

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: društvo.livarjev@siol.net
Spletna stran: www.drustvo-livarjev.si

Glavni in odgovorni urednik / Chief and responsible editor:

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

Tehnično urejanje / Technical editing:

mag. Mirjam Jan-Blažić

Uredniški odbor / Editorial board:

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

Prevod v angleški jezik / Translation into English:

Marvelingua, Aljaž Seničar s.p.

Lektorji / Lectors:

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

Tisk / Print:

Fleks d.o.o.

Naklada / Circulation:

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

Letna naročnina: 35 EUR z DDV

Year subscription: 35 EUR (included PP)

Dano v tisk: junij 2018



Naslov/address:
SIAPRO d.o.o.
Postaja 9
5216 MOST NA SOČI

Direktor: Franc Jezeršek

T: +386 5 3841 632
F: +386 5 3841 630
E: info@siapro.si
www.siapro.eu

VSEBINA / CONTENTS

Stran / Page:

R. Doepp: **Prispevek k strukturi in lastnostim
temprane litine / Contribution to Structure and
Properties of Malleable Cast Iron** 60

J. H. Li, P. Schumacher: **Odkrivanje sprememb
evtektičnega Si v zlitini Al z napredno elektronsko
mikroskopijo / Revealing the modification of
eutectic Si in Al alloy by advanced electron
microscopy** 75

Franc Zupanič, Gorazd Lojen, Tonica Bončina:
**Uporaba fokusiranega ionskega snopa pri
karakterizaciji livnih Al-zlitin / Application of a
focussed ion beam by characterization of casting
Al-alloys** 86

Jianmin Shi, Helge Pries, Elisabeth Stammen, Klaus
Dilger: **Korozija in trpežnost adhezivno vezanih
tlačno litih aluminijevih zlitin / Corrosion and
Durability of Adhesively Bonded High-Pressure
Die Cast Aluminum Alloys** 95

AKTUALNO / CURRENT

Koledar livarskih prireditev 2018 102

Veliko livarsko posvetovanje treh držav 103

Razgovor s predsednikom uprave Termit d.d.,
dobaviteljem in poslovnim partnerjem livarske
industrije 110

Program Portorož 2018 115

73. svetovni livarski kongres v Krakovu, Poljska 120

Izdajanje Livarskega vestnika sofinancira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije
Publishing supported by Slovenian Research Agency
Livarski vestnik je vpisan v razvid medijev Ministrstva za kulturo pod zaporedno številko 588

Prispevek k strukturi in lastnostim temprane litine

Contribution to Structure and Properties of Malleable Cast Iron

1 Sestava in struktura

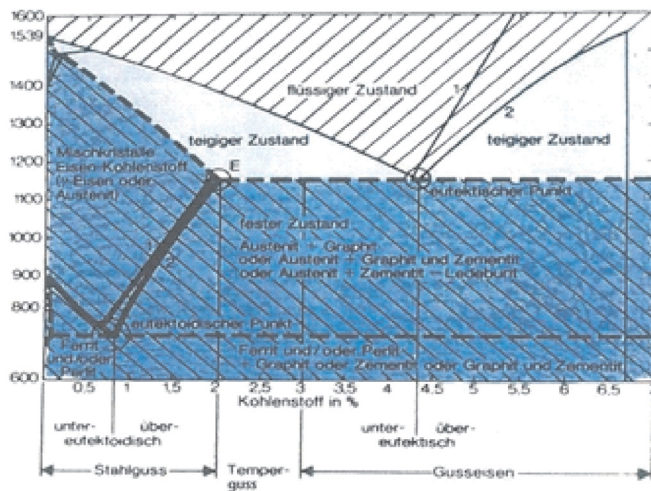
Zaradi kemijske sestave z 2–4 % C in 2–0,5 % Si skupina temprane litine prehaja od litega jekla na eni strani (najv. 2 % C) do litega železa z lamelastim, vermikularnim in sferoidnim grafitom na drugi strani (normalno z najm. 3 % C in 2 % Si). Nekaj podrobnosti je prikazano na Sl. 1 na podlagi trditev švicarskih livarn VSE 1970 [1] v primerjavi z [2].

Sl. 2 prikazana območja C in Si pri tehničnih zlitinah Fe-C-Si na podlagi trditev C. F. Waltona in T. J. Oparja [3], primerjava [4; 5], dopolnjeno z novimi standardnimi okrajšavami EN GJL, GJS, CTeL, BTeL in metalurškimi ravnotežnimi temperaturami TG za zmanjšanje SiO_2 s pomočjo C [6;

1 Composition and structure

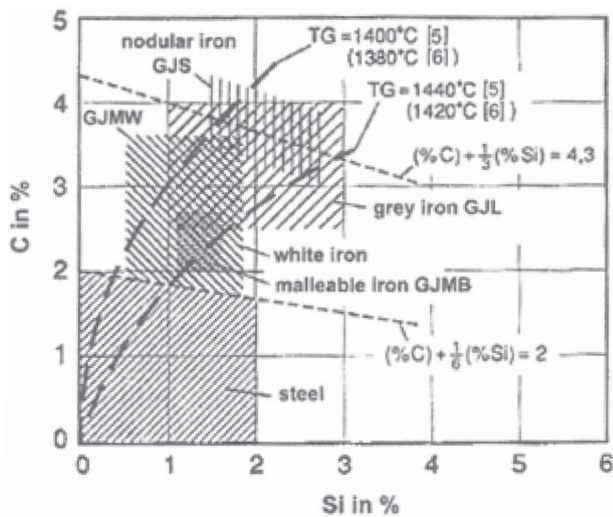
Due to its chemical composition with 2 to 4 % C and 2 to 0,5 % Si the group of malleable cast iron ranges between cast steel on the one side (max. 2 % C) and cast iron with lamellar, vermicular and spheroidal graphite on the other side (normally min. 3 % C and 2 % Si). Some details shows Fig. 1 following Swiss Iron Foundries VSE 1970 [1], compare [2].

Fig. 2 shows C- and Si-areas of technical Fe-C-Si-alloys, originally following C. F. Walton and T. J. Opar [3], compare [4;5], completed by new EN standard abbreviations GJL, GJS, GJMB, GJMW and with metallurgical equilibrium temperatures TG for the reduction of SiO_2 by C [6; 7].



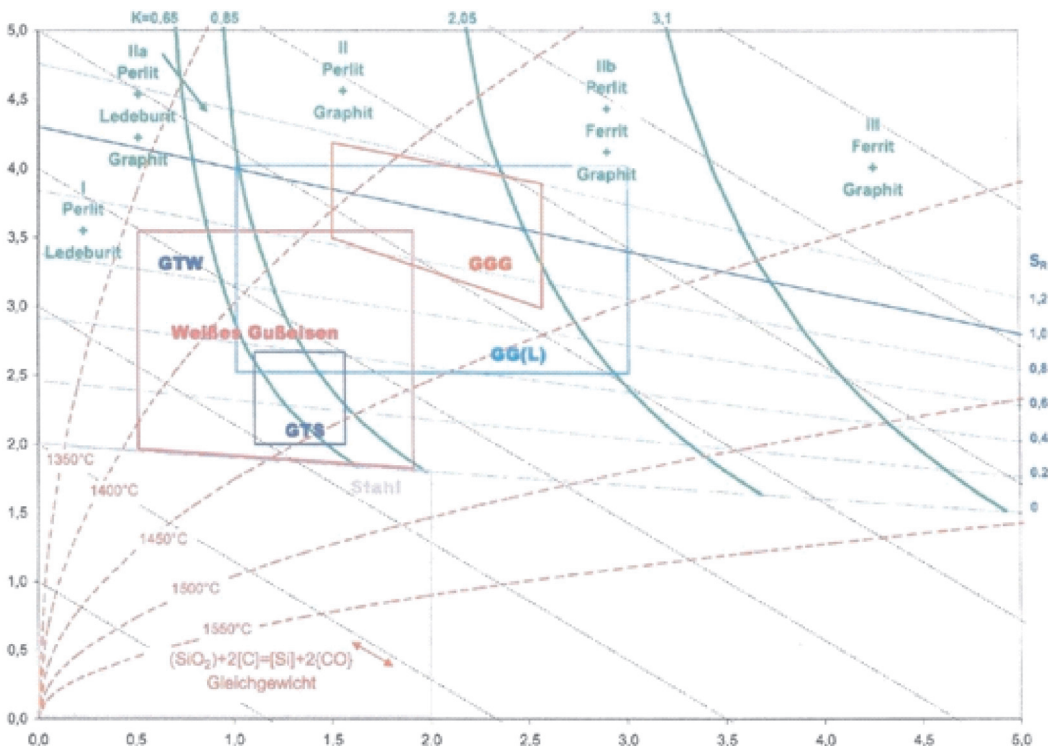
Sl. 1. Diagram Fe-C z litimi materiali Fe-C na podlagi Združenja švicarskih livarn (VSE) 1970 [1], sest. [2]

Fig. 1. Fe-C-Diagram with cast Fe-C-Materials, following Association of Swiss Iron Foundries (VSE) 1970 [1], comp. [2]



SI. 2. Območja tehničnih zlitin Fe-C-Si, prvotno na podlagi trditev C. F. Waltona in T. J. Oparja [3], dopolnjena z novimi standardnimi okrajšavami GJS, CTeL, BTeL in metalurškimi ravnotežnimi temperaturami TG za zmanjšanje SiO_2 s pomočjo C [6, 7], sest. [4, 5].

Fig. 2. Areas of technical Fe-C-Si alloys, originally by C. F. Walton and T. J. Opar [3], completed by new standard abbreviations GJL, GJS, GJMB, GJMW, and with metallurgical equilibrium temperatures for the reduction of SiO_2 by C [6,7], comp. [4,5]



SI. 3. Zadnja različica SI. 2 [9; 10]

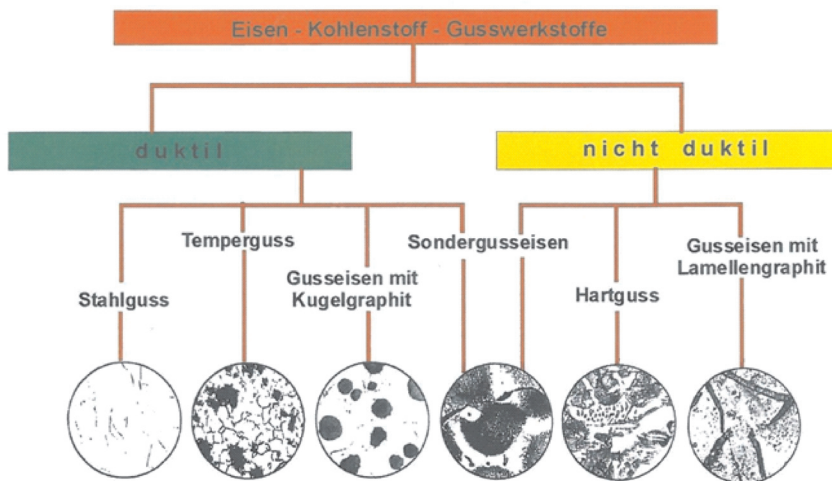
Fig. 3. Last version of Fig. 2 [9; 10]

7]. Tipična sestava je 3,5 % C in 0,5 % Si za litino BTeL ter 2,5 % C in 1,5 % Si za litino CTeL. Obe vrsti spadata med »bela železa«, kajti v litem stanju se morajo vse taline za temprano litino strditi »bela« oziroma metastabilno, pri čemer se med evtektično reakcijo tvori ledeburit »talina[^] avstenit + Fe₃C«. Vrednosti K za nagibanje h grafitiranju na podlagi trditev H. Lapanche [8] morajo biti v polju I diagrama C-Si.

Najnovejša različica Sl. 2 je Sl. 3, ki sta jo pripravila S. Ratkovic in R. Doepp [9; 10]. Pri primerjavi litine BTeL pri ravnotežni temperaturi (TG) ~1370 °C in litine GJL pri ravnotežni temperaturi (TG) ~1430 °C, pri čemer vsebujeta oba materiala 3,5 % C in različne vrednosti Si (0,5 in 2,0 %), je mogoče opaziti pozitivni učinek nižjih vrednosti ravnotežnih temperatur na belo strukturo in manjšo količino žlindre.

Typical compositions are 3,5 % C and 0,5 % Si for GJMW and 2,5 % C and 1,5 % Si for GJMB. Both types belong to "white iron", because in the as cast state all melts for malleable cast iron have to solidify "white", that means metastable, forming Ledeburite during the eutectic reaction "Melt → Austenite + Fe₃C". The K-values for graphitization tendency following H. Laplanche [8] must be located in field I of the C-Si-diagram.

The last version of Fig. 2 is Fig. 3 from S. Ratkovic and R. Doepp [9; 10]. Comparing GJMW with TG ~1370 °C and GJL with TG ~1430 °C, both materials with 3,5 % C, but different Si-values (0,5 and 2,0 %), the positive effect of lower TG-values on the tendency to white structure and reduced slag can be assumed.



Sl. 4. Duktilni in krhki liti materiali iz Fe-C), avtorji A. Engels, H. Kowalke, P. Tölke, H. G. Trapp, H. Werning: Temperguss, ein duktiler Gusseisenwerkstoff, Zentrale für Gussverwendung (ZGV), Düsseldorf 1983, str. 4, Sl. 1; sest. [9]

Fig. 4. Ductile and nonductile Fe-C-cast materials, by A. Engels, H. Kowalke, P. Tölke, H. G. Trapp, H. Werning: Temperguss, ein duktiler Gusseisenwerkstoff, Zentrale für Gussverwendung (ZGV), Düsseldorf 1983, p. 4, Fig. 1; comp. [9]

2 Struktura in lastnosti

Zaradi relativno kompaktne oblike tempranih ogljičnih grud (Sl. 4) ulitki iz temprane litine združujejo visoko trdnost z visoko voljnostjo, kar je podobno kot pri nodularni litini. Predvideni tok napetosti Sl. 5 je mnogo boljši kot pri litini GJL in podoben kot pri litini GJS, vendar pa ne dosega idealne vrste litega jekla, ki ima vselej enako kovinsko matriko.

Po drugi strani grafitni vključki neodvisno od vrste grafita izboljšujejo temperaturno prevodnost in odpornost proti toplotni deformaciji. Optimalni prenos toplote zagotavlja litina GJL, kar je eden glavnih razlogov za uporabo pri izdelavi avtomobilskih delov.

Ker ima litina BTeL razogljíčeno zgradbo oz. vsaj feritni, omogoča varjenje brez večjih težav.

Na podlagi trditev britanskega kolega Jacka Hilla (Svetovni livarski kongres v Budimpešti) številne težave nastopijo med

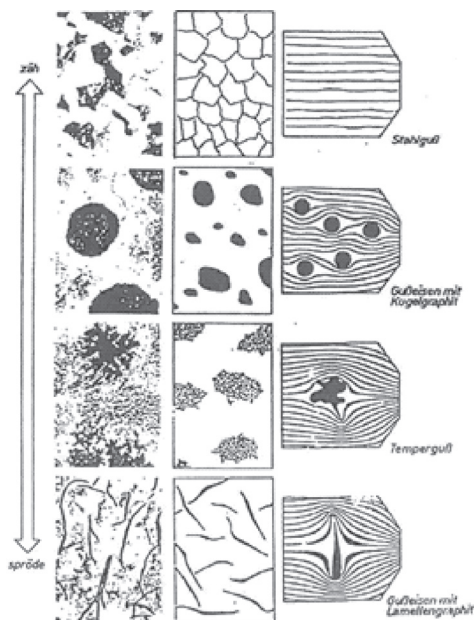
2 Structure and Properties

Due to the relative compact shape of the temper carbon nodules (Fig. 4) the malleable castings combine high strength with high ductility, similar to nodular cast iron. The assumed stress flow (Fig. 5) is far much better than with GJL and similar to GJS, but does not reach the ideal type of cast steel, always with the same metallic matrix.

On the other hand graphite inclusions, independent from the graphite type, improve heat conductivity and resistance against thermal deformation. Optimal heat transfer guarantees GJL, which is one main reason for application in automotive parts.

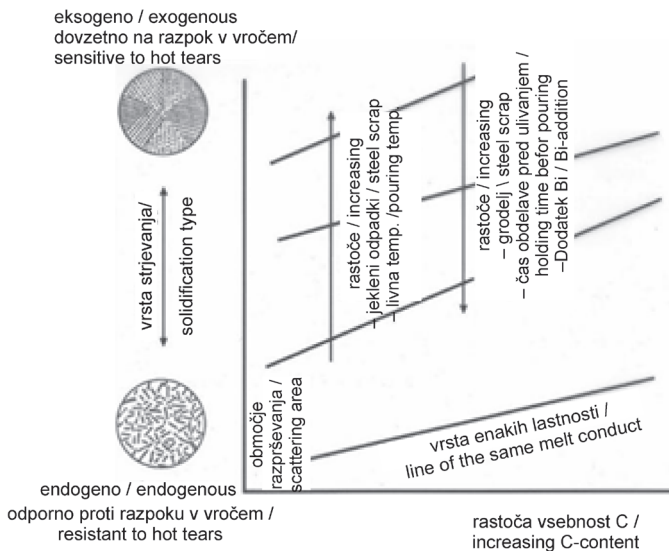
Because GJMW has a decarburized structure, at least a ferritic rim, it can be welded without severe problems.

Following the British colleague Jack Hill (World Foundry Congress Budapest) a lot of problems lie between liquidus and solidus temperature, that is during solidification.



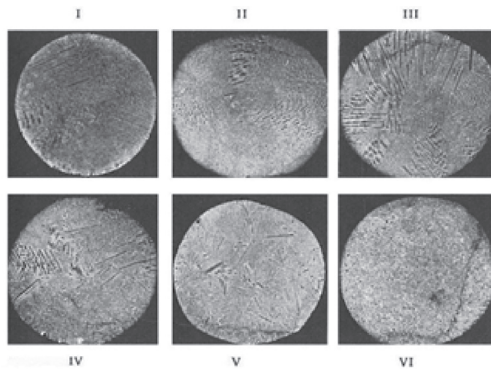
Sl. 5. Predvideni tok napetosti skladno z VDG – Združenjem nemških livarjev 1984, sest. [2], str. 11

Fig. 5. Assumed stress flow, according to VDG – Verein Deutscher Gießereifachleute 1984, comp. [2], p. 11



Sl. 6. Vpliv vsebnosti ogljika, material za nalaganje (grodelj in odpadno železo), lastnosti taline (čas obdelave pred ulivanjem; livna temperatura) in obdelava taline (dodatek Bi) na vrsto strjevanja primarnega avstenita ter odpornost proti razpoku v vročem [11; 12], sest. [5]

Fig. 6. Influence of carbon content, charge material (pig iron and steel scrap), melt conduct (holding time before pouring; pouring temperature) and melt treatment (Bi-addition) on the solidification type of primary austenite and on the resistance against hot tearing [11;12], comp. [5]



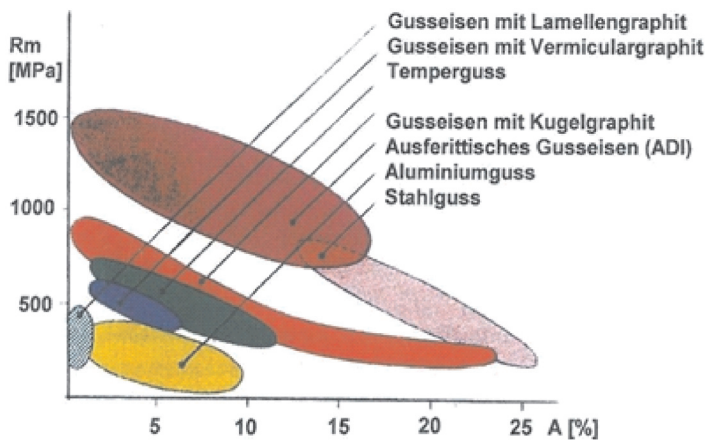
Sl. 7. Predlagani graf za šest tipov dentritskega strjevanja in dejanski primeri primarnega avstenita [11; 12], sest. [5]

Fig. 7. Proposed chart for 6 types of dendritic solidification and real examples of primary austenite [11;12], comp. [5]

temperaturo likvidusa in solidusa, torej med strjevanjem.

To je najpomembnejše pri litini CTeL z višjim intervalom strjevanja zaradi nižje vsebnosti ogljika. Glavno težavo predstavlja visoka nagnjenost k razpoku v vročem. Zato sta W. Patterson in R. Doepp [11] raziskala lastnosti primarnega avstenita med strjevanjem. Rezultat teh petletnih naporov

This is most important for GJMB with its higher solidification interval due to the lower carbon content. The main problem was a high tendency to hot tearing. Therefore, W. Patterson and R. Doepp [11] investigated the solidification behaviour of primary austenite. The result of a 5 years thesis work [11;12] with numerous coworkers at



Sl. 8. Natezna trdnost in raztezek določenih litih Fe- in Al-zlitin, »Comparison of Meehanite ADI with other materials«, prospekt družb JOT, Oddelek za strojni inženiring, Finska, sest. [9], str. 131, Sl. 10, s predlaganimi izboljšavami

Fig. 8. Tensile strength and elongation of some cast Fe- and Al-alloys, "Comparison of Meehanite ADI with other materials", prospect JOT-companies, Mechanical Engineering Division, Finland, comp. [9], p. 131, Fig. 10, with proposed improvements

[11; 12] v sodelovanju s številnimi sodelavci na Tehniški univerzi v Aachnu prikazuje Sl. 6 [13].

Želeni endogeni tip primarnega avstenita se uporablja zaradi nižje vsebnosti ogljika, večje vsebnosti grodlja pri nalaganju, daljšega časa obdelave pred ulivanjem, nižje livne temperature in dodatka Bi talini. Predlagani graf s šestimi tipi dendritskega strjevanja (Sl. 7 [14]) bi lahko bil uporaben tudi za številne druge neevtektične zlitine, npr. na osnovi Al, Mg, Cu, ne smemo pa pozabiti niti na jeklene litine.

V zvezi z natezno trdnostjo in raztezkom Sl. 8 [15] s Finske kaže dober položaj temprane litine (zelena) med vermikularnim (modra) in sferoidnim grafitnim litim železom (rdeča). Litina GJS tipa ADI (vijoličasta) je lahko predlog za lito jeklo (svetlo rdeča; jeklo je bila osnova), GJL (siva, spodaj levo), GJV (modra), CTeL in BTeL (zelena), kajti posebna toplotna obdelava se nanaša na kovinsko matriko neodvisno od vrste grafita.

the Technical University of Aachen shows Fig. 6 [13].

The wanted endogenous type of primary austenite is promoted by lower carbon content, increasing amount of pig iron in the charge, longer holding time before pouring, lower pouring temperature and Bi-addition to the melt. The proposed chart of six types of dendritic solidification (Fig. 7 [14]) may be useful for a lot of other noneutectic alloys, too, f.i. on base of Al, Mg, Cu and not to forget for steel alloys.

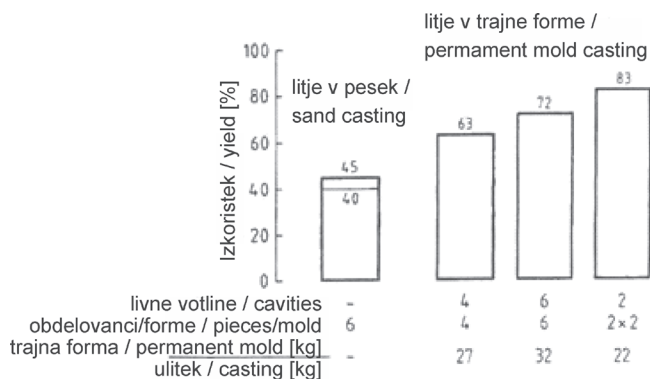
Concerning tensile strength and elongation, Fig. 8 [15] from Finland shows the good position of malleable cast iron (green) between vermicular (blue) and spheroidal graphite cast iron (red). The ADI-type of GJS (violet) may be a proposal for cast steel (light red; steel was the origin), GJL (gray, quite left down), GJV (blue), GJMB and GJMW (green), because the special heat treatment refers to the metallic matrix, independent of graphite type.

