

# Vplyv Ti na mechanické a fyzikálne vlastnosti AlSi5Cu2Mg zliatiny

**Martina Sýkorová, Ing.\***

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina  
E-mail: [martina.sykorova@fstroj.uniza.sk](mailto:martina.sykorova@fstroj.uniza.sk), Tel.: + 421 41 513 2771

**Dana Bolibruchová, prof. Ing., PhD.**

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: [danka.bolibruchova@fstroj.uniza.sk](mailto:danka.bolibruchova@fstroj.uniza.sk), Tel.: + 421 41 513 2772

## Impact of Ti on mechanical and physical properties of AlSi5Cu2Mg alloy

**Abstract:** The hypoeutectic aluminum alloy *AlSi5Cu2Mg* is used in the field of high-strength cylinder head castings for the automotive sector due to its favorable combination of mechanical, physical, and foundry properties. The regulation of the chemical composition of the *AlSi5Cu2Mg* alloy set by the manufacturer limits the use of standard grain refiners based on *Al-Ti* and *Al-Ti-B* due to the limited content of *Ti* (max. 0.03 wt.%). The article is focused on the possibility of increasing the *Ti* content in this specific alloy above 0.03 wt. % *Ti*. The article investigates the effect of graded addition of *Ti* (0.1; 0.2 and 0.3 wt. % *Ti*) on the resulting mechanical and physical properties of the *AlSi5Cu2Mg* alloy. In this paper, the effect of T6 heat treatment on the resulting mechanical and physical properties was also evaluated. The physical properties of the experimental alloys with *Ti* addition decreased with increasing *Ti* content. No significant changes in the mechanical properties were observed due to the addition of *Ti*. The ductility of the experimental alloys increased positively. The best combination of mechanical and physical properties was demonstrated by *AlSi5Cu2Mg* alloy with the addition of 0.1 wt. % *Ti*.

**Keywords:** grain refiner, titanium, mechanical properties, physical properties.

## ÚVOD

Zliatina *AlSi5Cu2Mg* nachádza uplatnenie v oblasti produkcie vysokonamáhaných odliatkov hláv valcov v dôsledku výhodnej kombinácie mechanických a fyzikálnych vlastností [1]. Podeutektická zliatina *AlSi5Cu2Mg* je výrobcom navrhnutá so špecifickým chemickým zložením, ktoré výrazne limituje obsah *Ti* na max. 0.03 hm. %. Pre dosiahnutie optimálneho zjemnenia podeutektických zliatin na báze *Al-Si* je nutné pridať 0.10 hm. % *Ti* [2]. Z tohto hľadiska predpis chemického zloženia vo výraznej miere obmedzuje použitie štandardných očkovačiek na báze *Al-Ti* a *Al-Ti-B*.

Titán slúži na očkovanie podeutektických *Al-Si* zliatin. Ako je všeobecne známe očkovanie hliníkových zliatin je proces zámerného vnášania vhodných prvkov alebo ich zliatin s cieľom zjemniť štruktúru prostredníctvom zvýšenia počtu kryštalizačných zárodkov pre  $\alpha$ -(Al) fázu [3]. Zjemnením štruktúry hliníkových zliatin dochádza k zlepšeniu mechanických vlastností, zlievarenských vlastností, zníženiu pórovitosti a zníženiu náchylnosti

hliníkových zliatin na vznik trhlín za tepla. *Ti* sa do taveniny vnáša vo forme predzliatin na báze *Al-Ti* a *Al-Ti-B*. Očkovací účinok samotného *Ti* vsádzkovaného vo forme predzliatin na báze *Al-Ti* je nedostačujúci. Kryštalické zárodky  $TiAl_3$  majú relatívne vysokú rozpustnosť v hliníku v dôsledku čoho klesá očkovací účinok. Lepší očkovací účinok podeutektických *Al-Si* zliatin je dosiahnutý kombinovaným účinkom *Ti* a *B*. Princíp očkovania *Al-Si* zliatin predzliatinou *Al-Ti-B* spočíva v tvorbe kryštalizačných intermetalických fáz na báze  $AlB_2$ ,  $TiB_2$  alebo  $(Al,Ti)B_2$  [2, 3].

Práca sa zameriavala na hodnotenie vplyvu odstupňovaného prídavku *Ti* (0.1, 0.2 a 0.3 hm. % *Ti*) a tepelného spracovania T6 na mechanické vlastnosti, fyzikálne vlastnosti a mikoštruktúru hliníkovej zliatiny *AlSi5Cu2Mg*. Prídavok *Ti* bol v experimentálnej práci zámerné zvolený tak aby prevyšoval limitovaný obsah *Ti* stanovený výrobcom. Hlavným cieľom experimentálnej práce bolo zistiť v akej miere vplyva nadlimitné množstvo *Ti* na výsledné vlastnosti hliníkovej zliatiny *AlSi5Cu2Mg*.

