

LIVARSKI VESTNIK

71/2024

1

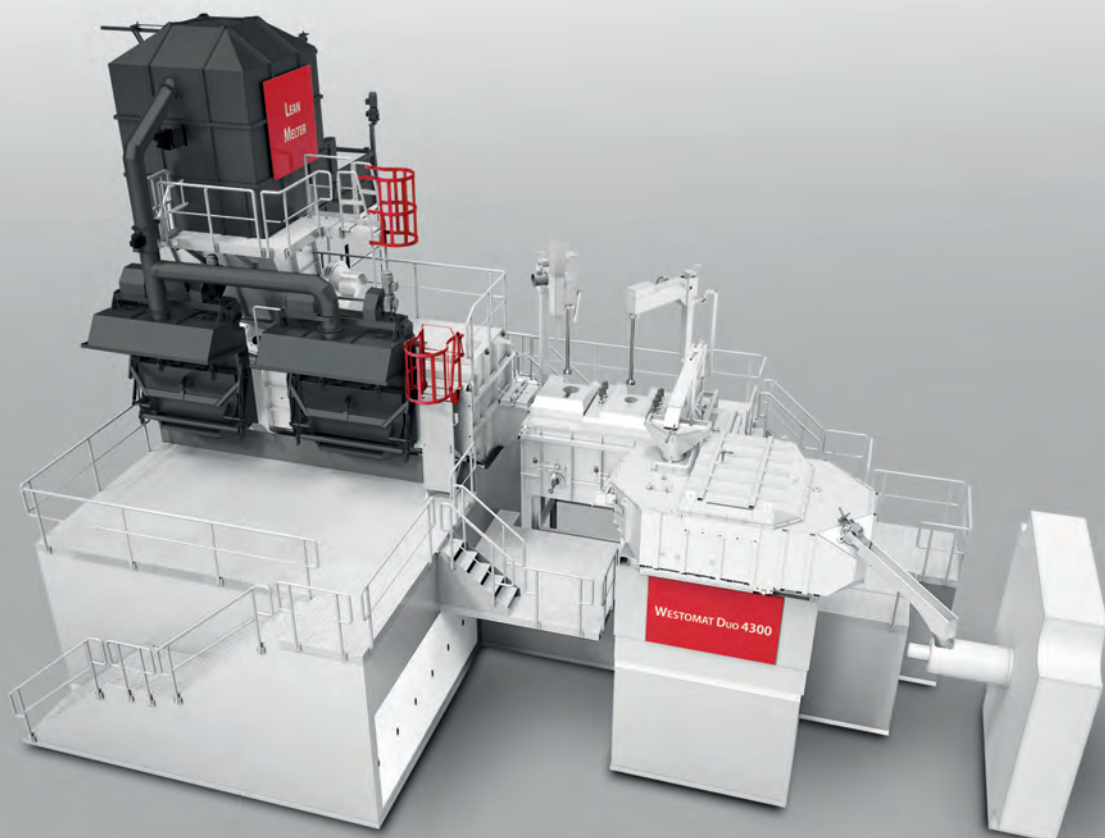


DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE
SLOVENIAN FOUNDRYMEN SOCIETY

StrikoWestofen^o
A Norican Technology

Meet our Giants designed for Giant Casting.

Flexible. Modular. Individual.



PRODUCTS FOR FOUNDRIES AND STEELWORKS



**COATINGS FOR
FOUNDRIES**



**THERMOINSULATION
MATERIALS FOR
STEELWORKS AND
FOUNDRIES**



OTHER PRODUCTS
*ferro alloys, inoculants,
nodulators, recarburisers*



REPRESENTATIVES
*Magma, Tribo - Chemie,
Henschke*

 **exoterm-it**

exoterm@exoterm.si

LIVARSKI VESTNIK

Izdajatelj / Publisher:

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

Glavni in odgovorni urednik / Chief and responsible editor:

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

Tehnično urejanje / Technical editing: mag. Mirjam Jan-Blažič

Uredniški odbor / Editorial board:

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

Prevod v angleški jezik /

Translation into English:
Marvelingua, Aljaž Seničar s.p.

Lektorji / Lectors:

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

Tisk / Print:

Fleks d.o.o.

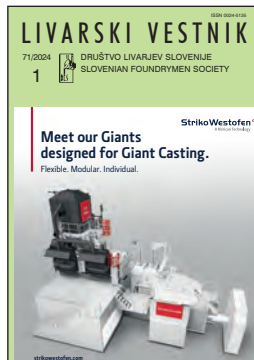
Naklada / Circulation:

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

Letna naročnina: 35 EUR z DDV

Year subscription: 35 EUR (included PP)

Dano v tisk: marec 2024



StrikoWestofen Group
Carl-Zeiss-Str. 12
51674 Wiehl

Tel.: +490226170910
e-mail: info@strikowestofen.com
spletna stran / web page:
<http://www.strikowestofen.com>

VSEBINA / CONTENTS

Stran / Page:

A. Majumdar, C. Palanisami, A. Bühri Polaczek: Korelacija med mikrostrukturno analizo litega železa s kroglastim grafitom in različnimi vsebnostmi silicija / Correlation of Microstructural Analysis of Spheroidal Graphite Cast Iron Grades by Varying the - 7Silicon Content	2
M. Fassina: Tehnični pomisleki za zmanjševanje izmeta pri visokotlačnem litju brez mehanskega zaklepa / Technical Considerations for Minimizing Scrap Thanks to Toggle-Free HPDC	22
M. Vončina, A. Pavšič, I. Paulin, J. Medved, M. Petrič: Ocena kakovosti udrobnilih sredstev / Assessing the Quality of Grain Refiners	33

AKTUALNO / CURRENT

V. Krmelj, L. S. Balažič, Š. Tertinek, D. Bokal: Koristi za podjetja, ki izhajajo iz integriranega trajnostnega poročanja	47
Dan Poljskih livarjev 2023	50
EUROGUSS 2024	51
Stanje evropske livarske industrije, januar 2024	53
Seja organov Društva livarjev Slovenije	55
Pregled livarskih prireditev v letu 2024	60
Portorož 2024	61

Livarski vestnik je vpisan v razvid medijev Ministrstva za kulturo pod zaporedno številko 588
Izdajanje Livarskega vestnika sofinancira ARIS javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko
dejavnost Republike Slovenije.

Publishing of the Livarski vestnik is supported by Slovenian Researching Agency ARIS

Korelacija med mikrostrukturno analizo litega železa s kroglastim grafitom in različnimi vsebnostmi silicija

Correlation of Microstructural Analysis of Spheroidal Graphite Cast Iron Grades by Varying the - 7Silicon Content

Povzetek

Gre za sivo litino s kroglastim grafitom, katere je danes ena najboljših izbiri za industrijske aplikacije v primerjavi z vsemi drugimi vrstami litega železa, saj ga zaradi edinstvene mikrostrukture odlikujejo dobre mehanske lastnosti, kot so visoka trdnost, dobra duktilnost in velik raztezek. Sestava SGI igra pomembno vlogo v izboljšavi mehanskih lastnosti in mikrostrukture končnega ulitka. SGI je sestavljen pretežno iz železa (Fe), ogljika (C) in silicija (Si) kot tudi drugih legirnih elementov v skladu s standardom EN 1563:2018. Vsebnost Si v sestavi določa naravo mikrostrukture in neposredno vpliva na grafitne krogle, prisotne v matrici. Zahtevane mehanske lastnosti in mikrostrukturo je mogoče zagotoviti s prilagoditvijo grafitne faze, perlita in vsebnosti ferita. Mikrostrukturo smo analizirali pod optičnim mikroskopom s 100-kratno povečavo, in sicer pred jedkanjem z 0,3% nitalom ter po njem. Kroglaste litine, število nodulov in grafita ter vsebnost grafita, perlita in ferita smo ocenili z analizo slik mikrostrukture s pomočjo odprtokodne programske opreme. Vsebnost ogljika povzroča nastajanje krogel in preprečuje nastanek razpok, silicij pa spodbuja tvorbo ferita in je grafitizator.

V tej raziskavi smo analizirali mikrostrukturo na podlagi različnih vsebnosti silicija v različnih sestavah ulitkov. Poskus smo izvedli s 5 različnimi razredi SGI z različnimi vsebnostmi silicija od 2,0 mas.% (EN-GJS-350-22) do 4,1 mas.% (EN-GJS-600-10), SGI pa smo vlili v standardne bloke Y1 (EN 1563:2018). Na podlagi metalografskih preiskav smo prišli do zaključka, da povečanje vsebnosti silicija v sestavi ulitka vodi v povečanje kroglastih litin mikrostrukture, ki smo jo skladno s standardom ISO 945-4:2019-05 ocenili kvantitativno. Ferit prav tako prevladuje nad perlitom v primeru večanja vsebnosti silicija, kar izboljša mehanske lastnosti kot tudi žilavost.

Ključne besede: lito železo s kroglastim grafitom (SGI), duktilnost, kroglastih litin, grafitizator, žilavost

Abstract

Spheroidal graphite cast iron (SGI) is now being considered to be one of the best material choices for industrial application over other types of cast iron because of its mechanical properties such as high strength, good ductility, and high elongation due to its unique microstructure. The composition of SGI plays a significant role in the improvement of the mechanical properties and microstructure of final casting. SGI is primarily composed of Iron (Fe), Carbon (C), and Silicon (Si) along with other alloying elements as per standard EN 1563:2018. The content of Si in composition determines the nature of the microstructure and directly influences the graphite nodules present in the matrix. The required mechanical

properties and microstructure can be obtained by adjusting of graphite phase, pearlite, and ferrite content. The microstructure is analysed under an optical microscope with 100x magnification under two conditions: before and after etching with 0.3 % Nital. The nodularity, nodule, and graphite count, graphite and pearlite content, and ferrite content are considered by analysing the microstructural images using opensource software. Accordingly, carbon content serves to form nodules and it acts as a crack arrester whereas, silicon is a strong ferrite promoter and graphitizer.

In this research work, the microstructure has been analysed based on the varying content of Silicon in different casting compositions. The experiment has been conducted on 5 different grades of SGI with varying silicon content from 2.0 mas. % (EN-GJS-350-22) to 4.1 mas. % (EN-GJS-600-10) which are cast in standard YII blocks (EN 1563:2018). From the metallographic observations, we conclude that the increase in silicon content within the casting composition will result in increasing the nodularity in the microstructure which is evaluated as per ISO 945-4:2019-05 quantitatively. Furthermore, ferrite dominates over pearlite with increasing silicon content which thereby enhances the mechanical properties and toughness characteristics.

Keywords: spheroidal graphite cast iron (sgi), ductility, nodularity, graphitizes, toughness

1 Uvod

Kroglasta litina, imenovana tudi SGI ali litina s kroglastim grafitom, je znana po svoji duktilnosti, ki jo pripisujejo prisotnosti Gre za grafit izoblikovan v obliki krogel oz. kroglic. Uporaba ulitkov SGI je v svetovnem merilu v porastu. V zadnjem času se povečuje zanimanje za analizo mikrostrukture ulitkov SGI. Ta mikrostruktura običajno obsega število grafitnih krogel in odstotek vsebnosti grafita ter ferit – perlit v ulitku. Zagotavljanje nadzora nad strukturo matrice litine SG postane še posebej pomembno, ko je v mikrostrukturi prisoten visok odstotek grafitnih krogel.

Na strukturo matrice sive litine s kroglastim grafitom vplivajo številni dejavniki, vključno s kemijsko sestavo, hitrostjo hlajenja, količino in vrsto naknadne inokulacije, količino preostalega magnezija in temperaturo litja [1-7]. Da bi izdelali visokokakovostno sivo litino s kroglastim grafitom, je pomembno v čim večji meri zmanjšati vsebnost žvepla in fosforja.

1 Introduction

Ductile iron, also referred to as SGI or Spheroidal Graphite Iron is an alloy known for its ductility, which is attributed to the presence of spheroidal graphite nodules. The utilization of SGI castings has been on the rise globally. Lately, there has been a growing interest in analyzing the microstructure of SGI castings. This microstructure typically includes the number of graphite nodules, nodularity, and the percentage of graphite, and ferrite-pearlite content within the casting. Ensuring control over the structure of the SG-iron matrix becomes particularly significant when a high percentage of graphite nodules is present in the microstructure.

The matrix structure of spheroidal graphite cast iron is influenced by several factors, including chemical composition, cooling pace, amount and kind of post-inoculation, amount of residual magnesium, and pouring temperature [1-7]. To achieve high-quality ductile iron, it is important

Vsebnost žvepla je priporočljivo ohranjati pod 0,03 mas.% in vsebnost fosforja pod 0,1 mas.%. Prav tako je priporočljivo ohranjati nizke ravni drugih elementov v sledovih za spodbujanje tvorbe okroglih ali sferičnih krogel.

Med postopkom litja uporaba magnezija pomaga pri sferoidizaciji grafita [9–11]. Prisotnost magnezija deluje kot nukleacijski substrat v kaley ali nukleusih ali nukleacijskih mestih za grafit [8] kroglastega grafita, medtem ko se njegova vloga sferoidizatorja in determinanta morfologije grafita pripisuje magneziju, ki je prisoten kot preprosta snov v kovinski matrici.

Litine so kompozitne strukture, ki so sestavljene iz grafita v različnih oblikah. Pogosto se uporabljajo v aplikacijah, kjer so bistvene tako toplotna prevodnost kot mehanske lastnosti [12]. Pri proučevanju mehanskih lastnosti litega železa pridejo v poštev dejavniki, kot so natezna trdnost, rezultati Charpyjevih udarnih preskusov, udarna natezna trdnost, žilavost in porazdelitev trdote materiala. Med temi lastnostmi igra žilavost ključno vlogo pri določanju vedenja materiala. Charpyjev udarni preskus (CI) je zaradi svoje cenovne dostopnosti in enostavne izvedbe v industriji zelo priljubljen za ocenjevanje lastnosti žilavosti različnih materialov.

Charpyjev udarni preskus, ki ga opredeljuje standard DIN EN ISO 148-1, se običajno uporablja za določanje lastnosti žilavosti; pogosto se pogosto uporablja za kvalifikacijo različnih tehničnih aplikacij. Dobro znano je, da parametri grafitne faze oz. grafita, kot sta kroglasti grafit in število nodulov, pomembno vplivajo na lastnosti žilavosti materiala in prehodno vedenje [13]. Siva litina s kroglastim grafitom, s krogلامي delanimi, vdelanimi v feritno matrico, nakazuje odlično duktilnost, odpornost na udarce ter primerljivo natezno trdnost in mejo tečenja kot nizkoogljeno

to minimize the levels of sulfur, and phosphorus. It is recommended to keep the sulfur content below 0.03 mas. % and the phosphorus content below 0.1 mas. % Additionally, it is advisable to maintain low levels of other trace elements to promote the formation of round or spherical nodules [8]. During the casting process, the use of magnesium helps in the spheroidization of the graphite [9-11]. The presence of magnesium acts as a nucleation substrate in the nuclei of nodular graphite, while its role as a spheroidizer and determinant of the graphite morphology is attributed to the magnesium present as a simple substance within the metallic matrix.

Cast irons are composite structures that consist of graphite in different forms, and they find extensive use in applications where both thermal conductivity and mechanical properties are essential [12]. When examining the mechanical properties of cast irons, factors such as tensile strength, Charpy impact test results, impact tensile strength, toughness, and hardness distribution of the material come into play. Among these properties, toughness plays a crucial role in determining the behavior of the material. The Charpy impact (CI) test is widely favored in the industry for evaluating the toughness properties of various materials due to its affordability and ease of implementation.

The Charpy impact test, defined by DIN EN ISO 148-1, is commonly employed to determine toughness properties and is widely used for qualifying various technical applications. It is well-established that graphite phase parameters, such as nodularity and nodule count, significantly influence the material's toughness properties and transition behavior [13]. Ductile iron, with graphite spheroids embedded in a ferrite matrix, exhibits excellent ductility, impact resistance, and comparable tensile

jeklo. Z vključitvijo ferita in perlita doseže material vmesne lastnosti med feritnimi in perlitnimi stopnjami, kar zagotavlja dobro obdelovalnost in stroškovno učinkovitost. Poleg tega je prehodna temperatura iz duktilnosti v krhkost ključen dejavnik, ki se upošteva pri izbiri materialov za neko uporabo, zlasti pri nizkih temperaturah [14].

SGI se uporablja na različnih področjih, kot so avtomobilski inženiring, tehnologija vetrne energije, ladjedelništvo in strojništvo. V teh aplikacijah ima SGI širok spekter mehanskih lastnosti, na katere vplivajo njegove mikrostrukturne značilnosti. Livarne skrbno izberejo ustrezno kombinacijo faz za izpolnjevanje posebnih zahtev glede mehanskih lastnosti, ki jih določajo stranke ali industrijski standardi. Zaradi naraščajočega povpraševanja po cenovno ugodnih zlitinah z izboljšanimi mehanskimi lastnostmi je postala konkurenčna gospodarska prednost zlitin DI pomembnejša med kovinskimi materiali. Posledično igra razvoj novih kemijskih sestav za sive litine ključno vlogo pri povečanju konkurenčnosti livarn in proizvodnih podjetij. Cilj teh prizadevanj je optimizirati lastnosti teh materialov in izboljšati njihovo splošno učinkovitost.

Namen te raziskave je bil raziskati vpliv vsebnosti silicija v razponu od 2,0 mas.% do 4,1 mas.% na lastnosti materiala. Silicij je znan po svoji sposobnosti utrjevanja ferita [15-17]. Z večanjem vsebnosti silicija se povečuje tudi vsebnost ferita. Do tega pride, ker atomi silicija nadomestijo atome železa v kristalni mreži železa in ustvarijo substitucijsko trdno raztopino [18]. Prisotnost silicija zaradi razlike v velikosti atomov železa in silicija popači kristalno mrežo. Posledično je gibanje dislokacij znotraj materiala ovirano, kar vodi do zmanjšanja plastične deformacije [19, 20]. Za ponovno premikanje dislokacij je potrebna večja stopnja obremenitve.

and yield strength to low-carbon steel. By incorporating both ferrite and pearlite, the material achieves intermediate properties between ferritic and pearlitic grades, providing good machinability and cost-effectiveness. Additionally, the ductile to brittle transition temperature is a critical factor considered when selecting materials for applications, particularly under low-temperature conditions [14].

SGI finds applications in diverse fields like automotive engineering, wind energy technology, shipbuilding, and mechanical engineering. In these applications, SGI exhibits a wide range of mechanical properties influenced by its microstructural characteristics. Foundries carefully select the appropriate combination of phases to meet the specific mechanical property requirements set by customers or industry standards. The increasing demand for low-cost alloys with enhanced mechanical properties has made the competitive economic advantage of DI (Ductile Iron) alloys more significant among metallic materials. Consequently, the development of new chemical compositions for cast irons plays a crucial role in enhancing the competitiveness of foundries and manufacturing companies. These endeavors aim to optimize the properties of these materials and improve their overall performance.

This research is aimed to investigate the impact of silicon content ranging from 2.0 mas. % to 4.1 mas. % on the properties of the material. Silicon is known for its ability to strengthen ferrite [15-17]. As the silicon content increases, the ferrite content also increases. This is because silicon atoms replace iron atoms in the crystal lattice of iron, creating a substitutional solid solution [18]. The presence of silicon distorts the crystal lattice due to the difference in size between iron and silicon atoms.

Očitno postane, da se trdnost ferita poveča z večanjem vsebnosti silicija.

2 Ozadje raziskave

2.1 Mikrostruktura

Vpliv silicija (Si) na mikrostrukturo SGI je bil v preteklih letih obsežno raziskan. Velik del objavljenega eksperimentalnega dela se osredotoča na proučevanje posameznega vpliva enega elementa oz. več elementov. Višja vsebnost silicija v komponentah SGI povzroči močno zmanjšanje variacije trdote in zagotavlja prednosti skozi odpravo prisotnosti perlita v mikrostrukturi [21]. Opaziti je mogoče vzorce SGI s kroglastim grafitom, vdelanim v popolnoma feritno matrico, ki ne vsebujejo perlitne faze. Kadar matrična struktura SGI vsebuje perlit v razponu od 10 % do 60 %, jo lahko kategoriziramo kot feritno-perlitna SGI [22]. S povečanjem vsebnosti Si se vsebnost perlita v mikrostrukturi zmanjšuje, feritna faza in kroglasti grafit pa se povečujeta.

V kroglasti litini vsako grafitno jedro povzroči nastanek enega samega grafitnega nodula, zato je nukleacija odločilni dejavnik za končno število nodulov. Posledično povečanje števila nodulov v litem železu vodi v večjo trdnost in duktilnost, izboljšano enotnost mikrostrukture in zmanjšano dovzetnost za težave, povezane s hlajenjem.

Na prehodno vedenje DI vpliva povprečno število grafitnih nodulov, in sicer z dokazanim znižanjem prehodne temperature, ko se število nodulov povečuje, kar vodi do zmanjšanja energije zgornjega praga (USE) [24, 25]. Prehodna temperatura krhkega loma (DBTT) se zaradi višje vsebnosti silicija (Si) opazno poveča [26]. Povečanje števila grafitnih nodulov in delcev spremlja zmanjšanje

Consequently, the movement of dislocations within the material is impeded, leading to a restriction in plastic deformation [19,20]. To enable dislocations to move again, a higher level of stress is required. It becomes evident that the strength of ferrite increases as the silicon content increases.

2 Research Background

2.1 Microstructure

The influence of silicon (Si) on the microstructure of SGI has been extensively studied over the years. Much of the published experimental work focuses on examining the individual impact of one or more elements. Higher silicon content in SGI components results in a significant reduction in hardness variation and offers advantages by eliminating the presence of pearlite in the microstructure [21]. SGI samples with spheroidal graphite embedded in a fully ferritic matrix, devoid of any pearlite phase, can be observed. When the matrix structure of SGI contains pearlite ranging from 10% to 60%, it can be categorized as ferritic-pearlitic SGI [22]. By increasing the Si content, there is a tendency for the pearlite content in the microstructure to decrease, while the ferrite phase and nodularity increase [23]. In ductile iron, each graphite nucleus leads to the formation of a single graphite nodule, thereby making nucleation a determining factor for the final nodule count. Consequently, an increase in the nodule count in cast iron results in enhanced strength and ductility, improved microstructural uniformity, and reduced susceptibility to cooling-related issues.

The transition behavior of DI is influenced by the average graphite nodule count, with a demonstrated decrease in transition temperature as the nodule count increases, leading to a reduction in the

velikosti delcev grafita. Povprečno število delcev vpliva tudi na statične mehanske lastnosti proučevanih zlitin. Tako natezna trdnost (UTS) kot meja tečenja (YS) se z večjim številom delcev grafita povečata. Nasprotno pa ima zmanjšanje števila nodulov vse manjši učinek na trdnost, pri čemer je opaziti zmanjšanje za približno 27 MPa pri UTS in 23 MPa pri YS pri zmanjšanju 100 nodulov na mm². DBTT v Charpyjevem udarnem preizkusu kaže znatno zmanjšanje ob večjem številu delcev. Da bi zagotovili zadostne lastnosti žilavosti pri nizkih in sobnih temperaturah, je treba meriti na povečano število nodulov, in sicer 300 nodulov na mm², začetek pokanja pri večjem številu nodulov pa zahteva več energije, segregacija na mejah zrn pa se pojavi ne glede na obliko nodulov [27].

