



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
MATERIÁLOVOTECHNOLOGICKÁ FAKULTA SO SÍDLOM V TRNAVE

Ing. Michaela Lopatková

Autoreferát dizertačnej práce

Zváranie progresívnych ľahkých zliatin laserovým lúčom

Na získanie akademického titulu: doktor(philosophiae doctor, v skratke PhD.)

V doktorandskom študijnom programe: Strojárske technológie a materiály

V študijnom odbore: 5.2.7 Strojárske technológie a materiály

Forma štúdia: denná

Miesto a dátum: Trnava, dňa 30.5.2022



Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Ústave výrobných technológií, Materiálovotechnologickej fakulty so sídlom v Trnave,
Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ:

Ing. Michaela Lopatková

Ústav výrobných technológií
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Jána Bottu 2781/25
91724 Trnava

Školiteľ:

prof. Ing. Milan Marônek, CSc.

Ústav výrobných technológií
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Jána Bottu 2781/25
91724 Trnava

Oponenti:

prof. Ing. Ján Viňáš, PhD., IWE

Strojnícka fakulta
Technická univerzita v Košiciach

doc. Dr. Ing. Pavel Kovačócy

Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave
Slovenská technická univerzita v Bratislave

Autoreferát bol rozoslaný:.....

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa 24.8.2022 o 10:30 h.

na Materiálovotechnologickej fakulte so sídlom v Trnave, Slovenskej technickej univerzity v Bratislave

.....
prof. Ing. Miloš Čambál, CSc.
dekan Materiálovotechnologickej fakulty STU

OBSAH

ÚVOD	4
1 Súčasný stav danej problematiky	6
1.1 Vplyv tepelného spracovania na mechanické vlastnosti zvarových spojov	8
1.2 Vplyv úpravy povrchu materiálu na geometriu a pórovitosť zvarových spojov	9
1.3 Vplyv zvarovania so zvaracím materiálom na pórovitosť	11
2 Ciele dizertačnej práce	12
3 Experiment	13
3.1 Technológia zvarovania	13
3.2 Skúmaný materiál	13
3.2.1 Vplyv tepelného spracovania na vlastnosti zvarových spojov zliatiny AW 2099	14
3.2.2 Vyhodnotenie experimentu	20
3.3 Vplyv povrchovej úpravy zvarovaných materiálov na geometriu a pórovitosť prietavov	23
3.3.1 Frézovanie základného materiálu z jednej strany	23
3.3.2 Frézovanie základného materiálu z oboch strán	29
3.3.3 Chemické čistenie základného materiálu	31
3.3.4 Zváranie nevalcovaného základného materiálu	33
3.4 Vplyv zvarovania so zvaracím materiálom na pórovitosť zvarov	34
3.5 Vyhodnotenie experimentov	37
4 Výsledky a prínosy dizertačnej práce	41
ZÁVER	42
ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV	44
ZOZNAMPUBLIKAČNEJ ČINNOSTI	46

ÚVOD

Súčasnosc' nám dáva možnosť sledovať progresiu technológií, ktorých vývoj súvisí s markantne sa meniacim trhom. Dominantné postavenie v ňom zastávajú aj odvetvia ako automobilový, letecký či kozmický priemysel, a ktoré zaraďujeme medzi aktuálne jedny z najdynamickejších prostredí vôbec. Automatizácia, vývoj nových metód, zvyšovanie efektívnosti a eliminácie prestojov sú len špičkou optimalizácií procesov, na ktoré sú kladené čoraz väčšie nároky. Práve požiadavky trhu indikujú nové míľniky a vytláčajú neefektívne metódy aj v oblasti zvarovania a spájania materiálov. Vývoj nových metód, a takisto materiálov znižujú výslednú hmotnosť vyrábaných komponentov, ktoré následne znižujú hmotnosť hotových výrobkov, a tým dochádza k redukcii prevádzkových nákladov.

Ľahké kovy a kompozitné materiály, špecifické nižšou hmotnosť v porovnaní s rôznymi druhmi ocele, ale zároveň podobnou koróznou odolnosťou a pevnostnými charakteristikami, ich stavajú do značného popredia. Zliatiny hliníka, ako súčasť ľahkých kovov, čelia tvrdej konkurencii zo strany kompozitných materiálov a zliatin titánu. Čo predstavovalo základ pre vývoj výkonnejších a lacnejších hliníkových zliatin, ktoré by boli schopné konkurovať v rovnakom kvalitatívnom a ekonomickom tempe ako ich náprotivky. Možno dedukovať, že až 80 % hmotnosti moderných lietadiel tvoria zliatiny hliníka neustále vyvíjané za ostatné storočie. Jednou z mnohých výziev bola aj aplikácia Al-Li zliatin v leteckom sektore (Williams and Starke, 2003; Warner, 2006; Dursun and Soutis, 2014; Metinvest, 2020).

Lítium, ktoré mení konvenčné hliníkové zliatiny na zliatiny s nižšou hustotou, charakterizuje prísadu vhodnú aj pre letecké aplikácie, čím dochádza k rozšíreniu použitia hliníkových zliatin (Rioja and Liu, 2012). Prvý vývoj sa datuje do polovice 20. storočia a na začiatku 21. storočia došlo k vývoju najpokročilejšej Al-Li generácie spoločnosťou Alcoa a Alcan (Rioja and Liu, 2012; Starke, 2014; Goebel, Ghidini and Graham, 2016). Ich použitie smerovalo do oblastí vysokovýkonných aplikácií ako letecký či kozmický priemysel, kde je potrebné spĺňať parametre ako nízka hustota, vynikajúca odolnosť voči poškodeniu, dobrá zvariteľnosť, ale aj vynikajúca korózná odolnosť. Tieto vlastnosti sú charakteristické pre zliatinu AW 2099 s vysokým obsahom lítia, až 1,8 hm. %, ktoré znateľne zlepšuje vlastnosti danej zliatiny (Gable *et al.*, 2001; Kertz, Gouma and Buchheit, 2001; Fragomeni, Wheeler and Jata, 2005; Giummarra, Thomas, 2007).

Prísne podmienky a vysoké nároky v oblasti kozmu a letectva vedie spoločnosti k neustálej optimalizácii interných procesov vo výrobe a vývoji na zaručenie kvality s nulovou chybovosťou výrobkov. Z toho dôvodu sa zameriavajú na progresívnejšie spôsoby zvarovania a spájania materiálov, a to laserový lúč a trecie premiešavacie zvarovanie, ktoré sú považované za výhodnejšie z hľadiska ich vlastností. Teoretická časť práce sa primárne zameriava na popis úkonov nevyhnutných na základe špecifických vlastností ľahkým zliatin. Prienikom tejto časti práce sú takisto teoretické poznatky o zvariteľnosti ľahkých zliatin, ktoré môžu slúžiť ako súčasť možných aplikácií, resp. časť ďalšej vedeckej štúdie. Spomenuté sú takisto chyby zvarových spojov, na ktoré sú zliatiny ľahkých kovov náchylné a postupy, ktoré slúžia na ich elimináciu.

Pôvod pórovitosti zvarov ako jedna z najčastejších chýb zvarových spojov pri zvarovaní ľahkých zliatin, doteraz nie je známy. Literárne zdroje uvádzajú dva možné dôvody tvorby. Jedným z vysvetlení je prítomnosť vodíka vo zvarovom kove, kedy sa vodík dostáva do zvarového kúpeľa nesprávnym odstránením povrchovej vrstvy oxidov. Póry sa potom tvoria v dôsledku nízkej rozpustnosti vodíka v hliníku počas tuhnutia zvarového kovu. Druhým

dôvodom pórovitosti zvaru môže byť nestabilita paroplynového kanála počas zvarovania, kedy dochádza k jeho kolapsu (Xie, 2002; Kutsuna *et al.*, 2006; Pinto *et al.*, 2010; Löveborn, Larsson and Persson, 2017). Z toho dôvodu sa ďalšia časť práce zameriava na stanovenie vplyvu úpravy povrchu na pórovitosť zvarových spojov. V experimentoch budú povrchy zváraných materiálov upravené rôznymi spôsobmi a na základe výsledkov z CT analýzy bude stanovený postup úpravy zváraných materiálov, pri ktorom bude detegovaná pórovitosť najnižšia. Podobným spôsobom bude v experimente sledovaný vplyv laserového zvarovania so zváraným materiálom na výslednú pórovitosť, v porovnaní so vzorkami, ktorých povrch bol pred zvarovaním upravovaný mechanicky, chemicky alebo nebol nijakým spôsobom upravený.

Al-Li zliatina AW 2099, použitá v experimente, je charakteristická zmenou mechanických vlastností vplyvom zvarovania, najmä k zmäknutiu. Tvrdosť, resp. pevnosť týchto zliatin je však možné zvýšiť umelým starnutím, ktoré zvýši modul pružnosti, zabezpečí nižšiu hustotu, vyššiu špecifickú tvrdosť a priaznivejšie vlastnosti voči poškodeniu (Gable and Starke, 2002).

Z tohto dôvodu bude jeden z experimentov práce zameraný na stanovenie vplyvu režimu tepelného spracovania na výsledné vlastnosti zvarových spojov ako aj na stanovenie režimu tepelného spracovania po procese zvarovania, pri ktorom budú mechanické vlastnosti zvarového spoja čo najviac podobné vlastnostiam materiálu v dodanom stave.

1 Súčasný stav danej problematiky

Hliník disponuje veľkým koeficientom teplotnej rozťažnosti, vysokou tepelnou a elektrickou vodivosťou, avšak mechanické vlastnosti čistého hliníka nie sú veľmi vysoké. Medza pevnosti čistého hliníka sa v závislosti od stupňa deformácie pohybuje v rozmedzí od 70 – 130 MPa, avšak je možné ju zvýšiť viacerými spôsobmi. Medzi spôsoby zvyšovania pevnosti hliníka patrí legovanie, tvárnenie za studena alebo tepelné spracovanie. Na základe spôsobu, akým je možné zvýšiť pevnosť hliníkových zliatin sa tieto zliatiny rozdeľujú na tepelne spracovateľné a tepelne nespracovateľné (Hrivňák, 2009; Zahradníček, 2016; IGAWA, 2017; Lincoln and Company, 2014).

V prípade zvárania tepelne spracovateľných hliníkových zliatin, tvrdosť zvarového spoja vykazuje komplikovanú distribúciu vzhľadom na mikroštruktúru ovplyvnenú teplom, na ktorú boli jednotlivé oblasti vyhriate. Zóna tuhého roztoku môže byť vytvorená v oblasti, kde dochádza k ohrevu na teploty 450 – 550 °C alebo vyššie. V tejto oblasti sa precipitáty rozpúšťajú v matrici, čo spôsobuje zhrubnutie zrna. K zmäknutiu zliatiny môže dôjsť v oblasti vyhriatej na teploty vyššie ako sú teploty starnutia (150 °C – 250 °C), z dôvodu nadmernej precipitácie a neúplnému vyžíhaniu (IGAWA, 2017).

Hliník má veľkú afinitu ku kyslíku, a preto sa na povrchu hliníka rýchlo vytvára tenká vrstva oxidu hlinitého. Hliník a vytvorený oxid na jeho povrchu majú zhodný molekulárny objem, a preto vrstva oxidov pevne prilnieva na povrch hliníka, pasivuje ho, a tým zabezpečuje jeho koróznou odolnosť voči slanej vode, oxidačným a neutrálnym roztokom solí a kyseline dusičnej. Avšak jeho koróznou odolnosť nie je dostatočná voči hydroxidu sodnému, draselnému a čpavku. Nevýhodou vytvoreného oxidu je jeho vysoká teplotná stabilita. Keďže vytvorený oxid má teplotu tavenia okolo 2040 °C, nedochádza k jeho roztaveniu ani vo zvarovom kúpeli (Hrivňák, 2009; Zahradníček, 2016).

Tento oxid na povrchu hliníkových zliatin môže absorbovať vlhkosť, ktorá je zdrojom vodíka a ten spôsobuje pórovitosť zvarov hliníkových zliatin. Zdrojom vodíka môžu byť aj mastnoty, nátery a nečistoty v mieste zvaru. Vodík je rozpustný v roztavenom zvarovom kove a so znižujúcou sa teplotou počas tuhnutia zvarového kovu rozpustnosť vodíka klesá. Pri prudkom ochladení počas zvárania sa voľný vodík nestihne vylúčiť zo zvaru a spôsobí pórovitosť. Pórovitosť zvaru potom znižuje pevnosť a ťažnosť zvaru, v závislosti od obsahu pórov (Welding the Nonferrous Metals: General Overview, 2002).

Pri zváraní hliníkových zliatin laserom je problém pórovitosti zvarov spôsobenej vodíkom väčší, ako pri konvenčných spôsoboch zvárania, pretože pri tejto metóde je rýchlosť zvárania vyššia, a teda aj rýchlosť ochladzovania je vyššia, a tak čas, kedy má vodík možnosť uniknúť z roztaveného kovu je kratší. Nápravným opatrením na zamedzenie vzniku a rastu pórov vodíka je zníženie rýchlosti zvárania. Ďalšou možnosťou na zamedzenie pórovitosti je zvýšenie hustoty energie lasera, a tým zvýšením času tuhnutia, čo zabezpečí viac času na uniknutie vodíka z roztaveného kovu. Najlepšou možnosťou je však predchádzať tvorbe vodíkovej pórovitosti vopred, zabezpečením správnej kvality východiskového materiálu, vhodných podmienok skladovania materiálu, správnych podmienok prípravy povrchu, podmienok spracovania atď. (European Aluminium Association, 2015).

Vodíková pórovitosť je označovaná ako metalurgická a charakteristická je pórmi sférického tvaru s veľkosťou, ktorá nepresahuje 100 μm . Povrch metalurgických pórov je hladký a ich výskyt je ovplyvnený výskytom vodíka vo zvarovom kove. Metalurgické póry, ktoré sú zobrazené na obr. 1, sa nachádzajú v celom objeme zvarového kovu, avšak ich najčastejší výskyt je na hranici stavenia (Xiao, R., Zhang, 2014; Kah et al., 2015).



Obr. 1 Metalurgická pórovitosť (Xiao, R., Zhang, 2014)

Vrstva oxidického filmu na povrchu hliníka musí byť pred procesom zvarovania prioritne odstránená, čo je kľúčovou podmienkou pre získanie vysokokvalitných zvarov. Ak sa neodstráni celá vrstva, tak sa malé časti neroztavených oxidov dostanú do zvarového kúpeľa, čo môže spôsobiť praskanie zvaru a zníženie jeho ťažnosti (Welding the Nonferrous Metals: General Overview, 2002; IGAWA, 2017).

Avšak aj pri správnej príprave povrchu zvarovaného materiálu, parametroch zvarovania, ochrannej atmosfére a zvaracom materiáli sú zliatiny hliníka pri zvaraní laserom v režime hlbkej penetrácie náchylné k náhodnej pórovitosti. Póry môžu vo zware vznikáť v dôsledku kolapsu paroplynového kanála, ako aj z dôvodu turbulentného prúdenia vo zvarovom kove. Tieto typy pórov sa nazývajú keyhole póry a majú nepravidelný alebo rúrkový tvar a sú obvykle umiestnené v dráhe paroplynového kanála, zatiaľ čo póry vodíka sú viac – menej rovnomerne rozložené v objeme. Veľkosť keyhole pórov je obvykle väčšia ako 100 μm a keyhole pór je zobrazený na obr. 2. Póry vznikajúce kolapsom paroplynového kanála sú najčastejšie pozorované vo zvarových spojoch s čiastočnou penetráciou (Xiao, R., Zhang, 2014; Kah et al., 2015).



Obr. 2 Keyhole pórovitosť (Xiao, R., Zhang, 2014)

1.1 Vplyv tepelného spracovania na mechanické vlastnosti zvarových spojov

Zváranie laserovým lúčom spôsobuje štruktúrne zmeny vo zvarovom kove zliatiny. V dôsledku týchto štruktúrnych zmien dochádza k prudkému poklesu pevnosti zvarového spoja v porovnaní s pevnosťou základného materiálu. Zváranie laserovým lúčom sa vyznačuje vysokou rýchlosťou ohrevu na teplotu tavenia a pri následnej kryštalizácii dochádza k nerovnomernému znižovaniu teploty a vzniku zvarového kovu s nehomogénnou mikroštruktúrou. Z toto dôvodu bol Malikovom a jeho kolektívom vykonaný výskum zameraný na účinok tepelného spracovania po procese zvárania, pozostávajúceho z kalenia a umelého starnutia, na mechanické vlastnosti (pevnosť a mikrotvrdosť) a mikroštruktúru zvarových spojov Al-Cu-Li hliníkovej zliatiny V-1416 zvaranej laserovým lúčom (Malikov et al., 2019).

