

# Kvantitatívne hodnotenie náchylnosti Al-Si-Cu-Mg zliatiny s prídavkom titánu na vznik trhlín za tepla

**Martina Sýkorová, Ing., PhD.**

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

## Quantitative Evaluation of the Hot-Tearing Susceptibility of Al-Si-Cu-Mg Alloy with Titanium Addition

**Abstract:** This study presents a quantitative evaluation of the effect of *titanium (Ti)* additions on the hot-tearing susceptibility of the *AlSi5Cu2Mg aluminium* alloy. The *AlSi5Cu2Mg aluminium* alloy is used in the production of highly stressed cylinder head castings and is characterized by an increased susceptibility to hot tears. The main objective of the study was to determine the extent to which grain refinement of the *aluminium* alloy with an excessive amount of *Ti* affects its susceptibility to hot tears. Thermal analysis was performed to characterize the solidification behaviour of the experimental alloys. Grain refinement was evaluated metallographically by measuring the *Dendrite Arm Spacing (DAS) index*. The results confirmed that the addition of *titanium* led to a decrease in the hot tearing susceptibility of the *AlSi5Cu2Mg* alloy.

**Keywords:** aluminium alloys, titanium, hot-tearing susceptibility.

## ÚVOD

Trhliny za tepla sú závažnou chybou odliatku, ktoré vznikajú počas tuhnutia pri teplote blízkej *solidu*. Vznik trhlín za tepla sa uskutočňuje v oblastiach s nízkou pevnosťou a teda po hraniciach zŕn, pričom dochádza k medzikryštalickému porušeniu. Trhliny vznikajú v dôsledku prítomnosti napätí *endogénneho* a *exogénneho* pôvodu. *Endogénne* napätia vznikajú vplyvom rozdielného zmrašťovania jednotlivých častí odliatku v dôsledku nerovnomerného ochladzovania. Napätia *exogénneho* pôvodu vznikajú vplyvom pôsobenia vonkajších činiteľov, ktoré kladú odpor voči zmrašťovaniu odliatku, ako napr. zlievarenská forma. Zlievarenská forma ovplyvňuje vznik *exogénnych* napätí v závislosti od jej materiálu a konštrukčného vyhotovenia [1].

Nemenej dôležitým faktorom vplývajúcim na vznik trhlín je aj chemické zloženie materiálu. To má vplyv na výslednú náchylnosť zliatiny na vznik trhlín najmä z pohľadu vplyvu jednotlivých chemických prvkov na šírku intervalu tuhnutia [2]. Pri *Al-Si-Cu-Mg* zliatinách má *med'* výrazný vplyv na náchylnosť zliatiny na vznik trhlín, a to najmä z dôvodu ovplyvnenia šírky intervalu tuhnutia. Vo všeobecnosti sa so vzrastajúcim obsahom *Cu* v zliatine zároveň rozširuje aj interval tuhnutia, čo spôsobuje zníženie odolnosti zliatiny voči vzniku trhlín [3]. Štúdie preukázali, že jednou z možností ako znížiť

náchylnosť zliatiny na vznik trhlín za tepla, je očkovanie *Al-Si-Cu-Mg* zliatin. *Jang* uvádza, že prídavok *Ti* vedie k zníženiu náchylnosti hliníkových zliatin na vznik trhlín za tepla v dôsledku lepšieho dosadzovania taveniny do medzidendritických priestorov [4].

Zníženie náchylnosti *Al-Si-Cu-Mg* zliatin na vznik trhlín za tepla prostredníctvom očkovania môže vo významnej miere rozšíriť oblasť použitia *Al-Si-Cu-Mg* zliatin s vysokou náchylnosťou na praskanie.

Podutektická hliníková zliatina *AlSi5Cu2Mg* nachádza uplatnenie v oblasti produkcie vysokonamáhaných odliatkov pre automobilový priemysel (napr. hláv valcov). Zliatina *AlSi5Cu2Mg* je výrobcom navrhnutá so špecifickým chemickým zložením, ktoré výrazne limituje obsah *Ti* v tavenine (max. 0,03 hm. % *Ti*). Štúdie uvádzajú, že optimálny očkujúci účinok *podeutektických hliníkových* zliatin je dosiahnutý pridaním 0,10 hm. % *Ti* [5]. Predpis chemického zloženia *AlSi5Cu2Mg* zliatiny stanovený výrobcom obmedzuje použitie štandardných očkovadiel typu *Al-Ti* a *Al-Ti-B*. Aj napriek obmedzeniam vyplývajúcich z predpisu chemického zloženia bol v experimentálnej práci zámerne zvolený prídavok *Ti*, ktorý v nadlimitnom množstve prevyšoval odporúčania výrobcu. Cieľom výskumu bolo zistiť v akej miere vplyva nadlimitné množstvo

Ti na výslednú náchylnosť hliníkovej zliatiny  $AlSi5Cu2Mg$  na vznik trhlín za tepla.

