

# Influence of the AlSi12 alloy inoculation on the microstructure and mechanical properties development

---

**Zovko Brodarac, Zdenka; Rupčić, Tomislav; Kozina, Franjo; Mašinović, Dario**

*Source / Izvornik:* **Livarski vestnik, 2021, 68, 35 - 50**

**Journal article, Published version**

**Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:115:525177>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-06-30**



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET  
UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF METALLURGY

*Repository / Repozitorij:*

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



The logo for 'dabar', featuring a stylized bird or wing shape above the word 'dabar' in a lowercase, sans-serif font. Below it, the text 'DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ' is written in a smaller, uppercase font.

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

# LIVARSKI VESTNIK

68/2021

1



DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE  
SLOVENIAN FOUNDRYMEN SOCIETY



**LIVING**

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

# LIVARSKI VESTNIK

## Izdajatelj / Publisher:

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

## Glavni in odgovorni urednik / Chief and responsible editor:

prof. dr. Alojz Križman  
E-mail: [probatust@triera.net](mailto:probatust@triera.net)

## Tehnično urejanje / Technical editing:

mag. Mirjam Jan-Blažič

## Uredniški odbor / Editorial board:

prof. dr. Alojz Križman, Univerza v Mariboru  
prof. dr. Primož Mrvar, Univerza v Ljubljani  
prof. dr. Jožef Medved, Univerza v Ljubljani  
doc. dr. Gorazd Lojen, Univerza v Mariboru  
prof. dr. Andreas Bührig-Polaczek, Giesserei  
Institut RWTH Aachen  
prof. dr. Peter Schumacher, Montanuniversität  
Leoben  
prof. dr. 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.

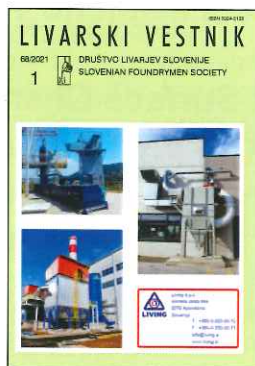
## Naklada / Circulation:

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 2021



LIVING d.o.o.  
Goriška cesta 66A  
5270 Ajdovščina

Direktor: Aleksander FERJANČIČ

T: +386 5 33 33 810  
F: +386 5 33 33 071  
E: [info@living.si](mailto:info@living.si)  
<http://www.living.si>

## VSEBINA / CONTENTS

Stran / Page:

S. Ramrattan, L. Wells, R. Tuttle, J. Medved: <b>Karakterizacija površin z ognjeobstojnim premazom za diskaste vzorce s kemično vezanim peskom – 2. del / Refractory Coated Surface Characterization for Steel using Disc- Shaped Chemically Bonded Sand Specimens – Part II</b>	2
M. Petrič, B. Zeka, P. Mrvar, B. Leskovar, B. Markoli: <b>Razvoj zlitine AlSi7Mg z dodatki Li / Development of AlSi7Mg Alloy with Additions of Li</b>	23
Z. Zovko Brodarac, T. Rupčič, F. Kozina, D. Mašinović: <b>Vpliv cepljenja zlitine AlSi12 na mikrostrukturo in razvoj mehanskih lastnosti / Influence of the AlSi12 Alloy Inoculation on The Microstructure and Mechanical Properties Development</b>	35
<b>AKTUALNO / CURRENT</b>	
Pregled livarskih prireditev v letih 2021 in 2022	50
60 let osrednje livarske konference Društva livarjev Slovenije	51
Pregled svetovne livarske proizvodnje v letu 2019	61
Seje organov Društva livarjev Slovenije	63
Portorož 2021	65
Vodstvo in organi Društva livarjev Slovenije	66

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

## Vpliv cepljenja zlitine AlSi12 na mikrostrukturo in razvoj mehanskih lastnosti

### Influence of the AlSi12 Alloy Inoculation on The Microstructure and Mechanical Properties Development

#### Povzetek

Zaradi širokega razpona ugodnih lastnosti so se aluminijeve zlitine začele pojavljati v skorajda vseh industrijskih vejah. Potencialne izboljšave lastnosti uporabe so postale očitne pri oblikovanju koristnih intermetalnih faz pri medsebojni interakciji številnih legirnih elementov, kot so silicij, baker ali magnezij, skupaj z elementi v sledih, kot sta železo in mangan. Drugi pomembni elementi, kot so titan, bor, stroncij ali natrij, so namerno dodani pri ciljni obdelavi taline zaradi izboljšanja strjevanja s povečanjem potenciala nukleacije in posledičnega spreminjanja morfologije. Upoštevanje tehnoloških parametrov litja, ki vplivajo na hitrost ohlajanja/strjevanja, prav tako predstavlja osnovo za spreminjanje mikrostrukture in končno kakovost ulitka. Aktivnost sinergij pri legiranju in/ali elementih v sledih ter njihova interakcija in tehnološki parametri v procesu litja so izjemno pomembni pri upoštevanju uporabe zlitine.

Ta raziskava obravnava evtektično zlitino EN AC AlSi12 (EN AC 44100) z ozkim intervalom strjevanja, predvideno za tehnologijo hitrega ohlajanja/strjevanja, kot je tlačno litje (HPDC). Vpliv različnih načinov obdelav taline zlitine AlSi12 na mikrostrukturo in mehanske lastnosti smo spremljali kot del zagotavljanja kakovosti. Uporabljen način obdelave taline zajema modifikacijo evtektika z dodatkom predzlitine AlSr10 v vseh primerih raziskave. Razlika med načinom obdelave taline je bila v ciljnem dodajanju predzlitine AlTi5B. Hipoteza preučevanja temelji na predpostavki, da lahko ciljna obdelava taline vpliva na način strjevanja, razvoj mikrostrukturnih lastnosti in končno dosego mehanskih lastnosti zlitine skladno z ustrežno geometrijo litja in/ali uporabo tehnologije.

**Ključne besede:** zlitina AlSi12, cepljenje, modifikacija, mikrostruktura, mehanske lastnosti

#### Summary

Due to a wide range of favourable properties, aluminium alloys found their application in almost all industrial branches. The potential of improving usage properties has been recognized through the forming of favourable intermetallic in mutual interaction of numerous alloying elements such as silicon, copper or magnesium, along with trace elements such as iron and manganese. Other important elements such as titanium, boron, strontium or sodium are intently added through targeted melt treatment in order to improve the solidification path by increasing the nucleation potential and therefore changing morphology. In consideration of the casting technology parameters which influence the cooling / solidification rate also represents the base for changing the microstructure and final quality of the casting. The synergy activity of the alloying and/or trace elements and their interaction and technological parameters of casting process is of great importance in consideration of alloy applicability.

This investigation deals with EN AC AlSi12 (EN AC 44100) eutectic alloy with narrow solidification interval, intended for rapid cooling/solidification technology such as high

pressure casting (HPDC). The effect of a different mode of AlSi12 alloy melt treatment on microstructure and mechanical properties was monitored as a quality insurance. Applied melt treatment mode consists of modification of eutectic with addition of AlSr10 master alloy in all investigated cases. The difference in melt treatment mode was in targeted addition of AlTi5B master alloy. The hypothesis of the examination is based on the assumption that targeted melt treatment can influence the solidification manner, development of microstructural characteristics and finally achieving mechanical properties of the alloy in accordance to corresponded casting geometry and/or technology application.

