

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

**AUTOREFERÁT
DIZERTAČNEJ PRÁCE**



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

Ing. Lucia Pastierovičová

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

VPLYV PRÍSADOVÝCH PRVKOV Fe a Mn NA ŠTRUKTÚRU A VLASTNOSTI
SEKUNDÁRNYCH AI- ZLIATIN

Na získanie akademického titulu d o k t o r

(„philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“)

v študijnom odbore Strojárstvo

v študijnom programe Technické materiály

Žilina 2024

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia na Žilinskej univerzite v Žiline, Strojníckej fakulte, Katedre materiálového inžinierstva.

Predkladateľ: Ing. Lucia Pastierovičová
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra materiálového inžinierstva

Školiteľ: prof. Ing. Eva Tillová, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra materiálového inžinierstva

Oponenti: 1. prof. Ing. Ernest Gondár, CSc.
2. dr hab. Inž. Miroslav Bonek
3. prof. Ing. Otakar Bokůvka, PhD.

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa 27.08.2024 o 11.00 hod. v miestnosti BB218 na SjF, Univerzitná 8215/1, 010 26, Žilina, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou odborovou komisiou v študijnom odbore Strojárstvo, v študijnom programe Technické materiály, vymenovanou dekanom Strojníckej fakulty, Žilinskej univerzity v Žiline.

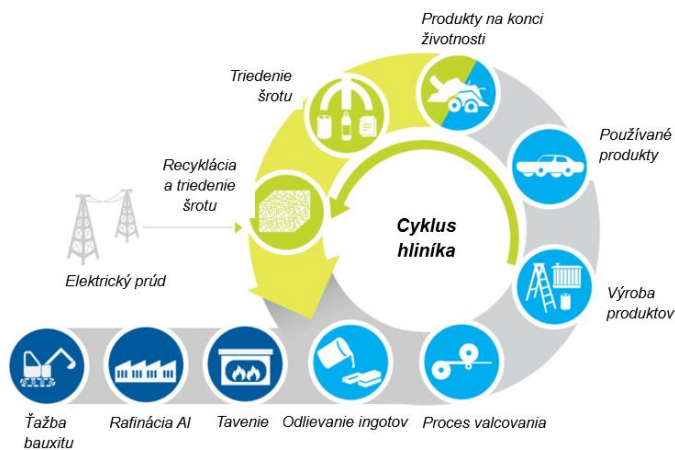
S dizertačnou prácou je možné sa oboznámiť na referáte pre vedu a výskum dekanátu SjF, UNIZA, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

Prof. Ing. Peter Palček, PhD. v. r.

predseda komisie pre obhajobu dizertačnej práce

Úvod

Hliník je riešením mnohých hospodárskych výziev, ktorým Európa čelí v snahe vybudovať udržateľnejšie hospodárstvo. Vzhľadom na zachovanie úžitkových vlastností po viacerých recyklačných cykloch, sa hliník považuje za udržateľný materiál. Sekundárny hliník sa vzťahuje na recyklovaný hliník pochádzajúci z rôznych foriem hliníkového šrotu (obr. 2). Práve pretavením recyklovaného Al- materiálu sa ušetrí takmer 95 % spotreby energie potrebnej na výrobu primárneho hliníka, čím sa zabráni vzniku príslušných emisií vrátane skleníkových plynov. Vzhľadom na zvyšujúcu sa výrobu Al- odliatkov zo sekundárnych zliatin - predovšetkým na báze Al-Si, Al-Si-Mg alebo Al-Si-Cu, je potrebné zabezpečiť prísnu metalurgickú kontrolu kvality, pretože tieto sekundárne Al- zliatiny obsahujú vyššiu prítomnosť nežiaducich prvkov v dôsledku pretavovania kovového šrotu. Tieto nežiadúce prvky vo forme nečistôt vážne znižujú kvalitu sekundárnych Al-zliatin. Významným problémom mnohých nežiaducich prvkov je komplikovaný proces eliminácie ich negatívnych účinkov na kvalitu Al-Si zliatin. Najbežnejšie vyskytujúcim sa prvkom v sekundárnych Al-Si zliatinách je železo, kumulujúce sa z nečistôt v bauxitovej rude a z kontaminácie hliníkového šrotu železnými kovmi. Hoci je železo dobre rozpustné v kvapalnom hliníku a jeho zliatinách, je veľmi málo rozpustné v tuhom stave a preto má tendenciu spájať sa s inými prvkami a vytvárať rôzne typy intermetalických fáz, ktoré môžu negatívne ovplyvniť kvalitu odliatkov z hľadiska štruktúry, mechanických, koróznych a únavových vlastností a tiež podporujú vznik liacich defektov ako sú zmršťovanie a pórovitosť. Odstraňovanie železa z taveniny je veľmi technologicky a ekonomicky náročný proces a preto je dôležité študovať jeho vplyv na štruktúru a vlastnosti Al-odliatkov pri rôznych jeho obsahoch [1-5].



Obr. 3 Schéma výroby sekundárneho hliníka [1]

Stručný prehľad problematiky

Vzhľadom na ekonomické a environmentálne požiadavky je čoraz dôležitejšie znížiť hmotnosť vozidla. Na dosiahnutie tohto cieľa sa vo veľkej miere využívajú zlievarenské zliatiny Al-Si. Tieto zliatiny slúžia na výrobu automobilových komponentov pracujúcich pri okolitej a aj pomerne vysokej teplote (do 200 °C) vďaka vynikajúcim vlastnostiam, ako sú vynikajúca odlievateľnosť, vysoká špecifická pevnosť a recyklovateľnosť = nízke výrobné náklady. Zliatiny Al-Si obsahujú aj prísady s cieľom zlepšiť úžitkové vlastnosti výrobkov. Ako vyplýva z označenia Al-Si ich hlavný prísadový prvok je kremík (silícium). Kremík je hlavným a najdôležitejším legujúcim prvkom zlievarenských Al-Si zliatin, ktorý

výrazne zlepšuje zlievarenské vlastnosti ako sú tekutosť, zabiehavosť, zvyšuje pevnosť tuhého roztoku a zvyšuje odolnosť proti praskaniu pri vyšších teplotách [5,6]. S cieľom zvýšiť mechanické vlastnosti Al-Si zliatin, sa do taveniny zámerne pridávajú ďalšie legúry. Pri dostatočne vysokých teplotách sú v tavenine úplne rozpustené, avšak s klesajúcou teplotou sa ich rozpustnosť znižuje.

Všetky nerozpustené legúry vytvárajú veľké množstvo intermetalických fáz, ktoré majú rôzne chemické zloženie, veľkosť a morfológiu v závislosti od množstva legujúcich prvkov a ich rozpustnosti v tuhom roztoku. Najbežnejšie sa vyskytujúcou nečistotou v sekundárnych Al-Si zliatinách je železo. Železo v tuhej látke má nízku rozpustnosť a tak v zliatine dochádza k vzniku tvrdých a krehkých intermetalických fáz rôzneho tvaru a dĺžky. Tvar a veľkosť Fe-intermetalických fáz sú dané chemickým zložením a tepelnou históriou zliatiny [5-8]. So zvyšujúcim sa obsahom Fe v zliatine narastá aj veľkosť a hustota Fe-fáz. Vysoký obsah Fe má nepriaznivý vplyv na mechanické vlastnosti, zvyšuje pórovitosť a súčasne znižuje pevnosť, tekutosť, ťažnosť, lomovú húževnatosť a aj odolnosť proti korózii. Nežiadúcou fázou na báze Fe je Al_5FeSi , ktorá je charakteristická vysokou tvrdosťou a krehkosťou. Fáza Al_5FeSi svojím tvarom pôsobí ako koncentrátor napätia, štiepi matricu a blokuje prúdenie taveniny v medzidendritických oblastiach počas tuhnutia. Veľkosť týchto fáz je závislá od obsahu železa a podmienok tuhnutia zliatiny. V zliatine sa nachádza v tvare tenkých dosiek, ktoré v rovine metalografického výbrusu pozorujeme v tvare ihlíc. Jej doskovitý tvar vedie k výraznému zníženiu ťažnosti a lomovej húževnatosti zliatiny. Preto sa považuje za najkritickejšiu spomedzi Fe-fáz [6-10]. Fe sa zo zliatiny odstraňuje len veľmi ťažko preto jeho množstvo v zliatine sa môže jedine eliminovať, nie úplne odstrániť. Taktiež sa môže do zliatin dostať počas výrobných procesov, keďže tekutý hliník je schopný železo rozpúšťať a to napr. pri odlievaní do kovovej formy, z pecí, z nechránených nástrojov alebo pridávaním legúr s nízkou čistotou. Podľa Taylora [10] škodlivé pôsobenie železa nastáva až pri prekročení kritickej hodnoty $Fe_{krit.}$ a táto hodnota sa dá vypočítať pomocou vzťahu:

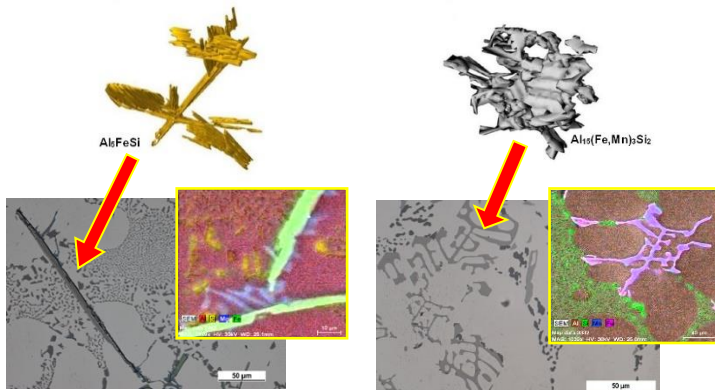
$$Fe_{krit.} \approx 0,075 \times (\% Si) - 0,05 \quad (1)$$

Je potrebné vyhnúť sa obsahu železa nad kritickou úrovňou obsahu kremíka v zliatine, ak má dôjsť ku kryštalizácii Fe-fáz inej morfológie ako doskovitých Al_5FeSi fáz, pomocou vyššieho obsahu Si a tiež by to mohlo spôsobiť vysokú stratu ťažnosti v konečnom odliatku. Na čiastočne odstránenie nežiaducich prvkov v zliatine sa môže použiť aj niektorý z nasledujúcich spôsobov, ktoré taveninu čiastočne „vyčistia“ a sú to napr. [10]:

- odlievanie do pieskových foriem a nie do kokíl (ekonomický spôsob),
- riedenie s „čistou“ zliatinou (neekonomický spôsob),
- použitie filtrov pri odlievaní,
- zmena morfológie Fe-fázy na menej škodlivú pridaním prísadového prvku napr. Mn, Cr, Co, Nb, Be, Ni, V.

Zliatiny na báze Al-Si obsahujú približne 0,3 až 0,6 % Mn a do zliatiny sa dostáva ako nečistota z recyklovaného šrotu alebo sa pridáva do Al zliatin zámerne s cieľom eliminácie nepriaznivého účinku Al_5FeSi a to v množstve o polovicu menšom ako je obsah Fe v zliatine. Vhodné neutralizačné prvky, ako je napr. Mn, ovplyvňujú tvorbu nežiadúcej doskovitej Al_5FeSi fázy, ktorý sa pridáva do Al zliatin zámerne s cieľom eliminácie nepriaznivého účinku Fe. Prísada Mn v správnom pomere k Fe transformuje škodlivé Al_5FeSi fázy na menej škodlivé $AlMnFeSi$ fázy (obr. 2), prítomné v štruktúre v tvare čínskeho písma, resp. kostrovitých útvarov a tým umožňuje aplikáciu sekundárnych zliatin s vyšším obsahom Fe v automobilovom priemysle. Ukázalo sa, že podobný účinok ako Mn má Cr. Prvky Mn a Cr sú bežne prítomné v sekundárnych Al

zliatinách ako nečistoty v dôsledku procesu recyklácie hliníkového šrotu. Fe, Mn a Cr sa môžu navzájom nahradiť v tej istej bcc (kubickej priestorovo centrovanej) kryštálovej mriežke v tvare čínskeho písma, hviezdovitou alebo polyedrickou morfológiou. Žiaľ, prísada Mn sa spája so zvýšenou tvorbou kalových fáz tzv. sludge phases bohatých na Fe, Mn a Cr, ktoré svojou krehkosťou a typickým hviezdovitým tvarom môžu iniciovať pórovitosť, vznik trhlín a tvrdosťou znižujú obrobiteľnosť komponentov.



Obr. 2 Pritomnosť Fe- intermetalických fáz v AlSi7Mg0,3 zliatine [2]

S cieľom preukázať možnosť konkurencie sekundárnych Al-zliatin primárnym zliatinám a v nadväznosti na dizertačnú prácu Ing. Ivany Švecovej, PhD., bola ako experimentálny materiál zvolená sekundárna Al- zliatina AlSi7Mg0,6 (AC 42 200, A357.0). Mechanické vlastnosti primárnej zliatiny AlSi7Mg0,6 sú podľa normy EN 1706: 2010 ovplyvnené samotným liatím taveniny do kovových (kokíl) alebo pieskových foriem a tepelným spracovaním. Dosahujú hodnoty uvedené v tab. 1. Tieto vlastnosti zliatiny umožňujú jej využitie v automobilovom priemysle napr. v podobe hláv valcov a rôznych iných súčastí.

Tab. 1 Mechanické vlastnosti zliatiny AlSi7Mg0,6 podľa EN 1706: 2010

Stav	Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Pevnosť v ťahu R_m [MPa]	Ťažnosť A [%]	Tvrdosť podľa Brinella HBW
VS	80	140	2	50
T6 (S)	210	250	1	85
T6 (K)	240	320	3	100
T64 (K)	210	290	6	90

T6 - Stav po rozpúšťacom žíhaní a umelom starnutí; T64 - Stav po rozpúšťacom žíhaní a umelom starnutí za podmienok nedostatočného starnutia k zlepšeniu tvárnosti; (S) - liate do pieskovej formy; (K) - liate do kovovej formy.

Experimentálna zliatina AlSi7Mg0,6 bola vyrobená spoločnosťou Uneko Zátor s.r.o., Česká republika. Odliatych bolo viacero tavieb - s rôznym obsahom Fe, v kombinácií s Mn, bez (tzv. východiskový stav) a po tepelnom spracovaní T6. Tavby boli odliate metódou gravitačného liatia do pieskových foriem. Teplota odlievania bola 750 °C a teplota rafinácie 740 - 745 °C. Chemické zloženie experimentálnych tavieb bolo zaslané spoločnosťou UNEKO s.r.o a uvedené v dodacom liste - zobrazené v tab. 2.

Tab. 2 Chemické zloženie tavieb experimentálnej zliatiny AlSi7Mg0,6 podľa dodacieho listu UNEKO s.r.o. a podľa EN 1706: 2010

Tavby	Si	Fe	Mn	Mg	Cu	Zn	Ti	Al
1(VS)/2(T6)	6,742	0,128	0,046	0,519	0,012	0,005	0,108	zv.
3(VS)/4(T6)	6,675	0,202	0,058	0,564	0,018	0,021	0,113	zv.
5(VS)/6(T6)	7,097	0,429	0,044	0,466	0,013	0,002	0,119	zv.
7(VS)/8(T6)	6,881	0,429	0,149	0,596	0,011	0,002	0,103	zv.
9(VS) /10(T6)	7,374	0,750	0,0071	0,477	0,017	<0,002	0,121	zv.
11(VS) /12(T6)	7,252	0,728	0,402	0,500	0,014	0,002	0,120	zv.
13(VS) /14(T6)	7,276	1,264	0,0083	0,548	0,012	0,002	0,117	zv.
15(VS) /16(T6)	7,047	1,245	0,661	0,546	0,013	0,004	0,115	zv.
EN 1706: 2010	6,5 - 7,5	max. 0,19	max. 0,1	0,45 -0,7	Max. 0,05	-	-	zv.

Polovica odliatych experimentálnych tyčí bola analyzovaná vo východiskovom stave - po odliatí (F) a na polovicu tyčí bolo aplikované tepelné spracovanie metódou T6 v spoločnosti UNEKO s.r.o. a pozostávalo z rozpúšťacieho žihania na teplote 530 °C ± 5 °C s dobou výdrže 7 hodín, rýchleho ochladenia na teplotu 50 °C a následného umelého starnutia na teplote 160 °C po dobu 6 hodín.

Riešenie dizertačnej práce nadväzovalo na poznatky získané v práci Ing. Ivany Švecovej, PhD. „Vplyv železitých intermetalických fáz na štruktúru a vlastnosti sekundárnych hliníkových zliatin na báze Al-Si-Mg, DDP, 2021“. Predkladaná dizertačná práca bola orientovaná na vplyv prvkov ako Fe a Mn, a tepelného spracovania na kvalitu odliatkov zo sekundárnej Al- zliatiny AlSi7Mg0,6.

Tézy dizertačnej práce

Pre riešenie čiastkových experimentálnych úloh je uvažované s využitím nasledovných experimentálnych metód:

- klasické, v súčasnosti bežne používané metódy hodnotenia mikroštruktúry pomocou optickej a elektrónovej mikroskopie;
- aplikácia metód hlbokého leptania kremíka a intermetalických fáz;
- použitie metodík kvantitatívneho hodnotenia štruktúrnych parametrov (Fe-fázy, častice kremíka, Mg-fázy, SDAS faktor, pórovitosť);
- mechanické skúšky podľa STN EN ISO 6506-1 a ISO 6892-1 – s cieľom stanoviť vplyv Fe, Mn, TS na mechanické vlastnosti odliatkov;
- realizácia tryskania zliatin v spolupráci s firmou PeenService, Boloňa, IT;
- realizácia únavových skúšok podľa ISO 12110-1 experimentálnych materiálov v liatom stave, stave po tepelnom spracovaní T6, po tryskaní a v koróznom prostredí;
- fraktografická analýza lomových plôch po statických a únavových skúškach;
- realizácia a vyhodnotenie korózných skúšok (ponorové skúšky, potenciodynamická skúška, expozičná skúška na vzduchu).