Med strjevanjem se silicij (Si) loči v trdno fazo, kar povzroči zmanjšanje topnosti ogljika v feritu. To pa poveča izločanje grafita. Z večanjem vsebnosti ogljika v železu se povečuje tudi odstotek grafita v mikrostrukturi. Višja vsebnost silicija prispeva k povečanemu številu nodulov, s čimer se zmanjša dolžina difuzijske poti ogljika med eutektoidno transformacijo. Posledica je višji odstotek ferita v matrici [28, 29]. Vse vrste kroglaste litine imajo visoko število nodulov, ki se dodatno poveča z višjo vsebnostjo silicija zaradi spodbujanja grafita. Doseganje visokega števila nodulov se olajša z vrhunsko metalurško kakovostjo in nukleacijskim potencialom taline, ki je dosežen z uporabo visoke vsebnosti grodlja, Predobdelava taline in močno cepljenjem v loncu in curku med postopkom litja v formi [29].

Dodatek magnezija kot sredstva za nadulacijo pri proizvodnji litine s kroglastim grafitom povzroči nastanek mikroskopskih kroglastih grafitnih zrn. Majhna, sferična oblika teh nodulov, ki jo povzroči prisotnost magnezija, povečuje kroglasti grafit sive

upper shelf energy (USE) [24,25]. Notably, the ductile-to-brittle transition temperature (DBTT) is increased by higher silicon (Si) content [26]. The increase in graphite nodule and particle count is accompanied by a decrease in graphite particle size. The average particle count also affects the static mechanical properties of the alloys studied. Both tensile strength (UTS) and yield strength (YS) exhibit an increase with higher graphite particle count. Conversely, reducing the nodule count has a diminishing effect on strength, with a decrease of approximately 27 MPa in UTS and 23 MPa in YS observed for a reduction of 100 nodules per mm². The DBTT in Charpy impact tests shows a significant decrease with higher particle counts. To obtain sufficient toughness properties at both low and room temperatures, an increased nodule count of 300 nodules per mm² should be targeted and the initiation of cracking at higher nodule counts requires more energy, and grain boundary segregation occurs regardless of nodule shape [27].

During solidification, silicon (Si) segregates into the solid phase, leading to a reduction in carbon solubility in ferrite. This, in turn, increases the precipitation of graphite. As the carbon content of iron increases, the percentage of graphite in the microstructure also increases. Higher silicon contents contribute to an increased nodule count, thereby reducing the length of the carbon diffusion path during eutectoid transformation. This results in a higher percentage of ferrite in the matrix [28,29]. All species of ductile iron exhibit a high nodule count, which further increases with higher silicon content due to the promotion of graphite. The achievement of a high nodule count is facilitated by the superior metallurgical quality and nucleation potential of the melt, which is achieved through the use of high pig iron content,

litine. Količina potrebnega magnezija se poveča z višjo vsebnostjo žvepla v osnovnem železu, ki ga je treba obdelati [30]. Ko staljenemu železu dodamo sredstvo za sferoidizacijo, lahko žveplo in kisik, prisotna v staljenem železu, reagirata z magnezijem. Nekateri reakcijski produkti delujejo kot nukleacijski substrati za kroglasti grafit, medtem ko se drugi iz taline odstranijo skupaj z žlindro. Površinska napetost med grafitom in talino se po obdelavi z magnezijem znatno spremeni, kar ustvarja potrebne termodinamične pogoje za rast SGI [31]. Pri določanju kroglastih litin se v izračunu kroglastih litin kot delci sferoidnega grafita štejejo samo delci oblike V in VI [32].

2.2 Mehanske lastnosti

Silicij (Si) je poznan kot pomemben dejavnik, ki vpliva na prehodno vedenje kroglastih litin. Vsebnost silicija vpliva predvsem na statične mehanske lastnosti kroglastih litin [33]. Rezultati kažejo, da višje ravni silicija sovpadajo z nižjo vsebnostjo ogljika, kar lahko prispeva k doseganju večje trdnosti brez poslabšanja mehanskih lastnosti. Manjša kroglasta litina nekaterih vzorcev kroglastih litin ima manjši vpliv na končno natezno trdnost in mejo tečenja [21]. Natezna trdnost in meja tečenja kroglaste litine se običajno povečata z naraščanjem vsebnosti silicija do določene točke (okoli 4,22 mas.%), nato pa se zaradi povečane krhkosti zmanjšata z nadaljnjim povečanjem vsebnosti silicija. Raztezek in udarna energija se nenehno zmanjšujeta ob naraščanju vsebnosti silicija s 3,11 mas.% na 5,42 mas.%. Zaradi zmanjšane plastičnosti in povečane krhkosti ferita. Poleg tega vodi povečanje vsebnosti silicija do nenehnega povečevanja trdote, saj se okrepi učinek silicija na ferit [29].

preconditioning, and strong inoculation in the ladle and metal stream during the casting process in the molds [29].

The addition of magnesium as a spheroidizing agent in the production of spheroidal graphite cast iron results in the formation of microscopic nodular graphite grains. The small, spherical shape of these nodules, induced by the presence of magnesium, enhances the nodularity of the cast iron. The amount of magnesium required increases with higher sulfur content in the base iron to be treated [30]. When the spheroidizing agent is added to the molten iron, sulfur, and oxygen present in the molten iron can react with magnesium. Some of the reaction products act as nucleation substrates for spheroidal graphite, while others are removed along with the slag from the molten iron. The interfacial tension of graphite experiences significant changes after magnesium treatment, creating the necessary thermodynamic conditions for the growth of spheroidal graphite iron (SGI) [31]. In determining nodularity, only Form V and VI particles are considered spheroidal graphite particles in the nodularity calculation [32].

2.2 Mechanical Properties

Silicon (Si) is recognized as a significant factor influencing the transition behavior of ductile iron. The silicon content primarily affects the static mechanical properties of ductile iron [33]. The results show that higher silicon levels coincide with lower carbon content, which may contribute to achieving higher strength without a decline in mechanical properties. The lower nodularity of certain ductile iron specimens has a lesser impact on ultimate tensile strength and yield strength [21]. Tensile strength and yield strength of ductile iron tend to increase with increasing silicon

Udarne energija po Charpyju feritno-perlitne kroglaste litine (DI) nakazuje na znatno povečanje pri konstantni temperaturi, ko se poveča povprečna kroglasta litina. DBTT v Charpyjevem udarnem preizkusu kaže znatno zmanjšanje ob večjem številu delcev. Študije so pokazale, da lahko povečanje vsebnosti silicija z 2,74 na 3,74 mas.% dvigne vrednost DBTT za približno 70 °C. Najnižje vrednosti za natezno trdnost (UTS) in mejo tečenja (YS) so zaznane pri vzorcih z najnižjo vsebnostjo silicija, medtem ko zvečanje vsebnosti silicija povzroči znatna povečanja tako UTS kot YS. DBTT se premakne k višjim temperaturam z naraščajočo vsebnostjo silicija, prehodno območje med duktilnim in razkolnim lomom pa se razširi zaradi povečane vsebnosti silicija [27].

Poleg tega povečanje števila krogel v feritni kroglasti litini železu povzroči znatno zmanjšanje vrednosti DBTT [35]. Prehodna temperatura krhkega loma (DBTT) se opazno in znatno poveča z zvečanjem vsebnosti silicija (Si) [26]. Priporočljivo je doseči povečano število nodulov 300 nodulov na mm², da bi zagotovili zadostne lastnosti žilavosti pri nizkih in sobnih temperaturah [26]. Dokazano je bilo, da se prehodna temperatura DI znatno zmanjša s povečanjem števila grafitnih nodulov, posledica česar je zmanjšanje energije zgornjega praga (USE) [35, 36].

Toplotna obdelava in nadzorovani hladilni sistemi se običajno uporabljajo za spreminjanje mikrostruktur materiala in za izboljšanje mehanskih lastnosti. V primeru litega železa je mogoče za nadzor razmerij med feritom in perlitom ali celo njeno popolno spremembo uporabiti toplotno obdelavo. Ferit ima boljšo toplotno prevodnost v primerjavi s perlitom [37], vendar običajno povzroči nižjo trdnost, razen če je ustrezno utrjen v raztopini z legirnimi elementi. V primeru razmeroma novih standardiziranih

content up to a certain point (around 4.22 mas. %), but then decrease with further increases in silicon content due to increased embrittlement. Elongation and impact energy continuously decrease with increasing silicon content from 3.11 mas. % to 5.42 mas. % due to decreased plasticity and increased embrittlement of ferrite. Additionally, an increase in silicon content leads to a continuous increase in hardness as the strengthening effect of silicon on ferrite intensifies [29].

The Charpy impact energy of ferritic-pearlitic ductile iron (DI) shows a significant increase at a constant temperature when the average nodularity is raised. The DBTT in Charpy impact tests shows a significant decrease with higher particle counts. Studies have shown that increasing the silicon content from 2.74 to 3.74 mas. % can raise the DBTT by about 70°C. The lowest values for ultimate tensile strength (UTS) and yield strength (YS) are observed in samples with the lowest silicon content, while an increase in silicon content leads to significant increases in both UTS and YS. The DBTT is shifted to higher temperatures with increasing silicon content, and the transition range between ductile and cleavage fracture behavior is extended due to the increased silicon content [27].

Moreover, an increase in the nodule count in ferritic ductile iron results in a significant reduction in the DBTT [35]. Notably, the ductile-to-brittle transition temperature (DBTT) is significantly raised by increasing the silicon (Si) content [26]. Achieving an increased nodule count of 300 nodules per mm² is recommended to obtain sufficient toughness properties at both low and room temperatures [26]. It has been demonstrated that the transition temperature of DI decreases significantly with increasing graphite nodule count,

feritnih kroglastih litin (SSF), ojačenih z utrjevanjem trdne raztopine, višje stopnje legiranja, npr. povečana vsebnost silicija, zagotavljajo izboljšane mehanske lastnosti v kombinaciji s homogeno feritno mikrostrukturo [38–40]. Dodatek silicija v trdni raztopini zmanjša toplotno prevodnost v vseh proučevanih zlitinah. Kot navajajo v drugih študijah, višje ravni silicija naredijo ferit manj prevoden, hkrati pa izboljšajo mehanske lastnosti. Vendar pa učinek silicija na toplotno prevodnost ni linearen. Sprememba je izrazitejša pri manj legiranih zlitinah in se nagiba k nasičenosti pri višjih ravneh [40].

Meja tečenja in natezna trdnost materiala naraščata linearno z naraščajočo vsebnostjo silicija, in sicer do določene ravni. Vendar pa se duktilnost linearno zmanjšuje in se pri približno 5,3 mas.% vsebnosti silicija približuje ničli. Za GJS-600-10 z vsebnostjo silicija med 4,2 in 4,5 mas.%, lahko duktilnost variira od nad 20 % do skoraj nič, v primerjavi s spodnjo mejo specifikacije 10 % duktilnosti [41]. Povečanje vsebnosti silicija v materialu povzroči zmanjšanje odpornosti. Na dinamične udarne lastnosti feritnega litega železa vplivata količina grafitnih nodulov ter kroglaste litine [42, 43]. Preizkušanje udarcev je bistvenega pomena za karakterizacijo dinamične odpornosti materiala in določa energijo, potrebno za zlom preskusnega vzorca.

Znatno višjo prehodno temperaturo krhkega loma (DBTT), zaznано pri Charpyjevem udarnem preizkusu (CI), določeno pri polovični energiji energije zgornjega praga (USE), pripisujejo izraziti občutljivosti na hitrost deformacije (SRS) kroglasta litina (DI). SRS se nanaša na povečano ojačitev materiala z naraščajočo hitrostjo deformacije [45]. Lokalno napetostno stanje, ki prevladuje v komponenti, vpliva tudi na prehod in lomno

resulting in a reduction of the upper shelf energy (USE) [35,36].

Heat treatment and controlled cooling systems are commonly utilized to modify material microstructures and enhance mechanical properties. In the case of cast irons, heat treatments can be employed to control the ratios of ferrite and pearlite or even completely alter the microstructure. Ferrite exhibits superior thermal conductivity compared to pearlite [37], but it typically results in lower strength unless properly solution-strengthened through alloying elements. In the case of relatively new standardized solution-strengthened ferritic ductile irons (SSF), higher levels of alloying, such as increased silicon content, offer improved mechanical properties combined with a homogeneous ferritic microstructure [38-40]. The addition of silicon in a solid solution reduces the thermal conductivity in all studied alloys. Higher silicon levels make ferrite less conductive, while simultaneously enhancing mechanical properties, as observed in other studies. However, the effect of silicon on thermal conductivity is not linear. The change is more pronounced in lower alloying ranges and tends to saturate at higher levels [40].

The yield strength and tensile strength of the material increase linearly with increasing silicon content up to a certain level. However, ductility decreases linearly and approaches zero at around 5.3 mas. % silicon content. For GJS-600-10, which has a silicon content between 4.2 and 4.5 mas. %, the ductility can vary from above 20% to almost zero, compared to the lower specification limit of 10% ductility [41]. Increasing the silicon content in a material leads to a decrease in resilience. The dynamic impact properties of ferritic cast iron are influenced by the quantity of graphite nodules and the nodularity [42,43]. Impact testing is essential for characterizing

vedenje materiala [46–48]. Ta lokalna napetostna stanja je mogoče v celoti opisati z uporabo dveh brezdimenzionalnih indeksov: triosne napetosti (η), ki predstavlja razmerje med hidrostatično napetostjo in ekvivalentno napetostjo, in normaliziranega parametra kota Lode (θ), ki temelji na drugi in tretji invarianti deviatornega tenzorja napetosti. Pri vzorcih z zarezo za Charpyev test je triosna napetost zaradi povečane debeline približno 45 % višja v primerjavi z vzorci za udarni natezni preskus. Določa celotne mehanizme krhkega in duktilnega loma pri kvazistatičnih pogojih obremenitve pri $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ kot tudi pri dinamičnih pogojih obremenitve pri $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3 Zasnova poskusa

Da bi raziskali učinke temperature, stopnje deformacije in lokalno napetostno stanje, je bila izvedena serija poskusov litja z uporabo dveh različnih materialov iz kroglaste litine (DI), EN-GJS-400-15 in EN-GJS-450-18. Vsaka serija ulitkov je imela skupno težo ulitkov približno 250 kg, kar predstavlja osnovo za preizkus, ki je čim bolj podoben industrijski izvedbi preizkusa. Vsebnost silicija (Si) v materialih DI je bila prilagojena na ciljni vrednosti 2,4 % in 3,03 % teže. S spreminjanjem vsebnosti Si smo dosegli različne mikrostrukture, ki so vplivale na vsebnost perlita in stopnjo utrditve trdne raztopine v frakciji feritne matrice. Te spremembe v mikrostrukturi so bile namenjene preučevanju učinkov na vedenje materiala v različnih preskusnih pogojih.

Preskusno litje smo izvedli s srednjefrekvenčno indukcijsko pečjo Fa. Otto Junker z maksimalno kapaciteto 250 kg litega železa. Za ta poseben poskus smo uporabili šest form, pri čemer je vsaka forma lahko vsebovala 40–45 kg materiala. Vsak ulitek je bil sestavljen iz 230 kg

the material's dynamic resistance and determines the energy required to fracture a test sample.

The significantly higher ductile-to-brittle transition temperature (DBTT) observed in the Charpy impact (CI) test, determined at the half energy of the upper shelf energy (USE), is attributed to the pronounced strain rate sensitivity (SRS) of ductile iron (DI) materials. The SRS refers to the increased strengthening of the material with increasing strain rate [45]. The local stress state prevailing in the component also influences the transition and fracture behavior of the material [46–48]. These local stress states can be fully characterized using two dimensionless indices: the stress triaxiality (η), which represents the ratio of hydrostatic stress to equivalent stress, and the normalized Lode angle parameter (θ), which is based on the second and third invariants of the deviatoric stress tensor. In Charpy-V-notched specimens, the stress triaxiality is approximately 45% higher compared to impact tensile test specimens due to their increased thickness. It determines the complete brittle and ductile fracture mechanisms under quasistatic loading conditions at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, as well as under dynamic loading conditions at $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3 Experimental Setup

To explore the effects of temperature, strain rate, and local stress state, a series of casting experiments were conducted using two different ductile iron (DI) materials, EN-GJS-400-15 and EN-GJS-450-18. Each casting series had a total casting weight of approximately 250 kg which will show a test basis that is as close as possible to industrially relevant test performed. The silicon (Si) content in the DI materials was adjusted to target values of 2.4% and

staljene kovine, medtem ko preostali del predstavljajo jekleni odpadki in magnezij. Sestava taline ter dodajanje jeklenih odpadkov in magnezija so bili skrbno nadzorovani, da bi dosegli željeno sestavo in lastnosti vzorcev kroglaste litine.

Za začetek postopka litja smo v peč vložili carbolux, čisto železo, ferosilicij (FeSi) in feromangan (FeMn). Zmes smo segreli do temperature 1500 °C. Pri tej temperaturi smo odvzeli vzorec za termično analizo za določitev vsebnosti ogljika in ogljikov ekvivalent. Sestavo ostalih elementov smo analizirali s spektroskopsko metodo, in sicer z napravo Spectro 1. Po začetni analizi smo peč še močnejše segreli na temperaturo 1530 °C in to temperaturo ohranjali 5 minut. Ta korak smo izvedli za odstranitev vseh nečistoč, ki so prisotne v talini, in za kompenzacijo temperaturnih izgub med ravnanjem s talino.

Nato smo staljeno kovino vlili v predhodno segret lonec. Lonec smo pripravili tako, da smo na dno položili magnezij in ga prekrili z jeklenimi odpadki. To pomaga olajšati proces sferoidizacije grafita in ohranja zelene lastnosti kroglaste litine. Po obdelavi z magnezijem smo z metodo prelivanja izvedli inokulacijo z loncem. Ta korak pomaga dodatno izboljšati mikrostrukturo kroglaste litine.

Po inokulaciji smo odvzeli vzorce za termično analizo za namene spremljanja vsebnosti ogljika in ogljikov ekvivalent. Poleg tega smo izvedli spektrometrične analize (Spectro 2) za določitev sestave staljene kovine. Končno smo postopek litja izvedli pri temperaturi litja približno 1380 °C–1400 °C. Uporabili smo forme iz kremenčevega peska z vezivom iz furanske smole, ki so bili zasnovani za izdelavo modelov za YII-standardne vzorce v skladu s standardom DIN EN 1563. Ti vzorci se običajno uporabljajo za preizkušanje in ocenjevanje lastnosti kroglaste litine.

3.03% by weight. By varying the Si content, different microstructures were achieved, specifically affecting the pearlite content and the degree of solid solution strengthening in the ferritic matrix fraction. These variations in microstructure were intended to examine the corresponding effects on the material's behavior under different testing conditions.

The casting trials were conducted using a medium-frequency induction furnace from Fa. Otto Junker, which had a maximum capacity of 250 kg of cast iron. For this particular experiment, a total of six molds were used, with each mold capable of holding 40-45 kg of material. Each casting was composed of 230 kg of molten metal, while the remaining portion consisted of steel scrap and magnesium. The composition of the melt and the addition of steel scrap and magnesium were carefully controlled to achieve the desired composition and properties of the ductile iron specimens.

To begin the casting process, the furnace was loaded with carbolux, pure iron, ferrosilicon (FeSi), and ferromanganese (FeMn). The mixture was heated up to a temperature of 1500°C. At this point, a sample was taken for thermal analysis to determine the carbon content and carbon equivalent. The composition of the other elements was analyzed using a spectroscopic method, specifically Spektro 1. After the initial analysis, the furnace was further heated to a temperature of 1530°C and held at this temperature for 5 minutes. This step was carried out to remove any impurities present in the melt and to compensate for temperature losses during the handling of the melt.

Next, the molten metal was poured into a preheated ladle. The ladle was prepared by placing magnesium at the bottom, and it was covered with steel scrap. This setup helps facilitate the spheroidization process of the graphite and maintain the desired

Kvazistatične natezne preskuse smo izvedli z uporabo preskusnega stroja za natezno trdnost Fa. Instron 8033. Ta stroj se običajno uporablja za ocenjevanje mehanskih lastnosti materialov pod statično obremenitvijo. Na drugi strani smo natezne preskuse pri visokih hitrostih izvedli s servohidravličnim preskusnim strojem Fa. Roell-Amsler HTM. Ta stroj je zmožen uporabiti stopnje dinamične obremenitve za oceno obnašanja materiala pri visokih stopnjah obremenitve.

Vzorci za metalografsko analizo smo odvzeli iz vzorcev YII klinaste oblike. Te vzorce smo nato brusili in polirali, dokler nismo dosegli gladke površine s končno obdelavo 0,25 μm . Za pregled mikrostrukture vzorcev smo uporabili svetlobni mikroskop, in sicer Carl Zeiss Axio Scope.A1.

4 Analiza mikrostrukture

Metalografske vzorce smo ekstrahirali iz neposredne bližine vzorcev za natezne preizkuse. Vzorci so bili podvrženi postopku hladne vdelave in nato brušeni z uporabo brusilnih papirjev SiC različnih granulacij (180, 320, 500 in 1000). Kasneje smo metalografske vzorce zložili z uporabo diamantne suspenzije z velikostjo delcev 9 μm , 3 μm in 0,25 μm . Mikrostrukturno analizo smo izvedli na zloženih in z nitalom jedkanih vzorcih z optičnim svetlobnim mikroskopom. Avtomatizirano analizo slik smo izvedli s pretvorbo pridobljenih slik v binarizirane mikrofotografije in z uporabo programske opreme AxioVision. Skupaj smo zajeli pet slik površine vsakega vzorca in jih analizirali, da bi določili kroglaste litine, število nodulov, vsebnost grafita, ferita ter perlita v mikrostrukturi.

Oceno okroglosti vsakega delca in izračun kroglastih litin smo izvedli po standardih ISO 945-4. Število nodulov smo določili z upoštevanjem izključno delcev z

properties of the ductile iron. Following the magnesium treatment using the pour-over method, a ladle inoculation was performed. This step helps further refine the microstructure of the ductile iron.

After the inoculation, samples were taken for thermal analysis to monitor the Carbon content and carbon equivalent. Additionally, spectrometric analyses (Spectro 2) were conducted to determine the composition of the molten metal. Finally, the casting process was carried out at a pouring temperature of approximately 1380°C-1400°C. Furan resin-bonded silica sand molds were used, which were designed to create molds for YII-standard specimens according to DIN EN 1563. These specimens are commonly used for testing and evaluating the properties of ductile iron.

Quasi-static tensile tests were carried out using a tensile testing machine from Fa. Instron 8033. This machine is commonly used for evaluating the mechanical properties of materials under static loading conditions. High-speed tensile tests, on the other hand, were performed using a servo-hydraulic testing machine from Fa. Roell-Amsler HTM. This machine is capable of applying dynamic loading rates to assess the material's behavior under high strain rates.

Samples for metallographic analysis were taken from YII-wedge specimens. These samples were then ground and polished until a smooth surface with a finish of 0.25 μm was achieved. A light microscope, specifically the Carl Zeiss Axio Scope.A1, was used to examine the microstructure of the samples.

4 Microstructural Analyse

Metallographic specimens were extracted from the immediate vicinity of the

najmanjšo okroglostjo 0,6. Za ovrednotenje parametrov grafitu smo uporabili spodnji prag 25 kvadratnih mikronov za območje nodula. Upoštevati je treba, da bi imel popolnoma okrogel nodul z okroglostjo 1,0 premer 5,64 mikronov, kar je precej pod najmanjšo velikostjo 10 mikronov, določeno v standardu ISO 945-4 za največji Feretov premer.