Výskumom sa stanovili režimy tepelného spracovania, pri ktorých hodnoty pevnosti v ťahu, medze klzu a relatívneho predĺženia dosahovali 92 %, 91 % a 88 % hodnôt základného materiálu. Režimom tepelného spracovania, ktoré zahŕňalo kalenie z teploty 530 °C a následné umelé starnutie na teplote 170 °C s výdržou na teplote starnutia 32 hodín, bola dosiahnutá pevnosť v ťahu 92 %, medza klzu 91 % a relatívne predĺženie 88 % základného materiálu. Pri vykonanej statickej skúške ťahom došlo k porušeniu materiálu za miestom zvaru, čo sa pripisuje segregácii a rovnomernému rozloženiu fáz obsahujúcich med' T_1 (Al_2CuLi) a θ' (Al_2Cu) v matrici tuhého roztoku (Malikov et al., 2019).

Ďalší výskum vykonaný Linom a kolektívom bol zameraný na stanovenie vplyvu režimu rozpúšťacieho žihania na mechanické vlastnosti Al-Li zliatiny AW 2099. V tomto experimente bolo porovnávaných šesť režimov rozpúšťacieho žihania, a to (Lin, Zheng and Li, 2014):

- režim 1: 520 °C/1h,
- režim 2: 530 °C/1h,
- režim 3: 540 °C/1h,
- režim 4: 540 °C/4 h,
- režim 5: 550 °C/1h,
- režim 6: 560 °C/1h.

Po vykonaní rozpúšťacieho žihania boli vzorky podrobené dvojstupňovému umelému starnutiu, kedy boli v prvom kroku ohriate na teplotu 121 °C a čas starnutia bol 12 hodín. Druhý stupeň umelého starnutia trval 48 hodín a vzorky boli počas starnutia ohriate na teplotu 152 °C (Lin, Zheng and Li, 2014).

Zvyšovaním teploty rozpúšťacieho žihania došlo k zníženiu množstva primárnych častíc v zliatine a následnej precipitácii fáz δ' a T_1 , čo viedlo k zvýšeniu pevnosti. Tiež došlo k zmäkčeniu zliatiny z dôvodu zníženia stupňa rekryštalizácie. Maximálne množstvo spevňujúcich precipitátov bolo získaných po rozpúšťacom žíhaní na teplote 540 °C. Pri vyšších teplotách žihania došlo k nepriaznivému zhrubnutiu zrna, a tým k zmäknutiu zliatiny. Experimentom sa zistilo, že najlepšie mechanické vlastnosti zliatiny AW 2099 sa dosiahli pri režime tepelného spracovania pozostávajúceho z rozpúšťacieho žihania na teplote 540 °C a výdržou na teplote 1 hodinu. Po tomto režime tepelného spracovania sa dosiahla pevnosť zliatiny 604 MPa a ťažnosť 7,9 % (Lin, Zheng and Li, 2014).

V ďalšom experimente bol skúmaný vplyv tepelného spracovania po procese zvárania na mechanické vlastnosti hliníkovej zliatiny Al-Cu-Li zvárané elektrónovým lúčom. Experiment porovnával vlastnosti zvarových spojov, ktoré neboli tepelne spracované po procese zvárania so zvarovými spojmi, ktoré boli po procese zvárania podrobené tepelnému spracovaniu pozostávajúceho z rozpúšťacieho žihania na teplote 510 °C, výdrže 1 hodiny a následnom umelom starnutí. Vzorky, ktoré boli tepelne spracované po zváraní sa líšili v režimoch umelého starnutia. Pri jednej skupine vzoriek sa vykonávalo jednostupňové umelé starnutie na teplote 155 °C počas 16 hodín a pri druhej skupine vzoriek sa po tomto režime umelého starnutia zaradil druhý stupeň, kedy sa vzorky ohriali na teplotu 130 °C s výdržou na teplote 12 hodín (Wang, Huang and Zhao, 2018).

Experimentom sa zistilo, že najlepšie mechanické vlastnosti zvarových spojov boli dosiahnuté po tepelnom spracovaní zahŕňajúcom dvojstupňové umelé starnutie. Týmto režimom tepelného spracovania sa dosiahla pevnosť zodpovedajúca 0,9-násobku pevnosti pôvodného materiálu. Týmto režimom starnutia došlo nielen k najväčšiemu nárastu tvrdosti zvarového kovu v porovnaní s ostatnými vzorkami, ale aj k celkovému nárastu tvrdosti zvarového spoja (Wang, Huang and Zhao, 2018).

1.2 Vplyv úpravy povrchu materiálu na geometriu a pórovitosť zvarových spojov

Ako už bolo spomínané na povrchu hliníka a jeho zliatin sa vytvára vrstva oxidov, ktorá pevne prilnieva na povrch. Táto vrstva oxidov má výrazný vplyv na proces zvárania hliníkových zliatin a to najmä z dvoch dôvodov. Prvým dôvodom je teplota tavenia povrchových oxidov, ktorá je približne trikrát vyššia ako teplota tavenia hliníkovej zliatiny, na ktorej sa vrstva oxidov vytvorila. Táto skutočnosť má vplyv najmä na výslednú geometriu zvarového spoja, kedy môžu vyhotovené zvary dosahovať oveľa menšiu penetráciu než sa požaduje. To je spôsobené tým, že veľká časť tepla vnesená procesom zvárania do materiálu je spotrebovaná na roztavenie povrchových oxidov a nie na tavenie zváraného materiálu.

Druhý dôvod, pre ktorý má povrchová vrstva oxidov vplyv na proces zvárania hliníkových zliatin, je ich schopnosť pohlcovať vlhkosť. Vodík je najväčším problémom pri zváraní hliníkových zliatin, pretože spôsobuje nežiaducu pórovitosť zvarových spojov, ktorá má vplyv na celistvosť a mechanické vlastnosti vyhotovených spojov. Z týchto dôvodov je nutné dbať na dôkladné odstránenie povrchových oxidov pred procesom zvárania. Toto odstraňovanie je nutné vykonávať tesne pred procesom zvárania a zahŕňa napríklad odmastenie povrchu a následné mechanické odstraňovanie povrchových oxidov koróziivzdornou kefou.

Už samotným postupom čistenia povrchu je možné dosiahnuť rozdielne kvality zvarov, pretože pri nesprávnom postupe môžu byť nečistoty a oxidy zatlačené do zváraného materiálu a môžu negatívne vplývať na výslednú kvalitu zvarov. Rovnako aj dlhší čas medzi čistením povrchu a samotným zváraním môže vplývať na kvalitu zvarov, pretože čím dlhší čas uplynie medzi týmito dvoma operáciami, tým je vyššie riziko, že na zváranom povrchu sa opäť vytvorí určitá vrstva oxidov.

Do úvahy je nutné brať aj fakt, že v prípade manuálneho čistenia zváraných materiálov nevieme zaručiť, že zvárané materiály sú rovnako očistené od oxidov a nečistôt na celej zvárannej ploche, a preto sa môžu na zváraných materiáloch vyskytovať oblasti, ktoré nie sú tak dôkladne očistené ako iné, čo má tiež vplyv na výslednú kvalitu zvarov.

Rovnomerné odstránenie povrchových oxidov a nečistôt by sa mohlo dosiahnuť frézovaním povrchu zváraných materiálov s konštantnou hĺbkou rezu. Frézovaním by sa odstránila povrchová vrstva oxidov, a tým by sa potlačilo riziko pórovitosti zvarov spôsobených vodíkom nachádzajúcim sa v oxidoch a mastnotách na povrchu. Frézovaním je možné dosiahnuť rôzne drsnosti povrchu zmenou parametrov frézovania. Predpokladá sa, že zmenou drsnosti povrchu sa mení aj reflexia zváraného materiálu, a teda drsnosť po frézovaní môže mať vplyv aj na výslednú geometriu zvarových spojov.

Vplyv drsnosti povrchu na absorpciu laserového lúča koróziivzdornej ocele AISI 304, hliníka a železa skúmali Arata a Miyamoto. Výskumom zistili, že s rastúcou drsnosťou povrchu narastá aj absorpcia laserového lúča, a to pri oceli o 13 %, hliníku 3 % a železa 5 %. Po roztavení zváraného materiálu absorpcia lúča klesla na konštantnú hodnotu. Covelli a kolektív sa v experimente zamerali na vplyv drsnosti zváraného materiálu, ktorým bola 4 mm hrubá koróziivzdorná oceľ, pri laserovom zváraní CO₂ laserom s výkonom 2,5 kW. Výskumom sa zistilo, že drsnosť povrchu nemá významný vplyv na výsledné vlastnosti zvarových spojov (Sokolov et al., 2012).

Uvedené skutočnosti vplyvu drsnosti povrchu na hĺbku privaru potvrdil aj výskum, ktorý vykonal Sokolov spolu s kolektívom. Výskum bol zameraný na stanovenie vplyvu drsnosti povrchu na kvalitu vyhotoveného zvaru a hĺbku privaru. Vo výskume boli laserovým lúčom zvárané vzorky z nízkolegovaných ocelí S355 a St3, ktorých hrúbka bola 20 mm. Ich povrchy boli rôznymi spôsobmi opracované tak, aby drsnosť povrchu bola rôzna. Zváranie bolo vykonávané dvoma rôznymi vláknovými lasermi s vlnovou dĺžkou 1070 nm a pri výkone od 10 do 15 kW. Absorpcia sa hodnotila pri výkone 10 kW pomocou kalorimetra. Medzi drsnosťou a hĺbkou zvaru bola signifikantná pozitívna korelácia. Najväčšia hĺbka privaru pri výkone lasera 14 a 10 kW sa dosiahla pri drsnosti povrchu $R_a = 6,3 \mu\text{m}$ (Sokolov et al., 2012).

Jedným z najvýznamnejších zistení v tomto výskume bolo zistenie, že absorpcia konštrukčnej ocele pri zváraní na tupo vláknovým laserom je výrazne závislá od drsnosti povrchu pri výkonoch lasera vyšších ako 10 kW. Z experimentu sa zistilo, že pri zváraní materiálov, ktorých drsnosť sa pohybovala v rozmedzí $R_a = 1,6 - 8,0 \mu\text{m}$ sa maximálna penetrácia zvaru dosiahla pri drsnosti $R_a = 6,3 \mu\text{m}$. Zváranie s plným privarom pri materiáloch s drsnosťou $R_a = 8,0 \mu\text{m}$ viedlo k vyhotovovaniu zvarov neprijateľnej kvality. Výskumom sa došlo k záveru, že je odporúčané stanoviť limity drsnosti povrchu, pri ktorých sa dosiahnu nielen zvary dostatočnej penetrácie, ale aj vyhovujúcej kvality. Ďalej sa odporúča preskúmať vplyv drsnosti povrchu na absorpciu lúča (Sokolov et al., 2012).

Experiment zameraný na stanovenie vplyvu drsnosti povrchu na výslednú geometriu zvarového spoja skúmal aj McCathy s kolektívom. V ich experimente bola skúmaným materiálom hliníková zliatina AW 5754 s rozmermi 25×25×4 mm, na ktorej boli frézovaním vytvorené plochy s rôznou drsnosťou. Na týchto plochách boli následne CO₂ laserom vyhotovované prietavy pri konštantných parametroch pulzného zvárania. Po vyhotovení prietavov boli v experimente zmerané ich geometrické rozmery. Zistilo sa, že zvyšovaním drsnosti zváraného materiálu dochádzalo k nárastu rozmerov vyhotoveného prietavu. Tento nárast geometrických rozmerov je spôsobený pravdepodobne zvýšenou absorpciou laserového lúča (Ahmed Obeidi et al., 2019).

1.3 Vplyv zvárania so zváracím materiálom na pórovitosť

Pri zváraní hliníkových zliatin je riziko vzniku horúceho praskania, pórovitosti ako aj zmeny mechanických vlastností z dôvodu selektívneho odparovania legúr a rozpúšťania spevňujúcich precipitátov. Moon a Metzbower pozorovali zníženie obsahu horčíka z 5 % nachádzajúcich sa v základnom materiáli na 4 % vo zvarovom kove. Zníženie obsahu horčíka viedlo k zhoršeniu mechanických vlastností zvaru. Znižovanie obsahu horčíka spôsobuje nestabilitu paroplynového kanála v procese zvárania, čo vedie k vzniku pórov. Pridaním prvkov s vyššou afinitou k hliníku ako sú zinok, kremík, meď a železo dochádza k zníženiu rozpustnosti vodíka v tekutom hliníku, pretože tieto prvky prednostne vytvárajú väzby s hliníkom. Opačný účinok majú lítium, titán a horčík. Tieto prvky majú vysokú afinitu k vodíku, a teda pridaním týchto prvkov do materiálu dochádza k zvýšenej rozpustnosti vodíka v hliníku (Ahn et al., 2017).

Aby sa zabránilo náchylnosti na praskanie zvarových spojov, je potrebné upraviť mikroštruktúru tuhnúceho zvarového kovu na štruktúru, ktorá nie je tak citlivá na praskanie. Toto je možné dosiahnuť buď zmenou parametrov zvárania s cieľom ovplyvniť proces tuhnutia zvarového kovu, alebo použitím vhodného zváracieho materiálu s rozdielnym chemickým zložením a nižšou teplotou tavenia než má základný materiál (Ahn et al., 2017).

Náchylnosť na horúce praskanie je možné znížiť zváracím materiálom eutektickej zliatiny s nižšou teplotou tavenia, ako napríklad zliatiny Al-Si. Najčastejšie sa ako zváracie materiály používajú hliníkové zliatiny skupiny 4XXX. Zvárací drôt poskytuje dostatok materiálu eutektického zloženia, ktorý môže vyplňať trhliny pri tuhnutí zvarového kovu. Ďalším benefitom zvárania so zváracím materiálom je vyššia stabilita procesu – zníženie pórovitosti spôsobenej kolapsom paroplynového kanála. Okrem toho sa použitím zváracieho materiálu zníži pórovitosť v dôsledku zvýšenia objemu zvarového kovu, pretože v mieste zvaru sa nachádza dostatok materiálu, ktorý môže vyplniť prázdne miesta vzniknuté odparením niektorých prvkov. Použitím zváracieho materiálu je možné potlačiť aj vodíkovú pórovitosť, pretože prítomnosť kremíka vo zváracom materiáli zvýši rozpustnosť vodíka v roztavenom hliníku. Kremík v dôsledku svojej vysokej afinity k vodíku jeho veľkú časť naviaže, čím dôjde k zníženiu pórovitosti po stuhnutí zvarového kovu (Ahn et al., 2017).

Na Materiálovotechnologickej fakulte bol Sahulom spolu s kolektívom vykonaný experiment, ktorý bol zameraný na stanovenie mechanických vlastností a mikrotvrdosti zvarových spojov zliatiny AW 2009 zvárenej laserovým lúčom s použitím hliník–horčíkového zváracieho materiálu AW 5087 s priemerom 1,2 mm. Pri tomto experimente mal zváraný plech rozмеры 100×50×2 mm. V experimente bolo vyhotovených 20 zvarov z toho ani pri jednom nebol sledovaný vznik horúcich trhlín. Keďže zliatina AW 5087 nie je tepelne spracovateľná, tak vo zvarovom kove bola nameraná najmenšia hodnota tvrdosti, ktorá predstavovala priemerne 89 HV_{0,1}. Tento pokles tvrdosti je spôsobený rozpustením spevňujúcich precipitátov pri procese zvárania. Pri zvaroch zliatiny AW 2099 vyhotovených bez zváracieho materiálu bola priemerná tvrdosť zvarového kovu 72 HV_{0,1}. Pri použití zváracieho materiálu bola tvrdosť zvarového kovu vyššia z dôvodu prítomnosti zirkónia vo zváracom materiáli, ktoré vplýva na výslednú štruktúru zvaru, ktorá je vďaka nemu jemnozrnnejšia. Z výsledkov statickej skúšky ťahom sa zistilo, že pevnosť zvarového spoja bola približne 284 MPa, čo predstavuje 67 % pevnosti základného materiálu, ktorého priemerná pevnosť bola 425 MPa. Pokles pevnosti zvarového spoja vyhotoveného so zváracím materiálom bola taktiež spôsobená použitím nevytvrditeľného zváracieho materiálu (Sahul a kol. 2019).

2 Ciele dizertačnej práce

Na základe literárnej rešerše a preskúmaní súčasného stavu v oblasti zvárania boli v dizertačnej práci stanovené nasledovné ciele:

1. Stanovenie vplyvu tepelného spracovania zvarových spojov zliatiny AW 2099 po laserovom zváraní na mechanické vlastnosti. Konkrétne išlo o stanovenie režimu tepelného spracovania, ktorým by sa dosiahli mechanické vlastnosti zvarových spojov čo najviac podobné vlastnostiam základného materiálu v dodanom stave. Sledovanými parametrami boli pevnosť v ťahu, dohovorená medza klzu, ťažnosť a mikrotvrdosť. Cieľom bolo tiež stanoviť vplyv tepelného spracovania na mikroštruktúru jednotlivých oblastí zvarových spojov. V rámci prvého cieľa bol stanovený nasledovný vedecký predpoklad:

- Tepelným spracovaním zvarových spojov sa získa pevnosť v ťahu, ktorá bude rovnaká ako pevnosť v ťahu zliatiny AW 2099 v dodanom stave.