3 Napredni proizvodni procesi [16]

En primer je gravitacijsko litje tempranih talin v trajne forme [17; 18]. Izkoristek se pri litju v pesek zveča s približno 40 na 50 %, pri litju v trajne forme pa na približno 60–80

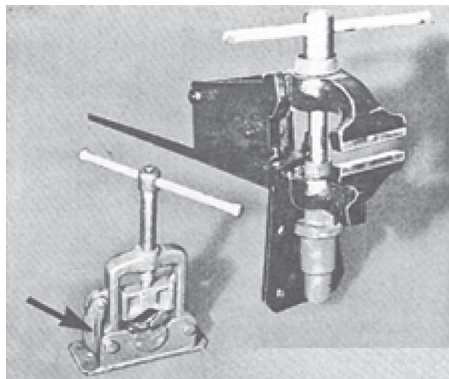
3 Progressive Production Processes [16]

One example is gravity casting of malleable melts into permanent molds [17; 18]. Yield increases from about 40 to 50 % in case of sand casting to about 60 to 80 % in case of



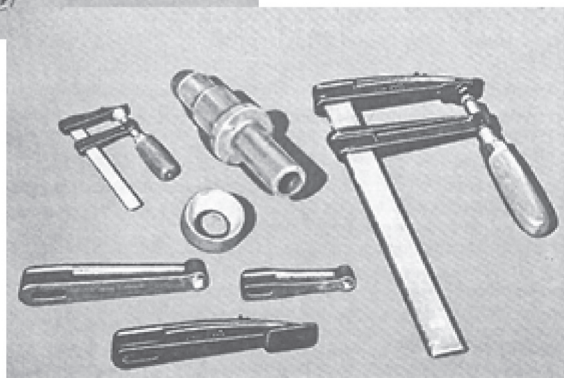
Sl. 9. V primerjavi z litjem v pesek se pri litju bele temprane litine v trajne forme (BTel) izboljšuje izkoristek dobrih odlitkov za od 15 do 35 % [17; 18], sest. [5], str. 727

Fig. 9. Compared to sand casting permanent mold casting of whiteheart malleable cast iron (GJMW) improves yield of good castings by about 15 to 35 % [17; 18], comp. [5], p. 727



Sl. 10. Deli iz bele temprane litine (primeži in spone) so bili izdelani za tradicionalno lastno proizvodnjo in zunanje naročnike [20]

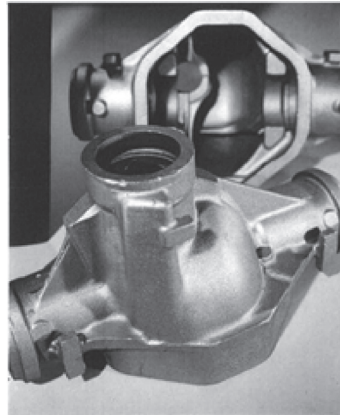
Fig. 10. Malleable cast iron parts for tools (vices and clamps) were made for traditional own production and for external customers [20]





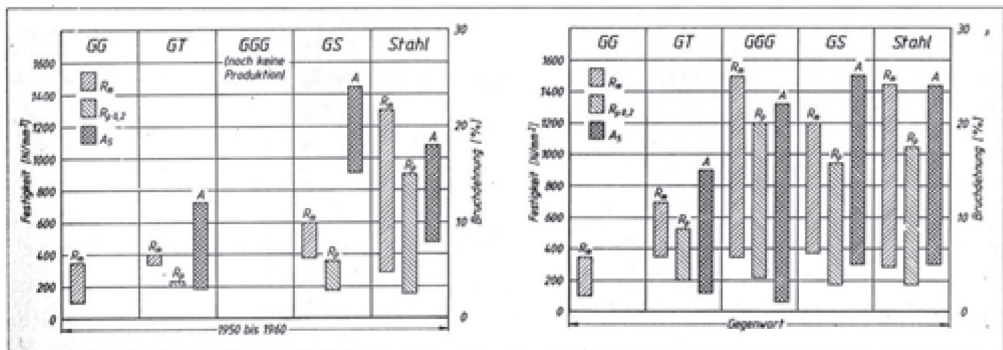
Sl. 11. Deli iz bele temprane litine za izdelavo gradbenih odrov, ki morajo prenesti velike obremenitve do 30 ton, v posebnih primerih do največ 75 ton [20]

Fig. 11. Malleable cast iron parts for scaffolding industry, which have to endure high pressures up to 30 t, in special cases max. 75 t [20]



Sl. 12. Črna temprana litina osnega mostu in ohišja osovine in tovrnega vozila Vir: [21]

Fig. 12. Blackheart malleable iron Axle bridge and rear axle housing for trucks Source: [21]



Sl. 13. V nasprotju s petdesetimi leti (levo) dandanes (desno) lita železa z vidika trdnosti konkurirajo jeklom; vrednosti povzete po zadevnih nemških standardih za materiale

Fig. 13. Contrary to the fifties (left), today (right) cast iron materials compete with steels in terms of their strength properties. Values taken from the respective German material standards

% (Sl. 9). Čas žarjenja pri visoki temperaturi bi se lahko skrajšal s 96 ur (4 dni) na 6 ur.

Drugi primer je vakuumsko litje z jeklenim zdrobom kot materialom za formanje namesto nezamejenega kremenčevega peska, ki se uporablja običajno [19].

4 Uporaba

Številne primere uporabe. npr. litine BTeL za orodja (primeži in sponse) Sl. 10 ter za izdelavo gradbenih odrov. prikazuje Sl. 11 [20], ki kaže na širok razpon uporabe: »trdnost v kombinaciji z voljnostjo«. Eden izmed stalnih ciljev je nadomestiti kovane in zvarjene dele z visoko zmogljivimi ulitki, kot so ulitki iz temprane litine.

En primer uporabe litine CTeL je prikazan na Sl. 12 na podlagi trditev H.-D. Landwehrja, nekdanjega vodje v koncernu +GF+ Mettmann, Nemčija, GIFA 2015 [21]. Skupaj s prispevki P. Toelkeja, +GF+ Schaffhausen, Švica [22], in R. Doeppa, Ennepetal, Nemčija, [23] te tri objave predstavljajo celovito raziskavo obsežnega področja temprane litine.

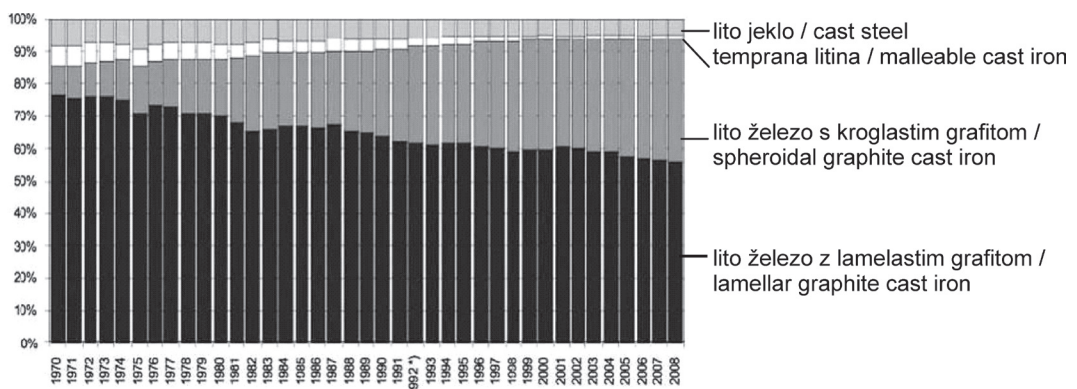
permanent molds (Fig. 9). High temperature annealing time could be reduced from 96 hours (4 days) to 6 hours.

Another example is vacuum casting with steel shot as molding material instead of unbound normal silica sand [19].

4 Applications

A lot of examples f.i. GJMW for tools (vices and clamps) Fig. 10 and for the scaffolding industry Fig. 11 [20] shows the wide range of application: "Strength meets ductility". One continuous aim is to replace forged and welded parts by high duty castings like malleable iron castings.

One example of GJMB shows Fig. 12, following H.-D. Landwehr, former head of +GF+ Mettmann, Germany, GIFA 2015 [21]. Together with contributions of P. Toelke, +GF+ Schaffhausen, Switzerland [22], and R. Doepp, Ennepetal, Germany [23], these 3 publications give a comprehensive survey on the wide field of malleable cast iron.



Sl. 14. Proizvodnja litega železa v % („lito železo, lito jeklo in temprana litina“) v Nemčiji 1970–2008
Vir: Društvo livarjev Nemčije (BDG) *) Zahodna Nemčija do 1992

Fig. 14. Production of cast iron in % ("iron, steel and malleable cast iron") in Germany 1970–2008
Source: Federation of German foundry industry (BDG) *) West Germany until 1992

5 Pregled

Čeprav ima temprana litina nekaj posebnih prednosti, zlasti zelo dobro voljnost in varivost (BTel), kot je prikazano v preglednici 1 [24], je trenutni tekmelec temprane litine (tako litine CTel kot BTel) sferoidno grafitno lito železo (GJS). Na Sl. 13 je prikazana primerjava mehanskih lastnosti materialov iz železove litine v 50. letih 20. stoletja (levo) v primerjavi s trenutnim stanjem (desno) [25]. Zato je odstotek ulitkov iz temprane litine

5 Outlook

Although malleable cast iron has some specific advantages, mainly high ductility and weldability (GJMW), see table 1 [24], the actual competitor of malleable cast iron, both GJMB and GJMW, is spheroidal graphite cast iron (GJS). This can be seen in Fig. 13, comparing mechanical properties of cast iron materials in the 1950 years (left side) and in the presence (right) [25]. Therefore the percentage of malleable

Preglednica 1. Lastnosti litega železa. Orientacijske vrednosti z oceno na podlagi razredov; povzeto po R. Doepp 1996 [24] (1 = zelo dobro, 2 = dobro, 3 = srednje dobro, 4 = zadostno, 5 = slabo)

Table 1. Properties of cast iron materials. Orientation values with evaluation according to grades; adapted from R. Döpp 1996 [24] (1 = very good, 2 = good, 3 = medium, 4 = sufficient, 5 = bad)

	GJL GG Siva litina / Gray iron	GJMW GTW bela temprana litina / Whiteheart malleable iron	GJMB GTS črna temprana litina / Blackheart malleable iron	GJS GGG Litina s kroglastim grafitom / Sphredoidal graphite cast iron	GS GS Lito jeklo / Cast steel
Tok in zmožnost zapolnitve kalupov / Flow and shape filling capacity	1	2	3	3	4 - 5
Odpornost na razpoke med strjevanjem / Crack resistance during solidification	1	3	3 - 4	2	4
Odpornost na udarce / Impact strength	4 - 5	1 - 2	2 - 3	3 - 4	1
Raztezek / Elongation	5 - 6	1 - 2	1 - 2	1 - 2	1
Natezna trdnost / Tensile strenght	3 - 4	1 - 2	1 - 2	1	1
Tlačna trdnost / Compressive strength	1	2 - 3	2 - 3	2	1
Trdnost / Hardness	Oblikovalnost pri na splošno prilagodljivi višini / adjustable as desired				
Varivost / Weldability	5 - 6	1 - 2	3 - 4	3 - 4	1
Obdelovalnost / Machinability	2	2	2	2	3 - 4
Kaljivost / Hardenability	2	3 - 4	2	2	1
Atenuacija / Attenuation	1	3	2 - 3	1 - 2	3 - 4
Toplotna prevodnost / Thermal conductivity	1	odvisna od vsebnosti grafita / depending on graphite content	1 - 2	1 - 2	3 - 4
Elektr. prevodnost / Elec. conductivity	3 - 4	1 - 2	1 - 2	2 - 3	1
Odpornost na korozijo / Corrosion resistance	1	3	2 - 3	2	3 - 4
Zaščita kovinskih površin / Metallic surface protection	2 - 3	1	2	2	1
Storilnost / Throughput time	1	2 - 3	2 - 3	1 - 2	2 - 3
Strošek / Costs	1	2 - 3	3	2 - 3	3 - 4
Zmožnost organizacije / Organizational capability	Prilagodljive splošne prednosti ulitka / general advantage of casting				

Werkstoff nach DIN 1692		Werkstoff nach DIN EN 1562	
Kurzzeichen	Nummer	Kurzzeichen	Nummer
GTW-35-04	0.8035	EN-GJMW-350-4	EN-JM1010
GTW-S-38-12	0.8038	EN-GJMW-360-12	EN-JM1020
GTW-40-05	0.8040	EN-GJMW-400-5	EN-JM1030
GTW-45-07	0.8045	EN-GJMW-450-7	EN-JM1040
–	–	EN-GJMW-550-4	EN-JM1050
–	–	EN-GJMB-300-6	EN-JM1110
GTS-35-10	0.8135	EN-GJMB-350-10	EN-JM1130
GTS-45-06	0.8145	EN-GJMB-450-6	EN-JM1140
–	–	EN-GJMB-500-5	EN-JM1150
GTS-55-04	0.8155	EN-GJMB-550-4	EN-JM1160
–	–	EN-GJMB-600-3	EN-JM1170
GTS-65-02	0.8165	EN-GJMB-650-2	EN-JM1180
GTS-70-02	0.8170	EN-GJMB-700-2	EN-JM1190
–	–	EN-GJMB-800-1	EN-JM1200

Preglednica 2. Primerjava označb novih materialov skladno z DIN EN 1562 in predhodnih označb po DIN 1692 : 1982–01

Table 2. Adapted from K. Herfurth and R. Döpp [27]

Preglednica 3. po K. Herfurth in R. Doepp [27]

Table 3. Adapted from K. Herfurth and R. Döpp [27]

DIN EN 1559-1	Gießereiwesen – Technische Lieferbedingungen Teil 1: Allgemeines
DIN EN 1559-3	Gießereiwesen – Technische Lieferbedingungen Teil 3: Zusätzliche Anforderungen an Eisengußstücke
DIN EN 10002-1	Metallische Werkstoffe – Zugversuch Teil 1: Prüfverfahren (bei Raumtemperatur)
DIN EN 10003-1	Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Brinell Teil 1: Prüfverfahren
DIN EN 1560	Gießereiwesen – Bezeichnungssystem für Gußeisen Werkstoffkurzzeichen und Werkstoffnummern

v Nemčiji v letu 2008 padel na približno 1 % v primerjavi s 4 % litega jekla, približno 39 % litine GJS in 56 % litine GJL: Sl. 14 [26]. Vrednosti v svetu leta 2008 so bile 2 %

castings in Germany 2008 decreased to about 1 %, compared to about 4 % cast steel, roughly 39 % GJS and 56 % GJL: Fig. 14 [26]. The corresponding values world

Preglednica 4. po K. Herfurth in R. Doepp [27]

Table 4. Adapted from K. Herfurth and R. Döpp [27]

Werkstoffbezeichnung		Durchmesser der Probe (Nennmaß) d mm	Zugfestigkeit R_m N/mm ²	Dehnung $A_{3,4}$ %	0,2%- Dehngrenze $R_{p0,2}$ N/mm ²	Brinellhärte (nur informativ) HB
Kurzzeichen	Nummer		min.	min.	min.	max.
EN-GJMW- 350-4	EN-JM1010	6	270	10	- 1)	230
		9	310	5	-	
		12	350	4	-	
		15	360	3	-	
EN-GJMW- 360-12 2)	EN-JM1020 2)	6	280	16	- 1)	200
		9	320	15	170	
		12	360	12	190	
		15	370	7	200	
EN-GJMW- 400-5	EN-JM1030	6	300	12	- 1)	220
		9	360	8	200	
		12	400	5	220	
		15	420	4	230	
EN-GJMW- 450-7	EN-JM1040	6	330	12	- 1)	220
		9	400	10	230	
		12	450	7	260	
		15	480	4	280	
EN-GJMW- 550-4	EN-JM1050	6	-	-	- 1)	250
		9	490	5	310	
		12	550	4	340	
		15	570	3	350	

1) Wegen der Schwierigkeit der Bestimmung der Dehngrenze an kleinen Proben müssen die Werte und die Meßmethode zwischen Hersteller und Käufer bis zum Zeitpunkt der Annahme der Bestellung vereinbart werden
 2) Der zum Schweißen geeignetste Werkstoff.
 ANMERKUNG 1: 1 N/mm² entspricht 1 MPa.
 ANMERKUNG 2: Die Werkstoffbezeichnung entspricht EN 1560.
 ANMERKUNG 3: Die fettgedruckten Zahlen geben die Mindestzugfestigkeit und die Mindestdehnung $A_{3,4}$, denen das Kurzzeichen der Sorte zugeordnet ist, sowie den bevorzugten Nenndurchmesser der Probe und die entsprechende Mindest-0,2%-Dehngrenze an.

ulitkov iz temprane litine, 13 % litega jekla, 30 % litine GJS in 55 % litine GJL [26].

Razvoj nacionalnih in evropskih standardov za temprano litino sta podrobneje preučila K. Herfurth in R. Doepp [27] v Preglednicah 2–6.

Nove rezultate v zvezi z vrednostmi za lomno mehaniko bele temprane litine (BTel) so objavili P.-V. Huebner, G. Pusch, O. Liesenberg, TU BA Freiberg/Sachsen, in R. Doepp, TU Clausthal [28]. To je primer uspešnega strokovnega in osebnega sodelovanja.

2008 were 2 % malleable castings, 13 % cast steel, 30 % GJS and 55 % GJL [26].

The development of national and European standards for malleable cast iron was discussed in detail by K. Herfurth and R. Doepp [27] with tables 2-6.

New results concerning values for fracture mechanics of whiteheart malleable cast iron (GJMW) were published by P.-V. Huebner, G. Pusch, O. Liesenberg, TU BA Freiberg/Sachsen, and R. Doepp, TU Clausthal [28]. This is an example for successful professional and personal cooperation.

Werkstoffbezeichnung		Durchmesser der Probe (Nennmaß) ¹⁾ <i>d</i> mm	Zugfestigkeit <i>R_m</i> N/mm ² min.	Dehnung <i>A_{3,4}</i> % min.	0,2%-Dehngrenze <i>R_{p0,2}</i> N/mm ² min.	Brinellhärte (nur informativ) HB
Kurzzeichen	Nummer					
EN-GJMB- 300-6 ²⁾	EN-JM1110 ²⁾	12 oder 15	300	6	–	150 max.
EN-GJMB- 350-10	EN-JM1130	12 oder 15	350	10	200	150 max.
EN-GJMB- 450-6	EN-JM1140	12 oder 15	450	6	270	150 bis 200
EN-GJMB- 500-5	EN-JM1150	12 oder 15	500	5	300	165 bis 215
EN-GJMB- 550-4	EN-JM1160	12 oder 15	550	4	340	180 bis 230
EN-GJMB- 600-3	EN-JM1170	12 oder 15	600	3	390	195 bis 245
EN-GJMB- 650-2	EN-JM1180	12 oder 15	650	2	430	210 bis 260
EN-GJMB- 700-2	EN-JM1190	12 oder 15	700	2	530	240 bis 290
EN-GJMB- 800-1	EN-JM1200	12 oder 15	800	1	600	270 bis 320

¹⁾ Wenn eine Probe mit 6 mm Durchmesser für eine maßgebende Wanddicke des Gußstücks repräsentativ ist, darf dieses Probenmaß – in Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer bis zum Zeitpunkt der Annahme der Bestellung – angewendet werden. Es gelten die Mindesteigenschaften nach dieser Tabelle.

²⁾ Der Werkstoff ist besonders für Anwendungen bestimmt, für welche Druckdichtheit wichtiger ist als hohe Festigkeit und Duktilität.

ANMERKUNG 1: 1 N/mm² entspricht 1 MPa.

ANMERKUNG 2: Die Werkstoffbezeichnung entspricht EN 1560.

ANMERKUNG 3: Die fettgedruckten Zahlen sind der Mindestzugfestigkeit und der Mindestdehnung *A_{3,4}* der Sorte zugeordnet.

Preglednica 5. po K. Herfurth in R. Doepp [27]

Table 5. Adapted from K. Herfurth and R. Döpp [27]

Tabelle 5. Maße von Proben für den Zugversuch

Durchmesser <i>d</i> mm	Grenzabmaße für den Durchmesser mm	Anfangsquerschnitt <i>S₀</i> mm ²	Anfangsmesslänge $L_0 = 3,4 \cdot \sqrt{S_0}$ mm	Versuchslänge <i>L_c</i> mm	Mindestradius im Übergangsbereich <i>r</i> mm	Bevorzugte Maße des Schaftes (nur informativ)	
						<i>D</i> mm	<i>L</i> mm
6	±0,5	28,3	18	25	4	10	30
9	±0,5	63,6	27	30	6	13	40
12	±0,7	113,1	36	40	8	16	50
15	±0,7	176,7	45	50	8	19	60

ANMERKUNG: Die Dehnung *A_{3,4}* wird an *L₀* gemessen.

Preglednica 6. po K. Herfurth in R. Doepp [27]

Table 6. Adapted from K. Herfurth and R. Döpp [27]

6 Povzetek

Temprana litina se je tako v preteklosti in tudi zdaj izkazala na podlagi kemijske sestave, lastnosti strjevanja, strukture in lastnosti, dobre možnosti pa ima tudi v prihodnje [29].

6 Summary

Regarding chemical composition, solidification behaviour, structure and properties malleable cast iron has proved in past and present time and has good chances in future, too, compare [29].

Zasluge za dognanja gredo tudi učiteljem, kolegom in sodelavcem v Aaachenu, Ennepetalu in Clausthalu.

The assistance of teachers, colleagues and co-workers in Aachen, Ennepetal and Clausthal is gratefully acknowledged.

7 Zaključek

Ta prispevek je namenjen livarjem po vsem svetu, ki se s temprano litino srečujejo v praksi, pri raziskavah, razvoju in poučevanju. Dva kolega predstavnika sta bila g. Hans J. Heine, tehnični vodja društva livarjev temprane litine, Cleveland, Ohio, ZDA, in prof. dr. Milan Trbižan, inž., s Fakultete za naravoslovje in tehnologijo v Ljubljani ter Društvo livarjev Slovenije.

Ta prispevek je posvečen tudi našemu družinskemu podjetju Friedr. Ischebeck GmbH iz Ennepetala, Nemčija, ki ga je leta 1881 ustanovil naš pradedek Friedrich Ischebeck kot livarno za primeže, v kateri se je nato leta 1912 začela proizvodnja temprane litine, poznejšim dodatkom k sivi litini. Te 105-letne izkušnje s postopki, vezanimi na temprano litino, so naša vstopnica v prihodnost.

7 Conclusions

This contribution is dedicated worldwide to all foundrymen, who are engaged with malleable cast iron in practice, research, development and teaching. Two representative colleagues were Mr. Hans J. Heine, Technical Director of the Malleable Founders Society, Cleveland, Ohio, USA, and Prof. Dr.-Ing. Milan Trbizan, Technical University of Ljubljana and Društvo Livarjev Slovenije.

Furthermore this contribution is dedicated to our family company Friedr. Ischebeck GmbH in Ennepetal, Germany, founded 1881 by our great-grandfather Friedrich Ischebeck as forge for vices, with a malleable cast iron foundry since 1912, later additional gray cast iron. These 105 years of experience in malleable cast iron procedure are a bridge into future.