**Key words:** AlSi12 alloy, inoculation, modification, microstructure, mechanical properties

## 1 Uvod

Na splošno so za aluminij-silicijeve zlitine značilne: nizka specifična gostota, dobre livne lastnosti, relativno malo se krčijo, njihova proizvodnja je cenovno ugodna, dobro se varijo ter imajo odlično odpornost na korozijo kot tudi veliko natezno trdnost. Zaradi nizkega tališča in majhnega intervala strjevanja se zlitina AlSi12 najpogosteje uporablja zaradi enakomerno porazdeljene evtektične mikrostrukture, ki zagotavlja boljše mehanske in tehnološke lastnosti [1]. Evtektična zlitina Al-Si se dodaja pri kompleksnejših geometrijah, za odpornost proti koroziji in za nepropustne ulitke. Obdelava taline skozi udrobnevanje in modifikacijo je ključnega pomena z vidika kakovosti ulitkov.

Preiskovana zlitina AlSi12 (EN AC 44100) spada v skupino »evtektičnih zlitin« [2]. Silicij je eden najpomembnejših legirnih elementov, ki zagotavlja dobro livnost aluminijevih zlitin. Dodatek silicija izboljša napajanje med strjevanjem ter odpornost na razpoke v vročem. [3, 4]. Singergijski učinek legirnih elementov in elementov v sledovih razkriva nastanek širokega nabora intermetalnih faz [5-8].

Vpliv morfologije evtektika Al-Si močno vpliva na mehanske lastnosti. Mehanske lastnosti so povezane z vlaknasto morfologijo evtektika, ki se doseže bodisi

## 1 Introduction

In general, aluminum - silicon alloys characterized with low specific weight, possess good castability, relatively low contraction, low production price, good weldability and high corrosion resistance and tensile strength. A low melting point and narrow solidification interval indicates AlSi12 alloy as a most commonly used one due to the uniformly distributed eutectic microstructure indicating superior mechanical and technological properties [1]. Eutectic Al-Si alloy is applied for complex geometry, corrosion resistant and leakage castings. Melt treatment by grain refinement and modification is of essential importance for casting quality.

Investigated AlSi12 alloy (ENAC 44100) belongs to the group of "eutectic alloys" [2]. Silicon is one of the most important alloying elements which comprehend to good castability of aluminium alloys. The addition of silicon improves feeding capability and resistance to hot cracks [3, 4]. The synergy of alloying and trace elements comprehend to the wide range of intermetallic phases' evolution [5-8].

The influence of Al-Si eutectic morphology is significant for mechanical properties development. Mechanical properties are correlated to fibrous morphology of eutectic achieved either

s ke  
strje  
para  
mod  
ele  
več  
mod  
lame  
velik  
(αAl  
nate

obd  
izbc  
hon  
in c  
19].  
mo  
om  
hitr  
inol  
litje  
ma  
sko  
zna  
inte  
mik  
por  
por  
vrs  
alu  
go  
osi  
pa  
pre  
ras  
in  
in  
ele  
ne

zli  
pr  
litj  
ob

s kemijsko modifikacijo ali s prilagajanjem strjevanja, npr. prilagajanje tehnoloških parametrov [9]. Na splošno je mogoče modifikacijo Al-Si doseči z dodajanjem elementov-primesi v sledovih [10–13] ali z večjo hitrostjo strjevanja [14–17]. Namen modifikacije je sprememba morfologije iz lamelne/acikularne v vlaknasto, zmanjšanje velikosti in interfaznega razmika evtektika ( $\alpha\text{Al} + \beta\text{Si}$ ), vse skupaj pa vodi v povečanje natezne trdnosti.

Udrobnevanje je pomemben del obdelave taline, cilj katerega je tudi izboljšanje mehanske trdnosti, duktilnosti, homogenosti, napajanja med strjevanjem in drugih želenih lastnosti zlitin Al-Si [18, 19]. Velika hitrost hlajenja, ki jo zagotavljajo moderne livne tehnologije (HPDC), omogočajo udrobnevanje zahvaljujoč hitremu strjevanju. Udrobnevanje skozi inokulacijo je zato ključnega pomena za litje v peščene in trajne kalupe zaradi manjše hitrosti ohlajanja. Prav tako je za skoraj »evtektične« kompozitne zlitine značilen kratek temperaturno-časovni interval strjevanja, ki vodi v razvoj drobne mikrostrukture, sestavljene iz enakomerno porazdeljenega evtektika. Na splošno ponuja paradigma potenciala nukleacije vrsto razlag mehanizma udrobnevanja v aluminijevih zlitinah. En dobro poznani model govori o »paradigmi nukleacije« [20], ki se osredotoča na nukleacijske dogodke, drugi pa o »paradigmi raztopljenih elementov«, ki preučujejo učinek raztopljenih elementov na rast zrn. Oba modela sta zelo pomembna in ju je treba upoštevati sočasno [20, 21], in sicer z vključitvijo vpliva raztopljenih elementov na omejeno rast [20] ter »model neomejene rasti« [18].

Ta raziskava obravnava evtektično zlitino EN AC AlSi12 (EN AC 44100), predvideno za proizvodnjo z visokotlačnim litjem (HPDC). Učinek različnega načina obdelave zlitine AlSi12 na mikrostrukturo

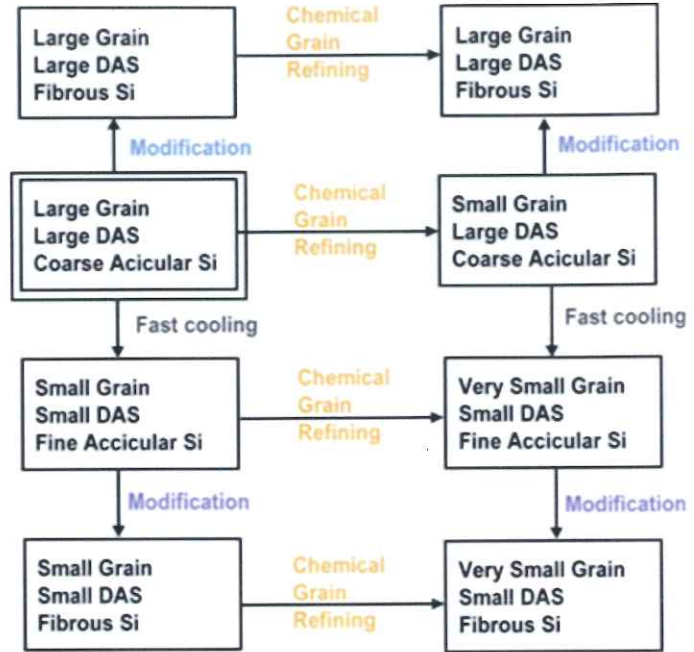
by chemical modification or adjusting solidification i.e. technological parameters [9]. In general Al-Si modification can be achieved through additions of trace impurity elements [10–13] or increased solidification rate [14–17]. The intention of modification is to change the morphology from lamellar/acicular to fibrous, reduce the size and interphase spacing of eutectic ( $\alpha\text{Al} + \beta\text{Si}$ ), which all comprehend to the increase of tensile strength.

Grain refining is an important part of melt treatment used also with the aim of improvement of mechanical strength, ductility, homogeneity, feeding during solidification and other desired properties of Al-Si casting alloys [18, 19]. High cooling rate obtained by recent casting technologies (HPDC) enables grain refinement due to rapid solidification process. Grain refinement by inoculation is therefore of essential importance for sand- and permanent mould casting due to the lower cooling rate. Also, near "eutectic" composition alloys are characterized with narrow temperature-time solidification interval, which also comprehends to the development of fine microstructure consists of uniformly distributed eutectic. In general, nucleation potential paradigm offers a number of explanations of grain refinement mechanisms in aluminum alloys. Two well-known models deal with "nucleant paradigm" [20] which is focused to nucleation event and the other "solute element paradigm", which consider the effect of solute elements on grain growth. Both models are very important and should be considered simultaneously [20, 21] by the incorporating of solute element influence effect on growth restriction [20] and "free growth model" [18].