2. Stanovenie vplyvu úpravy povrchu zváraných materiálov na výslednú geometriu a pórovitosť prietavu. V rámci tohto cieľa bol sledovaný vplyv drsnosti povrchu na geometriu a pórovitosť prietavu. Ďalej bol sledovaný vplyv mechanického a chemického spôsobu čistenia povrchu pretavovaných materiálov na výslednú pórovitosť, ako aj vplyv pretavovania na nevalcovanom plechu. V rámci tohto cieľa boli stanovené nasledovné vedecké predpoklady:

- S narastajúcou drsnosťou povrchu zváraných materiálov bude šírka prietavu narastať a zároveň sa v objeme prietavov nebudú vyskytovať póry.
- Frézovaním základného materiálu z oboch strán tesne pred procesom zvárania dôjde k úplnému odstráneniu pórovitosti prietavu.
- Pretavovaním plechov po chemickom čistení sa získajú prietavy bez pórov.
- V prietavoch na nevalcovanom základnom materiáli AW 2099 sa nebudú vyskytovať žiadne metalurgické póry.

3. Vplyv zvárania so zváracím materiálom na výslednú pórovitosť zvarových spojov. V rámci tohto cieľa dizertačnej práce sa sledovala zmena pórovitosti zvarového spoja vyhotoveného laserovým zváraním so zváracím materiálom v porovnaní s prietavmi, ktoré boli vyhotovené na zváraných materiáloch, ktoré boli pred procesom zvárania upravované rôznymi postupmi. Pri tomto celi dizertačnej práce bol stanovený nasledovný vedecký predpoklad:

- Použitím zváracieho materiálu AW 5087 pri zváraní hliníkových zliatin AW 2099 laserovým lúčom sa odstráni pórovitosť zvarových spojov.

3 Experiment

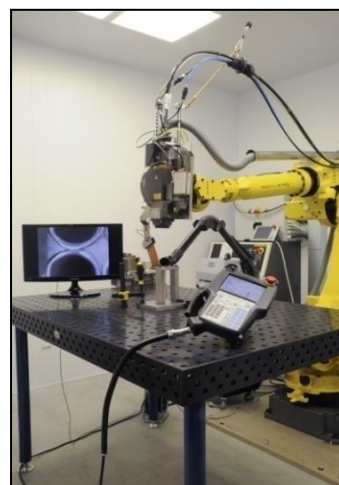
Experimentálna časť dizertačnej práce pozostávala z viacerých čiastkových experimentov, ktorých cieľom bolo stanovenie vplyvu úpravy povrchu pred procesom zvárania a tepelného spracovania po procese zvárania na výsledné vlastnosti a kvalitu vyhotovených zvarových spojov. Experimenty sa vykonávali za účelom stanovenia režimu tepelného spracovania, pri ktorých sa získajú zvarové spoje s mechanickými vlastnosťami, čo najviac podobnými vlastnostiam zváraných materiálov v dodanom stave. Veľký dôraz bol zároveň kladený na výslednú kvalitu zvarových spojov. Z hľadiska kvality zvarov sa požadovalo experimentmi stanoviť postupy a parametre zvárania, pri ktorých by boli zvary vizuálne vyhovujúce a vo zvaroch by sa nenachádzali chyby, prípadne pórovitosť zvarov by bola minimalizovaná. Vyhodnocovaniu kvality zvarových spojov hliníka, horčíka, ich zliatin a čistej medi vyhotovených laserovým a elektrónovým lúčom sa venuje norma ISO 13919-2:2021.

3.1 Technológia zvárania

V rámci experimentu bolo na zváranie skúmanej hliníkovej zliatiny využité zváranie laserovým lúčom. Zváranie sa vykonávalo na Materiálovotechnologickej fakulte Slovenskej technickej univerzity v laboratóriu centra excelentnosti 5-osového obrábania. Zdrojom laserového žiarenia bol diskový laser TruDisc 4002 od spoločnosti TRUMPF Slovakia s.r.o. s maximálnym výkonom 2 kW (obr. 3). Pohyb zváracej hlavy zabezpečoval 6-osový zvárací robot FANUC M-710ic/50 (obr. 4). Na laserovom zváracom pracovisku využívanom v experimente je možné vykonávať aj zváranie so zváracím materiálom a to vďaka systému na podávanie zváracieho materiálu od spoločnosti Fronius, ktorý je tiež upevnený na zváracom robote.



Obr. 3 Laserové zváracie centrum



Obr. 4 6-osový zvárací robot FANUC

3.2 Skúmaný materiál

Experimenty boli zamerané na zváranie hliníkovej zliatiny AW 2099 vo forme plechu s hrúbkou 3 mm. Zváraným materiálom v experimente bola hliník-lítiová zliatina AW 2099, ktorá bola od výrobcu Alcoa dodaná vo forme plechu s hrúbkou 25,4 mm. Z dôvodu limitovaného výkonu laserového zváracieho zariadenia (2 kW) bolo nutné redukovať pôvodnú hrúbku 25,4 mm na finálnu hodnotu 3 mm postupným valcovaním za tepla, ktoré bolo

vykonané po rozpúšťacom žíhaní na teplote 530 °C s výdržou 1 h a následným rýchlym ochladením vo vode. Redukcia hrúbky sa vykonala v spoločnosti COMTES FHT a.s..

Táto hliník-lítiová zliatina AW 2099 patrí medzi najmodernejšie hliník-lítiové zliatiny tretej generácie. Táto generácia Al-Li zliatin sa na trh dostala ako dôsledok snahy získať dobre zvariteľnú zliatinu hliníka s nízkou hustotou, ktorá nájde uplatnenie v kozmickom a leteckom priemysle, a zároveň bude v týchto priemyselných odvetviach schopná konkurencie kompozitným materiálom. Chemické zloženie a mechanické vlastnosti tejto zliatiny sú uvedené v tab. 1 a tab. 2 (Madhusudhan and Gokhale, 2014; Starke, 2014; Rioja and Liu, 2012).

Tab. 1 Chemické zloženie zliatiny AW 2099 (Smiths metals centers, 2018)

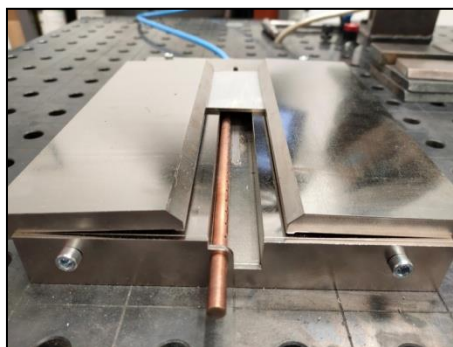
Chemické zloženie [hm. %]												
	Cu	Li	Zn	Mg	Mn	Zr	Ti	Fe	Si	Be	Ostatné	Al
Min	2,40	1,60	0,40	0,10	0,10	0,05	–	–	–	–	0,05	Zvyšok
Max	3,00	2,00	1,00	0,50	0,12	0,10	0,10	0,07	0,05	0,0001	0,15	Zvyšok

Tab. 2 Mechanické vlastnosti zliatiny AW 2099 (Smiths metals centers, 2018)

Mechanické vlastnosti 2099–T8		
Pevnosť v ťahu [MPa]	V smere valcovania	500
Pevnosť v ťahu [MPa]	Kolmo na smer valcovania	420
Medza klzu [MPa]	V smere valcovania	350
Medza klzu [MPa]	Kolmo na smer valcovania	320
Ťažnosť [%]	V smere valcovania	4,5
Modul pružnosti v ťahu [GPa]	–	78

3.2.1 Vplyv tepelného spracovania na vlastnosti zvarových spojov zliatiny AW 2099

Prvým krokom experimentu bolo očistenie zváraných plechov od povrchových oxidov brúsením na rovinnej brúske Amada DB-610. Ďalším krokom bolo zarovnanie hrany plechov pomocou čelnej frézy. Tesne pred procesom zvárania, bolo miesto zvárania očistené koróziivzdornou kefou a technickým benzínom. Takto pripravené plechy boli následne upnuté do špeciálneho prípravku, ktorý zabezpečoval kontinuálny a rovnomerný prísun formovacieho plynu, ktorým bolo hélium, počas celého procesu zvárania (obr. 5).



Obr. 5 Prípravok na zváranie s prívodom formovacieho plynu

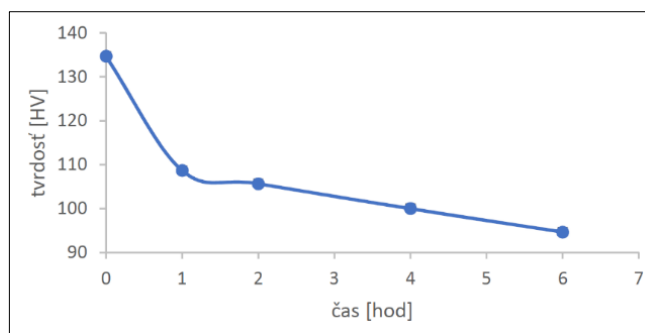
Ďalším krokom experimentu bolo samotné laserové zváranie, ktoré sa vykonávalo bez použitia zváracieho materiálu v smere kolmom na os valcovania a použité parametre zvárania sú zobrazené v tab. 3.

Tab. 3 Parametre laserového zvarovania

Výkon laserového lúča [W]	1700
Priemer optického vlákna [μm]	200
Rýchlosť zvarovania [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	15
Prietokové množstvo ochranného plynu (Ar) [$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$]	30
Prietokové množstvo formovacieho plynu (He) [$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$]	30
Fokusácia [mm]	0

Ďalej sa v experimente na základe normy STN EN ISO 6892-1 vyhotovili telieska na statickú skúšku ťahom. Aby sa zamedzilo tepelnému ovplyvneniu vzoriek, tak na vyrezanie skúšobných teliesok bolo zvolené rezanie vodným lúčom. Z každej vzorky boli vyrezané štyri skúšobné telieska.

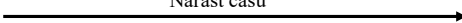
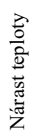
Ďalším krokom bolo stanovenie postupu tepelného spracovania vzoriek. Parametre rozpúšťacieho žihania sa určili experimentálne tak, že vzorky základného materiálu boli žihané v peci so vzdušnou atmosférou vyhriatou na teplotu $540\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 1; 2; 4 a 6 hodín. Následne boli vzorky prudko ochladené vo vode s teplotou $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ a bolo vykonané meranie tvrdosti takto žíhaných materiálov. Na základe nameraných údajov sa vyjadrila závislosť medzi časom rozpúšťacieho žihania a tvrdosťou základného materiálu zliatiny AW 2099. Grafické znázornenie tejto závislosti je na obr. 6.

Obr. 6 Závislosť tvrdosti materiálu od času rozpúšťacieho žihania pri teplote $540\text{ }^{\circ}\text{C}$

Z grafického zobrazenia výsledkov experimentu sa vyvodilo, že po 1,5 hodinách rozpúšťacieho žihania došlo k zastaveniu prudkého poklesu tvrdosti. Od tohto času dochádzalo už len k miernemu poklesu tvrdosti, čo mohlo byť spôsobené rastom zŕn. Na základe týchto výsledkov bol režim rozpúšťacieho žihania zvolený $540\text{ }^{\circ}\text{C} / 1,5\text{ h}$. Pri tomto režime bol predpoklad, že dôjde k rozpusteniu všetkých precipitátov a vytvoreniu homogénneho tuhého roztoku α .

Ďalej bolo potrebné vybrať režim umelého starnutia. V tejto časti boli stanovené teploty a časy vytvrdzovania. Zvolené boli 4 rôzne teploty vytvrdzovania a 4 rôzne časy výdrže na teplote vytvrdzovania. Spolu bolo navrhnutých 16 režimov umelého starnutia, ktoré sú uvedené v tab. 4.

Tab. 4 Parametre režimov umelého starnutia

	Režimy umelého starnutia				
	Nárast času 				
		1	2	3	4
Nárast teploty 	A	150°C ; 6h	150°C ; 12h	150°C ; 18h	150°C ; 24h
	B	160°C ; 6h	160°C ; 12h	160°C ; 18h	160°C ; 24h
	C	170°C ; 6h	170°C ; 12h	170°C ; 18h	170°C ; 24h
	D	180°C ; 6h	180°C ; 12h	180°C ; 18h	180°C ; 24h
	N	bez TS			

Okrem tepelne spracovaných vzoriek bola statickej skúške ťahom podrobená aj vzorka, ktorá nebola tepelne spracovaná, a tiež aj vzorky, ktoré boli tepelne spracované, ale neboli zvárané, teda išlo len o základné materiály. Pri základných materiáloch boli na statickú skúšku ťahom vyhotovené pri jednotlivých režimoch umelého starnutia len dve skúšobné telieska.

Po tepelnom spracovaní vzoriek bola vykonaná statická skúška ťahom v súlade s normou EN 10002. Statická skúška ťahom sa vykonávala na trhacom stroji LabTest5.250SP1-VM v smere pozdĺžnom na smer valcovania základného materiálu, a teda kolmo na os zvaru. Priemerné hodnoty dát získaných statickou skúškou v ťahu zvarových spojov sú zobrazené v tab. 5. V tabuľke je zaznamenaný aj počet skúšobných teliesok, pri ktorých došlo k lomu vo zvarovom kove.

Tab. 5 Priemerné hodnoty a štandardná odchýlka vybraných dát zo statickej skúšky ťahom na vzorkách so zvarovým spojom

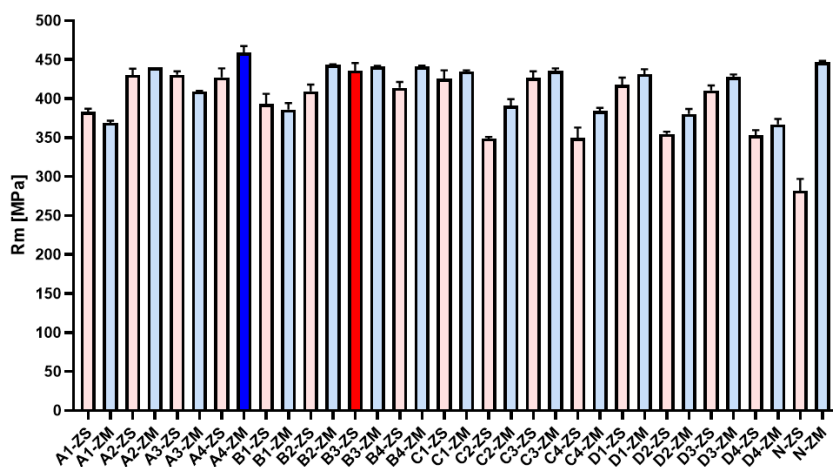
REŽIM TS	$\bar{R}_{p0,2-ZS}$ [MPa]	SD	$\bar{R}_{m-ZS}$ [MPa]	SD	$\bar{A-ZS}$ [%]	SD	LOM VO ZVARE
A1	245,50	4,51	383,00	4,08	24,45	2,54	2/4
A2	395,25	9,95	430,50	7,90	4,47	5,74	4/4
A3	295,75	6,65	430,75	4,35	24,03	3,34	0/4
A4	390,00	3,46	427,25	11,79	3,16	2,51	4/4
B1	280,50	29,05	393,00	13,37	18,34	4,46	0/4
B2	337,75	7,76	409,50	8,58	7,94	2,42	2/4
B3	376,50	8,89	436,00	9,93	6,07	4,23	4/4
B4	363,00	5,77	414,00	7,48	4,09	1,32	4/4
C1	363,50	3,11	425,50	11,03	9,38	4,45	2/4
C2	238,00	4,16	349,00	2,00	14,39	0,51	0/4
C3	367,25	8,50	426,75	8,46	7,35	3,36	4/4
C4	249,50	5,80	349,50	13,48	10,83	4,73	2/4
D1	355,25	7,89	417,50	9,68	7,11	3,99	2/4
D2	245,50	5,32	354,75	2,87	13,83	3,48	1/4
D3	342,25	9,74	410,50	6,66	6,64	1,14	4/4
D4	239,75	9,32	353,00	6,68	14,67	2,08	1/4
N	272,25	7,18	282,00	15,12	1,48	1,31	4/4

Priemerné hodnoty dát získaných statickou skúškou v ťahu základných materiálov bez zvarových spojov sú zobrazené v tab. 6.

