DOI:
https://doi.org/10.26552/tech.C.2023.1.13

Štruktúra hliníkových zliatin pre vysokotlakové odlievanie

Martin Medňanský, Ing.*
Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: martin.mednansky@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2771

Marek Brůna, doc. Ing., PhD.
Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: marek.bruna@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2756

Marek Matejka, Ing., PhD.
Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: marek.matejka@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2756

Structure of aluminium alloys used in high-pressure die casting

Abstract: The aim of the presented paper was to carry out a review of the internal structure of alloys used for high-pressure die casting (*HPDC*) and to experimentally perform a structural analysis of $AlSi_9Cu_3(Fe)$ alloy. Several castings with varying casting parameter – maximum plunger speed v_{max} were cast. In pre-selected critical locations, a change in porosity was observed with the change of the speed, and the casting samples with v_{max} = 2 and 3 $m \cdot s^{-1}$ showed the lowest porosity. The effect of v_{max} was also observed on the shape and size of the structural components, where at higher v_{max} the eutectic *Si* grew in length and decreased in thickness. *EDS* analysis determined found intermetallic phases to be *α-Al*(*Fe*,*Mn*,*Cr*)*Si* in the shape of a rhombic dodecahedron with sizes as small as 2 µm and Al_2Cu occurring in both modifications – oblong grains and globular ternary eutectic.

Keywords: *HPDC*, *Al-Si* alloy, porosity, structure

ÚVOD

Zliatiny *Al-Si*, tzv. *silumíny*, sú najčastejšie používaným typom zliatin pre vysokotlakové odlievanie. Podstatná časť produkcie *hliníkových* odliatkov je tvorená *silumínmi*, a to vďaka svojim výborným zlievarenským a dobrým mechanickým vlastnostiam. Na odlievanie tlakovým liatím sú primárne určené:

- zliatiny *Al-Si*:
  - *eutektické* - na liatie pod tlakom sa používajú pre svoju dobrú zabiehavosť a dlhú životnosť foriem. Používajú sa na výrobu tenkostenných členitých odliatkov, kde sa vyžaduje odolnosť voči korózii,
  - *podeutektické* - použitie tam, kde záleží na výbornej ťažnosti a odolnosti voči korózii,
  - *Al-Si* s prísadou horčíka - umožňuje čiastočné vytvrdzovanie vyhriatím odliatkov počas niekoľkých hodín na 150 °C ÷ 180 °C,
- zliatiny *Al-Si-Cu* - kde je obsah *Si* väčší než obsah *Cu*. Majú zníženú odolnosť voči korózii a vyskytuje sa v nich väčší obsah nečistôt,
- zliatiny *Al-Mg* - napriek vynikajúcim mechanickým vlastnostiam zliatin s 10 % *Mg* je veľký interval tuhnutia pre liatie pod tlakom nevýhodný. Zliatina má sklon k lepeniu odliatku na formu, preto sú často potrebné úpravy formy [1].

1 ŠTRUKTÚRNE ZLOŽKY Al-Si ZLIATIN

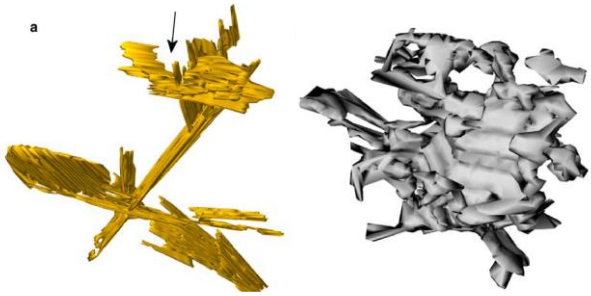
Podeutektická zliatina *Al-Si* sa skladá z primárnych dendritov substitučného tuhého roztoku *α* a *eutektika* vylúčeného v medzidendritických priestoroch. Štruktúru *eutektickej* zliatiny *Al-Si* tvorí *eutektikum*, pri modifikovaných zliatinách aj jednotlivé kryštály *α* fázy. Štruktúra *nadeutektickej* zliatiny *Al-Si* je tvorená

matricou *eutektika* a v nej sa nachádzajúcich častíc primárneho *Si*.