## 1 METODIKA A REALIZÁCIA EXPERIMENTOV

Pre experimentálne účely bola zvolená *podeutektická hliníková* zliatina  $AlSi5Cu2Mg$ , ktorá bola označená ako referenčná zliatina. Chemické zloženie referenčnej zliatiny  $AlSi5Cu2Mg$  je uvedené v tab. 1.

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

Si	Cu	Mg	Fe	Sr	Ti	Al
5,49	1,92	0,29	0,19	0,01	0,013	Zv.

*Podeutektická hliníková* zliatina  $AlSi5Cu2Mg$  bola roztavená v elektrickej odporovej peci. Experimentálne zliatiny boli získané očkovaním referenčnej zliatiny  $AlSi5Cu2Mg$  odstupňovaným prídavkom Ti (0,1; 0,2 a 0,3 hm. % Ti), pričom obsah Ti bol zámerne zvolený nad rámec odporúčania výrobcu (max. 0,03 hm. % Ti). V závislosti od prídavku Ti boli experimentálne zliatiny označené Ti-0,1, Ti-0,2 a Ti-0,3. Ti bol do taveniny pridaný vo forme predzliatiny  $AlTi5B1$  pri teplote  $770^{\circ}C \pm 5^{\circ}C$ . Experimentálne zliatiny boli vyhotovené gravitačným odlievaním v otvorenej atmosfére do kovovej formy. Kovová forma bola pred odlievaním ošetrená *grafitovým* náterom. Teplota kovovej formy bola počas odlievania udržiavaná v teplotnom intervale od 180 do  $200^{\circ}C$ . Teplota odlievania experimentálnych zliatin bola z dôvodu vyššieho prídavku Ti a horšej rozpustnosti predzliatiny  $AlTi5B1$  stanovená na  $755^{\circ}C \pm 5^{\circ}C$ . V tab. 2 uvádzajúcej chemické zloženie zliatin Ti-0,1; Ti-0,2 a Ti-0,3 možno vidieť, že reálny obsah Ti v tavenine bol nižší v dôsledku neúplného roztavenia predzliatiny  $AlTi5B1$ .

Tab. 2. Chemické zloženie experimentálnych zliatin [hm. %].

Prídavok Ti	Si	Cu	Mg	Ti	Sr	Al
Ti-0,1	5,81	1,84	0,27	<b>0,09</b>	0,007	Zv.
Ti-0,2	5,72	1,88	0,23	<b>0,17</b>	0,005	Zv.
Ti-0,3	5,62	1,84	0,22	<b>0,25</b>	0,006	Zv.

### 1.1 Termická analýza

Termická analýza bola uskutočnená s cieľom vyhodnotiť priebeh tuhnutia referenčnej zliatiny  $AlSi5Cu2Mg$ . Referenčná zliatina bola odliata do skúšobného téglika. Na dne skúšobného téglika bol umiestnený termočlánok typu K, ktorý zaznamenával teplotný priebeh tuhnutia taveniny. Teplotný priebeh tuhnutia taveniny bol zapísaný na tzv. meraciu kartu, ktorá umožňuje prepis získaného súboru údajov do

analogového zápisu. Analogový zápis bol následne prepísaný cez softvér *LabView 2 Hz* do numerického a grafického zápisu. *Softvérom LabView 2 Hz* bola vyhotovená krivka ochladzovania referenčnej zliatiny v závislosti od času. Vzhľadom na to, že teplota kryštalizácie jednotlivých fáz je na krivke ochladzovania ťažko identifikovateľná, bola vyhotovená prvá derivácia krivky ochladzovania. Teplota kryštalizácie jednotlivých fáz sa na prvej derivácii krivky ochladzovania vyznačuje zmenou priebehu krivky [5].