Viri / Literature:

- [1] VSE Verband Schweizerischer Eisengießereien: Das gegossene Eisen. Dokumentation über Fertigung und Verwendung von Gusseisen, Stahl- und Temperguss. Verlag VSE, Zurich 1970, str. 17. Abb. 14
- [2] R. Doepp: 100 Jahre Entwicklung: Gusswerkstoffe - Eisen-, Stahl- und Temperguss. Berlin 2009. VDG Fachbericht 090, Dusseldorf 2012, str. 10
- [3] C. F. Waltona in T. J. Opar: Iron Castings Handbook, 3rd Edition, Cleveland USA 1981, str. 137
- [4] R. Doepp, U. Kaeckenhoff, P. Sieben, G. Schmidt: Beitrag zur Metallurgie des Heißwind-Kupolofens. Giesserei 80 (1993), št. 12, str. 385–390, še posebej str. 386, Sl. 2
- [5] R. Doepp: Contribution to the development of cast materials. 66th World Foundry Congress, 6.-9. Sept. 2004, Istanbul, Turčija. Proceedings. Volume 1, str. 725
- [6] W. Oelsen, K. Roesch, K. Orth: Beeinflussung des Kohlenstoffes des Gießereieroseisens beim direkten Guss vom Hochofen. Archiv Eisenhüttenwesen 26 (1955), št. 11, str. 641–653
- [7] W. Oelsen, E. Schurmann: Das Problem der Reduktion der Kieselsäure durch Kohlenstoff in Eisenschmelzen und seine Bedeutung für Gusseisen. Giesserei, techn.-wiss. Beih., št. 19, 1958, str. 989-994; comp. Giesserei 45 (1958), št. 4, str. 99

- [8] H. Laplanche: Metal Progr. 52 (1947), str. 991–993; 55 (1949), str. 839–841; Fonderie 26 (1971), št. 297, str. 1–19; comp. Giesserei 38 (1951), št. 22, str. 577–580 (H. Pieper); Giesserei 77 (1960), št. 8, str. 161–164 (M. Lampic); comp. [5], str. 720, referenca [4]
- [9] R. Doepp: Beitrag zur Entwicklung der Eisen-Gusswerkstoffe. VDG Fachtagung Dusseldorf 2005, VDG Fachbericht 088, str. 121–134, še posebej str. 129, Sl. 8
- [10] R. Doepp: Beitrag zur Entwicklung der Eisengussdiagramme. VDG Fachausschuss Geschichte, Schaffhausen 2010; VDG Fachbericht 090, Dusseldorf 2012, str. 106–112, še posebej str. 112, Sl. 13
- [11] W. Patterson, R. Doepp: Zum Einfluss der Rohstoffe, der Schmelzföhrung und der Schmelzbehandlung auf das Erstarrungsverhalten von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen, besonders Temperguss. Giesserei, techn.-wiss. Beih., 16 (1964), št. 2, str. 49–86; comp. Giesserei 51 (1964), št. 14, str. 414; št. 20, str. 591
- [12] W. Patterson, K. Roesch, R. Doepp: Beitrag zum Erstarrungsverhalten von weisem und grauem GuBeisen. Giesserei 52 (1965), št. 6, str. 161–171
- [13] Oglejte si indeks [5], str. 725, Sl. 7
- [14] Oglejte si indeks [5], str. 725, Sl. 5
- [15] Oglejte si indeks [2], str. 20, Sl. 19
- [16] Oglejte si indeks [5], str. 718–719
- [17] R. Doepp, K. Lindemann: Beitrag zum Sand- und KokillengieBen von Eisenlegierungen. Giessereiforschung 35 (1983), št. 4, str. 135–150; comp. Giesserei 70 (1983), št. 26, str. 711; 71 (1984), št. 12, str. 486 (Leoben); št. 15, str. 611 (Clausthal)
- [18] G. Pistol, R. Doepp, P. R. Sahm: Hat Kokillenguss für Eisenwerkstoffe neue Chancen? Giesserei 79 (1992), št. 10, str. 381–388
- [19] R. Doepp, W. Gerhard, C. Land: Vacuum-Formverfahren mit Stahlsand - ein Schritt in Richtung Kokillenguss. Giesserei-Praxis 2005, št. 12, str. 446–450
- [20] R. Doepp, E. F. Ischebeck, D. Blankenagel: Temperguss für Baugeräte und Werkzeuge. konstruieren + gieBen 1977, št. 2, str. 24–30
- [21] H.-D. Landwehr: Schwarzer Temperguss. VDG Fachausschuss Geschichte, Dusseldorf 2015, GIFA, 20.6.2015, VDG Fachbericht demnächst (2017/2018)
- [22] P. Tolke: Entwicklung des Tempergusses - Grundlagen und Anwendungen. VDG Fachausschuss Geschichte, Dusseldorf 20.6.2015, oglejte si indeks [21]
- [23] R. Döpp: Weisser Temperguss. See [21]
- [24] R. Döpp: Eigenschaften von Eisen-Gusswerkstoffen. Beurteilung nach Schulnoten zur Orientierung. See [2], p. 13, table 1
- [25] see [2], p. 14, fig. 7
- [26] see [2], p. 12, fig. 4 and p. 13, table 2
- [27] K. Herfurth, R. Döpp: Europäische Normung: Temperguß – von DIN 1692 zu DIN EN 1562. Giesserei 85 (1998), Nr. 1, p. 64–66; compare konstruieren + gieBen 22 (1997), Nr. 4, p. 15–17
- [28] P.-V. Hübner, G. Pusch, O. Liesenberg, R. Döpp: Bruchmechanische Kennwerte von entkohlend geglühtem Temperguss. Giesserei 90 (2003), Nr. 5, p. 82–92; compare Bruchmechanische Kennwerte von Temperguss. Teil 2: Weisser Temperguss. konstruieren + gieBen 28 (2003), Nr. 3, p. 18–25 (mit Versuchswerkstoffen der Firmen R. Woeste + Co. in Velbert, August Hitzbleck Söhne GmbH in Heilgenhaus und Friedr. Ischebeck GmbH in Ennepetal)
- [29] R. Döpp: Malleable cast iron – Material with future?! Contribution Portoroz 28.5.1998

Razkritje modificiranja evtektskega Si v zlitini Al z napredno elektronsko mikroskopijo

Revealing the modification of eutectic Si in Al alloy by advanced electron microscopy

Izvleček

Sprememba evtektičnega Si iz kosmičaste v vlaknasto obliko je ključni dejavnik za izboljšanje lastnosti zlitin Al-Si. Mehanizem dvojčičenja zaradi nečistoč (ITT – impurity-induced twinning) in mehanizem povratnega roba dvojčične ploskve (TPRE – twin plane re-entrant edge) kot tudi zastrupitev mehanizma TPPE so na splošno sprejemljivi pod določenimi pogoji. Vendar pa IIT, TPPE ali zastrupitev mehanizma TPPE ni mogoče uporabiti za interpretacijo vseh opazovanj, ki spremljajo spreminjanje, kar pomeni, da lahko veljajo tudi drugi dejavniki. Ta članek ponuja pregled napredka sprememb evtektičnega Si s posebnim poudarkom na uporabi napredne elektronske mikroskopije. Več kot jasno je, da so lahko napredna elektronska mikroskopija vključno z visokokotnim obročastim detektorjem v temnem polju (HAADF) in spektroskopijo z izgubo energije elektronov (EELS) pri vrstični transmissijski elektronski mikroskopiji (STEM) ter tomografijo na atomsko sondo (APT) odlična orodja za pojasnitev mehanizma sprememb evtektičnega Si. Poleg uporabe napredne elektronske mikroskopije je zelo učinkovita tudi atomska simulacija, ki temelji na izračunu teorije gostotnega funkcionala (DFT), za pojasnitev lastnosti vezanja spreminjajočih elementov pri dvojčkih Si in učinka na dvojčičenje Si. Tako pri eksperimentalni kot simulacijski raziskavi smo odkrili, da imajo spreminjajoči elementi štiri različne vloge: (i) adsorpcija na presečišču faset Si, ki sproža mehanizem tvorbe IIT, (ii) adsorpcija na povratnem robu dvojčične ploskve, ki sproža mehanizem rasti TPPE, (iii) adsorpcija pred rastjo dvojčkov Si, ki sproža prehajanje snovi znotraj evtektičnega Si in (iv) segregacija na fronti med evtektičnim Si in evtektičnim Al, ki zavira rast evtektičnega Si. Prav tako je poudarjen pomen napredne elektronske mikroskopije (HAADF-STEM, EELS in APT) na področju strjevanja.

Ključne besede: zlitina Al-Si; nukleacije; rast; evtektično strjevanje; napredna elektronska mikroskopija; izračun teorije gostotnega funkcionala.

Abstract

Modifying the eutectic Si from flake-like to fibrous is a key factor to improve the properties of Al-Si alloys. The impurity-induced twinning (IIT) mechanism and the twin plane re-entrant edge (TPRE) mechanism as well as the poisoning of the TPRE mechanism are generally accepted to be valid under certain conditions. However, IIT, TPPE or poisoning of TPPE mechanism cannot be used to interpret all the observations accompanying modification, indicating that other factors may be also valid. In this paper, we overview the progress of modification of eutectic Si, which in particular focus on the application of advanced electron microscopy. It is very clear that advanced electron microscopy, including high angle annular dark field imaging (HAADF) and electron energy loss spectroscopy (EELS) in scanning transmission electron microscopy (STEM) as well as atom probe tomography

(APT), can provide a great tool to elucidate the modification mechanism of eutectic Si. Apart from the application of advanced electron microscopy, atomic simulation based on density functional theory (DFT) calculation was also found to be very efficient to elucidate the bonding behaviour of modifying elements within Si twins and its effect on the Si twinning. From both experimental and simulation investigation, it was found that modifying elements have four different roles: (i) the adsorption at the intersection of Si facets, inducing IIT growth mechanism, (ii) the adsorption at the twin plane re-entrant edge, inducing TPREG growth mechanism, (iii) the adsorption ahead of the growing Si twins, inducing a solute entrainment within eutectic Si, and (iv) the segregation at the interface between eutectic Si and eutectic Al, suppressing the growth of eutectic Si. The importance of advanced electron microscopy (HAADF-STEM, EELS and APT) in the field of solidification is also highlighted.

Keywords: Al-Si alloy; Nucleation; Growth; Eutectic solidification; Advanced electron microscopy; Density functional theory calculation.

1 Uvod

Da bi zmanjšali težo vozil in zagotovili skladnost s strožjimi predpisi v zvezi z učinkovitostjo goriv in emisijami CO₂, je v avtomobilski industriji vse več povpraševanja po oblikovanju lahkih ulitkov s še tanjšimi stenami. Za ta namen se za izdelavo lahkih ulitkov s tankimi stenami pogosto uporabljajo visokozmogljive hipoevtektične zlitine Al-Si, zahvaljujoč njihovi odlični zmogljivosti polnjenja in visoko specifični trdnosti. Hipoevtektične livarske zlitine Al-Si navadno vsebujejo med 5 in 12 wt. % Si skupaj z dodatki elementov Mg, Cu in Fe/Mn za izboljšanje mehanskih lastnosti [1]. Za nadzor strjevanja mikrostruktur in posledično lažje dovajanje se pogosto uporabljata dva postopka obdelave talin pri hipoevtektičnih zlitinah Al-Si. Prva obdelava taline je udrobnjevanje primarne α -Al, ki se navadno doseže z dodajanjem udrobnjevalnega sredstva, npr. udrobnjevalnega sredstva Al-Ti-B. Dobro je znano, da udrobnjevanje primarnega α -Al izboljšuje zmožnost polnjenja do točke koherence, s čemer se izognemo zvarom v hladnem. Vendar pa je treba opozoriti, da do napak pri litju navadno pride pri poznejših stopnjah strjevanja med

1 Introduction

To reduce vehicle weight and comply with more stringent regulations on fuel efficiency and CO₂ emissions, there is an increasing demand for light weight designs of even thinner walled casting parts in the automotive industry. For this purpose, high performance hypoeutectic Al-Si alloys have been widely used to produce light weight thin walled casting due to their excellent filling ability and high specific strength. Hypoeutectic Al-Si foundry alloys normally contain between 5 and 12 wt. % Si, together with additional Mg, Cu and Fe / Mn elements, to improve the mechanical properties [1]. Two very important melt treatments in hypoeutectic Al-Si alloys are very often employed to control solidification microstructure and thereby facilitate a better feeding. The first melt treatment is the grain refinement of primary α -Al, which is usually achieved by the addition of grain refiners, e.g. Al-Ti-B grain refiner. It is well-accepted that the grain refinement of primary α -Al improves the filling ability up to the coherency point, thus avoiding cold runs. However, it should be noted that casting defects are normally formed in latter stages of solidification during

tvorbo binarne evtektične strukture Al-Si in posledično morebitne ternarne evtektične strukture. Zato je druga pomembna obdelava taline sprememba strukture evtektičnega Si iz kosmičaste morfologije v morfologijo finega vlakna. Za spremembo evtektičnega Si se pogosto uporabljajo različni modifikatorji (npr. Na [2–4], Sr [5–9], Eu [10, 11]). Podrobno so bili proučeni mehanizmi sprememb (tj. mehanizem rasti dvojčičenja zaradi nečistoč (IIT) [5], mehanizmi rasti povratnega roba dvojčične ploskve (TPRE) [12, 13], zastrupitev TPRE [14] in odnašanje topljenca [7]). Vendar pa IIT, TPRE ali zastrupitev mehanizma TPRE ni mogoče uporabiti za interpretacijo vseh procesov, ki spremljajo spreminjanje, kar pomeni, da lahko veljajo tudi drugi dejavniki. Še pomembnejše je dejstvo, da sprememba evtektičnega Si v bližini določenih intermetalnih spojin tipa $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{X}$ (npr. X: Sr), pri evtektičnih kristalnih mejah pa ni vselej enotna. To postaja še pomembnejše za ulitke s tankimi stenami Al-Si. Zato so še vedno potrebne dodatne preiskave spremembe evtektičnega Si.

Da bi popolnoma pojasnili mehanizem sprememb evtektičnega Si, je izjemno pomembna podrobna karakterizacija porazdelitve spreminjajočih elementov na atomski ravni. Razvoj elektronske mikroskopije (zlasti mikroskopije z visokokotnim obročastim detektorjem v temnem polju (HAADF) in spektroskopija z izgubo energije elektronov (EELS) pri vrstični transmisiji elektronski mikroskopiji (STEM) ter tomografije na atomsko sondo (APT)) je imel izjemno vlogo med raziskovanjem sprememb evtektičnega Si.

Ta članek je pregled napredka sprememb evtektičnega Si s posebnim poudarkom na uporabi napredne elektronske mikroskopije. Zelo jasno je, da je lahko napredna elektronska mikroskopija, vključno z mikroskopijo HAADF in EELS pri

the formation of binary Al-Si eutectic and subsequently possible ternary eutectics. Thus, the second important melt treatment is the modification of the eutectic Si structure from a flake-like morphology to a fine fibrous morphology. Different modifiers (e.g. Na [2–4], Sr [5–9], Eu [10, 11]) have been widely used to modify the eutectic Si. The modification mechanisms (i.e. impurity-induced twinning (IIT) growth mechanism [5], twin plane re-entrant edge (TPRE) growth mechanism [12, 13], poisoning of the TPRE [14], and solute entrainment [7]) have been investigated in detail. However, IIT, TPRE or poisoning of TPRE mechanism cannot be used to interpret all the observations accompanying modification, indicating that other factors may be also valid. More importantly, the modification of the eutectic Si is not always uniform in the vicinity of certain intermetallics of the type $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{X}$ (e.g. X: Sr) and at eutectic grain boundaries. This becomes even more relevant for the thin walled Al-Si casting. Further investigations on the modification of eutectic Si are therefore still required.

In order to fully elucidate the modification mechanism of eutectic Si, a detailed characterisation on the distribution of modifying elements at atomic scale is of great necessity. Indeed, the development of electron microscopy (in particular high angle annular dark field imaging (HAADF) and electron energy loss spectroscopy (EELS) in scanning transmission electron microscopy (STEM) as well as atom probe tomography (APT)) has played a very important role during the investigation on the modification of eutectic Si.

In this paper, we overview the progress of the modification of eutectic Si, which in particular focus on the application of advanced electron microscopy. It is very clear that advanced electron microscopy, including HAADF and EELS in STEM as

STEM in APT, odlično orodje za pojasnitev mehanizma sprememb evtektičnega Si. Poleg uporabe napredne elektronske mikroskopije je zelo učinkovita tudi atomska simulacija, ki temelji na izračunu teorije gostotnega funkcionala (DFT), za pojasnitev lastnosti vezanja spreminjajočih elementov pri dvojčkih Si in učinka na dvojčičenje Si. Tako pri eksperimentalni kot simulacijski raziskavi smo odkrili, da imajo spreminjajoči elementi štiri različne vloge:

- (i) adsorpcija na presečišču faset Si, ki sproža mehanizem tvorbe IIT,
- (ii) adsorpcija na povratnem robu dvojčične ploskve, ki sproža mehanizem rasti TPPE,
- (iii) adsorpcija pred rastjo dvojčkov Si, ki sproža prehajanje snovi znotraj evtektičnega Si, in
- (iv) segregacija na fronti med evtektičnim Si in evtektičnim Al, ki zavira rast evtektičnega Si.

2 Napredek pri modificiranju evtektičnega Si

Odkritje spremembe evtektičnega Si izvira iz leta 1921 [2]. Od takrat so bili objavljeni številni članki o spremembi evtektičnega Si. Vendar pa natančen mehanizem sprememb še ni čisto pojasnjen kljub pogosti uporabi obdelave s spreminjanjem v livarski industriji. To je predvsem posledica pomanjkanja visokoločljivostnih opazovanj porazdelitve spreminjajočih elementov v evtektičnem Si. Hitri razvoj elektronske mikroskopije, zlasti HAADF-STEM, EELS in APT, je omogočil določitev porazdelitve spreminjajočih elementov v evtektičnem Si celo na atomski ravni.

Na Sliki 1 je prikazan sestavljeni evtektični Si v zelo čisti zlitini Al-5Si pri brizganju taline na hlajeno podlago z dodatkom 100 ppm Sr in 55 ppm Fe [6].

well as APT, can provide a great tool to elucidate the modification mechanism of eutectic Si. Apart from the application of advanced electron microscopy, atomic simulation based on density functional theory (DFT) calculation was also found to be very efficient to elucidate the bonding behaviour of modifying elements within Si twins and its effect on the Si twinning. From both experimental and simulation investigation, it was found that modifying elements have four different roles:

- (i) the adsorption at the intersection of Si facets, inducing IIT growth mechanism,
- (ii) the adsorption at the twin plane re-entrant edge, inducing TPPE growth mechanism,
- (iii) the adsorption ahead of the growing Si twins, inducing a solute entrainment within eutectic Si, and
- (iv) the segregation at the interface between eutectic Si and eutectic Al, suppressing the growth of eutectic Si.

2. The Progress of Modification of Eutectic Si

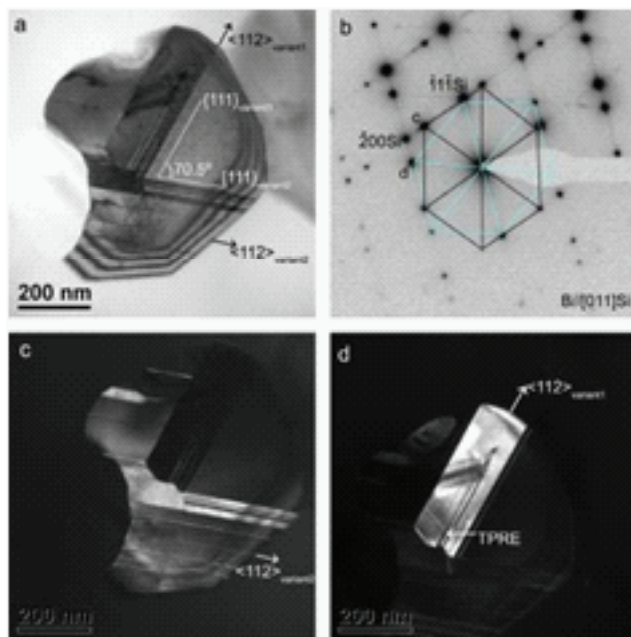
The discovery of the modification of eutectic Si can be dated back to 1921 [2]. Since then, a number of papers about the modification of eutectic Si have been published. But, the exact modification mechanism was still not clear yet, although the modification treatment has been widely used in foundry industry. This is mainly due to the lack of high resolution observation on the distribution of modifying elements within eutectic Si. With the rapid development of electron microscopy, in particular HAADF-STEM, EELS and APT, it becomes possible to determine the distribution of modifying elements within eutectic Si even at atomic scale.

V primerjavi z zelo čisto zlitino Al-5Si pri brizganju taline na hlajeno podlago z dodatkom 200 ppm Sr je številna gostota pri dvojčičenju Si mnogo višja. Še bolj zanimivo je to, da so bili atomi Sr določeni na presečišču dvojčičenja evtektičnega Si, kot je prikazano na Sl. 2. To je zelo neposredna poskusna podpora za mehanizem rasti IIT [6–8].

Zaradi velike razlike med atomskima številoma Sr (38) in Si (14) je mogoče določiti atomski stolpec Sr in Si s pomočjo mikroskopije HAADF-STEM. Vendar pa zaradi zelo majhne razlike med atomskimi števili Na (11) in Si (14) ni mogoče določiti Na v evtektičnem Si s pomočjo mikroskopije

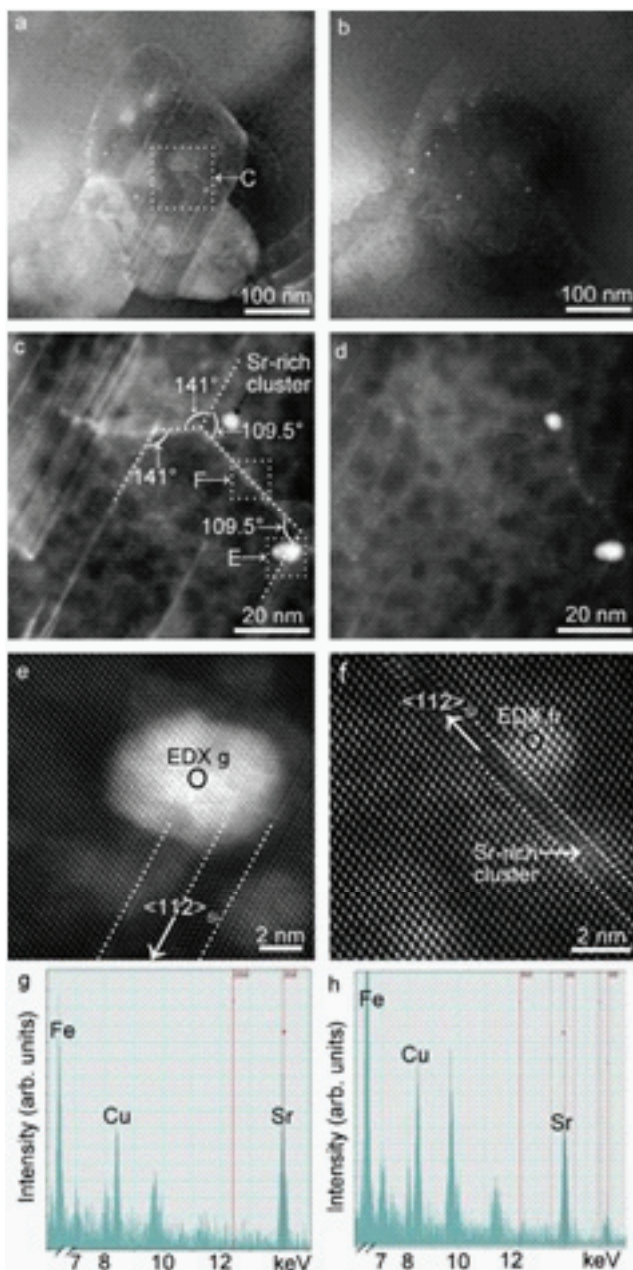
Figure 1 shows a multiple eutectic Si in high purity melt spun Al-5Si alloy with the addition of 100 ppm Sr and 55 ppm Fe [6]. Compared with high purity melt spun Al-5Si alloy without the addition of 200 ppm Sr, the number density of Si twinning is much higher. More interestingly, the Sr atoms were determined at the intersection of eutectic Si twinning, as shown in Figure 2. This is a very straightforward experimental support to IIT growth mechanism [6–8].

Due to the big difference of atomic numbers of Sr (38) and Si (14), it is possible to determine the Sr and Si atomic columns using HAADF-STEM. But, it is not possible to determine the Na within eutectic Si by



Sl. 1. (a) TEM-slika svetlega polja večkratnega dvojčnega delca Si, nagnjenega proti conski osi $[011]_{\text{Si}}$, v zlitini Al-5Si-100 ppm Sr-55 ppm, (b) ustrezno izbrano območje z vzorcem uklona, ki prikazuje dve možnosti, (c, d) centralne slike temnega polja, posnete na dveh $\{111\}$ mestih Si pri obeh različicah, kot je označeno s črko (b) [6].

Fig. 1. (a) TEM bright field image of a multiple twinned Si particle, tilted to the $[011]_{\text{Si}}$ zone axis, in Al-5Si-100 ppm Sr-55 ppm Fe alloy, (b) corresponding selected area diffraction pattern showing two variants, (c, d) central dark field images taken from the two $\{111\}_{\text{Si}}$ spots of the two variants, as marked in (b) [6].

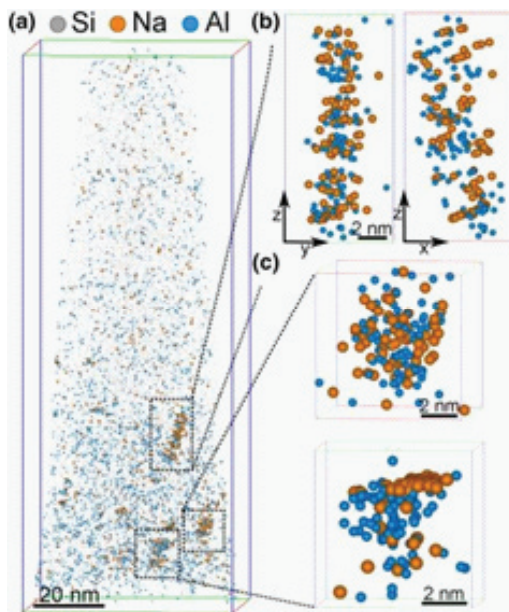


SI. 2. Serija slik večkratnega dvojčnega delca Si, nagnjenega proti conski osi $[011]_{\text{Si}}$ v zlitini Al-5Si-100 ppm Sr-55 ppm Fe: (a) slika temnega polja pri majhni povečavi, (b) zadevno izbrano območje slike STEM-HAADF pri majhni povečavi, (c) povečana slika temnega polja s prikazom sestavljenih dvojčkov Si, vzeto iz območja (C) (označeno z belim kvadratom v (c)) s prikazom grozda, bogatega s Sr, na presečišču dvojčkov Si, (f) povečana slika območja STEM-HAADF (F) (označena z belim kvadratom v (c)) s prikazom grozda, bogatega s Sr, vzdolž $[112]_{\text{Si}}$ smeri rasti Si, (g, h) analize EDX z območij, kot je označeno na slikah (e, f). Grozd, bogat s Sr, na presečišču dvojčkov Si je na sliki (c) označeno tudi s črno puščico [6].

Fig. 2. A series of images taken from a multiply twinned Si particle, tilted to the $[011]_{\text{Si}}$ zone axis, in Al-5Si-100 ppm Sr-55 ppm Fe alloy: (a) a dark-field image at a low magnification, (b) a corresponding STEM-HAADF image at a low magnification, (c) an enlarged dark-field image showing multiple Si twins, taken from the area (C) (marked with a white box in (a)), (d) a corresponding STEM-HAADF image, (e) an enlarged STEM-HAADF image taken from the area (E) (marked with a white box in (c)) showing a Sr-rich cluster at the intersection of Si twins, (f) an enlarged STEM-HAADF image taken from the area (F) (marked with a white box in (c)) showing a Sr-rich cluster along the $[112]_{\text{Si}}$ growth directions of Si, (g, h) EDX analyses taken from the areas as marked in (e, f), respectively. A Sr-rich cluster at the intersection of Si twins is also marked with a black arrow in (c) [6].