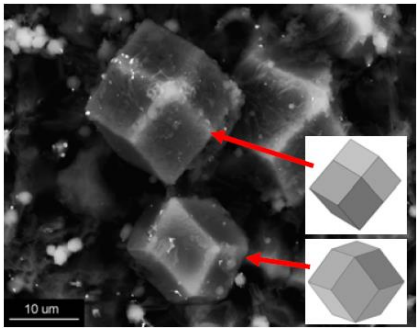
Dendrity $\alpha(Al)$ pri vysokotlakovom odlievaní dosahujú veľkú jemnosť v dôsledku rýchleho ochladzovania v kovovej forme priamej závislosti medzi tlakom v tavenine a kritickou veľkosťou zárodku. V dôsledku čoho sú dosahované vyššie mechanické vlastnosti [2, 3].

Eutektikum je mechanická zmes substitučného tuhého roztoku $\alpha(Al)$ a kryštálov takmer čistého *eutektického kremíka*, vznikajúca priamo z taveniny pri *eutektickej* premene. [4] *Eutektikum* sa v procese vysokotlakového liatia vylučuje prednostne v zrnitej a lamelárnej morfológii [5].

Železo je v *hliníkových* zliatinách považované za nečistotu. V *Al-Si* zliatinách vytvára intermetalické fázy s nepriaznivým účinkom na mechanické vlastnosti. Všeobecne je obsah *Fe* prijateľný do 0,5 hm. %. Špecifikom vysokotlakového odlievania je, že obsah *Fe* do 1 hm. % nie je problémom, nakoľko zabraňuje priváraniu odliatkov na kovové formy [3]. Prídavok *Fe* môže znížiť ťažnosť materiálu odliatku, ale zvýšiť medzu klzu a tvrdosť odliatku [6].



Obr. 1. 3*D* zobrazenie *Fe* intermetalických fáz v tvare dosiek a čínskeho písma [7]



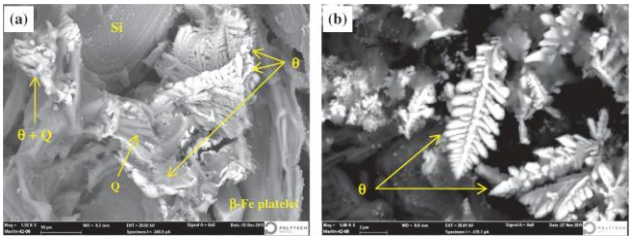
Obr. 2. Železitá fáza v tvare dvanásťstenu [8]

Z hľadiska vplyvu na mechanické vlastnosti je najmenej výhodná morfológia dlhých a hrubých dosiek fázy β-Al_5FeSi, ktoré sa na metalografickom výbruse prejavujú ako ihlice (obr. 1 vľavo). V dôsledku ich prítomnosti dochádza k poklesu ťažnosti, zníženiu pevnosti a lomovej húževnatosti.

Výhodnejším zložením a tvarom intermetalickej fázy *Fe* je čínske písmo α-$Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$, ktorá vzniká pridaním dostatočného množstva *Mn* [7].

Pridaním vedľajších prísadových prvkov *Mn* a *Cr* bola v zliatine $AlSi_9Cu_3(Fe)$ odlievanej vysokotlakovým liatím experimentálne zistená prítomnosť železitej intermetalickej fázy *železa α-Fe* vo forme *rombického* dvanásťstenu (obr. 2) [8].

Meď sa v mikroštruktúrach odliatych technológiou vysokotlakového liatia môže vyskytovať v dvoch modifikáciách fázy Al_2Cu - samostatne ako drobné oválne zrno s vysokou koncentráciou *Cu*, alebo ako ternárne *eutektikum* Al-Al_2Cu-Si, ktoré možno pozorovať v tepelne nespracovaných zliatinách ako kompaktné oválne útvary z množstva guľových častíc [4].