### 1.2 Hodnotenie DAS indexu

Vplyv odstupňovaného prídavku Ti na zjemnenie zrna bol posudzovaný metalograficky na základe hodnotenia *DAS indexu* (*Dendrite Arm Spacing*). *DAS index* určuje vzdialenosti sekundárnych osí *dendritov*, pričom platí, že čím menšia je hodnota *DAS indexu* tým jemnejšia je štruktúra a tým menšie sú segregáčne vzdialenosti. Hodnota *DAS indexu* sa vypočíta ako podiel dĺžky *dendritov* ( $L$ ) a počtu sekundárnych osí *dendritov* ( $n$ ):

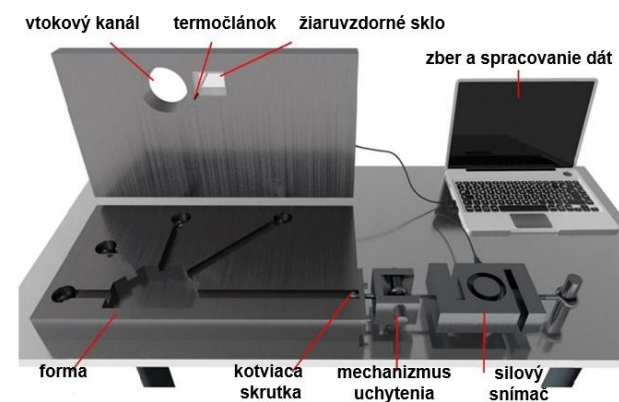
$$DAS = \frac{L}{n-1} \quad (1)$$

*DAS index* je priamo závislý len od rýchlosti ochladzovania v intervale tuhnutia. Pri príprave experimentálnych zliatin bol kladený dôraz na zabezpečenie približne rovnakých podmienok tuhnutia. Z tohto hľadiska by mohlo byť hodnotenie *DAS indexu* orientačným ukazovateľom miery očkujúceho účinku Ti.

Metalografické hodnotenie *DAS indexu* bolo uskutočnené prostredníctvom softvéru *Quick Photo Industrial 3.1*.

### 1.3 Hodnotenie náchylnosti na vznik trhlín

Meracie zariadenie na hodnotenie náchylnosti na vznik trhlín za tepla je zobrazené na obr. 1.



Obr. 1. Meracie zariadenie na hodnotenie náchylnosti na vznik trhlín za tepla

Konštrukcia formy bola nadimenzovaná tak aby podnecovala vznik trhlín v odliatku počas tuhnutia. Kovová forma bola pred odlievaním ošetrená

separačným *grafitovým* náterom. Teplota formy bola udržiavaná v teplotnom intervale  $150^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ . Tavenina bola vtokovým kanálom dopravovaná do dutiny formy. Dutina formy pozostávala z piatich ramien rôznej dĺžky. Štyri z piatich skúšobných ramien boli ukončené guľovým zakončením s cieľom zabezpečiť vznik brzdného zmraštenia, ktoré vedie k zvýšeniu náchylnosti zliatiny k tvorbe trhlín. Tieto ramená boli určené na kvantitatívne hodnotenie náchylnosti zliatiny na vznik trhlín.

Kvantitatívne hodnotenie bolo uskutočnené na základe stanovenia tzv. *Hot Tearing Indexu (HTI)*. Pre kvantitatívne hodnotenie náchylnosti na vznik trhlín boli určené 4 ramená rôznej dĺžky. Hodnota *HTI* bola určená dvomi rôznymi metódami (*HTI<sub>1</sub>* a *HTI<sub>2</sub>*) a ich vzájomnou kombináciou (*HTI<sub>3</sub>*).

Prvý spôsob získania hodnoty *HTI* vo svojich štúdiách popisuje *Wu* [6]. Hodnota *HTI<sub>1</sub>* je určená na základe počtu trhlín (*PT*), charakteru a veľkosti trhliny (*CHT*) a počtu posudzovaných ramien (*PR*) nasledujúcou rovnicou (2).

$$HTI_1 = \frac{PT \cdot \sum CHT}{PR} \quad (2)$$

Druhú metódu stanovenia hodnoty *HTI<sub>2</sub>* vo svojich prácach popisujú *Song* a *Akhyar* [7, 8]. V tomto prípade bola hodnota *HTI<sub>2</sub>* určená v závislosti od charakteru a veľkosti trhliny (*CHT*), polohy trhliny na skúšobnom ramene (*KPT*) a dĺžke skúšobného ramena (*KDR*) nasledovne:

$$HTI_2 = \sum CHT \cdot KPT \cdot KDR \quad (3)$$

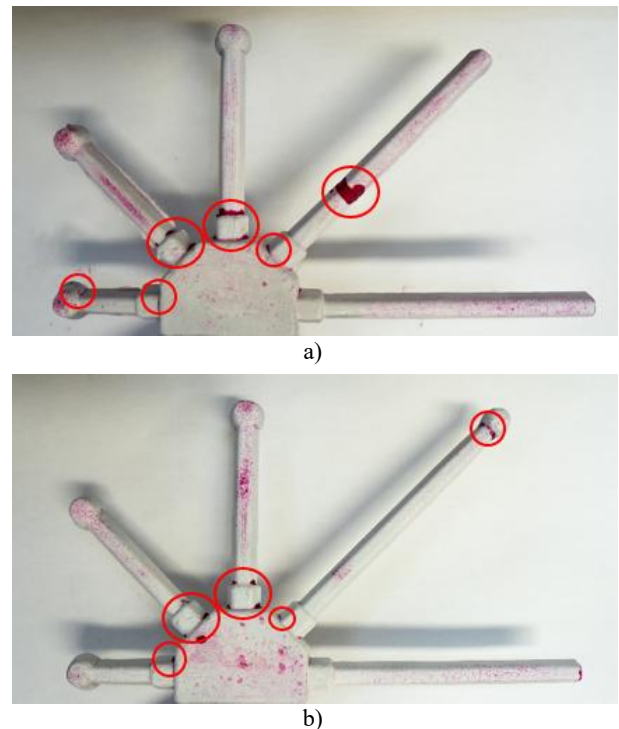
Koeficient charakteru a veľkosti trhliny *CHT* pri hodnotení *HTI<sub>1</sub>* a *HTI<sub>2</sub>* udáva mieru závažnosti trhliny. *Li* uvádza kategorizačný systém, ktorý v závislosti od závažnosti trhliny rozdeľuje koeficient *CHT* do štyroch kategórií (obr. 2) [9].



Obr. 2. Hodnotenie *CHT* na základe kategorizácie trhliny

Príslušná hodnota koeficientu *CHT* bola stanovená vizuálnou kontrolou trhlín na štyroch skúšobných ramenách. Na potvrdenie charakteru trhlín bola vykonaná kapilárna skúška (obr. 3). Kapilárna skúška bola vykonaná v súlade s *STN EN ISO 3452-1*. Pre kapilárnu skúšku bol použitý skúšobný systém s označením *IICe* podľa *STN EN ISO 3452-1*. Pre farebnú kapilárnu skúšku bol použitý kapilárny systém od firmy *Diffu-therm* v zložení čistič *BRE*, červený penetrant *BDR* a biela vývojka *BEA*.

Penetračný čas bol 60'. Hodnotilo sa v dvoch krokoch. Prvé hodnotenie bolo ihneď po zaschnutí vývojky a druhé po uplynutí vyvolávacieho času 15'. Kontrola bola vykonaná pri teplote  $22^{\circ}\text{C}$ .



Obr. 3. Príklad kapilárnej skúšky: a) referenčná zliatina, b) *Ti-0,3*

Tabuľka 3 uvádza hodnoty koeficientu dĺžky ramena (*KDR*) a koeficientu polohy trhliny (*KPT*) na stanovenie hodnoty *HTI<sub>2</sub>*.

Tab. 3. Kategorizačný systém na stanovenie hodnôt *KDR* a *KPT*

Koeficient dĺžky ramena	<i>KDR</i>	Koeficient polohy trhliny	<i>KPT</i>
Rameno 1 (64,5 mm)	1	Dolná časť ramena	1
Rameno 2 (104,5 mm)	2	Stredná časť ramena	3
Rameno 3 (124,5 mm)	3	Horná časť ramena	2
Rameno 4 (184,5 mm)	4		

Kombináciou výpočtov pre stanovenie hodnoty *HTI<sub>1</sub>* a *HTI<sub>2</sub>* bol získaný tretí spôsob výpočtu hodnoty *HTI<sub>3</sub>* podľa vzťahu (4). Hodnota *HTI<sub>3</sub>* poskytuje komplexnejší pohľad na náchylnosť zliatiny na vznik trhlín.

$$HTI_3 = \frac{PT \cdot \sum (CHT \cdot KDR \cdot KPT)}{PR} \quad (4)$$

Výsledné hodnoty *Hot Tearing Indexu (HTI<sub>1</sub>, HTI<sub>2</sub> a HTI<sub>3</sub>)* možno charakterizovať ako mieru náchylnosti na vznik trhlín za tepla *Hot Tears Susceptibility (HTS)* (tab. 4).

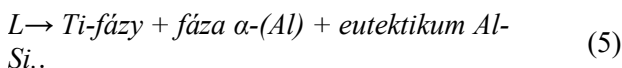
Tab. 4. Určenie miery náchylnosti na vznik trhlín za tepla (HTS).