This investigation deals with EN AC AlSi12 (EN AC 44100) eutectic alloy intended for high pressure die casting. AlSi12 alloy processed with different mode

SI. 1. Vpliv obdelave taline na nastanek mikrostrukture v zlitini [22]

Fig. 1. Influence of melt treatment on the alloy microstructure development [22]



in mehanske lastnosti je bil spremljan z namenom zagotavljanja kakovosti. Uporabljen način obdelave taline zajema modifikacijo eutektika z dodatkom predzlitine AISr10 v vseh primerih raziskave. Razlika med načinom obdelave taline je bila v ciljno dodajanje predzlitine AlTi5B. Različen učinek je mogoče pričakovati zaradi razmerja med obdelavo taline in parametri livne tehnologije, kot je prikazano na SI. 1.

Hipoteza preučevanja temelji na predpostavki, da lahko ciljna obdelava taline vpliva na način strjevanja, razvoj mikrostrukturnih lastnosti in končno dosego mehanskih lastnosti zlitine skladno z ustrezno geometrijo litja in/ali uporabo tehnologije.

## 2 Eksperimentalno delo

V eksperimentalnem delu so bili med drugim določene mikrostruktura in

of melt treatment was monitored for quality insurance. The applied melt treatment mode consists of the modification of eutectic with addition of AISr10 master alloy in all investigated cases. The difference in melt treatment mode was targeted addition of AlTi5B master alloy. A different effect can be expected due to the different relationship between melt treatment and casting technology parameters as shown in Fig. 1.

The hypothesis of the examination is based on the assumption that targeted melt treatment can influence the solidification manner, development of microstructural characteristics and finally achieving mechanical properties of the alloy in accordance to corresponded casting geometry and/or technology application.

## 2 Experimental procedure

Experimental included determination of AlSi12 (EN AC-44100) alloy microstructure

mehanske lastnosti zlitine AISi12 (EN AC-44100). Preiskovalne metode so obsegale taljenje in pripravo kemijske sestave skladno z zahtevami. Kemijska sestava je bila določena »in situ« z uporabo analizatorja za kovine SPECTROMAXx OES Metals Analyzer pred obdelavo taline s predzlitinami in po njej.

Predobdelava taline je zajemala razplinjanje z dušikom (N<sub>2</sub>) z uporabo naprave MTS 1500 - Foseco. Obdelava taline je bila prav tako izvedena skozi modifikacijo AISr10 in v drugi fazi z udrobnjevanjem skozi cepljenje s predzlitino AlTi5B.

Poskus je obsegal gravitacijsko litje zlitine v standardno celico croning in kalup ASTM B108 [23]. Enostavna termična analiza med ohlajanjem/strjevanjem taline v celici croning je bila v obeh primerih izvedena z uporabo naprave NI-9211, opremljene z modulom NI cDAQ-9172. Numerična simulacija strjevanja in napoved poroznosti ulitka ASTM B108 sta bili izvedeni s programsko opremo ProCast.

Preiskave lastnosti mehanske trdnosti so bile izvedene z univerzalno testno napravo Zwick 50 kN pri sobni temperaturi T = 20 °C skladno s standardom EN 10002-1:1998 [24].

Vzorci za metalografsko analizo smo pripravili s standardnim metalografskim postopkom za pripravo z brušenjem in poliranjem, sledilo pa je jedkanje v 0,5-odstotni fluorovodikovi kislini. Metalografska analiza je bila izvedena z uporabo optičnega mikroskopa Olympus GX51, njen namen pa je bil vizualna identifikacija določenih sestavin mikrostrukture. Mikrostrukture so bile posnete z digitalnim fotoaparatom Olympus DP70, analiza pa je bila izvedena s programsko opremo Analysis@MaterialsResearchLab. Podrobne mikrostrukturne preiskave so bile izvedene z vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM)

and mechanical properties. Investigation methodology comprised melting and preparation of requested chemical composition according specifications. Chemical composition was determined "in situ" using SPECTROMAXx OES Metals Analyzer prior and after the melt treatment with master alloys.

Melt pretreatment covered degassing of the melt with the nitrogen (N<sub>2</sub>) using a MTS 1500 - Foseco equipment. Melt treatment was also performed through modification with AISr10 and in second stage with and without grain refinement by inoculation using AlTi5B master alloy.

The experiment included gravity casting of an alloy in standard croning cell and ASTM B108 mould [23]. A simple thermal analysis was performed during cooling/solidification of the melt in the croning cell for both cases of melt treatment using NI-9211 device equipped with NI cDAQ-9172 module. Numerical simulation of solidification and porosity prediction of ASTM B108 casting was performed using the ProCast software.

Mechanical tensile properties investigations were performed on universal testing machine Zwick 50kN, at room temperature T = 20 °C in accordance to EN 10002-1:1998 [24].

Samples for metallographic investigation were prepared by standard metallographic preparation procedure by grinding and polishing, followed by etching in 0.5% HF. A metallographic analysis was performed using an optical microscope Olympus GX51 in order to visually identify particular microstructural constituents. Microstructures were acquired using the digital camera Olympus DP70, while the analysis was performed by Analysis@MaterialsResearchLab software. Detailed microstructural investigations were performed by using a scanning electron microscope (SEM) Tescan Vega TS 5136



Tescan Vega TS 5136 MM, opremljenim z energijsko disperzivnim spektrometrom (EDS) Bruker.

MM equipped with an energy dispersive spectrometer (EDS) Bruker.

### 3 Rezultati in razprava

Preiskava kemijske zlitine AlSi12 (EN AC-44100) je razkrila vrednosti, primerljive z zahtevaniami [2], kot je prikazano v Preglednici 1. Kemijska sestava preiskovanega vzorca je odvisna od obdelave taline z dodatkom sredstva za udobnjevanje (AlTi5B). Vzorci so ustrezno označeni:

- M z dodatkom modifikatorja AlSr10 in
- MI z dodatkom modifikatorja AlSr10 in sredstva za udobnjevanje AlTi5B.

Za zlitino AlSi12 (EN AC-44100) je značilno visoko razmerje Fe:Mn  $\approx$  1:1. Primerjava kemijske sestave je pokazala konsistentno vsebnost zanimivih elementov, razen po dodatku Ti in B.

Numerična simulacija strjevanja zlitine AlSi12 (EN AC-44100) v kalupu ASTM B108 z uporabo programske opreme ProCast je po polnjenju in strjevanju pokazala značilne stopnje strjevanja kot tudi napovedala poroznost končnega ulitka, kot je prikazano na Sl. 2.

Numerične simulacije razkrivajo vroče točke v spodnjem delu ulitka. Čeprav polnjenje kalupa in strjevanje ne trajata dlje

### 3 Results and discussion

The chemical composition of AlSi12 (EN AC-44100) alloy investigation resulted with values compared with the required one [2], as shown in Table 1. The chemical composition of investigated samples differs in melt treatment by addition of inoculant (AlTi5B). The samples are respectively marked:

- M with addition of AlSr10 modifying agent and
- MI with addition of AlSr10 modifying agent and AlTi5B inoculation agent.

The AlSi12 (EN AC-44100) alloy specificity is high ratio Fe : Mn  $\approx$  1 : 1. The C chemical composition comparison indicated consistent content of interesting elements except for afterward added Ti and B.

The numerical simulation of AlSi12 (EN AC-44100) alloy solidification in ASTM B108 mould using ProCast software resulted in follow-up of filling and solidification path in characteristic solidification stages as well as prediction of porosity in final casting, as shown in Fig. 2.