## 1 METODIKA A REALIZÁCIA EXPERIMENTOV

Na experimentálnu prácu bola zvolená zliatina  $AlSi5Cu2Mg$ , ktorá bola označená ako referenčná zliatina. V tab. 1 je uvedené chemické zloženie referenčnej zliatiny  $AlSi5Cu2Mg$ .

Tab. 1. Chemické zloženie referenčnej zliatiny  $AlSi5Cu2Mg$  [hm. %]

Si	Cu	Mg	Sr	Ti	Mn/Fe	Al
5,58	1,99	0,36	0,008	0,03	0,09	Zv.

Očkovaním referenčnej zliatiny  $AlSi5Cu2Mg$  odstupňovaným prídavkom  $Ti$  (0,1, 0,2 a 0,3 hm. %  $Ti$ ) boli získané experimentálne zliatiny označené v závislosti od prídavku  $Ti$  ako 1- $Ti$ , 2- $Ti$  a 3- $Ti$ . V rámci experimentálneho výskumu bol obsah  $Ti$  zámerne zvýšený nad rámec odporúčania výrobcu. V tab. 2 je uvedené chemické zloženie experimentálnych zliatin.

Tab. 2. Chemické zloženie experimentálnych zliatin

	Si	Cu	Mg	Sr	Ti	Mn/Fe	Al
1- $Ti$	5,81	1,89	0,28	0,007	<b>0,09</b>	0,085	Zv.
2- $Ti$	5,72	1,91	0,25	0,005	<b>0,18</b>	0,093	Zv.
3- $Ti$	5,68	1,94	0,26	0,008	<b>0,26</b>	0,089	Zv.

Podutektická zliatina  $AlSi5Cu2Mg$  bola roztavená v elektrickej odporovej peci. Do taveniny bol pri teplote  $770\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  pridaný  $Ti$  vo forme predzliatiny  $AlTi5B1$ . Experimentálne zliatiny boli vyhotovené gravitačným odlievaním v otvorenej atmosfére do kovovej formy. Teplota odlievania bola stanovená na  $750\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ .

Pre každú experimentálnu zliatinu bola vyhotovená sada 10 skúšobných vzoriek, pričom päť skúšobných vzoriek bolo hodnotených v liatom stave a päť bolo hodnotených po tepelnom spracovaní. Pre experimentálnu prácu bolo zvolené tepelné spracovanie precipitačným vytvrdzovaním  $T6$ . Tepelný režim  $T6$  pozostával z troch krokov:

- rozpúšťacieho žihanie  $500\text{ °C} \pm 5\text{ °C}/6,5\text{ h.}$ ,
- rýchleho ochladzovania do vody o teplote  $80\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ ,
- precipitačného vytvrdzovania  $250\text{ °C} \pm 5\text{ °C}/4\text{ h.}$

Metodika stanovenia tepelnej vodivosti bola založená na meraní konduktivity experimentálnych vzoriek prostredníctvom meracieho zariadenia *Sigma Check 2*. Dosadením hodnôt elektrickej vodivosti ( $\sigma$ ) do empirického vzorca (1) bol následne uskutočnený výpočet hodnôt tepelnej vodivosti ( $\lambda$ ):

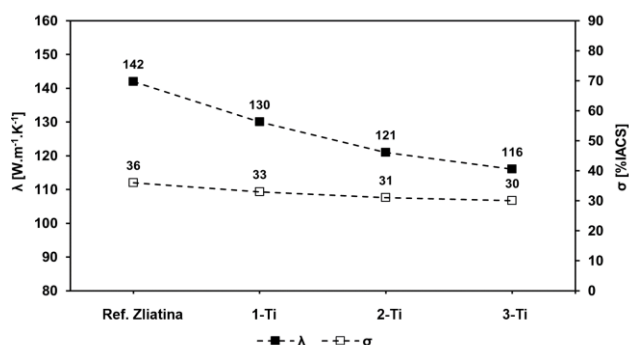
$$\lambda = 4,29 \cdot \sigma - 13,321 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (1)$$

Mechanické vlastnosti experimentálnych vzoriek boli hodnotené statickou skúškou ťahom podľa normy *EN*

*ISO 6895-1*. Statická skúška ťahom bola vykonaná univerzálnym ťahacím zariadením *Inspekt desk 50 kN*.

