovision KS 400. Fotografije za analizo grafitne faze so posnetki poliranega vzorca s 100-kratno povečavo za vzorca klinaste oblike Y_2 in oblike Y_4 oz. s 50-kratno povečavo za valj zaradi večjih kristalnih zrn in manjšega števila vozlov. Enake prilagoditve smo uporabili pri fotografijah s HNO_3 jedkanih vzorcev, ki smo jih posneli za oceno vsebnosti perlita. Za oceno količine karbidov smo vzorce zjedkali s Klemmovim jedkalom, fotografije pa posneli pri 200-kratni povečavi. Posneli smo pet fotografij vsakega vzorca na različnih mestih.

Fotografije grafitne faze smo uporabili za določitev števila grafitnih vozlov na mm^2 , površinskega odstotka grafitain nodularnosti, ki opisuje razmerje okroglih grafitnih delcev glede na skupno število grafitnih delcev. Za razvrstitev opazovanih grafitnih delcev v grafitne oblike I–IV skladno s standardom DIN-EN-ISO-945-1 smo uporabili koeficient sferičnosti in kompaktnosti brezdimenzijskih oblik. Te faktorje smo uporabili za razvrstitev vsakega delca na podlagi omejitev, ki jih je določila Velichkova [14]. Te omejitve razvrstitev so odvisne od velikosti delcev. Po razvrstitvi vsakega delca smo izračunali nodularnost N na površini grafitnih delcev A z naslednjo formulo:

$$N = \frac{\sum_{VI} A_i + \frac{1}{2} \sum_{IV}^V A_i}{\sum_I^{VI} A_i} \quad (1)$$

Površino vseh grafitnih delcev oblike VI (okrogli delci) smo sešteli s polovico površine grafitnih oblik IV in V (nepravilni okrogli delci) ter delili s skupno površino grafitu. Odstotek površine grafitu %G je potreben za izračun odstotka perlita %P s posnetkov jedkanega HNO_3 z določeno celotno površino grafitu in perlita. Odstotek perlita se torej izračuna po formuli:

2060 pixels and a maximum magnification factor of 1000 is used for the metallographic pictures. The image software Axiovision KS 400 is used for image analysis. Pictures for the observation of the graphite phase are taken from the polished specimen with a magnification factor of 100 for the Y_2 and Y_4 wedge and with a factor of 50 for the cylinder because of the larger grains and the lower number of nodules. The same adjustments are applied for the pictures of the HNO_3 -etched specimens, which were taken to estimate the pearlite content. For determining the amount of carbides, the samples are etched with Klemm's reagent and pictures are taken with a magnification factor of 200. Five pictures are taken from each specimen at different locations.

The pictures of the graphite phase are used for determining the number of graphite nodules per mm^2 , the area percentage of graphite and the nodularity, which describes the ratio of round graphite particles to all graphite particles. To group the observed graphite particles into graphite forms I - VI according to DIN-EN-ISO-945-1, the dimensionless shape factors roundness and compactness are used. These factors are used for classification of each particle according to the limits defined by Velichko [14]. These classification limits depend on the particle size. After the classification of each particle, the nodularity N is calculated from the area A of graphite particles according to the following formula:

$$N = \frac{\sum_{VI} A_i + \frac{1}{2} \sum_{IV}^V A_i}{\sum_I^{VI} A_i} \quad (1)$$

The area of all graphite particles of the shape VI (round particles) is added together with half of the area of the graphite shapes IV and V (irregular round particles) and divided by the total area of graphite. The area percentage of graphite %G is required

$$\%P = (\%G + \%P)_{\text{HNO}_3} - \%G_{\text{polirano}} \quad (2)$$

Odstotek površine karbidov smo določili ročno na podlagi mreže, ki smo jo položili prek barvno jedkane mikrostrukture.

to calculate the percentage of pearlite %P from the HNO_3 -etched pictures, where the total area of graphite and pearlite is determined. The pearlite percentage is thus calculated as:

$$\%P = (\%G + \%P)_{\text{HNO}_3} - \%G_{\text{polished}} \quad (2)$$

The area percentage of carbides is determined manually via a grid overlaid on the color- etched microstructure.

4 Rezultati

Preglednica 2 prikazuje kemijsko sestavo vsake taline. Lite so bile kombinacije do treh elementov.

4 Results

Table 2 shows the chemical composition of each respective melt. Combinations of up to three elements are cast.

Morfologija grafita

Morfologija grafita kaže jasne razlike med tremi analiziranimi ulitki. Na Sliki 2 je

Cast no.	Si	Cr	Cu	Mn	Mo	Nb	V	Mg
1	4.04	0.04	0.06	0.17	0.002	0.003	0.004	0.028
2	3.88	0.04	0.07	0.19	0.004	0.180	0.007	0.040
3	4.06	0.62	0.06	0.18	0.005	0.003	0.001	0.032
4	3.96	0.05	0.07	0.18	0.535	0.003	0.006	0.028
5	4.23	0.04	0.07	0.18	0.007	0.003	0.200	0.032
6	3.82	0.04	0.07	0.52	0.003	0.004	0.007	0.045
7	4.14	0.04	0.30	0.16	0.002	0.003	0.004	0.031
8	3.98	0.04	0.07	0.53	0.003	0.237	0.006	0.034
9	4.11	0.61	0.07	0.53	0.004	0.003	0.007	0.043
10	4.00	0.05	0.07	0.54	0.528	0.003	0.006	0.023
11	4.20	0.05	0.07	0.52	0.004	0.003	0.207	0.032
12	3.94	0.62	0.07	0.18	0.005	0.211	0.008	0.025
13	4.24	0.05	0.32	0.19	0.007	0.216	0.017	0.038
14	4.18	0.04	0.31	0.18	0.004	0.003	0.180	0.035
15	4.15	0.05	0.07	0.18	0.503	0.220	0.006	0.029
16	3.95	0.57	0.06	0.16	0.007	0.003	0.199	0.030
17	4.00	0.04	0.07	0.51	0.002	0.217	0.213	0.032
18	4.15	0.60	0.31	0.55	0.002	0.003	0.005	0.038
19	4.14	0.61	0.32	0.19	0.004	0.214	0.007	0.033
20	4.06	0.61	0.40	0.18	0.005	0.003	0.188	0.027
21	4.02	0.05	0.07	0.51	0.482	0.003	0.185	0.030

Preglednica 2: Kemijske sestave v mas. %, izmerjena z iskrno emisijsko spektrometrijo

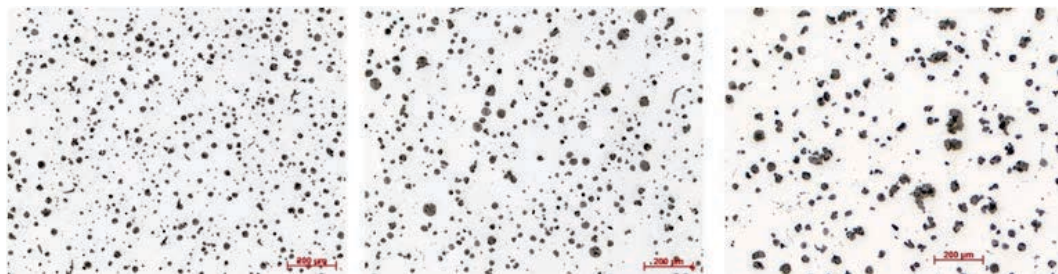
Table 2: Chemical compositions in wt. % measured via spark emission spectrometry

predstavljena morfologija grafita vsakega litja ulitka št. 1, v katerem ni bilo dodanih elementov. Večja kot je debelina, manjše je število vozlov. Z večanjem grafitnih delcev pa oblika postaja bolj nepravilna, zlasti pri valju. Število vozlov na mm^2 znaša 526, 344 oz. 136, nodularnost pa 87, 85 oz. 69 %.

Število grafitnih delcev in nodularnost pri vseh preizkusih litja sta prikazani v grafu raztrosa na Sliki 3 kot funkcija ostanka Mg. V enem je opazen velik odklon obeh parametrov v okviru analize preizkusov litja. Vendar pa se oblaki točk vseh treh delov

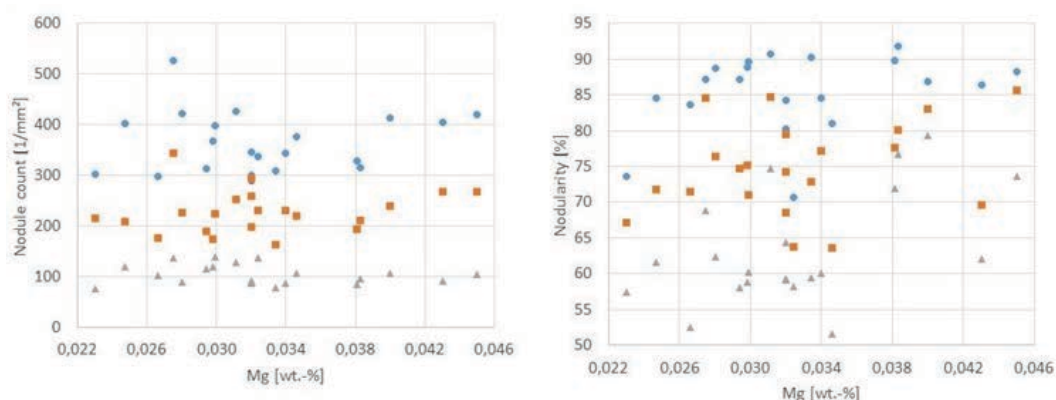
Graphite morphology

The graphite morphology shows distinct differences between the three cast parts that were analyzed. Figure 2 represents the graphite morphology in each casting for cast no. 1, where no element was added. The number of nodules decreases with increasing thickness. At the same time, the average size of the graphite particles increases while the shape becomes more irregular, especially in the cylinder. The nodule count is 526, 344 and 136 per



SI. 2: Reprezentativna struktura grafita vseh treh ulitkov: Y_2 , Y_4 in valj (od leve proti desni)

Fig. 2: Representative graphite structure in the three cast parts: Y_2 , Y_4 and cylinder (from left to right)



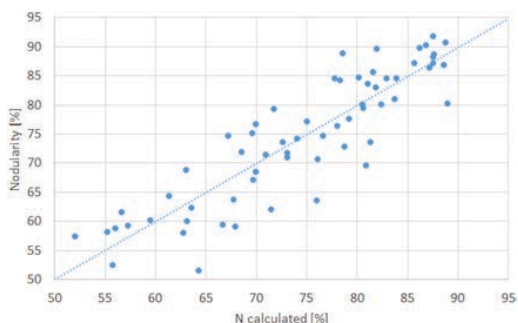
SI. 3: Število vozlov in nodularnost vseh treh ulitkov kot posledica prostega Mg (● vzorec klinaste oblike Y_2 ■ vzorec klinaste oblike Y_4 ▲ valj)

Fig. 3: Nodule count and nodularity in the three cast parts as a function of residual Mg-content (● Y_2 wedge ■ Y_4 wedge ▲ cylinder).

komajda medsebojno prekrivajo. Pri vseh treh ulitkih se zlasti razlikuje število vozlov.

Število vozlov pri vzorcu klinaste oblike Y_2 navadno znaša med 300 in 450 mm^{-2} , pri vzorcu klinaste oblike Y_4 pa med 150 in 350 mm^{-2} . Pri valju je število vozlov med 75 in 150 mm^{-2} . Iz grafa raztrosa je razvidno, da vsebnost Mg nima bistvenega vpliva na število vozlov. Nodularnost se z večanjem vsebnosti Mg izboljšuje. Najslabša nodularnost je prisotna pri valju. Spremembe v nodularnosti so zelo močne pri valju, kajti nodularnost je dovzetnejša na preostalo vsebnost Mg pri daljšem času strjevanja. Tudi nekateri legirni elementi zmanjšujejo nodularnost. Iz zadevne regresijske analize so razvidna naslednja razmerja med nodularnostjo N , časom strjevanja t^{sol} , ostankom Mg in vsebnostjo karbidotvornih elementov:

$$N [\%] = 99.4 - 0.141 \frac{\sqrt{t^{\text{sol}}[\text{min}]}}{\text{Mg}} - 32.5V - 10.5Mn - 10.1Nb \quad (3)$$



Sl. 4: Vrednosti nodularnosti v preizkusu v primerjavi z na podlagi regresijske formule izračunano nodularnostjo

Fig. 4: Experimental nodularity values vs. nodularity calculated by regression formula (3)

mm^2 and the nodularity 87, 85 and 69 %, respectively.

Graphite nodule count and nodularity for all casting trials are shown in a scatter diagram in figure 3 as a function of the residual Mg-content. A large variation of the two parameters within the analyzed casting trials can be observed. However, the point clouds of the three parts hardly overlap with each other. Especially the nodule count is very different in the three castings.

The nodule count in the Y_2 wedge is usually between 300 and 450 mm^{-2} , whereas in the Y_4 wedge between 150 and 350 nodules per mm^{-2} are present. The cylinder has a nodule count between 75 and 150 mm^{-2} . From the scatter diagram, it can be seen that the Mg-content does not have a significant impact on the nodule count. The nodularity improves with increasing Mg-content. The lowest nodularity is found in the cylinder. The variation in nodularity is also very large in the cylinder because the nodularity is more sensitive to the residual Mg-content when the solidification time is higher. Also some of the elements alloyed tend to decrease the nodularity. A respective regression analysis yields the following relationship between nodularity N , solidification time t^{sol} , the residual Mg-content and the content of carbide promoters:

$$N [\%] = 99.4 - 0.141 \frac{\sqrt{t^{\text{sol}}[\text{min}]}}{\text{Mg}} - 32.5V - 10.5Mn - 10.1Nb \quad (3)$$

$$R^2 = 78,8 \%$$

The intercept value is 99.4 % and thus very close to 100 %, which corresponds to the highest nodularity that can theoretically be achieved in DI. Vanadium has the highest negative impact on nodularity. Figure 4 shows the nodularity calculated

$$R^2 = 78,8 \%$$

Vrednost odseka je 99,4 % in torej zelo blizu 100 %, kar ustreza najvišji stopnji nodularnosti, ki jo je teoretično mogoče doseči pri nodularni litini. Vanadij najbolj negativno vpliva na nodularnost. Slika 4 prikazuje izračunano in izmerjeno nodularnost. Točke so enakomerno razporejene okrog diagonale in nakazujejo linearno vedenje, kar pomeni, da je predvidena odvisnost pravilna.

Perlit in karbidi

Posledica dodajanja številnih elementov, ki spodbujajo tvorbo perlita in karbidov, so različne mikrostrukture, od popolnoma feritnih matričnih struktur do popolnoma perlitnih matričnih struktur. Na Sliki 5 je prikazana mikrostruktura, jedkana s HNO_3 , vzorca klinaste oblike Y_4 pri različnih dodatkih legirnih elementov. Ko je Mn legiran brez dodatnih elementov, ostane matrica feritna. Količina perlita se pri dodatku Cr in Cu močno poveča. Odstotkovna vrednost perlita znaša 5, 49 in 72 %.

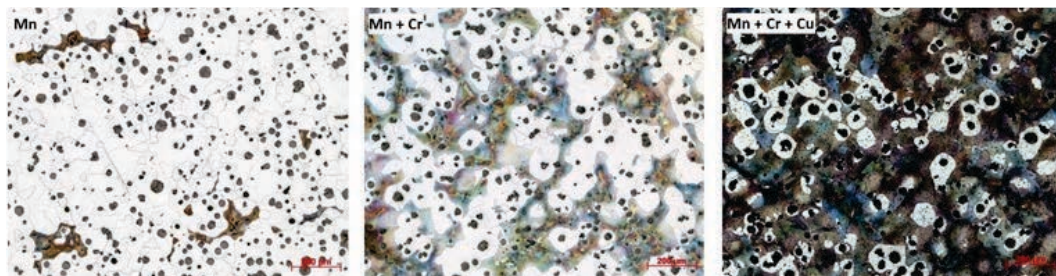
Uporabljeni legirni elementi različno vplivajo na spodbujanje tvorbe perlita, njihov posamezni vpliv na mikrostrukturo pa

and measured. The points are equally distributed around the diagonal and show a linear behaviour, which means that the dependency assumed is correct.