5 Rezultati

V Preglednici 1 so predstavljene kemijske sestave vzorcev iz kroglaste litine. Iz preglednica je razvidno, da so bile dosežene želene vsebnosti silicija. Visoka vsebnost silicija, skupaj z nizkimi stopnjami elementov, ki spodbujajo tvorbo perlita (Cu, Mn) in elementov, ki tvorijo karbide (Cr, V, Mo), omogoča tvorbo popolnoma feritne kovinske matrice v litem stanju.

Preglednica 1. Kemijska sestava litega železa s kroglastim grafitom

Table 1. Chemical Compositions of Spheroidal Graphite Cast Iron

Elementi / Elements	C	Si	Mn	Cr	CE
EN-GJS-400-15(A)	3,41	2,37	0,09	0,05	4,2
EN-GJS-450-18(B)	3,19	3,10	0,15	0,08	4,2

Slika 1a EN-GJS-400-15 in Slika 1b EN-GJS-450-18 prikazujeta, kako vsebnost silicija pomembno vpliva na mikrostrukturo kroglaste litine.

Slika 2a EN-GJS-400-15 in Slika 2b EN-GJS-450-18 prikazujeta, kako vsebnost silicija pomembno vpliva na perlit in ferit v mikrostrukturi kroglaste litine.

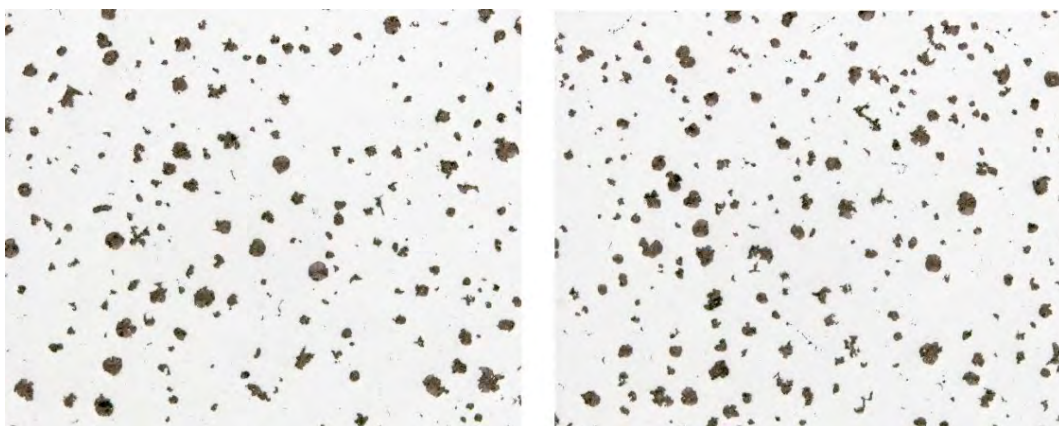
V študiji smo kroglasti litini dodali različne količine silicija, da bi proučili nastale spremembe v mikrostrukturi. Vsebnost silicija se je postopoma povečevala z

tensile test specimens. The specimens underwent a cold-embedding process and were subsequently ground using SiC grinding papers with varying grit sizes (180, 320, 500, and 1000). Subsequently, the metallographic specimens were polished using a diamond suspension with particle sizes of 9 μm , 3 μm , and 0.25 μm . Microstructural analysis was performed on both polished and nital-etched samples using an optical up-light microscope. Automated image analysis was performed by converting the acquired images into binarized micrographs and utilizing the AxioVision software. A total of five images were acquired from each sample's surface and analyzed to determine the nodularity, nodule count, graphite, ferrite, and pearlite content within the microstructure.

According to ISO 945-4 standards, the roundness of each particle was assessed, and the nodularity was calculated. The nodule count was determined by considering only particles with a minimum roundness of 0.6. To evaluate the graphite parameters, a lower threshold of 25 square microns for the nodule area was used. It should be noted that a perfectly circular nodule with a roundness of 1.0 would have a diameter of 5.64 microns, which is well below the minimum size of 10 microns specified in ISO 945-4 for the maximum Feret diameter.

5 Results

Table 1 presents the chemical compositions of the ductile iron specimens. It is evident from the table that the desired silicon contents have been achieved. The high silicon contents, along with low levels of pearlite-promoting elements (Cu, Mn) and carbide-forming elements (Cr, V, Mo), enable the formation of a fully ferritic metal matrix in the as-cast state.



a) EN-GJS-400-15

b) EN-GJS-450-18

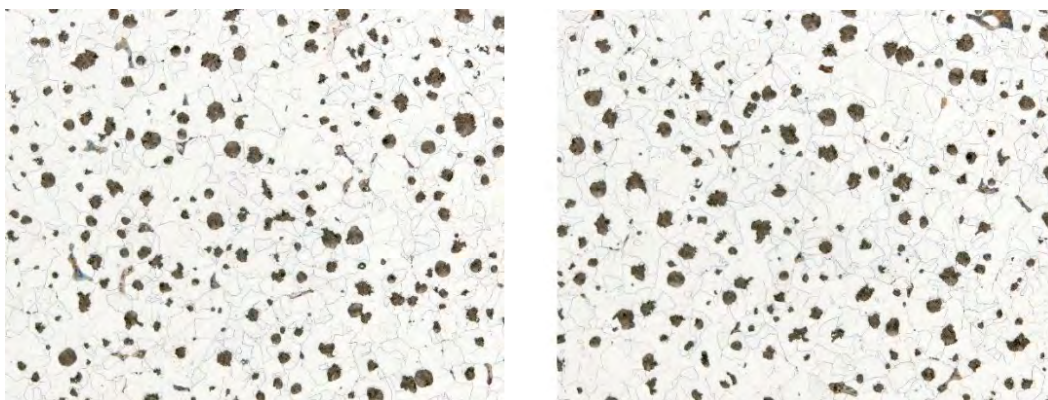
Slika 1. Vpliv vsebnosti silicija na mikrostrukturo kroglaste litine

Figure 1. influence of silicon content on the microstructure of the ductile iron

Preglednica 2. Analiza mikrostrukture EN-GJS-400-15 (A) in EN-GJS-450-18 (B)

Table 2. Analysis of Microstructure of EN-GJS-400-15 (A) and EN-GJS-450-18 (B)

Elementi/ Elements	Grafit / Graphite (%)	Perlit / Pearlite (%)	Ferit / Ferrite (%)	število nodulov / Nodule count	Kroglaste litine / Nodularity (%) (%)
EN-GJS-400-15	7,37	9,21	83,14	482	51
EN-GJS-450-18	7,03	4,86	88,11	515	58



a) EN-GJS-400-15

b) EN-GJS-450-18

Slika 2. Vpliv vsebnosti silicija na perlit in ferit v mikrostrukturi kroglaste litine

Figure 2. influence of silicon content on Peralite and Ferrite in the microstructure of the ductile iron

2,40 mas.% na 3,03 mas.%, medtem ko se je vsebnost ogljika ohranila med 3,19 mas.% in 3,41 mas.%, kar smo raziskali s toplotno analizo. Glede na literaturo se število nodulov poveča z višjo vsebnostjo silicija, kar označuje, da višje ravni silicija prispevajo k večji kroglasti litini (kot je prikazano na Sliki 1). Poleg tega povečanje vsebnosti silicija povzroči večjo vsebnost ferita v kovinski matrici, saj silicij spodbuja tvorbo ferita, hkrati pa zmanjšuje vsebnost perlita (kot je prikazano na Sliki 2).

6 Razprava

Namen te razprave je raziskati vpliv povečane vsebnosti silicija na mikrostrukturo in natezne lastnosti kroglaste litine s kroglastim grafitom (SGI). Pripravili smo dva razreda kroglaste litine SGI, EN-GJS-400-15 in EN-GJS-450-18, ter primerjali njune strukturne in mehanske značilnosti. Analiza je pokazala, da se je s povečanjem vsebnosti silicija vsebnost perlita v vzorcu A zmanjšala za 9,21 % in za 4,86 % v vzorcu B, medtem ko se je vsebnost ferita povečala na 83,14 % oziroma 88,14 %. Dovajanje magnezija kot sferoidizirajočega sredstva je povzročilo nastanek nodul, kar je izboljšalo kroglastih litin litega železa. Potrebna količina magnezija je bila odvisna od vsebnosti žvepla v osnovnem železu.

Po končanem postopku litja se silicij med strjevanjem nagiba k segregaciji v trdno fazo. To ločevanje povzroči zmanjšanje topnosti ogljika v feritu in povečanje izločanja grafita. Z naraščanjem vsebnosti ogljika v železu se povečuje tudi odstotek grafita v mikrostrukturi. V poskusu je vsebnost ogljika v EN-GJS-400-15 3,41, v EN-GJS-450-18 pa 3,19, posledica česar je zaznan odstotek grafita v vrednosti 7,37 % oziroma 7,03 %. Poleg tega višja

Figure 1a EN-GJS-400-15 & and Figure: 1b EN-GJS-450-18 illustrate that the silicon content has a significant influence on the microstructure of the ductile iron.

Figure 2a EN-GJS-400-15 & and Figure 2b EN-GJS-450-18 illustrate that the silicon content has a significant influence on Peralite and Ferrite in the microstructure of the ductile iron.

In the study, different silicon contents were added to the ductile iron to examine the resulting changes in the microstructure. The silicon content was increased incrementally from 2.40 mas. % to 3.03 mas. %, while the carbon content was maintained between 3.19 mas. % and 3.41 mas. % which has been investigated by the thermal analysis. According to the literature, the number of nodules increases with higher silicon content, indicating that higher silicon levels contribute to greater nodularity (as shown in Figure 1. Additionally, an increase in silicon content leads to a higher ferrite content in the metal matrix, as silicon promotes ferrite formation, while simultaneously decreasing the pearlite content (as shown in Figure 2.

6 Discussion

This discussion aims to explore the impact of increased silicon content on the microstructure and tensile properties of Spheroidal Graphite Iron (SGI). Two grades of SGI, EN-GJS-400-15 and EN- GJS-450-18, were prepared and their structural and mechanical characteristics were compared. The analysis revealed that as silicon content increased, pearlite content decreased by 9.21% in sample A and 4.86% in sample B, while ferrite content increased to 83.14% and 88.14%, respectively. The introduction of magnesium as a spheroidizing agent resulted in the formation of nodules, which improved the nodularity of the cast iron. The

vsebnost silicija prispeva k povečanemu številu nodulov s skrajšanjem difuzijskih poti ogljika med eutektoidno transformacijo, kar vodi do višjega odstotka ferita v mikrostrukturi. V kroglasti litine grafitna kali povzročijo nastanek posameznih grafitnih nodulov, kar pomeni, da je nukleacija ključni dejavnik pri določanju končnega števila nodulov. Zaznano število nodulov je 482 v vzorcu A in 515 v vzorcu B.

Glede na obstoječo literaturo povprečno število nodulov vpliva na mehanske lastnosti ulitkov, pri čemer se tako natezna trdnost kot meja tečenja izboljšata ob večjem številu nodulov. V našem primeru, torej če primerjamo dosežene vrednosti mejne natezne trdnosti (UTS) z literaturo, je vzorec A povezan z vrednostjo 411,82 MPa, vzorec B pa z vrednostjo 462,00 MPa. Silicij (Si) igra ključno vlogo pri prehodnem vedenju kroglastih litin. Višje ravni silicija so povezane z nižjo vsebnostjo ogljika, kar prispeva k večji trdnosti brez negativnega vpliva na mehanske lastnosti. Zanimivo je, da ima manjša kroglasta litina v nekaterih duktilnih vzorcih razmeroma majhen učinek na končno natezno trdnost in mejo tečenja. To je v skladu z vašimi eksperimentalnimi ugotovitvami o 51-odstotni kroglaste litine vzorca A in 60-odstotni kroglaste litine vzorca B. Nasprotno pa se raztezek in udarna energija dosledno zmanjšujeta z naraščajočo vsebnostjo silicija. To nakazuje, da čeprav višja vsebnost silicija poveča trdnost, pride posledično do zmanjšane raztezka in udarne energije.

Udarna energija po Charpyju feritno-perlitne kroglaste litine se opazno poveča pri dosledni temperaturi, ko je povprečna kroglasta litina povišana. Z večanjem vsebnosti silicija se prehodna temperatura krhkega loma (DBTT) premakne proti višjim temperaturam. Prav tako se zaradi višje vsebnosti silicija poveča razpon med duktilnim in krhkim lomom. Izboljšanje

necessary amount of magnesium depended on the sulfur content in the base iron.

Upon the completion of the casting process, silicon tends to segregate into the solid phase during solidification. This segregation leads to a decrease in carbon solubility in ferrite and an increase in graphite precipitation. As the carbon content of iron rises, the microstructure's graphite percentage also increases. In the experiment, the carbon content of EN-GJS-400-15 is 3.41, and in EN-GJS-450-18 it's 3.19, resulting in observed graphite percentages of 7.37% and 7.03%, respectively. Additionally, a higher silicon content contributes to an increased nodule count by shortening the carbon diffusion path during eutectoid transformation, leading to a higher percentage of ferrite in the microstructure. In ductile iron, graphite nuclei lead to the formation of individual graphite nodules, making nucleation a crucial factor in determining the final nodule count. The observed nodule counts are 482 and 515 in sample A and sample B, respectively.

As per existing literature, the average nodule count has an impact on the mechanical properties of castings, with both tensile strength and yield strength showing improvement with higher nodule counts. In your case, comparing the achieved Ultimate Tensile Strength (UTS) values against the literature, Sample A yielded 411.82 MPa, while Sample B recorded 462.00 MPa. Silicon (Si) plays a crucial role in influencing the transition behavior of ductile iron. Higher silicon levels are associated with lower carbon content, contributing to increased strength without compromising mechanical properties. Interestingly, lower nodularity in certain ductile samples has a relatively minor effect on Ultimate Tensile Strength and yield strength. This is in line with your experimental findings of 51% nodularity in

lastnosti žilavosti pri nižjih temperaturah in pri sobni temperaturi se doseže s povečanjem števila nodulov.

DBTT, določena pri polovici energije zgornjega praga (USE), kaže na znatno povečanje ob višji vsebnosti silicija (Si) v zlitini, ne glede na uporabljeno metodo preizkušanja žilavosti. Ta opazna razlika v prehodni temperaturi se pripisuje občutljivosti na hitrost deformacije (SRS) kroglaste litine (DI). Povečanje končne nateznetrnosti (UTS) s hitrostjo deformacije na splošno ni tako izrazito kot SRS. Velik SRS, ki ga kažejo materiali DI, lahko velja za glavni dejavnik, ki prispeva k izrazitemu premiku DBTT k višjim temperaturam pri Charpyjevem udarnem preizkusu (CI). Za preskus CI je značilna povišana stopnja deformacije in kritično lokalno napetostno stanje [49]. V prihodnosti se bodo raziskave osredotočale na vpliv povečanja silicija na mehanske lastnosti z udarnim preizkusom in udarno natezno trdnost.

7 Sklep

Povzetek rezultatov eksperimentalne študije razredov EN-GJS-400-15 in EN-GJS-450-18 je naslednji:

1. Višja vsebnost silicija vodi do popolnoma feritne matrice, kar nakazuje na vlogo silicija pri stabilizaciji ferita.
2. Povečanje vsebnosti silicija ob zmanjševanju vsebnosti ogljika povzroči zmanjšan delež grafita in perlita v mikrostrukturi.
3. Mikrostruktura je imela ob višji vsebnosti silicija povečano vsebnost ferita kot tudi večje število kroglastih litin.

Sample A and 60% nodularity in Sample B. Conversely, elongation and impact energy consistently decrease with rising silicon content. This suggests that while higher silicon content enhances strength, it comes at the expense of reduced elongation and impact energy.

The Charpy impact energy of Ferritic-Pearlitic ductile iron experiences a notable increase at a consistent temperature when the average nodularity is elevated. The Ductile-to-Brittle Transition Temperature shifts to higher temperatures as silicon content increases. Moreover, the range between ductile and cleavage fracture behavior is prolonged due to the higher silicon content. The enhancement in toughness properties at lower temperatures and room temperature is achieved through an increase in the nodule count.

The DBTT, determined at half of the upper shelf energy, shows a significant increase with higher silicon (Si) contents in the alloy, regardless of the toughness testing method employed. This notable difference in transition temperature is attributed to the strain rate sensitivity of ductile iron (DI). The increase in ultimate tensile strength with strain rate is generally not as pronounced as the SRS. The significant SRS exhibited by DI materials can be considered a major factor contributing to the distinct shift of the DBTT to higher temperatures in the Charpy impact (CI) test. The CI test is characterized by an elevated strain rate and a critical local stress state [49]. In future research, the influence of increasing silicon on the Mechanical properties by Impact test and Impact tensile strength will be studied.

7 Conclusion

The experimental study on Spheroidal Graphite Cast Iron grades EN-GJS-400-15

and EN-GJS-450-18 yielded the following summarized results:

1. A higher silicon content led to a fully ferritic matrix, indicating silicon's role in stabilizing ferrites.
2. Increasing silicon content while decreasing carbon content led to reduced percentages of graphite and pearlite in the microstructure.
3. The microstructure exhibited increased ferrite content as well as the nodule count with the higher silicon content.

Viri / Reference

1. J. Gayet and J.C. Margerie, AFS International Cast Metals Journal 6(6) (1981) 47.
2. J.E. Bevan and W.G. Scholz, AFS-Trans. 85 (1977) 271.
3. X.P. Shen, S.J. Harris and B.Nobel, Materials Science and Technology 11 (1995) 893.
4. L.Guerin and M.Gagne, Foundryman 8,9 (1987) 336.
5. N.Fatahalla, T.Gomaa, S.Bahi and M.Negm, Z.Metallkde 89(7) (1998) 501.
6. S.K.Yu, C.R.Loper, JR. and H.H. Cornell, AFS Trans. 94 (1986) 557.
7. D.R. Askeland and S. S. Gupata, ibid. 83 (1975) 313.
8. W. F. Smith and J. Hashemi, 2011 Foundations of materials science and engineering: McGraw-Hill.
9. QIT - Feret Titane Inc., Ductile iron data for design engineers, Rio Tinto Iron & Titanium, Montréal, 1990.
10. C. Labrecque, M. Gagné, Can. Metall. Q. 37 (5) (1998) 343–378.
11. H.T. Angus, Cast Iron: Physical and Engineering Properties, 2nd ed., Butterworth, 1978.
12. Kalle Jalava, Kaisu Soivio, and Juhani Orkas, Effect of Silicon and Microstructure on Spheroidal Graphite cast iron thermal conductivity at elevated temperature, International Journal of Metal Casting volume 12, pages 480– 486 (2018).
13. Deutsches Institut Für Normung E.V. DIN EN ISO 148-1: Metallische Werkstoffe-Kerbschlagebiegeversuch nach Charpy - Teil 1: Prüfverfahren; 2016.
14. D. RAJNOVIC, O. ERIC & L. SIDJANIN, Transition temperature and fracture mode of as-cast and austempered ductile iron, Journal of Microscopy, Vol. 232, Pt 3 2008, pp. 605–610.
15. M. Gagné, The Sorelmetal Book of Ductile Iron, Rio Tinto Iron & Titanium, Montreal, 2004. pp. 3-38.
16. R. Larker, China Foundry 6 (2009) 4, 343-351.
17. W. Stets, H. Löblich, G. Gassner, P. Schumacher, International Journal of Metal Casting 8 (2014) 2, 35-40.
18. A. K. Sinha, Physical Metallurgy Handbook, Chapter One, Iron-Carbon Alloys, McGraw-Hill, New York, 2003., pp. 1.14-1.17.

19. W. D. Callister, Jr., *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, John Wiley & Sons, New York, 2001., pp. 206-210.
20. R. Abbaschian, L. Abbaschian, R. E. Reed-Hill, *Physical Metallurgy Principles*, CENGAGE Learning, Stamford, 2009., pp. 267-271.
21. C. Hartung, Eivind G. Hoel, and Emmanuelle Ott, R. Logan, Andy Plowman and David Wilkinson, Research on Solution Strengthened Ferritic Ductile Iron (SSFDI) structure and properties using properties using different treatment and inoculation materials, *International Journal of Metal Casting* 14, 1195-1209(2020).
22. S. KARSAY, 'Ductile kon- the Production Practicos,' 2nd ed. (American Foundrymen's Society for Metals, USA, 1979).
23. W. Arshad, A. Mehmood, M. F. Hashmi, Obaid ur Rauf, The Effect of Increasing Silicon on Mechanical Properties of Ductile Iron, *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1082, Regional Conference on Materials and ASEAN Microscopy Conference 2017 (RCM & AMC 2017) 12–13 December 2017.
24. Mullin, J. D., *Ductile iron data for design engineers*. Rio Tinto Iron & Titanium Inc., Montreal, Quebec, Canada (1990).
25. C. Labrecque, P.-M. Cabanne, E.C. Muratore, Ductile iron characteristics and impact strength at low temperatures. *AFS Trans.* 118, 233–242 (2010).
26. L.-E. Björkegren, K. Hamberg, Silicon alloyed ductile iron with excellent ductility and machinability. In Keith Millis's symposium on ductile iron. Hilton Head Island, SC, USA (2003).
27. Daniel Franzen, Björn Pustal and Andreas Bührig-Polaczek, Influence of Graphite-Phase parameters on the mechanical properties of High silicon ductile iron, *International Journal of Metalcasting* 17, 4-21(2023).
28. K.A. Kasvayee, E. Ghassemali, I.L. Svenson, J. Olofsson, A.E.W. Jarfons, Characterization and modeling of mechanical behavior of high silicon ductile iron. *Mater. Sci. Eng. A* 708, 159–170 (2017).
29. Z. Glavas, A. Strkalj, A. Stojakovic, The properties of silicon alloyed ferritic ductile irons. *Metalurgija* 55, 293– 296 (2016).
30. Pallavi.H.Agarwal, Mamta P.Patel, Effect of Magnesium as Spherodizer on Graphite Morphology in Ductile Cast Iron, *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, Volume 3, Issue 2, February- 2016.
31. Zhiqing Shen, Hongliang Zheng, Tongtong Li, Yan Xu, Rongfu Xu, Xuelei Tian, The Influence of the Residual Mg Content in the Ductile Cast Iron on the Formation Law of Spheroidal Graphite. December 2011, *Advanced Materials Research* 415-417.907.
32. ISO 945-4:2019(E).
33. D.Franzen, B.Pustal, and A.Bührig-Polaczek, Mechanical Properties and Impact toughness of molybdenum alloyed ductile iron. *International Journal of Metalcasting*, volume 15, pp 983–994 (2021).
34. R. T. Titanium. *Ductile Iron Data for Design Engineers*. (1998).
35. Mullin, J. D., *Ductile iron data for design engineers*. Rio Tinto Iron & Titanium Inc., Montreal, Quebec, Canada (1990).
36. C. Labrecque, P.-M. Cabanne, E.C. Muratore, Ductile iron characteristics and impact strength at low temperatures. *AFS Trans.* 118, 233–242 (2010).
37. R.K. Williams, R.S. Graves, F.J. Weaver, D.W. Yarbrough, *J. Appl. Phys.* 62(7), 2778–

- 2783(1987).
38. R. Larker, China Foundry. 4(12), 343–351 (2009).
 39. H. Löblich, W. Stets, G. Gassner, P. Schumacher, Giesserei. 3, 28–32 (2012).
 40. W. Stets, H. Löblich, G. Gassner, P. Schumacher, Int. J. Metalcast. 8(2), 35–40 (2014).
 41. Peter Hammersberg, Kenneth Hamberg¹, Henrik Borgström, Joachim Lindkvist, and Lars-Erik Björkegren, Variation of Tensile Properties of High Silicon Ductile Iron, Materials Science Forum, ISSN: 1662-9752, Vol. 925, pp 280-287.
 42. QIT-Fer et Titane Inc., Ductile iron data for design engineers, Rio Tinto Iron & Titanium, Montréal, 1990.
 43. C. Labrecque, M. Gagné, Can. Metall. Q. 37 (5) (1998) 343–378.
 44. Akram Alhussein, Marion Risbet, A. Bastien, J. Chobaut, D. Balloy, Jérôme Favergeon, Influence of silicon and addition elements on the mechanical behavior of ferritic ductile cast iron. Material Science and Engineering: A, Volume 605, 27 May 2014, Pages 222-228.
 45. Münstermann S, Lian J, Döbreiner B. Die Zähigkeitscharakterisierung im Kerbschlagbiege- und Bruchmechanikversuch – Über die Ursachen von verschiedenen Übergangstemperaturen. Giesserei. 2015; 102(5): 30–37.
 46. Lian J, Sharaf M, Archie F, et al. A hybrid approach for modeling of plasticity and failure behavior of advanced high-strength steel sheets. International Journal of Damage Mechanics. 2012;22(2):188–218.
 47. Bleck W. Werkstoffprüfung in Studium und Praxis. Vol. 13. überarbeitete Auflage. Aachen: Bleck, W.; 2011.
 48. Könemann M. Zähigkeit von kaltumformbarem Stahlfeinblech. In Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. vol. Dr.-Ing. Aachen: RWTH Aachen; 2021. p. 190.
 49. Bai Y, Wierzbicki T. A new model of metal plasticity and fracture with pressure and load dependence. International Journal of Plasticity. 2008;24(2008):1071–1096.