Obr. 3. Modifikácie Al_2Cu fázy vo vysokotlakových odliatkoch [11]

Pórovitosť je spôsobená prítomnosťou plynov. Najškodlivejšími plynmi pre *hliníkové* zliatiny sú *vodík, kyslík* a vodná para. Do taveniny sa dostávajú z atmosféry, výmurovky pece, téglikov, náradím. Pri styku roztaveného kovu s vodnou parou dochádza k disociácii vody. *Kyslík* reaguje s *Al*, *vodík* sa v roztavenom kove rozpúšťa. Iným zdrojom prítomnosti *vodíka* môže byť vsádzka, ak sa pridáva do taveniny bez dôkladného predohrevu. *Vodík* je viazaný vo forme vody v póroch a vo forme hydroxidov na zoxidovanom povrchu v podobe $Al(OH)_3$, z ktorého sa uvoľňuje [3]. Špecifikom vysokotlakového liatia je pórovitosť vznikajúca uzatvorením vzduchu v tavenine počas plnenia formy. Pri pomalom pohybe piesta môže nastať zvírenie taveniny, uzavrú sa v nej plyny, a to odrazením vlny od konca plniacej komory. Pri rýchlom pohybe piesta môže nastať prevalenie vlny, kedy sa plyny uzavrú v tavenine. Pórovitosť sa znižuje zvýšením tlaku lisovania [9, 10].

EXPERIMENTÁLNE POZOROVANIE

Úlohou experimentu bolo porovnať štruktúru konštrukcie elektromotora, tlakovo odliateho zo zliatiny $AlSi_9Cu_3(Fe)$ vo firme *Rosenberg Slovakia spol. s r. o., Medzev.* Obsah prísadových prvkov v experimentálnej zliatine je uvedené v tab. 1.

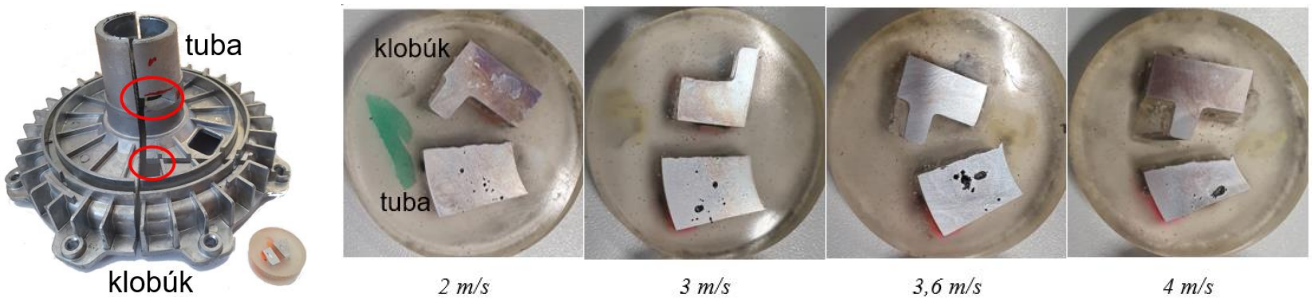
Tab. 1. Chemické zloženie zliatiny $AlSi_9Cu_3(Fe)$

Chemické zloženie [hm. %]						
Si	***Fe***	***Cu***	***Mn***	***Mg***	***Cr***	***Ni***
10,3	0,72	2,1	0,16	0,13	0,02	0,07

Experimentálne odliatky boli odliate v štyroch variáciách, a premenným parametrom bola maximálna rýchlosť lisovacieho piesta v plniacej komore v_{max} = 2, 3, 3,6 a 4 m·s^{-1}. Po natavení vsádzky a odplynení taveniny bolo odlievanie vykonané na tlakovom lejacom stroji s horizontálnou studenou komorou *CLH* 630.02*P*. Na základe skôr vykonanej simulácie priebehu tuhnutia taveniny a mikropórovitosti boli z každého odliatku zvolené dve miesta vhodné na pozorovanie - vzorka z tubovej časti vzhľadom na to, že ide o najvýraznejší tepelný uzol, a vzorka z teknostennej časti klobúka. Vzorky boli preparované zaliatím do *dentakrylu*, ďalej brúsené brúsnymi papiermi so zrnitosťou 100 až 1000 a leštené. Ako leptadlo bola použitá kyselina *HF* v koncentrácii 0,5 % počas 15 sekúnd.

v_{max} = 3 m·s^{-1}. Klobúkové časti oboch geometrických variantov odliatkov pri všetkých štyroch experimentálnych rýchlostiach pohybu piesta sa pri pozorovaní voľným okom javia ako bezchybné.