Pearlite and carbides

The addition of multiple pearlite and carbide promoting elements results in a variety of observed microstructures ranging from fully ferritic matrix structures to fully perlitic matrix structures. Figure 5 shows the HNO_3 -etched microstructure in the Y_4 wedge for different additions of alloying elements. When Mn is alloyed without additional elements, the matrix stays ferritic. The amount of pearlite increases significantly as Cr and Cu are added. The pearlite percentage is 5, 49 and 72 %, respectively.

The alloying elements used vary in their tendency to promote the formation of pearlite and their individual impact on the microstructure accumulates when multiple elements are added. This tendency is quantified for SSDI via the following regression analysis for the pearlite percentage P. This analysis takes account for the weight percentage of each element and the solidification time, which yields:



Sl. 5: Spreminjanje količine perlita v mikrostrukturi vzorca klinaste Y_4 oblike z vse večjimi dodatki elementov (ulitki št. 6, 9 in 18)

Fig. 5: Evolution of the amount of pearlite in the microstructure of the Y_4 wedge with increasing addition of elements (cast no. 6, 9 and 18)

se pri dodajanju več elementov akumulira. Ta tendenca je pri SSDI določena s pomočjo naslednje regresijske analize za odstotkovno vrednost perlita P . Ta analiza upošteva odstotek teže vsakega elementa in čas strjevanja:

$$P[\%] = 82.2 Cr + 88.7 Cu + 15.4 Mn + 18.2 Mo + 17.6 Nb + 10.2 V + 0.0368 t_{sol}[\text{min}] - 14.5 \quad (4)$$

$$R^2 = 98.3 \%$$

Na podlagi regresijske formule (4) krom in baker najbolj spodbujata tvorbo perlita, preostali štirje elementi pa na matrično strukturo vplivajo minimalno. Osnovno razmerje je izraženo z negativno vrednostjo, kajti popolnoma feritno strukturo je mogoče doseči že z dodajanjem zelo majhnih koncentracij teh elementov. Čas strjevanja skorajda nima vpliva na odstotek perlita. Vsebnost perlita se zveča za približno 1 %, ko se čas strjevanja podaljša za 27 minut. Zato imajo različni pogoji hlajenja, predstavljeni v študiji, zanemarljiv vpliv na količino perlita. Primerjava med izračunanimi in izmerjenimi vsebnostmi perlita je prikazana v Sliki 7(a) in nakazuje zelo dobro soodnosnost.

Karbidi, oborjeni zaradi dodanih elementov, se močno razlikujejo tako po velikosti kot obliki. V Sliki 6 so prikazani karbidi v mikrostrukturi valjastega ulitka po jedkanju s Klemmovim jedkalom za ulitka št. 15 in 16. V s Cr in V legirani SSDI so veliki razvejani karbidi zaradi segregacije Cr oborjeni. Ti karbidi so prisotni na kristalnih mejah in obkroženi s perlitom. Vanadijevi karbidi so mnogo manjši in kompaktnjši. V zlitini z dodatkom Mo in Nb najdemo značilno oblikovane Mo-karbide, obkrožene z majhnimi območji perlita. Nb-karbidi so mnogo manjši in bolj homogeno porazdeljeni v mikrostrukturi. Večina Nb-karbidov je prisotnih na kristalnih mejah; vendar pa so nekateri ugnezdjeni v feritnih

$$P[\%] = 82.2 Cr + 88.7 Cu + 15.4 Mn + 18.2 Mo + 17.6 Nb + 10.2 V + 0.0368 t_{sol}[\text{min}] - 14.5 \quad (4)$$

$$R^2 = 98.3 \%$$

According to regression formula (4), chromium and copper are the strongest pearlite promoters, while the other four elements have a minor impact on the matrix structure. The axis intercept is a negative number because a fully ferritic structure can even be achieved when low concentrations of these elements are added. The solidification time has almost no impact on the pearlite percentage. The pearlite content increases by approx. 1 % as the solidification time increases by 27 minutes. Thus, the different cooling conditions in the study presented have a negligible impact on the amount of pearlite. The pearlite contents calculated and measured are compared in figure 7 (a) and show a very good correlation.

The carbides precipitated by the elements added vary significantly in both size and shape. Figure 6 shows the carbides in the microstructure of the cylindrical cast part after etching with Klemm's reagent for cast no. 15 and 16. In the Cr and V alloyed SSDI, large branched carbides are precipitated due to the segregation of Cr. These carbides are located at the grain boundaries, surrounded by pearlite. The vanadium carbides are much smaller and compacted. In the alloy with Mo and Nb additions, characteristically shaped Mo-carbides are found, surrounded by small regions of pearlite. The Nb-carbides are much smaller and more homogeneously distributed in the microstructure. Most Nb-carbides are located at grain boundaries; however, some are embedded in ferrite grains because they were formed at earlier stages of solidification.

kristalnih zrnih, ker so nastali v zgodnejših fazah strjevanja.

Površina frakcije karbidov v mikrostrukturi je ocenjena tudi z regresijsko analizo z dodatnimi interakcijami. Te interakcije opisujejo dejstvo, da se lahko ob prisotnosti več karbidotvornih elementov tvorijo mešani karbidi. Cu ni zajet v regresijski izračun, kajti ne spodbuja tvorbe karbidov. Mn je bil zajet, vendar pa nismo našli bistvenega vpliva na količino karbidov. Rezultat regresijske formula pri frakciji karbidov C:

$$C [\%] = 0.365 Cr + 0.434 Mo + 0.852 Nb + 5.973 Nb \times V + 0.76 V + 0.00253 t_{sol} [\text{min}] - 0.053 \quad (5)$$

$$R^2 = 73.6 \%$$

Niobij in vanadij imata največji vpliv na količino karbidov. Nadalje ta elementa nakazujeta pomembno interakcijo, izraženo z ustrezno formulo. Čas strjevanja kaže minimalno zvečanje odstotkovne vrednosti karbidov. Soodnosnost med izmerjeno in izračunano vsebnostjo karbida je prikazana na Sliki 7(b). Raztros točk pri karbidu je izrazito večji kot pri perlitu. Vendar pa večina točk nakazuje dobro soodnosnost med regresijo in meritvijo.

5 Razprava

V predstavljeni študiji je ocenjen vpliv dodajanja več legirnih elementov litini EN-GJS-500-14 (SSDI) na mikrostrukturo in kvantificiran z regresijsko analizo. Upoštevan je čas strjevanja na podlagi geometrije ulitkov za tri različne ulitke. Nakazuje, da čas strjevanja močno vpliva na morfologijo grafita, tj. števil vozlov in nodularnost. Z daljšanjem časa strjevanja se oba parametra zmanjšujeta, kar je skladno z rezultati iz literature [15–17]. Vpliv časa

The area fraction of carbides in the microstructure is also evaluated via a regression analysis applying additional interaction terms. These interaction terms describe the fact that mixed carbides can be formed when multiple carbide promoters are present. Cu is not included in the regression calculation since it does not promote carbide formation. Mn was included, however, no significant impact on the amount of carbides was found. The regression formula for the fraction of carbides C yields:

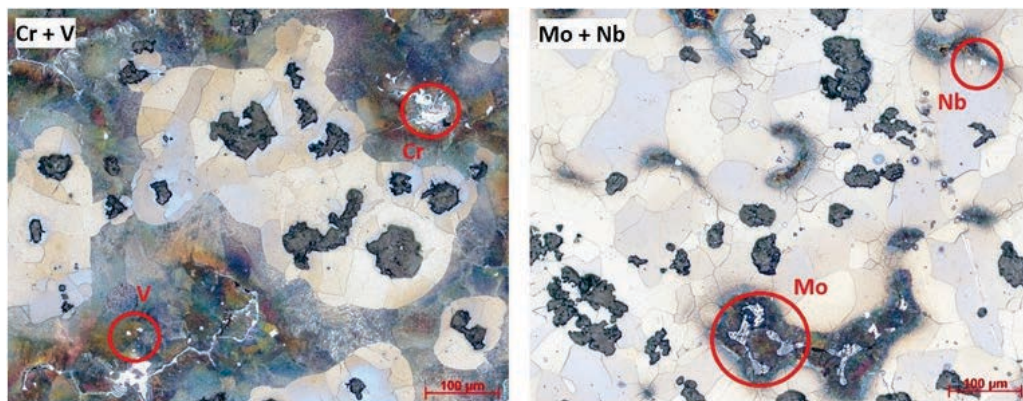
$$C [\%] = 0.365 Cr + 0.434 Mo + 0.852 Nb + 5.973 Nb \times V + 0.76 V + 0.00253 t_{sol} [\text{min}] - 0.053 \quad (5)$$

$$R^2 = 73.6 \%$$

Niobium and vanadium have the highest individual impact on the amount of carbides. Furthermore, these elements show significant interaction quantified by the corresponding interaction term. The solidification time shows a minor increasing impact on the percentage of carbides. The correlation between the carbide content measured and calculated is shown in figure 7(b). The scattering of the points is clearly higher for the carbides compared to pearlite. Nevertheless, most points indicate a good correlation between regression and measurement.

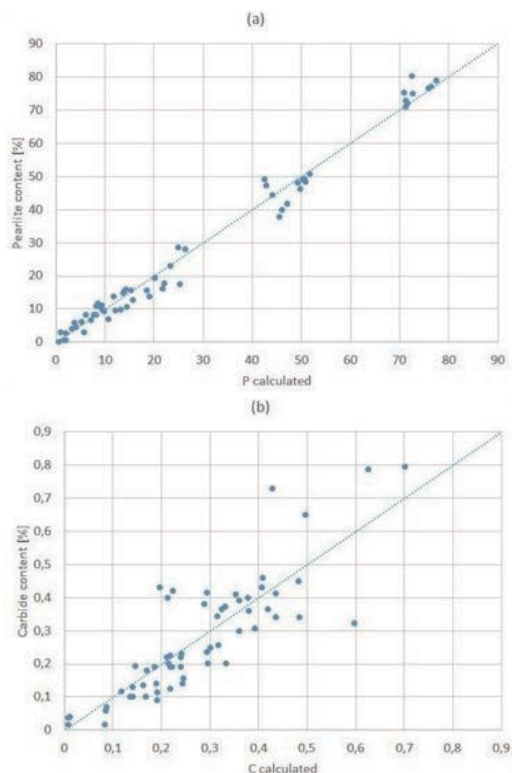
5 Discussion

In the study presented multiple alloying elements are added to EN-GJS-500-14 (SSDI) and their impact on the microstructure is evaluated and quantified via regression analysis. The solidification time is taken into account using a casting geometry with three different cast parts. It is shown that the solidification time has a high impact on the graphite morphology, i.e. the nodule



SI. 6: Karbidi v mikrostrukturi za litka št. 15 (desno) in 16 (levo)

Fig. 6: Carbides in the microstructure for cast no. 15 (right) and 16 (left)



SI. 7: Soodnosnost med izračunanim in izmerjenim odstotkom površine perlita (a) in karbidov (b)

Fig. 7: Correlation between calculated and measured area percentage of pearlite (a) and carbides (b).

count and the nodularity. Both parameters decrease with increasing solidification time, which is in agreement with results reported in literature [15-17]. The influence of solidification time, residual Mg-content and alloying elements on the nodularity was quantified via regression analysis. These results indicate that the impact of increasing solidification time can be compensated with a higher Mg-content. A large solidification time goes along with fading of the Mg-treatment and the inoculation, that results in poor nodularity, that has been reported earlier for conventional DI by [18, 19]. When the Mg-content after the treatment is at elevated levels, more residual Mg is present when the eutectic solidification starts. The negative impact of individual elements, especially vanadium, is quantified by the regression analysis. The negative impact of V on the spherical shape of graphite has been reported by Nechtelberger [5] for conventional DI. According to his work, the addition of V increases the irregularity of graphite nodules. For Nb and Mn, no quantitative information about the impact on nodularity in DI is found in literature.

The quantification of the pearlite content in terms of a regression analysis shows a very good correlation in the study

strjevanja, ostanka Mg in legirnih elementov na nodularnost je opredeljen z regresijsko analizo. Ti rezultati nakazujejo, da je mogoče vpliv vse daljšega časa strjevanja izravnati z večjo vsebnostjo Mg. Daljši čas strjevanja se ujema z zmanjševanjem obdelave in modifikacije Mg, posledica česar je slaba nodularnost, o kateri so avtorji [18, 19] že poročali v povezavi s klasičnimi nodularnimi litinami. Pri višji vsebnosti Mg po obdelavi je na začetku evtektičnega strjevanja prisotnega več ostanka Mg. Negativni vpliv posameznih elementov, zlasti vanadija, je določen z regresijsko analizo. O negativnem vplivu V na sferično obliko grafitu je poročal Nechtelberger [5] za klasično nodularno litino. Na podlagi njegovega dela dodatek V povečuje nepravilnost grafitnih vozlov. Literatura ne navaja nobenih kvantitativnih informacij v zvezi z vplivom Nb in Mn na nodularnost nodularne litine.

Količinska opredelitev vsebnosti perlita pri regresijski analizi v tej študiji kaže zelo dobro soodnosnost. Cu in Cr sta opredeljena kot elementa, ki močno spodbujata tvorbo perlita pri SSDI, drugi elementi pa zelo malo vplivajo na količino perlita. To je skladno z rezultati, predstavljenimi v literaturi. Čas strjevanja nima bistvenega vpliva na vsebnost perlita, kajti daljši čas strjevanja izravnava padajoče število vozlov. To velja tudi za reakcijo ferita/perlita. Ko število vozlov raste, se difuzijska razdalja za prenos ogljika zmanjšuje, kar spodbuja pretvorbo iz avstenita v ferit, kot poroča [20]. Hitrosti ohlajanja pri vseh treh ulitkih, uporabljene v predstavljenem delu, so najverjetneje prenizke, da bi bilo mogoče zaznati njihov vpliv na število vozlov. Vendar pa zamenjava časa strjevanja s številom vozlov v regresijski analizi nakazuje tudi pomemben vpliv na vsebnost perlita. Prevladujoči vpliv v tej študiji predstavlja segregacija litih komponent in njihov vpliv na evtektoidno transformacijsko

presented. Cu and Cr are identified as strong pearlite promoters in SSDI, whereas other elements have a minor impact on the amount of pearlite. This is in agreement with the results presented in literature. The solidification time has no significant impact on the pearlite content since increasing solidification time compensates for the decreasing nodule count. This is also true for the ferritic/perlitic reaction. When the nodule count increases, the diffusion distance for carbon transport decreases, which favours the transformation from austenite to ferrite as reported by [20]. The cooling rates in the three cast parts used in the work presented are probably too low to see an impact of the number of nodules. Thus, replacing the solidification time by the nodule count in the regression analysis shows also insignificant impact on the pearlite content. The predominant impact in the study presented is given by the segregation of components alloyed and their impact on the eutectoid transformation temperature, which has already been described by Lacaze et al. [21]. In this context elements such as Cr and Mn decrease both, the eutectoid transformation temperature and the temperature range for the ferritic transformation to take place, which promotes the formation of pearlite. Due to the segregation of these elements, their impact increases at the grain boundaries where the perlitic transformation is initiated.

The carbides investigated in the microstructures originate from the segregation of carbide promoting elements and are thus located at grain boundaries. The area percentage of carbides is modelled via regression analysis. It is found that niobium and vanadium have the highest impact on carbide formation. No significant contribution of Mn on the area percentage of carbides was found in SSDI, even though Mn is described as

temperaturo, ki so opisali že Lacaze et al. [21]. Tukaj elementa, kot sta Cr in Mn, zmanjšata tako evtektoidno transformacijsko temperaturo kot temperaturni razpon feritne transformacije, ki spodbuja tvorbo perlita. Zaradi segregacije teh elementov se povečuje njihov vpliv na kristalnih mejah, kjer se začne perlitna transformacija.