Tab. 6 Priemerné hodnoty dát získaných zo statickej skúšky v ťahu tepelne spracovaného základného materiálu

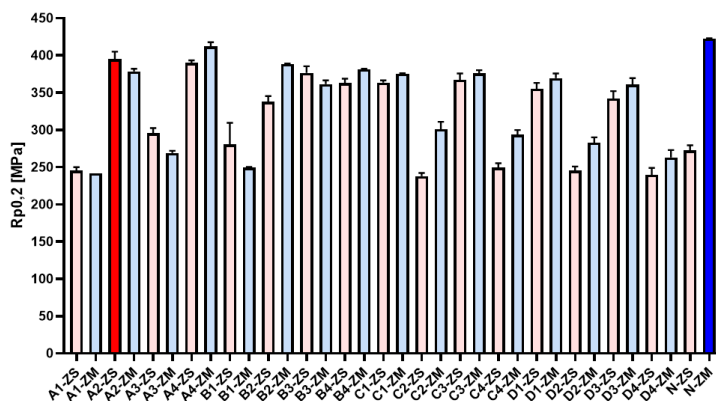
REŽIM TS	$\bar{R}_{p0,2}$ - ZM [MPa]	SD	$\bar{R}_m$ - ZM [MPa]	SD	$\bar{A}$ [%]	SD
A1	242,00	0,00	369,00	2,83	28,59	0,41
A2	378,50	3,54	440,00	0,00	12,89	0,26
A3	269,00	2,83	409,50	0,71	28,69	0,57
A4	412,00	5,66	459,00	8,49	11,88	0,07
B1	156,00	131,52	386,00	8,49	26,35	0,66
B2	388,50	0,71	443,50	0,71	10,37	0,16
B3	361,50	4,95	441,50	0,71	12,55	0,42
B4	381,50	0,71	441,00	1,41	11,37	0,27
C1	375,50	0,71	435,00	1,41	14,28	0,34
C2	301,00	9,90	391,00	8,49	14,83	2,02
C3	376,00	4,24	435,50	3,54	11,67	0,66
C4	293,50	6,36	384,00	4,24	13,65	0,16
D1	369,50	6,36	431,50	6,36	12,93	1,04
D2	283,00	7,07	380,50	6,36	15,76	0,94
D3	361,00	8,49	427,50	3,54	12,69	0,78
D4	263,00	9,90	367,00	7,07	15,39	0,41
N	422,50	0,71	446,50	2,12	4,32	1,20

Porovnanie pevností zvaraných vzoriek a základných materiálov pri rôznych režimoch umelého starnutia je graficky znázornené na obr. 7. Červenou farbou sú znázornené pevnosti zvaraných skúšobných tyčí a modrou skúšobné telieska základných materiálov. V grafe sú zároveň vyznačené aj najvyššie hodnoty pevnosti. Pri zvarových spojoch bola najväčšia pevnosť nameraná pri vzorke po režime umelého starnutia A4 a pri základnom materiáli pri vzorke B3.



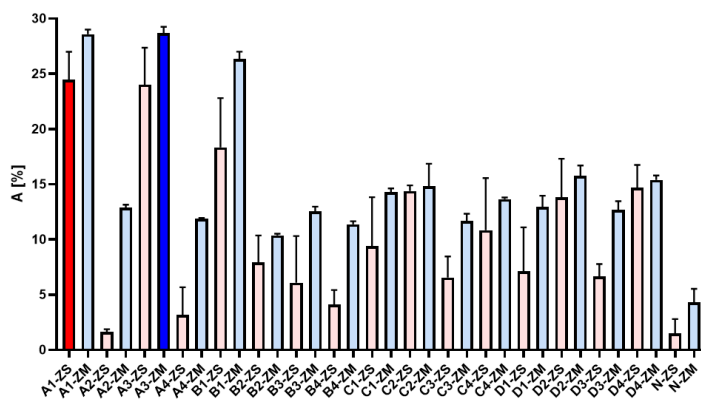
Obr. 7 Priemerné hodnoty pevnosti zvarových spojov a základných materiálov pre vybrané druhy tepelného spracovania

Porovnanie medze klzu zvaraných vzoriek a základných materiálov pri rôznych režimoch umelého starnutia je graficky znázornené na obr. 8. Červenou farbou sú znázornené priemerné hodnoty medze klzu zvaraných skúšobných tyčí a modrou skúšobné telieska základných materiálov. V grafe sú zároveň vyznačené aj najvyššie hodnoty medze klzu. Pri zvarových spojoch bola najväčšia dohovorovaná medza klzu nameraná pri vzorke po režime umelého starnutia A2 a pri základnom materiáli pri vzorke, ktorá nebola tepelne spracovaná.



Obr. 8 Priemerné hodnoty dohovorenej medze klzu zvarových spojov a základných materiálov pre vybrané druhy tepelného spracovania

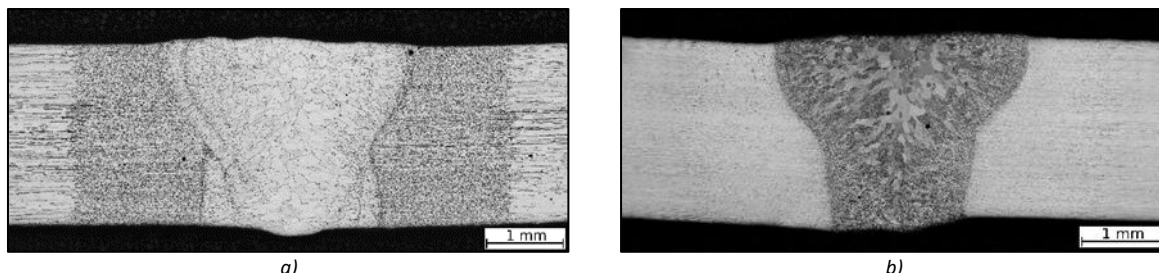
Porovnanie ťažností zváraných vzoriek a základných materiálov pri rôznych režimoch umelého starnutia je graficky znázornené na obr. 9. Červenou farbou sú znázornené priemerné hodnoty ťažnosti zváraných vzoriek a modrou základných materiálov. V grafe sú zároveň vyznačené aj najvyššie hodnoty ťažnosti. Pri zvarových spojoch bola najväčšia ťažnosť nameraná pri vzorke po režime umelého starnutia A1 a pri základnom materiáli pri vzorke A3.



Obr. 9 Priemerné hodnoty ťažnosti zvarových spojov a základných materiálov pre vybrané druhy tepelného spracovania

Po vykonaní statickej skúšky ťahom boli vzorky podrobené makro– a mikroskopickej analýze. Príprava vzoriek na tieto analýzy prebiehala bežným metalografickým postupom, ktorý zahŕňa brúsenie, leštenie a leptanie vzoriek v Kelleri (95 ml H₂O; 2,5 ml HNO₃; 1,5 ml HCl a 1 ml HF).

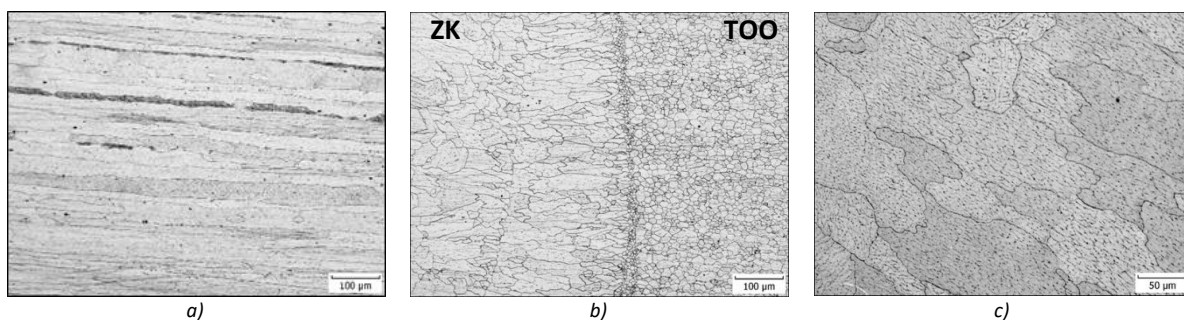
Makroskopické a mikroskopické snímky boli zhotovené na svetelnom optickom mikroskope CarlZeiss Jena Neophot 32. Makroskopické snímky vzorky B3 a vzorky, ktorá nebola tepelne spracovaná sú na obr. 10. Pri vzorke, ktorá nebola tepelne spracovaná (vzorka N) nie sú dobre viditeľné jednotlivé oblasti zvarového spoja, pretože pri jej leptaní došlo k rýchlemu naleptaniu zvarového kovu, zatiaľ čo v základnom materiáli a teplom ovplyvnenej oblasti ešte nedošlo k dostatočnému naleptaniu



Obr. 10 Makroskopické snímky zvarových spojov: a) vzorka B3; b) vzorka N

Keďže zváranie prebiehalo pri konštantných parametroch, tak aj šírka jednotlivých oblastí zvaru bola rovnaká. Šírka zvarového kovu bola na povrchu približne 3 mm a v koreni 1 – 2 mm. Teplom ovplyvnená oblasť dosahovala šírku 1 – 2 mm na každej strane zvarového spoja. Makroskopickou analýzou bolo potvrdené, že vo zvaroch sa vyskytujú póry.

Na obr. 11 sú zobrazené jednotlivé oblasti zvarového spoja vzorky B3. Základný materiál si zachoval valcovanú štruktúru aj po tepelnom spracovaní. Prechod z teplom ovplyvnenej oblasti do zvarového kovu je dokumentovaný na obr. 11–b. Teplom ovplyvnená oblasť prešla rekryštalizáciou a tvorená je globulárnymi zrnami s veľkosťou 10 – 30 μm . Na hranici stavenia došlo k vytvoreniu charakteristického zoskupenia malých rovnoosých globulárnych zŕn s veľkosťou 2 – 10 μm . Od tejto hranice sa začína oblasť zvarového kovu, ktorá je tvorená pretiahnutými zrnami kopírujúcimi smer odvodu tepla zo zvaru. Po hraniciach zŕn a v medzidendritických priestoroch sú pozorované tmavé oblasti, čo sú pravdepodobne vylúčené precipitáty.



Obr. 11 Mikroštruktúra vzorky B3: a) ZM; b) prechod z TOO do ZK; c) ZK

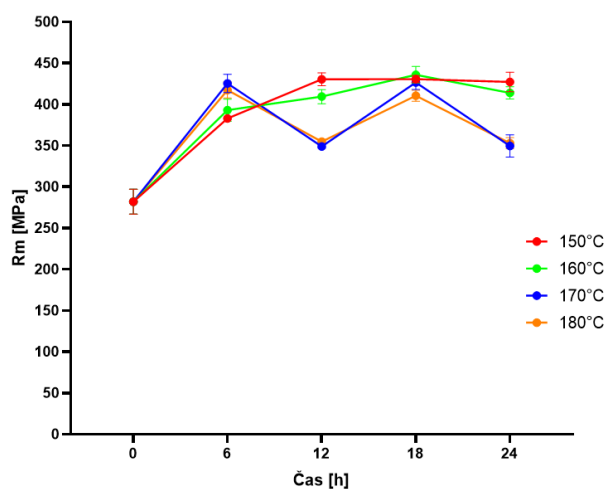
Po makroskopickej a mikroskopickej analýze bola ďalej v experimente meraná mikrotvrdosť vzoriek. Meranie mikrotvrdoosti sa vykonávalo na mikrotvrdomeri IndenteMet 1100. Záťaž počas merania bola 1 N a čas výdrže 10 s. Tvrdosť bola meraná kolmo na os zvaru z jednej strany základného materiálu na druhú v dvoch líniách. Prvá línia bola vo vzdialenosti 0,5 mm od povrchu zvaru a druhá línia bola 0,5 mm nad koreňom zvaru. Z nameraných hodnôt mikrotvrdoosti boli vypočítané priemerné hodnoty tvrdosti jednotlivých oblastí zvarového spoja, ktoré sú zobrazené v tab. 7.

Tab. 7 Priemerné hodnoty tvrdosti jednotlivých oblastí zvarového spoja

	ZM [HV0,1]	TOO [HV0,1]	ZK [HV0,1]
A1	115,4	117,0	112,1
A2	146,7	143,8	141,5
A3	158,2	157,9	162,3
A4	150,9	151,1	145,9
B1	150,0	147,5	142,6
B2	155,4	153,0	149,4
B3	160,7	153,8	155,8
B4	151,9	146,8	146,2
C1	162,1	154,3	154,3
C2	109,3	110,1	108,1
C3	158,6	156,5	152,0
C4	125,1	121,3	128,1
D1	136,1	134,2	131,6
D2	113,5	114,6	112,3
D3	156,6	150,2	151,0
D4	95,8	96,0	99,8
N	111,2	110,0	76,1

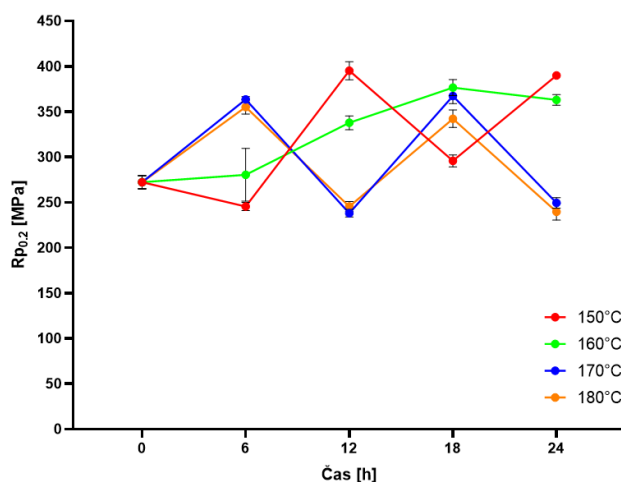
3.2.2 Vyhodnotenie experimentu

Zo statickej skúšky ťahom vyplýva, že tepelným spracovaním zvarových spojov došlo pri všetkých režimoch umelého starnutia k nárastu pevnosti, v porovnaní so zvarovým spojom bez tepelného spracovania po zváraní. Najvyššie hodnoty pevnosti sa dosiahli režimom tepelného spracovania označeného ako B3, ktoré pozostávalo z ohrevu na teplotu 160 °C a výdrže na tejto teplote 18 hodín. Týmto režimom sa dosiahla priemerná pevnosť 436 MPa, čo predstavuje 97,6 % pevnosti základného materiálu v dodanom stave, ktorého pevnosť bola 446,5 MPa. Keďže rozdiel priemerných pevností jednotlivých tepelne spracovaných vzoriek nebol výrazný, z ekonomického hľadiska je výhodnejší režim A2, pri ktorom boli vzorky ohriate na teplotu 150 °C s výdržou 12 hodín. Pri tomto režime sa dosiahla priemerná pevnosť zvarového spoja 430,5 MPa, čo predstavuje 96,4 % pevnosti základného materiálu v dodanom stave. Grafické znázornenie závislosti pevnosti v ťahu od času pri rôznych teplotách umelého starnutia je zobrazené na obr. 12.



Obr. 12 Grafická závislosť pevnosti zvarového spoja a času umelého starnutia pre rôzne teploty umelého starnutia

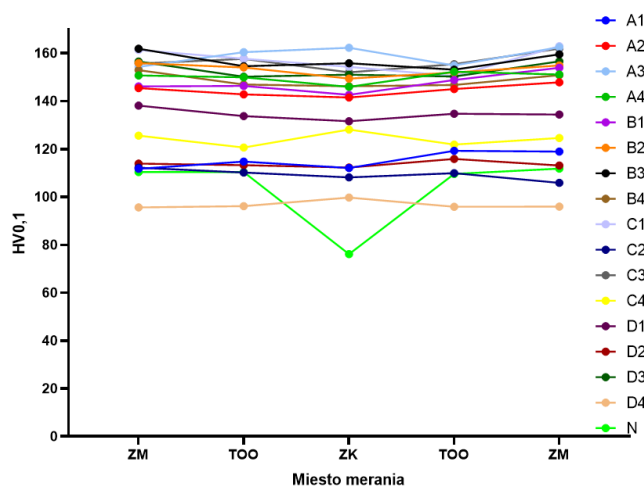
Pri experimentom stanovených režimoch umelého starnutia sa dosiahla najvyššia priemerná hodnota dohovorenej medze klzu pri vzorke tepelne spracovanej režimom A2. V jej prípade dosahovala dohovorená medza klzu hodnotu 395,25 MPa, čo je o 6,4 % menej ako dohovorená medza klzu základného materiálu v dodanom stave, ktorého medza klzu sa uvádza 422,50 MPa. Grafické znázornenie závislosti dohovorenej medze klzu od času pri rôznych teplotách umelého starnutia je zobrazené na obr. 13.



Obr. 13 Grafická závislosť dohovorenej medze klzu zvarového spoja a času umelého starnutia pre rôzne teploty umelého starnutia

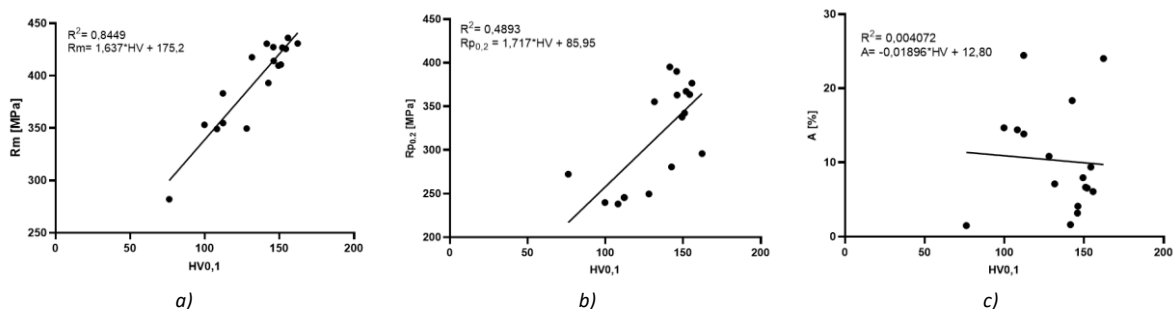
Umelým starnutím po procese zvárania sa pri všetkých režimoch získala ťažnosť, ktorá je vyššia ako ťažnosť zvaranej vzorky, ktorá nebola tepelne spracovaná. Najvyššia hodnota bola zaznamenaná pre režim A1, ktorý pozostával z ohrevu na teplotu 150 °C a zotrvaní na tejto teplote po dobu 6 hodín. Po tomto režime umelého starnutia bola ťažnosť vzorky 24,45 %, čo je približne 5,7-krát viac ako ťažnosť vzorky v dodanom stave (4,32 %). Pre navrhnutý režim umelého starnutia A2 bola spomedzi všetkých vzoriek dosiahnutá najnižšia ťažnosť (4,47 %), avšak jej hodnota je stále o 3,5 % vyššia ako ťažnosť dodaného materiálu.