Pozorovanie mikroštruktúry prebiehalo na svetelnom mikroskope *Neophot* 2 v svetlom poli pri zväčšení 200 a 500x. So zmenou maximálnej rýchlosti pohybu piesta možno pozorovať zmenu veľkosti *eutektického kremíka* a *dendritov* *α*-fázy. *Eutektikum* má nemodifikovanú morfológiu vo forme hexagonálnych lamiel, ktoré sa v rovine prejavujú ako tmavé ihlice (obr. 5). So zvyšujúcou rýchlosťou sa ihlice predlžujú a stenčujú. Možno sledovať prítomnosť mikrostiahnutín kopírujúcich *dendritickú* stavbu zliatiny. Najčastejším zdrojom pórovitosti sú kapsule zachyteného vzduchu v strhnutých oxidických

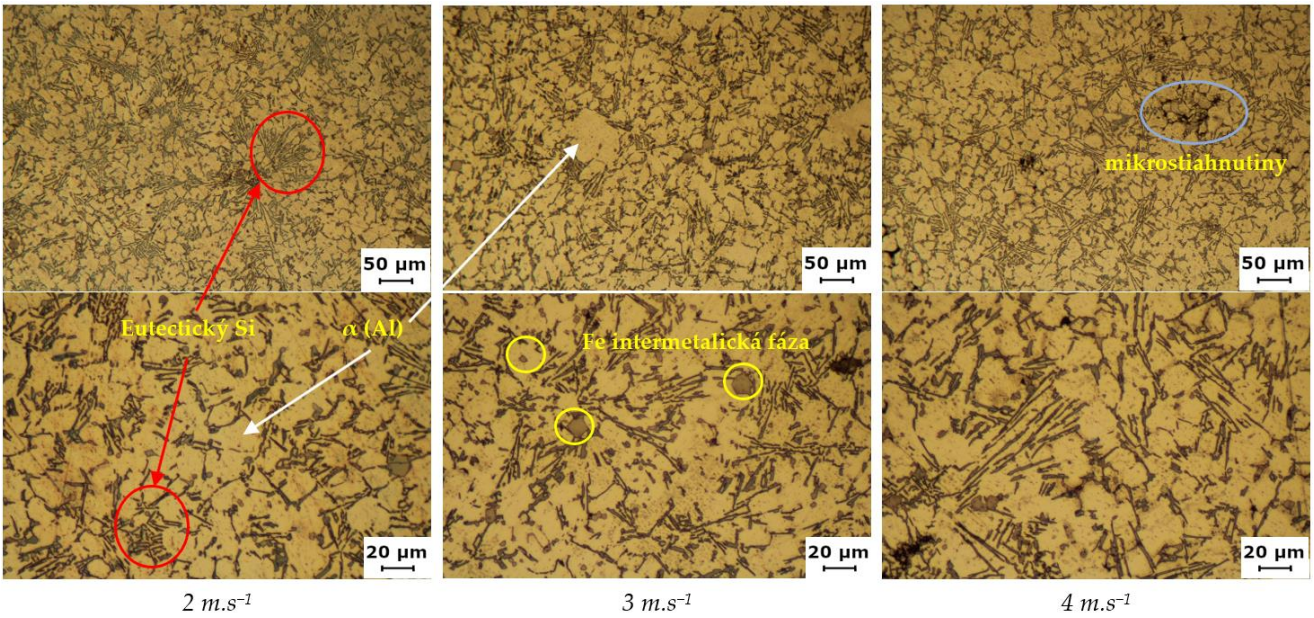


Obr. 3. Odliatok nosnej konštrukcie elektromotora a vizuálne pozorovanie makroštruktúry kritických miest.