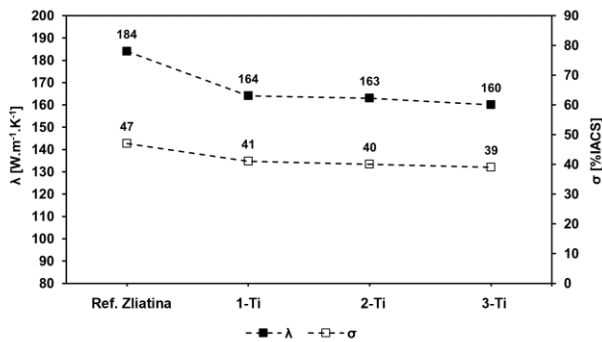
## 2 FYZIKÁLNE VLASTNOSTI

Fyzikálne vlastnosti referenčnej zliatiny v liatom stave a po tepelnom spracovaní  $T6$  sú uvedené na obr. 1. Uvedené hodnoty fyzikálnych vlastností predstavujú priemerné hodnoty z 3 meraní. Tepelná a elektrická vodivosť zliatin 1- $Ti$ , 2- $Ti$  a 3- $Ti$  klesala s narastajúcim hm. %  $Ti$  v porovnaní so zliatinou bez prídavku  $Ti$ . Najlepšie hodnoty fyzikálnych vlastností zliatin s prídavkom  $Ti$  boli dosiahnuté zliatinou 1- $Ti$ , pričom v porovnaní s referenčnou zliatinou klesli fyzikálne vlastnosti v priemere o 8 %. Najväčší pokles fyzikálnych vlastností bol zaznamenaný zliatinou s prídavkom 0,3 hm. %  $Ti$ . Elektrická a tepelná vodivosť klesla v porovnaní s referenčnou zliatinou o 18 % a 16 %. Fyzikálne vlastnosti mohli byť vo významnej miere ovplyvnené prítomnosťou hrubých šedých dosiek, ktoré boli identifikované ako fázy typu  $TiAlSi$ . Tepelná vodivosť závisí od prestupu voľných elektrónov prostredím. Mriežkové poruchy ako sú nečistoty pôsobia ako centrá rozptylu elektrónov, ktoré výrazne znižujú vodivosť hliníkovej zliatiny. Fázy typu  $TiAlSi$  mohli pôsobiť ako prekážky pre voľný pohyb elektrónov prostredím, čo malo negatívny dopad na výsledné fyzikálne vlastnosti [4, 5].



Obr. 1. Fyzikálne vlastnosti experimentálnych zliatin, liaty stav

Fyzikálne vlastnosti zliatin s odstupňovaným prídavkom  $Ti$  po tepelnom spracovaní  $T6$  sú uvedené na obr. 2. Vplyvom tepelného spracovania bol zaznamenaný pozitívny nárast fyzikálnych vlastností v dôsledku sferoidizácie eutektického  $Si$ . Podobne ako v liatom stave možno po  $T6$  pozorovať, že fyzikálne vlastnosti zliatin s prídavkom  $Ti$  mierne klesali s narastajúcim hm. %  $Ti$ . Elektrická a tepelná vodivosť zliatiny 1- $Ti$  klesla v porovnaní s referenčnou zliatinou o 13 % a o 11 %. Najnižšie fyzikálne vlastnosti boli podobne ako v liatom stave dosiahnuté zliatinou 3- $Ti$ . Vplyvom prídavku 0,3 hm. %  $Ti$  klesla elektrická vodivosť o 17 % a tepelná vodivosť o 13 % v porovnaní s referenčnou zliatinou bez prídavku  $Ti$ .



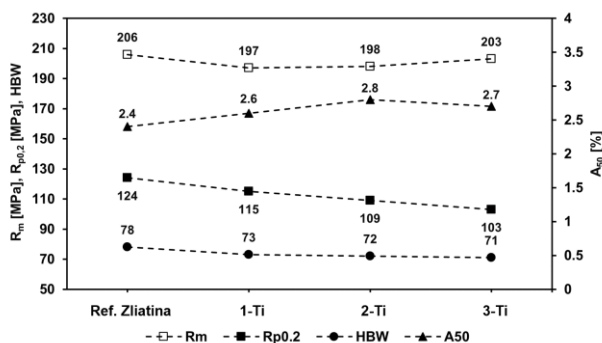
Obr. 2. Fyzikálne vlastnosti experimentálnych zliatin, T6

Literárnym prieskumom bolo preukázané, že prítomnosť *Ti* v *Al-Si-Cu-Mg* zliatinách vedie k zníženiu fyzikálnych vlastností [6]. Tepelná vodivosť konštrukčných materiálov na odliatky hláv valcov je kľúčovým faktorom, ktorý priamo ovplyvňuje výkon motora a jeho životnosť. Predpis výrobcu limitujúci obsah *Ti* v zliatine *AlSi5Cu2Mg*, určenej pre odliatky hláv valcov bol pravdepodobne zvolený s cieľom minimalizovať stratu fyzikálnych vlastností.