Tehnični vidiki za zmanjšanje izmeta zahvaljujoč tehnologiji tlačnega litja brez mehanskega zaklepne mehanizma

Technical Considerations for Minimizing Scrap Thanks to Toggle-Free HPDC

Povzetek predavanja

Ulitki se lahko med seboj močno razlikujejo, vendar so cilji produktivnosti vedno enaki. Zmanjševanje količine izmeta je ključnega pomena ne glede na to, ali v vašem podjetju s postopkom tlačnega litja proizvajate dele za e-mobilnost, velike industrijske strukturne sestavne dele ali elemente s strogimi specifikacijami za komunikacijske tehnologije 5G.

Zmanjšanje količine odpadnega materiala pomeni preprečevanje izmeta surovin, prihranek (drage) energije in izogibanje ponovnemu litju delov. Prav tako se močno zmanjša količina izpustov CO₂. Pri proizvodnji 50.000 ton letno zmanjšanje izmeta za zgolj 2 % pomeni skoraj 604 ton prihranka CO₂.

Ker je visokotlačno litje (HPDC) brez mehanskega zaklepa dandanes zaradi hitro spreminjajočih se zahtev v povezavi s tlačnim litjem prepoznano kot najboljša možnost v industriji, si bomo v okviru tega nastopa poglobljeje ogledali, kako specifične značilnosti zasnove strojev za visokotlačno litje brez mehanskega zaklepa vplivajo na stopnjo izmeta ter kakšna konfiguracija zagotovi najboljše rezultate glede na specifične cilje litja.

Posebno pozornost bomo namenili naslednjim vidikom:

- Zaprta zasnova enote – kako konstrukcijski materiali, gibanje plošče, zaklepni mehanizem povezovalnega droga, sile stiskanja in drugi ključni vidiki pomagajo zmanjševati tveganje v povezavi z deformacijo kokile ali toplotnim raztezanjem – pomembnima vzrokoma za nastanek izmeta.
- Krmiljenje bata v komori – kako analiza podatkov v realnem času o toku taline v kombinaciji s samodejnim prilagajanjem hitrosti bata vpliva na natančnost litja.
- Digitalna orodja – kako lahko digitalne rešitve dopolnijo zasnovo opreme za visokotlačno litje brez mehanskega zaklepa v povezavi z zmanjševanjem izmeta. Umetno inteligenco lahko tlačne livarne uporabijo za pozorno spremljanje ključnih kazalnikov učinkovitosti skladno s proizvodnimi cilji, opredelitev vzrokov za izmet in avtomatizacijo prilagajanja postopka/nadzora ter tako zagotoviti optimalno učinkovitost.

Ključne besede: storilnost, tlačno litje, digitalna orodja, zasnova orodij za visokotlačno litje brez mehanskega zaklepa, umetna inteligenca

Lecture abstract

Castings can be very different one from another but productivity goals are always the same. Whether your business is diecasting parts for e-mobility, large structural components for industry, or high-spec elements for 5G communication technologies – minimizing scrap is essential.

Reducing scrap means avoiding wastes of raw materials, saving (costly) energy, and avoid to re-cast replacements. It also means CO₂ emissions are dramatically lowered. A

scrap rate reduction of just 2% on a production rate of 50.000 tonnes a year, can result in a saving of 604 CO₂ tonnes.

With Toggle Free High-Pressure Die Casting (HPDC) now widely acknowledged as the industry's preferred option for rapidly evolving die-casting needs, this lecture takes a closer look at how specific design features of toggle-free HPDC machines influence scrap rates, and what configuration grants the best results for particular casting goals.

Particular focus will be given to:

- Closing Unit Design - how construction materials, plant movement, tie bar locking mechanism, clamping forces, and other key aspects help mitigate the risk of die distortion due to misalignment or thermal expansion – major causes of scrap.
- Injection Unit Control – how real-time data analysis on melt flow combined with automated piston speed adjustment influence casting accuracy.
- Digital tools - how digital solutions can complement Toggle Free HPDC equipment design in the fight to reduce scrap. From helping die casters more closely monitor KPIs in line with production targets, to using AI as a means to identify causes of scrap and automate process/control adjustments for optimal performance.

Keywords: productivity, die casting, digital tools, toggle-free HPDC equipment design, artificial intelligence

1 Uvod

Vrednost svetovnega trga tlačnega litja je leta 2022 dosegla 62,4 milijarde ameriških dolarjev, do leta 2028 pa naj bi bila vredna približno 87,1 milijarde ameriških dolarjev [1]. Napovedana rast jasno odraža globalni premik k aluminiju v obsegu in hitrosti brez primere.

Ta premik je viden v številnih sektorjih, saj spreminja način oblikovanja in litja aluminijastih delov, od aplikacij v težki industriji do visokotehnoloških elementov za komunikacijske tehnologije 5G. Najbolj opazen premiksmodoživeliv avtomobilskem sektorju. Predvsem razmah e-mobilnosti je prinesel novo obdobje tlačnega litja, saj nizka teža in konsolidacija delov (kar je povzročilo veliko povpraševanja po velikih strukturnih komponentah) predstavljata veliko priložnost. Analitiki predvidevajo, da bomo do leta 2028 zabeležili 7,9-odstotno rast deleža »strukturnih« ulitkov, zlasti za šasije, karoserije in sestavne dele električnih vozil [2].

1 Lecture

The worldwide die-casting market size reached US\$ 62.4 Billion in 2022 and is expected to be worth around US\$ 87.1 billion by 2028 [1]. Predicted growth clearly reflects a global shift towards aluminium of unprecedented scale and pace.

This shift is evident in many sectors, changing the way aluminum parts are designed and cast, from heavy industry applications to high-spec elements for 5G communication technologies. The most notable shift we experience is in the automotive sector. The surge of e-mobility in particular, gave birth to a new era of die casting, with lightweighting and part consolidation (resulting in high demand for large structural components) presenting significant opportunity. Indeed, analysts predict that we are likely to see a 7.9% CAGR for "structural" castings - especially for chassis, body-in-white, and EV components – by 2028 [2].

Ob priložnostih pa se pojavljajo tudi izzivi. Poleg sprejemanja ali prilagajanja rešitev za izpolnjevanje novih in/ali hitro razvijajočih se zahtev končnih kupcev morajo tlačni livarji to početi stroškovno učinkovito, uspešno in trajnostno. Pomembna dejavnika sta cena energije in svetovna prizadevanja za razogljičenje v skladu s prizadevanji za reševanje trenutne podnebne krize. Industrija seveda ne sme ogroziti končnega cilja: dosledne proizvodnje visokokakovostnih delov. Prav zato zmanjšanje stopnje izmeta še nikoli ni bilo tako pomembno. Konkurenca novih nastajajočih trgov, ki imajo veliko ugodnejše stroške energije, nižje stroške dela in močne vladne spodbude, je še en pomemben dejavnik, ki bi moral Evropo spodbuditi k hitremu ukrepanju in izboljšanju stroškovne učinkovitosti, da bi ohranila vodilno vlogo v sektorju visokotlačnega litja.

2 Zmanjšanje količine izmeta v središču pozornosti

Zmanjšanje izmeta pomeni manjšo porabo osnovnih surovin, prihranek (drage) energije in izogibanje ponovnemu litju delov. Prav tako se močno zmanjša količina izpustov CO₂. Pri proizvodnji 50.000 ton letno zmanjšanje izmeta za zgolj 2 % pomeni skoraj 604 ton prihranka CO₂.

Prizadevanja za čim nižjo stopnjo izmeta so vsakodnevna skrb livarjev, vendar stopnje izmeta, zlasti pri zapletenih in velikih ulitkih, brez uporabe novih in inovativnih orodij ni mogoče znižati pod določeno mejo. Livarji morajo doseči veliko širši spekter inovacij na področju storilnosti, ki jim bodo pomagale izkoristiti priložnosti, ki jih ponuja aluminij. Toda kako? Odgovor se skriva v zasnovi opreme in vse pogostejše tudi v uporabi digitalnih rešitev.

Along with opportunity comes also challenges. In addition to adopting or adapting solutions to meet new and/or rapidly evolving end-customer requirements, die casters must do so cost-effectively, efficiently, and sustainably. Energy prices and the global push for decarbonisation in line with efforts to tackle the ongoing climate crisis are both significant factors. The industry must not, of course, compromise the ultimate goal: The consistent production of high-quality parts. This is all exactly why scrap-rate reduction has never been more critical. The competition of new emerging markets that enjoy a much more favourable energy cost, a cheaper labour cost level, and strong governmental incentives is another important factor that should push Europe to act quickly and improve its cost-effectiveness to keep the leadership in the High-level die casting sector.

2 Scrap reduction in the spotlight

Reducing scrap means avoiding wastes of raw materials, saving (costly) energy, and avoid to re-cast replacements. It also means CO₂ emissions are dramatically lowered. A scrap rate reduction of just 2% on a production rate of 50.000 tonnes a year, can result in a saving of 604 CO₂ tonnes.

The efforts to keep scrap rates as low as possible is a daily job for die casters, but the scrap level, especially for complex and large castings cannot be lowered under a certain amount without using new and innovative tools. Foundrymen need to achieve a much wider spectrum of productivity 'wins' to help them capitalize on the aluminium opportunity at hand. But how? The answer lies in both equipment design and increasingly through the application of digital solutions.

3 Tlačni stroj brez mehanskega zaklepa – dokazana prednost.

S hidravličnim sistemom zapiranja je stroje, kot je naša serija brez mehanskega zaklepa, lažje vzdrževati in popravljati. Sistem brez mehanskega zaklepa je eden od najpogostejših vzrokov za okvare tlačnih strojev, saj je za popravilo potrebna daljša zaustavitev proizvodnje. Stroji brez mehanskega zaklepa so to popolnoma odpravili, poleg tega pa odstranitev tega izjemno težkega sklopa zmanjša obremenitev drugih sestavnih delov stroja, kar zmanjšuje druge težave z obrabo in vzdrževanjem.

Stroji za visokotlačno litje brez mehanskega zaklepa so običajno lažji in preprostejši od strojev z mehanskim zaklepom, kar pomeni, da je mogoče uporabiti enake ali večje zapiralne sile, vendar na manjši površini. To ne omogoča zgolj večje prilagodljivosti proizvodnje in manjše porabe energije, temveč tudi nove trende ogromnih ulitkov. Naši modeli serije Smart na primer omogočajo zapiralne sile med 6.100 in 11.000 tonami z veliko manjšim odtisom kot stroji HPDC, ki predvidevajo uporabo stroja za tlačno litje z mehanskim zaklepom. Poleg tega njihova modularna konstrukcija omogoča livarjem, da izberejo pravo zapiralno silo, razdaljo med povezovalnimi drogi in vbrizgalno enoto glede na specifične potrebe.

Zaradi teh prednosti so stroji brez mehanskega zaklepa postali prednostna izbira za livarje z različnimi in zapletenimi zahtevami glede proizvodnje ulitkov, še posebej pri pogostem menjavanju orodij in pri litju večjih konstrukcijskih elementov.

Poleg teh prednosti pa obstajajo tudi posebne lastnosti in funkcionalnosti strojev brez mehanskega zaklepa, ki lahko neposredno in pozitivno vplivajo na prizadevanja za zmanjšanje količine izmeta.

3 Toggle Free – an established advantage

Utilizing a hydraulic closing system, machines such as our Toggle Free Smart Series are easier to maintain and repair. The Toggle system is one most serious causes of failure in HPDC machines, needing a long time to stop production to be repaired. Toggle Free machines have cut this part completely and, in addition, removing this extremely heavy assembly reduces stress on other machine components – cutting down other wear and maintenance problems.

Toggle-free HPDC are typically lighter and leaner than Toggle machines, meaning the same or greater closing forces can be applied but in a smaller footprint. This lends itself not only to increased production flexibility and reduced energy consumption, but also to emerging giant casting trends. Our own Toggle Free Smart Series models for instance offer closing forces between 6100 and 11,000 tonnes with a much leaner footprint than HPDC machines that requires a Toggle Die casting machine. Further to this, their modular construction allows die casters to select the right closing force, tie bar distance and injection unit according to their specific needs.

These benefits have made Toggle Free machines The preferred choice for die casters with diverse and complex casting production requirements, especially where the die is frequently changed and for casting larger structural components.

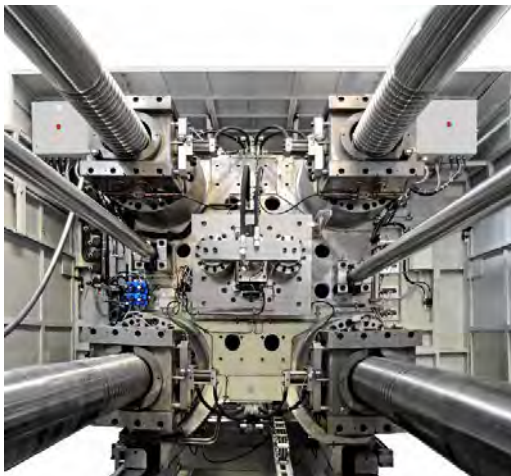
In addition to these advantages, however, there are specific features and functionalities in Toggle Free HPDC machines that can directly and positively impact efforts to reduce scrap.

4 Zapiralna enota, ki zmanjšuje količino izmeta: ključne sestavine

Kot smo že poudarili, stroji brez mehanskega zaklepa, kot so modeli serije Smart družbe ItalPresseGauss S.p.A., uporabljajo hidravlični mehanizem za izboljšanje stabilnosti pri zapiranju kokile.

Trdota plošč je izredno pomembna za zagotavljanje trajnosti in zanesljivosti stroja v daljšem časovnem obdobju. Uporaba plošč iz certificiranega legiranega jekla kot opcija s prevlečenimi trdim nerjavim jeklom in z zasnovo optimizirano za lokalna območja z visokimi obremenitvami – ustvarja močno in enakomerno porazdelitev sile na tlačno orodje, kar pomaga zmanjšati količino izmeta.

Za ponazoritev vam predstavljamo nadaljnje pomembne značilnosti zapiralnih mehanizmov, ki podpirajo zmanjševanje količine izmeta za stroje brez mehanskega zaklepa.



Slika 1. Zapiralna enota brez mehanskega zaklepa

Figure 1. Toggle Free closing unit

4 A closing unit that cuts scrap: the key ingredients

As already highlighted, Toggle-free machines such as ItalPresseGauss S.p.A. Smart Series models employ a hydraulic mechanism to improve stability as the die is closed.

Platen hardness is extremely important to assure machine durability and reliability over time. Using platens of certified alloy steel _ (optional)– coated with hard stainless steel and a design optimised for local, high-stress areas – creates a strong and even distribution of force on the die to help minimize scraps.

Continuing to use our Toggle-Free Smart Series to illustrate, here are further important characteristics of closing mechanisms that support scrap reduction.

5 Automatic adapting to the die

While rigidity is vital, hydraulic locking allows for automatic compensation for the geometrical imperfection of the die and its thermal expansion– helping to reduce scrap rates that might be linked to such imperfections.

6 Self-balanced force on tie bars

In a Toggle-free hydraulic locking machine the bars work independently, exerting the correct amount of pressure on the four corners of the platens to reach the required closing force and automatically maintain parallelism, before being locked in position.

High closing forces and well-equalized tie bar loads keep the die halves together as they are subjected to high pressure loads from the incoming molten metal –

5 Samodejno prilagajanje orodij

Čeprav je togost ključnega pomena, hidravlična zapora omogoča samodejno izravnavo geometrijskih nepopolnosti kokile in njenega toplotnega raztezanja, kar pomaga zmanjšati izmet, ki je lahko povezan s takšnimi nepopolnostmi.

6 Samouravnatežena sila na povezovalnih drogovi.

V stroju za hidravlično zaklepanje delujejo povezovalni drogovi neodvisno in izvajajo ustrezno količino pritiska na štiri vogale plošč, da dosežejo zahtevano zapiralno silo in samodejno ohranijo vzporednost, preden se končno zaklenejo v položaju.

Visoke zapiralne sile in dobro izenačene obremenitve povezovalnih drogovi držijo oba dela orodja skupaj, ko je podvržena visokim tlačnim obremenitvam zaradi vstopajoče staljene kovine, kar zmanjšuje deformacije in nastanek srha na delilnih ravninah, ki lahko povzročijo izmet.

7 Zasnova polnilne enote za nadzor in ponovljivost

Za upravljanje postopka postopnega vbrizgavanja je koristno imeti dva ločena krogotoka. Prvi krog je namenjen polnjenju livne votline pri visoki hitrosti, drugi pa potiskanju taline, ki je že zapolnila votlino, pod največjim pritiskom, da se zmanjša plinska poroznost v ulitku in tako prepreči morebitne napake, ki bi lahko povzročile izmet.

Programska oprema za nadzor vbrizga se hitro odziva na podatke o pretoku taline v orodju v realnem času in po potrebi prilagodi hitrost bata, da zagotovi enakomerno kakovost litja. To omogočata DVA ali TRIJE

minimizing distortion and parting plane separation that may result in scrap.

7 Injection unit design for control and consistency

It is advantageous to have two separate circuits to manage a phased injection process. One circuit to fill the die at high speed, and a second to push the metal that has already filled the cavity at maximum pressure to minimize the gas porosity included in the casting, thereby avoiding potential defects that could result in scrap.

Shot control software reacts quickly to real-time data on melt flow into the die, adjusting the speed of the piston as required to guarantee uniform casting quality. It does so thanks to TWO or THREE high-flow proportional valves that can react to the sampling every single millisecond, to have total control of the injection and to be sure that the machine is following the desired injection curve.

Finally, concerning the injection system, it is important that die casters seek flexible options that allow for speed, force, and stroke to be tailored to specific production requirements and shot weight preferences.

8 Digitally driven scrap reduction

The design features outlined all have a vital role to play in supporting casting consistency, repeatability, and minimizing scrap. But it's difficult for die casters to truly tackle scrap, and crucially, make improvements, without being able to closely monitor performance and link these back to process parameters. Here, digital solutions prove the ideal companion to equipment design.

proporcionalni ventili z visokim pretokom, ki se lahko vsako milisekundo odzovejo na vzorčenje, tako da lahko v celoti nadzorujejo vbrizgavanje in tako zagotovijo, da stroj sledi želeni krivulji polnjenja.

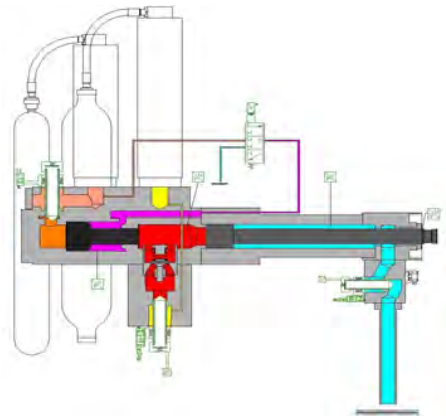
V zvezi z polnilnim sistemom je pomembno, da livarji iščejo prilagodljive možnosti, ki omogočajo prilagajanje hitrosti, sile in hoda glede na posebne proizvodne zahteve in želje glede mase strela polnjenega materiala.

8 Digitalno vodeno zmanjševanje količine izmeta

Vse opisane konstrukcijske značilnosti igrajo pomembno vlogo pri zagotavljanju doslednosti in ponovljivosti litja ter zmanjševanju količine izmeta. Vendar pa se livarji težko spopadejo z izmetom in izboljšavami če ne spremljajo učinkovitosti in jo povezujejo s procesnimi parametri. S tega vidika so digitalne rešitve idealen spremljevalec načrtovanja opreme.

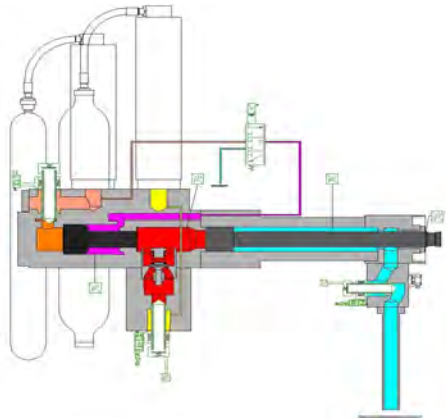
Platforme v oblaku, kot je na primer Monitizer@DISCOVER, livarnam omogočajo dostop in vizualizacijo v realnem času in podatke o delovanju strojev za tlačno litje, pa tudi katere koli druge povezane naprave ali dele opreme.

Na ta način je mogoče pridobiti popoln pregled nad podatki o litju, spremljati ključne kazalnike uspešnosti in izvajati praktične izboljšave. Vključno z ukrepi, ki bodo pomagali zmanjšati količino izmeta in splošno produktivnost. Slika 4. na primer prikazuje, kako lahko livarji spremljajo čas procesa (razpoložljivost), proizvedene ulitke (kakovostnih) v realnem času in v daljšem časovnem obdobju – na podlagi ciljev, ki so jih določili sami za razumevanje celotne učinkovitosti opreme (OEE) in ugotavljanje, kdaj/kje so se pojavile težave in kam je zato najbolje usmeriti korektivne ukrepe.