Vizuálnou kontrolou makroštruktúry vzoriek voľným okom bolo zistené, že pri nízkych rýchlostiach pohybu piesta sú dutiny (či póry, bubliny, riediny alebo stiahnutiny) v pozorovanom priereze tubovej časti odliatkov rozptýlené po stredovej časti medzikružia. So zvyšujúcou v_{max} sa dutiny zväčšujú a zhlukujú, ich počet však zdanlivo klesá. Berúc do úvahy kombináciu čo najmenšej veľkosti a početnosti chýb, za najviac vyhovujúci možno považovať s

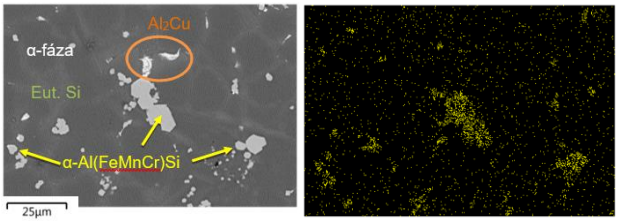
blanách. Na snímkach so zv. 500x možno pozorovať prítomnosť polyedrických intermetalických fáz. Ďalšie skúmanie týchto fáz prebehlo pomocou *EDS* analýzy.

Výsledky *EDS* analýzy potvrdzujú výskyt prvkov *Fe*, *Cr* a *Mn* majoritne v polyedrickej fáze v strede obr. 6 vľavo, rovnako aj v menších fázach. Malé polyedrické intermetalické fázy s veľkosťou už od 2 µm vyskytujúce sa aj v snímkach svetelnej



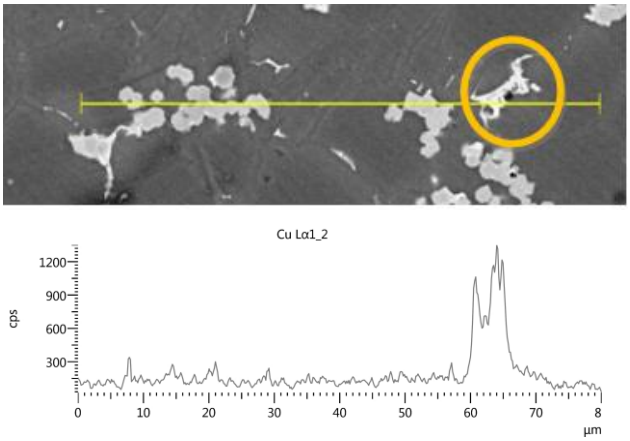
Obr. 4. Mikroštruktúra tubových častí odliatkov pri 200- a 500-násobnom zväčšení.

mikroskopie teda možno považovať za dvanásťstennú fázu *α-Al(Fe,Mn,Cr)Si*, čo korešponduje s výsledkami iného experimentu [8].



Obr. 5. *EDS* analýza *Fe* intermetalickej fázy - mikrofotografia a analýza prítomnosti *Fe*

Čiarová *EDS* analýza umožnila určiť zakrúžkovanú kompaktnú fázu ako Al_2Cu. Vo vzorkách sa však fáza prejavovala aj v *eutektickej* modifikácii vo forme guľovitých častíc.