#### Preglednica 1. Kemijska sestava zlitine AlSi12 (EN AC-44100)

Table 1. Chemical composition of AlSi12 (EN AC-44100) alloy

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	B	Sr	V
[2]	11.9	0,42	0,11	0,46	0,04	0,01	0,00	0,04	0,03	0,003	0,01	0,01
	3	6	6	5	6	1	7	4	6	4	2	2
M	12,4	0,46	0,11	0,45	0,04	0,01	0,00	0,04	0,03	0,003	0,01	0,01
	9	8	4	5	7	0	6	3	8	5	6	2
MI	12,5	0,47	0,11	0,44	0,04	0,01	0,00	0,04	0,06	0,007	0,01	0,01
	1	4	4	9	5	0	7	3	4	4	7	7



(a) 1

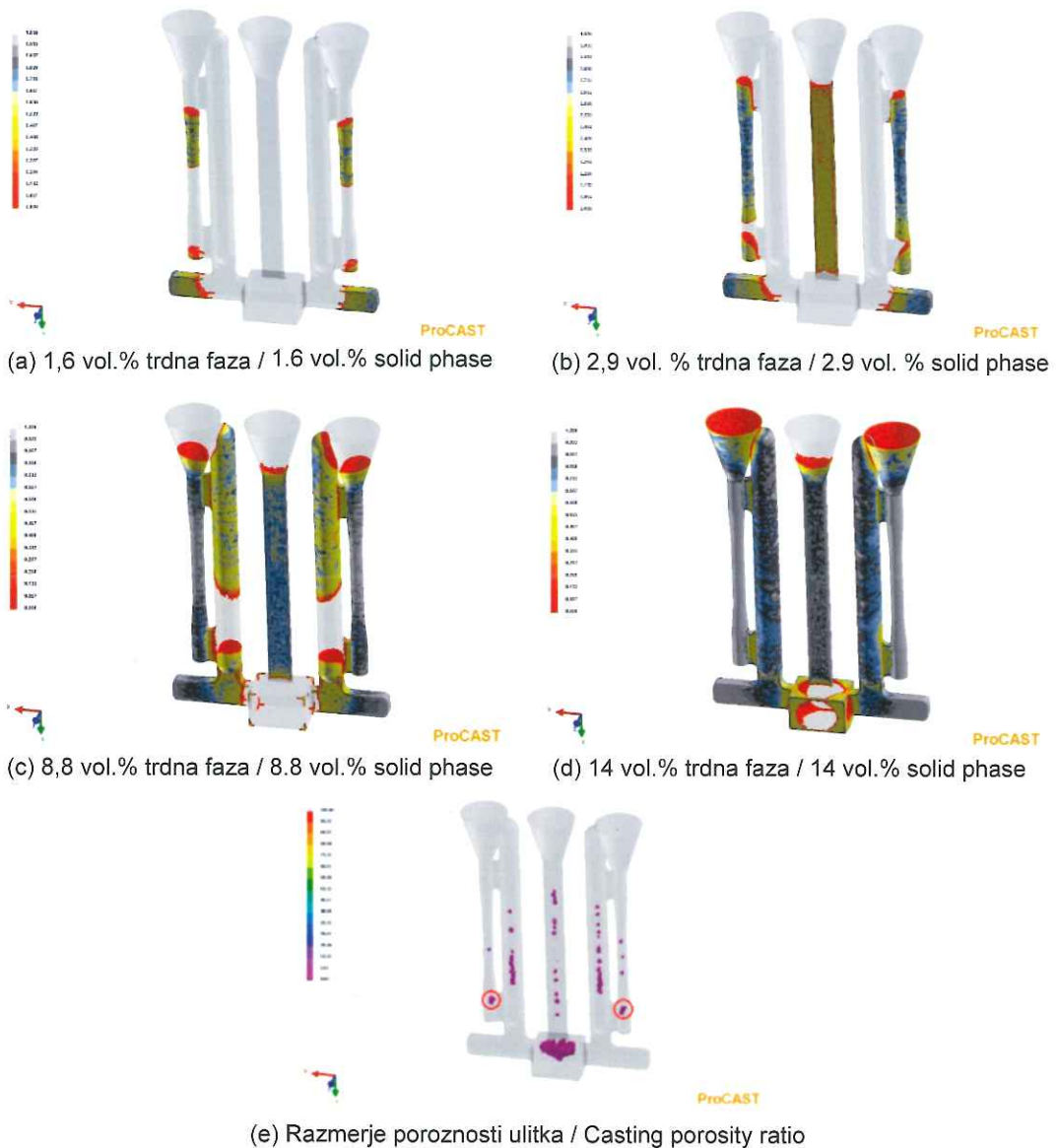


(c) 8

Sl. 2.

Fig. 2

kot 12 kalup količr strjev



SI. 2. Potek strjevanja in končna poroznost ulitka

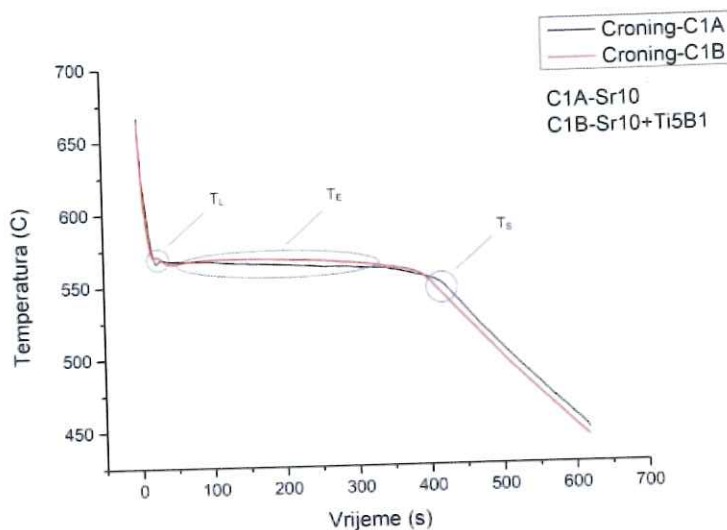
Fig. 2. Solidification path and final porosity in casting

kot 120 sekund, nastaja zaradi predgrevanja kalupa (140 °C) in primerne toplote količnika med talino in kalupom ter intervala strjevanja zlitine AlSi12 poroznost v vročih

Results of numerical simulation indicate hot spots in lower part of the casting. Although the total time of filling and solidification does not exceed 120s, due to

Sl. 3. Krivulje hlajenja ulitka celice Croning zlitine AlSi12

Fig. 3. Cooling curves of AlSi12 alloy croning cell casting



točkah. Simulacija ni razkrila bistvenih razlik v strjevanju med vzorcema M in MI.

V celici Croning izvedena termična analiza je razkrila krivulje ohlajanja osnovne M (C1A) in obdelane MI (C1B), kot je prikazano na Sliki 3

Značilna odvisnost temperatura-čas je razkrila vpliv dodatka modifikatorja med začetnimi fazami strjevanja skozi nižanje podhladitve likvidusa in krajšanje intervala strjevanja.

Mikrostrukturne preiskave z uporabo svetlobne in elektronske mikroskopije so bile izvedene na istih vzorcih iz celice (Sl. 4) kot tudi na vzorcih ASTM B108 (Sl. 5) in dotočnih delih (Sl. 6) ulitka po mehanski preiskavi.