Grafické znázornenie priemerných hodnôt mikrotvrdosti pre jednotlivé oblasti zvarových spojov podrobených umelému starnutiu pri rôznych režimoch je zobrazené na obr. 14. Meraním mikrotvrdosti sa najvyššia tvrdosť namerala pri vzorke A3. Táto vzorka dosahovala najvyššie priemerné hodnoty mikrotvrdosti v oblasti zvarového kovu aj teplom ovplyvnenej oblasti. V základnom materiáli priemerná mikrotvrdosť dosahovala hodnotu 158,2 HV0,1, v teplom ovplyvnenej oblasti 157,9 HV0,1 a vo zvarovom kove 162,3 HV0,1. Pri všetkých vzorkách sa pozorovalo, že tepelným spracovaním sa odstránil nežiadúci výrazný pokles tvrdosti vo zvarovom kove.



Obr. 14 Porovnanie priebehu priemernej tvrdosti jednotlivých zvarových spojov

Lineárnou regresnou analýzou sa skúmala závislosť medzi priemernými hodnotami mikrotvrdosti vo zvarovom kove a priemernými hodnotami pevnosti zvarových spojov týchto vzoriek. Analýzou sa zistilo, že hodnota hladiny významnosti (P -value) je menšia ako 0,05, takže medzi mikrotvrdosťou a pevnosťou vzoriek existuje signifikantná závislosť, ktorá je graficky znázornená na obr. 15–a. Rovnaká lineárna regresná analýza sa vykonala aj v prípade stanovenia závislosti mikrotvrdosti zvarového kovu a dohovorenej medze klzu zvarových spojov (obr. 15–b). Aj v tomto prípade bola hodnota hladiny významnosti (P -value) nižšia ako 0,05, takže závislosť je signifikantná. Regresnou analýzou závislosti mikrotvrdosti zvarového kovu a ťažnosti nebola zistená hodnota hladiny významnosti (P -value) vyššia ako 0,05, takže skúmaná závislosť nie je v našom prípade signifikantná (obr. 15–c).



Obr. 15 Regresná priamka závislosti mikrotvrdosti ZK a: a) pevnosti; b) dohovorenej medze klzu; c) ťažnosti

Pri makroskopickej analýze boli pozorované póry nachádzajúce sa vo zvarovom kove, a tiež sa zistilo, že jednotlivé časti zvarového spoja sú jasne viditeľné a rozmery týchto oblastí boli pri všetkých vzorkách rovnaké. Toto sa predpokladalo, keďže počas zvárania boli parametre konštantné. Mikroskopickou analýzou neboli pozorované výrazné rozdiely medzi jednotlivými režimami umelého starnutia. Jednotlivé oblasti zvarových spojov vykazovali podobnú morfológiu aj veľkosť zŕn. Rozdiel medzi jednotlivými režimami umelého starnutia môže byť v množstve a druhu vylúčených precipitátov.

Tepelným spracovaním došlo okrem zlepšenia mechanických vlastností vzoriek aj k ich výraznej deformácii. Tá síce nemala v procese experimentu vplyv na výsledky, avšak je nutné brať tento fakt do úvahy v prípade reálneho návrhu zvaranej súčiastky zo zliatiny AW 2099, ktorá bude po zváraní tepelne spracovávaná. Tepelné

spracovanie súčiastok z tejto zliatiny nie je vhodné v prípade veľkých rozmerov alebo komplikovaných tvarov súčiastok, výrazných rozdieloch v priereze a hrúbke materiálu ako ani pre tenkostenné konštrukcie.

Na začiatku experimentu sa predpokladalo, že tepelným spracovaním zvarových spojov bude možné získať pevnosť v ťahu, ktorej hodnota by bola rovnaká ako pevnosť základného materiálu v dodanom stave. Tento vedecký predpoklad bol experimentom potvrdený, pretože tepelným spracovaním po procese zvárania sa v jednom prípade dosiahla pevnosť zvarového spoja o 2,4 % nižšia ako pevnosť základného materiálu v dodanom stave, čo je zanedbateľný rozdiel.

3.3 Vplyv povrchovej úpravy zváraných materiálov na geometriu a pórovitosť prietavov

Experiment bol zameraný na stanovenie vplyvu povrchovej úpravy základného materiálu pred procesom zvárania na výslednú geometriu vyhotovených prietavov a rovnako aj na ich pórovitosť. Experiment bol rozdelený na štyri časti. V prvej časti experimentu sa ako spôsob povrchovej úpravy zvolilo frézovanie základného materiálu na rôzne drsnosti povrchu len z jednej strany. V druhom experimente sa frézovanie základného materiálu na rôzne drsnosti vykonalo z oboch strán. V tretej časti sa vykonalo len chemické čistenie základného materiálu v rôznych moridlách. Poslednou časťou experimentu bolo vyhotovenie prietavov na vzorkách získaných z pôvodného kusu zliatiny AW 2099 s hrúbkou 25,4 mm, kedy sa vynechal proces viacnásobného valcovania pri výrobe 3 mm hrubého plechu. Jednotlivé výsledky experimentov boli následne porovnané a na základe nich sa stanovil vhodný spôsob prípravy základných materiálov pred procesom zvárania, vďaka ktorému by v následne vyhotovených zvaroch bola potlačená, prípadne odstránená, pórovitosť.

3.3.1 Frézovanie základného materiálu z jednej strany

Prvým krokom experimentu bolo vyhotovenie plôch s rôznou hodnotou drsnosti. Plochy s rôznou drsnosťou boli vyhotovené na páse plechu zliatiny AW 2099, ktorého šírka bola 100 mm a hrúbka 3 mm. Zmenou parametrov frézovania sa dosiahli rôzne hodnoty drsnosti a vyhotovilo sa 12 rôznych plôch, ako je zobrazené na obr. 16.



Obr. 16 Pás plechu AW 2099 s plochami rôznej drsnosti

Frézovanie sa vykonalo na CNC obrábacom stroji DMG 105 linear. Pri frézovaní bola hĺbka rezu konštantná 0,5 mm, takže výsledná hrúbka zváraných vzoriek bola 2,5 mm. Po procese obrábania boli pomocou drsnomera Mitutoyo SJ-210 zmerané drsnosti jednotlivých vytvorených plôch. Drsnosť sa merala na každej ploche trikrát a následne sa stanovila priemerná hodnota drsnosti danej plochy.

Ďalej bolo v experimente vykonané pretavovanie laserovým lúčom. Tesne pred pretavovaním bola spodná časť plechu odmastená technickým benzínom a očistená koróziivzdornou kefou, aby sa zamedzilo vniknutiu oxidov zo spodnej časti plechu do zvarového kovu. Povrch pretavovaných plôch bol pred zváraním očistený

acetónom. Parametre zvarovania, ktorými boli v experimente vykonané prietavy, boli rovnaké ako v predchádzajúcom experimente a sú uvedené v tab. 3.

Po pretavovaní bolo vykonané meranie šírky povrchu jednotlivých prietavov ako aj ich koreňov. Na každom prietave sa vykonalo 6 meraní šírky koreňa a 6 meraní šírky povrchu pomocou ručného digitálneho mikroskopu Dino-Lite a priemerné hodnoty nameraných údajov sú zobrazené v tab. 8.

Tab. 8 Namerané hodnoty šírky povrchu a koreňa prietavu

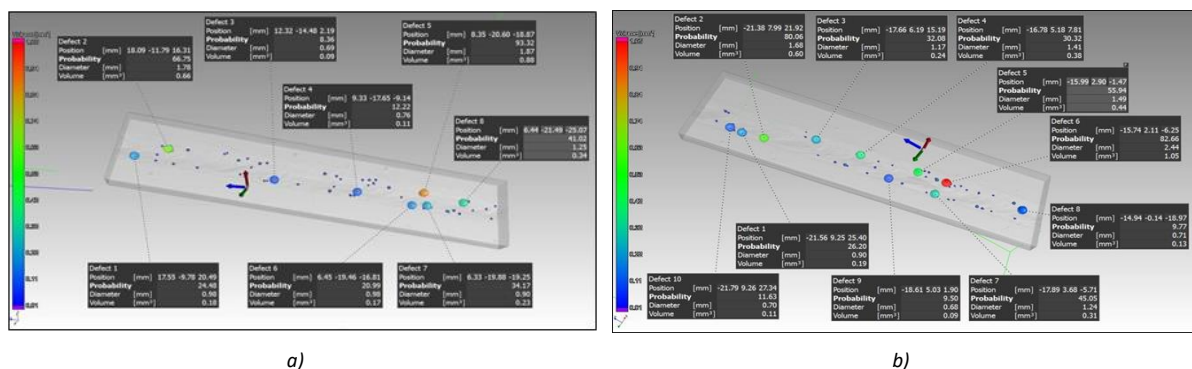
Vzorka	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]	Priemerná šírka povrchu húsenice [mm]	Priemerná šírka koreňa húsenice [mm]
kefa	3,103	3,581	13,814	4,66	3,64
1	0,752	0,894	4,121	4,60	3,53
2	5,926	6,981	26,037	4,22	3,53
3	6,922	8,067	30,741	4,00	3,43
4	9,124	10,837	42,128	4,31	3,66
5	3,565	4,629	19,000	4,27	3,71
6	5,858	6,897	25,358	4,30	3,51
7	8,812	10,437	36,426	4,66	3,45
8	5,689	6,460	22,105	4,41	3,53
9	5,093	5,780	20,083	4,34	3,45
10	11,514	14,957	61,706	4,37	3,52
11	10,883	13,495	54,131	4,41	3,46
12	14,797	16,946	55,829	4,42	3,61

Po meraní geometrických rozmerov prietavov boli jednotlivé prietavy vyrezané na pásovej píle a následne pomocou kotúčovej píly boli všetky prietavy narezané na rovnako dlhé vzorky s dĺžkou 50 mm. Štatistickou analýzou v programe GraphPad Prism 8 bola vykonaná lineárna regresná analýza na zistenie signifikancie medzi šírkou povrchu respektíve koreňa prietavu a drsnosťou základného materiálu. Po vykonaní štatistickej analýzy boli vzorky 1; 2; 3; 4; 5; 12 a vzorka s neofrézovaným povrchom podrobené prežarovacej skúške na počítačom tomografe Zeiss Metrotom 1500. Dáta charakterizujúce pórovitosť pri jednotlivých hodnotách drsnosti sú zobrazené v tab. 9. Výsledky z tejto analýzy boli rovnako podrobené lineárnej regresnej analýze v programe GraphPad Prism 8 na stanovenie závislosti medzi drsnosťou povrchu pretavovaného materiálu a pórovitosťou prietavu.

Tab. 9 Namerané hodnoty drsnosti vzoriek a pórovitosti z CT analýzy

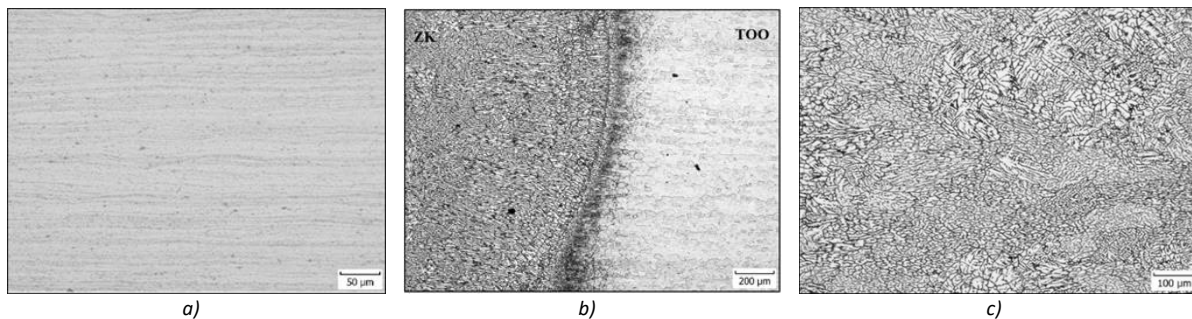
Vzorka	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]	CT		
				Priemerný rozmer pórov [mm]	Celkový objem pórov [mm^3]	Celkový povrch pórov [mm^2]
0 (kefa)	3,103	3,581	13,814	0,66	4,32	67,15
1	0,752	0,894	4,121	0,75	3,53	95,31
2	5,926	6,981	26,037	0,96	6,92	176,54
3	6,922	8,067	30,741	0,73	4,93	72,29
4	9,124	10,837	42,128	0,68	3,94	109
5	3,565	4,629	19,000	0,80	4,12	105,38
12	14,797	16,946	55,829	0,78	5,49	147,84

Prežarovacou skúškou boli vyhotovené 3D snímky vzoriek s vyznačenými pórmí, ktoré sa nachádzajú v prietavoch. Pri prežarovaní vzoriek sa nenastavoval žiadny prah detekcie póru, a teda zaznamenané boli póry všetkých priemerov. Pri desiatich najväčších detegovaných póroch sú v obrázkoch zaznamenané ich hodnoty. Na obr. 17 sú zobrazené ukážky vizualizácie pórovitosti vzorky čistenej kefou a vzorky 3 získanej CT analýzou. Prežarovacou skúškou sa zistilo, že najväčšie póry sa nachádzajú na okraji prietavu. Malé póry sú situované nielen na okraji prietavu, ale aj v jeho strede.



Obr. 17 Vizualizácia pórovitosti prietavov: a) vzorky očistenej kefou; b) vzorky 3

Vzorka 3 a vzorka bez ofrúzaného povrchu boli podrobené makroskopickej a mikroskopickej analýze. Na obr. 18–a je zobrazená mikroštruktúra základného materiálu vzorky 3, ktorá je tvorená pretiahnutými valcovanými zrnami. Prechod z teplom ovplyvnenej oblasti do zvarového kovu vo vzorke 3 je zdokumentovaný na obr. 18–b. V teplom ovplyvnenej oblasti došlo vplyvom tepla k rekryštalizácii zŕn, preto nie je možné v tejto oblasti pozorovať pôvodnú valcovanú štruktúru. Prechod medzi týmito dvomi oblasťami je tvorený hranicou stavenia. Hranica stavenia je tvorená rovnoosími globulárnymi zrnami. Zvarový kov vzorky 3 je zobrazený na obr. 18–c a je charakteristický liatou štruktúrou s dendritickou morfológiou. V medzidendritických priestoroch a na hraniciach dendridov sa môžu v závislosti od maximálnej teploty a výdrži na nej vyskytovať spevňujúce sekundárne fázy typu θ' (Al_2Cu), δ' (Al_3Li), ktoré sú typické pre tretiu generáciu hliník-lítiových zliatin, do ktorých zliatina AW 2099 patrí (Xiao, Zhang, 2014).

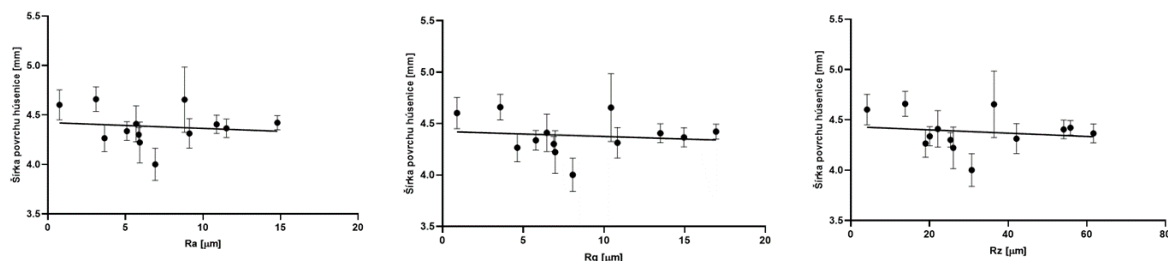


Obr. 18 Mikroskopická analýza vzorky 3: a) ZM; b) prechod z TOO do ZK; c) ZK

3.3.1.1 Vyhodnotenie experimentu

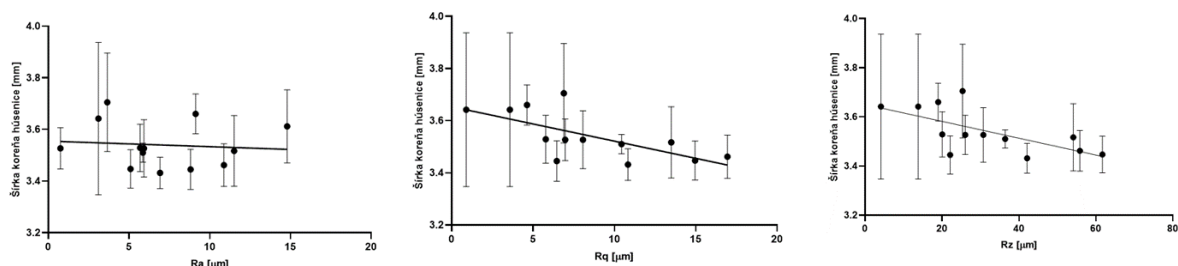
V experimente boli pred procesom zvarovania frézovaním vytvorené na páse plechu plochy rôznej drsnosti. Drsnosť takto vyhotovených plôch sa pohybovala v rozsahu $0,752 - 14,957 \mu\text{m}$ pre R_a , $0,894 - 16,946 \mu\text{m}$ pre R_q a $4,121 - 55,829 \mu\text{m}$ pre R_z a bola dosiahnutá frézovaním z jednej strany plechu pri rôznych parametroch frézovania a konštantnej hĺbke rezu $0,5 \text{ mm}$. Následne bola vykonaná lineárna regresná analýza, ktorou bola sledovaná závislosť medzi drsnosťou povrchu plochy a šírkou povrchu a koreňa prietavu vyhotoveného na danej ploche. Predpokladalo sa, že so zvyšujúcou sa drsnosťou povrchu zvarovaného materiálu, bude absorpcia laserového lúča väčšia, a teda, že sa počas zvarovania absorbuje viac tepla, ktoré spôsobí zmenu geometrie prietavu. Konkrétne sa predpokladalo, že čím bude drsnosť povrchu väčšia, tým bude prietav širší.