HTI <sub>x</sub> index	< 0,5	0,5÷1,25	1,25÷2,25	2,25÷3,5	> 3,5
HTS	minimálna	malá	mierna	vysoká	veľmi vysoká

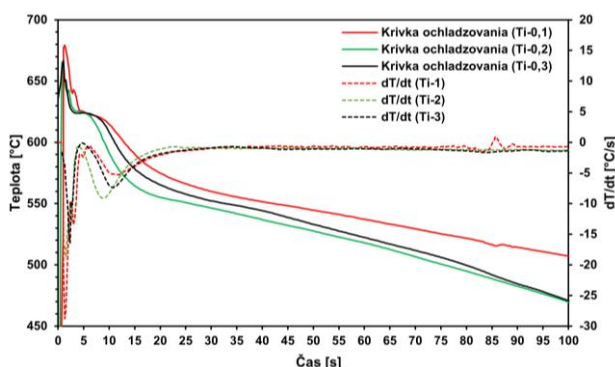
## 2 VÝSLEDKY A DISKUSIA

### 2.1 Termická analýza

Záznam z termickej analýzy pre zliatiny *Ti-0,1*, *Ti-0,2* a *Ti-0,3* je zobrazený na obr. 4. Na krivkách ochladzovania bola na začiatku tuhnutia zliatin *Ti-0,1*, *Ti-0,2* a *Ti-0,3* zaznamenaná rekalscencia v oblasti teplôt od 638 do 645°C. Na zázname termickej analýzy referenčnej zliatiny nebola rekalscencia v teplotne vymedzenej oblasti prítomná. Zhang vo svojich štúdiách uvádza, že priebeh tuhnutia *Al-Si* zliatin očkovaných *Ti* možno popísať nasledovne [10]:



Zo záznamu termickej analýzy a na základe uvedenej štúdie [10] vyplynulo, že tuhnutie *AlSi5Cu2Mg* zliatiny s prídavkom *Ti* začína kryštalizáciou fáz na báze *Ti*. Kryštalizácia *Ti*-fáz prebiehala pred tuhnutím primárnej fázy  $\alpha\text{-}(Al)$  v oblasti teplôt od 638 do 645°C.



Obr. 4. Krivky ochladzovania zliatin s odstupňovaným prídavkom *Ti* a ich prvé derivácie

Teploty kryštalizácie príslušných fáz, ktoré boli získané z termickej analýzy sú uvedené v tab. 5.

Z nadobudnutých výsledkov bolo preukázané, že očkovanie *AlSi5Cu2Mg* zliatiny *Ti* viedlo k zvýšeniu teploty likvidu ( $T_L$ ).  $T_L$  narastala s narastajúcim hm. % *Ti*. Teplota likvidu zliatiny bez prídavku *Ti* bola 610°C. Najvyšší nárast  $T_L$  bol zaznamenaný zliatinou s prídavkom 0,3 hm. % *Ti* (*Ti-0,3*).  $T_L$  v porovnaní s referenčnou zliatinou v tomto prípade vzrástla o 35°C. Výsledky termickej analýzy zliatin s prídavkom *Ti* sú v súlade so Samuelovými štúdiami [11].

Tab. 5. Teploty kryštalizácie príslušných fáz v experimentálnych zliatinách [°C]

Zliatina	$T_L$	Eutektikum <i>Al-Si</i>	$Mg_2Si$	$Al_2Cu$	$T_S$
Ref. zliatina	610	567	555	543	517
<i>Ti-0,1</i>	638	554	521	506	483
<i>Ti-0,2</i>	640	551	531	507	481
<i>Ti-0,3</i>	645	553	533	510	486

Tuhnutie zliatin s prídavkom *Ti* pokračovalo kryštalizáciou eutektickej fázy *Al-Si* pri teplote okolo 553°C. V porovnaní s referenčnou zliatinou klesla teplota kryštalizácie eutektickej fázy *Al-Si*. Pokles teploty kryštalizácie bolo taktiež možné pozorovať pri intermetalických fázach  $Mg_2Si$  a  $Al_2Cu$ . Tuhnutie končí na teplote *solidu* ( $T_S$ ).  $T_S$  klesla vplyvom prídavku *Ti* v porovnaní s referenčnou zliatinou, pričom najväčší pokles 36°C bol zaznamenaný zliatinou *Ti-0,2*. Z uvedeného vyplýva, že v dôsledku prídavku *Ti* do *AlSi5Cu2Mg* zliatiny dochádza k ovplyvňovaniu teploty kryštalizácie príslušných fáz a rozširovaniu intervalu tuhnutia *AlSi5Cu2Mg* zliatiny, čo môže viesť k zvýšeniu náchylnosti na vznik trhlín za tepla.