Karbidni v preiskovanih mikrostrukturah izvirajo iz segregacije karbidotvornih elementov in so zato prisotni na kristalnih mejah. Odstotek površine karbidov je modeliran z regresijsko analizo. Odkrili smo, da imata niobij in vanadij največji vpliv na tvorbo karbidov. Pri SSDI nismo ugotovili bistvenega vpliva Mn na odstotek površine karbidov, čeprav je Mn v literaturi o klasični nodularni litini opisan kot karbidotvorni element. Posledično lahko sklepamo, da visoka vsebnost silicija v SSDI preprečuje tvorbo Mn-karbidov. Za razliko od Cr ali V ima mangan manj izražen segregacijski profil. Vrednosti segregacijskih faktorjev teh in drugih elementov navaja Hasse [4]. Lahko sklepamo, da obogatitev z Mn v preostali talini med strjevanjem ni zadostna za precipitacijo Mn-karbidov.

Izvedena regresijska analiza v bistvu opisuje kvantitativno odvisnost mikrostrukturnih parametrov od kemijske sestave in časa strjevanja. Najboljša soodvisnost med izračunanimi in izmerjenimi vrednostmi je pri vsebnosti perlita z determinacijskim koeficientom $R^2 = 98,3$ %. Pri nodularnosti je dosežen mnogo nižji koeficient 78.8 % zaradi večjih razlik med samimi podatki. Kljub temu pa so podatki enakomerno razporejeni okoli koordinate na Sliki 4, ki kaže pravilno regresijsko analizo. Količina karbidov nakazuje dobro soodvisnost med izračunanimi in izmerjenimi podatki v večini primerov, vendar pa so nekatere točke zunaj koordinate, prikazane na Sliki 7(b). Ta odstopanja so posebej pomembna pri visokih vsebnostih karbidov.

a carbide promoting element in literature for conventional DI. As a result, it can be concluded that the high silicon content in SSDI prevents the formation of Mn-carbides. In contrast to Cr or V, manganese has a less pronounced segregation profile. Values for the segregation factors of these and other elements are given by Hasse [4]. It can be concluded that the enrichment of Mn in the residual melt during solidification is insufficient to precipitate Mn-carbides.

The regression analysis performed essentially describes the quantitative dependence of microstructure parameters on the chemical composition and solidification time. The best correlation between the values calculated and measured is found for the pearlite content with a coefficient of determination of $R^2 = 98.3$ %. For nodularity, a much lower coefficient of 78.9 % is reached because of the larger variation of data itself. Nevertheless, the data are homogeneously distributed around the trend line in Figure 4 which indicates a correct regression analysis. For the amount of carbides a good correlation between calculated and measured data is found in most cases, however some points are located far away from the trend line in Figure 7 b. These discrepancies are especially significant for high carbide contents. Maybe additional interaction terms are required to describe these data points, however no clear trend is evident. In future work this issue is analyzed in detail with the help of microsegregation simulation as performed by Pustal et al. [22].

6 Conclusions

The aim of this work is to analyse and quantify the impact of multiple pearlite and carbide promoting elements on the

Morda so za opis teh podatkovnih točk potrebne dodatne interakcije, vendar jasen trend ni razviden. V prihodnjem delu to vprašanje podrobno obravnavano skozi analizo s pomočjo mikrosegregacijske simulacije, kot so jo izvedli Pustal et al. [22].

6 Sklepi

Cilj tega dela je analizirati in količinsko ovrednotiti vpliv elementov, ki spodbujajo tvorbo perlita in karbida, na mikrostrukturo SSDI EN-GJS-500-14 pri različnih pogojih hlajenja. V tem smislu smo dognali naslednje:

1. Čas strjevanja vpliva predvsem na število vozlov. Nodularnost je odvisna od časa strjevanja in ostanka Mg. Koncentracija karbidotvornih elementov dodatno zmanjšuje nodularnost. Na nodularnost močno negativno vpliva vanadij.
2. Krom in baker močno spodbujata tvorbo perlita v SSDI, molibden, mangan, niobij in vanadij pa so šibki spodbujevalci tvorbe perlita. Pri različnih pogojih ohlajanja nismo opredelili bistvenega vpliva časa strjevanja ali števila vozlov na količino perlita, kajti učinek časa in učinek razdalje se medsebojno izenačujeta. Učinek spodbujanja tvorbe perlita pri proučevanih legirnih elementih se večja na enostaven in linearen način.
3. Vanadij in niobij močno vplivata na količino karbidov, prav tako pa medsebojno močno reagirata. Tudi krom in molibden precej vplivata na količino karbidov, nobenega zvečanja pri vsebnosti karbidov pa nismo zaznali pri dodatku 0,5 mas. % mangana. Zaključimo lahko, da karbidotvorni učinek Mn do neke mere kompenzira visoka vsebnost Si.

microstructure of SSDI EN-GJS-500-14 for different cooling conditions. With respect to this, the following conclusions can be outlined.

1. The solidification time chiefly impacts the nodule count. The nodularity depends on solidification time and the residual Mg-content. The concentration of carbide promoting elements additionally decreases the nodularity. Especially vanadium has a distinct negative impact on nodularity.
2. Chromium and copper are strong pearlite promoters in SSDI, whereas molybdenum, manganese, niobium and vanadium are weak pearlite promoters. For different cooling conditions, no significant impact of the solidification time or the nodule count on the amount of pearlite was found, because the time effect and the distance effect compensate for each other. The pearlite promoting effect of the alloying elements investigated adds up in a simple linear manner.
3. Vanadium and niobium have a strong impact on the amount of carbides and their interaction is significant. Chromium and molybdenum also have a distinct influence on the amount of carbides, whereas no increase of carbide content is found when 0.5 wt. % manganese is added. In conclusion, to some extent the carbide promoting effect of Mn is compensated by the high Si-content.

The regression formulas calculated allow the forecast of microstructure parameters from a given chemical composition, at least within the analyzed ranges. The scattering results of the carbide content at elevated levels of carbide promoting elements as well as the influence on the mechanical properties of SSDI will be presented in future publications.

Izračunane regresijske formule omogočajo napoved mikrostrukturnih elementov na podlagi kemijske sestave, vsaj v okviru analiziranih razponov. Rezultati raztrosa vsebnosti karbidov pri visokih količinah karbidotvornih elementov, pa tudi vpliv na mehanske lastnosti SSDI, bodo predstavljeni v prihodnjih objavah.

Zahvale

Avtorji smo zelo hvaležni združenju AIF za financiranje projekta IGF št. 18555N raziskovalnega združenja za livarsko tehnologijo v okviru programa spodbujanja industrijske skupnosti zveznih ministrstev za gospodarstvo in energetiko. Avtorji se zahvaljujemo družbam Georg Fischer GmbH, Quarzwerke GmbH in Hüttenes Albertus Chemische Werke GmbH za dobavo materialov; Ingu Braunu in Dietmarju Lembrechtu za njuno podporo med proizvodnim procesom; Elke Schaberger-Zimmermann, Elke Breuer in Moniki Fafflok za metalografsko pripravo vzorcev, pa tudi Marii Schaarschmidt in Davidu Stepputat za izvedbo kvantitativne slikovne analize.

Acknowledgements

The authors are very grateful to the AIF for funding the IGF project 18555N of the research association for foundry technology in the framework of the program for promotion of the industrial community of the federal ministry for economy and energy. The authors gratefully acknowledge the Georg Fischer GmbH, the Quarzwerke GmbH and Hüttenes Albertus Chemische Werke GmbH material supply; Ingo Braun and Dietmar Lembrecht for their support during the production process; Elke Schaberger-Zimmermann, Elke Breuer and Monika Fafflok for the metallographic specimen preparation as well as Maria Schaarschmidt and David Stepputat for the quantitative image analysis.

Viri / References

- [1] C. Labrecque, M. Gagne, R. T. I. a. T. Inc., Ductile Iron: Fifty years of continuous development, Canadian Metallurgical Quarterly 37 (1998) 343– 378.
- [2] H. Löblich, Gusseisen mit Kugelgraphit profitiert vom hohen Siliziumgehalt, Maschinen Markt 41 (2011) 42– 46.
- [3] H. Löblich, W. Stets, G. Gassner, P. Schumacher, Hoch siliciumhaltiges Gusseisen mit Kugelgraphit toleriert größere Anteile an carbidbildenden Elementen, Giesserei 99(4) (2012) 28– 32.
- [4] S. Hasse, Niedriglegiertes Gusseisen mit Kugelgraphit, Gießerei-Praxis 8 (Niedriglegiertes GJS) (2005) 293– 301.
- [5] E. Nechtelberger, Der Einfluss von Vanadium auf das Gefüge und die mechanischen Eigenschaften von Gußeisen mit Kugelgraphit, Gießerei-Praxis 1 (1969).
- [6] I. Rivera, A. Roca, F. Patino, M. Cruells, Microalloyed niobium influence on ductile ferrite cast iron, International Journal of Cast Metals Research 16 (2003).
- [7] T. N. F. Souza, F. J. S. Franco, R. A. P. S. Nogueira, M. T. P. Aguiar, P. R. Cetlin, Mechanical and Microstructural Characterization of Nodular Cast Iron with Niobium Additions, Materials Research 17(5) (2014) 1167– 1172.

-
- [8] M. Nili Ahmadabadi, E. Niyama, E. Tanino, T. Abe, T. Ohide, Chemical Composition and Structural Identification of Eutectic Carbide in 1 Pct Mn Ductile Iron, *Metallurgical and Materials Transactions A* 25A (1994) 911– 918.
- [9] G. S. Cho, K. H. Choe, K. W. Lee, A. Ikenaga, Effects of Alloying Elements on the Microstructures and Mechanical Properties of Heavy Section Ductile Cast Iron, *Journal of Materials Science & Technology* 23 (2007) 97– 101.
- [10] J. Hernandez-Avila, E. Salinas-Rodriguez, E. Cerecedo-Saenz, I. Rivera-Landero, E. Cardoso-Legorreta, E. Javier Flores-Badillo, M. I. Reyes-Valderrama, The effect of molybdenum on the microstructure of nodular iron, *European Scientific Journal* 11(36) (2015) 337.
- [11] E. Campomanes, R. Goller, The Effect of Certain Carbide Promoting Elements on the Microstructure of Ductile Iron, *AFS Transactions* 87 (1979) 619– 626.
- [12] M. Riebisch, H. G. Sönke, B. Pustal, A. Bührig-Polaczek, Influence of Carbide-Promoting Elements on the Pearlite Content and the Tensile Properties of High Silicon SSDI Ductile Iron, *International Journal of Metalcasting* (2017).
- [13] G. Wolf, W. Stets, U. Petzschmann, Bewertung der kumulativen Wirkung von Carbid bildenden Elementen auf die Eigenschaften von GJS-400-15, *Gießerei 10 (Technologie & Trends)* (2011) 24–32.
- [14] A. Velichko, Quantitative 3D Characterization of Graphite Morphologies in Cast Iron using FIB Microstructure Tomography, *Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät III Chemie, Pharmazie, Bio- und Werkstoffwissenschaften, Universität des Saarlandes, Saarbrücken*, 2008.
- [15] J. M. Borrajo, R. A. Martínez, R. E. Boeri, J. A. Sikora, Shape and Count of Free Graphite Particles in Thin Wall Ductile Iron Castings, *ISIJ International* 42(3) (2002) 257–263.
- [16] G. Rivera, R. Boeri, J. Sikora, Influence of the inoculation process, the chemical composition and the cooling rate, on the solidification macro and microstructure of ductile iron, *International Journal of Cast Metals Research* 16(1-3) (2003) 23–28.
- [17] R. Salazar F., M. Herrera-Trejo, M. Castro, J. Méndez N., J. Torres T., M. Méndez N., Effect of nodule count and cooling rate on As-Cast matrix of a Cu-Mo spheroidal graphite cast iron, *Journal of Materials Engineering and Performance* 8(3) (1999) 325–329.
- [18] Z. Shen, H. Zheng, T. Li, Y. Xu, R. Xu, X. Tian, The Influence of the Residual Mg Content in the Ductile Cast Iron on the Formation Law of Spheroidal Graphite, *Advanced Materials Research* 415–417 (2011) 907–914.
- [19] Y. Iwabuchi, H. Narita, O. Tsumura, Toughness and Ductility of Heavy- Walled Ferritic Spheroidal-Graphite Iron Castings, *Research Reports Kushi National College*, 2003, str. 1–9.
- [20] J. M. Massone, R. E. Boeri, J. A. Sikora, Solid state transformation kinetics of high nodule count ductile Iron, *International Journal of Cast Metals Research* 16(1–3) (2003) 179–184.
- [21] J. Lacaze, J. Sertucha, L. Magnusson Aberg, Microstructure of As-cast Ferritic-pearlitic Nodular Cast Irons, *ISIJ International* 56(9) (2016) 1606–1615.
- [22] B. Pustal, A. Bührig-Polaczek, Physico-chemical causes of the formation of chunky graphite in austenitic ductile iron, *Acta Materialia* 124 (2017) 137–142.

Nanotehnologija v metalurgiji: analiza stanja in napoved razvoja

Nanotechnology in metallurgy: Status analysis and prediction of development

Povzetek

Napredek v metalurgiji je v drugi polovici dvajsetega stoletja povezan s hitro zamenjavo osnovnih proizvodnih sistemov; rečemo lahko, da gre za obdobje nove tehnične revolucije. V teh okvirih so poznane modifikacije elektro-talilnih sistemov, uvedba novih postopkov toplotnih obdelav jekel in vakuumskega pretaljevanja, kontinuirnega litja, kakor tudi metalurgija prahov in hidro-ekstrudiranje. Vse to predstavlja nove pristope za izdelavo visoko kakovostnih jekel.

V zadnjem desetletju je bil dosežen še napredek v metalurgiji predvsem z razvojem nanotehnologije, zlasti na področju proizvodnje visoko kakovostnih materialov za uporabo v elektroniki, optiki, gradbeništvu, energetiki, proizvodnji, aeronavtiki in drugod. V »metalurgiji na veliko« se tako že uporabljajo nekateri principi nanotehnologije, in sicer v postopkih za doseg velike plastične deformacije v ustreznem orodju (v zaprtih matrikah in zaprtih valjčnih žlebičih) ali pri termo redukciji z visoko stopnjo redukcije oziroma pri nizkotemperaturni finalni deformaciji. Nasprotno temu je nanotehnologija manj pomembna v metalurgiji železnih kovin. Trenutno se serijska proizvodnja kakovostnih valjanih jekel še vedno opira na legiranje. Stroški izdelave takšnih finoizdelkov brez vsebnosti oksidov in ostalih nekovinskih vključkov so visoki. Jeklo, ki ima drobnozrnato mikrostrukturo, je namreč bistveno kakovostnejše, saj pomeni posredno garancijo za visoko trdnost, stabilnost pri nizkih/visokih temperaturah in odpornost proti koroziji. Konkurenčnost metalurških izdelkov na svetovnem trgu je prvenstveno odvisna od teh lastnosti jekel, saj omogoča uporabo le-teh za najrazličnejše aplikacije. Ob upoštevanju, da so med uporabo ta jekla različno obremenjena in ob tem izpostavljena velikim plastičnim deformacijam, je prisotnost defektov in različnih vključkov v mikrostrukturi neželena, saj lahko to pripelje do zloma materiala oziroma konstrukcije, prej kot je bilo predvideno. Zato je potrebno poznati možne scenarije življenjske dobe tovrstnih izdelkov. Za izračune življenjske dobe se v zadnjem času uporablja simulacija na osnovi nanostrukturiranja. Pri tem se izračunavajo trdnosti posameznih nanofaz v conah maksimalnih napetosti z izbrano fragmentacijo matrične faze. Izračuni kažejo, da je trdnost in življenjska doba takšnega izdelka odvisna od njegove začetne strukture in dinamično-strukturnih sprememb, kakor tudi od samoorganizacije utrjevanja nanokompozitnih faz, ki razpršijo vneseno energijo. Urejen nanokompozit ima bistveno boljše lastnosti: trdoto, trdnost ter plastičnost v primerjavi z neurejenim. Z reguliranjem nastanka finoizdelane strukture omogočamo nastanek urejenega nanokompozita, ki ni samo trden, ampak tudi plastičen in preoblikovalen v hladnem. To pa je osnova za poenostavitev postopka termo-mehanske obdelave tovrstnih jekel.