Slika 2. Krog 1: za polnjenje kokile pri visoki hitrosti

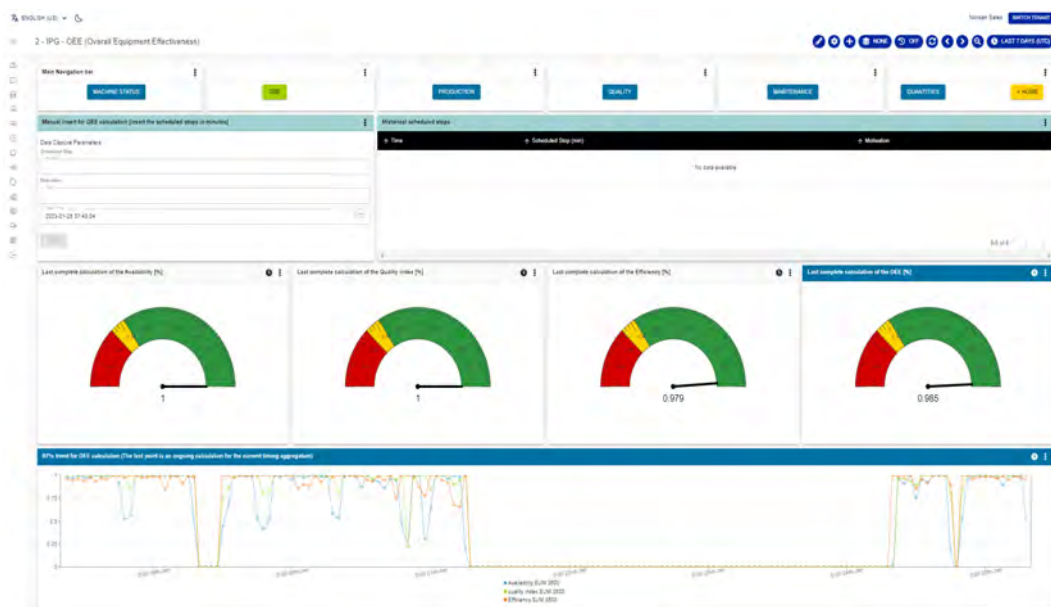
Figure 2. Circuit 1; to fill die at high speed



Slika 3. Krog 2: za potiskanje kovine pod največjim pritiskom

Figure 3. Circuit 2: to increase instantly the pressure into the die

Cloud-based platforms like Monitizer@DISCOVER, for example, allow die casters to access and visualise in real time and historical performance/operating data from die casting machines, but also from any other connected device or piece of equipment.



Slika 4. Nadzorna plošča OEE v programu Monitizer@DISCOVER

Figure 4. OEE dashboard in Monitizer@DISCOVER

Podobno bi lahko livarji spremljali izdelane ulitke po vrstah, urah in serijah, da bi zlahka ugotovili, če/ko se pojavijo izmetni ulitki in bolje razumeli zakaj je do tega prišlo. Mogoče je celo nastaviti opozorila za sprotno obveščanje, če stopnja izmeta ali kateri koli drug dejavnik preprečuje, da bi linija/celica dosegla svoj polni potencial z vidika optimalne produktivnosti.

9 Povezovanje napak in procesnih parametrov

Zgoraj opisana digitalizacija in analiza sta izjemno učinkovita. Prav tako pa pomagata prikazati povezave med dvema podprocesoma.

Tukaj lahko pomaga umetna inteligenca. Sistem z umetno inteligenco "Expert Execution System" (EES), na primer Monitizer | PRESCRIBE, je zmožen

In this way, it becomes possible to gain a complete overview of casting data, monitor KPIs, and implement practical improvements. Including measures that will help reduce scrap and overall productivity. Figure 4 shows, for instance, how die casters can track process times (availability), casts produced (quality) in real time and over time - based on their targets self-specified - to understand Overall Equipment Effectiveness (OEE) and see when/where issues have occurred and therefore where best to focus corrective action.

Similarly, die casters could track cast parts produced by type, per hour, and per batch, to easily spot if/when any waste casts occur to better understand why that might be. It is even possible to set up alerts to be notified in real time if scrap rates, or any other factor, is preventing a line/cell from meeting its full potential in terms of optimal productivity.

upoštevati vse parametre procesa iz celotne proizvodne linije, da bi čim bolj povečal eno ciljno spremenljivko – kakovost ulitkov.

Umetna inteligenca najprej prouči pretekle podatke in ugotovi, kakšen medsebojni vpliv imajo posamezni parametri in kako vplivajo na končno kakovost ulitkov. Nato izračuna, katera kombinacija nastavitve stroja in lastnosti materiala bo dala najboljše rezultate za vsak vzorec.

Model nevronske mreže umetne inteligence z naprednim nenadzorovanim strojnim učenjem izračuna in vzpostavi povezavo in interakcijo med več sto vhodnimi procesnimi in strojnimi spremenljivkami (kot so tlak v peči, temperatura kokile, čas vklopa in izklopa hladilnih kanalov v kokili, temperatura taline, temperatura taline ob polnjenju itd.) in podatki o kakovosti končnega litja. S tem se ustvari začetni model, ki se uporablja za samodejno določitev optimalnega režima delovanja

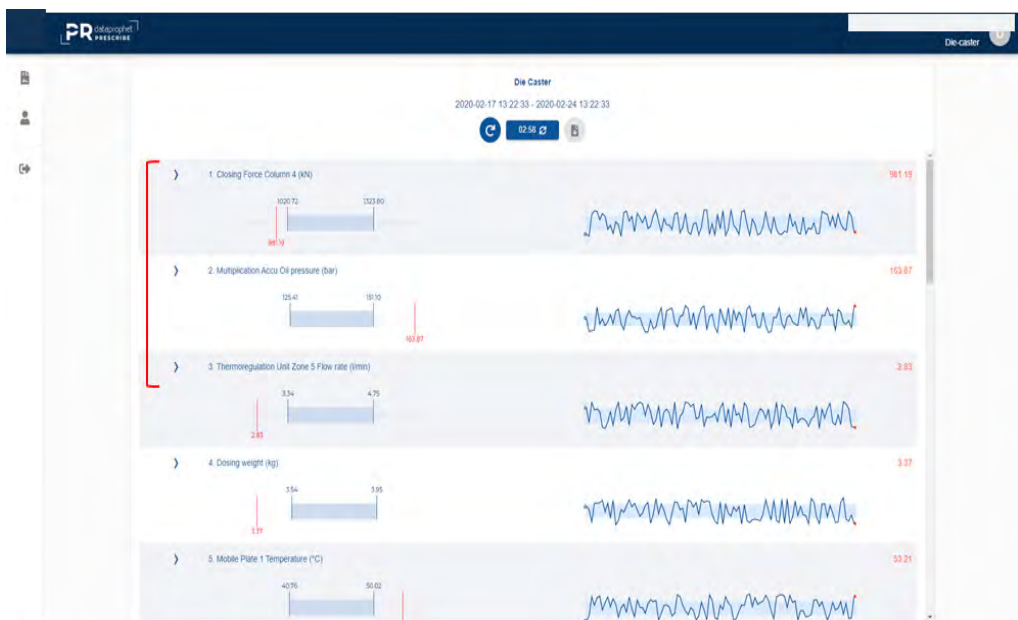
9 Correlating defects with process parameters

Digitalization and analysis as described above is extremely effective. But it also helps to show the links between one sub-process and another.

Here, AI can help. An AI-driven Expert Execution System (EES), Monitizer | PRESCRIBE, for example, can consider all the process parameters from an entire production line to maximize one target variable – casting quality.

The AI first examines historical data to learn how specific parameters influence each other – and affect final casting quality. It then calculates which combination of machine settings and material properties will produce the best results for each pattern.

Through advanced, unsupervised machine learning, the AI's neural network



Slika 5. Vpliv sile zapiranja na povezovalnem drogu na kakovost

Figure 5. Impact of closing force on tie bar on the quality

(načrta nadzora) za proizvodnjo, na katero se nanaša niz podatkov.

Med proizvodnjo se sistem EES odziva ne samo na težave s kakovostjo, temveč vsakih 30 minut posodablja priporočila za načrt nadzora na podlagi napovedi umetne inteligence, ki temeljijo na podatkih v realnem času. Tako se ohranja stabilna in kakovostna proizvodnja, tudi če se spreminjajo dejavniki, kot je temperatura zraka.

Jasna in preprosta predpisana navodila sistema EES v realnem času omogočajo livarjem, da že v prvem poskusu pravilno izvedejo zapletene spremembe. Še več, sprejmejo lahko odločitve, ki bodo imele največji in najhitrejši učinek na zmanjšanje količine izmeta. Sistem namreč na podlagi naučenega razvrsti parametre glede na njihov vpliv za »slabo kakovost«.

Primer na Sliki 5 na primer kaže, da ima »sila zapiranja na povezovalnem drogu 4« največji vpliv za slabo kakovost. Najprimernejše procesno okno predpiše umetna inteligenca. Rdeča vrednost »41,8« v majhnem oknu grafa kaže, da je dejanska vrednost prenizka in jo je treba za najboljšo kakovost zvečati na vrednost v modrem priporočenem območju.

Proces je neprekinjen. Ko model začne delovati (med testiranjem in proizvodnjo), se model posodablja z novimi podatki o parametrih in končni kakovosti, zato se rezultati optimizacije stalno izboljšujejo.

10 Sklep

Zmanjšanje izmeta je morda le en izmed ciljev, vendar prinaša več koristi. In sicer manjši ogljični odtis zaradi manjše porabe energije za pretaljevanje/predelavo in manjše porabe surovin. Zmanjšanje količine izmeta je enostavnejši način za povečanje dobička, čeprav kakovost

model calculates and establishes connections and interactions between hundreds of input processes and machine variables (such as furnace pressure, die temperature, ON/OFF times of cooling channels in the die, metal temperature, metal fill-up temperature, etc.) and final casting quality data. This produces an initial model used to automatically specify the optimal operating regime (control plan) for production that the data set relates to.

During production, instead of simply reacting to quality issues, the EES updates its recommendations for the control plan every 30 minutes in response to AI predictions based on real-time data. This maintains stable, high-quality production, even as factors like air temperature vary.

The EES's clear and simple real-time prescriptive instructions make it possible for the die casters to make complex changes correctly the first-time round. What's more, decisions that will have the biggest and fastest impact on scrap reduction. This is because the system uses what it learns to rank parameters according to their impact on 'bad quality'.

The example shown in Figure 5. for instance, shows that the "Closing force on Tie bar 4" is rated to have the greatest impact on bad quality. The most ideal process window is prescribed by the AI. The red "41.8 value" in the small graph window shows that the actual value is too low and should be increased to a value within the blue, recommended range for best quality.

The process is perpetual. Once the model is operational (during both testing and production), it updates its model with the new parameter and final quality data, so the optimization results continue to improve.

10 Conclusion

Minimizing scrap rates may be a singular objective but it delivers multiple benefits. A

povečuje proizvodno zmogljivost, povečuje tolerance procesa in zmanjšuje stroške poslovanja, kar izboljša produktivnost in dobičkonosnost.

Zaradi globalnega prehoda na aluminij se lahko deli razlikujejo. Cilji produktivnosti pa ostajajo enaki. Kombinacija vrhunske opreme tlačnega stroja brez mehanskega zaklepa in digitalnih rešitev omogoča zmanjšanje količine izmeta za doseganje teh ciljev in ohranjanje konkurenčnega položaja na prenatrpanem trgu.

reduced carbon footprint due to using less energy on remelting/reworking, and wasting less raw material. Reducing the scrap is the easier way to increase profit through quality it increases production capacity, maximizes process tolerances, and lowers operating costs, for improved productivity and profitability.

The global shift towards aluminium may mean that parts differ. But productivity goals don't. The combination of leading-edge Toggle Free HPDC equipment and digital solutions delivers a scrap-reducing route to achieving those goals and maintaining competitive positioning in a crowded market.

Viri / References

- 1 Vir: Global Die Casting Market Report 2023: Significant Growth in the Automotive Industry Fuels the Sector – ResearchAndMarkets.com
- 2 Vir: Ducker Holdings, LLC

Ocena kakovosti udrobnilnih sredstev

Assessing the Quality of Grain Refiners

Povzetek

Primarni cilj udrobnjevanja v aluminijevih zlitinah je zmanjšati velikost strjenih kristalnih zrn, s čimer se odpravi prisotnost velikih stebrastih zrn. Ta proces udrobnjevanja je ključen za izboljšanje mehanskih lastnosti in splošne učinkovitosti zlitine. Da bi dosegli odlične rezultate udrobnjevanja zrn, je bistvenega pomena uporaba visokokakovostnega udrobnilnega sredstva. To vključuje upoštevanje različnih dejavnikov, kot so ustrezno število delcev Al_3Ti in TiB_2 , primerna oblika in velikostna porazdelitev delcev ter optimalno razmerje Ti/B .

Za oceno kakovosti različnih udrobnilnih sredstev je bila izvedena raziskava z uporabo električne upornosti. Poleg tega so bile izvedene analize diferenčne vrstične kalorimetrije in mikrostrukture za potrditev in podporo pridobljenih rezultatov.

Med preiskovanimi udrobnilnimi sredstvi je najnižjo električno upornost izkazalo udrobnilno sredstvo B (Al-3Ti-1B). Rezultat je mogoče pripisati več dejavnikom. Prvič, udrobnilno sredstvo B je imelo nizko vsebnost nečistoč, kar kaže na visoko stopnjo čistosti in kakovosti. Nečistoče, kot sta Fe in Si, lahko negativno vplivajo na učinkovitost udrobnjevanja in prispevajo k večji električni upornosti. Poleg tega je udrobnilno sredstvo B pokazalo ustrezno število in velikostno porazdelitev delcev TiB_2 in Al_3Ti . Prisotnost ustrezne količine teh delcev spodbuja učinkovito nukleacijo, ki je bistvena za uspešno udrobnjevanje. Velikostna porazdelitev delcev ima prav tako ključno vlogo pri zagotavljanju njihove enakomerne disperzije po zlitini, kar vodi do doslednega in učinkovitega udrobnjevanja zrn. Poleg tega je imelo udrobnilno sredstvo B optimalno razmerje Ti/B 3,6. Razmerje Ti/B je kritičen parameter, saj vpliva na nastanek in porazdelitev nukleirajočih delcev. Optimalno razmerje zagotavlja prisotnost zadostnega števila nukleirajočih delcev, kar omogoča učinkovito udrobnjevanje zrn.

Nasprotno pa so druga udrobnilna sredstva pokazala večjo električno upornost. To lahko pripišemo različnim dejavnikom, kot sta povečana količina in velikost delcev TiB_2 in Al_3Ti ter prisotnost nečistoč, kot sta Fe in Si. Ti dejavniki lahko ovirajo proces udrobnjevanja in povzročijo večjo velikost zrn ter zmanjšano učinkovitost udrobnilnega sredstva. Poleg tega lahko prisotnost vključkov v zlitini prispeva k večji električni upornosti.

Ključne besede: udrobnilna sredstva Al-Ti-B , kakovost, delci TiB_2 , delci Al_3Ti

Abstract

The main objective of grain refinement in aluminium alloys is to reduce the size of solidified crystal grains, thereby avoiding the presence of large columnar grains. This refining process is critical to improving the mechanical properties and overall performance of the alloy. To achieve excellent grain refining results, a high-quality grain refiner must be used. Several factors must be considered, such as the appropriate number of Al_3Ti and TiB_2 particles, the appropriate shape and size distribution of the particles, and an optimal Ti/B ratio.

To evaluate the quality of different grain refiners, a study using electrical resistivity measurement was conducted to assess the quality of these grain refiners. In addition, analyses using differential scanning calorimetry and microstructure studies were carried out to validate and support the results obtained.

Among the grain refiners tested, grain refiner B (Al-3Ti-1B) exhibited the lowest electrical resistivity. This superior performance can be attributed to several factors. First, grain refiner B had a low content of impurities, indicating a high level of purity and quality. Impurities, such as Fe and Si, can affect the effectiveness of the grain refiner and contribute to higher electrical resistivity. In addition, grain refiner B had an adequate number and size distribution of TiB_2 and Al_3Ti particles. The presence of a sufficient amount of these particles promotes effective nucleation, which is essential for successful grain refinement. The size distribution of the particles also plays a crucial role in ensuring their uniform distribution in the alloy, resulting in a uniform and efficient grain refinement. In addition, grain refiner B exhibited an optimum Ti/B ratio of 3.6. The Ti/B ratio is a critical parameter because it affects the formation and distribution of nucleation particles. An optimum ratio ensures the presence of a sufficient number of nucleating particles, which facilitates effective grain refinement.

In contrast, the other grain refiners exhibited higher electrical resistance. This can be attributed to several factors, such as the larger amount and size of TiB_2 and Al_3Ti particles, and the presence of impurities such as Fe and Si. These factors can hinder the grain refining process and result in larger grains and lower refiner effectiveness. In addition, the presence of inclusions in the alloy can contribute to higher electrical resistivity.

Key words: Al-Ti-B grain-refiners, quality, TiB_2 particles, Al_3Ti particles

1 Uvod

Glavni cilj udrobnjevanja zrn v aluminijevih zlitinah je zmanjšati velikost strjenih kristalnih zrn, kar pomaga preprečiti velika stebrasta zrna, ki se lahko pojavijo, ko hitrost hlajenja ni optimalna. Namen tega postopka je zmanjšati površinske napake med transformacijo materiala, izboljšati mehanske lastnosti in povečati sposobnost ulivanja zlitine [1–3].

Predzlitine Al-Ti-B se običajno uporabljajo za udrobnjevanje zrn aluminijevih zlitin. Vendar rezultati raziskav [4] kažejo, da je za učinkovito udrobnjevanje zrn potrebna prisotnost raztopljenih delcev Ti in TiB_2 z optimalnim povprečnim polmerom in ozko porazdelitvijo polmera. Običajne metode udrobnjevanja zrn so omejeno primerne za proizvodnjo visokokakovostnih

1 Introduction

The main objective of grain refinement in aluminium alloys is to reduce the size of solidified crystal grains, which helps to avoid large columnar grains that can occur when the cooling rate is not optimal. This process aims to minimize surface defects during material transformation, improve mechanical properties, and increase alloy castability [1–3].

Al-Ti-B master alloys are commonly used for grain refinement of aluminium alloys. However, research results [4] show that effective grain refinement requires the presence of dissolved Ti and TiB_2 particles with a reasonable average radius and a narrow radius distribution. Conventional grain refinement methods have limited suitability to produce high-quality aluminium

aluminijevih zlitin zaradi večjega polmera in širše porazdelitve polmera delcev TiB_2 v osnovnih zlitinah [5].

Prisotnost raztopljenega Ti ovira heterogeno nukleacijo α -Al z delci TiB_2 in omejuje rast zrn α -Al zaradi ustavnega podhlajevanja. Ko je koncentracija raztopljenega Ti nizka, je zaviralni učinek na rast α -Al minimalen in vodi le do izboljšanja stebraste zrnate strukture. Ko pa se koncentracija raztopljenega Ti poveča, se izboljša udrobnjevanje zrn in opazimo prehod iz stebraste v enakoosno strukturo zrn. Nad kritično vrednostjo nadaljnje povečevanje koncentracije raztopljenega Ti le malo vpliva na udrobnjevanje zrn [5].

Trenutno je najpogosteje uporabljeno udrobnilno sredstvo Al-5Ti-1B. Vendar pa obstajajo poročila [4], ki kažejo, da se polmer delcev TiB_2 , ki se običajno sintetizirajo s halogenidnimi solmi, postopoma povečuje v teh udrobnilnih sredstvih, kar ima za posledico širšo porazdelitev velikosti delcev in omejeno sposobnost udrobnjevanja.

Na morfologijo delcev Al_3Ti v udrobnilnih sredstvih vplivata razmerje Ti/B v predzlitini in pogoji obdelave, ki določajo mehanizme rasti. Različna udrobnilna sredstva Al-Ti-B vsebujejo različne morfologije delcev Al_3Ti . Na primer, v udrobnilnih sredstvih, kot je Al-5 mas. % Ti-1 mas. % B, se delci Al_3Ti pojavljajo kot veliki kockasti delci v središčih zrn α -Al, medtem ko se manjši delci TiB_2 nahajajo na mejah zrn. Po drugi strani pa delci Al_3Ti prevzamejo kosmičasto obliko v udrobnilnih sredstvih z zmanjšanim razmerjem Ti/B, kot je Al-3 mas. % Ti-1 mas. % B [5–7].

Da bi zagotovili učinkovito nukleacijo α -Al, mora vsebnost titana v končni talini (z dodatkom udrobnilnega sredstva) preseči stehiometrično razmerje za tvorbo delcev TiB_2 . Rahel presežek titana zadošča za udrobnjevanje zrn, višje vsebnosti titana, ki omogočajo obstoj Al_3Ti v talini, pa ne

alloys due to the larger radius and wider radius distribution of TiB_2 particles in master alloys [5].

The presence of dissolved Ti hinders the heterogeneous nucleation of α -Al nuclei by TiB_2 particles and restricts the growth of α -Al grains due to constitutional supercooling. When the concentration of dissolved Ti is low, the inhibitory effect on α -Al growth is minimal and leads only to a refinement of the columnar grain structure. However, as the concentration of dissolved Ti increases, grain refinement improves and a transition from a columnar to an equiaxed grain structure is observed. Beyond a critical value, further increasing the concentration of dissolved Ti has little effect on grain refinement [5].

Currently, the most used grain refinement is the Al-5Ti-1B master alloy. However, there are reports [4] indicating that the radius of TiB_2 particles, which are usually synthesized using halide salts, is gradually increasing, resulting in a wider distribution of particle sizes and limited refining ability.

The morphology of Al_3Ti particles in grain refiners is influenced by the Ti/B ratio in the master alloy and the processing conditions, which determine the growth mechanisms. Different Al-Ti-B grain refiners exhibit different morphologies of Al_3Ti particles. For example, in grain refiners such as Al-5 wt.% Ti-1 wt.% B, the Al_3Ti particles appear as large blocky particles in the centers of the α -Al grains, while smaller TiB_2 particles are located at the grain boundaries. On the other hand, the Al_3Ti particles assume a flaky form in grain refiners with a reduced Ti/B ratio such as Al-3 wt.% Ti-1 wt.% B [5–7].

To ensure effective nucleation of α -Al, the titanium content in the final melt (with the addition of the grain refiner) must exceed the stoichiometry of TiB_2 . A slight excess of

izboljšajo učinkovitosti. Če pa se delovanje udrobnilnega sredstva poslabša zaradi bledenja ali vpliva nečistoč, je mogoče njegovo učinkovitost obnoviti z dodajanjem titana v talino. Masno razmerje Ti/B, ki ustreza stehiometriji TiB_2 , je 2,215 in učinkovitost udrobnjevanja se bistveno izboljša, ko je to razmerje preseženo. Vendar pa se zmogljivost zmanjša pri višji vsebnosti titana [6, 7].

Prisotnost določenih legirnih elementov ali nečistoč, kot so Zr, Cr, Li in visoka vsebnost Si v aluminijevih zlitinah, lahko znatno zmanjša učinkovitost osnovnih zlitin Al-Ti-B za udrobnjevanje zrn [8, 10–13]. Ta pojav je splošno znan kot „zastрупitev“ [8]. Študije so pokazale, da lahko celo majhne količine Zr (nekaj sto ppm) v staljenem aluminiju naredijo komercialno dostopna udrobnilna sredstva Al-5Ti-1B neučinkovita, kar povzroči grobo in popolnoma stebrasto strukturo zrn po strjevanju. Zanimivo je, da na osnovni površini TiB_2 ni segregiranja Fe ali Si, čeprav se Fe tvori na prizmatični površini TiB_2 . Zdi se, da niti Fe niti Si nimata vloge nečistoč pri zastrupitvi delcev TiB_2 z Zr v staljenem aluminiju ob prisotnosti Zr. Študije so pokazale, da lahko kemična segregacija izbranih zlitinskih elementov/nečistoč na vmesni površini tekoče-substrat učinkovito vpliva na heterogeno nukleacijo in spodbuja ali ovira proces [9].

