
Hodnotenie vplyvu technologických parametrov na mikroštruktúru vysokotlakových odliatkov

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

Evaluation of the effect of technological parameters on high pressure die casting microstructure

Abstract: A number of technological parameters influence the mechanical properties of a high pressure die casting. The aim of the presented paper was to perform microstructural analysis of *AlSi9Cu3(Fe)* alloy casting fabricated with high-pressure die casting (HPDC) technology. Several castings with varying casting parameter – maximum plunger speed v_{max} were cast. In pre-selected critical spots, the effect of v_{max} was observed on the shape and size of the structural components, where at lower v_{max} the eutectic *Si* shortened in length and thickened. 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 *Al₂Cu* being present in both modifications – oblong grains and globular ternary eutectic. There was no significant change in microhardness of α (*Al*) phase found, that would be caused by the varying v_{max} .

Keywords: HPDC, *Al-Si* alloy, microstructure, microhardness

ÚVOD

Súčasný výskum technológie vysokotlakového odlievania sa zameriava na zlepšenie kvality odliatkov optimalizáciou technologických parametrov vstupujúcich do procesu odlievania. Na mechanické vlastnosti priamo vplyva mikroštruktúra odliatku, preto je predmetom skúmania tohto článku.

Medzi najdôležitejšie technologické parametre patrí dotlak - tlak v konečnej fáze vysokotlakového odlievania. Umožňuje jemnozrnnú štruktúru špecifickú pre vysokotlakové odlievania, pretože existuje priama závislosť medzi tlakom v tavenine a kritickou veľkosťou nukleovaného zárodka. V dôsledku jemnejšej štruktúry sú dosahované vyššie mechanické vlastnosti [1-3].

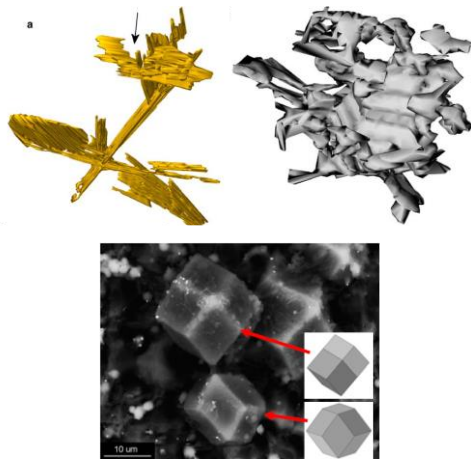
Rýchlosť plnenia dutiny formy ovplyvňuje kvalitu výsledného odliatku. Rýchlosť taveniny v záreze menšia ako optimálna spôsobuje nezabehtnutie formy, nedoliatie odliatku, rozmerové nepresnosti a studené spoje. Naopak vyššia ako optimálna rýchlosť taveniny v záreze spôsobí náraz prúdu taveniny na steny dutiny formy s vysokou kinetickou energiou, čom má za následok odplavenie vznikajúcej kôry do vnútra odliatku, ďalej nalepovanie zliatiny na stenu formy, dôsledkom čoho je mapovitý povrch odliatku [4].

Zavedením predhrevu plniacej komory a kovovej formy pred začatím procesu odlievania je zamedzené znižovanie teploty odlievanej zliatiny a zabraňuje sa jej predčasnej kryštalizácii. Výber teploty predhrevu je dôležitý, nakoľko príliš vysoká teplota povrchu dutiny formy spôsobuje nepriľnutie mazadla na

povrch, čím je spôsobená tvorba pľuzgierov. Pri použití príliš nízkej teploty nie je dosiahnuté odstránenie všetkej zvyškovej vlhkosti, v dutine formy, ktorá býva zdrojom pórovitosti a bublín [5, 6]. 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. Hlavnými štruktúrnymi zložkami silumínov sú jemné dendrity $\alpha(Al)$ fázy a eutektický kremík, ktorý sa v procese vysokotlakového odlievania vylučuje prednostne v zrnitej a lamelárnej morfológii. [2, 3, 7] Okrem týchto je častá prítomnosť fáz bohatých na železo a meď.