### 3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI

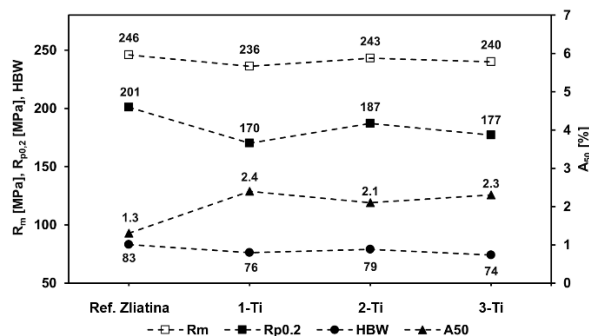
Mechanické vlastnosti experimentálnych zliatin s prídavkom *Ti* boli porovnávané so zliatinou *AlSi5Cu2Mg*, ktorá poskytovala referenčné hodnoty. Uvedené hodnoty mechanických vlastností predstavujú priemerné hodnoty z piatich meraní.

Mechanické vlastnosti zliatin s prídavkom *Ti* v liatom stave sú uvedené na obr. 3. Zliatinami 1-*Ti*, 2-*Ti* a 3-*Ti* nebola v dôsledku prídavku *Ti* zaznamenaná podstatná zmena  $R_m$  a  $HBW$ . S narastajúcim hm. % *Ti* bol zaznamenaný pokles  $R_{p0.2}$ . V porovnaní s referenčnou zliatinou  $R_{p0.2}$  zliatin 1-*Ti*, 2-*Ti* a 3-*Ti* klesla o 7, 12 a 17 %. Pri hodnotení ťažnosti bol zaznamenaný pozitívny nárast v dôsledku prídavku *Ti*. Maximálny nárast ťažnosti bol zaznamenaný zliatinou 2-*Ti*. Ťažnosť vzrástla v porovnaní s referenčnou zliatinou o 17 %. Naopak najmenší nárast bol zaznamenaný zliatinou s prídavkom 0.1 hm. % *Ti*, pričom ťažnosť vzrástla v porovnaní s referenčnou zliatinou o 8 %.



Obr. 3. Mechanické vlastnosti experimentálnych zliatin, liaty stav

Mechanické vlastnosti zliatin s odstupňovaným prídavkom *Ti* sú uvedené na obr. 4.  $R_m$  zliatin s prídavkom *Ti* vykazovala približné rovnaké hodnoty ako referenčná zliatina.  $R_{p0.2}$  a  $HBW$  mierne klesli s narastajúcim hm. % *Ti*.  $R_{p0.2}$  experimentálnych zliatin 1-*Ti* a 2-*Ti* klesla o 15 % a 7 % v porovnaní so zliatinou bez prídavku *Ti*. Vplyvom *Ti* bol zaznamenaný pozitívny nárast ťažnosti. Najvyšší nárast ťažnosti o 84 % bol zaznamenaný zliatinou 1-*Ti* v porovnaní s referenčnou zliatinou. Ťažnosť zliatin 2-*Ti* a 3-*Ti* vzrástla v porovnaní s referenčnou zliatinou o 61 % a 76 %.