Zvolené metódy spracovania

Pre úspešne splnenie stanovených cieľov bolo potrebné využitie nasledujúcich metódik:

- Príprava vzoriek pre metalografickú analýzu a kvantitatívna analýza štruktúry a transmisná elektrónová mikroskopia s cieľom charakteristiky štruktúry experimentálneho materiálu:*
 - Z dodaných skúšobných tyčí boli odrezané vzorky o veľkosti \varnothing 20 mm a dĺžky 15 mm za pomoci automatickej píly MTH MIKRON. Počas rezania boli vzorky ochladzované kvapalinou. Označené suché vzorky boli spolu so zmesou bakelitu a technického dentacrylu vložené do zalisovávacieho stroja za tepla Struers CitoPress. Po zalisovaní nasledovalo brúsenie a leštenie vzoriek na automatickom prístroji Struers TegraSystem. Pre pozorovanie na optickom mikroskope a na riadkovacom elektrónovom mikroskope boli vzorky štandardne leptané 0,5% HF. Pre potreby pozorovania priestorovej morfológie štruktúrnych zložiek, boli vzorky leptané aj koncentrovanou HCl po dobu 30 sekúnd, tzv. hlboké leptanie. Meranie vybraných štruktúrnych parametrov sa uskutočnilo metódou kvantitatívneho hodnotenia na optickom mikroskope NEOPHOT 32 s kamerou NIKON Coolpix 4500 pomocou vyhodnocovacieho programu (obrazová analýza) NIS Elements 5.2, v ktorom bola zhotovená aj fotodokumentácia. Cieľom kvantitatívneho hodnotenia bolo stanoviť veľkosť SDAS faktora, plošný podiel Fe- fáz, veľkosť Fe- fáz (hrúbka a dĺžka), kruhovitost' Si častíc a plošný podiel pórov.
- Skúška tvrdosti podľa Brinella:*
 - Skúška tvrdosti podľa Brinella bola vykonaná v súlade s normou STN EN ISO 6506-1 na tvrdomeri NEXUS 3000. Skúška tvrdosti spočívala vo vtlačaní indentora (gulôčka z tvrdokovu) s priemerom $D=2,5$ mm, konštantným zaťažením $F=62,5$ N po dobu $t=30$ s. Tvrdosť experimentálneho materiálu bola definovaná ako HBW 2,5/62,5/30 z minimálne 5-tich meraní na každej vzorke.
- Skúška na únavu ohybom za rotácie:*
 - Skúšky na únavu experimentálnych taviieb sa realizovali podľa normy ISO 1143: 2021 na skúšobnom zariadení ROTOFLEX s cieľom určiť odolnosť experimentálneho materiálu proti cyklickému namáhaniu. Z experimentálnych taviieb boli vyrobené trieskovým obrábaním dve sady vzoriek – 1. sada na skúšku ohybom za rotácie v bežnej atmosfére (cca 60% - 70% vlhkosť vzduchu) a 2. sada vzoriek bola určená pre skúšku na únavu ohybom za rotácie v simulovanom koróznom prostredí, v priebehu rotácie bol za pomoci knôtu, neustále nanášaný na namáhanú oblasť roztok 3,5% NaCl).
- Tryskanie:*
 - V spolupráci s talianskou firmou PeenServis so sídlom v Bologni sa uskutočnilo tryskanie na dvoch experimentálnych tavných s najnižším obsahom Fe, bez a po tepelnom spracovaní, s cieľom zvýšiť únavovú odolnosť experimentálnej zliatiny AISi7Mg0,6 prostredníctvom deformácie povrchu.
- Skúška ťahom:*
 - Skúška ťahom bola realizovaná podľa normy STN EN ISO 6892-1 na trhacom skúšobnom stroji ITALSIGMA s.r.l. na Univerzite v Bologni. Princíp skúšky spočíval v statickom zaťažovaní skúšobnej tyče upnutej do čelustí trhacieho stroja tak, aby sa os vzorky zhodovala s osou pôsobiacej sily. Skúšobné vzorky boli vyrobené trieskovým obrábaním z experimentálnych taviieb.

Z grafických výsledkov skúšobného stroja sa získajú hodnoty pre pevnosť v ťahu R_m [MPa], dohovorenú medzu klzu $R_{p0,2}$ [MPa] a ťažnosť A [%].

6. *Ponorové a expozičné skúšky v koróznom prostredí s cieľom identifikovať korózne charakteristiky a posúdiť koróznou odolnosť:*

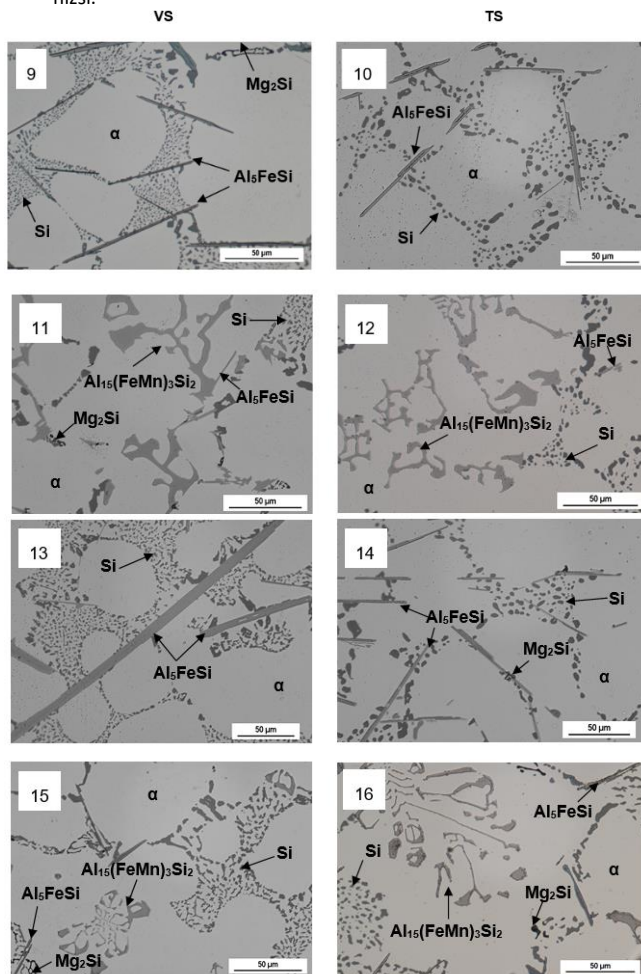
Mechanicky očistené a odvážené vzorky boli uložené do sklenenej nádoby a zaizolované tyčinkami z PU a skla s kruhovým prierezom aby došlo k minimálnemu kontaktu so vzorkami. Následne vzorky boli zaliate roztokom 3,5% NaCl podľa vypočítaného obsahu vzoriek a objemu nádoby. Ponorová skúška sa vykonávala po dobu 3 týždňov pri konštantnej teplote 20 ± 2 °C. Po uplynutí 3 týždňov vzorky boli očistené a bolo možné vyhodnotiť ich hmotnostný úbytok/prírastok, rozmiestnenie a rýchlosť korózneho napadnutia. Rovnaký postup skúšky sa opakoval aj na vzorkách po tryskaní. Korózna odolnosť vzoriek bola určená gravimetricky. Ďalšia ponorová skúška sa vykonávala podľa normy Audi PV 11 13 používanej v automobilovom priemysle. Postup prípravy skúšky a vzoriek bol takmer identický ako pri ponorovej skúške. Do sklenenej nádoby bol naliaty roztok $1 \text{ dm}^3 \text{ H}_2\text{O} + 20 \text{ g NaCl} + 0,1 \text{ dm}^3 20 \% \text{ HCl}$. Vzorky boli v roztoku ponorené po dobu 2 hodín pri teplote prostredia 20 ± 2 °C. Po uplynutí doby skúšky, vzorky boli očistené a opláchnuté etanolom a odvážené. Opäť bolo stanovené rozmiestnenie a rýchlosť korózneho napadnutia. Na poteciodynamické polarizačné skúšky boli použité rovnaké vzorky ako pri predchádzajúcich korózných skúškach s tým rozdielom, že strany vzorky, ktoré boli upínané do koróznej cely boli obrúsené brúsny papierom so zrnitosťou 500. Meranie skúšky prebieha v uzavretej koróznej cele pripojenej na laboratórny potenciostat VSP Biologic SAS v trojelektrodovom zapojení. Do koróznej cely bol naliaty 0,5 M roztok NaCl a meranie prebiehalo pri teplote 20 ± 2 °C. Pri meraní bol aplikovaný potenciál v rozmedzí od -200 mV do 300 mV. Rozsah bol nastavený vzhľadom na potenciál otvoreného obvodu a rýchlosť vykresľovania bola 0,2 mV/s. Namerané krivky sa analyzovali Tafelovou metódou, na základe ktorej bolo možné stanoviť hodnoty korózneho potenciálu E_{corr} a hustotu korózneho prúdu i_{corr} pre experimentálny materiál. Poslednou skúškou bola expozičná skúška, ktorej cieľom bolo určiť koróznou odolnosť experimentálnej zliatiny vplyvom atmosférickej korózie. Na skúšku boli použité vzorky rozmerov $\varnothing 30 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$. Mechanicky očistené, etanolom opláchnuté a odvážené vzorky boli vložené do dreveného podstavca aby nedošlo k ovplyvneniu experimentálneho materiálu a materiálu podstavca a umiestnené na strechu fakulty PEDAS UNIZA po dobu 1 roka. Po ukončení skúšky boli vzorky očistené od hrubej špiny, opláchnuté etanolom a znovu odvážené analytickými váhami s cieľom gravimetricky vyhodnotiť rýchlosť korózie.