Obr. 6. Čiarová *EDS* analýza *Cu* fázy

ZÁVER

Cieľom predloženého príspevku bolo vykonať rešerš poznatkov o vnútornej stavbe zliatin používaných na vysokotlakové odlievanie a experimentálne vykonať štruktúrnu analýzu zliatiny $AlSi_9Cu_3(Fe)$, z ktorej bol vysokotlakovým odlievaním zhotovený odliatok. Pridanou hodnotou príspevku je vyhotovenie viacerých odliatkov so zmenou parametra odlievania - rôzne rýchlosti posuvu piesta v_{max}. Vo vopred vybraných kritických miestach bola so zmenou rýchlosti pozorovaná zmena pórovitosti, pričom za vyhovujúcejšie možno považovať vzorky odliatkov s v_{max} =2 a 3 m·s^{-1}. Vplyv v_{max} bol pozorovaný aj na tvare a veľkosti štruktúrnych zložiek, kde pri vyšších v_{max} *eutektický Si* rástol do dĺžky a zmenšoval svoju hrúbku. *EDS* analýzou boli skúmané neznáme intermetalické fázy a bolo určené, že ide o fázu *α-Al(Fe,Mn,Cr)Si* v tvare rombického dvanásťstenu s veľkosťou už od 2 µm a Al_2Cu vyskytujúcu sa v oboch modifikáciách. Predmetom ďalších experimentov môže byť dôkladné skúmanie vplyvu zmeny rýchlosti v_{max} na štruktúrne zložky zliatiny.

LITERATÚRA

[1] RAGAN, E. et al. (2007): *Liatie kovov pod tlakom.* Prešov : s.n., 2007. ISBN 978-80-8073-979-9.

[2] TALANDA, I. (2010): *Studium hlavních faktoru, které ovlyvňují jakost u technologických procesu*. Brno: Vysoké učení technické, 2010, Záverečná práca.

[3] BOLIBRUCHOVÁ, D. - PASTIRČÁK, R. (2018): *Zlievarenská metalurgia neželezných kovov.* Žilina : EDIS – vydavateľské centrum ŽU, ISBN 978-80-554-1463-8.

[4] TILLOVÁ, E. - CHALUPOVÁ, M. (2009): *Štruktúrna analýza zliatin Al-Si.* Žilina : Žilinská univerzita v Žiline. ISBN 978-80-554-0088-4.

[5] OUTMANI, I. - FOUILLAND-PAILLE, L. A. - ISSELIN, J. (2017): *Effect of Si, Cu and processing parameters on Al-Si-Cu HPDC castings*. s. l.: Elsevier, 2017. 249 (2017) 559–569. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2017.06.043.

[6] JIAO X.Y. - LIU, Y.X. - WANG, J. - LIU, W.N. - WAN, A.X. - WIESNER, S. - XIONG, S.M. (2022): *The microstructure characteristics and fracture behavior of the polyhedral primary iron-rich phase and plate-shaped eutectic iron-rich phase in a high-pressure die-cast AlSi10MnMg alloy*: Journal of Materials Science & Technology. 2022. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.09.014

[7] DINNIS, C. M. - TAYLOR, J. A. - DAHLE, A. K. (2005): *As-Cast morphology of iron-intermetallics in Al-Si foundry alloys*: Scripta Materialia. 2005, 53 955-958.

[8] FABRIZI, A. - FERRARO, S. - TIMELLI, G. (2014): *The Influence of Fe, Mn and Cr Additions on the Formation of Iron-rich Intermetallic Phases in an Al-Si Die-casting Alloy*. Shape Casting: 5th International Symposium. DOI: 10.1007/978-3-319-48130-2_34.

[9] MAJERNÍK, J. - GAŠPÁR, Š. - PODARIL, M. - KOLÍNSKY, J. (2019): *The Influence of the Gate Geometry on Selected Process Parameters in the High Pressure Die Casting Technology:* Manufacturing Technology February 2019, Vol. 19, No. 1. s. 101-106. ISSN 1213-2489.

[10] MAJERNÍK, J. - GERKOVÁ, J. (2014): *Vplyv konštrukcie vtokového systému na kvalitu odliatkov* Portál pre odborné publikovanie, Ročník 7, č. 8, ISSN 1338-0087

[11] BEROUAL, S. - BOUMERZOUG, Z. - PAILLARD, P. - BORJON-PIRON, Y. (2019): *Comparative study on the microstructures and hardness of the AlSi10.6CuMg alloy produced by casting and high pressure die casting:* International Journal of Cast Metals Research.32(4):1-22, DOI: 10.1080/13640461.2019.1603681