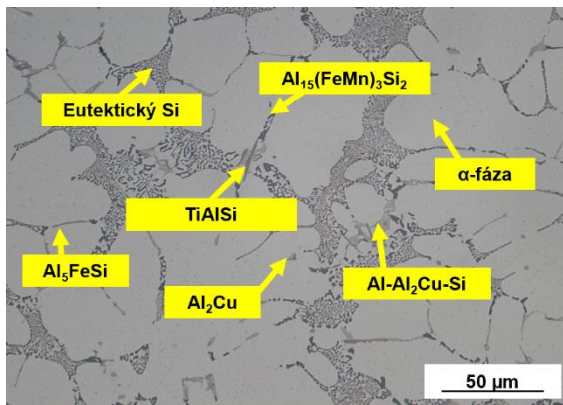


Obr. 4. Mechanické vlastnosti experimentálnych zliatin, T6

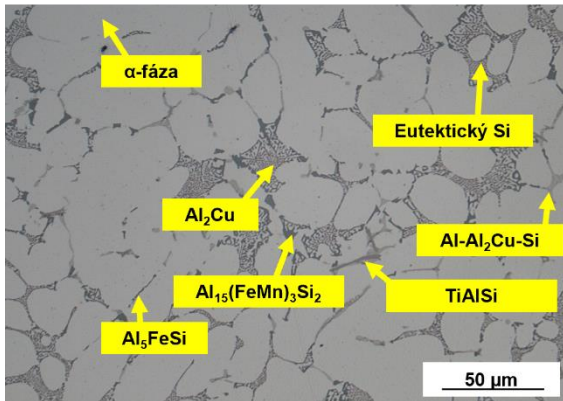
Najväčším benefitom *Ti* bolo zvýšenie ťažnosti zliatin s prídavkom *Ti* v liatom stave a po T6. Očkovanie *AlSi5Cu2Mg* zliatin s prídavkom *Ti* prevyšujúcim odporúčanú hodnotu výrobcu viedlo k zvýšeniu ťažnosti nad 2 %.

### 4 HODNOTENIE MIKROŠTRUKTÚRY

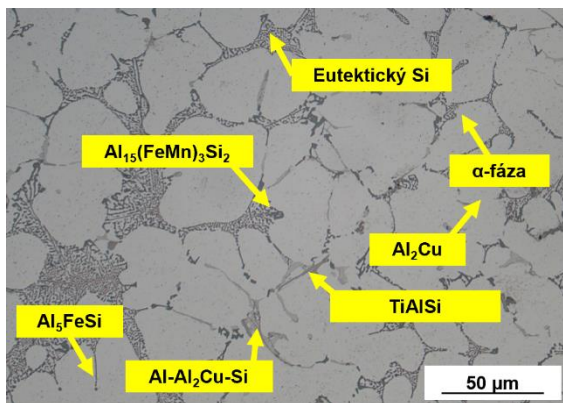
Mikroštruktúra zliatin s prídavkom *Ti* bola vyhodnotená v liatom stave a po tepelnom spracovaní T6. Mikroštruktúra zliatin s prídavkom *Ti* pozostáva v liatom stave z primárnej fázy  $\alpha$ -*(Al)*, eutektického *Si* a intermetalických fáz na báze *Cu*, *Fe* a *Ti* (obr. 5). V dôsledku toho, že zliatina *AlSi5Cu2Mg* bola dodávaná v predmodifikovanom stave, eutektický *Si* bol vylúčený vo forme nedokonale oblých zrn. V rovine metalografického výbrusu boli železité fázy pozorované v dvoch modifikáciách, vo forme doskovitých útvarov  $\beta$ - $Al_3FeSi$  a vo forme segmentovaného čínskeho písma  $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$ . Intermetalické fázy bohaté na *Cu* boli vylúčené v podobe ternárneho eutektika kompaktnej morfológie  $Al-Al_2Cu-Si$  a vo forme izolovaných častíc  $Al_2Cu$ . Intermetalické fázy na báze *Ti* boli v rovine metalografického výbrusu pozorované vo forme hrubých šedých dosiek, ktoré boli identifikované ako fázy na báze *TiAlSi*. Fázy *TiAlSi* boli vylúčené v medzidendritických oblastiach. Prítomnosť fáz na báze *TiAlSi* vylúčených vo forme hrubých dosiek mohla mať negatívny dopad na výsledné mechanické a fyzikálne vlastnosti *AlSi5Cu2Mg* zliatin.



a)



b)

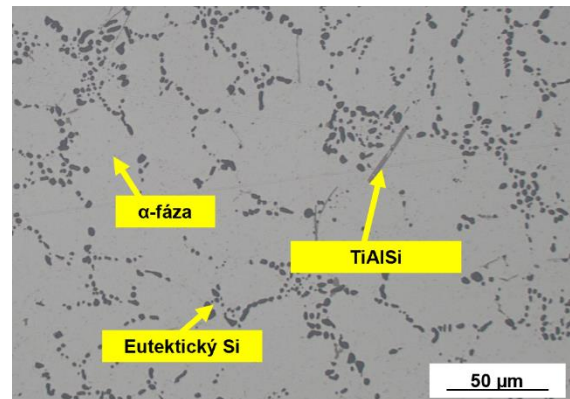


c)