Štatistickou analýzou závislosti šírky povrchu prietavu od drsnosti povrchu zváraného materiálu sa zistilo, že v prípade Ra existuje 40,72 % pravdepodobnosť, že závislosť medzi drsnosťou a šírkou povrchu prietavu je čisto náhodná, a teda drsnosť nemá vplyv na šírku prietavu. V prípade Rq je táto pravdepodobnosť 88,72 % a pri hodnote drsnosti Rz dokonca 91,13 %. Grafické znázornenie závislosti šírky povrchu prietavu od drsnosti povrchu sú zobrazené na obr. 19.



Obr. 19 Grafická závislosť šírky povrchu húsenice od drsnosti materiálu

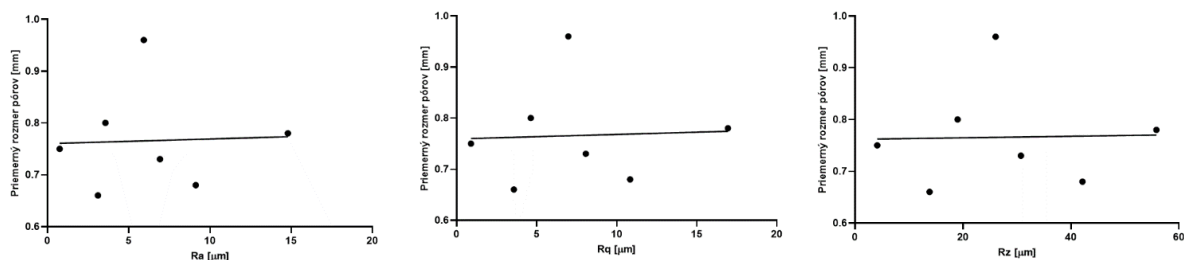
Štatistickou analýzou závislosti šírky koreňa prietavu od drsnosti povrchu sa preukázalo, že parameter Ra nemá vplyv na šírku koreňa prietavu a existuje 62,4 % pravdepodobnosť, že vzťah medzi týmito dvoma parametrami je čisto náhodný. V prípade závislosti šírky koreňa od parametrov drsnosti Rz a Rq bola zistená závislosť, a teda zo štatistického hľadiska tieto parametre drsnosti ovplyvňujú výslednú šírku koreňa. Grafické znázornenie vplyvu jednotlivých hodnôt drsnosti povrchu na šírku koreňa prietavu sú zobrazené na obr. 20.



Obr. 20 Grafická závislosť šírky koreňa húsenice od drsnosti materiálu

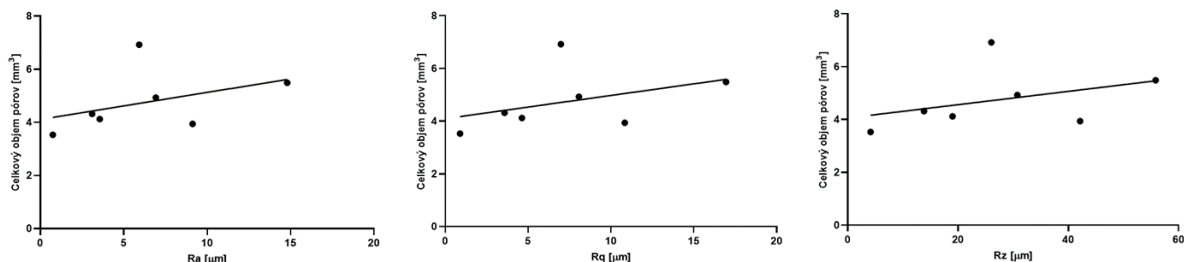
Pórovitosť sa v experimente zisťovala nedeštruktívnou CT analýzou, na ktorú boli vybrané vzorky, ktoré zahŕňali rozsah dosiahnutých drsností. Konkrétne išlo o vzorky s označením 1; 2; 3; 4; 5; 12 a vzorky, ktorej povrch nebol frézovaný, ale len očistený kefou z koróziivzdornej ocele. Aj v tomto prípade bola závislosť medzi sledovanými parametrami určená lineárnou regresnou analýzou. Sledovaný bol vplyv jednotlivých parametrov drsnosti Ra, Rz a Rq na objem, povrch a priemer pórov. Štatistickou analýzou sa nepotvrdil vplyv parametrov drsnosti na výslednú pórovitosť prietavov a ich vzájomný vzťah je čisto náhodný.

Štatistickou analýzou závislosti priemerného rozmeru pórov od drsnosti povrchu bolo zistené, že ani v jednom prípade nedošlo k tomu, aby bola hladina významnosti (P-value) menšia ako 0,05, čo znamená, že drsnosť povrchu nemá štatisticky významný vplyv na priemerný rozmer pórov. Graficky je závislosť medzi jednotlivými hodnotami drsnosti povrchu a priemerného rozmeru pórov zobrazená na obr. 21. Keďže namerané dáta majú výrazný rozptyl v hodnotách, tak boli štatisticky vyhodnotené ako nevýznamné.



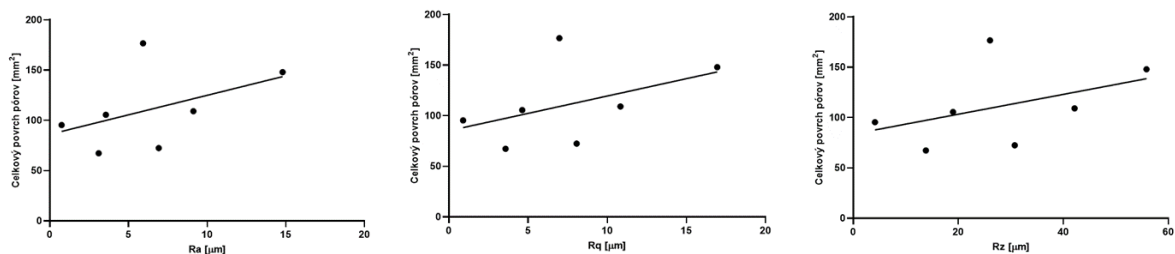
Obr. 21 Grafická závislosť priemernej veľkosti pórov materiálu od drsnosti povrchu materiálu

Štatistickou analýzou závislosti celkového objemu pórov od drsnosti povrchu bolo zistené, že žiadna z hodnôt drsnosti nemá signifikantný vplyv na celkový objem pórov, keďže ani v jednom prípade nebola hladina významnosti (P -value) menšia ako 0,05. Vzťah medzi drsnosťou povrchu a celkovým objemom pórov v prietavoch je teda úplne náhodný. Grafické znázornenie tejto závislosti je zobrazené na obr. 22. Keďže v nameraných hodnotách je výrazný rozptyl, tak boli tieto hodnoty štatistickým programom vyhodnotené ako nevýznamné.



Obr. 22 Grafická závislosť celkového objemu pórov od drsnosti materiálu

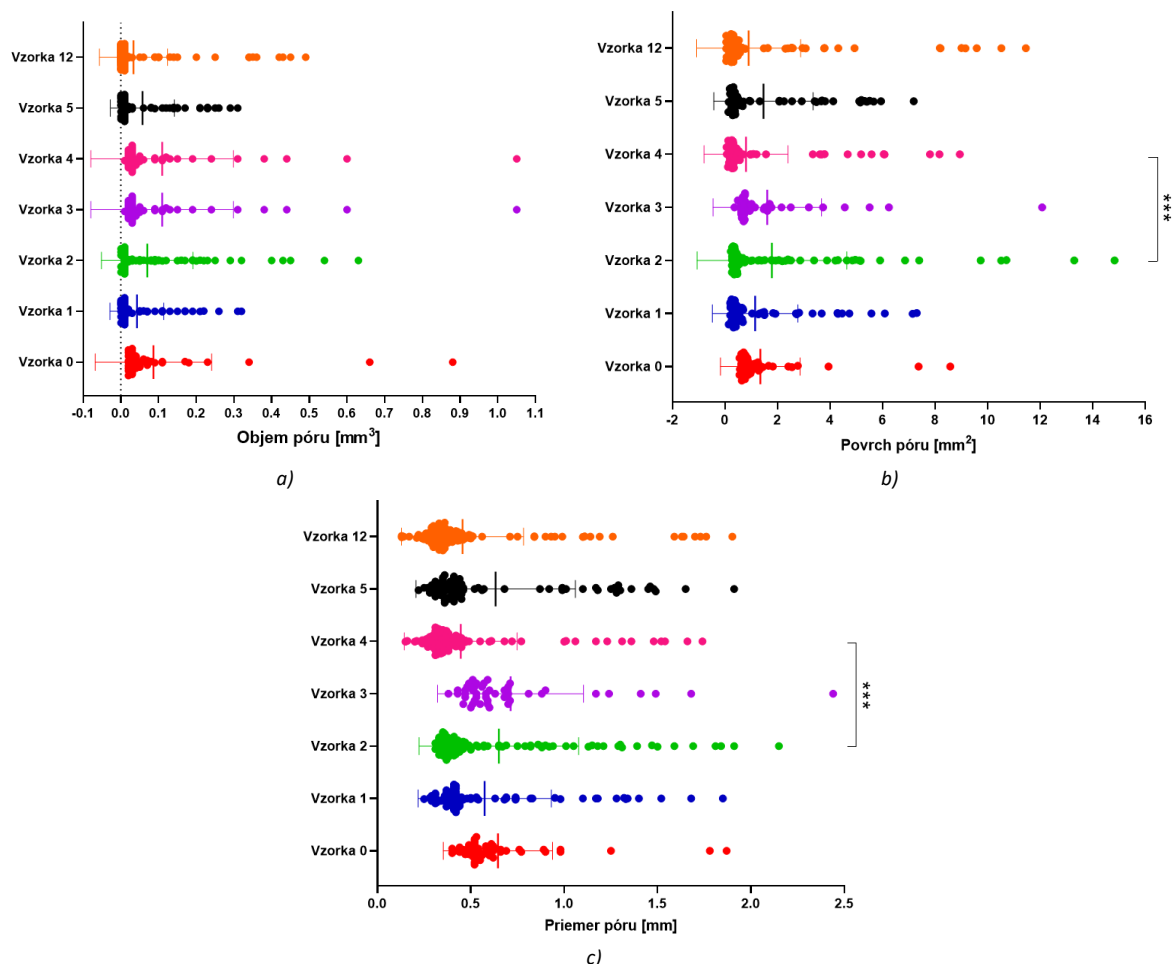
Zo štatistickej analýzy závislosti celkového povrchu pórov od drsnosti povrchu je zrejmé, že ani v tomto prípade nebola hladina významnosti (P -value) v žiadnom prípade menšia ako 0,05. Z čoho vyplýva, že drsnosť povrchu nemá signifikantný vplyv na celkový povrch pórov a vzťah medzi týmito dvoma premennými je čisto náhodný. Graficky sú výsledky tejto štatistickej analýzy zobrazené na obr. 23. Namerané hodnoty majú značný rozptyl, a teda sú štatisticky nevýznamné.



Obr. 23 Grafická závislosť celkového povrchu pórov od drsnosti materiálu

Na porovnanie jednotlivých vzoriek medzi sebou z hľadiska objemu, povrchu a priemeru pórov boli vykonané Shapiro-Wilk testy normality, ktorými sa zistilo, že ani jeden z pozorovaných súborov nemá normálne rozdelenie, a teda pre porovnanie jednotlivých vzoriek medzi sebou boli vykonané Kruskal – Wallis testy. Výsledky týchto testov ukázali, že hodnota hladiny významnosti (P -value) bola menšia ako 0,05 len v prípade porovnávania vzorky

číslo 2 a vzorky číslo 4 z hľadiska povrchu a polomeru pórov, avšak pri ostatných vzorkách nebola hodnota hladiny významnosti menšia ako 0,05, a teda drsnosť povrchu frézovanej vzorky nemá signifikantný vplyv na výslednú pórovitosť. Grafické znázornenie rozptylu nameraných hodnôt medzi jednotlivými vzorkami je možné vidieť na obr. 24.



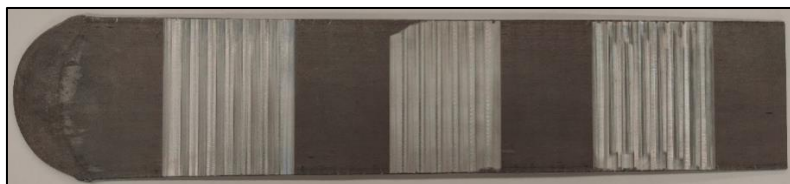
Obr. 24 Grafická závislosť pórovitosti všetkých skupín medzi sebou a) objem póru, b) povrch póru, c) priemer póru

V experimente bola vykonaná aj makroskopická a mikroskopická analýza prietavov vyhotovených pre rozdielne drsnosti povrchu zváraných materiálov. Výsledky ukázali, že frézovanie povrchu nemalo žiadny vplyv na výslednú štruktúru zvarového spoja, a teda aj v tomto experimente bola v základnom materiáli pozorovaná textúra po valcovaní. Teplom ovplyvnená oblasť prešla procesom rekryštalizácie, a teda jej mikroštruktúra bola tvorená polyedrickými zrnami. Aj v tomto prípade bola na prechode medzi teplom ovplyvnenou oblasťou a zvarovým kovom pozorovaná typická EQZ, ktorá je tvorená veľmi malými rovnoosými polyedrickými zrnami. Od tejto hranice stavenia smerom k osi prietavu boli pozorované pozdĺžne kolumnárne zrná, ktorých rast je orientovaný hlavným smerom odvodu tepla. Smerom k osi prietavu sa štruktúra zvarového kovu menila z kolumnárnych zŕn na typickú liatu štruktúru tvorenú dendridmi. Na hraniciach zŕn a v medzidendritických priestoroch boli optickým mikroskopom pozorované tmavé oblasti, ktoré sú pravdepodobne tvorené sekundárnymi spevňujúcimi fázami typu θ' (Al_2Cu), δ' ($\text{Al}_3\text{-Li}$). Prítomnosť týchto fáz v experimente potvrdil Lin a kolektív (Lin, Zheng and Li 2014).

Na začiatku experimentu sa predpokladalo, že s rastúcou hodnotou drsnosti pretavovaného materiálu bude narastať šírka prietavu, a zároveň pórovitosť týchto prietavov bude odstránená. Tento vedecký predpoklad nebol experimentom potvrdený, pretože sa nezistila závislosť medzi drsnosťou povrchu a šírkou prietavu, a zároveň CT analýzou prietavov boli v ich objeme detegované póry.

3.3.2 Frézovanie základného materiálu z oboch strán

V prvom kroku bolo vykonané frézovanie z oboch strán na CNC obrábacom stroji DMG 105 linear. Frézovanie sa vykonávalo na páse plechu zliatiny AW 2099 so šírkou 100 mm a hrúbkou 3 mm. Pri frézovaní bola hĺbka rezu konštantná 0,25 mm, takže výsledná hrúbka zváraných vzoriek bola aj pri tomto experimente 2,5 mm. Vytvorené plochy na páse plechu sú zobrazené na obr. 25. Po procese frézovania boli pomocou drsnomera Mitutoyo SJ-210 namerané drsnosti jednotlivých vytvorených plôch. Drsnosť sa merala trikrát na každej ploche z oboch strán a následne sa stanovila priemerná hodnota drsnosti sledovanej plochy. Parametre frézovania pre jednotlivé plochy, ako aj namerané drsnosti na jednotlivých plochách sú uvedené v tab. 10.