V obeh primerih je bilo mogoče opaziti nastanek dendritske mreže. V obdelanem vzorcu je mogoče opaziti povišano razmerje  $\alpha_{Al}$ , ki označuje prednostno tendenco razvoja primarnega dendrita. Večje povečave so razkrile mešano morfologijo eutektika (igličasno in vlaknasto), povezano s prekomerno modifikacijo. Visokotemperaturna železna intermetalna faza obdaja primarni  $\alpha_{Al}$ . Njihova morfologija se pojavlja v igličasti

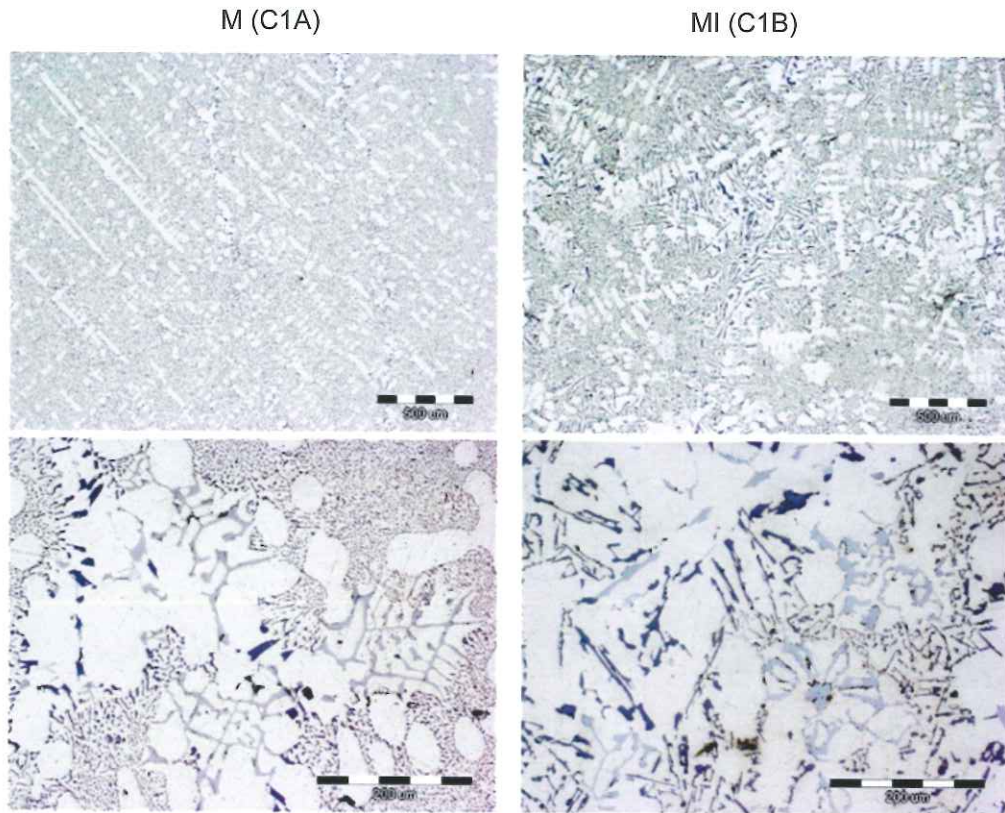
mould preheating (140°C) and adequate thermal coefficient of heat conductivity between melt and mould as well due to narrow solidification interval of AlSi12 alloy, porosity occurs in hot spots. Simulation does not reveal significant difference in solidification path for M and MI samples.

A thermal analysis performed in croning cell resulted in cooling curves of base M (C1A) and refined MI (C1B) melt, as shown in Figure 3.

Characteristic temperature-time dependence revealed an influence of inoculant addition in the initial solidification stages by lowering the liquidus undercooling and shortening the solidification time interval.

Microstructural investigation using light and electron microscopy was performed on the same samples from croning cell (Fig. 4) and as well on ASTM B108 samples from test (Fig.5) and inflow part (Fig 6) of the casting after mechanical investigation.

In both cases, dendritic network development has been noticed. In refined sample, a higher ratio of  $\alpha_{Al}$  is observed which indicate preferred tendency to primary dendrite development. Higher



SI. 4. Mikrostruktura osnovne (M) in obdelane (MI) zlitine AlSi12 iz celice Croning

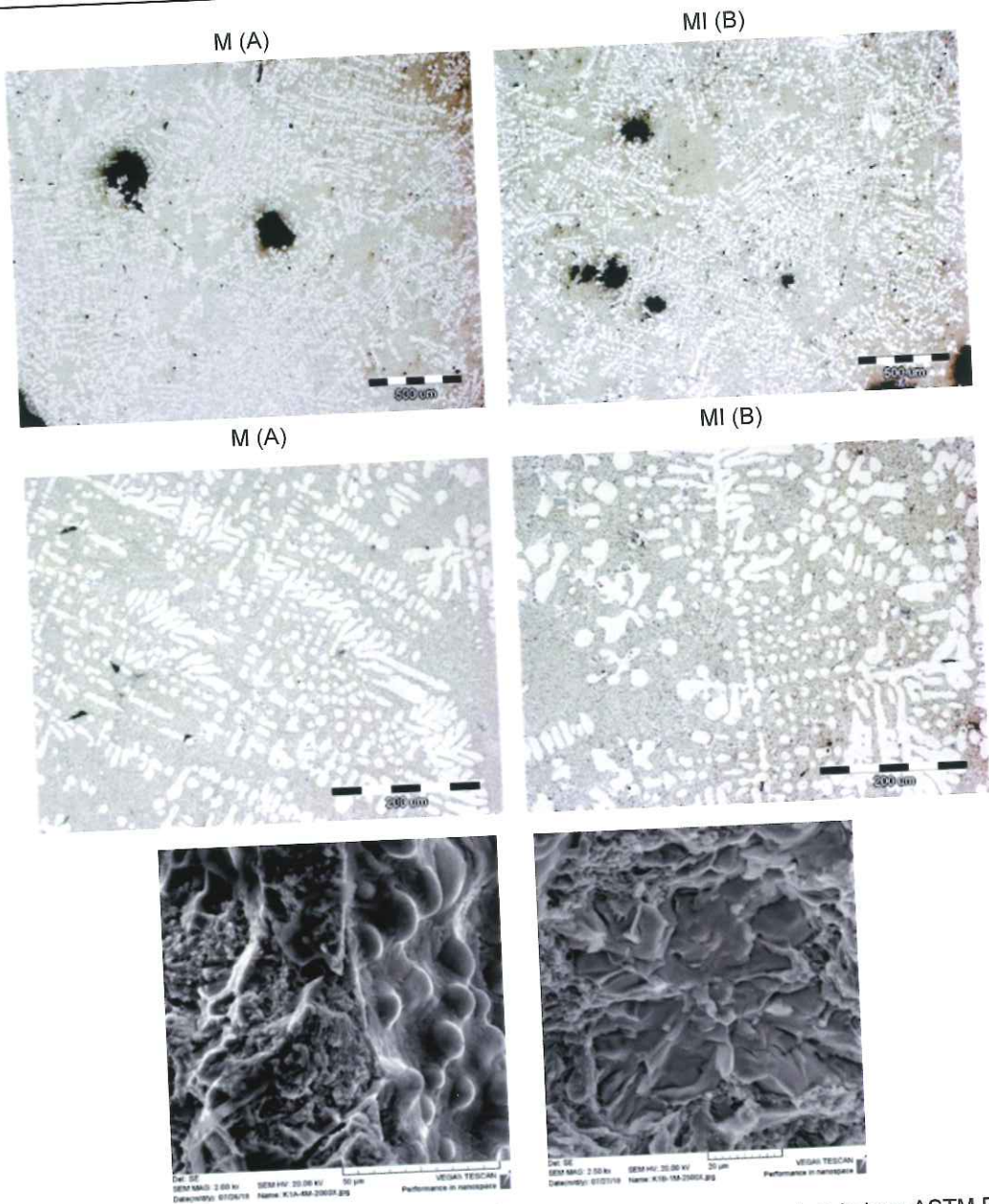
Fig. 4. Microstructure of the base (M) and refined (MI) AlSi12 alloy from croning cell

obliki kot  $Al_5FeSi$  zaradi značilno nizke hitrosti ohlajanja v celici Croning in  $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$  v obliki kitajskih pismenk zaradi visoke vsebnosti Mn.