Dosiahnuté výsledky

Experimentálna časť práce bola zameraná na analýzu štruktúry, mechanických, únavových a korózných vlastností dodanej experimentálnej zliatiny AlSi7Mg0,6 s vyšším obsahom Fe, bez a s prídavkom Mn, vo východiskovom stave a po tepelnom spracovaní. Vzhľadom k tomu, že predložená dizertačná práca nadväzovala na poznatky získané v práci Ing. Ivany Švecovej, PhD., ktorá hodnotila tavby s obsahom Fe do 0,429 %, bez a s prídavkom Mn, rovnako vo východiskovom stave a v stave po tepelnom spracovaní T6, boli výsledky dizertačnej práce čiastočne porovnávané aj s jej výsledkami, s cieľom zaznamenať celý priebeh zvyšujúceho sa obsahu Fe (od 0,128 % do 1,264 %), prídavku Mn a VS/TS na štruktúru, mechanické, únavové a korózne vlastnosti.

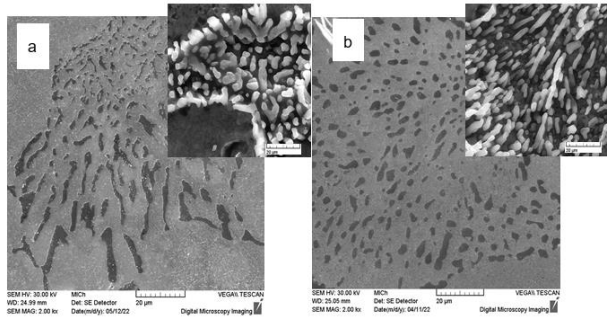
➤ **Vplyv obsahu Fe a Mn na mikroštruktúru:**

- Zliatina zodpovedá podeutektickej Al-Si zliatine (obr. 3) a jej štruktúra je nezávisle od obsahu Fe tvorená α -Al matricou, eutektikom a intermetalickými fázami na báze Fe, Mn a Mg, bez výskytu kalových fáz;
- S rastúcim obsahom Fe sa v štruktúre vyskytovali rozmerovo väčšie doskovité β -fázy Al_5FeSi , ktoré môžu svojím tvarom negatívne ovplyvňovať mechanické, únavové a korózne vlastnosti, podporujúce vznik zlievarenských defektov ako sú póry. Po tepelnom spracovaní ich rozmery boli menšie;
- Prídavok Mn v odporúčanom pomere Fe : Mn = 2 : 1 eliminoval výskyt nežiadúcich Al_5FeSi fáz prostredníctvom zmeny ich morfológie na $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$ fázy, pričom po tepelnom spracovaní ich výskyt bol ešte nižší.



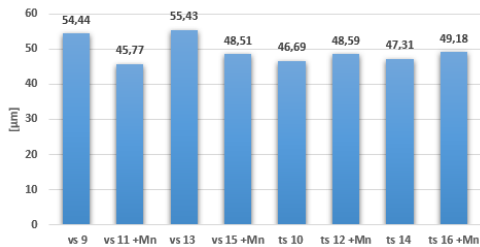
Obr. 3 Mikroštruktúra taviieb experimentálnej $AlSi7Mg0,6$ zliatiny, základné štruktúrne zložky, ozn. číslom podľa taviieb, lept. 0,5% HF

- Po tepelnom spracovaní metódou T6 bola pozorovaná sferoidizácia eutektického kremíka a segmentácia intermetalických fáz (obr. 4);



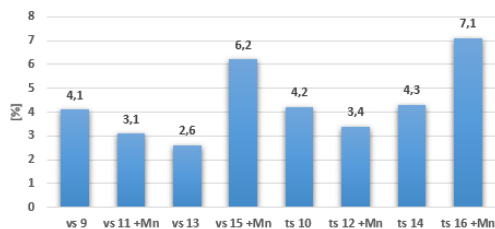
Obr. 4 Morfológia eutektického Si v zliatine AlSi7Mg0,6 s 0,750 % Fe: a) vo VS, b) po TS (T6), lept. 0,5% HF(2D), 36% HCl (3D), REM

- Hodnoty SDAS faktora (obr. 5) sa pohybovali v rozmedzí 52 - 54 μm vo východiskovom stave do hodnoty $Fe_{krit.}$. Po prekročení $Fe_{krit.}$ tavy s prídavkom Mn dosahovali nižšie hodnoty SDAS (54 - 58 μm) vo východiskovom stave. Po tepelnom spracovaní hodnoty SDAS boli takmer totožné bez vplyvu Fe;



Obr. 5 Hodnoty SDAS faktora tavieb experimentálnej AlSi7Mg0,6 zliatiny

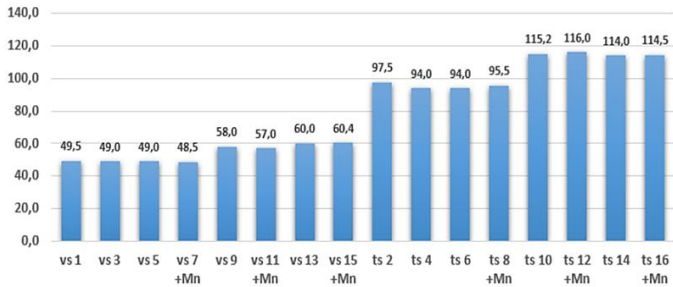
- S rastúcim obsahom Fe sa zvýšil priemerný % podiel pórov (obr. 6) vo východiskovom stave aj po tepelnom spracovaní na 4,5 % až do hodnoty $Fe_{krit.}$. Po prekročení hodnoty $Fe_{krit.}$ (0,429 % Fe) plošný podiel pórov klesá so zvyšujúcim sa obsahom Fe vo východiskovom stave. Tavy po tepelnom spracovaní dosahovali všeobecne vyšší plošný podiel pórov. Prídavok Mn znížil plošný podiel pórov okrem tavieb 15 a 16, ktoré dosiahli najvyššiu pórovitosť aj najvyšší podiel pórov;



Obr. 6 Výsledky pórovitosti tavieb experimentálnej AlSi7Mg0,6 zliatiny

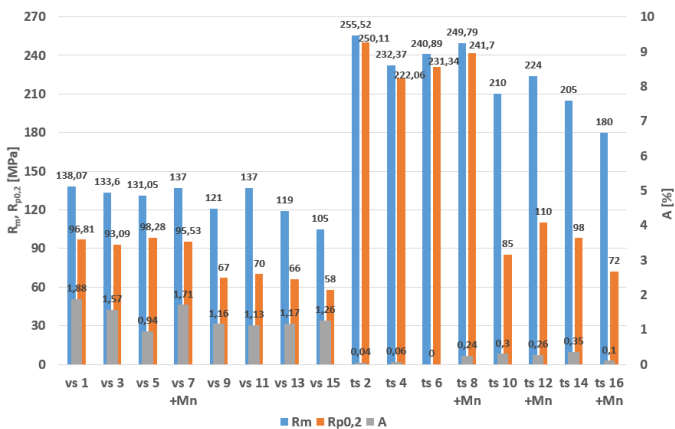
➤ **Vplyv obsahu Fe a Mn na mechanické vlastnosti:**

- Tvrdosť zliatin vo VS 48,5 - 49,5 HBW a po TS 94 - 97,5 HBW sa výrazne nemenila do obsahu 0,429 % Fe ($Fe_{krit.}$) (obr. 7). Po prekročení $Fe_{krit.}$ sa tvrdosť zliatin zvýšila na 58 - 60,4 HBW pre zliatiny vo východiskovom stave a na 114 - 116 HBW pre zliatiny po tepelnom spracovaní. Vzhľadom na pomerne nízky rozptyl hodnôt tvrdostí, prídavok Mn nemal výrazný vplyv na výsledky tvrdostí zliatin. Hodnoty tvrdostí podľa Brinella sú vyššie v porovnaní s normou STN EN 1706 (východiskový stav 50 HBW; tepelné spracovanie (T6) 85 HBW);



Obr. 7 Grafické znázornenie tvrdostí podľa Brinella sekundárnej AISi7Mg0,6 zliatiny

- Pevnostné vlastnosti R_m , $R_{p0,2}$ a ťažnosť A_5 zliatiny s obsahom 0,128 % Fe zodpovedajú primárnej zliatine a sú v súlade s normou EN 1706. So zvyšujúcim sa obsahom Fe tieto hodnoty klesali po hranicu $Fe_{krit.}$. Prídavok Mn zvýšil pevnosť v ťahu a ťažnosť vo východiskovom stave a aj po tepelnom spracovaní. Pri vyšších obsahoch Fe nedochádzalo k výrazným zmenám R_m , $R_{p0,2}$ a A_5 , pričom nebol pozorovaný vplyv Mn;