### 2.2 Hodnotenie DAS indexu

Hodnoty *DAS* indexu referenčnej zliatiny a zliatin s prídavkom *Ti* sú uvedené v tab. 6. Uvedené hodnoty predstavujú priemerné hodnoty z piatich meraní *DAS* indexu.

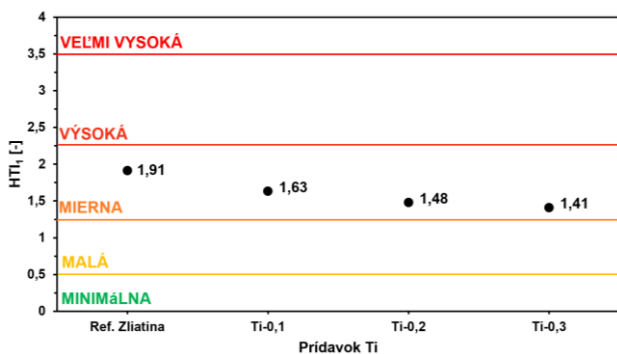
Tab. 6. Hodnoty *DAS* indexu experimentálnych zliatin [ $\mu\text{m}$ ]

	Ref. zl.	<i>Ti-0,1</i>	<i>Ti-0,2</i>	<i>Ti-0,3</i>
<i>DAS</i> index	26,8	21,1	20,3	19,9

Referenčná zliatina dosiahla hodnotu *DAS* indexu = 26,8  $\mu\text{m}$ . Vplyvom prídavku 0,1 hm. % *Ti* bol v porovnaní s referenčnou zliatinou zaznamenaný pokles *DAS* indexu o 21 %. Hodnota *DAS* indexu zliatiny *Ti-0,2* klesla v porovnaní s referenčnou zliatinou o 24 %. Pokles hodnoty *DAS* indexu naznačuje dosiahnutie jemnejšej štruktúry, ktoré vzhľadom na striktné dodržiavanie podmienok tuhnutia možno pripísať očkujúcemu účinku *Ti*. Ďalším zvyšovaním hm. % *Ti* nebol zaznamenaný výraznejší pokles *DAS* indexu, čo je v súlade so štúdiami, ktoré uvádzajú, že zvyšovaním *Ti* nad 0,20 hm. % nedochádza k významnejšiemu zjemneniu štruktúry [10].

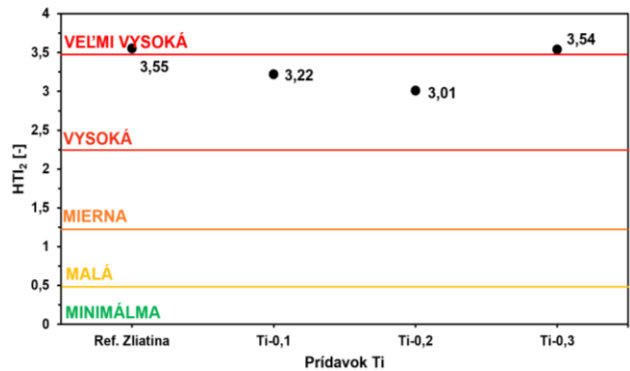
### 2.3 Kvalitatívne hodnotenie náchylnosti $AlSi5Cu2Mg$ zliatiny na vznik trhlín

Hodnoty indexu  $HTI_1$  sú pre referenčnú zliatinu a zliatinu s prídavkom  $Ti$  uvedené na obr. 5. Na základe posúdenia počtu trhlín, charakteru a veľkosti trhlín na príslušných skúšobných ramenách bol výpočtom stanovený index pre referenčnú zliatinu  $HTI_1 = 1,91$ . Z hľadiska hodnotenia miery náchylnosti na vznik trhlín  $HTS$  bola zliatina zaradená medzi zliatiny s miernou náchylnosťou na vznik trhlín. Zliatiny s prídavkom  $Ti$  vykazovali mierny pokles hodnoty indexu  $HTI_1$ , pričom jeho hodnota klesala s narastajúcim hm. %  $Ti$ . Prídaním 0,10 hm. %  $Ti$  hodnota posudzovaného indexu klesla v porovnaní s referenčnou zliatinou o 14 %. Zliatinou  $Ti-0,2$  bola dosiahnutá hodnota indexu  $HTI_1 = 1,48$ . Pokles v porovnaní s referenčnou zliatinou činil 22 %. Najnižšia hodnota bola získaná zliatinou s prídavkom 0,3 hm. %  $Ti$ . Hodnota  $HTI_1$  indexu zliatinu  $Ti-0,3$  klesla z 1,91 na 1,41 (pokles o 26 %). Zliatiny s prídavkom  $Ti$  boli napriek miernemu poklesu  $HTI_1$  klasifikované medzi zliatiny s miernou náchylnosťou na vznik trhlín.