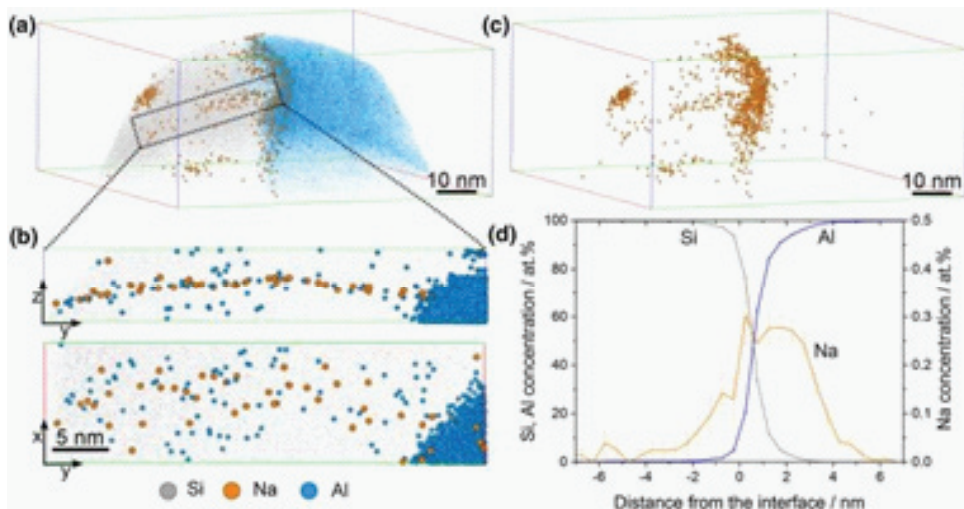
HAADF-STEM. Posledično je bila za določitev porazdelitve Na v evtektičnem Si uporabljena tomografija APT [3, 4].

using HAADF-STEM, which is due to its very close atomic numbers of Na (11) and Si (14). APT was therefore used to determine the distribution of Na within eutectic Si [3, 4].



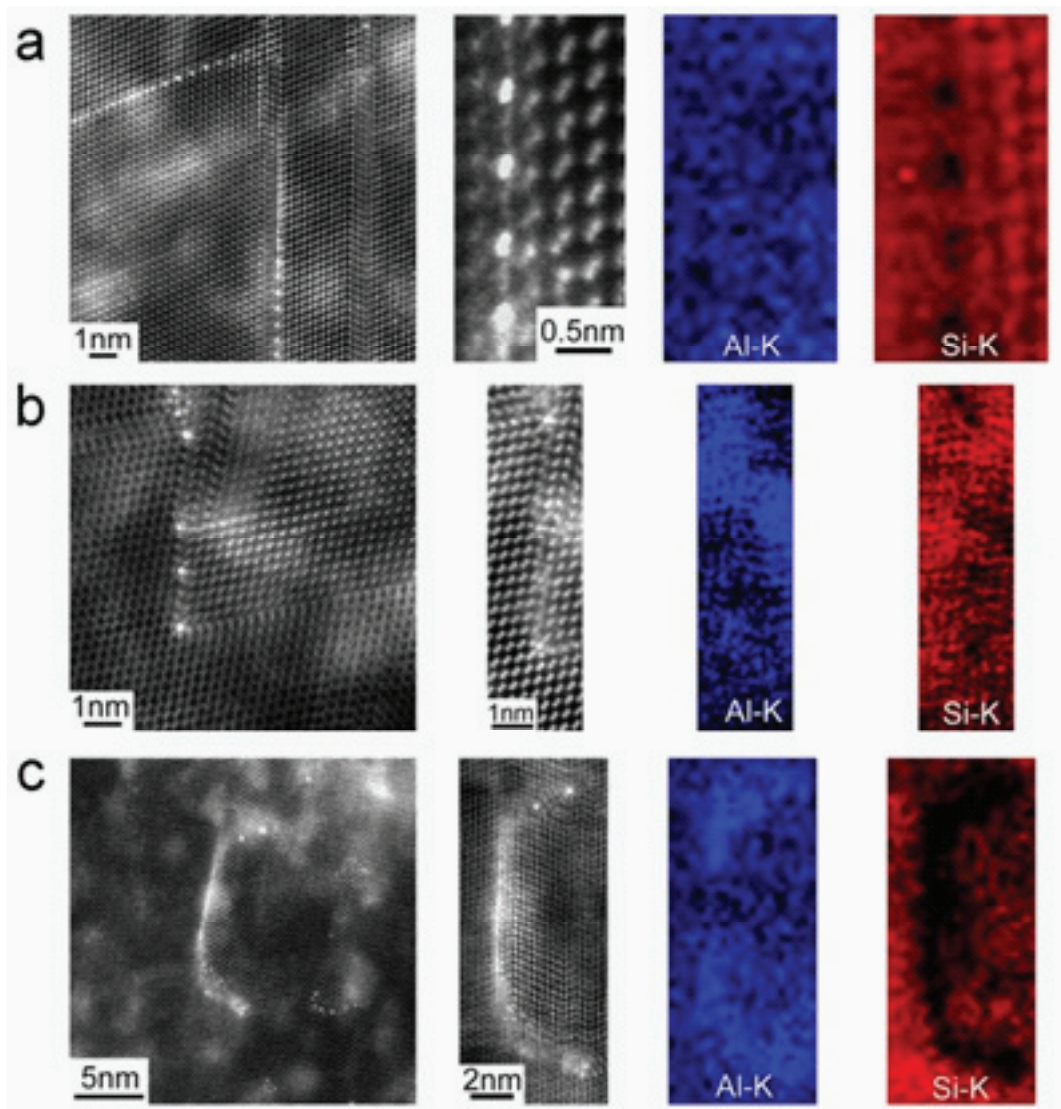
SI. 3. Tomografija na atomsko sondo evtektičnega Si v zlitini Al-5Si z dodatkom 160 ppm Na, (a) popolna 3D-rekonstrukcija podatkov (atomi vsakega elementa so za namene prikaza prikazani v različnih velikostih), (b) povečana slika gnezda v obliki cevi, (c) povečani sliki dveh grozdov v obliki delcev [3],

Fig. 3. Atom probe tomography of eutectic Si in Al-5Si alloy with 160 ppm Na addition, (a) complete 3D reconstruction of the data (atoms of each element are shown in different sizes for visualization purposes), (b) magnified image of a rod-like cluster, (c) magnified images of two particle-like clusters [3].



SI. 4. Tomografija na atomsko sondo evtektičnega Al in evtektičnega Si v zlitini Al-5Si z dodatkom 160 ppm Na, (a) popolna 3D-rekonstrukcija podatkov z atomi Na, prikazanimi v sferični obliki, (b) subvolumenska označitev grozda v obliki cevi, sestavljenega iz enoatomske plasti, (c) atomska preslikava atomov Na, ki prikazuje obogatitev Na na fronti med evtektičnim Al in evtektičnim Si, (d) koncentracija profila po fronti, izdelana s pomočjo histograma bližine, ki prikazuje obogatitev Na na fronti [3].

Fig. 4. Atom probe tomography of eutectic Al and eutectic Si in Al-5Si alloy with 160 ppm Na addition, (a) complete 3D reconstruction of the data with Na atoms represented as sphere, (b) a sub-volume highlighting a rod-like cluster composed of an atomic monolayer, (c) atomic map of Na atoms showing Na enrichment at the interface between eutectic Al and eutectic Si, (d) concentration profile across the interface constructed using proximity histogram, showing the enrichment of Na at the interface [3].

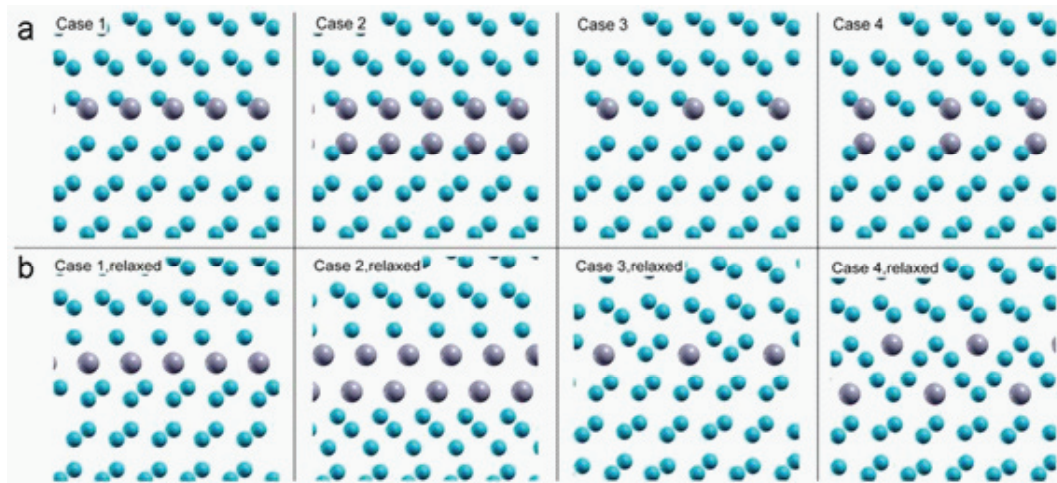


SI. 5. Slike HAADF-STEM v visoki ločljivosti in preslikave EELS Al, Si in Eu v zlitini Al-5Si-0.05Eu. (a) prikazuje atome Eu med vsakima atomskima stolpcema Si na povratnem robu dvojčične ploskve, kar kaže na aktivno zastrupitev mehanizma TPPE. (b) prikazuje, da so atomski stolpci, bogati z Eu, na fronti faset Si in njihovih dvojčkov, kar kaže na aktivnost mehanizma IIT. (c) prikazuje, da so atomi Eu pred rastočimi dvojčki Si, ki tvorijo neprekinjeno plast, obogateno z Eu, kar kaže, da se segregacija na fronti odvija v okviru evtektičnega Si [11].

Fig 5. High resolution HAADF STEM images and EELS maps of Al, Si and Eu in Al-5Si- 0.05Eu alloy. (a) shows Eu atoms between every two Si atomic columns being located at the twin plane re-entrant edge, indicating that poisoning of the TPPE mechanism is active. (b) shows Eu-rich atomic columns are located at the intersection of Si facets and respectively twins, indicating that the IIT mechanism is active. (c) shows Eu atoms are located ahead of the growing Si twins, forming a continuous Eu-rich layer, indicating that a solute entrainment occurs within eutectic Si [11].

Slika 3 prikazuje distribucijo atomov Na v evtektičnem Si [3]. Jasno se je za Na izkazalo, da se nahaja vzdolž TPRES in na presečišču dvojčičenja Si, ki je zelo podobno Sr, kar nakazuje, da bi lahko bila mehanizma sprememb Na in Sr tudi podobna in se zato lahko interpretirata na podoben način. Nadalje so bili vzdolž fronte med matriko evtektičnega Si in Al določeni tudi atomi Na, kot prikazuje Sl. 4 [3]. To kaže, da se lahko Na difundira iz evtektičnega Si med postopkom strjevanja in se izceja pred strjevalnimi frontami, kar ovira nadaljnjo rast evtektičnega Si [3, 4]. O zelo podobnih opažanjih z mikroskopiranjem HAADF-STEM so poročali tudi pri zlitini Al-5Si s

Figure 3 shows the distribution of Na atoms within eutectic Si [3]. Clearly, Na was found to be located along TPRES and at the intersection of Si twinning, which is very similar to Sr, indicating that the modification mechanism of Na and Sr may also be similar and therefore can be interpreted in a similar manner. Furthermore, Na atoms were also determined along the interface between eutectic Si and Al matrix, as shown in Figure 4 [3]. This indicates that Na may diffuse out the eutectic Si during solidification and segregate ahead of solidification fronts, hampering the further growth of eutectic Si [3, 4]. A very similar observation was also reported in Al-5Si alloy with 500 ppm Eu



Sl. 6. (a) Začetne strukture in (b) sproščene strukture za štiri različne primere atomov Eu v evtektičnem Si. V primeru 1 so bili vsi atomi Si na eni strani TB zamenjani z atomi Eu, kar ustreza celotnemu pokritju atomov Eu na eni strani dvojčka Si. V primeru 2 so bili vsi atomi Si na obeh straneh TB zamenjani z atomi Eu, kar ustreza celotnemu pokritju atomov Eu na obeh straneh dvojčka Si. Podobno primer 3 prikazuje polovično pokritost atomov Eu na eni strani dvojčka Si, primer 4 pa prikazuje polovično pokritost atomov Eu na obeh straneh dvojčka Si [11].

Fig 6. (a) Starting structures and (b) relaxed structures for four different cases of Eu atoms within eutectic Si. In Case 1, all Si atoms on one side of the TB have been substituted with Eu atoms which corresponds to a full coverage of Eu atoms on one side of the Si twin. In Case 2, all Si atoms on both sides of the TB have been substituted with Eu atoms which corresponds to a full coverage of Eu atoms on both sides of the Si twin. Similarly, Case 3 corresponds to half coverage of Eu atoms on one side of the Si twin, and Case 4 corresponds to half coverage of Eu atoms on both sides of the Si twin [11].

dodatkom 500 ppm Eu, kot je prikazano na Sl. 5 [10, 11]. Treba je opozoriti tudi, da je mogoče tovrstna opažanja pri visokoločljivostnih preizkusih dodatno potrditi s simulacijo DFT, kot je prikazano na Sl. 6 [11].

Tako pri eksperimentalni kot simulacijski raziskavi smo odkrili, da imajo spreminjajoči elementi štiri različne vloge: (i) adsorpcija na presečišču faset Si, ki sproža mehanizem tvorbe IIT, (ii) adsorpcija na povratnem robu dvojčične ploskve, ki sproža mehanizem rasti TPPE, (iii) adsorpcija pred rastjo dvojčkov Si, ki sproža prehajanje snovi znotraj evtektičnega Si in (iv) segregacija na fronti med evtektičnim Si in evtektičnim Al, s čimer zavira rast evtektičnega Si.

3 Sklep

Razvoj napredne elektronske mikroskopije, vključno z vključno z mikroskopijo HAADF in EELS pri STEM in APT, prinaša odlično orodje za pojasnitev mehanizma sprememb evtektičnega Si. Nadalje bi bilo treba za popolno osvetlitev vedenja vezave treba upoštevati tudi atomsko simulacijo, ki temelji na izračunu teorije gostotnega funkcionala (DFT) spreminjajočih elementih v dvojčkih Si in njen učinek na dvojčičenje Si. Iz predhodnega raziskovalnega dela je jasno razvidno, da igra napredna elektronska mikroskopija (HAADF-STEM, EELS in APT) zelo pomembno vlogo pri poglobljenem raziskovanju na atomarni ravni na področju strjevanja.

addition by HAADF-STEM, as shown in Figure 5 [10, 11]. It should also be noted that such type of high resolution experimental observation can be further confirmed by DFT simulation, as shown in Figure 6 [11].

From both experimental and simulation investigation, it was found that modifying elements have four different roles: (i) the adsorption at the intersection of Si facets, inducing IIT growth mechanism, (ii) the adsorption at the twin plane re-entrant edge, inducing TPPE growth mechanism, (iii) the adsorption ahead of the growing Si twins, inducing a solute entrainment within eutectic Si, and (iv) the segregation at the interface between eutectic Si and eutectic Al, suppressing the growth of eutectic Si.

3 Conclusion

The development of advanced electron microscopy, including HAADF and EELS in STEM as well as APT, provides a great tool to elucidate the modification mechanism of eutectic Si. Furthermore, atomic simulation based on density functional theory (DFT) calculation should be also taken into consideration in order to fully elucidate the bonding behaviour of

modifying elements within Si twins and its effect on the Si twinning. From our previous research works, it is very clear that advanced electron microscopy (HAADF-STEM, EELS and APT) play a very important role for the in-depth atomic scale investigation in the field of solidification.

Viri / References

- [1] D.G. McCartney (1989) Grain refining of aluminum and its alloys using inoculants, *International Materials Reviews* 34: 247–260.
- [2] A. Pacz (1921) Alloy, U S Patent No. 1387900.

-
- [3] J. H. Li, J. Barrirero, M. Engstler, H. Aboulfadl, F. Mücklich in P. Schumacher (2015) Nucleation and growth of eutectic Si in Al-Si alloys with Na additions, *Metall. Mater. Trans. A*, 46A: 1300–1311.
 - [4] J. Barrirero, J.H. Li, M. Engstler, N. Ghafoor, P. Schumacher, M. Oden in F. Mücklich (2016) Cluster formation at the Si/liquid interface in Sr and Na modified Al-Si alloys, *Scripta Mater.* 117: 16–19.
 - [5] Shu-Zu Lu in A. Hellawell (1987) The mechanism of silicon modification in aluminum-silicon alloys: Impurity induced twinning, *Metall. Mater. Trans. A*, 18: 1721–1733.
 - [6] J. H. Li, M. Zarif, M. Albu, B. McKay, F. Hofer in P. Schumacher (2014) Nucleation kinetics of entrained eutectic Si in Al-5Si alloys, *Acta Mater.*, 72: 80–98.
 - [7] J. H. Li, M. Albu, F. Hofer and P. Schumacher (2015) Solute adsorption and entrapment during eutectic Si growth in Al-Si based alloys. *Acta Mater.*, 83: 187–202.
 - [8] J. H. Li, M. Zarif, G. Dehm and P. Schumacher (2012) Influence of impurity elements on the nucleation and growth of Si in high purity melt-spun Al-Si based alloys, *PHIL. Mag.*, 92: 3789–3805.
 - [9] M. Timpel, N. Wanderka, R. Schlesiger, T. Yamamoto, N. Lazarev, D. Isheim, G. Schmitz, S. Matsumura in J. Banhart (2012) The role of strontium in modifying aluminium-silicon alloys, *Acta Mater.*, 60: 3920–3928.
 - [10] J. H. Li, X. D. Wang, T. H. Ludwig, Y. Tsunekawa, L. Arnberg, J. Z. Jiang in P. Schumacher (2015) Modification of eutectic Si in Al-Si alloys with Eu addition, *Acta Mater.*, 84: 153–163.
 - [11] J. H. Li, F. Hage, M. Wiessner, L. Romaner, D. Scheiber, B. Sartory, Q. Ramasse in P. Schumacher (2015) The roles of Eu during the growth of eutectic Si in Al-Si alloys. *Scientific reports*. 5, 13802. DOI: 10.1038/srep13802.
 - [12] R. S. Wanger (1960) On the growth of germanium dendrites, *Acta Metall.*, 8: 57–60.
 - [13] R. D. Hamilton in R. G. Seidensticker (1960) Propagation mechanism of Germanium dendrites, *J. Appl. Phys.*, 31: 1165.
 - [14] M. G. Day in A. Hellawell (1968) The microstructure and crystallography of aluminum-silicon eutectic alloys, *Proc. R Soc. Lond A*, 305: 473–491.

Uporaba fokusiranega ionskega snopa pri karakterizaciji livnih Al-zlitin

Application of a focussed ion beam by characterization of casting Al-alloys

Povzetek

Mikrostrukture livnih aluminijevih zlitin vsebujejo številne mikrostrukturne sestavine mikro- ali nanovelikosti. Za metalografsko analizo največ uporabljamo standardne metode, kot so svetlobna mikroskopija, vrstična in presečna elektronska mikroskopija s številnimi analitičnimi metodami ter rentgenska difrakcija. Dodatne informacije o mikrostrukturi pa nam omogoča tudi metoda dvojnega snopa: fokusiranega ionskega snopa (FIB) in elektronskega snopa (SEM).

Fokusirani ionski snop (FIB; angl. Focussed Ion Beam) običajno galijevih ionov lahko pa tudi ioni drugih kovin nastane z ekstrakcijo v električnem polju in ima premer od nekaj nanometrov do mikrometrov. Pospešeni ioni ob trku z vzorcem izbijajo atome in tako odstranjujejo snov. Pri tem nastanejo različni signali, ki jih uporabimo za slikanje mikrostrukture. V kombinaciji s SEM lahko s FIB obdelujemo površino in jo hkrati s SEM upodobimo.

V tem članku je predstavljena uporaba metode (FIB-SEM) pri metalografskih preiskavah izbranih aluminijevih livnih zlitin. Prednost te metode so predvsem prečni prerezi na točno določenih mestih ter odkrivanje razporeditve in oblike mikrostrukturnih sestavin pod površino vzorca. Na kratko je predstavljen tudi postopek izdelave serijskih rezov in prostorska (3D) rekonstrukcija mikrostrukture.

Ključne besede: aluminijeva zlitina, litje, fokusiran ionski snop, karakterizacija, mikrostruktura

Abstract

Microstructures of cast aluminium alloys consist of numerous micro- and nanosized microstructural constituents. For metallographic investigations, several standard methods have been used: light microscopy (LM), scanning (SEM) and transmission (TEM) electron microscopies combined with several analytical techniques, and X-ray diffraction (XRD). Additional information regarding the microstructure can be obtained by a dual beam microscopy: focussed ion beam (FIB) and electron beam (SEM).

The focussed ion beam is a device, in which a gallium ion beam is produced with a diameter ranging from few nanometres up to few micrometres. Collisions of ions with a sample result in scattering of atoms and ions from its surface, causing formation of different signals. By the application of a dual beam, the FIB modifies the surface, while SEM is used for the imaging.

In this article, we present the use of the dual beam (FIB-SEM) for metallography of selected aluminium casting alloys. The advantage of this method is a possibility to create cross-sections at particular sites and reveal the shapes and distributions of microstructural constituents, which are below the surface of a sample. We briefly represent the procedure for making serial cuts and spatial (3D) reconstruction of microstructure.

Keywords: aluminium alloy, casting, focussed ion beam, characterization, microstructure

1 Uvod

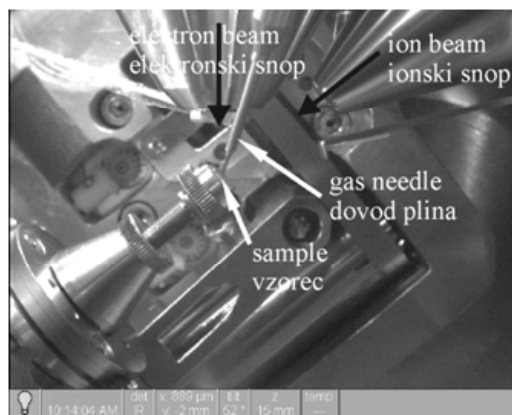
Fokusirani ionski snop (FIB) je naprava, v kateri nastane ionski curek s premerom nekaj nanometrov do nekaj mikrometrov [1]. Lahko se uporablja kot samostojna enota, vendar je večinoma dodatek vrstičnemu elektronskemu mikroskopu (SEM). V slednjem primeru govorimo o mikroskopu z dvojnimi snopoma (FIB-SEM) [2].

V fokusiranem ionskem snopu (FIB) so v večini primerov galijeve ioni. Poleg teh se v manjši meri še uporabljajo helijeve ali argonovi ioni [3]. Trki ionov s površino vzorca povzročijo izbijanje atomov s površine, kar imenujemo razprševanje. Hitrost razprševanja je sorazmerna razpršitvenemu koeficientu. FIB se lahko uporablja za odstranjevanje ali dodajanje snovi z natančnostjo nekaj desetih nanometrov. Zaradi tega se veliko uporablja

1 Introduction

The focussed ion beam (FIB) is a device, in which an ion beam is produced with a diameter ranging from few nanometres up to few micrometres [1]. It is available as a standalone device; however, it is predominantly an attachment to a scanning electron microscope (SEM). In the latter case, it is usually referred to as a dual-beam microscope (FIB-SEM) [2]. The interior of the chamber is shown in Fig. 1.

There are predominantly gallium ions in the ion beam. Additionally, FIB with helium or argon ions is also used in a smaller extend [3]. Collisions of ions with a sample scatter atoms from its surface. The rate of scattering is proportional to the scattering coefficient. FIB can be utilised for the removing and addition of substance with a precision of few ten of nanometres.



Slika 1. Notranjost komore mikroskopa z dvojnimi snopoma (FIB-SEM) v mikroskopu Quanta 200 3D

Figure 1. The chamber interior of the dual-beam microscope (FIB-SEM) Quanta 200 3D

v elektroniki. Med trki ionov s površino nastajajo tudi izbiti (sekundarni) elektroni in ioni. Tako lahko FIB deluje tudi kot mikroskop. Pri tem moramo upoštevati, da se pri opazovanju površina spreminja zaradi sočasnega izbijanja površinskih atomov z ioni [4].

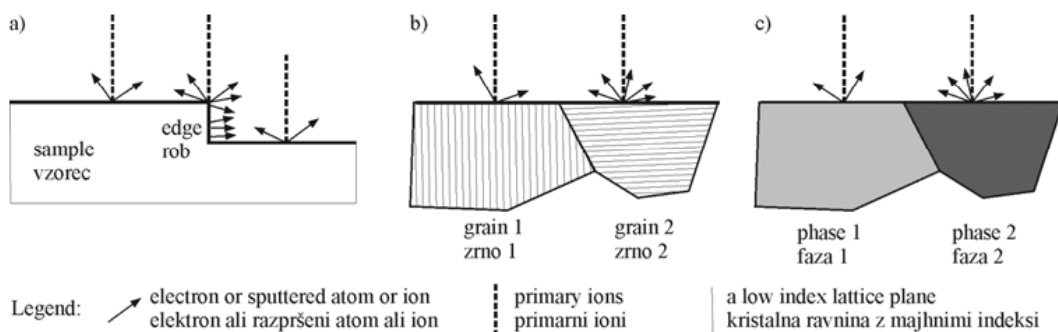
Nastanek slike omogočajo topografski, orientacijski in fazni kontrast. Dobimo lahko informacijo o hrapavosti površine (topografski kontrast), o orientaciji kristalnih zrn (orientacijski kontrast) in fazni sestavi (fazni kontrast), kar je shematično prikazano na sliki 2.