Obr. 25 Frézované plochy rôznej drsnosti

Tab. 10 Parametre frézovania a výsledné namerané hodnoty drsnosti

Vzorka	ap [mm]	vc [m·min ⁻¹]	n [ot·min ⁻¹]	fz [mm]	vf [mm·min ⁻¹]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
0 (kefa)	–	–	–	–	–	3,103	3,581	13,814
1	0,25	500	8478	0,01	254	0,367	0,453	2,230
2	0,25	500	8478	0,15	3815	1,543	1,985	7,613
3	0,25	500	8478	0,20	5087	5,201	5,819	20,703

Legenda: ap – hĺbka rezu, vc – rezná rýchlosť, n – frekvencia otáčania, fz – posuv na zub, vf – rýchlosť posuvu, Ra – stredná aritmetická odchýlka profilu, Rq – stredná kvadratická odchýlka profilu, Rz – aritmetický priemer najväčších výšok profilu

Po procese obrábania boli takto pripravené vzorky očistené technickým benzínom a následne tesne pred zváraním aj acetónom. Pri tomto experimente boli opäť namiesto zvarov vyhotovené prietavy. Parametre laserového zvárania boli rovnaké ako v prípade prvého experimentu, a sú zobrazené v tab. 3. Na každej ploche sa vyhotovili tri prietavy, aby bolo možné vykonať štatistickú analýzu. Následne boli na pásovej pile vyrezané z plechu jednotlivé prietavy, ktoré boli na kotúčovej pile narezané na vzorky s rovnakou dĺžkou 50 mm, aby mohli byť následne podrobené prežarovacej skúške na zariadení Zeiss Metrotom 1500. Výsledky z prežarovacej skúšky sú zobrazené v tab. 11.

Tab. 11 Výsledky CT analýzy vzoriek frézovaných z oboch strán

Vzorka		CT		
		Priemerný rozmer pórov [mm]	Celkový objem pórov [mm ³]	Celkový povrch pórov [mm ²]
bez čistenia	1	0,71	2,80	32,74
	2	0,65	5,07	62,40
	3	0,58	1,74	23,93
1	1.1	0,54	1,19	21,75
	1.2	0,43	0,65	14,45
	1.3	0,51	1,11	20,45

2	2.1	0,48	1,71	30,24
	2.2	0,46	1,32	22,91
	2.3	0,48	1,13	21,38
3	3.1	0,50	0,90	18,61
	3.2	0,25	1,10	19,54
	3.3	0,47	1,21	21,39

Poslednou časťou experimentu bolo štatistické porovnanie jednotlivých vzoriek medzi sebou. V GraphPad Prism 8 sa opäť ako prvé vykonali Shapiro-Wilk testy normality, ktorými sa zistilo, že ani jeden z pozorovaných súborov nemá normálne rozdelenie, a teda pre porovnanie jednotlivých vzoriek medzi sebou bol vykonaný neparametrický Kruskal – Wallis test. Aby sa zistilo, medzi ktorými porovnávanými dvojicami existuje štatistická závislosť, tak v rámci tohto testu bol vykonaný Dunnov post-hoc test viacnásobného porovňovania, ktorého výsledky sú zobrazené v tab. 12, tab. 13 a tab. 14.

Tab. 12 Štatistické vyhodnotenie pórovitosti všetkých skupín medzi sebou – objem pórov

Number of families	1				
Number of comparisons per family	6				
Alpha	0,05				
Dunn's multiple comparisons test	Mean rank diff,	Significant?	Summary	Adjusted P-value	
bez čistenia vs. vzorka 1	43,13	Yes	*	0,0165	A-B
bez čistenia vs. vzorka 2	50,47	Yes	**	0,0011	A-C
bez čistenia vs. vzorka 3	42,9	Yes	*	0,0155	A-D
vzorka 1 vs. vzorka 2	7,342	No	Ns	>0,9999	B-C
vzorka 1 vs. vzorka 3	-0,2309	No	Ns	>0,9999	B-D
vzorka 2 vs. vzorka 3	-7,573	No	Ns	>0,9999	C-D

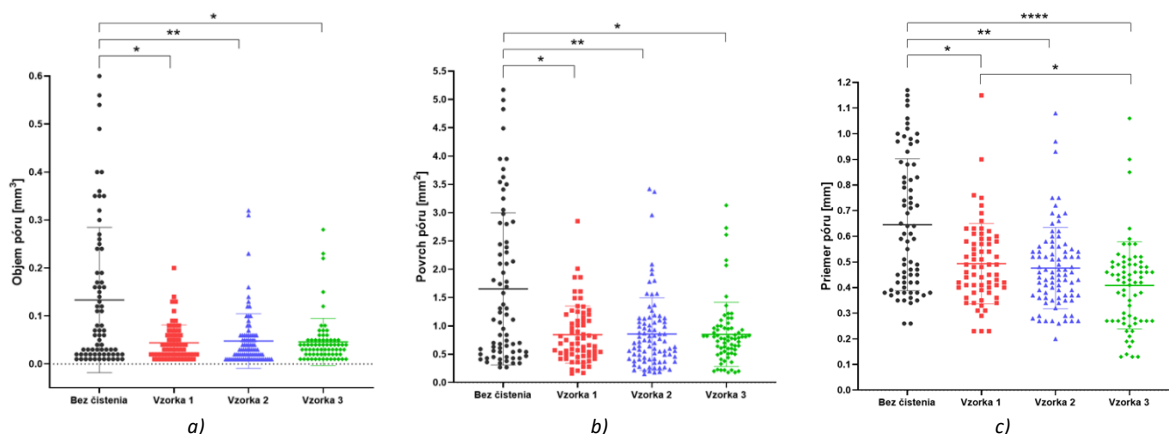
Tab. 13 Štatistické vyhodnotenie pórovitosti všetkých skupín medzi sebou – povrch pórov

Number of families	1				
Number of comparisons per family	6				
Alpha	0,05				
Dunn's multiple comparisons test	Mean rank diff,	Significant?	Summary	Adjusted P-value	
bez čistenia vs. vzorka 1	43,25	Yes	*	0,0175	A-B
bez čistenia vs. vzorka 2	49,67	Yes	**	0,0016	A-C
bez čistenia vs. vzorka 3	43,34	Yes	*	0,0153	A-D
vzorka 1 vs. vzorka 2	6,423	No	Ns	>0,9999	B-C
vzorka 1 vs. vzorka 3	0,08806	No	Ns	>0,9999	B-D
vzorka 2 vs. vzorka 3	-6,334	No	Ns	>0,9999	C-D

Tab. 14 Štatistické vyhodnotenie pórovitosti všetkých skupín medzi sebou – priemer pórov

Number of families	1				
Number of comparisons per family	6				
Alpha	0,05				
Dunn's multiple comparisons test	Mean rank diff,	Significant?	Summary	Adjusted P-value	
bez čistenia vs. vzorka 1	40,88	Yes	*	0,0293	A-B
bez čistenia vs. vzorka 2	50,98	Yes	**	0,0011	A-C
bez čistenia vs. vzorka 3	82,17	Yes	****	<0,0001	A-D
vzorka 1 vs. vzorka 2	10,1	No	Ns	>0,9999	B-C
vzorka 1 vs. vzorka 3	41,29	Yes	*	0,0285	B-D
vzorka 2 vs. vzorka 3	31,19	No	Ns	0,1392	C-D

Z výsledkov Dunn testov je možné povedať, že frézovanie vzoriek má signifikantný vplyv na priemer pórov, povrch pórov a objem pórov. Pri porovnaní nefrézovaných vzoriek s frézovanými je hodnota hladiny významnosti (P-value) nižšia ako 0,05, čiže frézovanie má vplyv na pórovitosť prietavov. Drsnosť jednotlivých plôch na sledované parametre pórovitosti vplyv nemajú, nakoľko v týchto prípadoch nebola hodnota hladiny významnosti (P-value) menšia ako 0,05. Grafické znázornenie rozptylu nameraných hodnôt medzi jednotlivými vzorkami je možné pozorovať na obr. 26.



Obr. 26 Grafická závislosť pórovitosti pri všetkých skupín medzi sebou a) objem póru, b) povrch póru, c) priemer póru

3.3.2.1 Vyhodnotenie experimentu

Na každej vzorke boli vyhotovené tri prietavy, ktoré boli ďalej v experimente podrobené nedeštruktívnej CT analýze s cieľom stanovenia vplyvu drsnosti povrchu vzoriek frézovaných z oboch strán na výslednú pórovitosť. Prežarovacej skúške bola podrobená aj vzorka, ktorej povrch nebol pred procesom zvárania frézovaný, ale bol len očistený technickým benzínom.

Výsledky CT analýzy boli štatisticky spracované s cieľom porovnania neofrézovanej vzorky a všetkých frézovaných vzoriek medzi sebou z hľadiska objemu pórov, priemeru pórov a povrchu pórov. Štatistickou analýzou rozptylu (ANOVA) sa zistilo, že pri všetkých sledovaných parametroch bola štatisticky významná závislosť medzi vzorkami, ktoré boli pred procesom pretavovania len čistené technickým benzínom a medzi vzorkami, ktoré boli frézované z oboch strán. Pri porovnaní frézovaných vzoriek medzi sebou sa nezistila štatistická závislosť. Výnimkou bolo porovnanie vzorky 1 a vzorky 3 z hľadiska priemeru pórov, kedy bolo zistené, že medzi týmito vzorkami existuje štatistická závislosť.

Pred vykonaním experimentu sa predpokladalo, že frézovaním materiálu pred zváraním z oboch strán dôjde k odstráneniu povrchových oxidov, a teda týmto postupom sa dosiahnu prietavy bez pórov. Tento vedecký predpoklad sa nepodarilo experimentom potvrdiť, avšak touto metódou došlo k zníženiu pórovitosti v porovnaní so základným materiálom, ktorého povrch nebol frézovaný.

3.3.3 Chemické čistenie základného materiálu

Na začiatku experimentu boli na pásovej píle pripravené vzorky s rozmerom 75×100×3 mm. Tieto vzorky boli rozdelené do 4 základných skupín na základe typu moridla. Ďalej sa tieto vzorky v rámci jednotlivých skupín delili na základe času morenia. Označenie vzoriek a sumarizácia postupu chemického čistenia je uvedené v tab. 15.

Tab. 15 Označenie vzoriek na základe typu moridla a času morenia

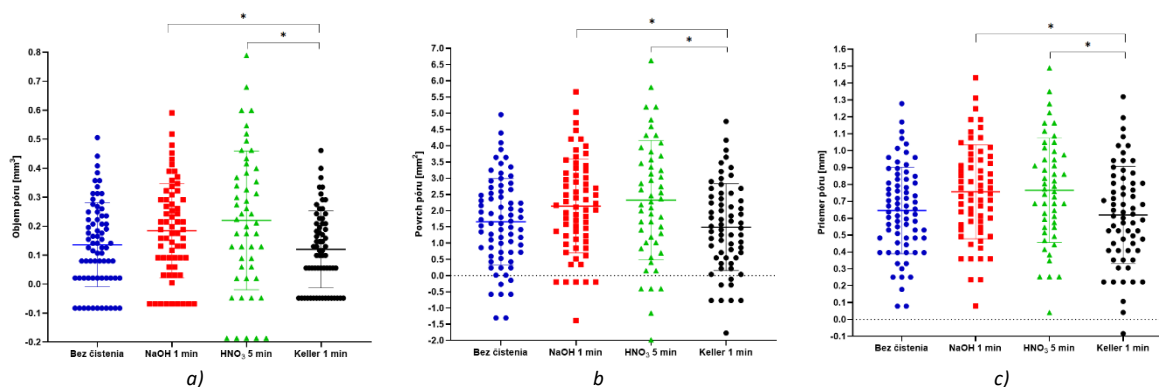
Číslo vzorky	Moridlo	Teplota morenia [°C]	Čas morenia [min]
1	Bez čistenia	-	-
2.1	10 % NaOH	50	1
2.2			3
2.3			5
2.4			8
2.5			10
3.1	30 % HNO ₃	20	1
3.2			3

3.3	Keller	20	5
3.4			8
3.5			10
4.1			1
4.2			3
4.3			5
4.4			8
4.5			10

Aby sa pri experimente eliminovalo riziko vzniku chýb vo zvarovom kove spôsobených vyhotovovaním tupých zvarov, ktoré by mohli ovplyvniť výsledky experimentu, tak aj v tomto experimente boli na vzorkách vyhotovované namiesto zvarov prietavy. Tie sa realizovali do 2 hodín od chemického čistenia vzoriek, aby sa zamedzilo opätovnému vzniku oxidov na povrchu vzoriek. Na každej vzorke boli vyhotovené tri prietavy, tak aby sa výsledky z analýz mohli štatisticky vyhodnotiť. Pretavovanie bolo vykonávané opäť parametrami laserového zvarovania, ktoré boli použité v prvej časti experimentu (tab. 3).

Prežarovacia skúška sa vykonávala na MTF STU na počítačom tomografe Metrotom 1500 od spoločnosti Zeiss. Skúška bola zameraná na stanovenie objemu pórov, povrchu jednotlivých pórov ako aj ich priemerov. Na túto skúšku bola vybraná z každej skupiny len jedna reprezentatívna podskupina, a to na základe vizuálneho hodnotenia povrchu základného materiálu po morení. Vzorky, ktoré boli vybrané na CT analýzu sú v tab. 15 vyznačené červenou farbou. Výsledky z prežarovacej skúšky boli následne štatisticky spracované v softvéri GraphPad Prism 8 štatistickou metódou ANOVA, kedy boli navzájom porovnané jednotlivé skupiny. Prvým štatistickým testom boli Shapiro-Wilk testy normality, ktorými sa zistilo, že ani jeden z vybraných súborov nemá normálne rozloženie, a tak bol vykonaný Dunn test viacnásobného porovnávania. Počas tohto testu boli medzi sebou porovnávané jednotlivé skupiny tak, že namerané hodnoty v jednotlivých prietavoch v rámci jednej skupiny boli porovnané s nameranými hodnotami druhej skupiny.

Vykonaním Dunn testov sa zistilo, že v prípade vzoriek morených v roztoku NaOH a HNO_3 existuje štatistická závislosť pri porovnávaní so vzorkou morenou v leptadle Keller, pretože pri týchto skupinách bola hodnota hladiny významnosti (P -value) menšia ako 0,05. Štatistická závislosť medzi týmito porovnávanými skupinami sa zistila pri všetkých sledovaných parametroch pórovitosti, a teda čistenie v leptadle Keller malo vplyv na pórovitosť v porovnaní so vzorkami morenými v ostatných moridlách. Grafické znázornenie rozptylu nameraných dát medzi jednotlivými skupinami je znázornené na obr. 27.



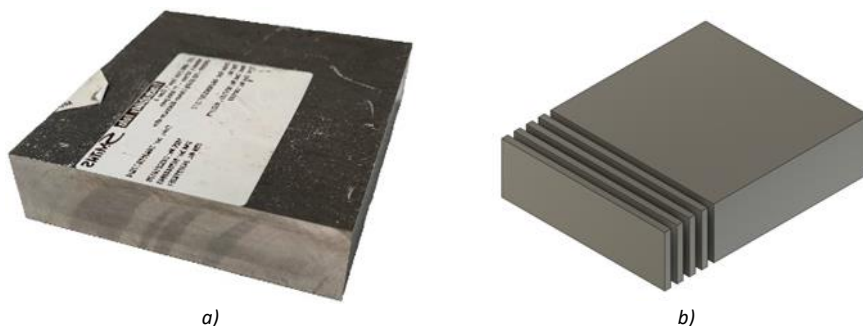
Obr. 27 Grafická závislosť pórovitosti jednotlivých skupín: a) objem póru, b) povrch póru, c) priemer póru

Pri tomto experimente sa predpokladalo, že po chemickom čistení budú vyhotovené prietavy bez pórov. Ani tento predpoklad nebol našim experimentom potvrdený, nakoľko CT analýzou sa v skúmaných prietavoch dokázala prítomnosť pórov.

3.3.4 Zváranie nevalcovaného základného materiálu

Po experimentoch, v ktorých bola povrchová vrstva oxidov odstraňovaná mechanicky pomocou koróziivzdornej kefy, odfrézovaním 0,5 mm vrstvy z povrchu plechu, odfrézovaním 0,25 mm vrstvy z oboch strán plechu a tiež po chemickom odstraňovaní oxidov v rôznych moridlách, vznikol ďalší vedecký predpoklad. V tom sa uvažuje o tom, že vysokotaviteľné oxidy, mastnoty a nečistoty mohli byť zatlačené do objemu materiálu v procese viacnásobného valcovania. K tomuto valcovaniu došlo pri procese výroby plechu. Dodaný materiál zo zliatiny AW 2099 mal hrúbku 25,4 mm. Takto hrubý materiál nie je možné zvärať laserovým lúčom na zariadení, ktoré je k dispozícii, a tak bola jeho hrúbka zredukovaná na 3 mm. Táto redukcia bola dosiahnutá postupným valcovaním za tepla, ktoré bolo vykonávané po rozpúšťacom žíhaní na teplote 530 °C s výdržou 1 h a následným rýchlym ochladením vo vode.