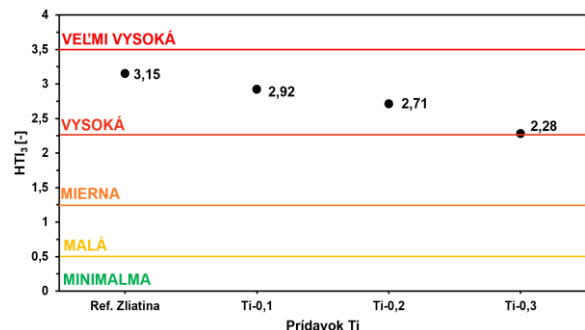
Obr. 5. Náchylnosť zliatiny  $AlSi5Cu2Mg$  s prídavkom  $Ti$  na vznik trhlín za tepla podľa  $HTI_1$ .

Hodnoty indexu  $HTI_2$  pre referenčnú zliatinu a zliatinu s prídavkom  $Ti$  sú zobrazené na obr. 6. Druhý spôsob stanovenia  $HTI_2$  zohľadňoval okrem charakteru a veľkosti trhliny aj polohu trhliny na skúšobnom ramene a dĺžku skúšobného ramena. Z tohto hľadiska boli dosiahnuté hodnoty  $HTI_2$  podstatne vyššie ako hodnoty indexu  $HTI_1$ . Referenčná zliatina dosiahla hodnotu indexu  $HTI_2 = 3,55$  a bola zaradená medzi zliatiny s veľmi vysokou náchylnosťou na vznik trhlín. Zliatinami s prídavkom  $Ti$  bol  $\leq 0,2$  hm. %  $Ti$  zaznamenaný pokles hodnoty indexu  $HTI_2$ . V porovnaní s referenčnou zliatinou vykazovali zliatiny  $Ti-0,1$  a  $Ti-0,2$  pokles indexu  $HTI_2$  o 7 % a 13 %.  $Ti-0,1$  a  $Ti-0,2$  boli klasifikované medzi zliatiny s vysokou náchylnosťou na vznik trhlín za tepla.  $HTI_2$  stanovená pre zliatinu  $Ti-0,3$  nadobudla hodnotu blízku  $HTI_2$  stanovenej pre referenčnú zliatinu. Zliatina  $Ti-0,3$  bola podobne ako zliatina bez prídavku  $Ti$  zaradená medzi zliatiny s veľmi vysokou náchylnosťou na vznik trhlín.



Obr. 6. Náchylnosť zliatiny  $AlSi5Cu2Mg$  s prídavkom  $Ti$  na vznik trhlín za tepla podľa  $HTI_2$

Hodnota indexu  $HTI_3$  bola získaná vzájomnou kombináciou vzťahov pre výpočet  $HTI_1$  a  $HTI_2$  (obr. 7). Zliatina bez prídavku  $Ti$  dosiahla hodnotu  $HTI_3 = 3,15$  a bola klasifikovaná medzi zliatiny s vysokou náchylnosťou na vznik trhlín za tepla. Následne bol pozorovaný pokles hodnoty indexu  $HTI_3$  s narastajúcim hm. %  $Ti$ . V dôsledku prídavku 0,1 hm. %  $Ti$  klesol index  $HTI_3$  z 3,15 na 2,92 (pokles o 7 %). Zliatinou  $Ti-0,2$  bol zaznamenaný pokles  $HTI_3$  v porovnaní s referenčnou zliatinou o 14 %. Najpriaznivejšie výsledky boli v tomto prípade získané zliatinou  $Ti-0,3$ . Hodnota indexu  $HTI_3$  klesla v dôsledku prídavku 0,3 hm. %  $Ti$  z 3,15 na 2,28 takmer o 28 %. Zliatiny s prídavkom  $Ti$  boli podobne ako referenčná zliatina klasifikované medzi zliatiny s vysokou náchylnosťou na vznik trhlín za tepla.



Obr. 7. Náchylnosť zliatiny  $AlSi5Cu2Mg$  s prídavkom  $Ti$  na vznik trhlín za tepla podľa  $HTI_3$ .