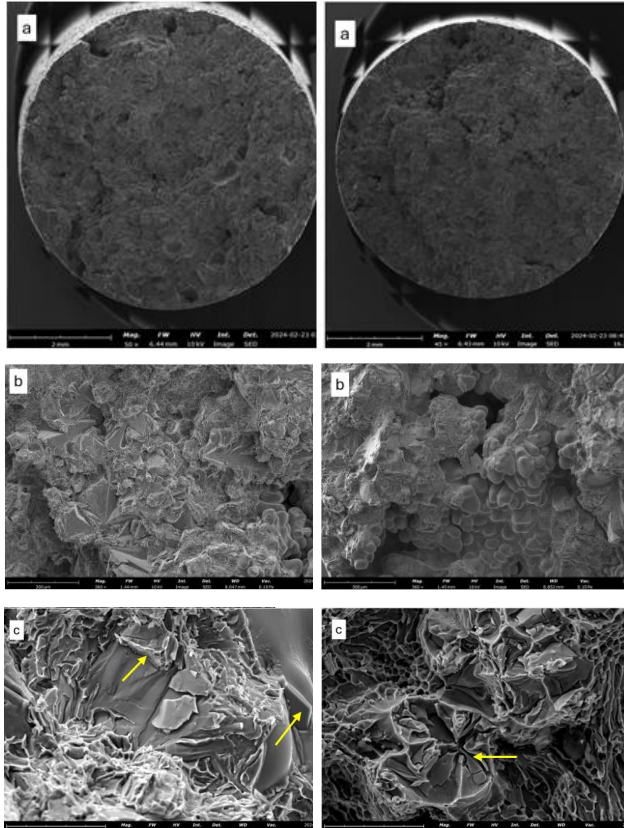


Obr. 8 Mechanické vlastnosti experimentálnej zliatiny AISi7Mg0,6 po skúške ťahom

- Na lomových plochách po skúške ťahom u všetkých taviieb prevládalo transkrystalické tvárne porušenie Al-matrice s jankovou morfológiou. Tvar a veľkosť jamiek je ovplyvnená tvarom a veľkosťou Si častíc. Na lomových plochách bol pozorovaný lokálny výskyt štiepných faziet súvisiacich s prítomnosťou Al_3FeSi alebo $AlMnFeSi$ fáz. Pre lomové povrchy všetkých taviieb bola charakteristická vysoká prítomnosť pórov, ktoré do veľkej miery ovplyvňovali hodnoty mechanických vlastností;

Tavba 15

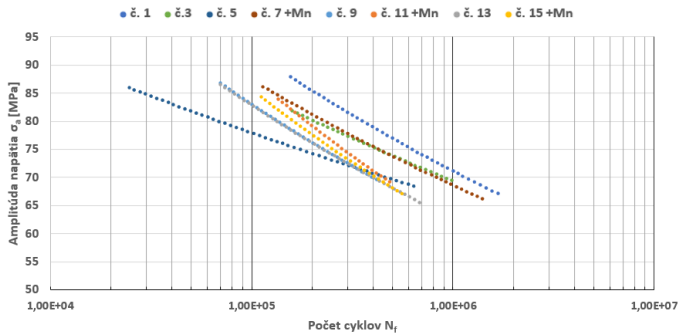
Tavba 16



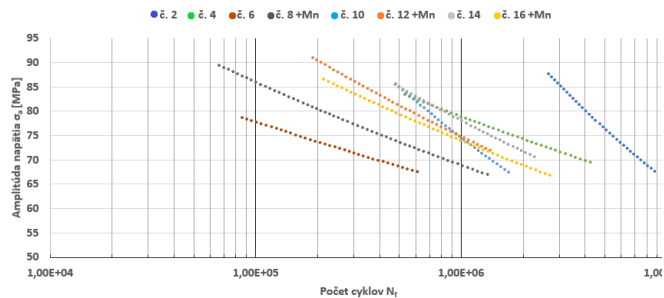
Obr. 9 Lomová plocha experimentálnej zliatiny $AlSi7Mg0,6$ s 1,245 % Fe: a) celkový pohľad, b, c) detail, vyznačené Fe-fázy, REM

- Hodnotenie únavovej životnosti experimentálnej zliatiny prebiehalo v oblasti vysokocyklovej únavy v režime zaťažovania ohybom za rotácie (obr. 10, obr. 11). Nižšiu únavovú životnosť dosiahli tavby vo východiskovom stave v porovnaní s tavnami po tepelnom spracovaní, čo súvisí s precipitačným vytvrdzovaním;
- Najbližší počet cyklov do lomu k primárnej zliatine (0,126 % Fe) dosiahla tavba 3 (0,202 % Fe) čím sa preukázal vplyv Fe. S rastúcim obsahom Fe únavová životnosť zliatin klesala;

- Pozitívny vplyv Mn sa prejavil zvýšením počtu cyklov do lomu. Tavby po prekročení hodnoty $F_{e,krit.}$ s prídavkom Mn dosahovali únavovú životnosť podobnú ako tavby s obsahom do 0,429 % Fe;

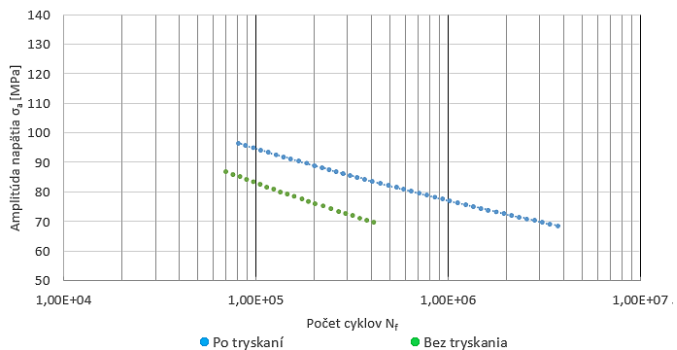


Obr. 10 Wöhlerov diagram pre experimentálnu AlSi7Mg0,6 zliatinu vo východiskovom stave s obsahom Fe od 0,128 do 1,264 %

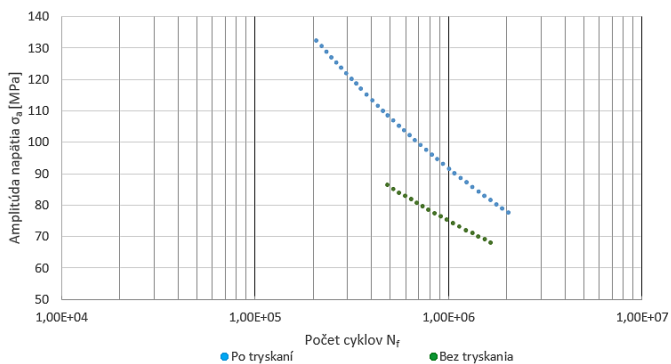


Obr. 11 Wöhlerov diagram pre experimentálnu AlSi7Mg0,6 zliatinu po tepelnom spracovaní s obsahom Fe od 0,128 do 1,264 %

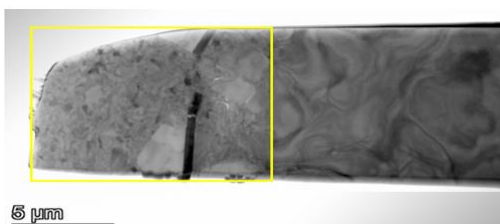
- Totožný priebeh únavovej životnosti nadobudli aj zliatiny pod vplyvom korózneho prostredia. Pričom vplyv zvyšujúceho sa obsahu Fe bol výraznejší. Korózne produkty v liacich póroch rozleptávali matricu, čím zväčšovali svoj objem a stávali sa tak iniciačnými miestami pre vznik a šírenie trhlín;
- So zvyšujúcim sa obsahom Fe sa znižoval počet cyklov do lomu v koróznom prostredí u tavieb vo východiskovom stave aj po tepelnom spracovaní. Prídavok Mn mal rovnako pozitívny vplyv ako u tavieb bez korózneho prostredia;
- Pozitívny vplyv na zvýšenie únavovej životnosti malo tryskanie. Únavová životnosť tavieb vo východiskovom stave (obr. 12) aj po tepelnom spracovaní (obr. 13) s obsahom 0,750 % Fe je vyššia v porovnaní s únavovou životnosťou primárnej zliatiny (0,128 % Fe) z dôvodu zjemnenia zŕn, zvýšenia hustoty dislokácií a zmeny napäťového stavu (obr. 14);
- Fraktografická analýza lomových plôch experimentálnej zliatiny preukázala, že povrchové a podpovrchové liacie defekty - póry a stiahnutiny, predstavujú iniciačné miesta pre vznik a šírenie trhlín (obr. 15);



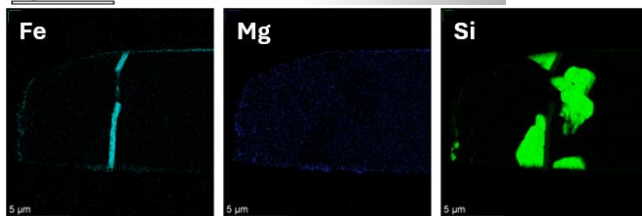
Obr. 12 Porovnanie S-N kriviek pre tavbu č. 9 (0,750 % Fe) vo VS experimentálnej zliatiny AISi7Mg0,6 pred a po tryskaní