Fazni kontrast omogoča, da razlikujemo različne faze v zlitinah. Ker je hitrost odstranjevanja atomov z galijevimi atomi zelo majhna, je smiselno ugotavljati faze le v manjših območjih [5]. To so npr. meddendritna območja v počasi ohlajenih vzorcih. Po drugi strani se lahko uporabi za popolno karakterizacijo hitrostrjenih prahov ali trakov. Odstranjevanje snovi omogoča tudi pripravo prečnih prereзов, s katerimi odkrijemo mikrostrukturo na površini, ki je pravokotna na spolirano površino. Ta, tako imenovana 3D-mikroskopija, lahko odkrije

Therefore, it is instrumental in electronics. During collisions of ions with a surface, also secondary electrons and secondary ions can be formed. Thus, FIB can also work as a microscope. However, it has to be taken into account that during the microscopic investigation the surface of a sample is being changed simultaneously [4].

Imaging is possible due to the topographic, orientation and phase contrasts. One can obtain information regarding the surface roughness (topographic contrast), different orientation of crystal grains (orientation contrast), and the phase composition (phase contrast), which is schematically shown in Fig. 2.

A phase contrast enables distinctions between different phases in alloys. Since the removal rate by the use of gallium ions is rather low, it is worth to use for determination of phases in smaller regions [5]. Thus, it could be used for the determination of phases in the interdendritic regions of slowly cooling specimens. On the other hand, it can be used for the complete characterization of rapidly solidified powders or melt-spun ribbons. The removal of substance can also



Slika 2. Shematična predstavitev interakcije ionskega snopa s površino vzorca in nastanka različnih vrst kontrasta: a) topografski kontrast, b) orientacijski kontrast in c) fazni kontrast.

Figure 2. A schematic presentation of interactions of an ion beam with the surface of a specimen, and the formation of various types of contrast: a) topographic contrast, b) orientation contrast, and c) phase contrast

prostorsko razporeditev faz. S kombinacijo številnih zaporednih prečnih prereзов lahko naredimo prostorsko rekonstrukcijo faz, ki omogoča opredelitev njihove 3D-oblike [6].

V tem prispevku bomo prikazali uporabo metode FIB pri opredelitvi faz v nekaterih aluminijevih livnih zlitinah. Glavni cilj je prikazati uporabo FIB v metalografiji.

2 Eksperimentalno delo

Raziskali smo več aluminijevih zlitin. Predstavljamo rezultate zlitine A383 in poskusne zlitine Al-Mn-Be (preglednica 1). Zlitine so bile ulite v bakreno kokilo.

Zlitini smo preiskali v mikroskopu z dvojnimi curkom Quanta 200 3D, ki uporablja galijev izvor ionov. Majhen tok (okoli 10 pA) smo uporabili za ionsko mikroskopijo in jedkanje površine. Tokove od 3 do 20 nA smo uporabili za grobo, tokove 0,5-1 nA pa za srednje grobo odvzemanje. Za poliranje površine so bili primerni tokovi od 0,1 do 0,5 nA. Tok 0,5 nA je bil uporabljen za nanašanje platine. Za opazovanje mikrostrukture smo uporabili sekundarne (SE) in izbite (BSE) elektrone, prav tako pa tudi sekundarne elektrone, ki so jih izbili ioni (II-SE).

3 Rezultati in diskusija

Pri klasični metalografiji pripravljamo vzorce z mehanskim brušenjem in poliranjem, čemur navadno sledi kemijsko jedkanje. S temi koraki odkrijemo mikrostrukturo

allow preparation of cross-sections, allowing the revealing of microstructure on a surface perpendicular to the polished surface. This, so-called, 3D-microscopy can reveal a 3D phase distribution. By a combination of many sequential cross-sections, a 3D-reconstruction of phases is possible, which allows determination of their exact 3D-shape [6].

In this article we used FIB for determination of phases in some Al-casting alloy. The main aim was to show the performance of FIB in metallography.

2 Experimental

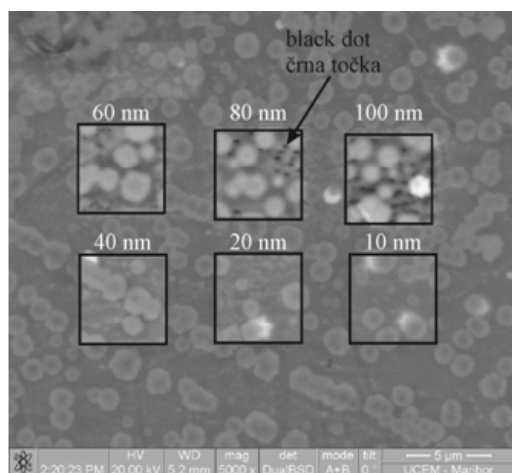
Several Al-alloys were investigated. In this article, we will present some results of the alloy A356 + Sc, A383 and an experimental Al-Mn-Be alloy (Table 1). The alloys were cast into a copper mould.

The alloys were investigated using a dual beam (ion and electron) scanning microscope Quanta 200 3D, which uses gallium ion source. A low ion current was used (usually 10 pA) for the ion microscopy and surface etching, 3-20 nA for the rough milling, 0.5-1 nA for the middle milling and 0.1-0.5 nA for the final polishing of cross-sections. The 0.5 nA current was used for the platinum deposition. The imaging was carried out using secondary (SE) and backscattered (BSE) electrons, as well as ion induced secondary electrons (II-SE).

Preglednica 1. Kemijska sestava raziskanih zlitin

Table 1. The chemical compositions of the investigated alloys

Alloy/Elements	Mg	Mn	Cu	Ti	Fe	Si	Sc	Be	Al
A383	0.35	0.24	2.61	0.04	0.69	10.72	-	-	Rest
Al-Mn-Be	-	11.18	-	-	-	-	-	1.90	Rest



Slika 3. Vpliv globine ionskega jedkanja za videz mikrostrukture zlitine Al-Mn-Be (slika z odbitimi elektroni)

Fig. 3. Effect of the ion etching depth on microstructure appearance of the alloy Al-Mn-Be (backscattered electron image, BSE)

vzorca, ki jo lahko opazujemo s svetlobnim mikroskopom. Ker sta ločljivost in globinska ostrinasvetlobnegamikroskopazeloomejeni, danes vzorce večinoma raziskujemo v vrstičnem elektronskem mikroskopu, ki ima ločljivost okoli 1 nm in odlično globinsko ostrino. Pri opazovanju z odbitimi elektroni se lahko pogosto izognemo jedkanju vzorca, torej lahko razločimo mikrostrukturo na spolirani površini. Za končno poliranje lahko uporabimo $\frac{1}{4}$ μm diamantno pasto ali suspenzijo SiO_2 . Elektronski curek, ki ga uporabljamo za opazovanje, praktično ne poškoduje površine kovinskega vzorca. Po drugi strani ionski curek vselej odstranjuje atome s površine. Torej se površina nenehno spreminja. Nadzorovano odstranjevanje površinskih atomov lahko poveča kontrast med mikrostrukturnimi sestavinami, če mikrostrukturo upodobimo

3 Results and discussion

In the classical metallography, metallic samples are prepared by mechanical grinding and polishing, followed by chemical etching. These steps reveal the microstructure of the samples that can be observed by a light microscope.

Since the resolution and depth of field of light microscopes are limited, metallic samples are nowadays mainly investigated by scanning electron microscopes that have a resolution around 1 nm, and excellent depth of field. By imaging using backscattered electrons, one can even avoid sample etching, and can observe the samples in the as-polished condition. The final polishing can comprise polishing using a $\frac{1}{4}$ μm diamond paste or a silica suspension. An electron beam can hardly damage any metallic sample. On the other hand, an ion beam always causes scattering of atoms from the surface. Thus, the surface is being constantly modified. The controlled removal of the surface atoms can increase a contrast between the microstructural constituents when the microstructure is imaged by ions or electrons. This process is called ion etching.

Ion etching

Fig. 3 shows the microstructure of an Al-Mn-Be sample that was cast into a permanent mould. The microstructure outside the boxes corresponds to the initial as-polished conditions. The backscattered electron image reveals the α -Al matrix (Al-rich solid solution), with the quasicrystalline (slightly darker particles) and intermetallic compound $\text{Al}_{15}\text{Mn}_3\text{Be}_2$ particles (brighter particles). The numbers above the boxes indicate the thicknesses of the layers that were removed from the surface by the ion beam.

z ioni ali elektroni. Ta proces imenujemo ionsko jedkanje.

Ionsko jedkanje

Slika 3 prikazuje mikrostrukturo zlitine Al-Mn-Be, ki je bila ulita v bakreno kokilo. Mikrostruktura izven kvadratov ustreza začetnemu stanju po mehanskem poliranju. Mikroposnetek z odbitimi elektroni odkrije aluminijevo osnovo α -Al (aluminijeva trdna raztopina) s kvazikristalnimi delci (nekoliko temnejši delci) in delci intermetalne spojine $\text{Al}_{15}\text{Mn}_3\text{Be}_2$ (svetlejši delci). Številke nad kvadrati označujejo debelino plasti, ki je bila odstranjena s površine z ioni. Razvidno je, da se z večjo debelino odstranjene plasti poveča kontrast med mikrostrukturnimi sestavinami. Različne faze imajo različne razpršitvene koeficiente, zato se debeline odstranjenih plasti razlikujejo med fazami. Zato ionsko jedkanje poveča površinsko hrapavost, kar poveča topografski kontrast. Toda po odstranitvi več kot 60 nm snovi, se začnejo pojavljati črne točke, delci pa postajajo bolj zaobljeni. Ta primer kaže, da obstaja optimalna debelina odstranjene snovi. Ko je debelina večja, se začnejo pojavljati različni artefakti, prav tako pa se večajo poškodbe mikrostrukturnih sestavin. Znano je tudi, da se ob obstreljevanju galijeve atomi vgradijo v površino. To spremeni kemično sestavo površine in lahko vodi tudi do nastanka galijeve faz, ki povsem spremenijo mikrostrukturo.

Z ionskim jedkanjem lahko kontrastiramo površine, ki jih nismo metalografsko pripravili. To so npr. površine trakov, ki smo jih hitro strdili.

Z ionskim jedkanjem lahko povečamo kontrast, vendar dobimo še vedno samo 2D-sliko, podobno kot jo dobimo tudi pri svetlobni mikroskopiji ali vrstični elektronski mikroskopiji.

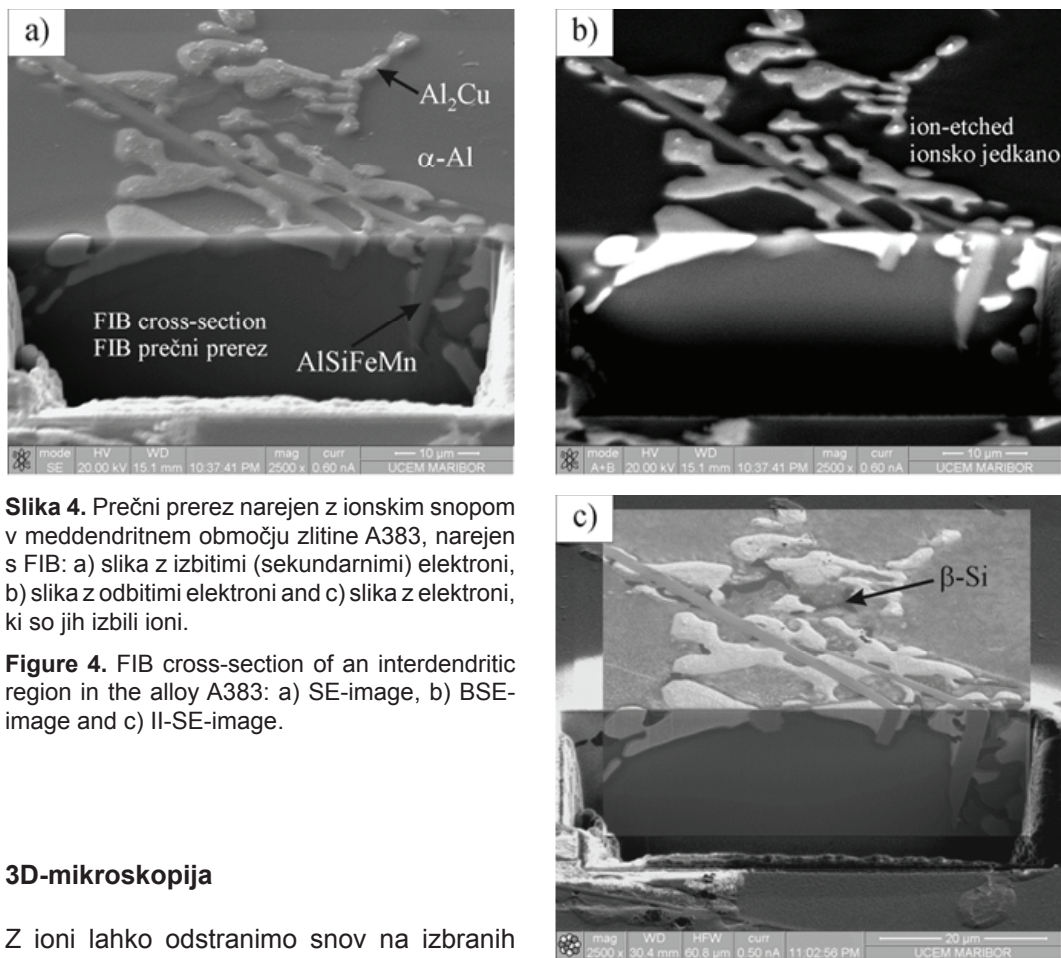
It is evident that by the increasing thickness of the removed layers, the contrast between microstructural constituents increases. Different phases possess different scattering factors, thus the thickness of the removed layer slightly differs between phases. Thus, the ion etching increases the surface roughness, which contributes to the topographic contrast. However, after removing of 60 nm and more substance, dark spots appear and particles become slightly more rounded. This example clearly shows that there exists an optimal thickness of the removed substance. When this thickness is exceeded, several artefacts can appear, and microstructural constituents become damaged. It is known, that incoming gallium atoms become implanted into the surface, which modifies the surface's chemical composition, can, in extreme cases, leads to the formation of Ga-rich compounds, which can totally change the microstructure.

In addition to polished surfaces, the ion etching can be used for contrasting of the surfaces that was not prepared by metallography, e.g. the outer surfaces of casting or melt-spun ribbons.

By ion etching, we can obtain an image with enhanced contrast, but it is still a 2D-image, similar as can be obtained by light and scanning electron microscopy.

3D-microscopy

With the ions, it is possible to remove material at selected places; the process is called ion milling. At this stage, higher ion current is applied, thus, all sides of the hole are rough. After that, one surface that is perpendicular to the initial mechanically polished surface is - smoothed by ion polishing. This surface is indicated by "FIB cross section" in Fig. 4a, and the initial mechanically surface is denoted by "ion etched" in Fig. 4b. This, so-



Slika 4. Prečni prerez narejen z ionskim snopom v meddendritnem območju zlitine A383, narejen s FIB: a) slika z izbitimi (sekundarnimi) elektroni, b) slika z odbitimi elektroni and c) slika z elektroni, ki so jih izbili ioni.

Figure 4. FIB cross-section of an interdendritic region in the alloy A383: a) SE-image, b) BSE-image and c) IL-SE-image.

3D-mikroskopija

Z ioni lahko odstranimo snov na izbranih mestih. Proces imenujemo ionsko odvzemanje snovi. Pri tem uporabimo večje ionske tokove, zato so stranice nastale luknje precej hrapave. Zatem zgladimo eno od stranic luknje, ki je pravokotna na mehansko spolirano površino. Ta ploskev je označena kot "FIB prečni prerez" na sliki 4a, medtem ko je mehansko polirana površina označena z "ionsko jedkano" na sliki 4b. To je t.i. 3D-mikroskopija, ki odkrije 3D-obliko faz ter njihovo prostorsko razporeditev.

Slika 4 prikazuje isti prečni prerez s sekundarnimi elektroni (slika 4a), odbitimi elektroni (slika 4b) in s sekundarnimi elektroni, ki so jih izbili ioni (slika 4c). Vsaka slika nudi drugačno informacijo o

called, 3D-microscopy reveals 3D-shapes of phases and also indicates a spatial phase distribution.

Fig. 4 shows the same cross-section imaged by secondary (Fig. 4a) and backscattered (Fig. 4b) electrons, and by secondary electrons induced by ions (Fig. 4c). Each image carries different information. The silicon phase ($\beta\text{-Si}$) is hardly seen in SE- and BSE-images, while it is easily recognized in IL-SE-image.

mikrostrukturi. Silicijeva faza (β -Si) se komaj opazi na slikah s sekundarnimi in odbitimi elektroni, medtem ko je izrazito vidna na sliki s sekundarnimi elektroni, ki so jih izbili ioni (II-SE).

3D-tomografija

Kadar združimo več zaporednih prečnih prereзов, dobimo 3D-rekonstrukcijo faz, kar omogoča natančno opredelitev njihove prostorske oblike. To je bilo narejeno že za več aluminijevih livnih zlitin [6]. Danes se 3D-tomografija pogosto kombinira z EDS (energijskodisperzijsko spektroskopijo), da dobimo prostorsko razporeditev elementov [8] in z EBSD (difrakcija odbitih elektronov), pri čemer dobimo prostorsko orientiranost faz [7].

4 Zaključki

Fokusiran ionski snop (FIB) je naprava, ki uporablja ionsko snop za odstranjevanje snovi s površine vzorcev, in tudi za mikroskopiranje. Nadzorovano odstranjevanje snovi s površine lahko povzroči ionsko jedkanje, ki poveča kontrast med mikrostrukturnimi sestavinami. Ionsko jedkanje lahko povzroči lastne artefakte, zato je za vsak primer posebej potrebno opredeliti optimalne parametre.

Zaradi sorazmerno počasnega odstranjevanje snovi, lahko odkrijemo mikrostrukturo le v manjših območjih. Uporaba FIB omogoča 3D-mikroskopijo in 3D-tomografijo, ki dodata nove vidike klasični metalografiji, ki temelji na raziskavi 2D-prečnih prereзов. Tako lahko metoda FIB predstavlja pomembno komplementarno tehniko drugi tehnikam karakterizacije.

3D-tomography

By a combination of many sequential cross-sections, a 3D-reconstruction of phases is possible, which allows determination of their exact 3D-shape. This has already been done for some Al-casting alloys, e.g. in Ref. [6]. In addition, 3D tomography is often combined with EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) to obtain 3D chemical maps [8], and with EBSD (Electron Back-Scattered Diffraction) to obtain 3D orientation maps [7].

4 Conclusions

The focussed ion beam (FIB) is a device, in which an ion beam is used for removing of a material from the surface from samples, as well as from imaging. Controlled removal of the material from the surface can produce ion etching. This increases the contrast between microstructural constituents. However, ion etching can also produce its own artefacts, thus the optimal conditions have to be found.

Due to the relatively small removal rates, the microstructure can be revealed at smaller regions. The application of FIB allows 3D-microscopy and 3D-tomography, which adds additional dimensions to classical metallography, which relied on 2D-cross sections. Thus, FIB can represent an important complementary method to other characterisation techniques.

Acknowledgement

The work was carried out in the framework of the Slovenian smart specialization, programme Materials and Technologies for New Applications, MARTINA, No.

Zahvala

Delo je bilo izvedeno v okviru Slovenske pametne specializacije, program Materiali in tehnologije za nove aplikacije, MARTINA, OP20.00369 in infrastrukturnega programa UM I0-0029, ki ga financira ARRS.

OP20.00369 and Infrastructure programme UM I0-0029 financed by the National Research Agency ARRS.

Viri / References

- [1] H. Sawaragi, H. Kasahara, R. Mimura, W. Thompson, M.H. Shearer, A FOCUSED ION-BEAM SYSTEM WITH A RETARDING MODE OBJECTIVE LENS, *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 9 (1991) 2613-2616.
- [2] L. Repetto, G. Firpo, U. Valbusa, Applications of focused ion beam in material science, *Materiali in Tehnologije*, 42 (2008) 143-149.
- [3] M.B.H. Breese, E.J. Teo, D. Mangaiyarkarasi, F. Champeaux, A.A. Bettiol, D. Blackwood, Proton beam writing of microstructures in silicon, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B-Beam Interactions with Materials and Atoms*, 231 (2005) 357-363.
- [4] F. Zupanic, T. Boncina, D. Pipic, V. Henc-Bartolic, UV N-2 laser ablation of a Cu-Sn-Zn-Pb alloy: Microstructure and topography studied by focused ion beam, *J. Alloy. Compd.*, 465 (2008) 197-204.
- [5] M. Voncina, J. Medved, T. Boncina, F. Zupanic, Effect of Ce on morphology of alpha(Al)-Al₂Cu eutectic in Al-Si-Cu alloy, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 24 (2014) 36-41.
- [6] F. Lasagni, A. Lasagni, E. Marks, C. Holzapfel, F. Mucklich, H.P. Degischer, Three-dimensional characterization of 'as-cast' and solution-treated AlSi12(Sr) alloys by high-resolution FIB tomography, *Acta Materialia*, 55 (2007) 3875-3882.
- [7] K. Kulawik, P.A. Buffat, A. Kruk, A.M. Wusatowska-Sarnek, A. Czyrska-Filemonowicz, Imaging and characterization of γ' and γ'' nanoparticles in Inconel 718 by EDX elemental mapping and FIB-SEM tomography, *Materials Characterization*, 100 (2015) 74-80.
- [8] M.D. Uchic, M.A. Groeber, D.M. Dimiduk, J.P. Simmons, 3D microstructural characterization of nickel superalloys via serial-sectioning using a dual beam FIB-SEM, *Scripta Materialia*, 55 (2006) 23-28.

Korozija in trpežnost adhezivno vezanih tlačno litih aluminijevih zlitin

Corrosion and Durability of Adhesively Bonded High-Pressure Die Cast Aluminum Alloys

Povzetek

Tlačno litje aluminijevih zlitin je privlačen proizvodni proces za izdelavo aluminijastih delov, ki se uporabljajo v avtomobilski, gradbeni ter letalski in vesoljski industriji. Združevanje tlačno litih aluminijastih komponent z drugimi strukturnimi deli s pomočjo adhezivnih sredstev še vedno predstavlja izziv zaradi kontaminacije ploskve ulitkov z mazivi pri ulivanju, ki je neločljivo povezana s procesom, in neenakomerne porazdelitve legirnih elementov po ploskvi. V tem članku bomo poročali o razvoju univerzalnih procesov predhodne kemijske obdelave za zanesljivo proizvodnjo adhezivno vezanih tlačno litih aluminijevih zlitin. Učinkovitost procesov predhodne kemijske obdelave smo ocenili s primerjavo morfologij ploskve in kemijskih sestav, korozijskih parametrov pred kemijsko obdelavo in po njej ter adhezijskih lastnosti v primeru staranja in brez njega. Prikazana je ocena procesa razvitih predhodnih kemijskih obdelav, vključno z razmaščevanjem v raztopinah NaOH, deoksidacijo v raztopini z žveplovno kislino in fluoridom ter pomakanjem v raztopine s heksafluorotitansko kislino pri tlačno litih komponentah v industriji.

Ključne besede: tlačno litje, aluminijeve zlitine, karakterizacija ploskve, korozija, adhezivna vezava, trpežnost

Abstract

High-pressure die casting of Al alloys is an attractive manufacturing process for the production of aluminum components used in the automobile, construction and aerospace industry. Joining of high-pressure die cast aluminum components with other structural parts using adhesives is still challenging, due to the inherent contamination of casting surfaces by die lubricants and the inhomogeneous distribution of alloying elements on the surface. In this lecture we will report on the development of a universal chemical pre-treatment process for the reliable fabrication of adhesively bonded HPDC aluminum alloys. The effectiveness of chemical pre-treatment processes was evaluated by comparison of surface morphologies and chemical compositions, corrosion parameters before and after chemical treatment, as well as adhesion properties without and with aging. The validation of the developed chemical pre-treatment process including degreasing in NaOH solutions, de-oxidation in fluoride-containing sulfuric acid solutions and dipping in hexafluorotitanic acid solutions, on high-pressure die cast components from the industry will be demonstrated.