### ZÁVER

Termickou analýzou experimentálnych zliatin bolo preukázané, že s prídavkom  $Ti$  dochádza k rozširovaniu intervalu tuhnutia  $AlSi5Cu2Mg$  zliatiny. Rozširovanie intervalu tuhnutia je sprevádzané zvýšením náchylnosti zliatiny na vznik trhlín za tepla. Napriek rozšíreniu intervalu tuhnutia zliatin s prídavkom  $Ti$  bolo na základe zosumarizovaných výsledkov kvantitatívneho hodnotenia preukázané, že zliatiny s prídavkom  $Ti$  vykazovali nižšiu náchylnosť na vznik trhlín za tepla v porovnaní s referenčnou zliatinou  $AlSi5Cu2Mg$ .

V tomto prípade bol rozhodujúcim faktorom pozitívny vplyv zjemňujúceho účinku  $Ti$  na primárnu

fázu  $\alpha$ -(Al). Vplyvom zjemnenia primárnej fázy  $\alpha$ -(Al) bolo zabezpečené lepšie dosadzovanie taveniny do medzidendritických priestorov, čím dochádzalo k zlepšeniu náchylnosti na vznik trhlín za tepla. Pozitívne zníženie náchylnosti na vznik trhlín za tepla zliatiny *AlSi5Cu2Mg* v dôsledku prídavku *Ti* by mohlo viesť k zvýšeniu životnosti odliatkov hláv valcov. Obmedzenie výrobcu, ktoré výrazne limituje obsah *Ti* v *AlSi5Cu2Mg* zliatine však zamedzuje použitie predzliatin *Al-Ti-B* v nami uvedenom rozsahu. Predpokladá sa, že toto obmedzenie vychádza z negatívneho vplyvu *Ti* na tepelnú vodivosť, ktorá taktiež vo významnej miere ovplyvňuje životnosť hláv valcov.

### Pod'akovanie

Článok bol vytvorený v rámci projektu grantovej agentúry KEGA: 003ŽU-4/2024. Autori týmto ďakujú agentúre za podporu.

### LITERATÚRA

- [1] PASTIRČÁK, R. - BOLIBRUCHOVÁ, D. - SLÁDEK, A. (2015): *Teória zlievania*. Žilinská univerzita v Žiline, EDIS - vydavateľské centrum ŽU, 155 pages.
- [2] ZHAO, B. - YE, B. - WANG, L. - BAI, Y. - YU, X. - WANG, Q. - YANG, W. (2022): *Effect of Ageing and Thermal Exposure on Microstructure and Mechanical Properties of a HPDC Al-Si-Cu-Mg alloy*. In: *Materials Science and Engineering: A*, 849, 143463.
- [3] OH, S. - MUNKHDELGER, C. - KIM, H. (2021): *Effect of Cu Content on Hot Tearing Susceptibility in Al-Si-Cu Aluminum Casting Alloy*. In: *Korea Foundry Soc.*, 41, pp. 419-433.
- [4] JANG, J. - KUMAR, L. - YU, H. - SHINK, K. (2022): *Effects of Cr and Ti Addition on Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Al-7Si-3Mg Die-Casting Alloys*. In: *Metals and Materials International*, 29, pp. 204-214.
- [5] PASTIRČÁK, R. - BOLIBRUCHOVÁ, D. (2018): *Zlievarenská metalurgia neželezných kovov*. Žilinská univerzita v Žiline, EDIS - vydavateľské centrum ŽU, 167 pages.
- [6] WU, Q. (2014): *Study of Hot Tearing in cast and Wrought Aluminum Alloys*. Bakalárska práca, Massachusetts: Worcester polytechnic institute, 46 pages.
- [7] SONG, J. - PAN, F. - ATRENS, A. - JIANG, B. - ZHANG, M. - LU, Y. (2016): *A Review on Hot Tearing of Magnesium Alloys*. In: *Journal of Magnesium and Alloys*, 4, pp. 152-172.
- [8] AKHYAR, A. - SUYITNO, V. - ISWANTO, P. T. (2017): *Hot Tearing Susceptibility of Aluminum Alloys Using CRCM-Horizontal Mold*. In: *Results in Physics*, 7.
- [9] LI, Y. - LI, H. - KATGERMAN, L. - DU, Q. - ZHANG, J. - ZHUANG, L. (2021): *Recent Advances in Hot Tearing During Casting of Aluminium Alloys*. In: *Progress in Materials Science*, 35.
- [10] 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.
- [11] SAMUEL, A. M. - MOHAMED, S. S. - DOTY, H. W. - SAMUEL, F. H. (2018): *Effect of Melt Temperature on the Effectiveness of the Grain Refining in Al-Si Castings*. In: *Materials Science and Engineering*, 7626219.