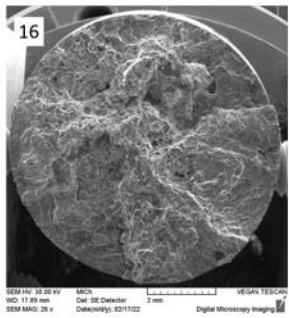
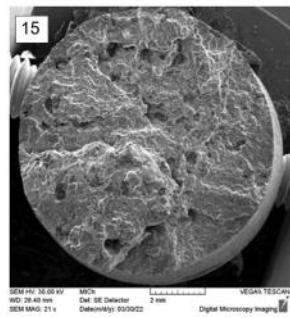
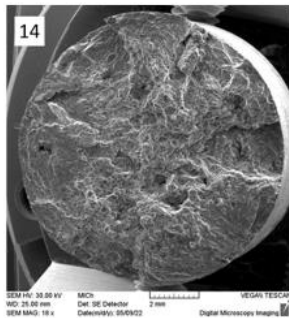
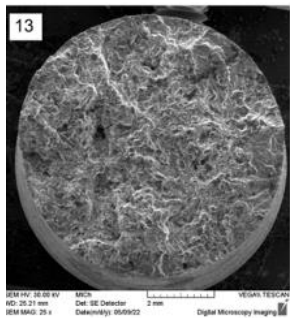
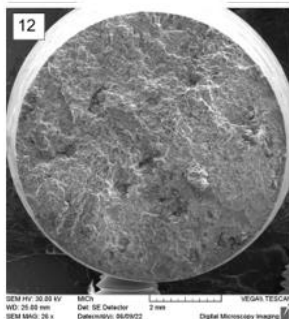
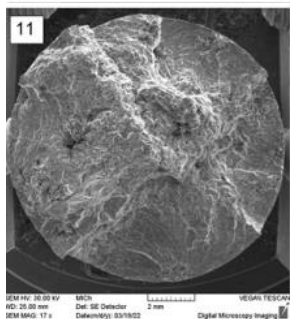
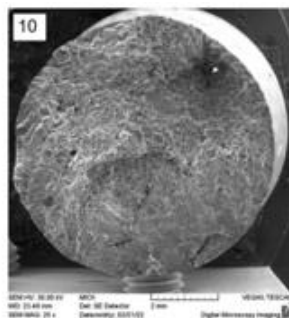
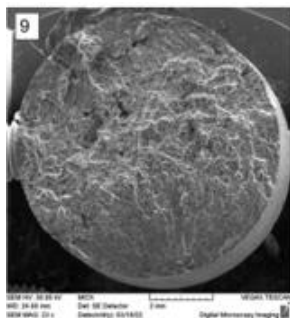


Obr. 13 Porovnanie S-N kriviek pre tavbu č. 10 (0,750 % Fe) po ts experimentálnej zliatiny AISi7Mg0,6 pred a po tryskaní



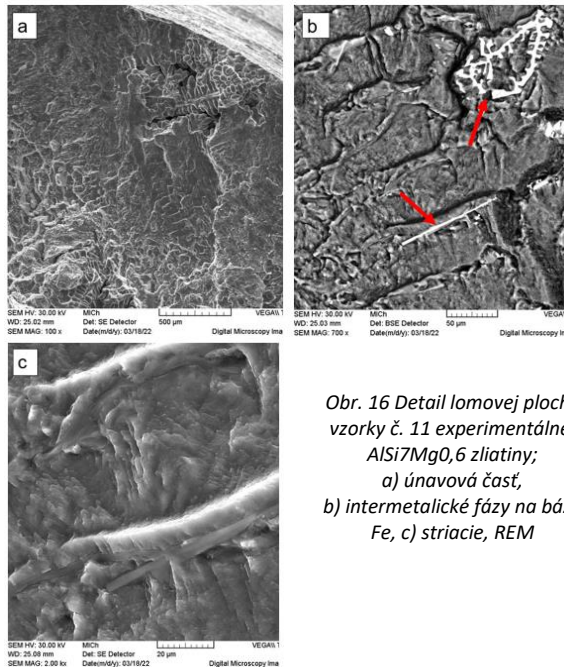
Obr. 14 Detail mikroštruktúry tavby č. 10 po tryskaní, TEM





Obr. 15 Lomové plochy taviieb experimentálnej AlSi7Mg0,6 zliatiny, ozn. podľa čísla tavby, REM

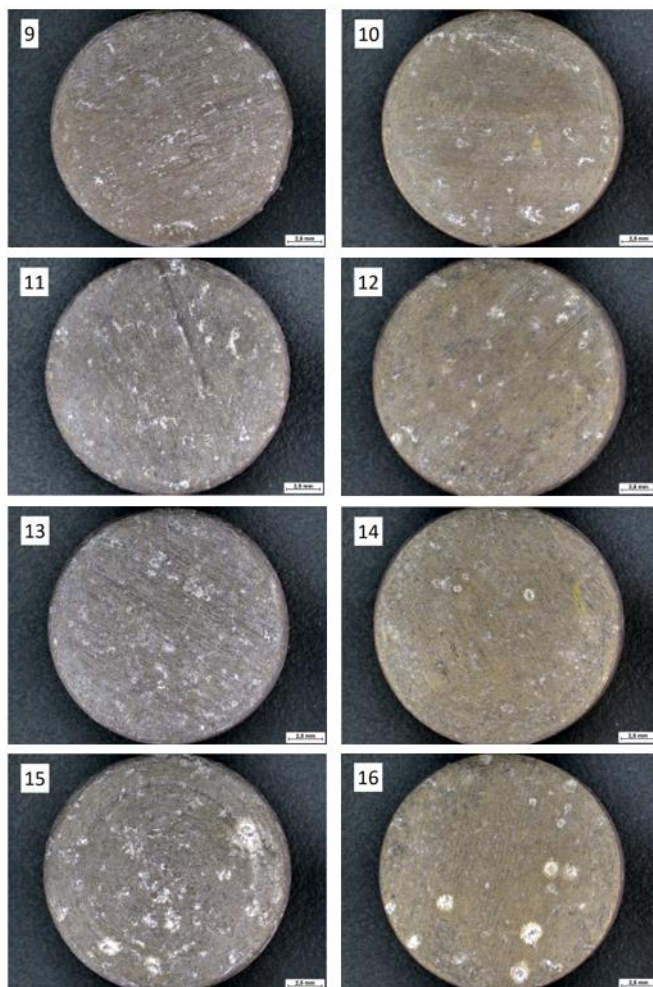
- U taviieb do 0,429 % Fe so zvyšujúcim sa zaťažením sa únavová oblasť v porovnaní s oblasťou dolomenia zmenšovala, pri vyšších amplitúdach napätia boli prítomné viaceré iniciačné miesta. U taviieb s vyšším obsahom Fe sa fraktograficky nepreukázali významné zmeny v mikromechanizmoch porušenia v závislosti od veľkosti amplitúdy napätia. V okolí iniciačných miest (obr. 16) sa nachádzala únavová oblasť, charakteristická transkrýštalickým únavovým porušením Al-matrice, medzifázovým porušením v miestach výskytu intermetalických fáz a výskytom jemných striácií a hladkými oblasťami identifikovanými ako intermetalické fázy bohaté na báze Fe a Mn;
- Charakter oblasti dolomenia závisel od veľkosti a tvaru Si častíc a intermetalických fáz. Vo všetkých tavných sa na dolomení pozoroval transkrýštalický tvrný lom Al matrice s jamkovou morfológiou. Tvar jamiek zodpovedá tvaru Si častíc, preto je rozdielny pre tavné po tepelnom spracovaní (globulárne častice) a vo východiskovom stave (tyčinky);
- U taviieb do 0,429 % Fe lomové plochy po súčasnom koróznom pôsobení obsahovali viacero iniciačných miest v rôznych úrovniach, čo vytváralo skokovité porušenie vzoriek. Charakter únavových oblastí a oblastí dolomenia bol rovnaký.



*Obr. 16 Detail lomovej plochy vzorky č. 11 experimentálnej AlSi7Mg0,6 zliatiny;
a) únavová časť,
b) intermetalické fázy na báze Fe, c) striácie, REM*

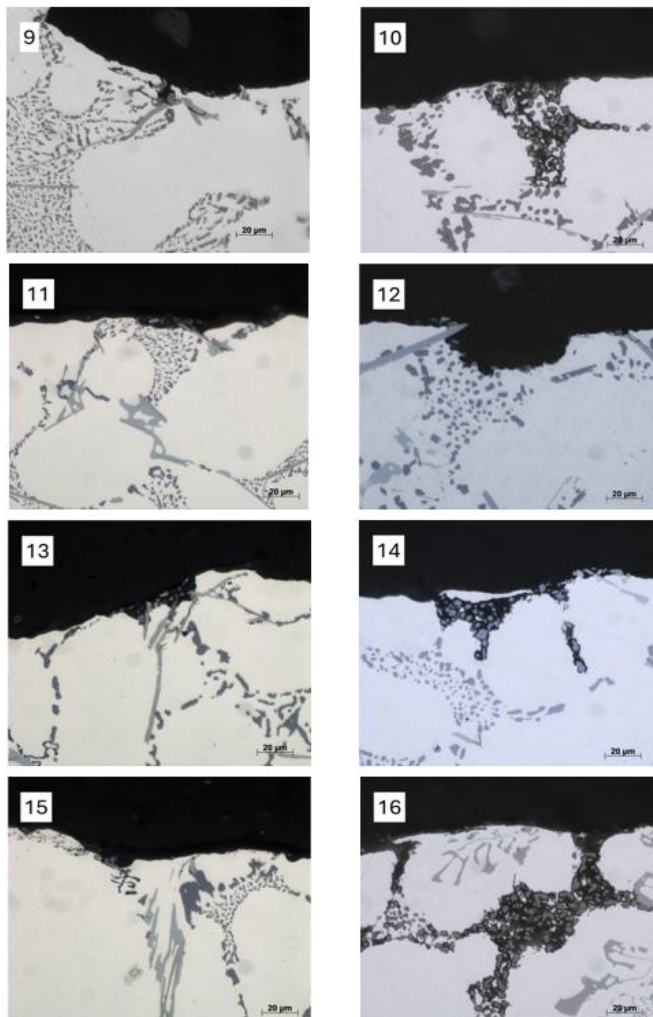
➤ **Vplyv obsahu Fe a Mn na koróznú odolnosť:**