Keywords: high-pressure die casting, aluminum alloys, surface characterization, corrosion, adhesive bonding, durability

1 Uvod

Tlačno litje (HPDC) aluminijevih zlitin je privlačen proizvodni proces za lahke konstrukcijske dele v avtomobilski industriji zaradi visoke stopnje proizvodnje in nizkih stroškov izdelave delih, izdelanih s tehniko litja skoraj brez izmeta [1–3]. Adhezivno vezanje je ena najobetavnejših tehnik spajanja za vezavo neenakih materialov, kot so jekla, aluminijeve zlitine in z vlakni okrepljena plastika v hibridni konstrukciji vozil. Integracija aluminijevih ulitkov v hibridne konstrukcije za vozila s pomočjo adhezivnih sredstev še vedno predstavlja izziv zaradi kontaminacije ploskve ulitkov z ostanki maziv in neenakomerne porazdelitve legirnih elementov, ki so škodljivi za začetno trdnost vezanja in trajnost adhezivnih spojev pri tlačnem litju aluminijevih zlitin [4, 5]. Naše predhodno delo v zvezi z adhezijskimi lastnostmi tlačno litih aluminijevih zlitin je pokazalo, da je do adhezijske napake pogosto prišlo pri ploskovnih regijah, oddaljenih od lijaka taline, na teh predelih pa je bila zaradi obogatenih intermetalnih faz izmerjena visoka gostota korozijskih tokov [4]. Zato se lastnosti adhezivne vezave aluminijevih tlačnih ulitkov močno razlikujejo glede na različne lokacije na livni ploskvi. Na podlagi kemijske analize ploskve in ocene trdnosti vezanja smo razvili kemijski proces za predobdelavo tlačno litih aluminijevih zlitin za izdelavo adhezivno vezanih struktur s pomočjo tlačno litih aluminijevih komponent. Ta postopek zajema tri korake, tj. razmaščevanje v alkalnih raztopinah, deoksidacijo v kislinskih raztopinah in nanos oksidnih premazov v kopeli za kemično konverzijo na tlačno litih aluminijastih ploskvah za boljšo odpornost proti koroziji, optimiziran pa je bil v zvezi s kemikalijami, uporabljenimi v drugem in tretjem koraku [5–7]. Najučinkovitejši odkriti proces kemične obdelave zajema

1 Introduction

High-pressure die casting (HPDC) of Al alloys is an attractive manufacturing process for light-weight structural parts in the automobile industry because of the high production rate and low cost for the fabrication of near-net-shape components [1-3]. Adhesive bonding is one of the most promising joining techniques for bonding dissimilar materials, such as steels, aluminum alloys and fiber-reinforced plastics in hybrid construction of vehicles. Integration of Al die castings into hybrid vehicle-structures using adhesives is still challenging due to the inherent contamination of the casting surfaces by residual lubricants and the inhomogeneous distributions of alloying elements, which are detrimental to the initial bonding strength and durability of adhesive joints involving HPDC Al alloys [4, 5]. Our previous work on the adhesion properties of HPDC Al alloys showed that an adhesive failure often occurred in the surface regions away from the melt in-gate and that a high corrosion current density in these regions was also measured due to the enrichment of intermetallic phases [4]. Thus the adhesive bonding property of an HPDC Al casting varies significantly at different locations on the casting surface. Based on the surface chemical analysis and the evaluation of bonding strength, we have developed a chemical process for the pre-treatment of HPDC Al alloys to fabricate adhesively bonded structures using HPDC Al components. This process consists of three steps, i.e., degreasing in alkaline solutions, deoxidation in acidic solutions and deposition of oxide coatings in a chemical conversion bath on HPDC Al surfaces to improve corrosion resistance, and it was optimized with respect to chemicals used in the second and third steps [5-7]. The most effective chemical treatment process

razmaščevanje v alkalnih raztopinah, ki mu sledi deoksidacija v žveplenokislinskih raztopinah s fluoridom ter nanos Ti-oksидnih konverzivnih premazov. V tem članku poročamo o uporabi optimiziranega procesa predobdelave pri drugih tlačno litih ulitkih z različnimi sredstvi za mazanje pri ulivanju. Učinkovitost procesa predobdelave smo potrdili z oceno trajnosti adhezivnih spojev pred staranjem in po njem.

2 Materiali in preizkusne metode

Dve aluminijevi zlitini, EN AC- AlSi9Cu3(Fe) in EN AC AlSi10MnMg , smo predhodno stali v električni peči in nato ulili v plošče ($260 \times 150 \times 4$ mm) z uporabo livarskega stroja za tlačno litje (Buehler Evolution 530B). Med procesom tlačnega litja smo livne ploskve pri vsakem livnem ciklu popršili s sredstvi za mazanje na osnovi polisiloksana z dodatkom voska ali brez njega (ChemTrend, Nemčija).

Kemikalije, uporabljene pri predobdelavi tlačno litih aluminijevih zlitin, so navedene v Preglednici 1. Te kemične raztopine so bile izbrane izmed komercialno dostopnih industrijskih izdelkov na osnovi njihovih glavnih sestavin (Alufinish GmbH, Nemčija). Morfologijo ploskve in kemijsko sestavo pred kemijsko obdelavo in po njej smo preverili z vrstično elektronsko mikroskopijo (SEM: JEOL JSM6480) in rentgensko fotoelektronsko spektroskopijo (XPS: ESCA-Lab MK II).

found consists in degreasing in alkaline solutions, followed by deoxidation in fluoride-containing sulfuric acid solutions and deposition of Ti-oxide conversion coatings. In this paper we report on the applicability of the optimized pre-treatment process to other HPDC alloys cast with different die lubricants. The effectiveness of the pretreatment process was verified by the evaluation of the durability of adhesive joints before and after aging.

2 Materials and Experimental Methods

Two Al alloys, EN AC- AlSi9Cu3(Fe) and EN AC AlSi10MnMg were pre-melted in an electric furnace and then cast into plates ($260 \times 150 \times 4$ mm) using an HPDC machine (Buehler Evolution 530B). During HPDC process, polysiloxane-based die lubricants with or without wax-additives (ChemTrend, Germany) were sprayed onto the die surfaces in each casting cycle to maintain HPDC operation.

The chemicals used for the pre-treatment of HPDC Al alloys are listed in Table 1. These chemical solutions were selected from commercially available industrial products based on their main ingredients (Alufinish GmbH, Germany). The surface morphology and chemical compositions before and after chemical treatment were examined by using scanning electron microscopy (SEM: JEOL JSM6480) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS: ESCA-Lab MK II), respectively.

Preglednica 1. Glavne kemikalije, uporabljene za predobdelavo ploskve

Table 1. Main chemicals used for surface pre-treatment

Razmaščevanje / Degreasing	Deoksidacija / Deoxidation	Konverzivni premaz / Conversion coating
raztopina NaOH / NaOH solution	Raztopina F- + H_2SO_4 / F- + H_2SO_4 solution	Raztopina H_2TiF_6 / H_2TiF_6 solution

Za izdelavo vzorcev klinaste oblike skladno z nemškim standardom DIN 65448 je bilo uporabljeno enokomponentno konstrukcijsko lepilo na osnovi epoksija (Dow Automotive System). Po 30-minutnem strjevanju pri temperaturi 180 °C so bile tlačno liti paneli iz vsake plošče izrezani v štiri vzorce klinaste oblike. Po vstavitvi vzorcev klinaste oblike in skladiščenju v laboratorijski atmosferi 1 uro smo izmerili dolžino začetne napokline. Nato smo vzorce klinaste oblike v klimatski komori za 1 teden potopili v raztopino NaCl (5 wt%) pri temperaturi 70 °C. Po staranju smo znova izmerili dolžino napokline. Po obnovi na zraku pri sobni temperaturi smo vzorce klinaste oblike za pregled prelomnih ploskev odprli s pomočjo stroja Instron 5567.

A one-part structural adhesive based on epoxy (Dow Automotive System) was used to fabricate wedge specimens according to the German standard, DIN 65448. After curing at 180 °C for 30 min, the bonded HPDC panels were cut into four wedge specimens from each plate. After the insertion of the wedges and storage in the lab atmosphere for 1 h, the initial crack length was measured. Then, the wedge specimens were immersed in 70 °C, 5 wt% NaCl solutions in a climate chamber for 1 week. After aging the crack length was measured again. After reconditioning at room temperature in air, the wedge specimens were opened using an Instron 5567 machine for examination of fracture surfaces.

3 Rezultati in razprava

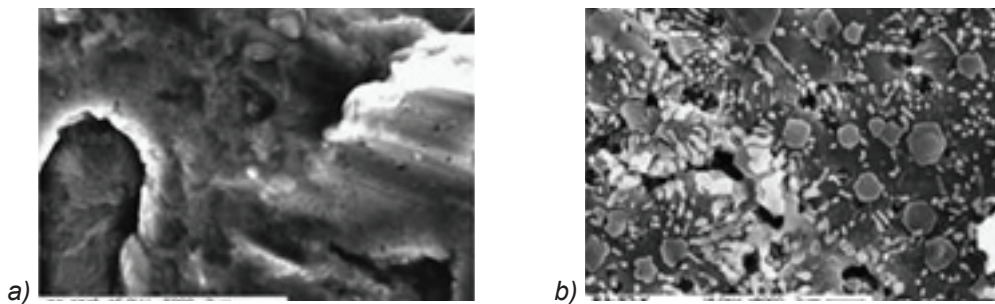
3.1 Spremembe v morfologiji ploskve in kemijski sestavi po kemijski obdelavi

Sprememba v morfologiji ploskve po kemijski obdelavi tlačnega litja AlSi10MnMg je prikazana na Sl. 1. Relativno nezanimiva

3 Results and discussion

3.1 Changes in Surface Morphology and Chemical Compositions after Chemical Treatment

The change in surface morphology after the chemical treatment of HPDC AlSi10MnMg is shown in Fig. 1. The relatively featureless



Sl. 1. SEM mikrosposnetki na ploskvi tlačno litih plošč AlSi10MnMg: (a) pri litju in (b) po kemični obdelavi

Fig. 1. SEM micrographs of the surface of HPDC AlSi10MnMg plates: (a) as-cast and (b) after chemical treatment

morfologija ploskve pri ploskvi med litjem se je spremenila v grob vzorec z izpostavitvijo intermetalnih faz, delcev Si in tvorbo jamičastih korozij na kristalnih mejah zaradi učinkov jedkanja uporabljenih kemikalij. Kemijska sestava ploskve, določena na podlagi meritev XPS, je prikazana na Sl. 2.

Po kemični obdelavi je koncentracija pri vrstah, ki vsebujejo C, pri ploskvi pri litju padla s približno 65 at% na približno 40 at% na kemično obdelanih ploskvah skupaj z zvečanjem koncentracije atomov kisika in aluminija. Nanos Ti-oksidgega konverzivnega premaza smo potrdili s pojavom signalov Ti (približno 0,5 at%) na posnetku preiskave kemično obdelane

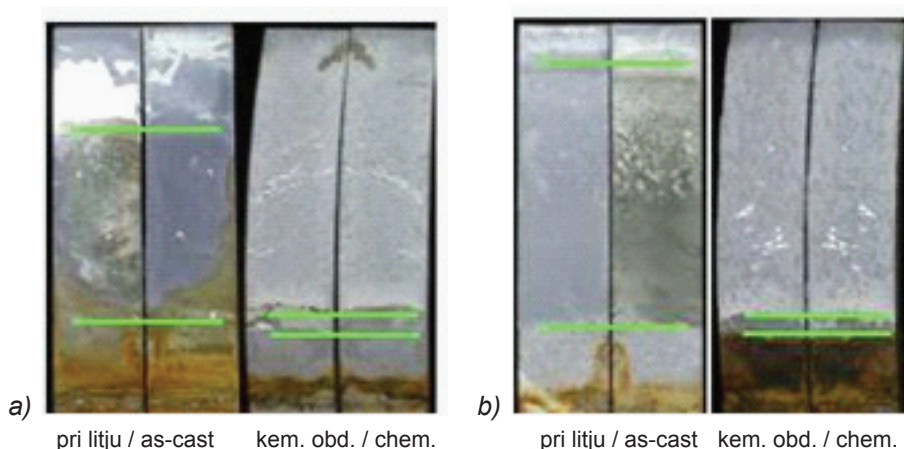
surface morphology of the as-cast surface changed into a rough pattern with exposure of intermetallic phases and Si particles and formation of pitting holes at the grain boundaries, due to etching effects of chemicals used. The surface chemical composition determined from XPS measurements are listed in Table 2.

After chemical treatment, the concentration of C-containing species decreased from about 65 at% on the as-cast surface to about 40 at% on chemically treated ones and is accompanied by an increase in atomic concentration of oxygen and aluminum. The deposition of Ti-oxide conversion coating was confirmed by the

Preglednica 2. Kemijska sestava ploskve (at. %) AlSi10MnMg pred kemijsko obdelavo in po njej

Table 2. Surface chemical compositions (at. %) of AlSi10MnMg before and after chemical treatment

	C	O	Si	Al	Mg	F	Ti
pri litju / as-cast	65,2	14,7	11,8	4,6	3,7	0,0	0,0
kem. obd. / chem.	40,3	30,2	6,9	20,7	0,7	0,7	0,5



Sl. 2. Prelomne ploskve vzorcev v obliki klinov, v litem stanju in kemično obdelane (kem. obd.) stanju (a) tlačno lite zlitine AlSi10MnMg in (b) tlačno lite zlitine AlSi9Cu3(Fe). Razširitev napokline je na vsaki fotografiji označena z zelenimi črtami.

Fig. 2. Fracture surfaces of wedge specimens fabricated in the as-cast and chemically treated (chem.) states of (a) HPDC AlSi10MnMg and (b) HPDC AlSi9Cu3(Fe) alloys. The crack extension is marked by the green lines in each photograph

ploskve. Na eni strani je padec koncentracije Si po kemični obdelavi dodaten kazalnik za odstranitev preostalih maziv. Po drugi pa pri visoko ločljivostnem spektru Si2p pri ulivani ploskvi prevladujejo organske vrste Si, ki nastanejo zaradi preostalih maziv, medtem ko pri kemično obdelanih ploskvah prevladuj anorganski Si, tj. Si in SiO₂. Rezultate karakterizacije ploskve smo potrdili z učinkovitostjo kemične obdelave za odstranitev preostalih maziv in nanosom Ti-oksidsnih premazov, odpornih proti koroziji.

3.2 Ocena lastnosti začetne vezave in trajnost adhezivnih spojev

Dolžina začetne napokline, sprožene z vstavitvijo vzorcev v obliki klina, in razširitev napokline po staranju za dve tlačno liti aluminijevi zlitini sta prikazani v Sl. 3. Pri litem stanju smo opazili daljšo začetno napoklino in razširitev napokline kot pri kemično obdelanem vzorcu. Prav tako smo opazili, da legirni elementi pri tlačno litih zlitinah vplivajo samo na trajnost adhezivnih spojev, izdelanih pri litju. Po kemični obdelavi nismo opazili nobene očitne odvisnosti na zlitinsko sestavo. Ta rezultat nakazuje, da je proces kemične predobdelave primeren za predobdelavo različnih tlačno litih zlitin in je posledično univerzalni proces za adhezivno vezanje aluminijevih tlačno litih zlitin.

appearance of Ti signals (about 0.5 at%) in the survey scan of the chemically treated surface. On one hand, the decrease in Si concentration after chemical treatment is another indicator for removing residual lubricants. On the other hand, the high-resolution Si2p spectrum of the as-cast surface is dominated by organic Si species resulting from the residual lubricants while that of chemically treated surfaces is dominated by inorganic Si, i.e., Si and SiO₂. The results of surface characterization confirmed the effectiveness of chemical treatment for the removal of residual lubricants and the deposition of corrosion-resistant Ti-oxide coatings.

3.2 Evaluation of initial bonding properties and the durability of adhesive joints

The initial crack length induced by inserting wedges, and the crack extension after aging for two HPDC Al alloys are listed in Table 3. Longer initial crack length and crack extension were observed for the as-cast state than for the chemically treated specimen. It is also noticed that the alloying elements in HPDC alloys influence only the durability of adhesive joints fabricated in the as-cast state. After chemical treatment, no obvious dependence on alloying

Preglednica 3. Dolžina začetne napokline in razširitev napokline po staranju pri temperaturi 70 °C v raztopini NaCl (5 wt. %)

Table 3. Initial crack length and crack extension after aging in 70 °C, 5 wt. % NaCl solutions

Tlačno lita zlitina / HPDC alloy	Stanje ploskve / Surface state	Dolžina napokline (mm) / Crack length (mm)	
		Začetno / Initial	Po staranju / After aging
AlSi9Cu3(Fe)	pri litju / as-cast	29,9 ± 8,9	84,8 ± 28,0
	kem. obd. / chem.	19,3 ± 1,1	19,9 ± 1,6
AlSi10MnMg	pri litju / as-cast	31,7 ± 7,6	72,6 ± 9,4
	kem. obd. / chem.	21,6 ± 2,1	25,2 ± 6,3

Reprezentativne prelomne ploskve po odprtju vzorca klinaste oblike, izdelanega s kemično obdelavo in brez nje, so prikazane v Sl. 2 za obe tlačno liti zlitini. Prelomne ploskve adhezivnih spojev pri litju kažejo na možnost napak, ki prevladujejo pri vezavi, medtem ko kemično obdelani vzorci nakazujejo napake pri koheziji pri obeh tlačno litih zlitinah. Iz karakterizacije ploskve in primerjave lastnosti vezave litih in kemično obdelanih vzorcev lahko sklepamo, da lahko razvit proces kemične obdelave bistveno izboljša trajnost adhezivnih spojev pri tlačno litih aluminijevih zlitinah ter se lahko uporablja pri različnih adhezivnih vezavah tlačno litih aluminijevih zlitin.

4 Sklepi

V tem članku je prikazan proces kemične predobdelave za zanesljivo izdelavo adhezivnih spojev pri tlačno litih aluminijevih zlitinah. Proces kemične obdelave zajema razmaščevanje v raztopinah NaOH, deoksidacijo v žveplenokislinskih raztopinah s fluoridom in nanos Ti-oksidičnih konverzivnih premazov. Učinkovitost procesa kemične predobdelave smo potrdili s karakterizacijo ploskve in preizkusi trajnosti adhezivnih spojev. Izkazalo se je, da je optimizirani kemični proces univerzalni proces predobdelave za tlačno lite aluminijeve zlitine z različnimi kemijskimi sestavami in litimi z različnimi sredstvi za mazanje pri ulivanju.

Zahvale

Izjemno smo hvaležni za finančno podporo Nemškega ministrstva za gospodarstvo in energetiko (BMW) prek Kolektivne raziskave industrijskega združenja (IGF).

composition was observed. This result suggested that the chemical pretreatment process is suitable for the pre-treatment of different HPDC alloys, thus being a universal process for adhesive bonding of HPDC Al alloys.

Representative fracture surfaces after opening the wedge specimen fabricated with and without chemical treatment are shown in Fig. 2 for the two HPDC alloys. The fracture surfaces of adhesive joints in the as-cast state exhibit a failure mode dominated by adhesive failure while those of chemically treated specimens show a cohesive failure mode for both HPDC alloys. From the surface characterization and the comparison of bonding properties of the as-cast and the chemically pretreated specimens, one can conclude that the developed chemical pre-treatment process can substantially improve the durability of adhesive joints involving HPDC Al alloys and is applicable to various HPDC Al alloys for adhesive bonding.

4. Conclusions

A chemical pretreatment process for the reliable fabrication of adhesive joints involving HPDC Al alloys is demonstrated in this paper. The chemical pre-treatment process consists in degreasing in NaOH solutions, deoxidation in fluoride-containing sulfuric acid solutions and deposition of Ti-oxide coatings. The effectiveness of the chemical treatment process was verified by surface characterization and durability tests of adhesive joints. The optimized chemical process is found to be a universal pre-treatment process for HPDC Al alloys of various chemical compositions and cast with different die lubricants.

Acknowledgements

Financial support from the German Ministry of Economics and Energy (BMWi) through Industrial Collective Research (IGF) is greatly acknowledged.

Viri / References

- [1] G. S. Cole in A. M. Sherman: Mater. Charact. 35 (1995) 3-9.
- [2] T. A. Barnes in I. R. Pashby: J. Mater. Process Technol. 99 (2000) 72-79.
- [3] J. Hirsh: Mater. Trans. 52 (2011) 818-824.
- [4] J. Shi, H. Pries, K. Dilger, M. Martin and F. Walther: Surface chemical inhomogeneity of high-pressure die cast Al-Si alloys and its effects on corrosion behaviors and adhesive bonding capabilities, in Proc. of the 71st World Foundry Congress. 2014, Bilbao, Spain.
- [5] J. Shi, H. Pries, E. Stammen in K. Dilger: Int. J. Adhes. Adhes. 61 (2015) 112-121.
- [6] J. Shi, H. Pries in K. Dilger: Prozesssicheres Kleben von strukturellen Aluminiumdruckguss-Komponenten. Project report, 2014.
- [7] H. Pries, J. Shi, E. Stammen in K. Dilger: Gießerei. 103 (2016) 28-35.

AKTUALNO / CURRENT

Koledar livarskih prireditev 2018, 2019

6.-27.07. 2018	VDI-Seminar »Gussteilgestaltung in der Praxis«	München, Nemčija
12.-14.09. 2018	58. IFC Portorož 2018	Portorož, Slovenija
23.-27.09. 2018	73. WFC »Creative Foundry« in Generalna skupščina WFO	Krakov, Poljska
21.-22.11. 2018	VDI-Seminar »Gussteilgestaltung in der Praxis«	Düsseldorf, Nemčija
14.-15.03. 2019	45. Aachener Gießerei-Kolloquium	Aachen, Nemčija
27.-30.04. 2019	CastExpo	Atlanta, ZDA
21.-24.05. 2019	Moulding Expo	Stuttgart, Nemčija
25.-29.06. 2019	GIFA, NEWCAST, METEC, THERMPROCESS	Düsseldorf, Nemčija
18.-20.09. 2019	WFO – Tehnični Forum in 59. IFC Portorož 2018	Portorož, Slovenija

AKTUALNO / CURRENT



Veliko livarsko posvetovanje treh držav

V organizaciji Avstrijskega livarskega inštituta ÖGI Leoben, Avstrijskega društva livarskih strokovnjakov Proguss Austria, Katedre za livarstvo Montanistične univerze Leoben, Švicarske livarske zveze GVS, Nemškega društva livarskih strokovnjakov VDG, Zveze nemške livarske industrije BDG, Raziskovalnega združenja za livarsko tehniko, Düsseldorf, FVG, je bilo v času med 26. in 27. aprilom 2018 v Kongresnem centru v Salzburgu, Avstrija, Veliko livarsko posvetovanje držav Nemčije, Avstrije in Švice. Posvetovanja se je udeležilo 780 udeležencev iz skupaj 21 držav. Predstavitve so bile razdeljene v 4 skupine: plenarna predavanja (6 predstavitev), področje livarstva železa in jekla (9 predstavitev), področje livarstva neželeznih kovin (9 predstavitev), področje izdelovalne tehnike (9 predstavitev) in 4 kratke strokovne predstavitve študentov, torej skupno 37 predstavitev. Na spremljajoči razstavi opreme, tehnologij, izdelkov in različnih razvojnih dosežkov ter strokovne literature in informacij je sodelovalo 63 razstavljalcev iz Nemčije, Avstrije, Švice, Italije, Nizozemske in Švedske. Ob zelo visoki strokovni ravni predstavitev so organizatorji pripravili zbornik s povzetki predavanj ter seznam razstavljalcev in udeležencev. Podajamo kratke povzetke strokovno najzanimivejših dvajsetih predavanj:

Plenarna predavanja

K.Lellig in J.Feikus - Nemak Europe GmbH, Frankfurt, Nemčija, sta predstavila za livarstvo izjemno pomembno temo: **"Izzivi in priložnosti za ulitke v različnih pogonskih komponentah avtomobilov"**. Družbeno zavedanje po trajni in ekološko sprejemljivi mobilnosti je izraženo z novimi predpisi glede zmanjšanja škodljivih emisij (CO₂, NO_x, fini prašni delci) konvencionalnih motorjev z notranjim zgorevanjem. Zaradi tega je nujnost znižanja teže avtomobila in razvoja alternativnih vrst pogonov. Zmanjšanje teže blokov in cilindrov motorjev ter ohišja gonila je možno z uporabo lahkih materialov in inovacijami izvedbe. Enako velja za strukturne komponente kot so npr. vzdolžni nosilci in podpore vzmeti. Prav tako so v zelo hitrem razvoju alternativni pogoni: električen in hibriden. Za ulitke so v fokusu predvsem ohišja elektomotorjev in ohišja baterij ter nekatere druge strukturne

komponente. Koncept izvedbe se danes med konkurenti še močno razlikuje. Ob tem postaja tudi velik pomen sodelovanja livarn in avtomobilskih proizvajalcev in s tem vse večja vloga inženirskega kadra v livarnah in možnosti livarn kot modulnih in sistemskih dobaviteljev. Povpraševanja do livarn se hitro spreminjajo, kar zahteva tudi veliko prilagodljivost. Vse pomembnejše je vprašanje varnosti in novih materialov in s tem sodelovanje že v R&R fazi in ustvarjanje medsebojnih digitalnih mrežnih povezav.

J.Edbauer – GF Automotive AG, Schaffhausen, Švica, je podal predavanje: **»Spremembe v avtomobilski in livarski industriji, priložnosti in izzivi«**. Industrija je pred velikimi izzivi globalizacije, avtomatizacije in digitalizacije. Odločilna sta znanje in fleksibilnost. Še posebej velja to za dobavitelje avtomobilski industriji. Livarska industrija se bo morala prilagoditi novim tržnim zahtevam in ob tem razvijati nove tehnologije in stalno skrbeti za nova znanja zaposlenih. Ob tem se podjetje predvsem usmerja v vse lažje izdelke in stalno prilagajanje trgu ter v globalne mreže povezav. GF kot globalno podjetje ocenjuje stabilnost v količinski prodaji ulitkov iz nodularne litine in rast potreb po ulitkih iz aluminijevih zlitin z višjo trdnostjo in žilavostjo. Ob tem se zavedajo, da gre dejansko za premik od avtomobilov do produktov za mobilnost.