Špecifikom vysokotlakového odlievania je, že *Fe*, ktoré je obvykle považované za nečistotu, je v tomto prípade pri jeho obsahu do 1 hm. % prijateľné až výhodné, nakoľko zabraňuje priváraniam odliatkov na kovové formy [3]. Prídavok *Fe* môže znížiť ťažnosť materiálu odliatku, ale zvýšiť medzu klzu a tvrdosť odliatku [8]. *Fe* sa v štruktúre môže vyskytovať vo fázach rôznych tvarov. Z hľadiska vplyvu na mechanické vlastnosti je najmenej výhodná morfológia dlhých a hrubých dosiek fázy $\beta-Al_3FeSi$. Jej prítomnosť znižuje ťažnosť, pevnosť a lomová húževnatosť. Pridaním dostatočného množstva *Mn* vzniká intermetalická fáza $\alpha-Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ v tvare čínskeho písma. [9] Experimentálne bola v zliatine *AlSi9Cu3(Fe)* odliatej vysokotlakovým odlievaním zistená prítomnosť *Fe* fázy vo forme polyedrických zrn v tvare rombického dvanásťstenu (obr. 1) [10].

Meď sa v mikroštruktúrach odliatych technológiou vysokotlakového liatia vyskytuje v dvoch modifikáciách fázy Al_2Cu – samostatne ako drobné oválne zrno s vysokou koncentráciou meďi, alebo ako ternárne eutektikum $Al-Al_2Cu-Si$, ktoré možno pozorovať v tepelne nespracovaných zliatinách ako kompaktné oválne útvary z množstva guľových častíc [6].



Obr. 1. 3D zobrazenie *Fe* intermetalických fáz v tvare dosiek, čínskeho písma a dvanásťstenných častíc [9, 10]

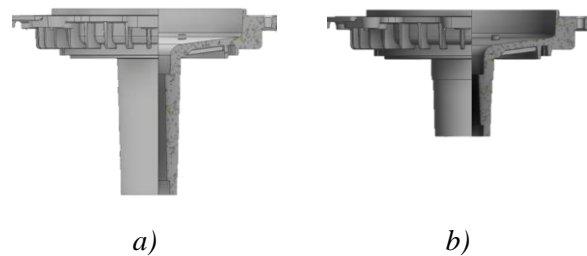
1 METODIKA EXPERIMENTU

Úlohou experimentu bolo porovnať mikroštruktúry plášťov elektromotora, tlakovo odliatych zo zliatiny *AlSi9Cu3(Fe)* vo firme *Rosenberg Slovakia s.r.o., Medzev*. Obsah prísadových prvkov v experimentálnej zliatine je uvedený v tab. 1.

Tab. 1. Obsah prísadových prvkov v zliatine *AlSi9Cu3(Fe)*

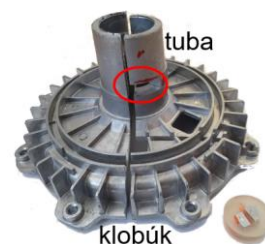
Chemické zloženie [hm. %]						
<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>
10,30	0,72	2,10	0,16	0,13	0,02	0,07

Experimentálne odliatky dvoch geometrických variantov (obr. 2) boli odliate v štyroch variáciách, pričom menený technologický parameter bola maximálna rýchlosť lisovacieho piesta v plniacej komore $v_{max} = 2, 3, 3,6$ a $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Odlievanie bolo po natavení vsádzky a odplynení taveniny vykonané na tlakovom lejacom stroji s horizontálnou studenou komorou *CLH 630.02P*.



Obr. 2. Geometrické varianty odliatku: a) *SB120*, b) *SB55*

Na základe vykonanej numerickej simulácie priebehu tuhnutia taveniny a mikropórovitosti bolo z odliatkov zvolené kritické miesto určené na pozorovanie - vzorka z tubovej časti vzhľadom na to, že v danom mieste bol predikovaný najvýraznejší tepelný uzol. Vzorky boli preparované, brúsené brúsnymi papiermi so zrnitosťou 100 až 1000 a leštené použitím $1 \mu\text{m}$ diamantovej pasty. Ako leptadlo pre pozorovanie na svetelnom mikroskope bola použitá kyselina *HF* v koncentrácii 0,5 % po dobu 15 sekúnd. Po pozorovaní svetelnou mikroskopiou boli vzorky prebrúsené a hlboko leptané po dobu 2 minút namáčaním a miešaním v zmesi 36 ml *HCl* a 100 ml *H₂O*, ďalej určené na pozorovanie *REM* a *EDS* analýzu.