Zaključimo lahko, da je proces izdelave raznovrstnih jekel, vezan na doseganje drobnnozrnate strukture z maksimalno vsebnostjo utrjevalne kovinske nanofaze (karbidi, nitridi, karbo-nitridi, intermetalne faze) in z minimalno vsebnostjo žvepla, fosforja, oksidov in ostalih nekovinskih vključkov. Danes se zdi, da je takšen nanosistemski pristop obravnavanja jekel zelo obetaven.

Ključne besede: metalurgija, nanotehnologija, utrjanje, simulacije

Abstract

Progress in metallurgy in the second half of the twentieth century is connected with the rapid replacement of basic production systems, and we can say that this is a period of a new technical revolution. Within these frameworks there are known modifications of electro-melting systems, introduction of new processes of heat treatment of steels and vacuum refining, continuous casting, as well as powder metallurgy and hydro-extrusion. All this represents new approaches for the production of high-quality steels. In the last decade, progress has been made in metallurgy, primarily through the development of nanotechnology, especially in the field of manufacturing high quality materials for use in Electronics, Optics, Construction, Energy, Manufacturing, Astronautics and elsewhere. Some of the principles of nanotechnology are already being used in the "metallurgy in bulk" procedures for achieving large plastic deformation in the appropriate tool (in closed matrices and closed rolling grooves) or in thermo-reduction with a high degree of reduction or in a low temperature final deformation. In contrast, nanotechnology is less important in metallurgy of ferrous metals. At present, the serial production of quality rolled steel still relies on alloying. The cost of producing such finely grained steels without oxides and other non-metal inclusions is high. Steel, which has a fine grain microstructure, is significantly better, because it represents an indirect guarantee for high strength, stability at low/high temperatures and resistance to corrosion. The competitiveness of metallurgical products on the world market depends primarily on these properties of steels, since it allows them to be used for a wide variety of applications. Taking into account that during use, these steels are subjected to varying stresses and are subjected to high plastic deformations, the presence of defects and various inclusions in the microstructure is undesirable, as this can lead to a breakdown of material or construction before its time. Therefore, it is necessary to know the possible scenarios of the life of such products. Simulation based on nanostructuring has recently been used for life-cycle calculations. In the simulations, the strengths of individual nanophases are calculated in the maximum tension zones with a selected matrix phase fragmentation. Calculations show that the strength and lifetime of such a product depends on its initial structure and dynamic-structural changes, as well as from the self- organisation of the hardening of nanocomposite phases that disperse the energy input. An ordered nanocomposite has significantly better properties hardness, strength and plasticity, compared to the unordered. By regulating the formation of a fine-grained structure, we allow the formation of an ordered nanocomposite which is not only solid, but also plastic and cold transformable. This is the basis for the simplification of the thermo-mechanical treatment of such steels.

We can conclude that the process of manufacturing of various steels is related to achieving a fine grain structure with a maximum content of hardening metal nanoparticles (carbides, nitrides, carbo nitrides, intermetallic phases) and with minimum sulphur,

phosphorus, oxide and other non-metallic inclusions. Today, this nanosystemic approach to the treatment of steels seems to be very promising.

Key words: metallurgy, nanotechnology, hardening, simulations

1 Uvod

Nanotehnologija je veja znanosti, ki se osredotoča na materiale z vsajeno dimenzijo pod 100 nm. Nanomateriali (nanodelci, nanocevke, nanopiramide) imajo drugačne lastnosti v primerjavi z materiali običajnih dimenzij. Njihove spremenjene fizikalne in kemične lastnosti izhajajo iz velikega razmerja med površino in volumnom ter visoke površinske aktivnosti. Znale so različne metode izdelave nanodelcev, ki jih delimo na dva pristopa: od spodaj navzgor in od zgoraj navzdol. Primeri izdelave od spodaj navzgor so metode sol-gel, kemično napaarjevanje, sinteza z razpršilnim plamenom, različne pirolize, ter atomska ali molekularna kondenzacija [1-4]. Med metode izdelave od zgoraj navzdol štejemo lasersko ablacijo, nanolitografijo in visoko-energijsko mletje [5, 6]. Trenutno te metode omogočajo proizvodnjo majhnih količin nanodelcev, z velikimi variacijami oblik in velikosti pri izdelavi različnih serij nanodelcev.

2 Sodobno stanje nanotehnologije v metalurgiji

Doseganje drobnozrnate strukture pri nastanku materiala na področju metalurgije je bilo vedno videti težavno in zahtevno [7]. Danes obstaja več obetavnih pristopov, ki temeljijo na nanotehnologiji. Trdnost kovin, zlasti jekel različnih razredov, se lahko poveča za faktor 3-4 z uporabo nano-stanj, poveča se trdota v hladnem, ob tem pa se zelo poveča še odpornost na korozijo [8, 9]. Glavna prednost nanotehnologije

1 Introduction

Nanotechnology is a branch of science and engineering focused on materials with at least one dimension below 100 nm. Nanomaterials (nanoparticles, nanotubes, nanopyrramids) have different properties compared to materials with ordinary dimensions. Their altered physical and chemical properties come from a large surface-to-volume ratio and a high surface activity. Different production methods for nanoparticles are known; they are divided into bottom-up and top-down approaches. Bottom-up examples include sol-gel, chemical vapour deposition, flame spray synthesis, various pyrolysis and atomic or molecular condensation [1-4]. Top-down methods include laser ablation, nanolithography and high-energy milling [5, 6]. Currently, these methods are suitable for production of small quantities of nanoparticles with major variations in shapes and sizes of the nanoparticles from production of different batches.

2 State-of-the-art Nanotechnology in Metallurgy

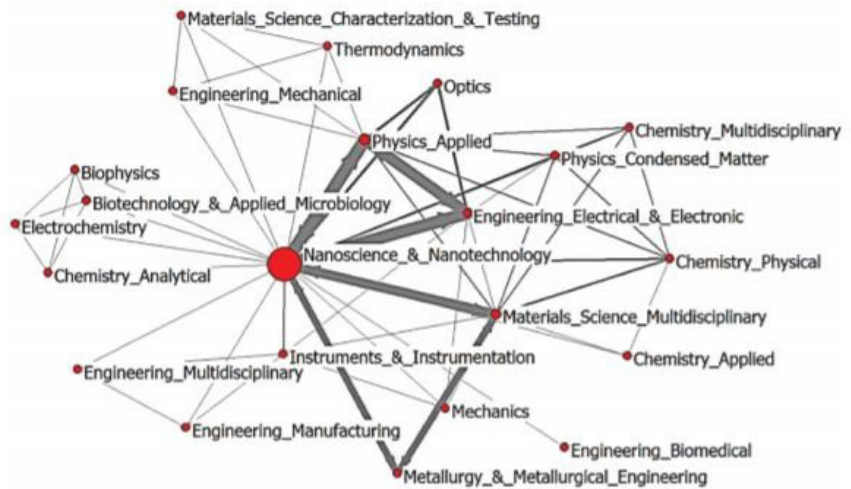
The production of a fine-grained structure in the formation of a material in the field of Metallurgy had always seemed tricky, difficult and challenging [7]. Today, several approaches based on Nanotechnology are promising. The strength of the metal, especially steels with different grades, can be increased by a factor of 3-4 with the application of nano-states, the hardness by an order of magnitude with the improvement

je mikro legiranje v fazah nitrida in karbo-nitrida pri jeklu, pa tudi pri širokem naboru kovinskih izdelkov. Nedavno so poročali o nano-procesih v kovinski talini, ki so bili ustvarjeni za izdelavo fino zrnate strukture z močnim povečanjem običajne trdnosti in trdnosti v hladnem pri poznanih ogljikovih ter nizko legiranih jeklih. Uvajanje teh novih nanotehnoloških metod je povečalo proizvodnjo takšnih jekel: 85-86 % celotne proizvodnje, vključno s 72-74 % ogljikovimi jekli in 13-14 % nizko legiranimi jekli [10]. Brez dvoma mora izdelava nove generacije kovinskih izdelkov temeljiti na kombinaciji nano-tehnoloških načel, vključno z nano-procesi za taljenje jekla, tlačne obdelave kovin in toplotne obdelave, s čimer se poveča tudi proizvodnja železniških koles in tirnic. Izboljšave pri razvoju tirnic s povečanjem njihove življenjske dobe in zanesljivosti zahteva vključitev nano-tehnološkega mikrolegiranja železniškega jekla z elementi, ki tvorijo karbo-nitridne elemente s pomočjo atomskega dušika in aluminija. Nedavna poročila so pokazala oblikovanje proizvodne tehnologije za čisto drobnozrnato jeklo s samoorganizacijo utrditve nanofaz, ki predstavljajo novo stopnjo razvoja nano-sistemov v metalurgiji in tudi novo stopnjo razvoja proizvodne tehnologije za visoko kakovostna jekla. Za proizvodnjo vroče valjanega traku iz ogljikovega, nizko legiranega in manganovega jekla s povišano trdnostjo in stabilnostjo v hladnem zagotavljajo nanotehnologije visoko gospodarsko učinkovitost. Njihova uvedba ne zahteva kapitalskih izdatkov in ne vpliva na delovne pogoje ali na okolje. Metalurška podjetja, ki aktivno preučujejo uporabo nanotehnologij, imajo možnost uvesti izdelke z izboljšanimi lastnostmi in zmanjšati proizvodne stroške z jasnimi konkurenčnimi koristmi [11].

in the cold strength, and great increase in the corrosion resistance [8, 9]. The main advantage of Nanotechnology is micro-alloying in the nitride and carbo-nitride phases in the case of steels, as well as in a wide range of metal products. Recently reported nano-processes during the metal melt have been created to produce a fine-grain structure with a sharp increase of the strength and cold strength in the widely used carbon and low-alloy steels. The significance of the introduction of these new nano-technological methods has increased the output of such steel: 85–86% of total production, including 72–74% of carbon steel and 13–14% of low-alloy steel [10]. Undoubtedly, the creation of a new generation of metal products must be based on a combination of nano-technological principles, including nano-processes for steel smelting, pressure treatment of metals, and heat treatment, thereby increasing the production of railroad wheels and rails. Improvement in the development of rails with an increase in their operational life and reliability calls for the incorporation of nano-technological micro-alloying of rail steel with carbo-nitride-forming elements by means of atomic nitrogen and aluminium. Recent reported works showed the creation of a production technology for pure fine-grain steel with self-organisation of strengthening nanophases, representing a new stage in the development of nano-systems in Metallurgy, and also a new stage in the development of a production technology for high quality steel. The production of hot-rolled strip from carbon, low-alloy, and manganese steel of elevated strength and cold stability, nanotechnologies ensure high economic efficiency. Their introduction does not require capital expenditure, and has no impact on the working conditions or on the environment. Metallurgical enterprises actively exploring the application of

Sl. 1: Mrežna struktura področij nanoznanosti in nanotehnologij

Fig. 1: Disciplinary network structure of Nanoscience & Nanotechnology



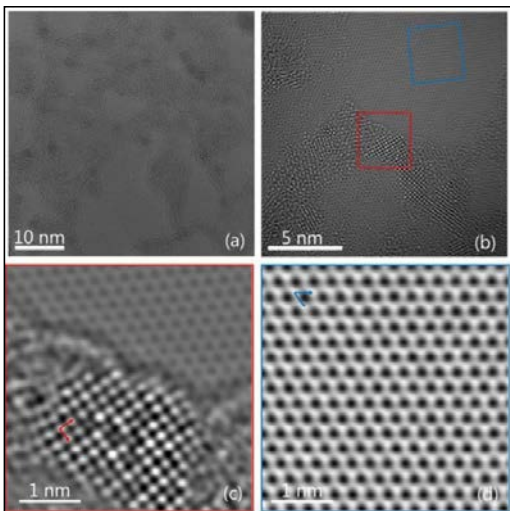
Vpogled v strukturo področij znanosti kaže osrednjo mesto za nanoznanost & nanotehnologije (glej sliko 1).

Na osnovi tega lahko sklepamo, da je nanoznanost, ki se je začela leta 1980, danes uvrščena v središče omrežja tehničnih znanosti. Nanoznanost in nanotehnologija je povezana z 22 vozlišči in je neizogibno vključena v vse vidike razvoja ter raziskav.

nanotechnologies have the opportunity of introducing products with improved properties and reducing production costs, with clear competitive benefits [11].

Insight into the Disciplinary Science Structure shows the central location of Nanoscience & Nanotechnology (see Figure 1).

It can be concluded that Nanoscience, which started in 1980, today, has a position within all technician science in the centre of the network. It looks as though Nanoscience



Sl. 2: (a) HR-TEM slika z velikim vidnim poljem, ki prikazuje velike 2 nm Ti-okside, (b) slika iz žariščne serije z izbranimi regijami za rekonstrukcijo izhodnih valov. Fazne slike rekonstruiranega vala, ki prikazujejo eno jedro in grafensko mrežo, so prikazane v slikah c in d [15]

Fig. 2: (a) HR-TEM image with a large field of view showing many 2 nm Ti-oxide, (b) One image from the focal series with the selected regions for exit-wave reconstruction. The phase images of the reconstructed wave showing one nucleus and the graphene lattice are shown in panels c and d [15]

3 Primer iz industrijske prakse

Eden izmed bolj znanih primerov povezave nanotehnologije z metalurgijo je proizvodnja zlitine Ti-Nb. Zlitina se je izdelala z različnimi vsebnostmi Nb, s procesom metalurgije prahov (Powder Metallurgy – PM), pri čemer so bile dobljene veliko boljše mikrostrukture in mehanske lastnosti. Pri eni od študij [12] so ocenili vpliv nastanka faz na mehansko trdnost Ti-Nb zlitine, izdelane s PM procesom.

Drugi primer je izdelava AlSiMnFe zlitine s pomočjo Equal Channel Angular Pressing (ECAP), kjer so v primerjavi s konvencionalnimi metodami pridobili popolnoma drugačne mikrostrukturne in mehanske lastnosti [13]. Z ECAP je bila stopnja deformacije zlitine določena za en prehod in z največjo obremenitvijo. Nano-finozrnato zlitino AlSiMnFe so izdelali z udrobnjevanjem zrnate žarjene zlitine z večkratnim ECAP postopkom pri sobni temperaturi. Rezultati navajajo dva režima: pri 1 do 2 prehodih se mikrostruktura razvije v nano-finozrnato, pri 2 do 4 prehodih pa se povprečna velikost zrn ne spremeni.

Naslednji primer je deklorinacija prahu cinkovega oksida z nano velikostjo s tehnologijo čiste metalurgije [14]. Postopek deklorinacije iz prahu cinkovega oksida z mikrovalovnim pečenjem so ocenili glede na učinek različnih temperatur za pečenje in glede na čas držanja. Rezultati raziskav so pokazali, da se $ZnCl_2$ in $PbCl_2$ z visokim faktorjem izgube prednostno segrejeta z mikrovalovi, delež dekloriranja pa lahko doseže 97,22 % po mikrovalovnem pečenju pri 650 °C za 40 minut.

Nadzorovana sinteza hibridnega nanomateriala na osnovi titanovega oksida in enoslojnega grafena (Single-Layer Graphene, SLG) z uporabo nanašanja atomskega sloja (Atomic Layer Deposition, ALD) je prav tako dober

& Nanotechnology are connected to the 22 nodes, and is necessarily included into all aspects of development and research.

3 Example from industrial praxis

One of the well-known examples of the connection of Nanotechnology and Metallurgy is the production of Ti-Nb Alloy at different compositions of Nb, produced via the Powder Metallurgy (PM) Route, where much better microstructures and mechanical properties were obtained. In one study [12] the effect was evaluated of phase formation to the mechanical strength of Ti-Nb alloy produced by the PM process.

The second example is the production of AlSiMnFe alloy by Equal Channel Angular Pressing (ECAP), where completely different microstructural and mechanical characteristics were obtained compared with conventional methods [13]. By ECAP, the defectiveness degree of the alloy was determined for one pass and maximum strain. Nano-fine grained AlSiMnFe alloy was produced by refining grained annealed bulk by multi-pass ECAP at room temperature. The results reveal two regimes: From 1 to 2 passes, the microstructure evolves to the equivalent of nano-fine grains, and from 2 to 4 passes there is no strict change in the average grain size.