L. Kallien-Hochschule Aalen Technik und Wirtschaft, Aalen, ZR Nemčija in C. Wilhelm-Foundry Consulting and Solutions-Wilhelm, Mauer bei Heidelberg, Nemčija sta v svojem predavanju podala aktualno temo: **«Vpliv elektro-mobilnosti na proizvodnjo ulitkov v nemški livarski industriji»**. Zaradi sprememb v avtomobilski industriji bo tem spremembam morala slediti tudi livarska industrija. Nemčija, Avstrija in Švica so veliki dobavitelji ulitkov za avtomobilsko industrijo. Zahteve po zmanjšanju teže avtomobila ter spremembe pogona bodo imele za posledico zmanjšanje števila ulitih delov v elektro-avtomobilih za predvidoma 2/3, kar pa ne pomeni ekvivalenta v masi teh delov. Previdoma bo že leta 2025 na svetovnem trgu med 8 in 10% avtomobilov z električnim pogonom. V primerjavi s sedanjim deležem pa se računa na močan porast deleža avtomobilov s hibridnim pogonom, ki pa zahtevajo večji delež ulitih delov. Ob globalizaciji svetovne proizvodnje avtomobilov, bi bilo nujno slediti razmišljanju o povezavi nemških, avstrijskih in švicarskih livarn in s skupnim inovacijskim potencialom razvijati tehnologije, ki bodo sposobne slediti vsem spremembam in zahtevam avtomobilske industrije.

C. Kühlgatz – Hüttenes-Albertus Chemische Werke GmbH, Hannover, Nemčija, je podal temo: **»Kako lahko dobavitelji in livarji v prihodnje skupaj skrbijo za razvoj tehnologije«**. Samo z inovacijami lahko podjetja zagotovijo svoj obstoj na vse bolj zahtevnem globalnem trgu. Tako je danes 75% strojne in livarske industrije izpostavljene inovacijskemu pritisku. Za livarstvo so ob tem izpostavljeni naslednji faktorji: večje zahteve kupcev, širjenje relevantnih znanj in vedenj, naraščajoča globalna konkurenčnost, zaostritev regulativnih pogojev (n.pr. področje okolja), nove tehnologije (n.pr. 3D tiskanje). Prav tako je izjemnega pomena hitrost zelo hitrega tehnološkega razvoja. Livarstvo je zahtevno tehnološko področje in je posameznim livarnam skoraj nemogoče slediti hitremu razvoju. Potrebno je poiskati platformo za skupen razvoj v: projektnem pristopu, optimizaciji procesne verige, tehniki livarstva in izobraževanju kadra.

L. Ohm; J. Alfes in G. Dieckhues – Ohm & Hänner Metallwerk GmbH&Co.KG, Olpe, Nemčija so bili avtorji predavanja : **»Od izdelovalca form do visoko tehnološke livarne«**. Družinska livarna in izdelovalka peščenih form je še pred 55 leti bila majhno in nepomembno podjetje. Danes je ena vodilnih nemških storitvenih livarn na področju litja v

pesek za tehniško zahtevne ulitke z veliko kakovostjo in fleksibilnostjo svoje proizvodnje, s preko 700 zaposlenimi in preko 100 mio EUR prometa. Danes ima 320 aktivnih odjemalcev zahtevnih ulitkov z zelo širokim spektrom ulitkov. Podjetje je v celoti zasnovano na računalniško podprtem celovitem inženiringu svojega dela, od izdelave modelov do končne montaže in storitev. CAE je osnova tako pri načrtovanju ulitkov in livnih sistemov kot pri izdelavi form, procesu litja ter optimizaciji vseh postopkov. Prigospodarjeni rezultati poslovanja se takoj reinvestirajo v nove posodobitve in tako zagotavljajo kontinuirano izboljšave in sodoben razvoj.

Predavanja iz strokovnega področja livarstva železa in jekla

R.Pausch - Fritz Winter Eisengiesserei GmbH&Co.KG, Stadtallendorf, ZR Nemčija je predstavil za livarstvo vedno dvoumno vprašanje: »**Staro razmišljanje, umazano ali celo okolju škodljivo?**« Takšno je zunanje mnenje o livarski stroki med prebivalci. Kaj storiti, da bi delovali nasprotno temu mnenju? Potrebno je začeti uvajati visoko avtomatizirane procese z inovativnimi tehnologijami in robotizacijo. Samo tako bi lahko kljub perspektivnosti panoge v prihodnje zagotavljali ustrezne kadre. V podjetju so osnovo za spremembo miselnosti o livarstvu poiskali v sodobni marketinški usmeritvi in korporativnem načrtovanju in to tudi enovito slikovno prikazali in celo spremenili logo podjetja. Za podjetje so podali novo oznako: ekolivarstvo. S tem so zasledovali ime inovativnega in trajnostnega livarskega procesa in s tem atraktivnega delodajalca. Spremembo dosedanjega mišljenja o livarstvu ne more ustvariti le posamezno podjetje temveč le celotna panoga.

B. Pustal – Livarski inštitut RWTH Univerze Aachen, ZR Nemčija je podal temo: »**Vnaprejšnja napoved strukture in mehanskih lastnosti na osnovi zmesnega kristala utrjene nodularne litine**«. Jekleni odpadki so najpomembnejša surovina za izdelavo nodularne litine. S stalnim spreminjanjem legirnih elementov v jeklu se spreminjajo tudi lastnosti jeklenih odpadkov. Predvsem zaradi vpliva na tvorbo perlita in karbidov so lahko določeni elementi neprimerni za proizvodnjo nodularne litine. Niso pa ti elementi škodljivi v primeru s silicijem utrjenih zmesnih kristalov te litine. Za raziskavo kumulativnega vpliva karbidotvornih elementov na nodularno litino z visokim deležem silicija EN-GJS-500-14 so bile izvršene eksperimentalne raziskave in termodinamične simulacije. Ugotovili so, da karbidi nastajajo predvsem na kristalnih mejah. Zelo negativen vpliv ima pri tem vanadij. Na tvorbo perlita pa najmočnejše vplivajo deleži Cr, Mn in Cu, medtem ko imata pri tem niobij in vanadij le neznamenit vpliv, vplivata pa izrazito kot karbidotvorca. S kvantifikacijo vpliva so razvili regresijske enačbe, ki omogočajo kvantitativno napoved strukture in lastnosti v odvisnosti od kemijske sestave. Količina tvorjenih karbidov pa je obratno sorazmerna s hitrostjo ohlajanja. Nastajajoča količina karbidov je povezana z naraščajočim deležem karbidotvornih elementov v zaostali talini. Eksperimentalno je bil ugotovljen negativen vpliv vanadija na tvorbo grafitnih kroglic in oblikovanje razkrojne oblike grafitnih vozlov (»chunky« grafit).

W.Menk-Georg Fischer Automotive AG, Schaffhausen, Švica je imel tehnično in gospodarsko zelo pomembno temo: »**Nova visoko trdnostna in visoko duktilna nodularna litina**«. Določen konstrukcijski element iz jekla so poskušali nadomestiti z nodularno litino GJS-500-14. Litina je po izračunih in preizkušanju kazala dobre rezultate. V aplikaciji za določen konstrukcijski element pa so nastopali krhki lomi. Material ni

prenašal dinamičnih obremenitev, saj ni imel zadostne duktilnosti. Na osnovi tega so razvili litino z moderiranim utrjenim zmesnim kristalom in dodatnim perlitnim utrjevanjem, ki so jo poimenovali SiboDur700, ki pomeni nov razvoj visoko trdne in visoko duktilne nodularne litine. Ta litina ima enako trdnost kot GJS-500-10, vendar 10% nižjo mejo tečenja $R_{p0,2}$, nekoliko nižjo razteznost ob pretrgu A_t , vendar dva- do štirikratno sposobnost prevzema energije pri udarni obremenitvi.

G.Wolf ; St.Krumm in L.Brunke – Tehniška univerza rudarska akademija Freiberg, Freiberg, ZR Nemčija, so bili avtorji predavanja: **"Oblika strukture in profil lastnosti tankostenskih jeklenih ulitkov"**. Uporaba visoko trdnostnih jekel za izdelavo karoserij osebnih avtomobilov je v zadnjih letih veliko pripomogla k lažji konstrukciji. Za zmanjšanje teže oziroma izboljšanje vzdržljivosti ob trku se uporabljajo vse bolj kompleksni strukturni elementi. Konstrukcijsko imajo ob tem prednost tlačni ulitki iz aluminija. Ob tem pa nastopa problem najugodnejše cene spojev med jekleno strukturo in Al-strukturnimi deli. Zaradi tega je prišlo do idej izdelave kompleksnih strukturnih delov iz tankostenskih jeklenih ulitkov, ki jih je z zvari lažje integrirati v strukturo karoserije. Ob tem ob samih tehniških zahtevah izdelave tankostenskih delov iz jeklene litine nastopijo še problemi pri naknadni termični obdelavi teh delov. Zaradi tega so poskusno izdelali ulite tanke ploščate jeklene vzorce in preiskovali njihove trdnostne lastnosti. Ugotovili so, da je možno izdelati tankostenske ulitke, ki bi brez naknadne termične obdelave in dodatnega ravnanja bili konkurenčna alternativa.

B.Tonn –Tehniška univerza Clausthal, Clausthal-Zellerfed, ZR Nemčija in N.S. Tiedje, Danska tehniška univerza, Lyngby, Danska, sta podala predavanje: **"Prognoza lokalnih lastnosti izdelka-karakterizacija in modeliranje"**. Uliti deli so v uporabi izpostavljeni različnim, pogosto celo nasprotnim, obremenitvam. Ob tem je ob zahtevah izdelave lahkih konstrukcij in maksimalne izkoriščenosti resursov to še toliko težje zagotoviti. Zato je potrebno izpostaviti tri ključne zadeve za prognozo lokalnih lastnosti v ulitih izdelkih:

1. Zelo natančno analizo procesnih parametrov in struktur ter iz tega rezultirajočih lastnosti ter njihova korelacija v kompleksnih ulitkih. Nujna je zelo občutljiva merilna senzorika, zelo natančna diagnostika strukture in njenih premen ter realnim obremenitvam prilagojeno mehansko preizkušanje.
2. Razumevanje in modelen opis mehanizmov. Potrebno je globlje razumevanje kinetike procesov polnjenja forme, strjevanja in premen. Ti modeli so možni le na mikro ali celo nano ravni.
3. Zelo natančne računalniške simulacije in prognoze lastnosti v določenih predelih ulitka.

Predavanja iz strokovnega področja livarstva neželeznih kovin

P. Schumacher-Montanistična univerza Leoben, Avstrijski livarski inštitut; E.Sobotka; Jiehua Li; H.Harmuth-Montanistična univerza, Leoben, Avstrija; B.Stauder-Nemak Linz GmbH, Avstrija, so bili avtorji predavanja: **»Novi aspekti pri proizvodnji ulitkov iz lahkih kovin.«** Potrebe po lahkih izdelkih zahtevajo tankostenske izdelke s kompleksno geometrijo. Pri največkrat uporabljenih Al-Si zlitinah pridemo ob tem do določenih omejitev. Podevtekske Al-Si zlitine nagibajo k tvorbi grobega zrna, kar pri tankostenskih ulitkih z

dendritno mrežo ne dovoljuje ustreznega pretoka pri polnjenju. Preostala evtektska talina se tako zelo težko prebija skozi dendritno mrežo. Samo zelo drobna zrna lahko zagotavljajo ustrezen pretok. Prav tako se na mejah evtektskih Al-Si zrn izločajo grobe intermetalne spojine, kar še dodatno zahteva čim finejša primarna zrna. Enako velja tudi za Al-Cu zlitine. Pri teh zlitinah se za udobnost zrn uporabljajo dodatki Zr in Sc. Finozrnate strukture so tako osnova za kakovostno izdelavo tankostenskih ulitkov.

A.Keidis - Franken Guss GmbH & Co.KG, Kitzingen, Zr Nemčija, je predstavil zelo aktualno temo: "**Uliti sestavni deli iz aluminijevih materialov kot lahki vgradni elementi v vozilu**". Lahki deli za vgradnjo zajemajo danes celoten spekter sestavnih elementov v vozilih. Postopek litja omogoča izdelavo obremenjenih delov skoraj brez omejitev geometrije. Podjetje Frankenguss ima zaradi različnih izdelovalnih postopkov odlične možnosti dialoga o izbiri materiala med litim železom in Al zlitinami. V aluminijevih livarnih se izdelujejo deli za avtomobilsko, kot tudi za letalsko in vesoljsko tehniko. Po konvencionalnem postopku tlačnega litja deli za avtomatske menjalnike, po postopku laminarnega tlačnega litja, znanega tudi pod imenom »Poral-Guss«, pa elementi za podvozja in karoserije. Po tem postopku izdelujejo izdelke brez poroznosti, s fino zrnato in homogeno strukturo ter možnostjo naknadne toplotne obdelave. Ti ulitki so tudi sposobni varjenja. Računajo, da bodo s tem postopkom lahko izdelovali tudi elemente za e-mobilnost, kot je n.pr. nosilec satorja za uporabo v avtomatskih menjalnikih v osebnih avtomobilih s hibridnim pogonom.

A.Buob - Bühler AG.Uzwil, Švica, je predstavil razvoj upravljanja procesa tlačnega litja: »Upravljanje celice-potencial optimizacije v tlačnem litju«. HPDC (high pressure die casting -visokotlačno litje) celica je koncept »pametne tovarne« in del industrije 4.0 tudi na področju tlačnega litja. Konkurenčnost tlačnega litja je odvisna od učinkovitosti samega procesa. Celoten sistem livne celice bo na osnovi IoT (internet stvari) sposoben samostojne optimizacije procesa. Izhodišče je v mrežni povezavi vseh komponent celice in njihovo centralno krmiljenje. S tem je možno zagotoviti učinkovitost in zanesljivost sistema. Prav tako bodo ob tem zajeta javljanja vseh napak in vsa navodila za njihovo odpravo. Razvoj sistema računalniškega upravljanja livne celice kot celote je nov korak k razvoju tlačnega litja.

M.Theiwes - Heck+Becker GmbH & Co.KG, Dautphetal, ZR Nemčija, je podal za izdelavo tlačnih ulitkov zelo zanimivo predavanje: »Hlajenje v bližini konture ulitka-nujnost, možnosti in tehniške predpostavke«. Konture tlačnih ulitkov so po svoji velikosti in kompleksnosti neprenehoma v porastu. Tako so posledično naslednje zahteve: minimalna količina pršilnih sredstev za zagotavljanje kakovosti in skrajšanje časovnih ciklusov; intenzivnejše hlajenje za zagotovitev krajšega časa ohlajanja; intenzivno hlajenje za preprečevanje skrčevalnih lunkejev v kritičnih območjih ulitka; intenzivno hlajenje za preprečevanje oprijemanja in lepljenja. Za navedeno sta rešitvi v hlajenju v bližini kontur ulitka oz. temperiranje forme, ki zagotavlja učinkovit in usmerjen odvod toplote. Ob tem je težava tudi zaradi relativno nizke toplotne prevodnosti orodnih jekel. Vodenje hladilnih medijev v bližini kontur pa vpliva tudi na samo vzdržljivost orodij. Reševanje problematike je povezano s tehničnimi rešitvami v samem orodju in v sposobnostih temperirnih naprav.

K.Bächle - Center za livarstvo Visoke strokovne šole severozahodne Švice, Brugg-Windisch, Švica in P.Dessarzin - Visoka tehniška šola ETH Zürich, Švica, sta predstavila dosežke z naslovom: "**Postopek za izdelavo forme v laboratorijskem merilu s 3D tiskanjem iztaljivih pozitivov iz umetnih materialov**". Namen predstavljenih

raziskav je bil z malo osebja in nizkimi infrastrukturnimi stroški izdelati enodelne livne forme za postopek FHC (fast hybrid casting). V ospredju je postopek aditivne tehnologije izdelave pozitivna forme. Pri tem so uporabili in ocenjevali tri različne umetne materiale. Najboljši rezultati so bili doseženi z uporabo nizkoviskozne PLA mase za 3D tiskanje. Kot material za izdelavo forme se je uporabil kremenčev pesek s furanskimi vezivi. Vzorec za testiranje postopka je bil cilindrične oblike. Izdelovali so testne ulitke iz cinka, Al-Si zlitin in medenine. Prav tako so izdelovali vzorce za preizkušanje natezne trdnosti.

Predavanje iz strokovnega področja izdelovalne tehnike

E.Allitsch-AM Ventures Holding GmbH, Krailling, ZR Nemčija in M. Lakomiec –EOS GmbH, Krailling, ZR Nemčija sta predstavila za livarstvo zanimivo temo: "**Aditivna izdelava na poti do serijske proizvodnje-inovativna dopolnitev za livarstvo**". Aditivna izdelava kovinskih delov-pogosto označena tudi kot industrijsko 3D tiskanje kovin, je bila prvotno razvita in uporabljena kot tehnologija hitre izdelave prototipov in specifičnih izdelkov, pri tem se je še posebej uveljavil laserski postopek, ki omogoča izdelavo kompleksnih geometrij, dobro površino in odlične lastnosti izdelkov. Kljub velikemu potencialu aditivne tehnologije (AT), ki ima letno rast 20%, je pri izdelavi ulitkov in odkovkov to še vedno le komplementarna tehnologija. Zelo zanimive v prihodnje so kombinacije s konvekcionalnimi izdelki kot n.pr. nanašanje sintranih plasti na ulitke. Omejitve za AT so v velikoserijski proizvodnji in geometrijsko velikih izdelkih. ZAT se kažejo seveda nove možnosti v obliki- in specifičnih lastnostih izdelkov, kar srednjeročno omogoča nove aplikacije in s tem krepitev vloge kovinskih izdelkov.

C.Thomser, M.Bodenburg, J.C.Sturm – Magma Giessereitechnologie GmbH, Aachen, ZR Nemčija, so podali predavanje: "Od toplotnih centrov do zagotovljenih lastnosti izdelka". Z razvojem v zadnjih tridesetih letih je danes računsko možno spremljati celoten proces litja in strjevanja ulitkov. Ob tem je možno napovedovati tudi strukturo, lastnosti in zaostale napetosti. Prav tako je možno napovedovati lokalno strukturo in lastnosti na določenih mestih ulitkov. Tako je možno konstrukcijo ulitkov tudi optimizirati. Poročnost in napake pogojene s strjevanjem lahko tudi kvantitativno napovedujemo. Nekovinske vključke kot n.pr. žlindra, ki nastaja tudi med litjem, do sedaj ni bilo možno točneje napovedovati. Zaradi tega so razvili poseben model, ki pri nodularni litini omogoča napovedovanje tej vključkov. Cilj tega je bil kvantitativen izračun prisotnosti nekovinskih vključkov v ulitku. S tem je glede na prisotnost nekovinskih vključkov možna tudi ocena varnosti ulitega izdelka v uporabi.

C.O.Huber, W.Schöffmann, C.Knollmayr - AVL List GmbH, Graz, Avstrija, so predstavili dosežek: "**Načrtovanje in optimizacija glave cilindra z visoko zmogljivostjo za 200 kW/L**". Aktualen je naraščajoč trend k manjšemu številu cilindrov in manjšim delovnim prostorninam valja s signifikantno povečanimi specifičnimi zmogljivostmi. Pri tem je najbolj obremenjen del glava cilindra. Predmet predstavitve je razvoj glave cilindra za 1,8L 4-cilindrske Otto motor s specifično zmogljivostjo 200 kW/L, ki je trenutno na preizkušanju v demonstracijskem športnem vozilu podjetja AVL. Za trajnost glave cilindra je zaradi visokih termomehanskih obremenitev ob optimalnem hlajenju odločilen material glave cilindra. Če ob srednjih in visokih zmogljivostih in optimalnem postopku litja in termične obdelave, zlitine Al-Si ustrezajo ciljem, omogočajo nove zlitine na osnovi sistema Al-Cu dodaten potencial.

Podjetje Nemak je razvilo nove Al-Cu zlitine in z optimizacijo lastnosti dokazalo prednosti tega materiala.

L.Plöchl-Quintus Technologies AB, Västeras, Švedska; R.Wagner-Aluwag AG, Niederbüren, Švica; B.Oberdorfer, D.Habe,G.Schindelbacher- Avstrijski livarski inštitut, Leoben, Avstrija so podali temo: **"Potencialna uporaba kombiniranih postopkov vročega izostastičnega stiskanja(HIP) in toplotne obdelave (WBH) za livne materiale z visoko trdnostjo"**. Postopek HIP se uporablja za zgoščevanje in s tem odstranjevanje volumetričnih napak v materialu. S tem postopkom se doseže 100% gostota in poveča se duktilnost ter trajna dinamična trdnost visoko obremenjenih delov. Z dodatno toplotno obdelavo (WBH) se navedene lastnosti še izboljšajo (angleško se kombiniran postopek označuje s kratico HPHT- high pressure heat treatment). Raziskovali so vpliv te kombinirane HIP/WBH obdelave na strukturo in lastnosti tlačnega ulitka iz zlitine AISi10MnMg, kot tudi pri vzorcih iz zlitine AISi7Mg ulitih v kokile. Raziskave z računalniško tomografijo in metalografijo so pokazale bistveno, ali celo popolno zmanjšanje poroznosti in izrazito povišanje zlasti trajne dinamične trdnosti.

M.Bednarz, T.Frank, H.Barth, T.Tuffensammer-ExOne GmbH, Gersthofen, Nemčija so predstavili novo temo: **"Binder-Jetting-Technologie-Izdelovalna metoda prihodnosti?"** Binder-jetting tehnologija je aditivna 3D tehnologija za tiskanje kompleksnih delov. Pri tem se na plast prahu s curkom nanaša tekoče vezivno sredstvo. Izdelek je tako sestavljen iz plasti prahu in vezivnega sredstva. Ta postopek se v livarski industriji vse pogosteje uporablja za izdelavo jeder in form. Predstavljen je bil postopek s primeri izdelave s furanom in hladno utrjevalnim fenolnim vezivom. Postopek je fleksibilen, izboljšuje kakovost form in jeder in je stroškovno zanimiv. Prikazan je bil primer uporabe tega postopka 3D tiskanja.

Veliko livarsko posvetovanje držav Nemčije, Avstrije in Švice, je izkazalo visoko raven organizacije posveta in predstavljenih strokovnih prispevkov. V gospodarsko zelo razvitih državah je razvoj tehnoloških postopkov in izdelkov zasnovan na tradiciji industrije, znanju, intenzivnem raziskovalnem delu na univerzah in inštitutih ter neposrednem sodelovanju z gospodarskimi podjetji pri razvojnih usmeritvah. Ob tem se izpostavlja zahteva po kakovostnem strokovnem kadru, ki bi lahko spremljal hiter razvoj in apliciral svoje izkušnje in znanje v aplikacijah industrijskega razvoja.

Glavni in odgovorni urednik Livarskega vestnika
zasl. prof. dr. Alojz Križman

AKTUALNO / CURRENT

Razgovor s predsednikom uprave Termit d.d., dobaviteljem in poslovnim partnerjem livarske industrije



Predsednik uprave družbe TERMIT d. d. Anton Serianz, univ. dipl. ing. metalurgije in materialov

1. Družba Termit d. d., Moravče, SI, je podjetje za proizvodnjo in predelavo kremenovih peskov, izdelavo jeder za livarne, izdelavo pomožnih livarskih sredstev za livarne in metalurške obrate, ki se s svojim razvojem vse bolj uveljavlja na domačem in globalnem trgu. Kateri so glavni razvojni dosežki v zadnjih 10 letih?

Najprej vsekakor prodor na evropske trge, potem razvoj sintetičnih oplaščenih peskov, razvoj premazov in v lanskem letu začetek proizvodnje jedrnih paketov.

2. Termit d. d. je delniška družba. Kakšna je bila struktura delničarjev na dan 31. 12. 2017?

72,86 % je v rokah Holtermid d.o.o.; 5,17 % imajo različne pravne osebe; 4,38 % fizične osebe; 17,59 % pa je lastnih delnic.

3. Kako je bilo količinsko proizvodnjo v zadnjih petih letih, tako na področju količinske proizvodnje kremenovih peskov, kot s proizvodnjo keramičnih in kremenovih oplaščenih peskov ter proizvodnjo jeder po hladnem in toplim postopku?

Proizvodnja kremenovega peska	
LETO	v tonah
2013	155.000
2014	155.000
2015	180.000
2016	180.000
2017	202.000

LETO	Proizvodnja oplaščenega peska v tonah	Število izdelanih jeder v tonah	
		Cold-box	Hot-box
2013	28.000	672	440
2014	31.000	1.100	1.240
2015	31.000	890	2.000
2016	28.000	890	1.600
2017	27.000	2.300	2.500

4. Podjetje je v letu 2017 imelo finančno 19,3 Mio EUR prodajne realizacije in sprejemljivo dodano vrednost na zaposlenega. Kako so se gibal poslovní rezultati v zadnjih petih letih?