Čistost aluminija je ključni dejavnik, ki vpliva na električno upornost. Večja vsebnost nečistoč povzroči višjo električno upornost. Silicij ima razmeroma majhen vpliv na električno upornost aluminija, če je njegova koncentracija do 0,006 mas. % in je razmerje Fe/Si med 0,8 in 3,8. Vendar pa povečanje vsebnosti silicija na 0,15–0,16 mas.% bistveno poveča ta učinek. Drugi elementi, kot so Cr, Sn, Mn in Ti, imajo močnejši učinek na povečanje električne upornosti aluminija. Za aluminij, ki se uporablja v elektroindustriji, skupna

titanium is sufficient for grain refinement, and higher titanium contents that allow Al_3Ti to survive in the melt do not improve performance. However, if the performance of a grain refiner degrades due to fading or the influence of impurities, it is possible to restore its effectiveness by adding titanium to the melt. The Ti/B weight ratio corresponding to the stoichiometry of TiB_2 is 2.215, and refining performance improves significantly when this ratio is exceeded. However, the performance decreases at higher titanium contents [6, 7].

The presence of certain alloying or impurity elements, such as Zr, Cr, Li, and high Si content, in aluminium alloys, can significantly reduce the effectiveness of Al-Ti-B master alloys in grain refinement [8, 10–13]. This phenomenon is commonly known as “poisoning” [8]. Studies have shown that even small amounts of Zr (a few hundred ppm) in molten aluminium can render commercially available Al-5Ti-1B grain refiners ineffective, resulting in a coarse and completely columnar grain structure upon solidification. Interestingly, there is no segregation of Fe or Si at the basal surface of TiB_2 , although Fe segregates at the prismatic surface of TiB_2 . Neither Fe nor Si appears to play a role as impurity elements in the Zr poisoning of TiB_2 particles in Zr-containing molten aluminium. Studies have shown that chemical segregation of selected alloy/impurity elements at the liquid-substrate interface can effectively influence heterogeneous nucleation and either promote or hinder the process [9].

The purity of aluminium is a critical factor affecting electrical resistivity. Higher impurity content results in higher electrical resistivity. Silicon has a relatively small effect on the electrical resistivity of aluminium when its concentration is up to 0.006 wt.% and the Fe/Si ratio is between 0.8 and 3.8. However, increasing the silicon content to

koncentracija teh štirih elementov ne sme presegati 0,015 mas. %, ker vplivajo na električne lastnosti. Če je vsebnost silicija med 0,12 mas. % in 0,16 mas. %, skupna koncentracija teh štirih elementov ne sme preseči 0,01 mas. %, da bi izpolnili zahteve industrije. Kljub učinkovitemu udrobnjevanju, ki ga zagotavljajo predzlitine Al-Ti-B, presežek titana, vnesen v aluminijasto matriko po udrobnjevanju, neizogibno zmanjša električno prevodnost [14–16].

Cilj te študije je bil določiti najučinkovitejše udrobnilno sredstvo Al-Ti-B za aluminijeve zlitine. Cilj je bil oceniti kakovost udrobnilnih sredstev štirih različnih proizvajalcev, in sicer Al-5Ti-1B in Al-3Ti-1B.

2 Materiali in metode

Tabela 1 prikazuje sestavo proučevanih udrobnilnih sredstev, analiziranih z induktivno sklopljeno plazmo optičnega emisijskega spektrometra (ICP-OES). Ta udrobnilna sredstva so bila izbrana zaradi njihove pogoste uporabe pri udrobnjevanju livnih in preoblikovalnih aluminijevih zlitin.

Za izvedbo meritev električne upornosti smo na desetih različnih lokacijah izmerili polmer žic udrobnilnih sredstev in izračunali povprečni polmer. Poleg tega je bila izmerjena dolžina žic udrobnilnih sredstev in vključena v izračune za merjenje

0.15–0.16 wt.% significantly enhances this effect. Other elements such as Cr, Sn, Mn and Ti have a stronger effect on increasing the electrical resistance of aluminium. For aluminium used in the electrical industry, the total concentration of these four elements should not exceed 0.015 wt.% because they affect the electrical properties. When the silicon content is between 0.12 wt.% and 0.16 wt.%, the total concentration of these four elements should not exceed 0.01 wt.% to meet industry requirements. Despite the effective grain refinement provided by Al-Ti-B master alloys, the excess titanium introduced into the aluminium matrix after refinement inevitably reduces the electrical conductivity [14–16].

The objective of this study was to determine the most effective Al-Ti-B grain refiner for aluminium alloys. The objective was to evaluate the quality of grain refiners from four different manufacturers, namely Al-5Ti-1B and Al-3Ti-1B.

2 Materials and Methods

Table 1 shows the composition of the grain refiners studied, as determined by an inductively coupled plasma optical emission spectrometer (ICP-OES). These grain refiners were selected because of their frequent use in grain refining of cast and wrought aluminium alloys.

Tabela 1. Kemijska sestava in oznake preiskovanih udrobnilnih sredstev.

Table 1. Chemical composition and designations of investigated grain refiners.

Oznaka / Designation	Predzlitina / Master Alloy	Kemijski element, mas. % / Chemical element, wt.%						Razmerje Ti/B / Ti/B ratio
		Si	Cr	Fe	B	Ti	Al	
A	Al-3Ti-1B	0,13	<0,01	0,11	0,82	3,5	ostalo / rest	4,27
B	Al-3Ti-1B	0,13	<0,01	0,11	0,86	3,1	ostalo / rest	3,60
C	Al-5Ti-1B	0,16	<0,01	0,11	0,89	4,9	ostalo / rest	5,51
D	Al-5Ti-1B	0,19	<0,01	0,12	0,92	4,8	ostalo / rest	5,22

električne upornosti. Tehnika enosmernega toka s štirimi sondami, ki je podrobno opisana v [17], je bila uporabljena za merjenje električnega upora proučevanih žic. Meritve so potekale deset minut pri sobni temperaturi. Električno upornost (ρ) smo izračunali z uporabo enačbe $R = \rho \cdot L/A$, kjer je L dolžina in A prečni prerez žice udrobnilnih sredstev. Rezultati so podani kot električna upornost pri sobni temperaturi za dano žico udrobnilnega sredstva v $\Omega \cdot m$.

Dodatne analize so bile izvedene na vseh udrobnilnih sredstvih, da bi ocenili kredibilnost dobljenih rezultatov električne upornosti. Preizkusi diferenčne vrstične kalorimetrije (DSC) so bili izvedeni z uporabo naprave DSC 404 F1 Pegasus v dinamični atmosferi argona. Udrobnilna sredstva smo segreli na 720 °C s hitrostjo 10 K/min, vzdrževali pri tej temperaturi 10 minut in nato z enako hitrostjo ohladili na sobno temperaturo. Krivulje DSC so bile ovrednotene za opredelitev značilnih temperatur strjevanja ter strjevalnih entalpij.

Mikrostrukturalna analiza je bila izvedena na udrobnilnih sredstvih z uporabo vrstičnega elektronskega mikroskopa JEOL JSM -6500F (SEM), opremljenega z energijsko disperzijsko spektroskopijo (EDS) in difrakcijo povratnega sipanja elektronov (EBSD). Velikost, obliko in porazdelitev delcev Al_3Ti in TiB_2 smo preučevali s sistemom INCA ENERGY 400 EDS in kamero HKL Nordlys II s programsko opremo Channel 5.

Poleg tega smo uspešnost in učinkovitost preiskovanih udrobnilnih sredstev ocenili na aluminijevi zlitini Al99.7. Zlito smo predhodno segreli na 700 °C, po procesu taljenja pa smo talini dodali predzlito Al-Ti-B v deležu, ki ga priporoča proizvajalec. Talino smo zadržali 2 minuti in jo nato ulili pri temperaturnem območju 680–690 °C v Croning celico s hitrostjo hlajenja približno 7 K/min. Za določitev velikosti

To perform the electrical resistivity measurements, the radius of the grain refiner wires was measured at ten different locations and the average radius was determined. In addition, the length of the grain refiner wires was measured and included in the calculations for measuring electrical resistivity. The four-probe direct current technique described in detail in [17] was used to measure the electrical resistance of the wires studied. Measurements were made for a period of ten minutes at room temperature. The electrical resistivity (ρ) was calculated using the equation $R = \rho \cdot L/A$, where L is the length and A is the cross-section of the grain refinement wire. The results are given as the electrical resistivity at room temperature for a given grain refining wire in $\Omega \cdot m$.

Additional analyses were performed on all grain refiners to assess the validity of the electrical resistivity results obtained. Differential scanning calorimetry (DSC) tests were performed using a DSC 404 F1 Pegasus instrument in a dynamic argon atmosphere. Grain refiners were heated to 720 °C at a rate of 10 K/min, held at this temperature for 10 min, and then cooled to room temperature at the same rate. The DSC curves were evaluated to determine the characteristic solidification temperatures.

Microstructural analysis was performed on the grain refiners using a JEOL JSM -6500F scanning electron microscope (SEM) equipped with energy dispersive spectroscopy (EDS) and electron backscatter diffraction (EBSD). The size, shape, and distribution of Al_3Ti and TiB_2 particles were studied using the INCA ENERGY 400 EDS system and HKL Nordlys II camera with Channel 5 software.

In addition, the effectiveness and efficiency of the investigated grain refiners

zrn so bili odvzeti vzorci iz srednjega dela ulitih vzorcev. Ti vzorci so bili pripravljeni s standardnimi metalografskimi tehnikami in elektropolirani z Barkerjevim reagentom. Meje zrn so bile vizualizirane pod polarizirano svetlobo z uporabo mikroskopa Olympus BX61 s kamero DP70 pri 50-kratni povečavi. Velikost zrn je bila izmerjena z metodo srednje presečne razdalje po ASTM E112.

3 Rezultati in diskusija

Vrednosti električnega upora preučevanih udrobnilnih sredstev so prikazane v tabeli 2. Udrobnilno sredstvo B ima najnižjo električno upornost, kar kaže na najmanjšo vsebnost nečistoč, ki prispevajo k nižji upornosti [10,16]. Predvidevamo lahko, da to udrobnilno sredstvo vsebuje enakomerno porazdeljene kosmičaste delce Al_3Ti , skladne z analiziranim razmerjem Ti/B, kar omogoča optimalno udrobnjevanje. Za udrobnilni sredstvi C in D (Al-5 mas. % Ti-1 mas. % B) se električna upornost povečuje z razmerjem Ti/B, kar kaže na prisotnost delcev Al_3Ti različnih oblik, kot so t.i. kockasti in luskasti [5–7]. Masno razmerje Ti/B, ki ustreza stehiometriji TiB_2 , je 2,215, učinkovitost udrobnjevanja pa se občutno izboljša, ko je to razmerje nekoliko preseženo, vendar se zmanjša pri višjih vsebnostih titana [6,7], kot je bilo opaženo pri udrobnilnih sredstvih C in D. Udrobnilno sredstvo D naj bi vsebovalo večje količine Al_3Ti in faz s prisotnostjo silicija, ki dodatno prispevajo k zmanjšanju električne upornosti.

Rezultati analize DSC med ohlajanjem so prikazani na sliki 1. Krivulje DSC zagotavljajo informacije o procesih strjevanja različnih udrobnilnih sredstev, tako da je mogoče narediti korelacijo med fazno transformacijo in rezultati

were evaluated on Al99.7 aluminium alloy. The alloy was preheated to 700 °C, and after the melting process, the Al-Ti-B master alloy was added to the melt in the dosage recommended by the manufacturer. The melt was held for 2 minutes and then poured at a temperature range of 680-690 °C using a Croning cup, with a cooling rate of about 7 K/min. Samples were taken from the middle region of the cast specimens to determine the grain size. These samples were prepared by standard metallographic techniques and electropolished with Barker reagent. Grain boundaries were visualized under polarized light using an Olympus BX61 microscope with a DP70 camera at 50x magnification. The grain size was measured by the mean linear section method according to ASTM E112.

3 Results and discussion

The electrical resistivity values of the studied grain refiners are shown in Table 2. Grain refiner B has the lowest electrical resistivity, which indicates a lower content of impurities contributing to a lower resistivity [10,16]. It can be assumed that this grain refiner contains uniformly distributed flaky Al_3Ti particles, consistent with the analyzed Ti/B ratio, which allows optimal grain refinement. For grain refiners C and D (Al-5 wt.% Ti-1 wt.% B), the electrical resistivity increases with the Ti/B ratio, indicating the presence of Al_3Ti particles with different shapes, such as blocky and flaky [5–7]. The Ti/B weight ratio corresponding to TiB_2 stoichiometry is 2.215, and the refining efficiency improves significantly when this ratio is slightly exceeded but decreases at higher titanium contents [6,7], as was observed for grain refiners C and D. Grain refiner D is expected to contain higher amounts of Al_3Ti and Si-containing phases,

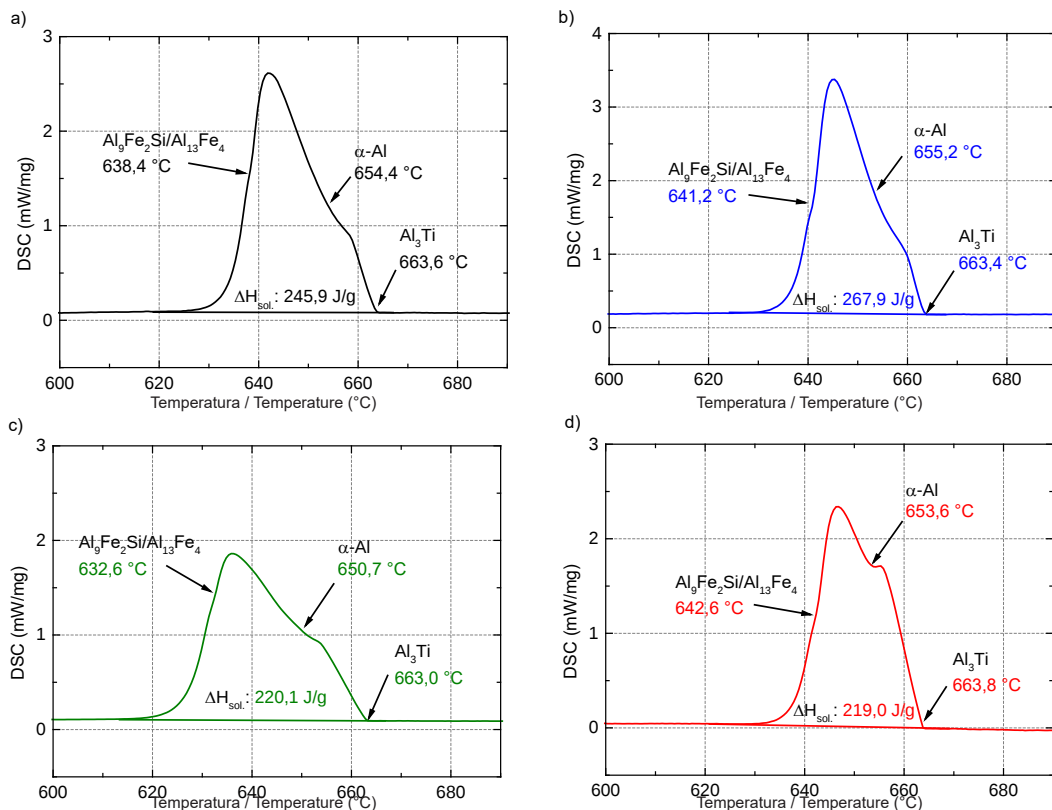
Tabela 2. Specifična električna upornost preiskovanih udrobnilnih sredstev**Table 2.** Specific electrical resistivity of investigated grain refiners

Oznaka / Designation	L, mm	A, mm ²	R, Ω	ρ , Ωm
A	800	0,76 ± 0,01	0,000368	3,48 · 10 ⁻⁸
B	1000	0,76 ± 0,01	0,000443	3,36 · 10 ⁻⁸
C	1000	0,77 ± 0,01	0,000454	3,48 · 10 ⁻⁸
D	700	0,24 ± 0,01	0,000341	3,53 · 10 ⁻⁸

električne upornosti. Pomembne razlike med udrobnilnimi sredstvi so vidne na ohlajevalnih krivuljah DSC. Temperature strjevanja ključnih faz (α -Al, Al_3Ti in $\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}/\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$, navedene v [18]) se

which further contributes to a decrease in electrical resistivity.

The results of DSC analysis during cooling are shown in Figure 1. The DSC curves provide information on the



Slika 1. Ohlajevalne krivulje DSC preiskovanih udrobnilnih sredstev: A (črna), B (modra), C (zelena) in D (rdeča), z označenimi značilnimi temperaturami, fazami in entalpijami

Figure 1. Cooling DSC curves of the investigated grain refiners: A (black), B (blue), C (green), and D (red), with the marking of the characteristic temperatures, phases, and enthalpies

razlikujejo med proučevanimi udrobnilnimi sredstvi, kar potrjuje njihove različne kemijske sestave. Sprememba strjevalne entalpije z najnižjo vrednostjo, opaženo pri udrobnilnih sredstvih C in D, kaže na večjo vsebnost nečistoč (nekovinskih vključkov), ki se talijo šele nad 720 °C in so manj učinkoviti udrobnjevalci. Poleg tega lahko nečistoče onesnažijo delce TiB_2 in vplivajo na učinkovitost udrobnjevanja udrobnilnih sredstev [19, 20].

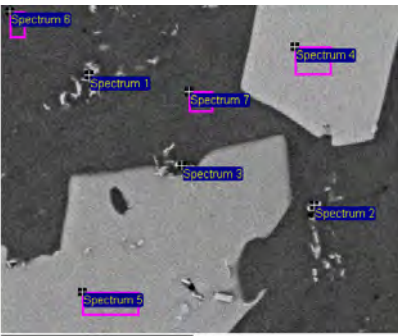
Slike 2a–h prikazujejo reprezentativne mikroposnetke udrobnilnih sredstev v litem stanju. Na slikah 2a in b, ki prikazujeta zlitino Al-3 mas. % Ti-1 mas. % B, so vidni kockasti ali luskasti veliki delci Al_3Ti , neenakomerno porazdeljeni v matrici, medtem ko so manjši razdrobljeni delci TiB_2 razpršeni. Sliki 2c in d prikazujeta zlitino Al-3 mas. % Ti-1 mas. % B z enakomerno porazdeljenimi kosmičastimi delci Al_3Ti različnih oblik. Pri udrobnilnih sredstvih C in D (sliki 2e in f), ki ustrezajo zlitini Al-5 mas. % Ti-1 mas. % B, se morfologija delcev Al_3Ti spremeni iz kockastih v luskaste z zmanjševanjem razmerja Ti/B. Ta opažanja dodatno potrjuje analiza EDS, predstavljena na sliki 2.

Izvedena je bila tudi SEM analiza več mikroposnetkov (48) za analizo delcev Al_3Ti in TiB_2 , s poudarkom na porazdelitvi velikosti. Rezultati, prikazani na sliki 3a in b, prikazujejo število delcev glede na njihovo velikost (površino delcev). Velikostna porazdelitev delcev TiB_2 igra ključno vlogo pri določanju učinkovitosti udrobnilnih sredstev. Najbolje se je izkazalo udrobnilno sredstvo B, saj je v primerjavi z ostalimi pokazal najugodnejše rezultate. Druga udrobnilna sredstva so imela večje število delcev TiB_2 v zelo majhnem območju velikosti, vendar so vsebovale tudi večje delce. Največje število delcev TiB_2 je bilo v udrobnilnem sredstvu D. Vendar pa zaradi neenakomerne porazdelitve velikosti in večje vsebnosti nečistoč, kot so Fe, Si in

solidification processes of the different grain refiners so that a correlation can be made between the phase transformation and the electrical resistivity results. Significant differences between the grain refiners can be seen in the DSC cooling curves. The solidification temperatures of the key phases ($\alpha\text{-Al}$, Al_3Ti , and $\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}/\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$, reported in [18]) vary among the studied grain refiners, confirming their different chemical compositions. The variation in solidification enthalpy, with the lowest value observed for grain refiners C and D, indicates a higher content of impurities (non-metallic inclusions), which melt only at 720 °C and are less effective as inoculants. Moreover, impurities can contaminate the TiB_2 particles and affect the grain refining performance of the grain refiners [19,20].

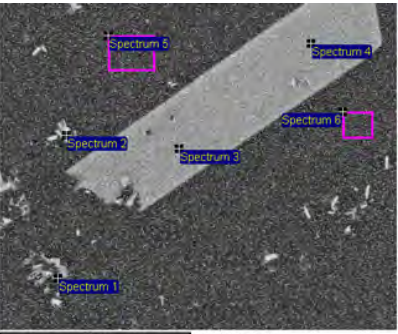
Figures 2a–h show representative micrographs of grain refinement in the as-cast state. In Figures 2a and b, which show the Al-3 wt.% Ti-1 wt.% B alloy, blocky or flaky large Al_3Ti particles are seen unevenly distributed in the matrix, while smaller fragmented TiB_2 particles are interspersed. Figures 2c and d show the Al-3 wt.% Ti-1 wt.% B alloy with uniformly distributed flaky Al_3Ti particles of different shapes. At grain refinement C and D (Figures 2e and f), corresponding to the Al-5 wt.% Ti-1 wt.% B alloy, the morphology of the Al_3Ti particles changes from blocky to flaky with decreasing Ti/B ratio. These observations are further confirmed by the EDS analysis presented in Figure 2.

SEM analysis of several microphotographs (48) was also performed to analyze the Al_3Ti and TiB_2 particles, focusing on the size distribution. The results, shown in Figures 3a and b, show the number of particles versus their size (particle surface area). The size distribution of TiB_2 particles plays a crucial role in determining the effectiveness of grain refinement. Grain



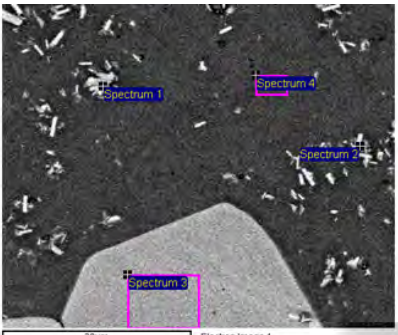
a)

Spectrum	B	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Skupaj / Total
1	20,5	55,8	0,4	23,0	0,1	0,2	100,0
2	44,9	33,5	0,2	21,4	0,0	0,0	100,0
3	43,1	24,9	0,1	31,6	0,0	0,2	100,0
4	0,0	62,8	0,7	36,5	0,0	0,1	100,0
5	0,0	62,5	0,9	36,3	0,2	0,1	100,0
6	17,3	82,1	0,1	0,4	0,0	0,0	100,0
7	6,4	92,9	0,2	0,5	0,0	0,0	100,0



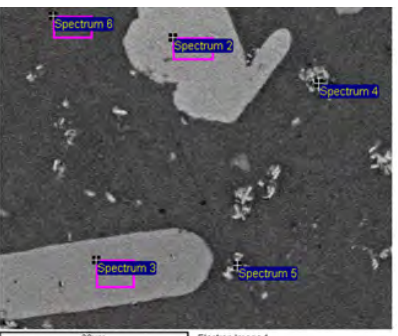
b)

Spectrum	B	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Skupaj / Total
1	7.7	58.7	0	31.9	0.2	1.5	100,0
2	43.1	26	0	30.4	0.2	0.3	100,0
3	0	63.2	0.3	36.2	0.3	0	100,0
4	0	63.1	0.3	36.3	0.1	0.2	100,0
5	0	98.8	0.2	0.8	0.2	0.0	100,0
6	0	98.9	0	1.1	0.0	0.0	100,0



c)

Spectrum	B	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Skupaj / Total
1	45.8	26.3	0.1	27.7	0.0	0.1	100,0
2	0.0	63.9	0.1	34.5	0.1	1.4	100,0
3	0.0	62.9	0.3	36.8	0.0	0.0	100,0
4	0.0	99.4	0.1	0.2	0.0	0.3	100,0



d)

Spec-tum	B	Al	Si	Ti	Mn	Fe	Cu	Skupaj / Total
1	0.0	63.5	0.5	35.5	0.0	0.2	0.3	0.3
2	0.0	64.0	0.5	35.0	0.1	0.1	0.3	0.3
3	40.8	28.3	0.0	30.4	0.1	0.4	0.0	0.0
4	0.0	64.8	0.3	25.2	0.1	9.6	0.0	0.0
5	0.0	98.9	0.1	0.9	0.0	0.1	0.0	0.0

Figure 2. SEM images of investigated grain refiners with corresponding EDS results in wt.%: a) A, b) B, c) C, and d) D

Slika 2. SEM slike preiskovanih udrobnilnih sredstev z ustreznimi rezultati EDS v mas. %: a) A, b) B, c) C in d) D.

drugi elementi, potrjeni z analizo DSC, ni pričakovati, da bo najbolj učinkovito. Na drugi strani je udrobnilno sredstvo B imelo manjšo količino delcev TiB_2 , vendar bi moralo biti njegovo delovanje boljše zaradi enakomernejše porazdelitve velikosti. Poleg tega je imela glede na analizo DSC udrobnilno sredstvo B najnižjo vsebnost nečistoč, kar je povzročilo najnižjo električno upornost. Večji delci in nečistoče, vključno z Fe, Si in vključki, prispevajo k povečanemu sipanju elektronov v matrici [15].