Obr. 3. Odliatok plášťa elektromotora s vyznačenými kritickými miestami

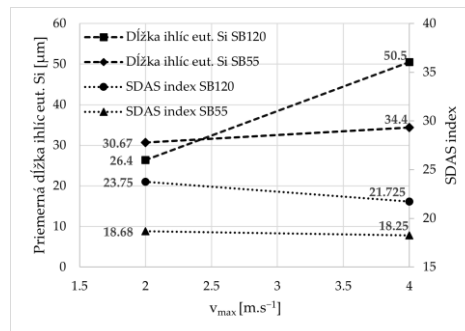
2 VÝSLEDKY A DISKUSIA

2.1 Pozorovanie mikroštruktúry

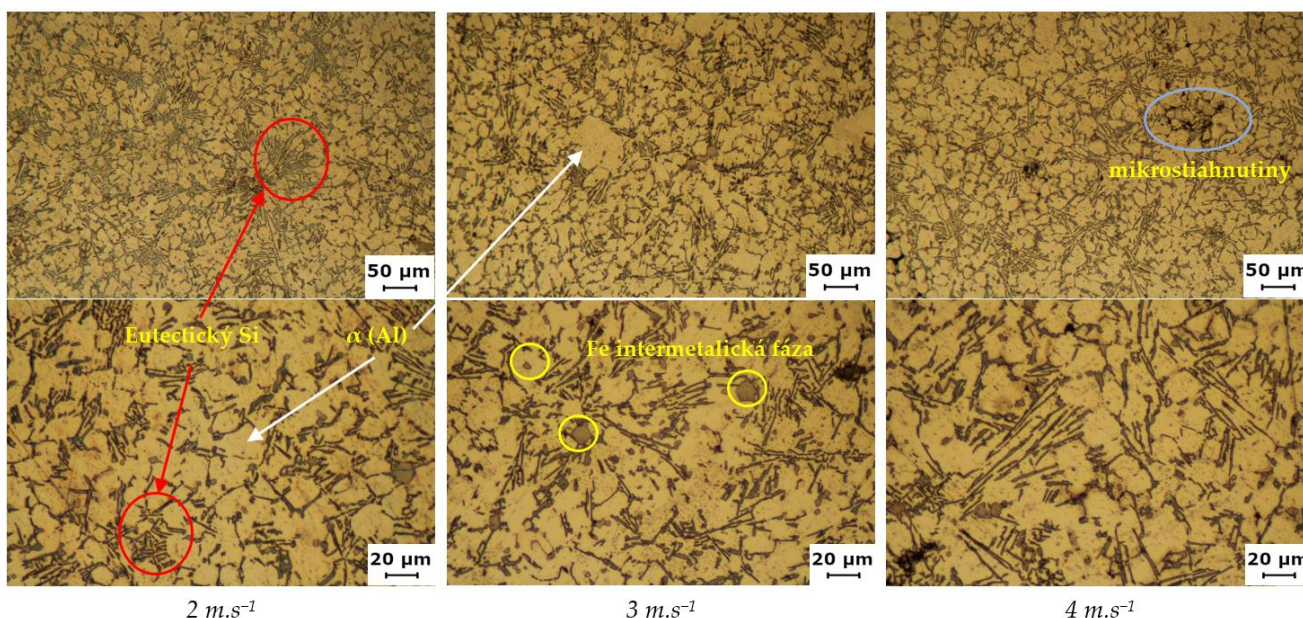
Pozorovanie mikroštruktúry bolo vykonané na svetelnom mikroskope Neophot 2 v svetlom poli pri 200- a 500-násobnom zväčšení. So zmenou maximálnej rýchlosti pohybu piesta možno pozorovať zmenu veľkosti eutektického *Si* a dendritov $\alpha(Al)$ fázy. Eutektikum má v oboch geometrických variantoch odliatku nemodifikovanú morfológiu vo forme hexagonálnych lamiel, v rovine sa prejavujúcej ako tmavé ihlice (obr. 5). S vyššou použitou rýchlosťou v_{max} sa ihlice predlžujú a stenčujú. Možno sledovať prítomnosť mikrostriahnutí kopírujúcej dendritickú stavbu zliatiny. Na snímkach so zv. 500 x možno pozorovať prítomnosť polyedrických intermetalických fáz

$$SDAS = a \cdot t_f^n, \quad (1)$$

kde a je konštanta závislá od zliatiny,
 n je konštanta v rozsahu 0,3 ÷ 0,5,
 t_f je miestny čas tuhnutia [3].