Rezultati poslovanja v zadnjih petih letih v EUR	Leto 2013	Leto 2014	Leto 2015	Leto 2016	Leto 2017
Dosežen celotni prihodek	13.305.366	16.458.398	17.375.797	16.648.910	19.721.693
Dosežen dobiček pred obdavčitvijo	196.879	335.983	266.052	99.562	74.187
Delež dobička v celotnem prihodku	1.48	2.04	1.53	0.6	0.38
Vrednost investicijskih vlaganj	613.702	942.444	1.923.236	3.268.153	4.325.871
Dodana vrednost na zaposlenega	39.515	47.476	38.291	34.990	33.655

5. Ugledno nemško podjetje Hüttenes - Albertus GmbH (HA), Düsseldorf, je ob dogovoru o sodelovanju s Termit d. d. v letu 2017 proizvodnjo jeder za livarsko industrijo iz svojega sestrskega podjetja Eurokern, Baddeckenstedt preneslo v Moravče. Izgrajen je bil objekt s 4000 m2 površine, instalirana sodobna oprema. Tako danes v Moravčah deluje največja posamična jedrarna v Evropi s 45 zaposlenimi in predvideno rastjo 30% letno. Izdelava najzahtevnejših jeder postaja tako najpomembnejše v programu proizvodnje Termita. Kateri so bili bistveni dogovori



Nov objekt jedrarne v Moravčah, otvoritev junij 2017

s podjetjem Hüttenes-Albertus, kolikšna je bila vrednost celotne investicije v nov obrat in na katerih osnovah bo potekalo nadaljnje sodelovanje?

Huettenes Albertus je zaprl svojo jedrarno v Nemčiji, saj je poslovala slabo. Ker so jedra izdelovali za nekaj svojih strateških kupcev, si niso mogli privoščiti, da z dobavo prenehajo. Izdelavo teh jeder so ponudili nam in mi smo se odločili, da ta posel sprejmemo, kljub temu, da smo se zavedali velikosti celotne investicije. Sedem mesecev med letoma 2016 in 2017 smo imeli na šolanju v Nemčiji 20 ljudi, kar je povezano z velikimi stroški. Z veseljem pa ugotavljam, da se nam po zelo težkem začetku investicija pričenja obrestovati. Danes v jedrarni zaposlujeemo 95 ljudi, za letošnje leto pa pričakujemo podvojitev realizacije v primerjavi z lanskim letom. S HA imamo zgolj sodelovanje na komercialni osnovi. So naš pomemben kupec in tudi dobavitelj in takšno sodelovanje nameravamo ohraniti tudi v prihodnje. Celotna investicija v novo jedrarno je bila nekaj nad 7 mio. Eur.

6. Ali se s podjetjem Hüttenes- Albertus v prihodnje predvideva še sodelovanje na drugih področjih kot so: veziva, premazi, lepila, sredstva za metalurško obdelavo kovinskih talin, eksotermna sredstva ,ostala pomožna livarska sredstva, regeneracija peskov in drugo?

Sodelovanja na drugih področjih zaenkrat ne načrtujemo, saj jim na nekaterih evropskih trgih s premazi in oplaščenimi peski močno konkuriramo

7. Vse večjo vlogo in pomen imajo tudi kremenovi peski za zaključna dela na področju gradbeništva: mokra mivka, malte, ometi, tlakovci, epoxi tlaki, fugiranje, gradbena lepila, zasipavanje. Kolikšen je vrednostno prodajni delež teh proizvodov in ali ste s temi proizvodi tudi konkurenčni na tujih trgih?

V letu 2017 je področje gradbeništva predstavljalo le 8 % prodaje, vendar je gradbeništvo kupec naših peskov z nižjo dodano vrednostjo, ki so za livarstvo manj zanimivi. Nizka dodana vrednost gradbenih peskov nas omejuje tudi pri izvozu, saj konkurenčni zgolj v vzhodnem delu Italije, avstrijski Štajerski in Koroški, Hrvaškem in seveda na domačem trgu. Naše aktivnosti nameravamo še povečati, predvsem na področju gradbene kemije.



Nova jedrarna:
montaža jedrnih
paketov iz
različnih peščenih
mešanic



Nova jedrarna:
izdelava paketov
jeder po Cold –box
postopku

Nova jedrarna:
izdelava jeder po
Croning postopku



8. Termit d. d. se širše uveljavlja tudi s kremenovimi peski za športna igrišča, otroška igrišča, travnate površine, vrtnarstvo. Kdo med ljubitelji športa ne ve, da je Termitov kremenčev pesek kot osnova na »sveti travi« nogometnega igrišča Ljudski vrt v Mariboru, ali pa da je njegova kremenova mivka bila položena na odbojškem spektaklu Beach volley challenge Ljubljana 2017 sredi Kongresnega trga. Kolikšen je po realizaciji ta del programa, ki blagovno znamko Termit izpostavlja v širšem javnem prostoru in ji daje javno veljavo in kako s tem še bolj tudi v tujini izpostaviti te možnosti?

Po realizaciji je v lanskem letu ta segment za Termit predstavljal 6 %. V zadnji letih smo razvili peske za maneže s katerim smo zelo uspešni v Avstriji, Švici in Italiji, kjer smo plasirali naše izdelke za izdelavo večjih manež za preskakovanje ovir ali za dresurno jahanje. Že nekaj let uspešno sodelujemo pri organizaciji odbojškega spektakla Beach Volley challenge Ljubljana sredi kongresnega trga, kjer se igra na Termitovi mivki. S kvaliteto mivke so zelo zadovoljni tudi profesionalni igralci. Za nas najpomembnejše pa so izgradnje nogometnih in golf igrišč. Naši peski so na nogometnem stadionu Ljudski vrt, v Domžalah, Radomljah, na Reki in zagrebškem Maksimiru, v Modeni itd. Prav tako dobavljamo pesek na skoraj vsa igrišča za golf v Sloveniji in še bi lahko naštevali. Za Termit je segment peskov za športna igrišča pomemben tudi z vidika nagovarjanja širšega tržišča

in ciljne publike, tako v Sloveniji, kot v sosednjih državah. Na ta način razvijamo in krepimo blagovno znamko Termit.

9. Kvaliteto proizvodov in storitev prav gotovo zagotavljate s pridobljenimi mednarodnimi certifikati. Katere mednarodne certifikate in za katera področja dejavnosti ima Termit?

Vsa področja dejavnosti Termita pokrivajo certifikati: -ISO9001 sistem vodenja kakovosti -ISO14001 za sistem ravnanja z okoljem - OHSAS18001 za sistem vodenja varnosti in zdravja pri delu.

10. Vaš glavni proizvod in surovina je naravni kremenov pesek. Prav zaradi tega je skrb za varovanje okolja in rekultiviranje izkopov primarna. Verjetno je sistem ravnanja z okoljem skladen standardu ISO 14001. Katere okoljevarstvene predpise upoštevate? Kako je s predelavo odpadkov, zaščito podtalnice ter še posebej v novi jedrarni z delovnimi pogoji in emisijami plinov?

Sistem ravnanja z okoljem je skladen s standardom ISO14001:2015. Upoštevamo vse okoljevarstvene predpise in imamo pridobljena vsa okoljevarstvena dovoljenja: za emisije v vode, emisije v zrak, emisije hrupa in okoljevarstveno dovoljenje za predelavo odpadkov. Redno izvajamo monitoring odpadnih vod. Rezultati analizo odpadne vode so v dovoljenih mejah. Podtalnica zaradi delovanja Termita ni ogrožena, kar je pokazala tudi raziskava, ki jo je naročila občina Moravče. Delovni pogoji in meritve emisij iz nove jedrarne so v zakonsko dovoljenih mejah.

11. Zaradi vašega hitrega razvoja je seveda potrebno tudi sodelovanje z raziskovalnimi inštitucijami in univerzo. kateri pomembnejši raziskovalni projekti so v zadnjih petih letih bili izvedeni skupaj z raziskovalci inštitutov in univerz? Kako ocenjujete to sodelovanje?

Termit ima močno interdisciplinarno razvojno raziskovalno skupino s 13 raziskovalci s področja materialov in proizvodnih tehnologij, energetike, informatike, kemije in ekonomije. Svoje ideje in projekte redno prijavlja na mednarodne in domače razpise, sodelovali smo na International conference on Materials and Technology, International ESEE Mining school itd. Na področju raziskav sodelujemo s domačimi in tujimi partnerji. Skupaj s tujimi partnerji smo se prijavili na razpis Horizon 2020. Na področju aplikativnega razvoja največ sodelujemo z Zavodom za gradbeništvo. Zelo dobro pa sodelujemo tudi z UL NTF in IMT, s katerima smo se prijavili tudi na javni razpis Spodbujanje izvajanja raziskovalno razvojnih projektov.

Razgovor vodil in pripravil:

Zasl. prof.dr. Alojz Križman

Glavni in odgovorni urednik Livarskega vestnika



**DRUŠTVO LIVARJEV SLOVENIJE
SLOVENIAN FOUNDRYMEN SOCIETY**

vas vljudno vabi na / invites you to

**58. IFC - MEDNARODNO LIVARSKO POSVETOVANJE
58th IFC - INTERNATIONAL FOUNDRY CONFERENCE**

PORTOROŽ 2018

s spremljajočo razstavo / with accompanying exhibition

12.-14. september 2018

**Informacije/Contact: Društvo livarjev Slovenije,
Lepi pot 6, p.p. 424, 1001 Ljubljana
T: 01 2522 488, F: 01 4269 934 drustvo.livarjev@siol.net, www.drustvo-livarjev.si**

AKTUALNO / CURRENT

Program / Programme

58. IFC Portorož 2018 / 58th IFC Portoroz 2018

Sreda / Wednesday, 12.09.2018

16.30-19.00:	Sprejem udeležencev posvetovanja in razstave na recepciji Posvetovanja/ Registration of participants at the Conference reception desk
17.30:	Avtobusni prevoz od Hotela Slovenija do Pirana / Bus transfer from Hotel Slovenija to Piran
18.00:	Sprejem na občini Piran / Reception at the Municipality of Piran

Četrtek / Thursday, 13.09. 2018 Dvorana / Hall Cristoforo Colombo

9.30-9.45:	MIRJAM JAN-BLAŽIČ predsednica / President , <i>Društvo livarjev Slovenije / Slovenian Foundrymen Society</i> Otvoritveni nagovor / The Opening Address
------------	---

Dvorana / Hall Cristoforo Colombo

Plenarna predavanja / **Plenary Lectures**

9.45-10.15:	H. LICKFETT, <i>Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie-BDG (D)</i> : The German Foundry Industry - Current Status and Some Serious Issues Regarding Perspectives / Nemška livarska industrija – trenutno stanje in nekatera resna vprašanja glede obetov v prihodnosti
10.15-10.45:	P. SCHUMACHER ¹ , E. SOBOTKA ² , B. STAUDER ³ , J. LI ² , H. HARMUTH ² , <i>1ÖG/ Leoben, 2Montanuniversität Leoben, Nemak Linz (AT)</i> : Novel aspects during processing of lightmetal castings / Novi vidiki pri procesiranju ulitkov iz lahkih kovin
10.45-11.15:	A. KRIŽMAN ¹ , M. DEBELAK ² , M. JAN-BLAŽIČ ³ , <i>1Univerza v Mariboru, 2Gospodarska zbornica Slovenije, 3Društvo livarjev Slovenije (SI)</i> : Guidelines for the development of Slovenian Foundry / Smernice razvoja slovenskega livarstva
11.15-11.30:	Odmor / Break
11.30-12.00:	J. CAMPBELL, <i>Campbell Technology Limited (GB)</i> : The production of Quality Castings / Proizvodnja kakovostnih ulitkov
12.00-12.30:	K. WEIß, <i>RWP GmbH (D)</i> : Cores-not just sand! Production, Usage, Impact to the Casting – Simulation and real results / Jedra – ne samo pesek! Proizvodnja, uporaba, vpliv na ulitek – simulacija in realni rezultat

12.30-13.00:	P. MRVAR ¹ , A. KRIŽMAN ² , S. KASTELIC ¹ , M. TERČELJ ¹ , M. PETRIČ ¹ , D. MITROVIĆ ¹ , <i>¹Univerza v Ljubljani, ²Univerza v Mariboru (SI): New cast Iron Alloy for a transport of Molten Al-alloys / Nova siva litina za transport staljenih Al-zlitin</i>
13.00-15.00:	Odmor za kosilo / Lunch break
15.00-15.30:	I. STAN, S. STAN, M. CHISAMERA, I. RIPOSAN, <i>Politechnica University of Bucharest (RO): Structure characteristics of silicon alloyed ductile cast irons / Strukturne značilnosti zlitin silikona in nodularnih litin</i>
15.30-16.00:	A. NOFAL, <i>Central Metallurgical Research and Development Institute (EG): Logical Approach to Diagnose Porosity Defects in Iron Castings / Logični pristop za diagnosticiranje poroznosti v ulitkih iz železovih litin</i>
16.00-16.15:	Odmor / Break
16.15-16.45:	P. LARSEN, K. PAW MADSEN, <i>Noricangroup DISA, Taastrup (DK): Digital foundry for tomorrow / Digitalna livarna za jutri</i>
16.45-17.15:	R. RUDOLF ¹ , L. ROZMAN ZORKO ¹ , V. ŠTAGER ² , A. KRIŽMAN ¹ , P. MAJERIČ ² , I. ANŽEL ¹ , <i>¹Univerza v Mariboru, ²Zlatarna Celje (SI): Nanotechnology as future technology / Nanotehnologija kot tehnologija prihodnosti</i>

Četrtek zvečer / Thursday evening, 13.09.2018

18.00:	Večerja na ladjah z vožnjo po slovenskem morju in zaključkom na terasi hotela Riviera / Dinner on boats and a boat ride alongside Slovenian coastline with and an ending on the terrace of Riviera hotel
--------	--

Petek / Friday, 14. 09. 2018

Sekcija A / Section A: Dvorana / Hall: Robert Scott

Železove zlitine in različne tehnologije v livarstvu / Cast iron and casting technology

9.00 - 9.20:	J. FRIEß, U. SONNTAG, I. STELLER, A. BÜHRIG-POLACZEK, <i>Foundry Institute of RWTH Aachen University (D): Development of a uniform analytic procedure for the system-independent evaluation of graphite morphology and nodularity of spheroidal cast iron / Razvoj enotnega analitskega postopka za sistemsko neodvisno oceno morfologije in okroglosti grafita v sivih litinah s kroglastim grafitom</i>
9.20-9.40:	M. KOMPREJ, A. BRANISELJ, <i>Livar d.d. (SI): Impact of additives and different types of sand in the core on veining defects inside casting / Vpliv dodatkov in različnih vrst peska v jedru na napako pripečenosti peska v notranjosti ulitka</i>
9.40-10.00:	F. J. HÖHN, <i>Heinrich Wagner Sinto Maschinenfabrik GmbH (D): Advanced technologies with a future for foundries – moulding & perfection in every single mould / Napredne tehnologije s prihodnostjo za livarne – formanje in popolnost v vsaki formi</i>
10.00-10.15:	Odmor / Break

10.15-10.35:	C. DELGADO ¹ , E. GARITAONANDIA ¹ , L. UNAMUNZAGA ¹ , A. MARTÍNEZ PUCHE ² , I. GARCÍA ³ , J. RÍOS ⁴ , J. L. RODRÍGUEZ ⁵ , ¹ IK4-Azterlan, ² Acciona Construcción S.A., ³ Fundiciones del estanda, S.A., ⁴ Gaiker-IK4, ⁵ Ondarlan, S.L. (E): Integration of a novel mechanical sand reclamation technology in a steel foundry to maximise SFS valorisation in foundry and construction applications / Integracija nove mehanske tehnologije za regeneracijo peska v jeklo livarnah za povečanje SFS valorizacije in konstrukcijske aplikacije
10.35-10.55:	S. AL-JASIM, D. ŽVEGLIČ, A. TEKAVČIČ, S. FEKONJA, <i>Kovis-Livarna d.o.o. (SI)</i> : The importance of synchronizing foundry parameters in process management / Pomembnost sinhronizacije livarskih parametrov v procesnem managementu
10.55-11.15:	G. HAJAS, <i>Alu-Onto Ltd. (HU)</i> : Mould filling proportions and mechanical properties of gravity sand castings of large geometry and thin wall /1-3mm/-by a new casting process / Deleži polnjenja form in mehanske lastnosti gravitacijskega litja v peščene forme in izdelava tankostenskih ulitkov /1–3 mm/ z novim livnim postopkom
11.15-11.30:	Odmor / Break
11.30-11.50:	A. KUMP, R. ANDERSSON, P. E. PERSSON, <i>NovaCast Systems AB (SE)</i> : Comparison of solidification properties in plain sand cup versus test castings with different modules using thermal analysis / Primerjava strjevalnih lastnosti v navadni peščeni celici in testnih ulitkih z različnimi moduli z uporabo termične analize
11.50-12.10:	M. ŽBONTAR ¹ , M. PETRIČ ² , M. VONČINA ² , J. MEDVED ² , J. ČEVKA ¹ , ¹ Exoterm-IT d.o.o., ² Univerza v Ljubljani (SI): Sol-gel technology in foundry coatings / Uporaba sol-gel tehnologije v livarskih premazih
12.10-12.30:	A. TEKAVČIČ ¹ , S. AL-JASIM ¹ , S. FEKONJA ¹ , P. MRVAR ² , B. MARKOLI ² , ¹ Kovis-Livarna d.o.o., ² Univerza v Ljubljani (SI): Flake Graphite Formation under Exothermic Riser Sleeves in Ductile Iron Castings – Causes and Remedies / pojav lamelnega grafita pod eksotermnimi napajalniki v ulitkih iz sive litine s kroglastim grafitom – vzroki in sredstva
12.30-12.45:	Odmor / Break
12.45-13.05:	U. KLANČNIK, A. STERGAR, J. BOJANOVIČ, M. DROBNE, <i>Valji d.o.o. (SI)</i> : Impact of mold rotation velocity on distribution of microstructural constituents in cast iron / Vpliv hitrosti vrtenja kokile na razporeditev mikrostrukturih konstituentov v železovi litini
13.05-13.25:	S. FEKONJA ¹ , A. TEKAVČIČ ¹ , B. KOSEC ² , B. MARKOL ² , B. KARPE ² , ¹ Kovis-Livarna, ² Univerza v Ljubljani (SI): Thermal Properties Measurements of Different Types of Cast Iron / Meritve toplotnih lastnosti različnih tipov sivih litin

Sekcija B / Section B: Dvorana/ Hall: Roald Amundsen
Neželezne zlitine / Non-ferrous alloys

9.00-9.20:	J. MEDVED, S. KORES, T. BALAŠKO, M. VONČINA, <i>Univerza v Ljubljani (SI)</i> : Influence of minor alloying element addition on aluminium casting alloys / Vpliv manjšega dodatka legirnih elementov na aluminijeve livarske zlitine
9.20-9.40:	Z. ZOVKO BORDARAC ¹ , D. STANIČ ² , F. KOZINA ¹ , ¹ University of Zagreb, ² CIMOS-P.P.C. Buzet d.o.o. (HR): Influence of Cu on the microstructure development of AlSi7MgCu alloys / vpliv Cu na razvoj mikrostrukture zlitine AlSi7MgCu

9.40-10.00:	F. ZUPANIČ, M. STEINACHER, T. BONČINA, <i>Univerza v Mariboru (SI)</i> : As-cast microstructure of a novel Al-Mg-Si alloy / Lita mikrostruktura nove zlitine Al-Mg-Si
10.00-10.15:	Odmor / Break
10.15-10.35:	M. SZUCKI, <i>AGH University of Science and Technology in Krakow (PL)</i> : Lattice Boltzmann approach to numerical modelling of Al alloys solidification / Uporaba mrežne Boltzmannove metode pri numeričnemu modeliranju strjevanja Al-zliti
10.35-10.55:	D. MOLNAR, A. KISS, C. MAJOROS, D. HALAPI, <i>University of Miskolc (H)</i> : Calculation and Simulation of Pre-filling at High Pressure Die Casting / Računanje in simulacija predpolnjenja pri tlačnem litju
10.55-11.15:	M. POTOČNIK, B. TRILAR, R. PETERNELJ, V. POCEK, <i>LTH Castings d.o.o. (SI)</i> : Analysis of influencing parameters of HPDC on deformations of electronics housing / Analiza vpliva parametrov tlačnega litja na ravnost ohišja elektronike
11.15-11.30:	Odmor / Break
11.30 - 11.50	S. MÜLLER, T. SCHUCHARDT, K. DILGER, <i>Technische Universität Braunschweig, IFS (D)</i> : Multi-criteria based optimization of cooling systems for high pressure die casting dies / Večkriterijska optimizacija hladilnih sistemov orodij za tlačno litje
11.50-12.10:	J. PAPIČ, D. GOGIČ, <i>MLM d.d. Maribor (SI)</i> : Example of thermography in HPDC of Al-alloys / Primer uporabe termografije v industriji tlačnega litja aluminijevih zlitin
12.10-12.30:	J. HAGENAUER, <i>HAGI GmbH (AT)</i> : Low pressure process for automotive casting / Nizkotlačni proces za ulitke za avtomobilsko industrijo
12.30-12.45:	Odmor / Break
12.45-13.05:	V. KOLDA, <i>Mecas ESI (CZ)</i> : Prediction of deformation, stress and fatigue life of HPDC / Napoved deformacij, napetosti in življenjske dobe tlačnih orodij
13.05-13.25:	D. ARNŠEK ¹ , B. PODGORŠEK ² , F. ZUPANIČ ¹ , T. BONČINA ¹ , ¹ <i>Univerza v Mariboru</i> , ² <i>OMCO METALS SLOVENIA d.o.o. (SI)</i> : Determination of microstructural constituents in advanced aluminium bronze / Opredelitev mikrostrukturnih sestavin v naprednih aluminijevih bronih
13.25-13.45:	G. GYARMATI, G. FEGYVERNEKI, D. MOLNAR, M. TOKAR, <i>University of Miskolc (H)</i> : Melt cleaning efficiency of different fluxes and their effect on the eutectic modification level of AlSi7MgCu alloy / Sposobnost čiščenja taline z različnimi talili in njihov vpliv na stopnjo evtektске modifikacije zlitne AlSi7MgCu

Posterske predstavitve / Poster presentations

1.	S. KASTELIC ¹ , M. PETRIČ ² , P. MRVAR ² , ¹ <i>TC Livarstvo</i> , ² <i>Univerza v Ljubljani (SI)</i> : Quality control of Al cast alloys by thermal analysis / Kontrola kakovosti aluminijevih livnih zlitin s termično analizo
2.	M. PETRIČ ¹ , A. MAHMUTOVIĆ ¹ , S. KASTELIC ² , P. MRVAR ¹ , ¹ <i>Univerza v Ljubljani</i> , ² <i>TC Livarstvo (SI)</i> : Filling and solidification calculation at semi solid casting technology / Izračuni litja in strjevanja ulitkov pri tehnologiji litja v testastem stanju
3.	F. KOZINA ¹ , Z. ZOVKO BRODARAC ² , M. PETRIČ ¹ , ¹ <i>University of Zagreb (HR)</i> , ² <i>Univerza v Ljubljani (SI)</i> : The influence of magnesium distribution on Al-2.5Mg-0.7Li alloy behavior / Vpliv porazdelitve magnezija na obnašanje zlitine Al-2,5Mg-0,7Li

AKTUALNO / CURRENT



The 73rd World Foundry Congress „Creative Foundry“

23 - 27 september 2018, Kraków, Poland

73. svetovni livarski kongres v Krakovu, Poljska

V času od 23.-27. septembra letos bo v Krakovu na Poljskem potekal 73. WFC-Svetovni livarski kongres, ki ga organizira WFO- Svetovna livarska organizacija, v sodelovanju s poljskim združenjem livarjev. V času od 25.-27. septembra 2018 pa bo v Kielcach okoli 100km od Krakova potekal tudi 22. Mednarodni sejem livarske tehnologije METAL, katerega si bodo udeleženci svetovnega livarskega kongresa tudi lahko ogledali. Kielce je svetovno znani sejamski center za področje livarstva in spremljajočih tehnologij ter procesov. Organizator sejma je najavil močno udeležbo proizvajalcev strojev za tlačno litje s pripadajočo opremo. Prisotna bo vrsta drugih proizvajalcev pomožnih materialov in surovin za livarsko industrijo, kot tudi proizvajalci filtrirnih in prezračevalnih sistemov ter kontrolne in merilne opreme za livarne.

Zadnji sejem METAL je potekal v letu 2016. Takrat je na sejmu sodelovalo okoli 270 razstavljalcev iz 27 držav. Evidentiranih je bilo okoli 3000 obiskovalcev, pretežno iz livarske industrije, kot tudi s področja robotike in avtomatizacije, letalske in avtomobilske industrije, strojogradnje in ladjedelništva. Na sejmu bodo 25. in 26. septembra potekali tudi različni

seminarji (poudarek bo na tlačnem litju). Seminarje bodo vodili poljski in tuji strokovnjaki.

Vse informacije o svetovnem kongresu v Krakovu in prijavo na dogodek je možno pridobiti na spletni strani www.73wfc.com.

Poročala:
mag. Mirjam Jan-Blažić