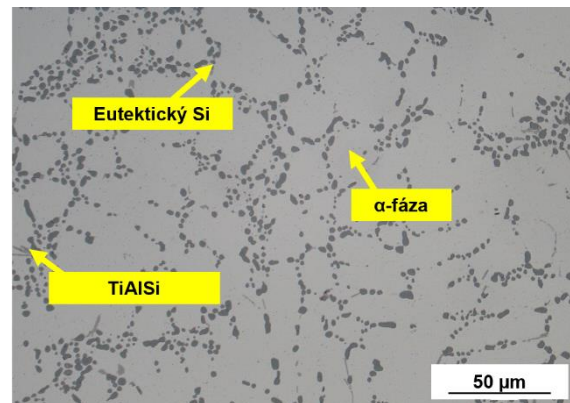
Obr. 5. Mikroštruktúra zliatin s prídavkom *Ti*, liaty stav, lept. 0.5 % HF: a) 1-Ti, b) 2-Ti, c) 3-Ti

Mikroštruktúry zliatin s prídavkom *Ti* po tepelnom spracovaní T6 sú zobrazené na obr. 6. Vplyvom tepelného spracovania T6 dochádza k rozpusteniu intermetalických fáz *Mg* a *Cu* do homogénneho tuhého roztoku  $\alpha$ -(Al) a ich následnému vylúčeniu v podobe spevňujúcich precipitátov  $Al_2Cu$  a  $Mg_2Si$ . Spevňujúce precipitáty  $Al_2Cu$  a  $Mg_2Si$  zvyšujú pevnosť a tvrdosť hliníkovej zliatiny. V dôsledku tepelného spracovania T6 dochádza k sferoidizácii eutektického Si. Eutektický Si je v rovine metalografického výbrusu vylúčený vo forme dokonale oblých zrn. V rovine metalografického výbrusu bolo možno pozorovať intermetalické fázy *TiAlSi*, ktorých morfológia sa vplyvom zvoleného postupu tepelného spracovania nezmenila. Tento jav

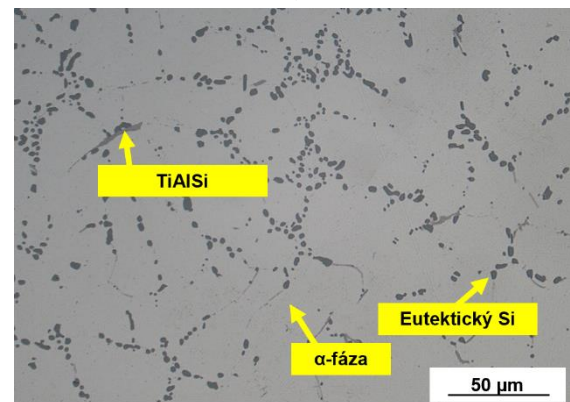
bol potvrdený štúdiami, ktoré preukázali vysokú tepelnú stabilitu fáz *TiAlSi* [7].



a)



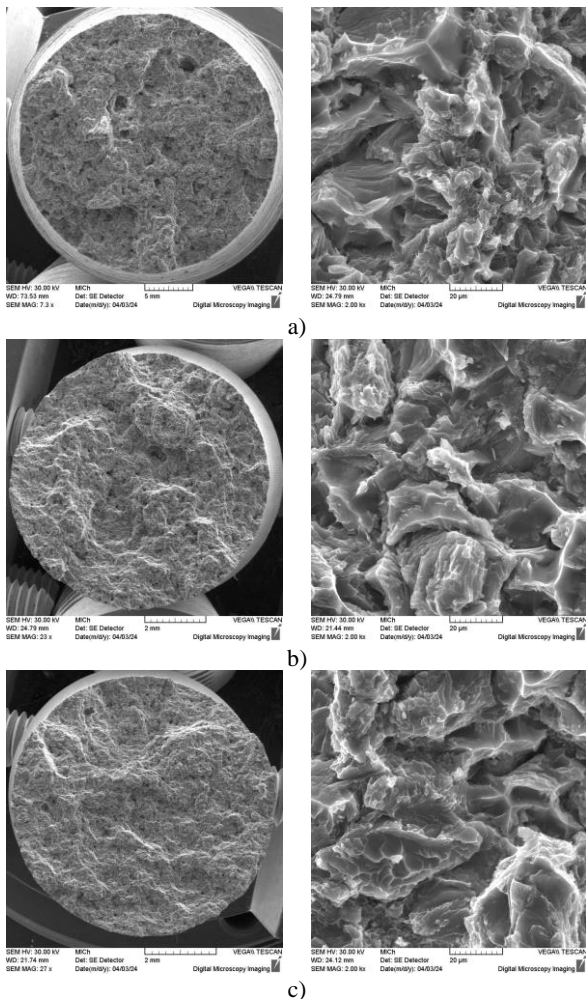
b)