Za testni del ulitka ASTM B108 je značilen položaj roba v kalupu in manjši premer preseka ter posledično višji temperaturni gradient med strjevanjem. Mikrostruktura na mestu oziroma v bližini mehanske preiskave nastanka razpoke je v obeh primerih razkrila plinsko poroznost, nastanek dendritske mreže in eutektične celice. Dendritska mreža je bolj drobna in v obdelanem vzorcu so dendriti fragmentirani (MI-B). Eutektiki se razkrijejo

magnification revealed mixed morphology of eutectic (needle and fibrous) correlated to over modification. High-temperature iron intermetallic surrounds primary  $\alpha_{Al}$ . Their morpholog appears as  $Al_5FeSi$  in needle-like form due to characteristic low cooling rate in croning cell and  $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$  in Chinese script form due to high Mn content.

Test part of ASTM B108 casting is characterised by edge position in the mould and small diameter in cross section, and therefore higher temperature gradient during solidification. Microstructure observed at position at/near the mechanical investigation fracture occurrence, revealed gas porosity,



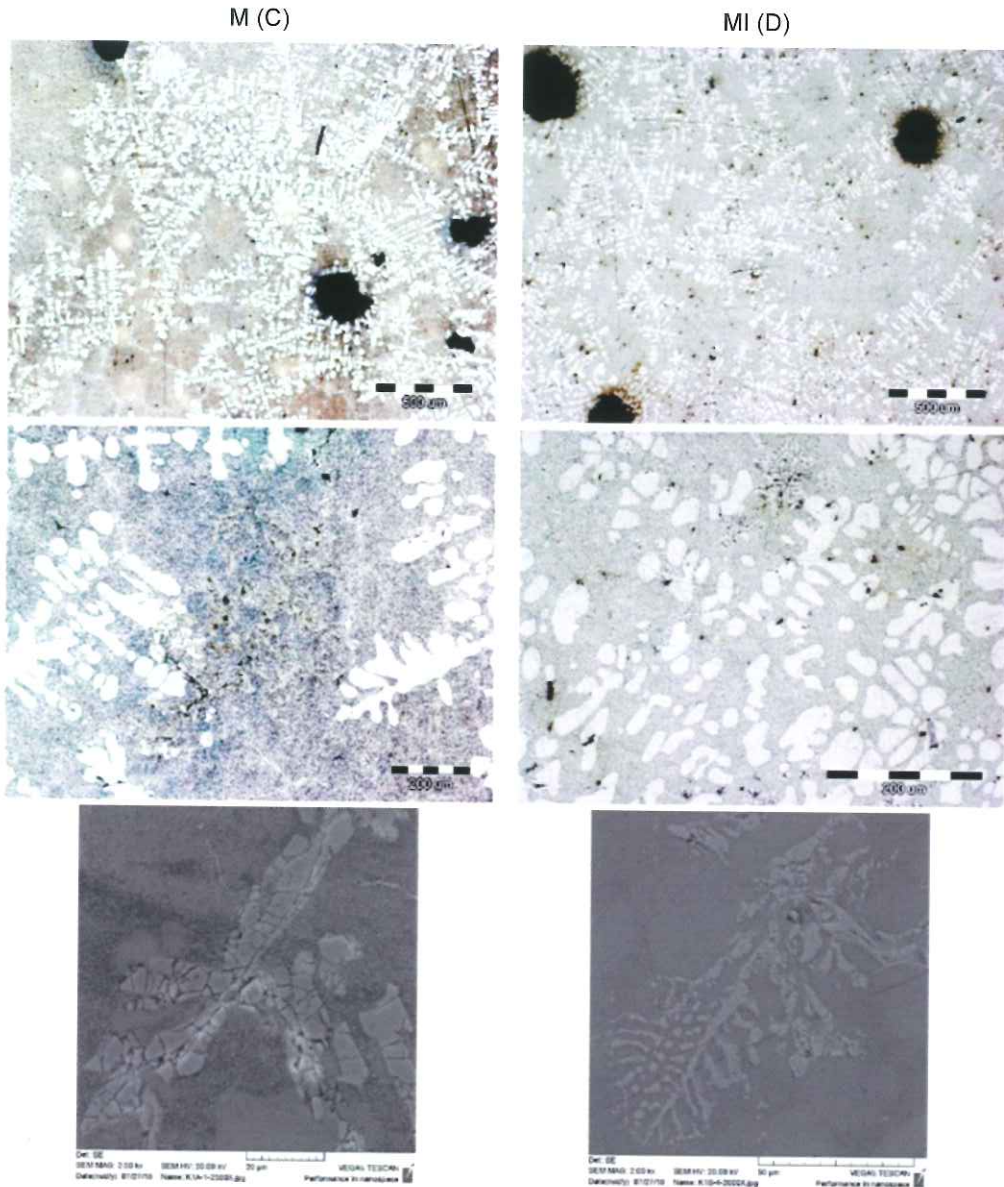
**SI. 5.** Mikrostruktura osnovne (M) in obdelane (MI) zlitine AlSi12 iz testnega dela kalupa ASTM B108  
**Fig. 5.** Microstructure of the base (M) and refined (MI) AlSi12 alloy from test part of ASTM B108 mould

v drobni vlaknasti in popolnoma modificirani morfoloiji. Fraktografija osnovnega vzorca

developed dendrite network and eutectic cells in both cases. The dendrite network

M prikazuje duktilnost oziroma krhkost celotnih dendritov  $\alpha_{Al}$  in obdajajočega eutektika. Fraktografija obdelanega vzorca

is finer and dendrites are fragmented in refined sample (MI-B). Eutectic reveals in fine fibrous and completely modified



SI. 6. Mikrostruktura osnovne (M) in obdelane (MI) zlitine AlSi12 iz dotočnega dela kalupa ASTM B108

Fig. 6. Microstructure of the base (M) and refined (MI) AlSi12 alloy from inflow part of ASTM B108 mould

MI razkriva popolno duktilno razpoko po celotnem eutektiku in intermetalni fazi Al-Fe-Mn-Si.

Dotočni del ulitka ASTM B108 je bližje osrednjemu delu ulitka in za ta predel je značilen večji premer preseka, kar pomeni nižjo hitrost hlajenja in strjevanja, kot je bilo napovedano z numerično simulacijo. Tehnološko stanje strjevanja potrjuje grobo mikrostrukturo, ki razkriva tudi visoko razvito dendritsko mrežo, ki je bolj enakomerno porazdeljena v obdelanem vzorcu (vzorec MI). Eutektik je v vlaknati morfologiji je popolnoma modificirana. Opaziti je bilo mogoče močno poroznost zaradi plina. Poroznost predstavlja šibko točko, kjer lahko pride do okvar oziroma napak. Večje povečave razkrijejo bolj grobo, a fragmentirano intermetalno fazo Al-Fe-Mn-Si, medtem ko je podobna struktura v obdelanem vzorcu mnogo bolj drobna.