Obr. 5. Vplyv rýchlosti piesta na dĺžku ihlic eutektického *Si* na *SDAS* index



Obr. 4. Mikroštruktúra tubových častí odliatkov SB120 pri 200- a 500-násobnom zväčšení.

v odliatku SB120. Podobný trend stenčovania a predlžovania ihlic *Si* pri vyšších zvolených v_{max} bol pozorovaný aj pri odliatku SB55 s kratšou tubovou časťou, avšak v menšej miere.

Na kvantifikáciu výsledkov pozorovania svetelnou mikroskopiou boli z mikrosnímkov manuálne merané priemerné dĺžky ihlic eutektického *Si* a *SDAS* index (obr. 6).

Namerané dĺžkové rozmery určitého počtu ihlic eutektického *Si* a prerátané hodnoty *SDAS* indexu boli aritmeticky sprimerované.

Namerané výsledky kvantitatívne potvrdili nárast dĺžky ihlic eutektického *Si*, a to vo väčšej miere v odliatku SB120 s nárastom o 91 %. *SDAS* index prejavil väčšiu zmenu rovnako v odliatku SB120, a to pokles o 8,5 %.

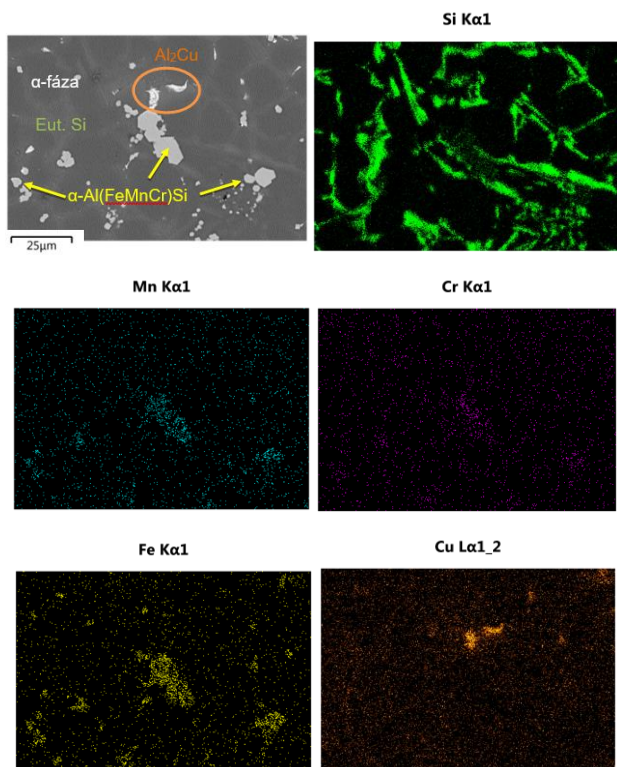
Menšia hodnota *SDAS* indexu v odliatku SB55 je dôsledkom kratšieho času tuhnutia podľa vzťahu:

Výsledky merania korešponujú s výsledkami numerických simulácií, ktoré predikovali menší tepelný uzol v dôsledku menšieho rozmeru tubovej časti odliatku SB55.