The next example is the dechlorination from nano sized zinc oxide dust by clean metallurgy technology [14]. The process of dechlorination from zinc oxide dust by microwave roasting was evaluated considering the effect of different roasting temperatures and holding times. The research results showed that the $ZnCl_2$ and $PbCl_2$ with high-loss factor were heated preferentially by microwave, and the dechlorination rate can reach 97.22% after microwave roasting at 650°C for 40 min.

primer pri načrtovanju metalurškega procesa [15]. Morfologijo in kristaliničnost oksidnega sloja na SLG lahko kontroliramo predvsem s temperaturo nanašanja, pri čemer dosežemo bodisi enotno amorfno plast pri 60°C ali ~2 nm posameznih nanokristalov na SLG pri 200°C po samo 20 ciklih ALD (glej sliko 2). Neprekinjena in enakomerna amorfna plast, oblikovana na SLG po 180 ciklih pri 60°C, se lahko pretvori v polikristalinično plast, ki vsebuje domene faze anataza TiO₂ po nanašanju z žarjenjem pri 400°C v vakuumu. Z uporabo presevalne elektronske mikroskopije s korigirano aberacijo (Aberration-Corrected Transmission Electron Microscopy, AC-TEM) je bila strukturna in kemična karakterizacija izvedena na atomskem nivoju, kar je dalo vpogled v razumevanje nukleacije in rasti. AC-TEM slikanje in spektroskopija energijske izgube elektronov sta pokazali, da so TiO nanokristali kamene soli občasno nastali v zgodnji fazi nukleacije po samo 20 ALD ciklih. Razumevanje in nadzor nukleacije in rasti hibridnega nanomateriala sta ključnega pomena za doseganje novih lastnosti in večjo učinkovitost za široko paleto aplikacij, ki izkoriščajo sinergijske funkcije zloga.

Materiali z visoko električno in toplotno prevodnostjo, z mikrostrukturno stabilnostjo in visoko temperaturno trdnostjo so zelo privlačni za električno-elektronsko industrijo, pa tudi v posebni strojni industriji (aktivno hlajeni deli, raketne šobe, magnetna žica in kabli, konice varilnih elektrod). Pri temperaturah, ki so precej nad okolico, večina utrjevalnih mehanizmov, kot so trdne raztopine, hladna deformacija in izločevalno utrjevanje, postane neučinkoviti. Namreč, pri visokih temperaturah ratopljeni atomi v trdni raztopini utrjene kovinske zlitine ne morejo blokirati dislokacij, deformacijsko utrjene kovine se rekristalizirajo in postanejo zelo mehke, izločki v izločevalno utrjenih

Controlled synthesis of a hybrid nanomaterial based on titanium oxide and Single-Layer Graphene (SLG) using Atomic Layer Deposition (ALD), is also a known example in the design of the metallurgy process [15]. The morphology and crystallinity of the oxide layer on SLG can be tuned mainly with the deposition temperature, achieving either a uniform amorphous layer at 60°C or ~2 nm individual nanocrystals on the SLG at 200°C after only 20 ALD cycles (see Figure 2). The continuous and uniform amorphous layer formed on the SLG after 180 cycles at 60°C can be converted to a polycrystalline layer containing domains of anatase TiO₂ after a postdeposition annealing at 400°C under vacuum. Using Aberration-Corrected Transmission Electron Microscopy (AC-TEM), characterization of the structure and chemistry was performed on an atomic scale, and provided insight into understanding the nucleation and growth. AC-TEM imaging and electron energy loss spectroscopy revealed that rocksalt TiO nanocrystals were formed occasionally at the early stage of nucleation after only 20 ALD cycles. Understanding and controlling nucleation and growth of the hybrid nanomaterial are crucial to achieving novel properties and enhanced performance for a wide range of applications that exploit the synergetic functionalities of the ensemble.

Materials with a high electrical and thermal conductivity, respectively, with the microstructural stability and high temperature strength, are very attractive for the electric-electronic industry, and also in the special machine building industry (actively cooled parts, rocket nozzles, magnet wire and cables, welding electrode tips). At temperatures well above ambient, most of the strengthening mechanisms, such as solid-solution hardening, cold working and precipitation hardening, become ineffective. Namely, at high

zlitinah pa se ponovno raztopijo in se tako izgubi učinek utrjevanja. Možna rešitev za izboljšanje utrjevanja zlitin pri visoki temperaturi zato predstavlja utrjevanje z vlakni (izdelava kompozitov) in disperzijsko utrjevanje. Izdelava kovinskih kompozitov temelji na uporabi ojačitvenih C-vlaken ali netopnih vlaken z visokim tališčem (Nb, W, ...). V industrijski praksi obstaja veliko znanih proizvodnih tehnologij za kompozit kovina-C, vendar noben od teh ne reši dveh težav: (i) vezave med matico in vlaknom, ki je izjemno šibka pri kompozitih kovina-C; (ii) doseganje visokega volumskega odstotka fino dispergiranih, nepovezanih grafitnih ali karbidnih delcev nano velikosti. Poleg tega je uporaba kompozita kovina-C pri visoki temperaturi omejena zaradi notranje oksidacije C-vlaken.

Vključitve majhnega odstotka dispergiranih, nepovezanih, finih disperzoidov nano velikosti v kovinsko matico je učinkovit način izboljšanja mehanskih lastnosti kovinskih materialov pri zelo visokih temperaturah. Pri takih disperzijsko utrjenih zlitinah dobimo učinek utrjanja z disperzijsko-dislokacijsko interakcijo, pri čemer disperzoidi ovirajo premike dislokacije. Dodatna zunanja napetost, ki je potrebna, da se dislokacija pri visoki temperaturi izogne nepovezanemu delcu in se lahko spet prosto giblje, je povezana z energijo za proces plezanja in energijo za naknadno ločitev dislokacijske črte od delca. Med fazo plezanja je potrebno zagotoviti dodatno energijo za dolžino nove dislokacije, ki se mora ustvariti. Hkrati del odseka dislokacije v stiku z delcem sprosti del svojega napetostnega polja (energija dislokacijske črte je nižja od polne energije v matici do sproščene energije na meji z delcem), tako da je potrebna dodatna sila za odstranitev dislokacije od delca. Skupni prag napetosti za premostitev dislokacije preko delca je največja vrednost

temperatures, solute atoms in solid-solution hardened metal alloys are not able to lock the dislocations, strain hardened metal recrystallizes and becomes very soft and precipitates in precipitation hardened alloys which go into the solution and their effect of hardening is lost. The possible solution for improved strengthening properties of alloys at high temperature therefore present the fibre strengthening (the composite formation) and dispersion strengthening. The metal-composite fabrication is based on the use of the reinforcement of C-fibre or non-soluble fibre with high melting (Nb, W,...). In the industrial praxis, there are many known production technologies for metal-C composite, but none of these solve the two problems: (i) The interfacial bonding matrix-fibre, which is extremely weak in metal-C composite; (ii) The attainment of a high volume percentage of finely dispersed, incoherent graphite or carbide particles of nano size. Furthermore, the use of metal-C composite at high temperature is limited because of the internal oxidation of C-fibre.

The inclusions of a small percentage of nanosized fine dispersed, incoherent, non-shearable dispersoids in a metal matrix is an efficient way of improving the mechanical properties of the metallic materials at very high temperatures. In such dispersion-strengthened alloys, the strengthening effect is obtained by dispersoids-dislocation interaction, whereby the dispersoids impede the dislocation motion. The additional supplied external stress, which is required so that the dislocation at high temperature avoids the incoherent particle and becomes again free to move, is associated with the energy for the climb process and the energy for subsequent detachment of the dislocation line from the particle. During the climbing stage, extra energy must be supplied for a new dislocation line length that has to be created. At the same time, the portion of the

dislocation line in contact with the particle relaxes part of its strain field (the line energy of dislocation is lower from the full energy in the matrix to the relaxed energy at the interface), such that an additional force is required to remove the dislocation from the particle. The overall threshold stress for dislocation bypass over the particle is the largest value of the two stresses - stress for local climb and for detachment. However, it was indicated that only a modest relaxation of the dislocation line energy (about 6 %) is necessary for detachment - controlled bypassing. So, it is obvious that relaxation of dislocation line energy plays an important role in the efficiency with which the particles inhibit dislocation motion. Such relaxation occurs by diffusional rearrangements of the atoms at the particle - matrix interface. The extent to which the dislocation relaxes its energy depends on the time of climbing and on the nature of the interface. As was shown in the literature [16], a high degree of dislocation relaxation can only be achieved at weakly bonded incoherent interfaces with a high specific energy. Therefore, the potential candidates for the effective dispersoids should have a crystal structure, which enables the dispersoids to exhibit a large lattice misfit at the interface with the matrix. Theoretically, if we remove the dispersion particles from the matrix, we would obtain the matrix strengthened with the "voids". While the relaxation of dislocation line energy occurs by diffusional rearrangements of the atoms at the "particle" - matrix interface, we obtain with the voids the highest degree of dislocation line energy relaxation and, hence, the greatest strengthening effect. According to the aforementioned, the development of the production technology of metallic materials strengthened with nanosized bubbles with high thermodynamically and chemically stability at high temperatures,

kovinski matici, kar posledično povzroča učinek utrjanja. Po drugi strani pa lahko takšno napetostno polje reagira z drsečo dislokacijo, s čimer se ovirajo premiki dislokacij.

4 Zaključki

Izdelava stabilnih funkcionalnih materialov na atomski ravni je končni cilj nanotehnologije in metalurgije. Različni procesi zahtevajo operacije ali uvedbo novih pristopov z visoko natančnostjo. Naša opažanja in pregled literature kažejo, da je postopek izdelave različnih materialov povezan z doseganjem finostrukture. Zato je potrebno imeti globlje razumevanje glede kemijskih in fizikalnih procesov na nano ravni, s čimer se lahko izdelave materiale z najvišjo kakovostjo.

Zahvala

To študijo sta podprla infrastrukturni program IO-0029 in raziskovalni program P2-0120, ki ju financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije ARRS. Zahvaljujemo se tudi Ministrstvu za šolstvo, znanost in šport Republike Slovenije (Program MARTINA, OP20.00369), ki je omogočilo sofinanciranje raziskav.

represents one of the solutions of high temperature strengthening. Such a material will be produced with the internal oxidation of metal- C discontinuous composite with fine dispersion of nanosized C-particles, where the reaction of dissolved oxygen with graphite yielded the gas products (CO and CO₂), which cannot occur in the metal-lattice, and they are meshed in the space previously occupied by graphite. The gas products have a greater specific volume than solid graphite, thus establishing the compressive stresses in the metallic matrix and, consequently, causing the strengthening effect. On the other hand, such stress field can react with sliding dislocation, whereby they impede the dislocation motion.

4 Conclusions

Fabricating stable functional materials at the atomic scale is the ultimate goal of Nanotechnology and Metallurgy. In different processes, high-precision operations or approaches are needed. Our observations and literature review show that the process of manufacturing of various materials is related to achieving a fine grain structure on the nano level. Therefore, a deeper understanding is needed connected to the chemical and physical processes on the nano-level, which could be a guarantee for the highest quality materials.

Acknowledgment

This study was supported by the Infrastructure Programme IO-0046 and Research Programme IO-0029 financed by the Slovenian Research Agency ARRS. Thanks also to the Ministry of Education, Science and Sport, Republic of Slovenia (Program MARTINA, OP20.00369), which enabled the research with co-financing.

Viri in reference / References

- [1] Y.-C. Wang and S. Gunasekaran, "Spectroscopic and microscopic investigation of gold nanoparticle nucleation and growth mechanisms using gelatin as a stabilizer," *J. Nanoparticle Res.*, vol. 14, no. 10, pp. 1–11, Sep. 2012.
- [2] R. G. Palgrave and I. P. Parkin, "Aerosol Assisted Chemical Vapor Deposition of Gold and Nanocomposite Thin Films from Hydrogen Tetrachloroaurate(III)," *Chem. Mater.*, vol. 19, no. 19, pp. 4639–4647, Sep. 2007.
- [3] T. T. Kodas and M. J. Hampden-Smith, *Aerosol Processing of Materials*, 1 edition. New York: Wiley-VCH, 1998.
- [4] J. Kimling, M. Maier, B. Okenve, V. Kotaidis, H. Ballot, and A. Plech, "Turkevich Method for Gold Nanoparticle Synthesis Revisited," *J. Phys. Chem. B*, vol. 110, no. 32, pp. 15700–15707, Aug. 2006.
- [5] N. G. Bastús, J. Comenge, and V. Puntès, "Kinetically Controlled Seeded Growth Synthesis of Citrate-Stabilized Gold Nanoparticles of up to 200 nm: Size Focusing versus Ostwald Ripening," *Langmuir*, vol. 27, no. 17, pp. 11098–11105, Sep. 2011.
- [6] G. Schmid and B. Corain, "Nanoparticulated Gold: Syntheses, Structures, Electronics, and Reactivities," *Eur. J. Inorg. Chem.*, vol. 2003, no. 17, pp. 3081–3098, 2003.
- [7] S. V. Kolpakov, V. A. Parshin, and A. N. Chekhovoi, "Nanotechnology in the Metallurgy of Steel", *Steel in Translation*, 2007, Vol. 37, No. 8, pp. 716–721, doi: 10.3103/S0967091207080177.
- [8] Chekhovoi, A.N., *Synergetics of Nanostructuring: Nanotechnology for Manufacturing: Appendix to the Journal Spravochnik*, Moscow: Mashinostroenie, 2006, no. 9, p. 24.
- [9] Baranov, S.M., Bezirozovannykh, A.V., and Chekhovoi, A.N., Influence of an Active Impurity on the Mechanical Strength and Few-Cycle Fatigue of High Strength Steel, *Dokl. Akad. Nauk*, 1981, vol. 261, no. 4, pp. 856–860.
- [10] Yu. A. Minaev, "Thermochemical Nanotechnology in Metallurgy and Machine Building", *Metallurgist*, Vol. 55, Nos. 11–12, March, 2012.
- [11] Yu. A. Minaev, "Functional steel alloys hardness and wear improving on a basis of phenomena of grain boundary phase transition" *Adv. Mat. Research*, 189–193, 4438–4441 (2011).
- [12] M. Yahaya et al., "Microstructures and Mechanical Properties of Ti-Nb Alloy at Different Composition of Nb Produced via Powder Metallurgy Route", *Materials Science Forum*, Vol. 863, pp. 14–18, 2016.
- [13] V.A.Andreyachshenko, A. B. Naizabekov, Microstructural and mechanical characteristics of AlSiMnFe alloy processed by equal channel angular pressing, *Metalurgija*, Vol.55 No.3 July 2016.
- [14] Aiyuan M., Xuemei Z., Shixing W., Jinhui P., Study on dechlorination kinetics from zinc oxide dust by clean metallurgy technology, 2016, <https://doi.org/10.1515/gps-2015-0041>.
- [15] Yucheng Z., Carlos G.-N., Ivo U.†, Michler J., Agrawal P., Rossell M.D., and Rolf E., Atomic Layer Deposition of Titanium Oxide on Single-Layer Graphene: An Atomic-Scale Study toward Understanding Nucleation and Growth, *Chem. Mater.*, 2017, 29 (5), pp 2232–2238.
- [16] J. Rösler, E. Arzt: A new model-based creep equation for dispersion strengthened materials; *Acta metall.*, Vol. 38, No. 4, 671–683, 1990.

Sekundarna tehnologija regeneracije peska no-bake za zmanjšanje stroškov in izboljšanje livarskega okolja

Secondary no-bake sand reclamation technology to reduce the cost and improve the foundry environment

Izvilleček

Livarna jekla z Bližnjega vzhoda je od lokalnih okoljskih oblasti prejela obvestilo, da bo zaradi območja, na katerem deluje, v primeru neuspešnega zmanjšanja količine hlapov pri litju morala zapreti svoja vrata.

Ta livarna se ukvarja z litjem v kemično vezani pesek na podlagi alkalno-fenolnega procesa za proizvodnjo form in jeder. Večinoma proizvaja ulitke iz manganskega, nerjavnega in drugega jekla, odpornega proti obrabi, s težo od 3 kg do 10 ton, s kombiniranjem mehanske formarske linije, formiranja v tleh in primarno mehansko regeneracijo.