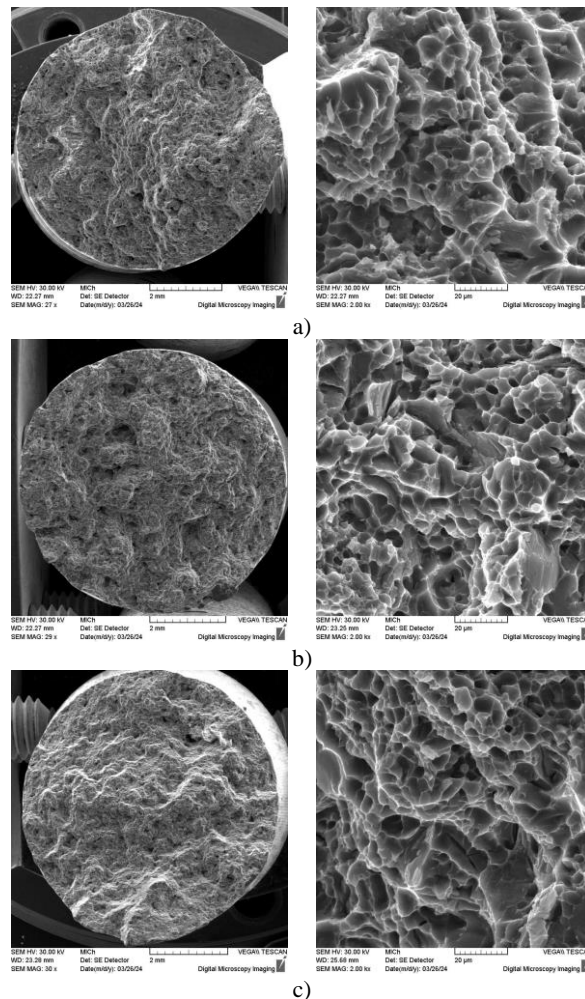
c)

Obr. 6. Mikroštruktúra zliatin s prídavkom *Ti*, T6, lept. 0.5 % HF: a) 1-Ti, b) 2-Ti, c) 3-Ti

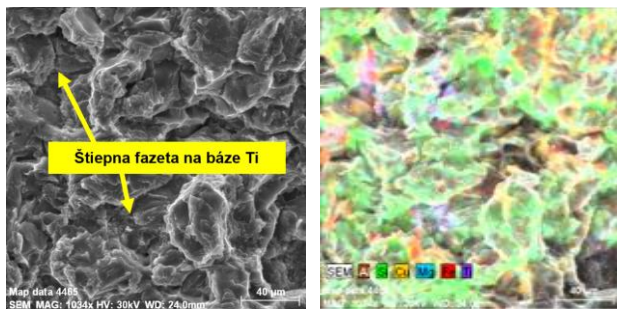
Lomové plochy zliatin v liatom stave s prídavkom *Ti* sú zobrazené na obr. 7. V závislosti od prídavku *Ti* sa reliéf lomových plôch výrazne nelíši. Eutektický Si možno v rovine lomovej plochy pozorovať vo forme malých dosiek. Štiepne fazety prítomné na lomových plochách boli plošnou EDX analýzou identifikované ako intermetalické fázy na báze *Cu*, *Mg*, *Fe* a *Ti* (obr. 8). Lomové plochy sú charakteristické tvárnym porušením s jamkovou morfológiou a plasticky pretvorenými hrebeňmi  $\alpha$ -fázy.



Obr. 7. Lomové plochy zliatin s prídavkom *Ti*, liaty stav, REM: a) 1-*Ti*; b) 2-*Ti*; c) 3-*Ti*



Obr. 9. Lomové plochy zliatin s prídavkom *Ti*, *T6*, REM: a) 1-*Ti*; b) 2-*Ti*; c) 3-*Ti*



Obr. 8. EDX analýza štiepných faziet, 3-*Ti*, liaty stav, REM

Fraktografickým hodnotením zliatin 1-*Ti*, 2-*Ti* a 3-*Ti* neboli vplyvom tepelného spracovania *T6* preukázané v závislosti od hm. % *Ti* výrazné zmeny (obr. 9). Tepelným spracovaním *T6* dochádza k sferoidizácii eutektického *Si*, ktorý sa na lomovej ploche pozoruje vo forme izolovaných častíc. V prípade tepelne spracovaných *Al-Si* zliatin sa podobne ako v liatom stave uplatňuje mechanizmus transkrystalického tvárneho porušenia s jamkovou morfológiou a plasticky pretvorenými hrebeňmi  $\alpha$ -fázy. Na lomových plochách zliatin s odstupňovaným prídavkom *Ti* bolo možné detegovať prítomnosť intermetalických fáz, ktoré sa prejavili výskytom štiepných faziet.