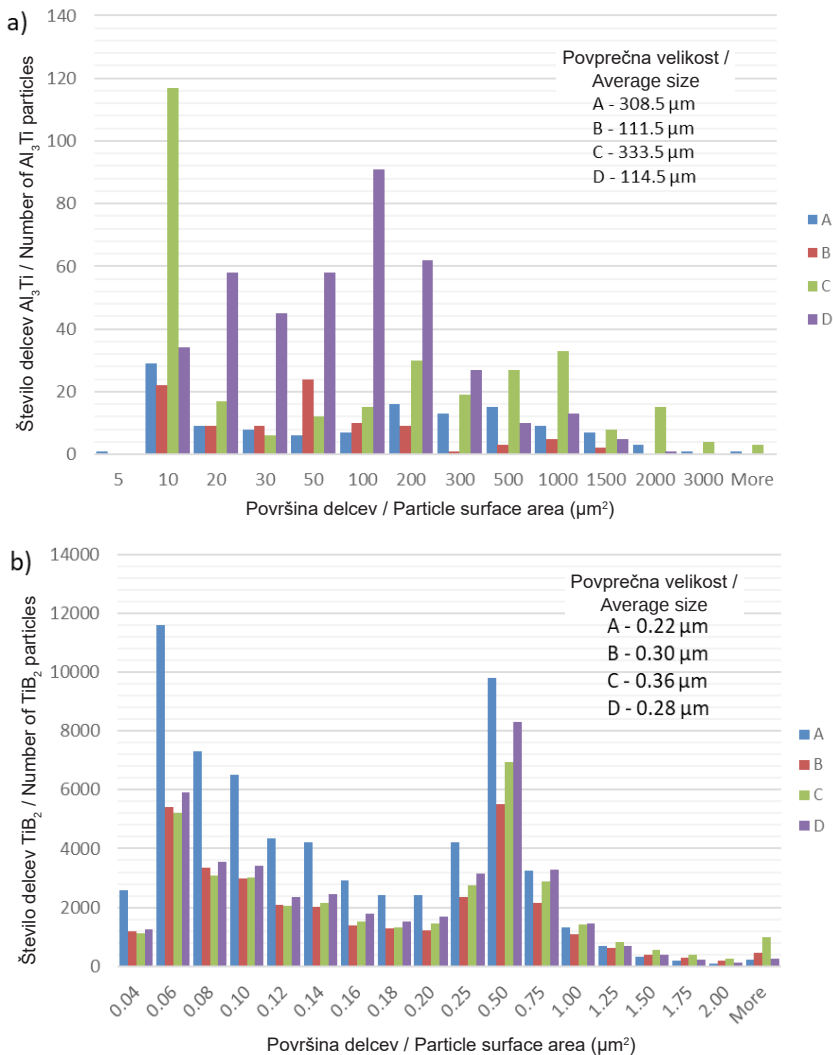
Slike 3a–h prikazuje različne oblike delcev Al_3Ti , ki jih je mogoče pripisati različnim mehanizmom rasti in pogojem obdelave. Za učinkovito udrobnjevanje morajo biti prisotni tako netopni delci TiB_2 kot topni delci Al_3Ti ustrežne velikosti in oblike. Delci TiB_2 delujejo kot substrat za nukleacijo Al_3Ti . Študije kažejo, da ima število delcev TiB_2 večji učinek na nukleacijo in udrobnjevanje v udrobnilnih sredstvih Al-Ti-B kot število delcev Al_3Ti [25]. To nakazuje, da TiB_2 predvsem poganja proces udrobnjevanja kot substrat za nukleacijo, medtem ko ima presežek Ti sekundarne učinke na površino TiB_2 . Vendar pa so za optimalno udrobnjevanje potrebne tudi primerne koncentracije in velikosti delcev Al_3Ti . V tem pogledu ima udrobnilno sredstvo B najbolj enakomerno porazdelitev velikosti delcev Al_3Ti , medtem ko udrobnilni sredstvi C in D kažeta večje razlike (slika 3).

Učinkovitost udrobnjevanja testiranih udrobnilnih sredstev je bila ovrednotena in pokazali so hitro delujoče in učinkovito udrobnjevanje, kot smo že poročali [20]. Prva slika na sliki 4a prikazuje mikrostrukturo lite aluminijeve zlitine Al99,7, strjene pri hitrosti hlajenja približno 7 K/min in kaže velikost kristalnih zrn približno 440 μm . Ko je bilo dodano udrobnilno sredstvo, se je velikost zrn znatno zmanjšala na 270–370 μm (slike 4b–e). Najboljše rezultate kažeta udrobnilni sredstvi B in C, kar bi lahko bila

refiner B exhibited the best performance as it showed the most favorable results compared to the others. The other grain refiners had a higher number of TiB_2 particles in the very small size range but also contained larger particles. Grain refiner D had the highest number of TiB_2 particles. However, due to the uneven size distribution and higher content of impurities such as Fe, Si, and other elements confirmed by DSC analysis, it is not expected to be the most efficient. Grain refiner B, on the other hand, had a lower amount of TiB_2 particles, but its performance should be better due to its more uniform size distribution. In addition, according to DSC analysis, grain refiner B had the lowest impurity content, resulting in the lowest electrical resistivity. The larger particles and impurities, including Fe, Si, and inclusions, contribute to enhanced electron scattering by the matrix [15].

Figure 4a–h illustrates the different shapes of Al_3Ti particles that can be attributed to different growth mechanisms and processing conditions. For effective inoculation, both insoluble TiB_2 particles and soluble Al_3Ti particles of appropriate size and shape must be present. TiB_2 particles act as a substrate for Al_3Ti nucleation. Studies show that the number of TiB_2 particles has a greater effect on nucleation and grain refinement in Al-Ti-B grain refiners than the number of Al_3Ti particles [25]. This suggests that TiB_2 primarily drives the grain refinement process as a nucleation substrate, while the excess of Ti has secondary effects on the surface area of TiB_2 . However, suitable concentrations and sizes of Al_3Ti particles are also required for optimal grain refinement. In this respect, grain refiner B exhibits the most uniform size distribution of Al_3Ti particles, while grain refiners C and D show larger variations (Figure 3).

The grain refining performance of the tested grain refiners was evaluated,

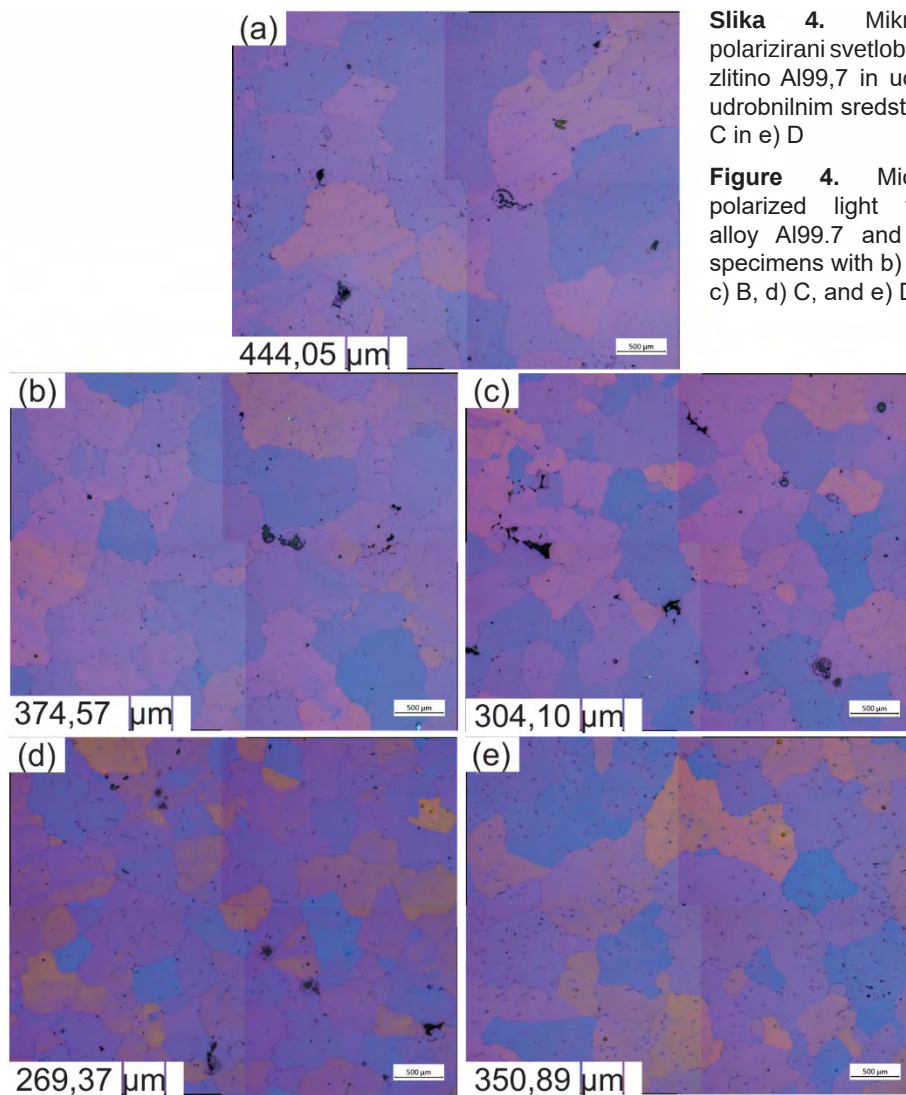


Slika 3. a) Velikostna porazdelitev delcev TiB_2 v preiskovanih udrobnilih sredstvih in b) velikostna porazdelitev delcev Al_3Ti v preiskovanih udrobnilih sredstvih

Figure 3. a) TiB_2 particle size distribution in various grain refiners and b) Al_3Ti particle size distribution in various grain refiners

posledica velikostne porazdelitve delcev, saj obe udrobnili sredstvi B in C sestojita iz ene same oblike delcev Al_3Ti , ki so bolj enakomerno porazdeljeni v matrici (slika 3).

and they showed fast-acting and efficient grain refining, as previously reported [20]. The first image in Figure 4a shows the microstructure of an $\text{Al}_{99.7}$ as-cast aluminum alloy solidified at a cooling rate of about 7 K/min and exhibited a large grain



Slika 4. Mikroposnetki v polarizirani svetlobi za aluminijevo zlitino Al99,7 in udrobnjene b) z udrobnilnim sredstvom A, c) B, d) C in e) D

Figure 4. Micrographs in polarized light for aluminum alloy Al99.7 and grain refined specimens with b) grain refiner A, c) B, d) C, and e) D.

4 Zaključki

Na podlagi predstavljenih rezultatov ima udrobnilno sredstvo B najnižjo električno upornost, kar kaže na nižjo vsebnost nečistoč in ugodno porazdelitev števila in velikosti delcev TiB_2 in Al_3Ti ter optimalno razmerje Ti/B . Nasprotno pa povečano število in velikost delcev TiB_2 in Al_3Ti ter prisotnost topnih elementov, kot sta Fe

size of about 440 μm . In contrast, when the experimental material was added for grain refinement, the grain size decreased significantly to a range of 270–370 μm (Figure 4b–e). The best results show grain refiners B and C, which could be due to the particle size distribution, as both grain refiners B and C consist of a single form of Al_3Ti particles that are more uniformly distributed in the matrix (Figure 3).

in Si ter njuni vključki, prispevajo k večji električni upornosti zaradi povečanega sipanja elektronov v matrici. Različne oblike delcev Al_3Ti lahko pripišemo različnim mehanizmom rasti in pogojem izdelave. Učinkovito udrobnjevanje zahteva kombinacijo netopnih delcev TiB_2 in topnih delcev Al_3Ti ustrezne velikosti in oblike, pri čemer TiB_2 služi kot nukleacijski substrat za Al_3Ti . Optimalno udrobnjevanje zahteva prisotnost ustrezne koncentracije in velikosti delcev Al_3Ti . Udrobnilno sredstvo B, izdelano iz Al-3Ti-1B z razmerjem Ti/B 3,6, ima optimalno število delcev TiB_2 in dobro velikostno porazdelitev delcev. Povprečna velikost delcev Al_3Ti je 111,5 μm , delcev TiB_2 pa 0,30 μm . Ko aluminijevi zlitini Al99,7 dodamo testirana udrobnilna sredstva, se velikost zrn zmanjša s približno 440 μm na 270–370 μm . Najboljše rezultate udrobnjevanja dosežemo z dodajanjem udrobnilnih sredstev B in C, saj imata najprimernejšo porazdelitev delcev.

4 Conclusions

Based on the results presented, grain refiner B exhibits the lowest electrical resistivity, indicating lower impurity content and favorable number and size distribution of TiB_2 and Al_3Ti particles, as well as an optimal Ti/B ratio. Conversely, an increased number and size of TiB_2 and Al_3Ti particles, as well as the presence of soluble elements such as Fe and Si and their inclusions, contribute to a higher electrical resistivity due to enhanced electron scattering by the matrix. The different shapes of Al_3Ti particles can be attributed to different growth mechanisms and processing conditions. Effective grain refining requires a combination of insoluble TiB_2 particles and soluble Al_3Ti particles of appropriate size and shape, with TiB_2 serving as a nucleation substrate for Al_3Ti . Optimal grain refinement requires the presence of a suitable concentration and size of Al_3Ti particles. Grain refiner B, made from Al-3Ti-1B with a Ti/B ratio of 3.6, has the optimum number of TiB_2 particles and well-distributed particle size. The average size of Al_3Ti particles is 111.5 μm and that of TiB_2 particles is 0.30 μm . When the tested grain refiners are added to the Al99.7 aluminum alloy, the grain size decreases from about 440 μm to a range of 270–370 μm . The best grain refining results are obtained by adding grain refiners B and C, as they have the most suitable particle size distribution.

Literatura / References

1. Mackenzie, A.S.; Totten, G.E. (Eds.). *Handbook of Aluminum: Physical Metallurgy and Processes*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2003; Volume 1.
2. Davis, J.R. *Aluminum and Aluminum Alloys*; ASM International: Novelty, OH, USA, 1993.
3. Han, L.; Vian, C.; Song, J.; Liu, Z.; Han, Q.; Xu, C.; Shao, L. *Grain Refining of Pure Aluminium, Light Metals*; TMS Aluminium Committee, Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2012.
4. Zhang, L.; Jiang, H.; He, J.; Zhao, J. Improved grain refinement in aluminium alloys by re-precipitated TiB₂ particles. *Mater. Lett.* **2022**, *312*, 131657.
5. Wang, X.; Song, J.; Vian, W.; Ma, H.; Han, G. The Interface of TiB₂ and Al₃Ti in Molten Aluminium. *Metall. Mater. Trans. B* **2016**, *47B*, 3285–3290.
6. Schumacher, P.; Greer, A.L.; Worth, J.; Evans, P.V.; Kearns, M.A.; Fisher, P.; Green, A.H. New studies of nucleation mechanisms in aluminium alloys: Implications for grain refinement practice. *Mater. Sci. Technol.* **1998**, *14*, 394–404.
7. Yu, H.; Wang, N.; Guan, R.; Tie, D.; Li, Z.; An, Y.; Zhang, Y. Evolution of secondary phase particles during deformation of Al-5Ti-1B master alloy and their effect on -Al grain refinement. *J. Mater. Sci. Technol.* **2018**, *34*, 2297–2306.
8. Fan, Z.; Wang, Y.; Zhang, Y.; Qin, T.; Zhou, X.R.; Thompson, G.E.; Pennycook, T.; Hashimoto, T. Grain refining mechanism in the Al/Al–Ti–B system. *Acta Mater.* **2015**, *84*, 292–304.
9. Wang, Y.; Fang, C.M.; Zhou, L.; Hashimoto, T.; Zhou, X.; Ramasse, Q.M.; Fan, Z. Mechanism for Zr poisoning of Al-Ti-B based grain refiners. *Acta Mater.* **2019**, *164*, 428–439.
10. Spittle, J.A.; Sadli, S. The influence of zirconium and chromium on the grain-refining efficiency of Al-Ti-B inoculants. *Cast Metals* **1995**, *8*, 247–253.
11. Qiu, D.; Taylor, J.A.; Zhang, M.-X. Understanding the Co-poisoning effect of Zr and Ti on the grain refinement of cast aluminium alloys. *Metall. Mater. Trans. A* **2010**, *41A*, 3412–3421.
12. Arjuna Rao, A.; Murty, B.S.; Chakraborty, M. Influence of chromium and impurities on the grain-refining behavior of aluminum. *Metall. Mater. Trans. A* **1996**, *27A*, 791–800.
13. Arjuna Rao, A.; Murty, B.S.; Chakraborty, M. Role of zirconium and impurities in grain refinement of aluminium with Al-Ti-B. *Mater. Sci. Technol.* **1997**, *13*, 769–777.
14. Wang, R.L.; He, Z.F.; Tian, S.L. Effect of V, Ti, Cr, Mn on the conductivity of electrical aluminum rod. *Nonferrous Metals Process.* **2009**, *38*, 12–14.
15. Petrič, M.; Mrvar, P.; Medved, J. Changes of Dimensions and Electrical Resistivity during Solidification of Alloys from Al–Si System. Ph.D. Thesis, University of Ljubljana, Ljubljana, 2013.
16. Xu, X.; Feng, Y.; Fan, H.; Wang, Q.; Dong, G.; Li, G.; Zhang, Z.; Liu, Q.; Fan, X.; Ding, H. The grain refinement of 1070 alloy by different Al-Ti-B mater alloys and its influence on the electrical conductivity. *Results Phys.* **2019**, *14*, 102482.
17. Petrič, M.; Kastelic, S.; Mrvar, P. Selection of electrodes for the in situ electrical resistivity measurements of molten aluminium. *J. Min. Metall. Sect. B Metall.* **2013**, *49*, 279–283.
18. Vončina M.; Paulin I.; Medved J.; Petrič M. Predicting the Quality of Grain Refiners

from Electrical Resistance Measurements of Aluminum. *Metals* **2023**, 13, 717.

19. Lee, C.-T.; Chen, S.-W. Quantities of grains of aluminum and those of TiB_2 and Al_3Ti particles added in the grain-refining processes. *Mater. Sci. Eng.* **2002**, A325, 242–248.
20. Vončina, M.; Medved, J.; Jerina, L.; Paulin, I.; Cvahte, P.; Steinacher, M. The impact of Al-Ti-B grain-refiners from different manufacturers on wrought Al-alloy. *Arch. Metall. Mater.* 2019, 64, 739–746.

AKTUALNO / CURRENT

Pregled livarskih prireditev v letu 2024

Datum dogodka	Ime dogodka	Mesto in država
29.02. – 01.03. 2024	Proizvodni procesi in njihov vpliv na kvaliteto livarskih izdelkov	Varaždin, Hrvaška
14.03. – 15.03. 2024	48. Aachener Giessereikolloquium 2024	Aachen, Nemčija
25.04. – 26.04. 2024	Grosse Giessereitechnische Tagung 2024	Salzburg, Avstrija
16.05. – 17.05. 2024	Aalener Giesserei Kolloquium	Aalen, Nemčija
04.06. – 06.06. 2024	CastForge 2024	Stuttgart, Nemčija
10.06. – 11.06. 2024	Industrijski forum inovacij, razvoja in tehnologij	Portorož, Slovenija
18.09. – 20.09. 2024	64. IFC Portorož 2024	Portorož, Slovenija
23.09 – 25.09. 2024	3rd Carl Loper Conference	Brasov, Romunija
26.09. – 27.09. 2024	13. Ranshofener Leichtmetalltage 2024	Saalfelden, Avstrija
08.10. – 10.10. 2024	Aluminium	Düsseldorf, Nemčija
25.10 – 30.10. 2024	The 75th World Foundry Congress	Deyang, Kitajska

POPRAVEK

V Livarskem vestniku št. 4/2023 je na 229. strani podnapis pod drugo fotografijo napačen in pravilno glasi: Rebeka Rudolf, Univerza v Mariboru in Zlatarna Celje- predavateljica in predsedujoča sekcije.

Za napako se vsem opravičujemo.

AKTUALNO / CURRENT

V. Krmelj, L. S. Balazič, Š. Tertinek, D. Bokal

Energetsko podnebna agencija za Podravje, DATABITLAB svetovanje d.o.o., Fakulteta za naravoslovje in matematiko Univerze v Mariboru

Koristi za podjetja, ki izhajajo iz integriranega trajnostnostnega poročanja

Zanimanje podjetij za trajnostnostna poročila se iz leta v leto vedno bolj povečuje, saj vpliva na optimiziranje svojega poročanja, izboljšanje finančnih rezultatov in izboljšanje ugleda ter konkurenčnosti podjetja. Za vse organizacije ali podjetja je pomembno vedeti, da bo 1.1. 2025 nova direktiva poročanja o trajnostnosti pričakovana za velika podjetja z več kot 500 zaposlenimi že za poslovno leto 2024, za ostala velika podjetja za poslovno leto 2025 in za večino ostalih podjetij v javnem interesu za poslovno leto 2027*. Cilji nove direktive so zagotoviti zanesljive in primerljive informacije o trajnostnostnih praksah v podjetjih, ter sprejem obveznih standardov trajnostnostnega poročanja. Obenem pa je cilj vsakega trajnostnostnega poročanja, da podjetje pozitivno vpliva na okolje in družbo.