Povezali so se s proizvajalci veziv, ki so si že prizadevali za uporabo zelo trdne alkalno-fenolne smole z malo dodatki, pri katerih se sprošča manj hlapov. Prav tako so se povezali z dobavitelji opreme, da bi poiskali rešitev za njihovo težavo s hlapi.

Po dolgotrajnem iskanju so našli rešitev, tj. posebno vrsto sekundarne mehanske regeneracije (sistem USR) (Sl. 1). Namen tega članka je predstaviti rezultate preizkušanja, ugotovitve o opremi za sekundarno mehansko regeneracijo ter pozitivni učinek sekundarne mehanske regeneracije na zmanjšanje količine hlapov ter druge pozitivne vplive na stroškovno učinkovitost in kakovost ulivanja.

Ključne besede: zmanjšanje količine hlapov, sekundarna mehanska regeneracija, USR, regeneracija peska za alkalno-fenolni proces

Abstract

A Middle Eastern steel foundry was informed by the local environmental agencies that due to the area in which they were located, they would have to close if a reduction in the level of casting fumes was not found.

The foundry in question is a chemically bonded sand foundry using the Alkaline Phenolic process for mould and core productions. They produce mainly manganese steel, stainless steel and other wear resistant steel castings from 3 kg up to 10 tons by using a combination of a mechanised moulding line, floor moulding and primary mechanical reclamation.

They have approached binder manufacturers, who have already been working on a high strength/low addition Alkaline Phenolic resin with less fume. They have also approached equipment suppliers to find a solution for their fume issue.

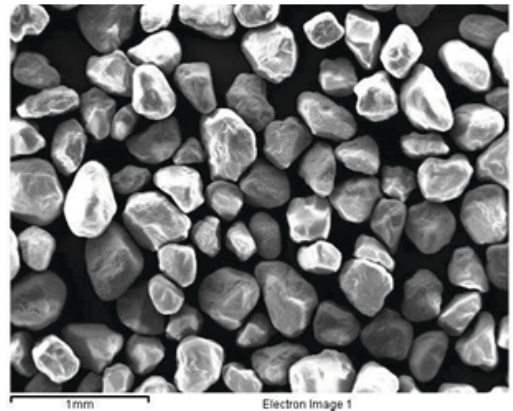
After a lengthy search, the found of a specific type of secondary mechanical reclamation (USR System) (fig 1) was the solution. This lecture is about the trial results and findings of the secondary mechanical reclamation equipment and the positive effect of secondary mechanical reclamation on fume reduction as well as other improvements of the cost efficiency and casting quality.

Key words: Fume reduction, mechanical secondary reclamation, USR, sand reclamation for Alkaline Phenolic process



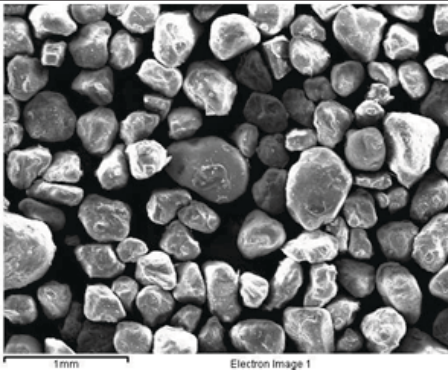
Sl. 1: Sekundarna drobljivost, sistem USR

Fig. 1: Secondary Attrition, USR, Unit



Sl. 2: Nov kremenčev pesek

Fig. 2: New silica sand

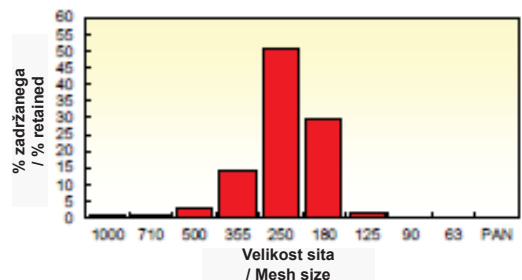


Sl. 3: Mehansko regenerirani pesek

Fig. 3: Mechanically reclaimed sand

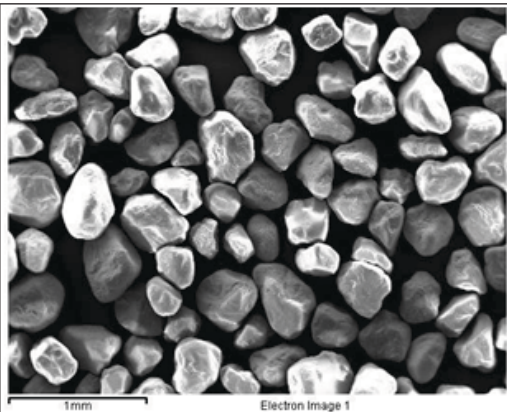
SEJALNA ANALIZA / SIEVE ANALYSIS

<u>Velikost sita</u> <u>/ Mesh size</u>	<u>% zadržanega</u> <u>/ % retained</u>
1000	0.50
710	0.48
500	3.01
355	14.12
250	50.53
180	29.66
125	1.55
90	0.12
63	0.04
PAN	0.00



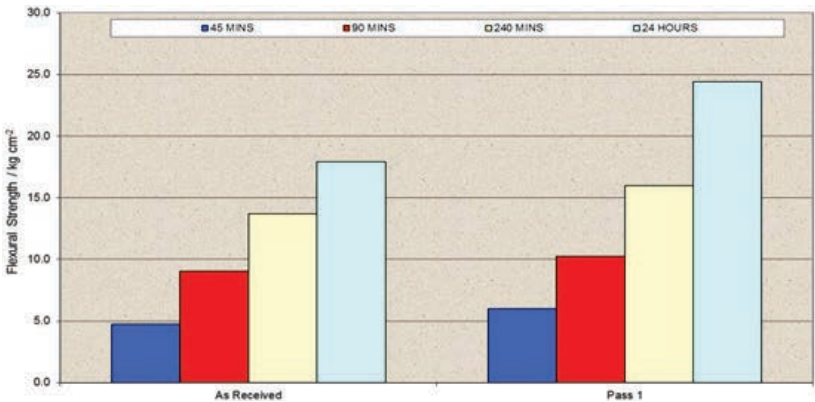
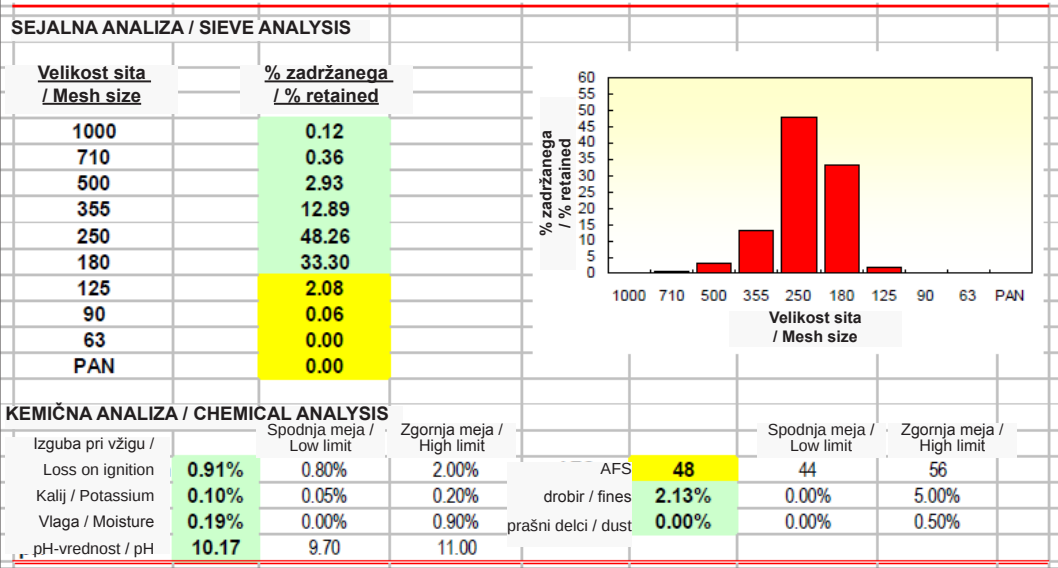
KEMIČNA ANALIZA / CHEMICAL ANALYSIS

		<u>Spodnja meja /</u> <u>Low limit</u>	<u>Zgornja meja /</u> <u>High limit</u>			<u>Spodnja meja /</u> <u>Low limit</u>	<u>Zgornja meja /</u> <u>High limit</u>
Izguba pri vžigu /				AFS	46	44	56
Loss on ignition	2.22%	0.80%	2.00%	drobir / fines	1.67%	0.00%	5.00%
Kalij / Potassium	0.16%	0.05%	0.20%	prašni delci / dust	0.04%	0.00%	0.50%
Vlaga / Moisture	0.63%	0.00%	0.90%				
pH-vrednost / pH	10.28	9.70	11.00				



SI. 4: Pesek po prvi in drugi obdelavi s sistemom USR

Fig. 4: Sand after 1st & 2nd pass through USR system



SI. 5: Razvoj trdnosti novega peska po obdelavi

Fig. 5: Strength development of new sand after processing

Preskusi s peskom

Preskusi z novim in regeneriranim peskom stranke so bili opravljeni v prostorih za raziskave in razvoj družbe Omega v Peterboroughu. Po obdelavi regeneriranega peska stranke s sistemom USR so zrna peska postala bolj zaobljena, pri mehansko regeneriranem pesku pa je bilo prav tako odstranjenih vsaj 60 odstotkov površinskih vezivnih sredstev, ne da bi to vplivalo na degradacijo peščenih zrn (Sl. 2, 3 in 4).

Rezultati

Positivni učinki čistejših in bolj zaobljenih peščenih zrn so se odražali v večji adhezijski trdnosti forme z manj veziva (Sl. 5 in 6).

Sl. 5 prikazuje, kako novi pesek, obdelan s sistemom URS, za katerega so značilna bolj zaobljena zrna, potrebuje manj smole, zagotavlja pa večjo adhezijsko trdnost.

Kot je razvidno iz (Sl. 6), je bil regenerirani pesek obdelan trikrat, da bi zagotovili optimalno raven odstranitve vezivnih sredstev. V zgornji preglednici je prikazano, da je zadostovala že enojna obdelava (skozi posamezno celico za izpiranje). V primeru bistvene koristi zaradi dveh obdelav bi bil stroj lahko opremljen z dvema celicama za izpiranje, in sicer eno na drugi (Sl. 7)

Sand Trials

Trials were carried out at Omega's Research & Development facility in Peterborough with the customer's new and reclaimed sand. By passing the customer's reclaimed sand through the USR system the sand grain itself became more rounded and in the case of the mechanically reclaimed sand, at least 60% of the surface binder was also removed without sand grain degradation (fig 2, 3 & 4).

Results

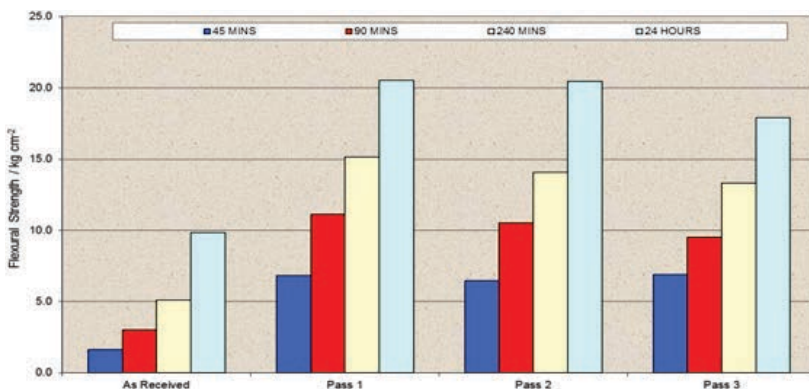
The positive effects of a cleaner, more rounded sand grain were greater mould strength for less binder (fig 5 & 6).

Fig 5 shows how by processing the new sand through USR system the rounded sand grains require less resin but give a greater strength.

As you can see from (fig 6) the reclaimed sand was processed up to three times to find the optimum level of binder removal. It is clear from the above chart that a single pass (single scrubbing cell) was sufficient. If there had been a clear advantage with two passes then the machine could have been supplied with two scrubbing cells – one on top of the other (fig 7)

Sl. 6: Razvoj trdnosti regeneriranega peska po obdelavi

Fig. 6: Strength development of reclaimed sand after processing

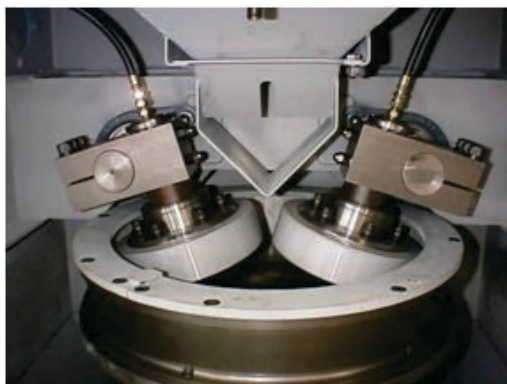




Sl. 7:
Fig 7:

Sl. 8: Celica
za izpiranje

Fig. 8: Scrubbing
Cell



Načelo delovanja

Kako deluje sistem USR?

Enoto so razvili v družbi Sintokogio na Japonskem in je zelo učinkovita pri regeneraciji anorganskih veziv na podlagi alkalno-fenolnega procesa, npr. natrijev silikat CO₂/ester.

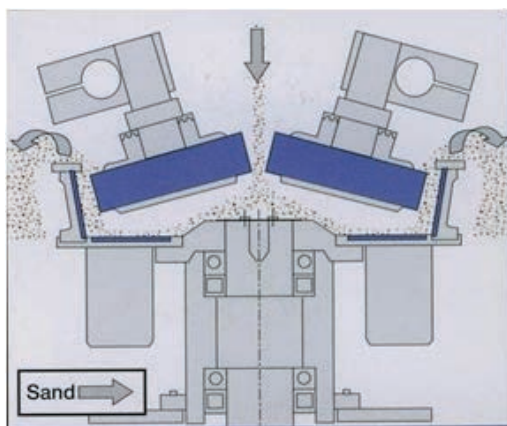
Načelo temelji na prehajanju novega in mehansko regeneriranega peska skozi celico za izpiranje, kjer se zrna peska stisnejo skupaj pod blagim pritiskom keramičnih valjev (Sl. 8), tako da ti vzajemno delujejo in na površini zrn peska ustvarjajo blago abrazijo. Ta abrazija zadostuje za odstranitev površinskega veziva in ostrih robov kremenčevega peska, vendar pa ni dovolj močna, da bi poškodovala kremenova peščena zrna.

Principle of operation

How does USR system work?

The unit was developed by Sintokogio of Japan and was very effective in reclaiming Alkaline Phenolic's, in-organic binders such as Sodium Silicate CO₂/Ester.

The principle is based on passing the new and mechanically reclaimed sand through a scrubbing cell, where the sand grains are squeezed together under a light pressure with ceramic rollers (fig 8) so that they interact and produce a mild abrasive action on the sand grain surface. This abrasion is sufficient to remove surface binder and remove the sharp edges of silica but not so high as to damage the silica sand grain.



Sl. 9: Keramični delci

Fig. 9: Ceramic parts

Nato pesek z izpranim vezivom vstopi v fluorirano gredo, kjer poteče ločevanje in odstranjevanje drobirja. Z natančnim nadzorom negativnega tlaka znotraj separacijske komore lahko nadzorujemo raven odstranjevanja drobirja.

Največja prednost te vrste sekundarne drobljivosti je, da ima tri glavne spremenljivke – pretok peska, odpornost znotraj bobna in pritisk valjev. Vsaka od teh spremenljivk omogoča drobne nastavitve, da se uporabi natančna količina pritiska, ki zagotavlja optimalne rezultate izpiranja peska.

Kot je razvidno iz (Sl. 9) določa raven izpiranja kombinacija širine roba in pritiska keramičnega valja.