## ZÁVER

Práca analyzovala vplyv odstupňovaného hm. % *Ti* na mechanické, fyzikálne vlastnosti a na mikroštruktúru hliníkovej zliatiny *AlSi5Cu2Mg*. Prídavok *Ti* bol zámerné navrhnutý tak aby prevyšoval predpis chemického zloženia stanovený výrobcom. Na základe nadobudnutých výsledkov možno konštatovať, že:

- prídavok *Ti* viedol k významnému poklesu fyzikálnych vlastností ako v liatom stave, tak po tepelnom spracovaní *T6*. Fyzikálne vlastnosti experimentálnych zliatin klesali s narastajúcim hm. % *Ti*,
- zliatinami s prídavkom *Ti* v liatom stave a po *T6* nebol zaznamenaný výrazný nárast  $R_m$  a  $HBW$  v porovnaní so zliatinou bez prídavku *Ti*,
- $R_{p0,2}$  experimentálnych zliatin s prídavkom *Ti* v liatom stave mierne klesla,
- prídavok *Ti* mal pozitívny účinok na hodnoty ťažnosti ako v liatom stave tak po tepelnom spracovaní *T6*,
- mikroštruktúra experimentálnych zliatin je tvorená primárnou fázou  $\alpha$ -*Al*, modifikovaným

eutektickým Si a intermetalickými fázami na báze *Fe*, *Cu* a *Ti*. Vplyvom tepelného spracovania dochádza k sferoidizácii eutektického *Si*. Mikroštruktúra zliatin sa v závislosti od hm. % *Ti* výrazne nelíši.

Na základe nadobudnutých výsledkov nastal predpoklad, že predpis chemického zloženia limitujúci obsah *Ti* v zliatine *AlSi5Cu2Mg* bol zvolený s cieľom potlačiť negatívny dopad prídavku *Ti* na fyzikálne vlastnosti zliatiny *AlSi5Cu2Mg*. Avšak je nutné uvažovať nad potenciálnym benefitom prídavku *Ti* v podobe dosiahnutia zvýšenej ťažnosti, ktorá je pre odliatky hláv valcov kľúčová.

### Pod'akovanie

Článok bol vytvorený v rámci projektu grantovej spoločnosti VEGA 1/0160/22 a VEGA 1/0241/23. Autori ďakujú agentúre za podporu.

### LITERATÚRA

[1] BOLIBRUCHOVÁ, D. - SÝKOROVÁ, M. - BRŮNA, M. - MATEJKA, M. - ŠIRANEC, L. (2023): *Effect of Zr Addition on Selected Properties and Microstructure of Aluminum Alloy AlSi5Cu2Mg*. In: International Journal of Metalcasting, 17(4), 2596-2611.

[2] SIGWORTH, G.K. - KUHN, T.A. (2015): *Grain Refinement of Aluminum Casting Alloys*. In: International Journal of Metalcasting, 1, 31-40.

[3] KASHYAP, K. T. - CHANDRASHEKAR, T. (2021): *Effects and Mechanism of Grain Refinement in Aluminium Alloys*. In: Bulletin of Materials Science, 24(4), 345-353.

[4] CZERWINSKI, F. (2020): *Thermal Stability of Aluminum Alloy*. In: Materials, 13(15).

[5] BEROUAL, S., - BOUMERZOU, Z., - PAILLARD, P. - BORJON-PIRON, Y. (2019): *Effects of Heat Treatment and Addition of Small Amounts of Cu and Mg on the Microstructure and Mechanical Properties of Al-Si-Cu and Al-Si-Mg Cast Alloys*. In: Journal of Alloys and Compounds, 784, 1026-1035.

[6] CHOI, S. - KIM, Y. - KIM, Y. -KANG, CH. (2019): *Effects of Alloying Elements on Mechanical and Thermal Characteristics of Al-6wt-%Si-0.4wt-%Mg-(Cu) foundry alloy*. In: Materials Science and Technology, 35(11), 1365-1371.

[7] ZHANG, Y. - YAN, F. - ZHAO, Y. - SONG, CH. - HOU, H. (2022): *Effect of Ti on Microstructure and Mechanical Properties of Die-Cast Al-Mg-Zn-Si Alloy*. In: Materials Research Express, 6, 036526.