Eden bolj znanih kazalnikov po ESRS standardu je izračun ogljičnega odtisa podjetja. Ogljični odtis lahko izračunamo na podlagi standardnih faktorjev preračuna, koliko CO₂ in drugih toplogrednih plinov nastane pri izgorevanju goriv ali drugem pridobivanju energije, npr. električne. Zelo zgoščeno povedano, je ogljični odtis količina ogljikovega dioksida, ki nastane pri proizvodnji določenega produkta, izvedbi storitev, procesa, ali organizacije. S tem ugotovimo, v kolikšni meri izbran proces prispeva k učinku tople grede. Evropska Unija je zato predstavila nov projekt, ki se imenuje, 'Pripravljenih na 55' in s tem zadala cilje, da bo do leta 2030 zmanjšala neto emisije toplogrednih plinov za vsaj 55%. Vsem pripravljavcem trajnostnostnih poročil bo najbolj ustrezal agilen integriran model obdelave trajnostnih podatkov, ki omogočajo učinkovito razumevanje in integracijo podatkov za izboljšanje učinkovitosti in zmanjšanje stroškov. Cilj le-tega je v ospredje postaviti izkoriščanje podatkov za optimizacijo svojih poslovnih procesov, izboljšati učinkovitost in konkurirati na trgu. Ključni element integriranega modela trajnostnostnega poročanja predstavlja programska oprema, ki v realnem času (sproti po knjiženju relevantnih podatkov) izračuna trajnostnostne kazalnike, ta zajema podatke in vrednosti kazalnikov v realnem času, prikaz lastne cene ter sočasna optimizacija lastne cene in okoljskih obremenitev. Primeri drugih prednosti (integriranega) trajnostnostnega poročanja so ugodnejši krediti, optimizacija logistike in drugih poslovnih procesov ter povečana privlačnost za investicije.

Podjetje ali organizacija lahko z uvedbo trajnostnostnega poročanja in izračunom ogljičnega odtisa skozi integrirano podatkovno analizo prispevata k krepitvi blagovne znamke in ugleda podjetja, konkurenčnosti, optimizaciji dela, zmanjšanju stroškov uporabe, natančnejšemu vodenju izračunov ogljičnega odtisa in večjemu zadovoljstvu družbe ter pozitivnejšemu vplivu na okolje.

*Člen 5 in Izhodišče (27) direktive DIREKTIVA (EU) 2022/2464 EVROPSKEGA PARLAMENTA IN SVETA. Dostopno na: <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/SL/TXT/?uri=CELEX%3A32022L2464>

Opomba: Dne 5.12.2023 je v organizaciji Društva livarjev Slovenije potekal seminar z izvajalci, ki so razvidni zgoraj, pod naslovom Koristi za podjetja, ki izhajajo iz integriranega trajnostnostnega poročanja.

AKTUALNO / CURRENT

Dan Poljskih livarjev 2023

V Krakovu na Poljskem smo se dne 15. decembra 2023 udeležili »Dneva Poljskih livarjev 2023«. V okviru tega dogodka je potekala mednarodna konferenca pod naslovom **»Inovacije v livarski industriji«**. Organizator dogodka je bil STOP – Stowarzyszenie Techniczne Odlewników Polskich (Tehnično združenje poljskih livarjev). Gre za livarski dogodek, ki je eden od najpomembnejših v poljski livarski industriji, ki je že nekaj let pomemben dogodek v mednarodnem prostoru, kar se kaže v naraščajoči udeležbi udeležencev iz tujine. O pomembnosti dogodka ne govori samo statistika temveč tudi dejstvo, da je dogodek organiziran pod pokroviteljstvom WFO – svetovne livarske organizacije in s medijskima pokroviteljema Foundry Planet, svetovno znani livarski portal ter revijo Przegląd Odlewnictwa.



Pogled na
livarsko razstavo

Letošnjega dogodka se je udeležilo skoraj 250 udeležencev iz Poljske in tujine. Gre za predstavnike livarske industrije, dobavitelje za livarsko industrijo ter predstavnike univerz in raziskovalnih organizacij. Tematika konferenca je bila posvečena predvsem novim rešitvam varčevanja z energijo, vključno z uporabo obnovljivih virov energije, zmanjševanju emisij CO₂ in uporabi novih inovativnih materialov in uporabi sodobnih rešitev digitalizacije in robotizacije, v skladu z industrijo 4.0. V konferenčnem delu dogodka je bilo predstavljeno 15 predavanj. Kot vsako leto ta dogodek spremlja tudi livarska razstava na kateri je sodelovalo 16 razstavljalcev, med njimi tudi TDR Legure d.o.o. iz Slovenije.

Organizator dogodka je poročal, da je bil s sklepom XXXV generalne skupščine delegatov STOP - Poljskega livarskega združenja, ki je potekala dne 14.12.2023, izvoljen

nov odbor STOP, ostali organi in predsednik. Novi predsednik STOP za mandatno obdobje 2023-2027 je postal prof. Rafal Danko, dosedanji podpredsednik STOP, ki je trenutno tudi podpredsednik WFO.



Slavnostna zahvala
odhajajočem
predsedniku STOP
mag. Tadeusz
Franaszek

Uradni del dogodka »Dan poljskih livarjev 2023« je bil zaključen s slavnostno zahvalo odhajajočem predsedniku STOP, mag. Tadeuszu Franaszku, ki je vse svoje življenje posvetil livarstvu, ustvarjanju in vodenju Poljskega livarskega združenja. Mag. Tadeusz Franaszek je častni član Društva livarjev Slovenije, zato smo se tudi iz tega razloga udeležili tega dogodka in slavnostne zahvale, ki jo naš dolgoletni stanovski kolegu in prijatelju iz Poljske zasluži.

Informacijo priredila:
mag. Mirjam Jan-Blažić

AKTUALNO / CURRENT

EUROGUSS

V Nuernbergu v Nemčiji je od 16.-18. januarja 2024 potekal specializiran sejem s področja tlačnega livarstva, kateri se na tej lokaciji prireja vsako drugo leto in se danes zagotovo lahko šteje kot največji evropski strokovni sejem za tlačno litje. Sejem predstavlja celotno verigo izdelave ulitkov na enem mestu – od surovin, tehnologije in procesov do končnih izdelkov. Osredotočen je na inovativne rešitve za procese tlačnega litja (aluminij, cink, magnezij). Sejem je bil prvič organiziran leta 1996. Takrat se je predstavilo 93 razstavljalcev, na sejem pa je prišlo 2.600 obiskovalcev. V letu 2020 je nastopilo rekordno število razstavljalcev, 758 iz 36 držav in preko 14.600 obiskovalcev, letos pa se beleži udeležba je 641 razstavljalcev iz 34 držav in 14.341 obiskovalcev. Deset držav, iz katerih prihaja največ obiskovalcev (po vrstnem redu) je: Nemčija, Italija, Turčija, Avstrija, Poljska, Češka, Španija, Republika Koreja, Slovenija in Švica.



Pomembnosti sejma se zavedajo tudi Slovenska podjetja. Na sejmu je tako razstavljalo kar 14 naslednjih razstavljalcev: Blisk livarstvo d.o.o., 3CNC d.o.o, DIFA d.o.o., Hidria d.o.o., HTS IC d.o.o., Iskra ISD livarna d.o.o., Kofra livarna d.o.o., Kovinoplastika Lož d.o.o., LTH castings d.o.o., MLM d.d., Orodjarstvo Gorjak, d.o.o., Talum d.d., Telkom d.o.o., Unior d.d..

Sejem tradicionalno obišče tudi Društvo Livarjev Slovenije in Katedra za livarstvo Oddelka za materiale in metalurgijo Naravoslovnotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Prevladujoča tema Eurogussa 2024 je bila trajnost. Z naraščajočim ozaveščanjem o okoljskih vprašanjih je v industriji tlačnega litja vse večje povpraševanje po bolj ekoloških proizvodnih procesih. Podjetja raziskujejo nove načine za zmanjšanje porabe energije, minimiziranje odpadkov in uporabo recikliranih materialov, ne da bi pri tem ogrozili kakovost. Ta zavezanost trajnosti je bila očitna v številnih ekoloških rešitvah na razstavi, ki segajo od energetsko učinkovitih strojev do inovativnih tehnik recikliranja.



Poleg tega se je digitalizacija izkazala kot še en ključen trend, ki preoblikuje področje tlačnega litja. Tehnologije industrije 4.0, kot so avtomatizacija, analitika podatkov in povezljivost IoT, spreminjajo proizvodne procese, izboljšujejo učinkovitost in omogočajo spremljanje in nadzor v realnem času. Obiskovalci smo imeli priložnost na lastne oči videti preoblikovalno moč digitalizacije skozi žive demonstracije in interaktivne razstave, ki prikazujejo, kako te tehnologije lahko optimizirajo operacije in spodbujajo inovacije.

Končno gledano je bil sejem odmeven uspeh, ki je ponovno potrdil svoj status kot dogodek, ki ga morajo obiskati strokovnjaki iz naših livarn tlačnega litja. Od novih trendov do vpoglednih razprav je sejem ponudil vpogled v prihodnost tlačnega litja, kjer so trajnost, digitalizacija in sodelovanje, gonilne sile, ki oblikujeta evolucijo industrije.

Poročal:
dr. Sebastjan Kastelic

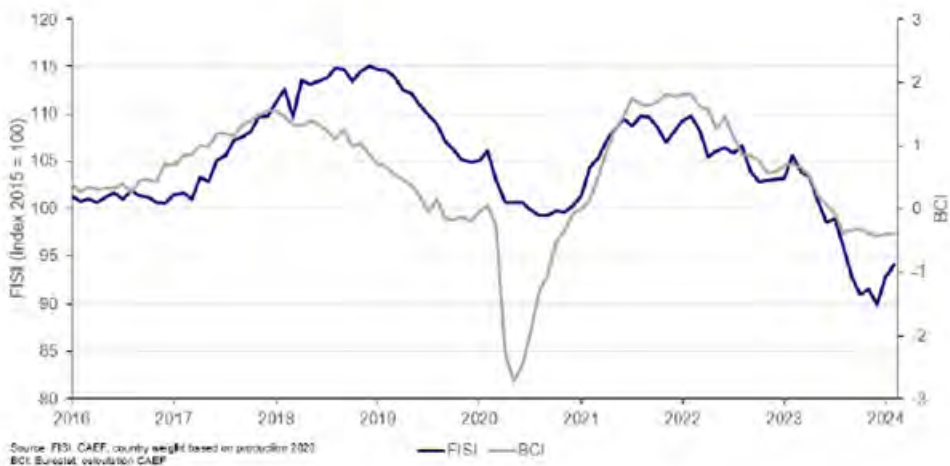
AKTUALNO / CURRENT

Mnenje o stanju evropske livarske industrije, februar 2024

FISI raste že drugi mesec zapored in znaša 94,0 indeksnih točk.

Februarja 2024 je kazalnik razpoloženja v evropski livarski industriji (FISI) doživel pozitiven skok. Gre za drugo zaporedno rast FISI za 1,1 točke, kar znaša 94,0 (92,9 v januarju).

Trenutni dvig FISI je mogoče deloma pripisati umirjanju razmer v nabavnih trgih, kar prispeva k rahlemu popuščanju pritiskov. Dinamika cen surovin oziroma materialov se je ustalila in odraža bolj normalno stanje, cene pa so še zmeraj na ravneh, ki presegajo stanje pred pričetkom pandemije. Vendar splošno stanje ostaja še zmeraj napeto, saj je treba premagati še precej ovir. Tekoči izzivi s katerimi se sooča Industrija sta nihajoče povpraševanje in svetovna gospodarska negotovost. Ti dejavniki opozarjajo na krhkost trenutnega izboljšanja ter poudarjajo potrebo po trajnem prizadevanju za stabilizacijo in krepitev sektorja. Majhno izboljšanje v februarju je pozitiven znak ampak pomembno je vedeti, da bo trasiranje poti evropske livarske industrije še vedno težavno. Z dodatno pozornostjo in s proaktivnimi koraki, ki bodo ključnega pomena za spopadanje s trenutnim dogajanjem in izzivi, bo potrebno zagotoviti, da Industrija kljub težavam ostaja močna.



Kazalnik poslovne klime (BCI) medtem ostaja nespremenjen pri -0,42 indeksne točke in je enak kot v januarju. To je že osmi zaporedni mesec, ko se BCI zadržuje pod kritično mejo 0 indeksnih točk. Ponovljajoči negativni trend BCI izhaja predvsem iz ocene ravnih izvoznih naročil. Nenehne geopolitične napetosti v regijah, kot je Bližnji vzhod in Ukrajina še naprej pomembno vplivata na to usmeritev, kar tudi prispeva k trajni stagnaciji BCI.

FISI je prvi razpoložljivi sestavljeni kazalnik, ki zagotavlja informacije o uspešnosti evropske livarske industrije. Vsak mesec ga objavi CAEF - Evropsko livarsko združenje, temelji pa na anketnih odgovorih evropske livarske industrije. CAEF prosi svoje člane, da podajo svojo oceno poslovanja v livarstvu in svoja pričakovanja za naslednjih 6 mesecev.

BCI – indikator poslovne klime je kazalnik, ki ga objavlja Evropska komisija. BCI vsak mesec ocenjuje razvojne razmere proizvodnega sektorja v evropskem območju in uporablja 5 mnenj iz raziskave industrije: Proizvodne trende, knjige naročil, knjige izvoznih naročil, zaloge in pričakovana proizvodnja.

Mnenjski indikator evropske livarske industrije (FISI) in kazalnik poslovne klime v Evro območju (BCI)

Zgoraj predstavljena tabela skupaj z dodatnimi informacijami je dostopna na www.caef.eu.

CAEF je krovna organizacija nacionalnih evropskih livarskih združenj. Organizacija, ustanovljena leta 1953, ima 22 evropskih držav članic in si prizadeva za promocijo gospodarskih, tehničnih, pravnih in družbenih interesov evropske livarske industrije. Hkrati CAEF izvaja dejavnosti, katerih cilj je razvoj nacionalnih livarskih industrij in usklajevanje njihovih skupnih mednarodnih interesov. Generalni sekretariat ima sedež v Düsseldorfu od leta 1997. CAEF predstavlja 4 400 evropskih livarn. Skoraj 260 000 zaposlenih ustvarja promet v višini 39 milijard evrov. Evropske livarne zaposlijo 20 000 delavcev in inženirjev na leto. Glavne panoge kupcev so npr. avtomobilska, splošna in gradbena industrija ter elektrotehnična industrija. Noben industrijski sektor ne obstaja brez uporabe litih komponent. Več informacij na www.caef.eu in CAEF LinkedIn.

Kontakt CAEF:

Johannes Kappes

CAEF Sekretar Evropskega livarskega združenja

Komisija za ekonomijo in statistiko

telefon: +49 211 68 71 – 291

elektronski naslov: johannes.kappes@caef.eu

Podatki v tem prispevku so povzeti iz CAEF – Sporočila za javnost z dne 22.03.2024 .

Informacijo pripravila:
mag. Mirjam Jan-Blažič

AKTUALNO / CURRENT

Seja organov Društva livarjev Slovenije

Društvo livarjev Slovenije (v nadaljevanju Društvo) je 5. marca 2024 izvedlo običajne seje vseh organov Društva v tem času v podjetju LTH Castings d.o.o. in to na lokaciji njegovega obrata Orodjarne v Škofji Loki. Organi Društva so potekali po zaporedju glede na potrebno odločanje in sicer najprej je zasedal Nadzorni odbor Društva, ki je obravnaval poročilo predsednice o delu Društva v letu 2023 s pripadajočim finančnim poročilom. Nadzorni odbor Društva je potrdil poročilo predsednice o delu in poslovanju Društva v letu 2023. Ugotovil je nadalje, da je finančno poslovanje Društva bilo vodeno v skladu z veljavnimi računovodskimi standardi za društva. Poraba sredstev je potekala v skladu s prejetim Programom dela Društva za leto 2023, sprejetim na letnem Občnem zboru, dne 31.2.2023. Iz poročila o finančnem poslovanju Društva v letu 2023 je razvidno, da je Društvo ustvarilo 146.439,11 € prihodkov od tega v pretežni meri iz naslova konference v Portorožu in seminarjev v vrednosti 77.915,15 €, iz naslova livarske revije Livarski vestnik 15.396,61 € in letnih članskih prispevkov 24.090,04 €. Celotni stroški so bili za 5% nižji kot v letu 2022 in so znašali 145.305,06 €. Pretežni del stroškov se nanaša na Livarsko konferenco v Portorožu in livarsko revijo Livarski vestnik. Razlika med prihodki in stroški pa je znaša 1.134,05 €. Ker je Društvo po zakonu o društvih neprofitna organizacija, je letno uravnavanje prihodkov in stroškov bilo uspešno.



Seja občnega zbora

Po seji Nadzornega odbora je potekala seja Izvršnega odbora na kateri so bili prisotni vsi člani Izvršnega odbora. Na seji je bil obravnavan naslednji dnevni red:

- Pregled zapisnika in realizacije sklepov 41. seje.

- Poročilo predsednice o delu in finančnem poslovanju Društva v letu 2023 s stališčem Nadzornega odbora.
- Poročilo Inventurne komisije za popis osnovnih sredstev.
- Program dela Društva livarjev Slovenije za leto 2024.
- Razno.

Za vse točke dnevnega reda so člani Izvršnega odbora prejeli podrobna pisna gradiva, ki jih je uvodoma predstavila predsednica Društva, mag. Mirjam Jan-Blažič. Izvršni odbor je soglasno sprejel vsa poročila in predlagan Program dela Društva za leto 2024.

Na letnem Občnem zboru, ki je sledil po seji Izvršnega odbora je obravnavano Poročilo o delu Društva v letu 2023 s finančnim poslovanjem in stališčem Nadzornega odbora in Program dela Društva za leto 2024. Za vse točke dnevnega reda so delegati Občnega zbora prejeli podrobna pisna gradiva, ki jih je uvodoma predstavila predsednica Društva, mag. Mirjam Jan-Blažič. Občni zbor je soglasno sprejel vsa poročila in predlagan Program dela Društva za leto 2024.

V Programu dela Društva za leto 2024 se načrtujejo nadaljnje izdaje Livarskega vestnika, v obsegu štirih izdaj na koncu vsakega kvartala, organizacija osrednjega dogodka 64. IFC Portorož 2024 z livarsko razstavo, ki bo potekala v času od 18. - 20. septembra 2024, izmenjava livarske revije Livarski vestnik s svetovnimi in domačimi livarskimi in drugimi strokovnimi revijami, udeležba na livarskih dogodkih doma in v tujini, sodelovanje s sorodnimi društvi in združenji, priprava statističnih podatkov o livarski proizvodnji v Sloveniji v letu 2023 za svetovno statistiko in organizacija in izvedba naslednjih strokovnih seminarjev:

Skupni seminar za vse člane Društva livarjev Slovenije

• Okoljevarstvene problematike za livarne

Izvajalec: Gospodarska zbornica Slovenije, Služba za varstvo okolja

Predvidena obravnava naslednjih tem:

Družbeno odgovorno ravnanje do trajnosti

Direktiva o trajnostnem korporativnem poročanju (CSRD)

Standardi trajnostnega poročanja (ESRS)

Predviden prenos direktiv v slovenski pravni red

Kako do trajnostnega poročila

Rok izvedbe seminarja 17.4.2024 .

Seminarji za neželezove livarne

1. Dvodnevni seminar za livarne tlačnega litija s praktičnim delom

Izvajalec: **ÖGI– Avstrijski livarski inštitut**, na lokaciji Leoben, Avstrija

Predvidena obravnava naslednjih tem:

- Vacuum and spraying technology
- Numerical Simulation with Focus on the spray process
- Porosities in HDPC
- Introduction to cooling and die tempering in HPDC
- Thermochemical and thermomechanical wear of tools for HPDC

- Thermography
- Standard water spraying/standard water spraying with core cooling
- Process conversion from conventional spraying to micro-spraying, microspraying with core cooling

Število udeležencev je omejeno na 12 slušateljev, zato je v sprejetem Programu Društva za leto 2024 že potrjen tudi razrez slušateljev po podjetjih.

Predviden rok izvedbe seminarja: oktober/november 2024.

2. Seminar za tlačne livarne

Izvajalec: Chem Trade, lokacija Gospodarska zbornica Slovenije

Predvidena obravnava naslednjih tem:

- Ekološka ločilna sredstva,
- Mikromazanje,
- Mazanje batov,
- Efekt ločevalnega premaza glede na kvaliteto (hrapavost) površine,
- Alternative orodnih jekel

Predviden rok izvedbe seminarja: junij/ 1. teden julij 2024.

3. Tri dnevni seminar za visoko usposobljene in izkušene kadre s področja tlačnega litja

Izvajalec: Bühler, lokacija Uzvil, Švica

Število udeležencev je omejeno na 10 slušateljev, zato je v sprejetem Programu Društva za leto 2024 že potrjen razrez slušateljev po podjetjih.

Predviden rok izvedbe seminarja: oktober/1. teden december 2024.

Seminarji za železove livarne

1. Enodnevni seminar o inovativnih rešitvah za predelavo in ponovno uporabo livarskih odpadnih peskov

Izvajalec: OMEGA Sinto in Heinrich Wagner Sinto GmbH, lokacija Portorož

Rok izvedbe seminarja: 18. september 2024.

2. Livarske napake in možne identifikacije z merilno opremo Katedre za livarstvo Naravoslovno tehniške fakultete Univerze v Ljubljani

Izvajalec: Katedra za livarstvo v Ljubljani

Predviden rok izvedbe seminarja: december 2023 /januar 2024.

Komisija za izbor seminarских tem za železove livarne je predlagala, da se poiščejo izvajalci še za naslednje seminarske teme:

- **Kako do večje energetske učinkovitosti pri zalaganju peči**
- **LCA analiza, kot orodje za doseganje trajnostnih ciljev poslovanja**
- **Določanje CO2 odtisa v transportu**

Predviden rok izvedbe seminarjev: oktober 2023 do januar 2024



Udeleženci Občnega zbora Občnega zbora

Pred sejo letnega občnega zbora je vse prisotne delegate pozdravil direktor livarne LTH Castings d.o.o., Matjaž Turk, ki je najprej s PowerPoint prezentacijo predstavil delegatom dosežke podjetja v lanskem letu in načrte za prihodnost in po predstavitvi podjetja s svojimi sodelavci popeljal delegate na ogled proizvodnih obratov Orodjarne. Po končanem občnem zboru je gostitelj poskrbel za kosilo in neformalno druženje delegatov Občnega zbora.

Za omogočeno izvedbo vseh organov Društva, prijazen sprejem in odlično gostiteljstvo, se Društvo livarjev Slovenije še enkrat zahvaljuje podjetju LTH Castings d.o.o. in vodstvu podjetja.

Poročala:
mag. Mirjam Jan-Blažić



DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE

Vabilo za

64. IFC PORTOROŽ 2024

z livarsko razstavo

18. - 20. SEPTEMBER 2024

Kontakt: DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE,

Lepi pot 6, p.p. 424, 1001 Ljubljana

T: +386 1 2522 488

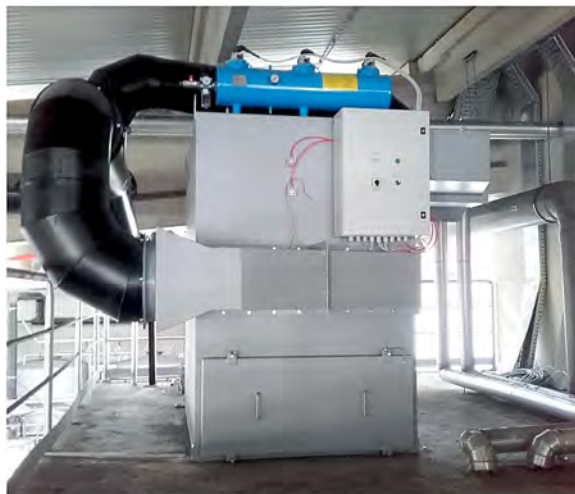
drustvo.livarjev@siol.net, www.drustvo-livarjev.si

The 75th
**WORLD FOUNDRY
CONGRESS**
DEVELOPING FOUNDRY

2024

Oct. 25-30 | Deyang · China

www.75wfc.com



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

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





TERMIT

Družba TERMIT je rudarsko podjetje
za pridobivanje kremenovih peskov



NAŠ PROGRAM:

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

www.termit.si