2.2 EDS analýza

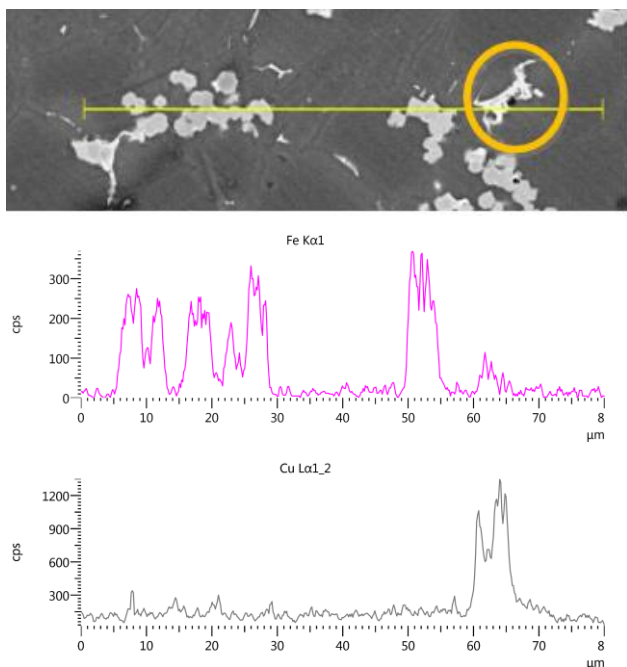
Výsledky *EDS* analýzy potvrdzujú výskyt prvkov *Fe*, *Cr* a *Mn* majoritne v polyedrickej fáze (obr. 6), rovnako aj v menších fázach. Malé polyedrické intermetalické fázy s veľkosťou už od 2 μm vyskytujúce sa aj v snímkach svetelnej mikroskopie teda možno považovať za dvanásťstennú fázu $\alpha-Al(Fe,Mn,Cr)Si$, čo korešponduje s výsledkami iného experimentu [10].

Výskyt *Cu* je dominantný vo fáze pravdepodobne Al_2Cu , v snímke zakrúžkovaná a označená oranžovou farbou.



Obr. 6. EDS analýza Fe intermetallickej fázy – vzorka SB120 4 m·s⁻¹

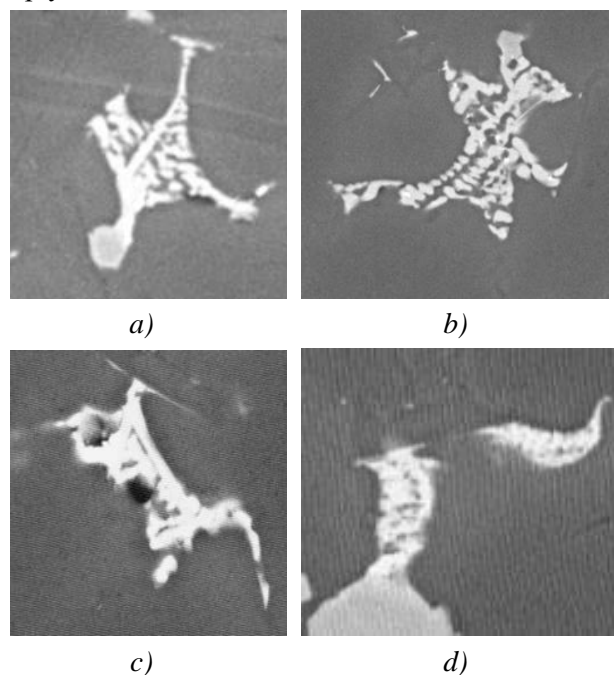
Čiarová EDS analýza umožnila určiť zakrúžkovanú kompaktnú fázu ako Al₂Cu, ako aj železité fázy polyedrického charakteru s rozmermi od 2 μm ÷ 3 μm.



Obr. 7. Čiarová EDS analýza Cu fázy zo vzorky SB55 4 m·s⁻¹

Na obr. 8 sú zobrazené vybrané medené fázy z odlievok s rôznymi v_{max} , pričom pri rýchlosti 3,6 m·s⁻¹ možno najjasnejšie pozorovať eutektický charakter fázy vo forme množstva guľovitých častíc. Nakoľko však na snímkach z rovnakej vzorky možno pozorovať obe modifikácie (obr. 8c, d), nemožno

tvrdiť, že by v_{max} bol parameter, ktorý by tvar modifikácie medenej fázy zásadným spôsobom ovplyvňoval.