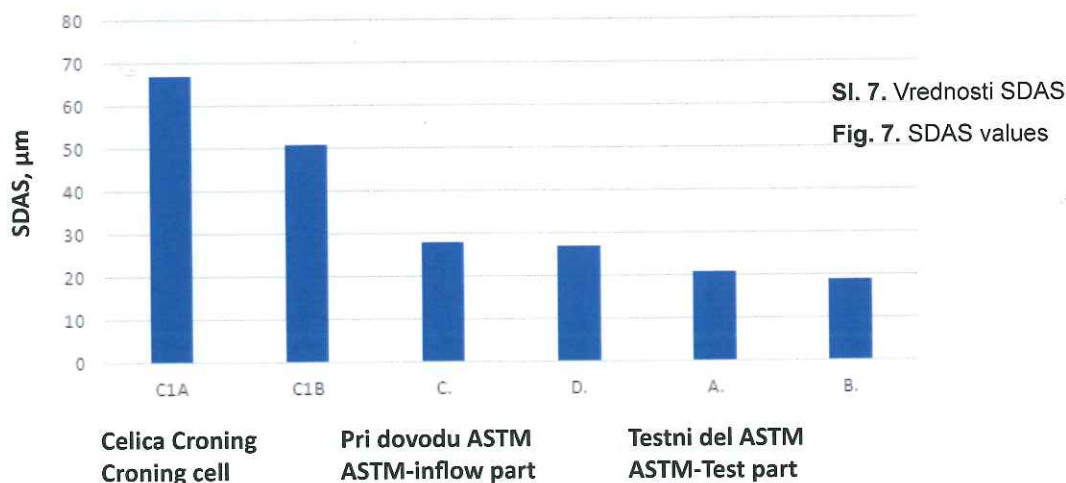
Analiza mikrostrukture omogoča primerjavo SDAS (Secondary Dendrite Arm Spacing) vseh preiskovanih vzorcev, kot je prikazano na Sl. 7.

Vrednosti SDAS potrjujejo spremembe, zaznane v mikrostrukturi. Vrednost SDAS se povečuje z višjo hitrostjo hlajenja/strjevanja (celica croning, pri dovodu, testni del).

morphology. Fractography of the base sample M indicates mixed ductile-brittle fracture nature across the primary  $\alpha$ Al dendrites and surrounding eutectic. Fractography of refined sample MI reveals completely ductile fracture across the eutectic and Al-Fe-Mn-Si intermetallic.

The inflow part of ASTM B108 casting is closer to the central part of the casting and this area is characterized with the larger diameter in cross section, and therefore lower cooling and solidification rate as predicted by numerical simulation. The technological condition of solidification is confirmed by a rough microstructure that also reveals a highly developed dendritic network which is more uniformly distributed in the refined sample (sample MI). The eutectic is completely modified in fibrous morphology. Large gas porosity can be observed. Porosity represents a weak place suitable for failure. Higher magnification reveals the rougher but fragmented Al-Fe-Mn-Si intermetallic, while the similar one in refined sample is much finer.

Microstructure analysis enables SDAS (secondary dendrite arm spacing) comparison for all investigated samples presented in Fig. 7.



Prav tako se zmanjša ob udrobnjevanju pri enakih pogojih strjevanja.

Preiskava mehanskih lastnosti je bila izvedena na vzorcih iz testnega in na dovodu dela ulitka ASTM B108. Pridobljena natezna trdnost ( $R_m$ ) in raztezek ( $A_{50}$ ) sta predstavljena v Preglednici 2.

**Preglednica 2.** Mehanske lastnosti vzorca zlitine AlSi12 iz kalupa ASTM B108

**Table 2.** Mechanical properties of AlSi12 alloy samples from ASTM B108 mould

Vzorec / Sample	Obdelava taline / Melt treatment	$R_m$ , [N/mm <sup>2</sup> ]	$A_{50}$ , [%]
A. (testni del)	M	216,25	2,91
B. (testni del)	MI	178,76	1,19
C. (na dovodu del)	M	198,88	4,36
D. (na dovodu del)	MI	187,89	3,54

Pridobljeni rezultati ustrezajo zahtevam standarda EN 1706. Nižja hitrost ohlajanja (vzorci dotočnih delov) zmanjša natezno trdnost in sočasno poveča raztezek zaradi večjega časovno-temperaturnega intervala strjevanja. Zaznana poroznost, ki je večja pri dovodih delih, prav tako pričča o zmanjšani natezni trdnosti. Na splošno je cepljenje vplivalo na mikrostrukturne spremembe v smeri proti enakomerni porazdelitvi drobne dendritske morfologije, čeprav ni imelo pozitivnega učinka na izboljšanje mehanskih lastnosti, tj. niti natezne trdnosti niti raztezka. Nasprotno – višja hitrost ohlajanja (testni del) in udrobnjevanje vodita do najnižjih mehanskih lastnosti.

Korelacija med izboljšanjem pridobljene mikrostrukture in rezultati natezne trdnosti je potrdila, da je eutektična zlitina AlSi12 (EN AC 44100) primernejša za proizvodnjo

SDAS values confirmed observed changes in microstructure. SDAS is decreasing with the increase of cooling / solidification rate (crowning cell, inflow part, test part). It also decreases with applied grain refinement within the same solidification conditions.

Mechanical properties investigation was performed on samples from test and inflow part of the ASTM B108 casting. Obtained tensile strength ( $R_m$ ) and elongation ( $A_{50}$ ) are presented in Table 2.

The obtained results correspond to those required by EN 1706 norm. Lower cooling rate (inflow part samples) decreases the tensile strength with simultaneously increasing of elongation due to wider solidification time-temperature interval. Observed porosity also, larger in size in inflow part, also comprehends to the decrease of tensile strength. In general, inoculation did affect the microstructural change towards the uniformly distributed fine dendrite morphology, although it did not have a positive effect on improvement of mechanical properties neither tensile strength nor elongation. On the contrary, a higher cooling rate (test part) and applied grain refinement revealed the lowest values of followed mechanical properties.

Correlation of obtained microstructure improvement and tensile strength results, confirmed that eutectic AlSi12 (EN AC 44100) alloy is more suitable for thin wall casting produced with HPDC technology without additional grain refinement.

#### 4 Conclusions

Targeted melt treatment can influence the solidification manner, development of microstructural features and application finally achieving mechanical properties of the alloy. Obtained results should be correlated



tankostenskih ulitkov brez dodatnega udrobnjevanja.

#### 4 Sklepi

Ciljna obdelava taline lahko vpliva na način strjevanja, razvoj mikrostrukturnih lastnosti in uporabo ter končno dosego mehanskih lastnosti zlitine. Pridobljene rezultate je treba uskladiti z ustreznimi livnimi geometrijami in tehnologijami. Preiskava EN AC evtektične zlitine AISi12 (EN AC 44100) z visoko vsebnostjo Fe in Mn je obsegala različne načine obdelave taline: modifikacije evtektika z dodatkom AISr10 in ciljni dodatek inokulanta AlTi5B. Preiskave so vodile v naslednje zaključke:

- rezultati numerične simulacije razkrivajo vroče točke v spodnjem delu ulitka ASTM B108, tehnološki parametri ulitka v kombinaciji z majhnih intervalom strjevanja zlitine AISi12 nakazujejo pojavnost poroznosti v vročih točkah, ki predstavljajo šibke točke in mesta pomanjkljivosti;
- udrobnjevanje zmanjša podhlajanje likvidusa in skrajša čas intervala strjevanja zlitine AISi12;
- mikrostrukturne preiskave so razkrile razvoj dendritske mreže, ki jo obdajajo evtektične celice, višje vsebnosti Fe in Mn v razmerju 1:1 vodijo v razvoj intermetalnih faz Al-Fe-Mn-Si, udrobnjevanje vpliva na zmanjšanje in/ali fragmentacijo mikrogradnikov, še posebej  $\alpha$ Al, cepljenje prispeva k enakomerni porazdelitvi dendritov  $\alpha$ Al in zmanjšanju vrednosti SDAS, višja hitrost ohlajanja prispeva tudi k udrobnjevanju in zmanjšanju vrednosti SDAS pod enakimi pogoji strjevanja;
- čeprav pridobljene mehanske lastnosti ustrezajo zahtevam standarda EN 1706, udrobnjevanje na mehanske lastnosti ni imelo absolutnega pozitivnega učinka, nižja hitrost ohlajanja (vzorci dovodnih delov) zmanjša natezno trdnost in sočasno poveča raztezek, višja hitrost ohlajanja (vzorci testnih delov) in udrobnjevanje vodita do najnižjih mehanskih lastnosti.