Sklep

Rezultati preizkusa z mešanim peskom so pokazali, da je posledica učinka priprave peska v enoti za sekundarno drobljivost (USR) v kombinaciji z majhno količino veziva razvoj večje adhezivne trdnosti forme. Manj dodanega veziva seveda pomeni bistveno zmanjšanje količine hlapov pri litju, kar je bila prvotna težava stranke. Nadaljnji pozitivni učinki so bili vidni v približno 50 odstotkov manjši porabi novega kremenčevega peska, približno 20 odstotkov nižji porabi smole, v boljšem zaključnem sloju forme z manj napakami pri litju, npr. poroznost, napake zaradi plina, in splošnem znižanju znižanje stroškov litja. Temu ni tako zgolj zaradi manjše količine porabljenega veziva, pač pa tudi zaradi višje stopnje regeneracije peska.

Ta študija primera jasno prikazuje neprekinjeni razvoj dobaviteljev vezivnih sredstev in strojev, pa tudi možnosti uporabe pri novih izzivih, s katerimi se sooča livarska industrija. Kombinacija teh razvojev lahko prinese hitro rešitev določenih težav v livarstvu, skupaj z dodatnimi in nepričakovanimi koristmi.

The sand together with scrubbed binder then enters a fluidised bed where the separation and removal of the fines takes place. By accurately controlling the negative pressure inside the separation chamber we can control the level of fines removal.

The major advantage of this type of Secondary Attrition is that it has three main variables – sand throughout, resistance within the drum and roller pressure. Each of these variables can be finely tuned so that the precise amount of pressure is applied to achieve the optimum sand scrubbing results.

As can be seen in (fig 9), the combination of rim width and ceramic roller pressure determines the level of scrubbing.

Conclusion

Mixed sand test results showed that the effect of sand conditioning in the Secondary Attrition unit (USR) combined with low binder additions resulted in a higher mould strength development. Lower binder additions of course resulted in a significant reduction in casting fume, which was the customer's initial key concern. Further positive effects were seen to be around 50% new Silica sand usage reduction, around 20% of the resin consumption, improved casting finish with reduced casting defects such as porosity, gas defects and overall moulding cost reduction. They are not only consumed because of the reduced level of binder but also due to the improved level of sand reclamation.

This case study clearly demonstrates the continual developments being carried out by the binder and machinery suppliers and how they can be applied to new challenges from the foundry industry. By combining these developments, a fast solution to a specific foundry problem can often be found with added, unexpected benefits.

AKTUALNO / CURRENT**58. mednarodno livarska konferenca – IFC Portorož 2018**

V Portorožu v Sloveniji je v času od 12. do 14. septembra 2018 potekala 58. IFC- tradicionalna mednarodno livarska konferenca z livarsko razstavo Portorož 2018. Organizator in soorganizatorja konference - Društvo livarjev Slovenije ter Naravoslovnotehniška fakultete Univerze v Ljubljani in Fakultete za strojništvo Univerze v Mariboru pripravijo vsako leto zanimivo srečanje znanstvenikov in raziskovalcev s področja livarstva ter livarskih strokovnjakov iz industrije. IFC v Portorožu je ena izmed najbolj tradicionalnih in največjih livarskih prireditev v tem delu Evrope.

Na predvečer pred pričetkom konference in razstave je župan Občine Piran, g. Peter Bossman za udeležence konference in razstave priredil tradicionalno spoznavno srečanje oz.- sprejem v mestni hiši v Piranu.

Letošnji livarski dogodek je minil v prijetnem in delovnem vzdušju. Posvetovanja se je udeležilo 240 udeležencev iz 16. držav. Skupaj je bilo predstavljenih 33 predavanj s strani predavateljev iz 12 držav in Slovenije. Predavanja so bila razvrščena v tri skupine: plenarna, železove litine in livarska tehnologija ter livarstvo neželeznih zlitin. Vsi povzetki predavanj so bili objavljeni v zborniku konference v slovenskem in angleškem jeziku. Celotna vsebina predavanj pa je bila objavljena v angleškem jeziku na digitalnem kompaktnem optičnem disku - CD, ki je bil dodan k zborniku. Pozdravni otvoritveni nagovor je v imenu organizatorjev podala predsednica Društva livarjev Slovenije, mag. Mirjam Jan-Blažič, ki je na zaključku pozvala vse prisotne k udeležbi na WFO- Tehnical forum, ki bo skupaj z 59. IFC Portorož 2019 potekal naslednje leto, med 18. in 20.septembrom.

Na spremljajoči livarski razstavi je sodelovalo 44 razstavljalcev, pretežno dobaviteljev za livarsko industrijo.

Podajamo kratke povzetke vseh plenarnih predavanj ter po sedem najzanimivejših predavanj iz sekcij letošnjega 58th IFC Portorož2018. Pri vseh predavanjih so navedeni le prvi avtorji, oziroma avtorji, ki so posamezne teme tudi predstavili:

PLENARNA PREDAVANJA:

- **H. LICKFETT, Združenje livarske industrije ZR Nemčije: Nemška livarska industrija-trenutno stanje in nekatera resna vprašanja glede prihodnosti.** Prikazan je pregled za obdobje med 2016 in 2017 v nemških livarnah ter nekaterih evropskih državah ter kratek pregled za prvo polovico leta 2018. Prav tako je podana analiza ter trendi v sektorju odjemalcev. Drugi del je osredotočen na osnovne izzive, ki so: kako tekmovali z državami z nizkimi stroški, kako pospešiti razvoj tehnologije in kako se odzvati na pomanjkanje usposobljenih delavcev ter pripravnikov ob spremenjenih globalnih pogojih.

- **P. SCHUMACHER, redni profesor in predstojnik katedre za livarstvo Montanistične univerze v Leobnu, Avstrija, ter vodja Avstrijskega livarskega inštituta in soavtorji: Novi aspekti v tehnologiji izdelave ulitkov iz lahkih kovin.** Ulitki iz lahkih kovin so vse pogostejše izdelani iz kompleksnih kemijskih sestav in imajo vse bolj

komplicirane oblike, tanjše stene te zelo kompleksna jedra. Še posebej gre za zahteve pri polnjenju forme v tankostenske dele in odstranjevanju jeder iz kompleksne notranjosti. Boljši masni pretok lahko dosežemo z udrobnjevanjem zrn. Ekstremno udrobnjevanje je možno doseči z dodatki skandija in cirkonija, ki omogočita velikosti kristalnih zrn daleč pod 100µm. Raziskan je bil nukleacijski mehanizem navedenih dodatkov. Drugi fokus predstavitve pa predstavlja opis odstranjevanja jeder na osnovi Mohr- Coulomb matematičnega modela za krhke materiale.

- **A. KRIŽMAN, zaslužni profesor, častni senator Univerze v Mariboru ter glavni in odgovorni urednik Livarskega vestnika in soavtorji: Smernice razvoja slovenskega livarstva.** Skupaj s štirimi izbranimi slovenskimi livarnami je bila izdelana analiza stanja, ki bi ob 90% usmerjenosti v izvoz, lahko zagotavljala tudi v prihodnje konkurenčnost na globalnem trgu in vključevanje v poslovne mreže z odjemalci in uporabniki ulitkov. Ob tem so ključna vprašanja: slovenski izobraževalni sistem ter inventivnost kadra, ki bo lahko sledil zelo hitrim tehnološkim in informacijskim spremembam. Ob samem osnovnem znanju in današnjih možnostih dostopa do novega znanja je za konkurenčnost bistvenega pomena lasten inventivni sistem, ki ga oblikuje posamezno podjetje glede svoje specifičnosti.

- **J. CAMBELL, zaslužni profesor Univerze v Birminghamu, Velika Britanija: Proizvodnja kakovostnih ulitkov.** Turbulenca ob polnjenju livne forme in prehajanje oksidnih filmov v talino je vzrok za nastanek oksidnih bifilmov, kar povzroča zelo resne napake v ulitkih. Oksidni bifilmi so tako tanki, da jih z rentgensko kontrolo ne zaznamo. Uporaba filtrov iz keramične pene ter lovilci na koncu razdelilnih kanalov lahko zmanjšajo prisotnost bifilmov v ulitkih. Prihodnost litja aluminija pa je v protigravitacijskem litju. Ti postopki se že uporabljajo za litje Al-, Ni-zlitin in jeklene litine.

- **K. WEIß, direktor podjetja RWP GmbH, Roetgen, ZR Nemčija: Jedra-ne samo pesek! Proizvodnja, uporaba, vpliv na ulitek-simulacija in realni rezultati.** Jedra imajo v livni formi funkcijo oblikovanja votlin v ulitkih. Vendar se ob tem vzpostavi še



Otvoritev posvetovanja, predsednica Društva mag. M. Jan-Blažič in plenarno predsedstvo: prof. dr. P. Mrvar, prof. dr. I. Anžel, J. Čevka, S. Stegne Ceraj, K. Čehovin

vprašanje stabilnosti jedra v formi ter njegov vpliv na strjevanje ulitkov. Različni materiali, ki se uporabljajo za izdelavo jeder imajo ob tem različne vplive. Prikazane so bile pravilne odločitve pri izdelavi ustreznih jeder in simulacije proizvodnje jeder. Predstavljena so bila nekatera pravila za proizvodnjo in izdelavo jeder ter primerjava simuliranega in dejanskega ulitka.

- **P. MRVAR, redni profesor, predstojnik katedre za livarstvo na FNT, Univerze v Ljubljani in soavtorji: Nova siva litina za transport staljenih Al-zlitin.** Prikazani so bili razvoj, izdelava in preizkusi Si-Mo sive litine z vermikularnim grafitom, ki ima odlično toplotno prevodnost in dobro obrabno obstojnost, z namenom izdelave livne komore za visokotlačno litje Al-zlitin. Raziskana litina je bila preizkušena v industrijski praksi in izvedeno je bilo vrednotenje tribološkega procesa na površini komore po izvedenih 20.000 ciklih litja. Podane so bile tako tehniške kot stroškovne prednosti uporabljenega novega materiala.

- **I. RIPOSAN, redni profesor, Politehnična univerza Bukarešta, Romunija in soavtorji: Strukturne lastnosti sive litine s kroglastim grafitom legirane s silicijem.** Podane so bile strukturne značilnosti treh sestav nodularnih litin: I.-2,5%Si; II.-4%Si in III.-4%Si in 1,6%Mo. Cepljenje nadomesti negativne učinke Mo na podhladitev. Si pa pospešuje odstopanje morfologije kroglastih grafitnih delcev. Koeficient sferoidnosti (SSF) je pomemben za oceno nodularnosti. Namesto SSF pa se priporoča meritev največje osi po ISO 945. Pri vsebnosti 4% Si prevladuje V-oblika po ISO 945. Večja količina dodanega Mo pospešuje tvorbo perlita, vendar močan mehanizem cepljenja preprečuje nastanek karbidnih tvorb.

- **D. MOLNAR, izredni profesor, Univerza Miskolc, Miskolc, Madžarska in soavtorji: Računanje in simulacija predpolnjenja pri tlačnem litju.** Pri predpolnjenju se zapolni del livne votline pri nizki hitrosti bata pred točko preklopa na polnjenje. Celoten postopek se razdeli na tri faze: predpolnjenje, polnjenje livne votline in multiplikacija. Cilj predpolnjenja je v zmanjšanju količine ujetega zraka v livni votlini. Ta faza postopka je pri velikih ulitkih ključna. Razvita je bila prilagojena računska metoda, katere pravilnost je bila potrjena z različico CVM simulacijske programske opreme.

- **J. TROJAN, Noricangroup DISA, Taastrup, Danska, s soavtorji: Digitalna livarna za jutri.** Industrija 4.0 je stalnica v razvojnih tendencah livarn prihodnosti. Predvsem livarski inženirji želijo za vsakodnevno dejavnost izkoristiti IoT možnosti. Pomembno je zagotoviti dostop do vseh podatkov v celotnem proizvodnem sistemu. Podane so bile



Pogled na plenarno dvorano

različne nove možnosti v zvezi z bazami podatkov in njihovo analizo, ki se nanašajo predvsem na podatke o formah in o livnem procesu ter spremljanje procesnih podatkov. Samo celovite baze podatkov omogočajo optimizacijo procesov in njihov nadzor.

- **R.RUDOLF, izredna profesorica Univerze v Mariboru in razvojna sodelavka v Zlatarni Celje s soavtorji: Nanotehnologija kot tehnologija prihodnosti.** Nanomateriali so v tehniškem pogledu materiali, ki imajo vsaj eno dimenzijo strukturnih delcev pod 100 nm. Prikazane so primerjave posameznih postopkov izdelave. Na primeru zlata je podana tudi karakterizacija izdelanih nanodelcev in možnost uporabe teh delcev v kompozitih za zobozdravstvo. Prikazani so bili glavni trendi prihodnosti nanotehnologije, in možnosti vključevanja v procese izdelave novih pametnih konstrukcijskih in drugih materialov (jeklo, stekla, nanosi, premazi in drugo).

Iz posameznih sekcij kratko izpostavljam po sedem predavanj:

- **A. Sekcija železovih litin in različnih livarskih tehnologij:**

- **J. FRIEß, Livarski institut, Univerza RWTH Aachen, Nemčija, s soavtorji: Razvoj enotnega analitskega postopka za sistemsko neodvisno oceno morfologije in okroglosti grafita v sivih litinah s kroglastim grafitom.** Do danes še vedno ni standardiziranega postopka za klasifikacijo oblik grafita. Raziskali so različne parametre metalografskega postopka in razvili enoten analitski postopek za neodvisno oceno morfologije grafita. Na izmerjeno obliko grafitnih delcev vpliva nastavitve optičnih naprav in natančnost posnetkov, prav tako tudi različna izvedba algoritmov za izračun mejnih vrednosti. Najnovejši standardi v povezavi z okroglostjo so opredeljeni za okroglost nad vrednostjo 0,6, čeprav bi bila potrebna celovita klasifikacija oblik grafita na podlagi različnih parametrov.

- **C.DELGADO, IK4-Azterian, Španija in soavtorji: Integracija nove mehanske tehnologije za regeneracijo peska v jeklo livarnah za povečanje SFS valorizacije in konstrukcijske aplikacije.** Livarne v Evropi ustvarijo več kot 9 Mio ton odpadnega peska letno in le 25-30% tega peska se uporabi v različnih aplikacijah. Odlagališča livarskega peska predstavljajo tako v Evropi resen okoljski problem. S strani EU financiran projekt LIFE ECO-SANDFILL je usmerjen v raziskavo za porabo odpadnega peska v gradbeništvu, za geotehnične aplikacije in materiale z nadzorovano nizko trdnostjo in za ponovne uporabe v livarstvu. V livarni v Baskiji (Španija) je bil izdelan nov prototipni sistem za mehansko regeneracijo odpadnega livarskega peska na osnovi centrifugalne sile za drobljenje peščenih zrn. Na podlagi rezultatov kemijske analize in ostalih lastnosti je bilo zaključeno, da regenerirani pesek izpolnjuje vse okoljske pogoje za uporabo v gradbeništvu.

- **A.TEKAVČIČ, Kovic Livarna, Štore in soavtorji: Pojav lamelnega grafita pod eksotermnimi napajalniki v ulitkih s kroglastim grafitom – vzroki in sredstva.** Eksotermnimi napajalniki predstavljajo stroškovno enega najbolj koristnih livarskih dodatkov. Ob mnogih pozitivnih učinkih pa so se pojavile tudi težave z degeneracijo kroglastega grafita v lamelni grafit v obliki obroča okoli vratu napajalnika. Raziskali so vzroke pojava degenerirane mikrostrukture. Ugotovljeno je bilo, da pod mini-napajalniki prihaja do degradacije kroglastega grafita zaradi prekomernega padca vsebnosti preostalega magnezija na površini ulitka. Z eksperimenti so raziskali vpliv različnih tehnoloških parametrov na pojav teh napak ter določili ukrepe za preprečitev oz. minimalen obseg teh napak.

- **M.ŽBONTAR, Exoterm-it, Kranj, in soavtorji: Uporaba sol-gel tehnologije v livarskih premazih.** Uporaba sol-gel postopka za proizvodnjo livarskih premazov je nova tehnologija. Dodatek sol-gel komponente bistveno izboljša površino ulitkov in reološke lastnosti premaza. Pri tem je pomembno razmerja sola glede na ostale komponente. Dodana sol-gel komponenta zmanjša viskoznost premaza in omogoča boljšo površino ulitka. Raziskan je bil učinek uporabe sol-gel komponente kot dodatka k premazu na vodni osnovi s cirkonskim polnilom. Rezultati so pokazali, da uporaba sol-gel komponente izboljša površinsko kakovost ulitkov.