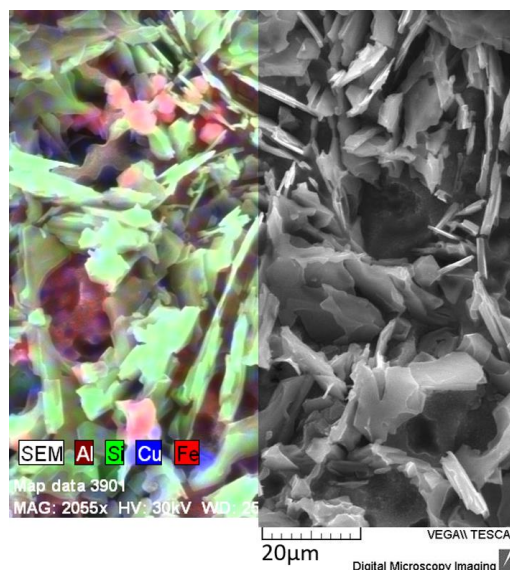


Obr. 8. Intermetalické fázy na báze Cu. Vzorka SB 120: a) 3 m·s⁻¹, b) 3,6 m·s⁻¹, c), d) 4 m·s⁻¹

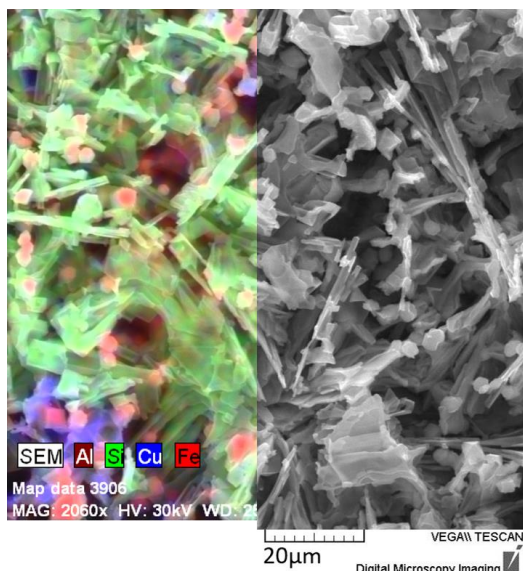
2.3 Elektrónová mikroskopia

Rastrovacím elektrónovým mikroskopom TESCAN LMU II boli pozorované vzorky z tubových častí odlievok. Hlbokým leptaním bola z pozorovanej roviny vzoriek odstránená matica $\alpha(Al)$ fázy.

Vo všetkých vzorkách možno pozorovať drobné polyedrické častice spomínanej železitej fázy $\alpha-Al(Fe,Mn,Cr)Si$ červenou farbou (obr. 8). Rozdielne použité rýchlosti piesta v_{max} pri odlievaní sa neprejavila rozdielom veľkosti či tvaru tejto fázy. Bola zaznamenaná prítomnosť fáz so zvýšeným podielom Cu modrou farbou (obr. 9).



Obr. 8. REM snímka a EDS mapping - SB55 2 m·s⁻¹



Obr. 9. REM snímka a EDS mapping - SB55 4 m·s⁻¹

2.4 Meranie mikrotvrdości

Posledným krokom experimentu bolo meranie mikrotvrdości. Bola meraná mikrotvrdość $\alpha(Al)$ fázy zariadením Hanemann typ Mod 32 s ihlanovým diamantovým indentorom na optickom mikroskope Carl Zeiss Neophot 2, pri zaťažení 10 p po dobu 10 s. Bolo vykonaných 10 vtláčkov na každom z dvoch kritických miest zo všetkých kombinácií geometrických a rýchlostných variantov. Výsledky boli aritmeticky spriemerované, bola vypočítaná smerodajná odchýlka merania a výsledky boli spracované v tab. 2 a v grafe (obr. 10).

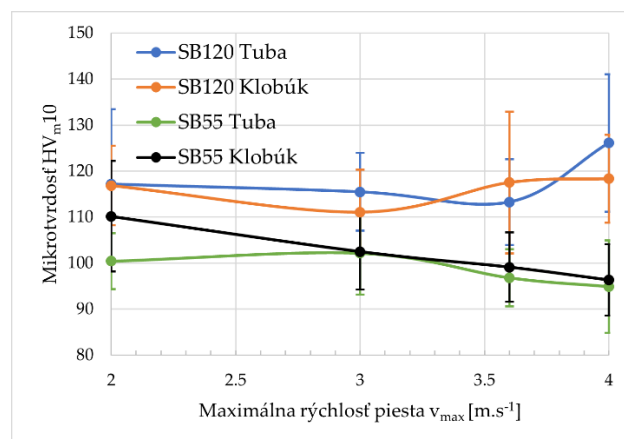
Tab. 2. Priemerné hodnoty mikrotvrdości a smerodajné odchýlky merania