- Z výsledkov ponorovej skúšky v roztoku 3,5% NaCl vyplýva, že s rastúcim obsahom Fe korózná odolnosť zliatin vo východiskovom stave aj po tepelnom spracovaní klesá;
- Tavby s prídavkom Mn dosahovali lepšiu koróznú odolnosť. Najlepšiu koróznú odolnosť dosiahla tavba 8 s 0,429 % Fe a prídavkom Mn. Vyššia korózná odolnosť bola pozorovaná po tepelnom spracovaní, kedy došlo k zmene morfológie Si, čo spomalilo rýchlosť rozpúšťania α -fázy v eutektiku;



Obr. 17 Povrch vzoriek po ponorovej skúške v 3,5 % NaCl roztoku (ozn. podľa č. tavby)

- Po prekročení $Fe_{krit.}$ (0,429 % Fe) tavy dosahovali horšiu koróznú odolnosť po tepelnom spracovaní. U taviieb vo východiskovom stave po prekročení $Fe_{krit.}$ boli prítomné hmotnostné prírastky;
- Podobné výsledky boli pozorované aj pri skúške AUDI test. Korózná odolnosť taviieb sa zhoršovala so zvyšujúcim sa obsahom Fe;
- Prídavok Mn zvýšil koróznú odolnosť najmä u taviieb po tepelnom spracovaní nezávisle od obsahu Fe;
- Korózne napadnutie pri ponorových skúškach sa iniciovalo prednostne na hraniciach zŕn, kde bolo pozorované rozpustenie α -fázy a silná odolnosť Si častíc a intermetalických fáz (obr. 18);



Obr. 18 Mikroštruktúra zliatiny AlSi7Mg0,6 - po koróznych skúškach (ozn. podľa č. tavy)

- Elektrochemické charakteristiky zliatiny boli ovplyvnené obsahom Fe (Tab. 2, Tab. 3). Hodnota korózneho potenciálu E_{corr} sa zvyšovala so zvyšujúcim sa obsahom Fe, čo znamená že zliatiny s najnižším obsahom Fe sú najviac termodynamicky stabilné;
- So zvyšujúcim sa obsahom Fe sa zvyšovala aj kinetika korózných procesov. Po pridaní Mn zliatina dosahovala pozitívnejšie hodnoty E_{corr} a taktiež nižšie hodnoty i_{corr} nezávisle od obsahu Fe;
- Vplyv atmosférickej korózie (na vzduchu) bol vzhľadom na veľmi nízke výsledky skúšky zanedbateľný (Tab. 4).

Tab. 2 Priemerné hodnoty korózneho potenciálu a prúdu získané Tafelovou analýzou

Tavba	1	3	5	7+Mn	9	11+Mn	13	15+Mn
Stav	vs	vs	vs	vs	vs	vs	vs	vs
E_{corr} [mV]	-796,09	-839,81	-844,17	-836,9	-870,06	-866,44	-867,03	-858,98
i_{corr} [μ A]	1,77	2,11	3,84	1,18	1,52	1,71	1,67	2,26

Tab. 3 Priemerné hodnoty korózneho potenciálu a prúdu získané Tafelovou analýzou

Tavba	2	4	6	8+Mn	10	12+Mn	14	16+Mn
Stav	ts	ts	ts	ts	ts	ts	ts	ts
E_{corr} [mV]	-736,35	-759,16	-887,89	-744,44	-883,94	-874,19	-880,08	-891,11
i_{corr} [μ A]	1,26	1,69	2,25	2,013	1,63	1,10	1,79	1,86

Tab. 4 Vyhodnotenie expozičných skúšok z hľadiska zmeny hmotnosti experimentálnej zliatiny

Stav	Tavba 1/2	Tavba 3/4	Tavba 5/6	Tavba 7/8	Tavba 9/10	Tavba 11/12	Tavba 13/14	Tavba 15/16
vs	0,0041	0,0055	0,0041	0,0033	0,00377	0,0012	0,0031	0,00081
ts	-0,0008	-0,0005	-0,0008	-0,0008	0,00096	0,00111	0,00096	0,00145

Výsledky vplyvu rôzneho obsahu Fe na štruktúru, mechanické, únavové a korózne vlastnosti sekundárnych Al-Si zliatin opisujú mnohí domáci aj zahraniční autori. Avšak komplexné výsledky popisujúce vzťah medzi štruktúrou, mechanickými a koróznymi vlastnosťami vplyvom prídavku Mn u primárnej zliatiny s 0,128 % Fe až po sekundárnu zliatinu s 1,264 % Fe doteraz publikované neboli. Preto získané výsledky dizertačnej práce možno považovať za unikátne.

Prínos pre ďalší rozvoj vedy a pre prax

Na základe možnosti niekoľkonásobnej recyklácie hliníka bez väčších strát jeho pôvodných vlastností, sa považuje za obehový materiál nevyhnutný pre klimaticky neutrálne a obehové hospodárstvo. V súčasnosti sa 36 % výroby hliníka zameriava na výrobu pomocou recyklácie. Navyše do roku 2050 môže táto hodnota dosiahnuť 50 % dopytu Európskej únie a zabrániť 39 miliónom ton emisií CO₂ ročne. Podpora sekundárnej výroby môže tiež znížiť závislosť EÚ od iných krajín.

Hlavný postup sekundárnej výroby Al zahŕňa pretavovanie šrotu, vedľajších produktov a výrobkov po skončení životnosti na sekundárne hliníkové zliatiny. Očakávaný nárast množstva Al odpadu vyvolal aj značný záujem o recykláciu. V dôsledku rôznych faktorov, ako je rôzne miešanie zliatin a kontaminácia - najmä Fe, počas procesu

recyklácie, zvyčajne nevykazujú rovnaké chemické zloženie a mechanické vlastnosti ako primárne zliatiny, čo obmedzuje rozsah ich použitia. Podľa normy STN EN 1706: 2010 pre primárnu Al- zliatinu AlSi7Mg0,6 je stanovená maximálna hranica prípustnosti obsahu Fe <0,19 %.

Výsledky prezentované v dizertačnej práci preukazujú podobné mechanické a korózne vlastnosti sekundárnej zliatiny s obsahom od 0,202 % Fe do 1,264 % Fe s prídavkom Mn v odporúčanom pomere (Fe : Mn = 2:1). Po prekročení $F_{e,krit.}$ (0,429 % Fe) sa vlastnosti sekundárnej zliatiny nezávisle od obsahu Fe s prídavkom Mn výrazne nezhoršovali. Výsledky dizertačnej práce taktiež preukázali, že hlavným limitujúcim faktorom sekundárnej experimentálnej zliatiny nie je kontaminácia Fe ale nadmerná pórovitosť. Z toho dôvodu pri aplikácií odliatkov zo sekundárnych Al- zliatin v automobilovom priemysle je nutné zabezpečiť vysokú kvalitu odlievania a tým minimalizovať vznik zlievarenských defektov (pórovitosť a stiahnutiny).

Summary

The most common undesirable impurity in secondary Al-alloys is iron, which forms hard and brittle intermetallic phases in the alloys. Since the removal of iron from the melt is a difficult and costly process, it is necessary to investigate its effect on the structure, mechanical, physical, and fatigue properties of the castings.

The results presented in this thesis demonstrate similar mechanical and corrosion properties of secondary alloys with Fe contents ranging from 0.202% Fe to 1.264% Fe with the addition of Mn in the recommended ratio (Fe : Mn = 2:1). Once the $F_{e,krit.}$ is crossed. (0.429 % Fe), the properties of the secondary alloy did not deteriorate significantly, independent of the Fe content, with the addition of Mn. The results of the thesis also showed that the main limiting factor of the secondary experimental alloy is not Fe contamination but excessive porosity. Therefore, when applying castings from secondary Al alloys in the automotive industry, it is necessary to ensure high casting quality and thus minimize the occurrence of casting defects (porosity and shrinkage).