- **F. HÖHN, Heinrich Wagner Sinto Maschinenfabrik GmbH, 57334 Bad Laasphe, Nemčija: Napredne tehnologije s prihodnostjo za livarne-formanje in popolnost v vsaki formi.** V izdelavi form se vse več uporabljajo vakuumске tehnologije pri katerih se z uporabo vakuumskih črpalk pesek oblikuje zaradi podtlaka v dvodelnih formah. Po litju se forma ponovno izpostavi atmosferskemu tlaku in je ulitek možno odstraniti iz forme. Uporabljeni livarski peski ne vsebujejo vezivnih sredstev in vode in imajo tako ekološko gledano trajno uporabo. Liti izdelki imajo izredno dobro površino in tudi pri zahtevnih ulitkih ni več potrebna površinska obdelava. Prikazan je bil primer izdelave tankostenskih ulitkov iz jeklene litine in različne tehnologije, ki jih podjetje ob tem razvija.

- **U.KLANČNIK s soavtorji, Valji Štore: Vpliv hitrosti vrtenja kokile na razporeditev mikrostrukturnih konstituentov v železovi litini.** Valji za vroče valjanje so v osnovi dvoplastni ulitki sestavljeni obrabno obstojnejše zunanje plasti iz legirane železove litine in iz žilavega jedra iz litine s kroglastim grafitom. Predstavljena študija je imela za cilj raziskati vpliv hitrosti vrtenja kokile na razporeditev mikrostrukturnih konstituentov legirane litine v posameznih plasteh in morebiten vpliv na izločanje grafita in karbidov. Rezultati dobljeni s tremi različnimi hitrostmi vrtenja kažejo na razlike v izločanju grafita, v obliki evtektskih karbidov in s tem v makro trdoti materiala. S spreminjanjem hitrosti vrtenja kokile je možno izboljšati kakovost končnih izdelkov.

- **M.KOMPREJ s soavtorjem, Livar, Ivančna Gorica: Vpliv dodatkov in različnih vrst peska v jedru na napako pripečenosti peska v notranjosti ulitka.** Zaradi poškodb jedra lahko litina penetrira v razpoke. Vzrok je običajno v previsoki temperaturi litja in neustrezne izbire materiala jedra. Predstavljen je bil simulacijski prikaz iskanja kritičnih con v odnosih litina-forma in litina-jedro. V raziskavi so bili uporabljeni različni dodatki v jedru, ki omogočajo različne trdnostne lastnosti jedra. Raziskave so na enostaven način prikazale rešitve, ki jih je mogoče implementirati v vsako livarno, ki se sooča s tovrstnimi napakami.

B. Sekcija neželeznih zlitin

- **J. HAGENAUER, HAGI GmbH, Pyhra, St.Poelten, Avstrija: Nizkotlačni proces za ulitke za avtomobilsko industrijo.** Zaradi vse večjih zahteve glede lastnosti komponent je nizkotlačno litje (LPDC) postopek, ki se vse več uporablja za izdelavo ulitkov za avtomobilsko industrijo. S predstavitvijo podjetja KurtzErsa so prikazali možnosti LPDC in nakazali trende razvoja. Prikazane so bile prednosti LPDC, ki so v primerjavi s konvencionalnim gravitacijskim litjem v: manjši teži ulitkov, manjših stroških naknadne obdelave, večjo stopnjo avtomatizacije izdelave in energetskih prihrankih. Prav tako so bili prikazani tudi nadaljnji trendi razvoja.

- **M. SZUCKI, AGH Znanstvena-tehniška Univerza, Krakow (PL): Uporaba mrežne Boltzmannove metode pri numeričnem modeliranju strjevanja Al-zlitin.** Uporaba

simulacijske programske opreme je v livarstvu vse pomembnejša. V primerjavi z znanimi programi na osnovi numeričnih metod za reševanje parcialnih diferencialnih enačb, je mrežna Boltzmannova metoda (Lattice Boltzmann Method) zasnovana za simulacijo toka tekočin. Predstavljeni sta je bili tako LBM kot inovativna hibridna metoda, ki omogočata modeliranje procesa strjevanja Al-zlitin. Pristop omogoča izbiro med natančnostjo in učinkovitostjo izračunov. Numeričen model je razširjen z analizo izbranih mejnih pogojev za termične procese.

- M. POTOČNIK in soavtorji, LTH Castings, Ljubljana: Analiza vpliva parametrov tlačnega litja na ravnost ohišja elektronike. Uporaba lahkih materialov v avtomobilski industriji zahteva izdelavo ohišja elektronike iz Al-zlitin. Zelo tanke stene in sorazmerno velika površina ulitka predstavljajo tehnični problem ob visokih zahtevah za ravnost ulitka ter pričakovano življenjsko dobo. Vpliv livnega sistema je bil analiziran z računalniško simulacijo. Izvršena je bila analiza parametrov tlačnega litja, ki vplivajo na ravnost ter testiranje v serijski proizvodnji. Rezultati meritev izvedeni po 6 sigma metodologiji ter 3D skeniranju ulitka so pokazali ustrezne pozitivne rezultate.

- J.MEDVED, redni profesor, predstojnik katedre za metalurško in procesno tehniko na FNT Univerze v Ljubljani in soavtorji: Vpliv manjšega dodatka legirnih elementov na aluminijeve livarske zlitine. Kompleksne aplikacije zahtevajo modeliranje inovativnih aluminijevih livnih zlitin z boljšimi lastnostmi za visokotemperaturne aplikacije. Raziskan je bil dodatek cirkonija in molibdena na strjevanje zlitine Al-Si-Mg-Mn. Uporabljeni so bili termodinamični izračuni, termična analiza in diferencialna kalorimetrija. S sodobnimi metodami so raziskovali mikrostrukturo preiskovanih zlitin, predvsem vrsto in količino nastalih faz. Z dodatkom cirkonija se izoblikuje nova igličasta faza. Molibden je v zlitini vključen v fazo AlFeMnSi in v nekaterih primerih delno zamenja železo in oblikuje se nova faza AlFeMnMoSi z drugačno morfologijo.

- Z.ZOVKO BRODARAC, izredna profesorica ter dekanica Fakultete za metalurgijo, Univerza v Zagrebu in soavtorji: Vpliv Cu na razvoj mikrostrukture zlitine AlSi7MgCu. Mikrostrukturne raziskave zlitine AlSiMgCu kažejo zelo širok razpon zapletenih reakcij in možnih intermetalnih faz. Cu sproža še dodatne interakcije z Mn in Mg. Analiza zaporedja strjevanja omogoča podrobnejši vpogled v potek strjevanja in možnosti nastanka številnih kompleksnih intermetalnih faz. Skozi celoten proces strjevanja prihaja do tvorbe širokega razpona intermetalnih faz ob trajni interakciji Fe, Mn in Cu. Morfologija zlitine in interakcije omogočajo povišanje trdnostnih lastnosti zlitine.

- S.MÜLLER, Tehnološka univerza Braunschweig, ZR Nemčija in soavtorji: Večkriterijska optimizacija hladilnih sistemov orodij za tlačno litje. Predstavljena je bila možnost optimizacije zasnove internih hladilnih sistemov v orodjih za tlačno z uporabo genetskih algoritmov. Opredeljena sta bila dva optimizacijska cilja: učinkovit prenos toplote in usmerjeno strjevanje. Uporaba genetskih algoritmov zagotavlja boljše rezultate kot tlačno litje. Ta zahtevna metoda je pa zaradi daljših časov potrebnih za izračune, smiselna le v primeru proizvodnje visokih serij ulitkov oziroma za zelo komplicirana orodja.

- D.ARNŠEK, Univerza v Mariboru s soavtorji: Opredelitev mikrostrukturnih sestavin v naprednem aluminijevem bronu. Kompleksni aluminijevi bron, ki vsebujejo še cink in velik delež niklja se uporabljajo v steklarski industriji, predvsem za orodja za izdelavo steklenic. Ta orodja so dolgotrajno izpostavljena visokim toplotnim in mehanskim obremenitvam, površina pa je v stiku s stekleno talino. Ti bron vsebujejo okrog 18% niklja.

Uliti vzorci so bili raziskani s svetlobno in vrstično mikroskopijo, mikrokemično analizo, rentgensko fazno analizo in diferenčno termično analizo. Mikrostruktura litrega stanja je sestavljena iz globulitov faze β , ki je intermetalna spojina AlNi. V meddendritnih prostorih sta dve vrsti dvofaznega zloga $\alpha + \beta$. V prvem je groba paličasta faza β , v drugem pa sta fazi α in β v obliki lamel. Podane so bile tudi mehanske lastnosti tega več komponentnega bronu.

Po odzivu udeležencev na koncu tega osrednjega livarskega dogodka Društva livarjev Slovenije in pisnih zahval in ocen posameznih udeležencev in medijev, je za nami še eno uspešno organizirano in speljano mednarodno livarsko srečanje.

Predsednica Organizacijskega odbora konference:
Mag. Mirjam Jan Blažič

Predsednik programskega odbora konference:
Zasl. prof. dr. Alojz Križman



Plenarni predavatelj,
H. Lickfett



Plenarni predavatelj,
prof. dr. P. Schumacher



Plenarni predavatelj,
prof. dr. A. Križman



Plenarni predavatelj,
prof. dr. J. Campbell



Plenarni predavatelj,
dr. K. Weiß



Plenarni predavatelj,
prof. dr. P. Mrvar



Plenarni predavatelj,
prof. dr. I. Riposan



Plenarni predavatelj,
dr. D. Molnar



Plenarni predavatelj,
J. Trojan



Plenarna predavateljica,
prof. dr. R. Rudolf



Predavatelj, prof. dr. F. Zupanič,
Univerza v Mariboru



Predavateljica, mag. J. Frieß,
Gießerei-Institut der RWTH
Aachen



Predavatelj, prof. dr. J. Medved,
Univerza v Ljubljani



Predavatelj, M. Komprij, Livar d.d.



Predavatelj, F. J. Höhn,
Heinrich Wagner Sinto
Machinenfabrik GmbH



Predavatelj, dr. M. Szucki,
AGH University of Science and
Technology in Kraków



Predavateljica, C. Delgado,
IK4-Azterlan



Predavatelj, M. Potočník,
LTH Castings d.o.o.



Predavatelj, dr. S. Müller,
Technische Universität
Braunschweig



Predavatelj, S. Al-Jasim,
Kovis-Livarna d.o.o.



Predavatelj, H. Gergely, Alu-Onto Ltd.



Predavatelj, V. Kolda, Mecas ESI s.r.o.



Predavatelj, A. Kump,
NovaCast Systems AB



Predavatelj, DI J.
Hagenauer, HAGI GmbH



Udeleženci iz tujine



Recepcija konference, mag. T. Balaško, dr.
M. Petrič, T. Cankar, dr. A. Šalej Lah



Utrip začetka razstave



Utrip na recepciji
konference



Razstavni prostor Analysis d.o.o.



Razstavni prostor Elkem ASA



Razstavni prostor EXOTERM-IT d.o.o.



Razstavni prostor Labtim d.o.o.

Razstavni prostor MAHLE
Electric Drives Komen d.o.o.Razstavni prostor BL Metal,
Bogdan Lovšin, s.p.Razstavni prostor Labena
d.o.o



Razstavni prostor Siapro d.o.o.



Razstavna prostora Norican Group (DISA in StrikoWestofen) in PSR d.o.o.



Razstavni prostor Primakem d.o.o.



Razstavni prostor KOOZ d.o.o.



Razstavni prostor Inductotherm Europe Ltd.



Razstavni prostor HAGI GmbH



Razstavni prostor Heinrich Wagner Sinto Maschinenfabrik GmbH



Razstavni prostor Trokut Test d.o.o.



Razstavni prostor Talum d.d.



Razstavni prostor KS Kneissl & Senn Technologie GmbH



Razstavni prostor Calderys Deutschland GmbH



Razstavni prostor SwatyComet d.o.o.



Razstavni prostor Living d.o.o.



Razstavni prostor Messer d.o.o.



Razstavni prostor Ceever S.r.l.



Razstavni prostor EDMD SOLUTIONS d.o.o.



Razstavni prostor Naravoslovnotehniška fakulteta



Razstavni prostor KMS d.o.o.



Razstavni prostor Stem d.o.o.



Razstavni prostor Labsys d.o.o.



Razstavni prostor SIJ Group – SILABS d.o.o.



Razstavni prostor Belloi & Romagnoli S.r.l.



Razstavni prostor Faprosid S.r.l.



Razstavni prostor F.LLI Mazzon S.p.A.



Razstavni prostor Topomatika d.o.o



Razstavni prostor AVL List GmbH



Razstavni prostor TCT Tesic GmbH



Razstavni prostor Instro d.o.o.



Razstavni prostor Feal-Inženiring d.o.o.



Razstavni prostor EKW-Kremen d.o.o.



Razstavni prostor TC Livarstvo d.o.o in Mecas ESI s.r.o.



Razstavni prostor Olma d.o.o.



Razstavni prostor RWP GmbH



Razstavni prostor Prolub d.o.o.



Razstavni prostor IRT 3000



Udeleženci konference pred mestno hišo na Tartinijevem trgu



Udeleženci v predverju mestne hiše



Pogostitev udeležencev v mestni hiši



Upravni sekretar svetovne livarske organizacije - WFO, J.J. Gonzalez, in predavateljica na konferenci, C. Delgado, na pogostitvi v mestni hiši



Župan Občine Piran, P. Bossman in predsednica Društva, M. Jan-Blažič



Spominsko darilo Društva Občini Piran



Predsednik svetovne livarske organizacije - WFO, M. Fenyés, in župan Občine Piran, P. Bossman, na pogostitvi v mestni hiši

AKTUALNO / CURRENT**Koledar livarskih prireditev 2018 in 2019**

Datum dogodka	Ime dogodka	Lokacija
21.-22.09. 2018	VDI-Seminar „Gussteilgestaltung in der Praxis“	Düsseldorf, Nemčija
14.-15.03. 2018	45. Aachener Gießerei-Kolloquium	Aachen, Nemčija
11.-12.04. 2018	63. Österreichische Gießerei Tagung	Schladming, Avstrija
27.-30.04. 2018	CastExpo	Atlanta, USA
21.-24.05. 2018	Moulding Expo	Stuttgart, Nemčija
25.-29.06. 2018	GIFA, NEWCAST, METEC, THERMPROCESS	Düsseldorf, Nemčija
18.-20.09. 2018	Werkstoff Woche	Dresden, Nemčija
18.-20.09. 2018	WFO-Technical Forum in 59. IFC Portorož 2018	Portorož, Slovenija

**The WORLD FOUNDRY ORGANIZATION
and
SLOVENIAN FOUNDRYMEN SOCIETY**

invites you to

**WFO-TECHNICAL FORUM
and
59th IFC PORTOROZ 2019**

with accompanying exhibition



The WORLD
FOUNDRY ORGANISATION
TECHNICAL FORUM
and
59th IFC PORTOROZ 2019

18-20 September
Portoroz, SLOVENIA



**Contact: Slovenian Foundrymen Society
Lepi pot 6, p.p. 424, 1001 Ljubljana, Slovenia
T: +386 1 2522 488 F: +386 1 4269934
www.drustvo-livarjev.si
E-mail: drustvo.livarjev@siol.net**



Optimizacija procesov s plini na vseh področjih metalurgije

Messer Slovenija Vam nudi več kot samo pline. Naše znanje in izkušnje na področju aplikativne tehnologije so obsežne in s tem ključ za optimiranje procesov v kakovostnem, ekonomičnem in inovativnem pogledu.

Naši plini in storitve tako optimizirajo tudi procese s plini na vseh področjih metalurgije, med drugim visokotemperaturne procese, procese toplotne obdelave in procese rafinacije.

Dovolite, da tudi na področju metalurgije postanemo Vaš partner za tehnične pline.



MESSER 

Messer Slovenija d.o.o.
Jugova 20
2342 Ruše
tel.: +386 2 669-03-00
faks: +386 2 661-60-41
info.si@messergroup.com
www.messer.si

Part of the **Messer World** 