Variant	Mikrotvrdość HV_{m10}				Hodnoty smerodajnej odchýlky merania			
	v_{max} [m·s ⁻¹]				v_{max} [m·s ⁻¹]			
	2	3	3,6	4	2	3	3,6	4
SB 120 Tuba	117,2	115,5	113,3	126,1	16,3	8,5	9,3	15
SB 120 Klobúk	116,9	111,1	117,5	118,3	8,6	9,2	15,4	9,6
SB 55 Tuba	100,4	102,2	96,8	94,9	6,1	9,1	6,2	10,1
SB 55 Klobúk	110,2	102,5	99,1	96,3	12	8,3	7,6	7,8

Možno konštatovať, že vyššie hodnoty mikrotvrdości sú dosahované v odliatkoch SB 120. Rovnako však výsledky boli najviac variabilné s najväčšími hodnotami smerodajnej odchýlky.

Pri zanedbaní extrémov spriemerovaných hodnôt mikrotvrdości s najvyššími smerodajnými odchýlkami, nemožno povedať, že by rýchlosť

pohybu piesta mala výrazný vplyv na mikrotvrdość $\alpha(Al)$ fázy.



Obr. 10. Závislosť priemernej hodnoty mikrotvrdości od maximálnej rýchlosti posuvu piesta

ZÁVER

Cieľom predloženého príspevku bolo experimentálne vykonať štruktúrnú analýzu zliatiny $AlSi9Cu3(Fe)$, z ktorej boli vysokotlakovým odlievaním zhotovené odliatky, ktoré sa líšili maximálnou rýchlosťou piesta v_{max} použitou pri odlievaní. Vo vopred vybraných kritických miestach odliatkov bol pozorovaný vplyv v_{max} na tvare a veľkosti štruktúrnych zložiek, kde pri vyšších v_{max} eutektický Si rástol do dĺžky a znižoval svoju hrúbku. Miera tohto javu bola ovplyvnená geometriou tubovej časti odliatku. EDS analýzou boli skúmané neznáme intermetalické fázy a bolo určené, že ide o fázu $\alpha-Al(Fe,Mn,Cr)Si$ v tvare romboického dvanásťstenu s veľkosťou už od 2 μm a Al_2Cu vyskytujúcu sa v oboch modifikáciách. Výber maximálnej rýchlosti piesta nemal merateľný vplyv na mikrotvrdość $\alpha(Al)$ fázy. Mikrotvrdość bola ovplyvnená najmä geometriou odliatku tak, že väčší tepelný uzol v rozmernejšej tubovej časti odliatku SB 120 znižuje rýchlosť ochladzovania.

Pod'akovanie

Príspevok bol vypracovaný v rámci riešenia grantového projektu VEGA 1/0241/23: „Vývoj a výskum inovatívnej metodiky pri výrobe konštrukcií z hliníkových zliatin za účelom zvýšenia stability procesu ich vzájomného spájania.“

LITERATÚRA

- [1] RAGAN, E. a iní. (2007): *Liatie kovov pod tlakom*. Prešov : s.n., ISBN 978-80-8073-979-9.
- [2] TALANDA, I. (2010): *Studium hlavných faktorů, které ovlyvňují jakost u technologických procesu*. Brno: Vysoké učení technické, Závěrečná práce.
- [3] BOLIBRUCHOVÁ, D. - PASTIRČÁK, R. (2018): *Zlievarenská metalurgia nezelezných kovov*.

Žilina: EDIS – vydavateľské centrum ŽU, ISBN 978-80-554-1463-8.

[4] GAŠPÁR, Š. (2013): *Technologické parametre v procese tlakového liatia a kvalitatívne vlastnosti hliníkových odliatok*. Prešov: Technická univerzita v Košiciach, habilitačná práca.

[5] ŠTIPL, P. (2014): *Technologie lití vysokotlakových odliatkov a vlivy působící na jejich kvalitu*. Brno: Vysoké učení technické Brno, Diplomová práce.

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

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

[8] 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*. In: Journal of Materials Science & Technology, DOI: 10.1016/j.jmst.2022.09.014.

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

[10] 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*. In: Shape Casting: 5th International Symposium, DOI: 10.1007/978-3-319-48130-2_34.