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] Vision 2050: European Aluminium's Contribution to the EU's Mid-Century Low-Carbon Roadmap. Available on-line on <http://www.european-aluminium.eu/>
- [2] L. Kuchariková, et al. Recycling and properties of recycled aluminium alloys used in the transportation industry, *Transport Problems*, 11, 2016: 117-122. <https://doi.org/10.20858/tp.2016.11.2.11>
- [3] Senčáková L., Virčíková E. 2007. LIFE CYCLE ASSESSMENT OF PRIMARY ALUMINIUM PRODUCTION, *Acta Metallurgica Slovaca*, 13, (412 - 419).
- [4] ROUČKA, J., 2004. *Metallurgie neželezných slitin*. Brno: Cerm. ISBN 8021427906
- [5] MICHNA, Š. a kol. 2005. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, s.r.o., 700 str. ISBN 8089041884
- [6] BOLIBRUCHOVÁ, D.; TILLOVÁ, E. 2005. *Zlievarenské zliatiny Al-Si*. Žilina: EDIS, 169 str. ISBN 80-8070-485-6.
- [7] ZAMANI, M., 2015. *Al-Si Cast Alloys: Microstructure and mechanical properties at ambient and elevated temperature*. Jönköping: Ineko AB. ISBN 978-91-87289-08-8.
- [8] VOJTECH, D., 2006. *Kovové materiály*. Praha: VŠCHT. ISBN 80-7080-600-1
- [9] SKOČOVSKÝ, P., a i., 2014. *Náuka o materiáli*. Žilina: EDIS. ISBN 978-80-554-0871-2.
- [10] TAYLOR, J. A. et al., 2008. The effect of Si and Cu content on Fe-containing intermetallic particles in Al-Si-Cu0.8Fe alloys. 11th International Conference of Aluminium Alloys (ICAA11), Aachen, Germany, str.105-114.

Zoznam publikovaných prác

ADC - Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch (7)

1067596: **Study of Si morphology in AlSi21CuNiMg cast alloy using colour and deep etching** / Tillová, Eva; Chalupová, Mária; Kuchariková, Lenka; Bonek, Mirosław; Uhrčík, Milan; Pastierovičová, Lucia. In: Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences. ISSN 0239-7528. – ISSN (online) 2300-1917. – Roč. 71, č. 2 (2023), s. 1-8.

1070922: **The influence of a corrosive environment on fatigue and mechanical properties of an Al-cast alloy with higher Fe content** / Kuchariková, Lenka; Pastierovičová, Lucia; Tillová, Eva; Uhrčík, Milan; Zatkalíková, Viera; Šajgalík, Michal. In: Metals. 2023, s. [1-20]. DOI 10.3390/met13061019

1123830: **The effect of sensitization on the susceptibility of AISI 316L biomaterial to pitting corrosion** / Zatkalíková, Viera; Uhrčík, Milan; Markovičová, Lenka; Pastierovičová, Lucia; Kuchariková, Lenka. In: Materials. ISSN (online) 1996-1944. – Roč. 16, č. 16, 2023, s. 1-11. DOI 10.3390/ma16165714

487593: **Quality of automotive sand casting with different wall thickness from progressive secondary alloy** / Pastierovičová, Lucia; Kuchariková, Lenka; Tillová, Eva; Chalupová, Mária; Pastirčák, Richard. In: Production Engineering Archives ISSN (online) 2353-7779. – Roč. 28, č. 2 DOI 10.30657/pea.2022.28.20 (2022), s. 172-177.

1060125: **Influence of structural parameters- the shape of graphite and matrix on change of ultrasonic wave propagation rate and value of attenuation in graphitic cast irons** / Belan, Juraj; Tillová, Eva; Uhrčík, Milan; Pastierovičová, Lucia. In: Production Engineering Archives. ISSN (online) 2353-7779. – Roč. 29, č. 1 (2023), s. 23-27. DOI 10.30657/pea.2023.29

1143430: **Structural and fractographic analysis of aluminum alloy before and after fatigue loading** / Uhrčík, Milan; Palček, Peter; Chalupová, Mária; Kuchariková, Lenka; Pastierovičová, Medvecká, Denisa; Markovičová, Lenka. In: Manufacturing Technology. ISSN (online) 2787-9402. – Roč. 23, č. 5 (2023), s. 725-731. DOI 10.21062/mft.2023.067

1075344: **Iron impact on the quality of sand casting made from secondary AlSi7Mg0.6 alloy used in the automotive and aerospace industry** / Pastierovičová, Lucia; Kuchariková, Lenka; Tillová, Eva; Chalupová, Mária. In: Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin. ISSN (online) 2392-0378. – Roč. 72, č. 144 (2023), s. 86-91. DOI 10.17402/537.

ADE - Vedecké práce v zahraničných nekarentovaných časopisoch indexovaných vo WoS a SCOPUS (5)

1165008: **Investigation of self-hardening AlZn10Si8Mg cast alloy for the automotive industry** / Kuchariková, Lenka; Pastierovičová, Lucia; Tillová, Eva; Chalupová, Mária; Závodská, Denisa. In: Archives of Metallurgy and Materials. ISSN (online) 2300-1909. – Roč. 68, č. 2 (2023), s. 517-524. DOI 10.24425/amm.2023.142430

523494: **The effect of manganese on Fe-rich intermetallic phases in progressive secondary AlSi7Mg0.6 alloy** / Pastierovičová, Lucia; Kuchariková, Lenka; Tillová, Eva; Chalupová, Mária; Bonek, Mirosław. In: Applied Engineering Letters ISSN (online) 2466-4847. – Roč. 7, č. 3 (2022), s. 100-107. DOI 10.18485/aeletters.2022.7.3.2.

1104305:**The fractographic analysis of tensile and fatigue fracture surfaces in secondary A356 aluminum alloy with a higher concentration of iron** / Kuchariková, Lenka; Tillová, Eva; Chalupová, Mária; Uhrčík, Milan; Pastierovičová, Lucia Belan, Juraj.– SCO In: Fractographic Analysis, s.15-20. DOI10.4028/p-99whstk.

1060127:**Formation of alpha-case layer during oxidation of Ti6Al4V surface by annealing at 1050 °C and change of microstructure after different cooling rates** / Belan, Juraj; Uhrčík, Milan; Kuchariková, Lenka; Tillová, Eva; Pastierovičová, Lucia. In: Advanced structural materials. ISBN (elektronické) 978-3-0364-1272-6, s.161-166. DOI10.4028/p-r71e1w

1060128:**Fracture mechanisms of austenitic steel caused by dynamic tests** / Uhrčík, Milan; Palček, Peter; Chalupová, Mária; Kuchariková, Lenka; Zatkalíková, Viera Pastierovičová, Lucia. In: Fractographic Analysis. ISBN (elektronické) 978-3-0364-1266-5, s.21-26. DOI10.4028/p-9jb036

AED - Vedecké práce v zahraničných recenzovaných zborníkoch (7)

AlSi7Mg0.6 alloy / Pastierovičová, Lucia; Kuchariková, Lenka; Tillová, Eva; Chalupová, Mária; Bonek, Mirosław. In: Advanced manufacturing and repair technologies in vehicle industry, 37: colloquium proceedings, 1.vyd. Žilina (Slovensko) : Žilinská univerzita v Žiline, 2022.– ISBN 978-80-554-1875-9, s.104-107.

498857:**Effect of different chloride environments on corrosion behavior of secondary AlSi7Mg0.6 cast alloy with higher Fe content** / Pastierovičová, Lucia; Kuchariková, Lenka; Tillová, Eva; Chalupová. In: 37th Danubia Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, 2022.– (Materials Today-Proceedings, ISSN 2214-7853 ; Vol.62), s.2450.

1132383:**The effect of loading mode on fatigue crack initiation of IN718 superalloy** / Belan, Juraj; Uhrčík, Milan; Vaško, Alan; Pastierovičová, Lucia. In: 6th International Conference on Structural Integrity and Durability (Volume 51 ISSN 2452-3216, s.109-114 [online].

1068740:**The relationship between wall thickness and secondary dendrite arm spacing in AlSi6Cu4 casts** / Kuchariková, Lenka; Pastierovičová, Lucia; Tillová, Eva; Mazur, Magdalena; Roszak, Marek. In: Advanced manufacturing and repair technologies in vehicle industry, 1.vyd. Žilina (Slovensko) : Žilinská univerzita v Žiline, 2022.– ISBN 978-80-554-1875-9, s.70-74.

1067335:**Application of foundry secondary aluminium alloys in the automotive industry** / Pastierovičová, Lucia; Tillová, Eva; Kuchariková; Uhrčík, Milan; Belan, Juraj. In: Advanced manufacturing and repair technologies in vehicle industry, 1.vyd.– Budapešť (Maďarsko): Gépipari Tudományos Egység, 2023, s. 135-138.

803171:**Recykliacia Al a jeho zliatin** / Petrisková, Ivana; Kuchariková, Lenka; Tillová, Eva; Pastierovičová, Lucia; Mazur, Magdalena. In: TalentDetector2022_Summer, 1. vyd.– Gliwice (Poľsko): Politechnika Slaska. Katedra materiałów inżynierskich i biomedycznych, 2022. ISBN 978-83-65138-33-0, s.368-373.

504765:**Výroba primárneho hliníka a jeho zliatin** / Petrisková, Ivana; Kuchariková, Lenka; Tillová, Eva; Pastierovičová, Lucia; Mazur, M. In: TalentDetector2022_Winter, 1. vyd.– Gliwice (Poľsko): Politechnika Slaska. Katedra materiałów inżynierskich i biomedycznych, 2022. ISBN 978-83-65138-30-9, s.558-566