to corresponded casting geometry or technology. Investigation of EN AC AISi12 (EN AC 44100) eutectic alloy with high Fe and Mn content, included different mode of melt treatment: modification of eutectic with addition of AISr10 and targeted addition of AlTi5B inoculant. Investigation revealed following conclusions:

- Results of numerical simulation indicate hot spots in lower part of the ASTM B108 casting. Technological parameters of casting in combination with narrow solidification interval of AISi12 alloy comprehends to the porosity occurrence in hot spots which represent a weak place and failure position.
- Grain refinement lowers the liquidus undercooling and shortens the solidification time interval of AISi12 alloy.
- Microstructural investigation reveals a dendrite network development surrounded by eutectic cells. Higher content of Fe and Mn and their ratio 1:1 comprehends to the development of Al-Fe-Mn-Si intermetallic. Grain refinement influences on the decrease and/or fragmentation of the microconstituents, in particularly  $\alpha$ Al. Inoculation contributes to the uniform distribution of  $\alpha$ Al dendrites and lowering the SDAS. A higher cooling rate also comprehends to the grain refinement and SDAS decreasing within the same solidification conditions.
- Although the obtained mechanical properties correspond to those required by EN 1706 norm, grain refinement did not have absolutely positive effect on mechanical properties. A lower cooling rate (inflow part samples) decreases the tensile strength with simultaneously increasing of elongation. A higher cooling rate (test part samples) and

Eutektična zlitina AlSi12 (EN AC 44100) z visoko vsebnostjo Fe in Mn v razmerju Fe:Mn = 1:1 je, glede na raziskave mikrostrukture in mehanskih lastnosti, najprimernejša za tankostenske ulitke (višje hitrosti hlajenja) in ne predvideva dodatnega udrobnjevanja.

grain refinement revealed the lowest values of mechanical properties.

Eutectic AlSi12 (EN AC 44100) alloy with high Fe and Mn content and Fe:Mn=1:1 ratio, according to microstructural and mechanical properties investigation is mostly suitable for thin wall casting (higher cooling rates) without additional grain refinement.

#### Viri / References:

- [1] ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys. Ohio: ASM International, Materials Park 1993.
- [2] EN 1706:2010 Aluminium and aluminium alloys – Castings – Chemical composition and mechanical properties.
- [3] ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys. Ohio: ASM International, Materials Park 1993.
- [4] D. Dispinar, J. Campbell, Metal quality studies in secondary remelting of aluminium, J. Inst. Cast Met. Eng. 2004;178:78–86.
- [5] V. Raghavan, Al-Fe-Mn-Si (Aluminum-Iron-Manganese-Silicon), Journal of Phase Equilibria and Diffusion, 2007;28:215-17
- [6] E. Tillová, M. Chalupová, L. Hurtalová, Evolution of phases in a recycled Al–Si Cast alloy during solution treatment. Phys Scanning Electron Microscopy 2012; 411–438.
- [7] T. Tański, K. Labisz, B. Krupińska, M. Krupiński, M. Król, R. Maniara R, Borek W. Analysis of crystallization kinetics of cast aluminum–silicon alloy. J Therm Anal Calorim. 2016;123:63-74.
- [8] N. Iqbal, N. H. van Dijk, S. E. Offerman, N. Geerlofs, M. P. Moret, L. Katgerman, G. J. Kearley, In situ investigation of the crystallization kinetics and the mechanism of grain refinement in aluminum alloys. Mater Sci Eng A Struct. 2006;416(1–2):18–32
- [9] T. Hosch, R.E. Napolitano, The effect of the flake to fiber transition in silicon morphology on the tensile properties of Al–Si eutectic alloys, Materials Science and Engineering A 528 (2010) 226–232
- [10] M. Garat, G. Laslaz, S. Jacob, P. Meyer, P. H. Guerin, R. Adam, Transactions of the American Foundrymen's Society 100 (1992) 821–832.
- [11] S. Z. Lu, A. Hellawell, Metallurgical Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science 18A (10) (1987) 1721.
- [12] D. C. Jenkinson, L.M. Hogan, Journal of Crystal Growth 28 (2) (1975) 187.
- [13] A. K. Dahle, K. Nogita, S. D. McDonald, C. Dinnis, L. Lu, Materials Science and Engineering A 413–414 (2005) 243–248
- [14] T. Hosch, L.G. England, R.E. Napolitano, Journal of Materials Science 44 (18) (2009) 4892–4899
- [15] M. G. Day, A. Hellawell, Proceedings Royal Society. Mathematical, Physical and

- Engineering Sciences 305 (1483), 1968, p. 473.
- [16] S. Z. Lu, A. Hellawell, Journal of Crystal Growth 73 (2) (1985) 316.
- [17] R. E. Napolitano, L. G. England, Solidification of Aluminum Alloys (2004) 445–451. [18] A. L. Greer, P.S. Cooper, M.W. Meredith, W. Schneider, P. Schumacher, J. A. Spittle, A. Tronche, Adv. Eng. Mater. 5 (2003) 81–91.
- [19] S. A. Kori, B. S. Murty, M. Chakraborty, Mater. Sci. Eng. A 283 (2000) 94–104. [20] M. Easton, D. St. John, Metall. Mater. Trans. A 30A (1999) 1613–1623.
- [21] M. Easton, D. St. John, Metall. Mater. Trans. A 30A (1999) 1625–1633
- [22] J. E. Gruzleski, B.M. Closset, The Treatment of Liquid Aluminum – Silicon Alloys, AFS, Illinois, 1999.
- [23] ASTM B108, Standard Specification for Aluminum-Alloy Permanent Mold Castings, <https://www.astm.org/Standards/B108.htm> (26.07.2018.)
- [24] EN 10002-1, 2001, Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Preizkusna metoda pri sobni temperaturi

## AKTUALNO / CURRENT

### Pregled livarskih prireditev v letih 2021 in 2022

Datum dogodka	Ime dogodka	Mesto in država
27. - 28.05.2021	Deutscher Giessereitag	Aachen, Nemčija
14. - 15.06.2021	Forum Giesserei-Industrie	Wuerzburg, Nemčija
15. - 17.09.2021	61. IFC Portorož 2021	Portorož, Slovenija
28. - 29.09.2021	Aluminium Sand- und Kokillenguss Grundlagen Block 2	Leimen, Nemčija
30.09.2021	Aluminium Bauteile gussgerecht konstruieren	Nußloch, Nemčija
08. - 09.10.2021	Zink Die Casting Conference	Koblenz, Nemčija
27. - 28.10.2021	VDI-Fachtagung »Gießtechnik im Motorenbau« 2021	Magdeburg, Nemčija
11.11.2021	Gussfehler in Leichtmetallguss-Bauteilen analysieren und richtig bewerten	Nußloch, Nemčija
02. - 03.12.2021	Formstoffbedingte Gussfehler	Düsseldorf, Nemčija
07.12.2021	Eigenschaften und Schmelztechnik der Aluminium-Gusswerkstoffe	Düsseldorf, Nemčija
07. - 08.12.2021	Prozessoptimierung in Gießereien	Bad Dürkheim, Nemčija
18. - 20.01.2022	EUROGUSS	Nuernberg, Nemčija