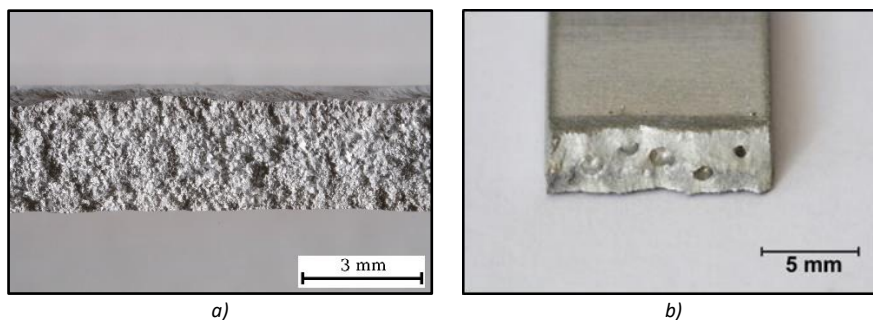
Aby sa potvrdil alebo vyvrátil tento vedecký predpoklad, tak ďalší experiment pozostával z vyhotovenia prietavov na základnom materiáli, ktorý týmto procesom redukcie hrúbky neprešiel. Prvým krokom experimentu bolo odfrézovanie vzoriek s hrúbkou 3 mm z objemu dodaného materiálu s hrúbkou 25,4 mm, ktorý je zobrazený na obr. 28–a). Na obr. 28–b) je zobrazené schematické znázornenie miesta, z ktorého boli vzorky vyfrézované. Frézovanie bolo vykonávané na MTF STU na 5-osovom HSC frézovacom centre DMG HSC 105 Linear.



Obr. 28 Dodaný materiál: a) nevalcovaný; b) schematické znázornenie vyfrézovaných vzoriek

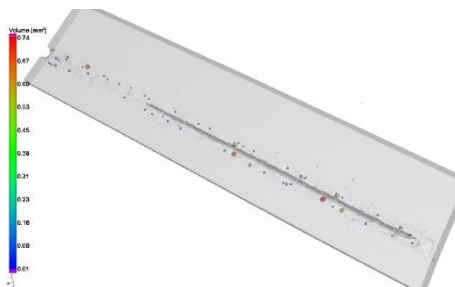
Takto odfrézované vzorky mali rozmery 100×25,4×3 mm a okamžite po obrábaní boli očistené technickým benzínom a pretavované, aby sa povrch nestihol medzi jednotlivými krokmi kontaminovať oxidmi. Parametre procesu zvárania zostali rovnaké ako pri predchádzajúcich častiach experimentu a sú uvedené v tab. 3.

Vo všetkých vyhotovených prietavoch došlo k vzniku trhliny. Táto chyba je pravdepodobne spôsobená tým, že vzorky mali veľmi malý rozmer, a z dôvodu výraznej tepelnej rozťažnosti hliník-lítiových zliatin došlo k vzniku trhliny. Na vzorkách bola pozorovaná lomová plocha vytvorená trhlinou (obr. 29–a) za účelom sledovania výskytu pórov v prietave. Na lomovej ploche neboli pozorované póry, ktoré sú pre porovnanie zreteľne viditeľné na obr. 29–b, kedy bola pozorovaná lomová plocha zvarového spoja v experimente zameranom na tepelné spracovanie po procese zvárania.



Obr. 29 Lomová plocha: a) prietavu nevalcovaného plechu, b) zváraného plechu (bez zváracieho materiálu)

Aj napriek vzniku trhlín bola jedna vzorka podrobená kontrolnej prežarovacej skúške na zariadení Zeis Metrotom 1500. Cieľom bolo zistiť, či sa v prietave nachádzajú póry. Prežarovacia analýza takto prasknutej vzorky nám nepriniesla dáta, ktoré by bolo možné štatisticky spracovať, ale počítačovou tomografiou bola získaná vizualizácia vzorky (obr. 30) spolu s pórmí nachádzajúcimi sa v prietave.



Obr. 30 Vizualizácia pórovitosti prietavu na nevalcovanej vzorke počítačovou tomografiou

Pri tomto experimente sa predpokladalo, že pretavovaním nevalcovanej vzorky sa odstráni metalurgická pórovitosť. Prežarovacou skúškou prietavov boli detegované póry v objeme prietavu, takže tento vedecký predpoklad je možné považovať za nesprávny.

3.4 Vplyv zvarovania so zváracím materiálom na pórovitosť zvarov

V ďalšom experimente boli plechy zo zliatiny AW 2099 zvárané laserovým lúčom s použitím zváracieho materiálu AW 5087 vo forme drôtu s priemerom $\varnothing 1,2$ mm. Prvým krokom experimentu bola príprava vzoriek s rozmermi $100 \times 100 \times 3$ mm. Tieto plechy boli čelnou frézou zarovnané tak, aby zvarové hrany boli rovné a medzi zváranými plechmi nevznikla zvarová medzera. Následne bola oblasť v okolí budúceho zvaru dôkladne očistená technickým benzínom. Po očistení boli tieto miesta zbavené oxidov mechanicky, použitím koróziivzdornej kefy. Po očistení vzorky kefou bolo miesto zvarovania opäť očistené technickým benzínom. Tesne pred samotným zvarovaním boli plechy očistené ešte acetónom.

Laserové zvarovanie sa vykonávalo parametrami zvarovania uvedenými v tab. 16—a vyhotovené boli 4 tupé zvarové spoje. Zvarovanie sa vykonávalo v špeciálnom prípravku, ktorý umožňuje použiť počas zvarovania formovací plyn, ktorý je rovnomerne privádzaný do miesta zvarovania. Upnutie zváraných plechov je zobrazené na obr. 31.

Tab. 16 Parametre laserového zvarovania so zvracím materiálom

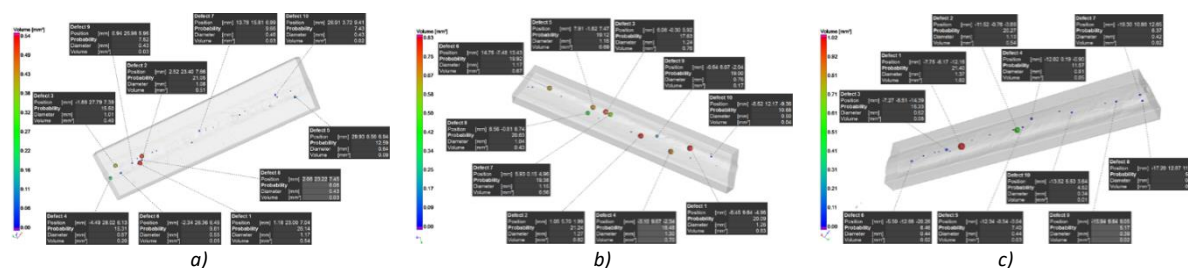
Výkon laserového lúča [W]	1850
Priemer optického vlákna [μm]	200
Rýchlosť zvarovania [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	12
Rýchlosť podávania drôtu [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]	1,1
Prietokové množstvo ochranného plynu (Ar) [$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$]	30
Prietokové množstvo formovacieho plynu (He) [$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$]	30
Fokusácia [mm]	+3



Obr. 31 Upnutie zvaraných plechov

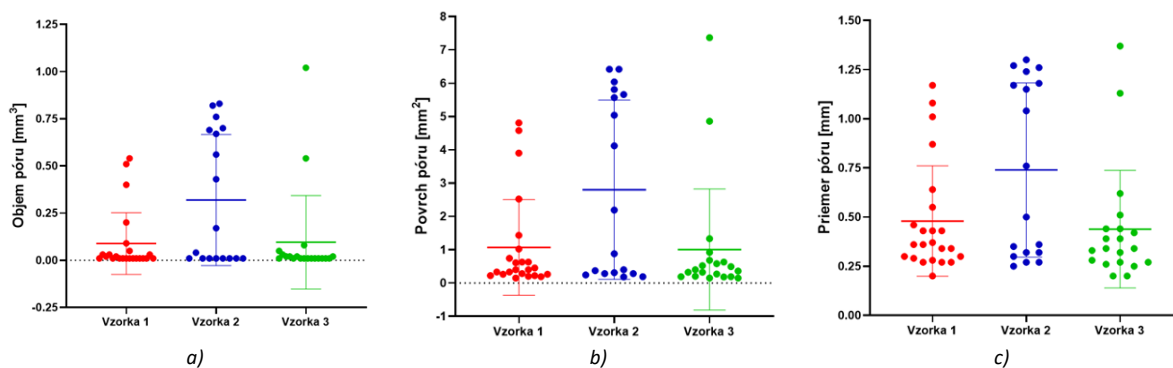
Po zvaraní boli jednotlivé zvary pomocou pásovej píly vyrezané a na kotúčovej pile narezané na vzorky s rovnakou dĺžkou 50 mm. Takto pripravené vzorky boli následne podrobené nedeštruktívnej prežarovacej skúške na MTF STU na počítačovom tomografe Zeiss Metrotom 1500. Prežarovacou skúškou boli sledované dáta ako celkový objem pórov, pozícia pórov, pomerný objem pórov a priemer pórov. Dáta získané prežarovacou skúškou boli ďalej štatisticky analyzované v programe GraphPad Prism 8.

Na obr. 32 je zaznamenané rozmiestnenie a charakteristika jednotlivých pórov vo vyhotovených zvaroch. Prežarovacou skúškou sa zistilo, že najväčšie póry vo zvarových spojoch mali priemer od 0,2 mm až po 1,37 mm a nachádzali sa na okraji prietavu. Menšie póry boli situované nie len na okraji prietavu, ale aj v jeho strede.



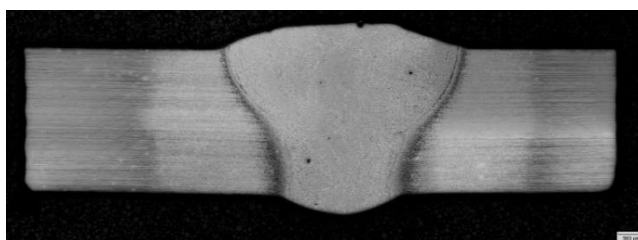
Obr. 32 Vizualizácia pórovitosti zvarov: a) vzorka 1; b) vzorka 2; c) vzorka 3

V štatistickom programe GraphPad Prism 8 boli vykonané Shapiro-Wilk testy normality, z ktorých výsledkov je možné dedukovať, že ani jeden z pozorovaných súborov nemá normálne rozdelenie a teda ďalším krokom bolo vykonanie Dunn testov. Na základe výsledkov týchto testov je možné konštatovať, že porovnávané zvary sa štatisticky významne nelíšia, keďže ani v jednom prípade nebola hodnota hladiny významnosti (P-value) menšia ako 0,05. Grafické znázornenie rozptylu jednotlivých nameraných hodnôt medzi jednotlivými zvarovými spojmami je možné pozorovať na obr. 33.



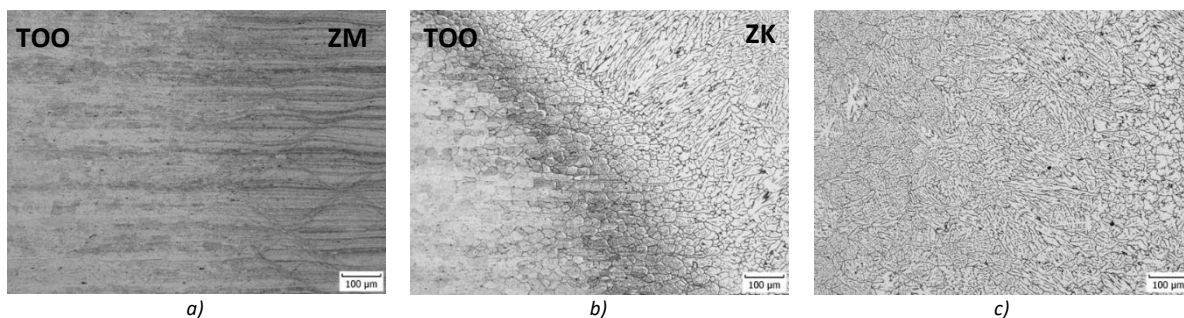
Obr. 33 Grafická závislosť vzoriek zvarovaných so zvaracím materiálom: a) objem póru, b) povrch póru, c) priemer póru

Keďže všetky vzorky boli vyhotovované pri rovnakých parametroch zvarovania, tak na makroskopickú a mikroskopickú analýzu bola vybraná len jedna vzorka, ktorá bol analyzovaná na optickom mikroskope CarlZeiss Jena Neophot 32. Makroskopická snímka zvarového spoja je zobrazená na obr. 34. Na makroskopickú snímku sú jasne viditeľné jednotlivé časti zvarového spoja. Šírka zvarového kovu bola na povrchu približne 4 mm a v koreni 2 mm. Šírka teplom ovplyvnenej oblasti bola približne 1 – 2 mm na každej strane zvarového spoja. Prevýšenie zvarového kovu bolo približne 0,5 mm a pretečenie koreňa 0,4 mm. Vo zvarovom kove boli makroskopickou analýzou pozorované aj póry, ktorých priemer bol približne 0,05 – 0,1 mm.



Obr. 34 Makroskopický snímok zvarového spoja vyhotoveného laserovým zvaraním so zvaracím materiálom

Na obr. 35–a je zobrazený prechod zo základného materiálu do zvarového kovu. Základný materiál je charakteristický valcovanou mikroštruktúrou, ktorá je tvorená mierne zvlnenými zrnami. Na obr. 35–b je zobrazený prechod z teplom ovplyvnenej oblasti do zvarového kovu. Vplyvom zvarovania, došlo v teplom ovplyvnenej oblasti k rekryštalizácii, a teda táto oblasť už nevykazuje známky valcovanej štruktúry, ale zrná v tejto oblasti sú rovnoosé. Na hranici stavenia, vo vysoko vyhriatej teplom ovplyvnenej, sa vytvorila úzka oblasť tvorená zoskupenými globulárnymi zrnami. Od tejto oblasti stavenia smerom do zvaru je možné pozorovať pretiahnuté kolumnárne zrná zvarového kovu, ktoré kopírujú smer odvodu tepla pri procese zvarovania. Mikroštruktúra zvarového kovu je zobrazená na obr. 35–c. Zvarový kov je tvorený dendritickou štruktúrou. Na hraniciach zŕn a v medzidendritických priestoroch došlo pravdepodobne k vylúčeniu precipitátov, ktoré je na snímke zvarového kovu možné pozorovať ako tmavé miesta.



Obr. 35 Mikroštruktúra zvarového spoja: a) prechod zo ZM do TOO; b) prechod z TOO do ZK; c) ZK

Posledný vedecký predpoklad hovoril o tom, že laserovým zvarovaním zliatiny AW 2099 so zvracím materiálom AW 5087 sa vyhotovia zvarové spoje bez pórov. Ani toto nebolo experimentom dokázané, hoci k zníženiu pórovitosti nepochybne došlo.

3.5 Vyhodnotenie experimentov

Po vykonaní experimentov, pri ktorých boli zvarované materiály pred procesom zvarovania povrchovo upravené rôznymi spôsobmi bola vykonaná štatistická analýza metódy rozptylu na stanovenie závislosti medzi jednotlivými vzorkami, z hľadiska objemu, povrchu a priemeru pórov. Prvým krokom štatistickej analýzy bolo vykonanie Shapiro-Wilk testov normality, aby sa zistilo, či jednotlivé dáta majú normálne rozdelenie. Týmito testami sa zistilo, že ani v jednom prípade nemajú vzorky normálne rozdelenie, a teda ďalším krokom bolo vykonanie Dunn testov. Vzhľadom na veľký rozsah testu, kedy bolo vykonaných 78 porovnaní, sú v tab. 17, tab. 18 a tab. 19 zobrazené len také závislosti, pri ktorých hodnota hladiny významnosti bola menšia ako 0,05, a teda porovnávané súbory dát sú štatisticky významné.

Tab. 17 Štatistické vyhodnotenie pórovitosti všetkých spôsobov úpravy povrchu medzi sebou – objem pórov

Number of families	1			
Number of comparisons per family	78			
Alpha	0,05			
Dunn's multiple comparisons test	Mean rank diff,	Significant?	Summary	Adjusted P-value
NaOH/1min vs. 1xfrézovanie(Ra=0,752µm)	178	Yes	**	0,0014
NaOH/1min vs. 1xfrézovanie(Ra=3,565µm)	156,4	Yes	*	0,0129
NaOH/1min vs. 1xfrézovanie(Ra=14,797µm)	159,3	Yes	**	0,0098
NaOH/1min vs. 2xfrézovanie(Ra=0,367µm)	182,7	Yes	****	<0,0001
NaOH/1min vs. 2xfrézovanie(Ra=1,543µm)	196,2	Yes	****	<0,0001
NaOH/1min vs. 2xfrézovanie(Ra=5,201µm)	179,1	Yes	****	<0,0001
HNO ₃ /5 min vs. 1xfrézovanie(Ra=0,752µm)	180,8	Yes	**	0,0029
HNO ₃ /5 min vs. 1xfrézovanie(Ra=3,565µm)	159,2	Yes	*	0,0222
HNO ₃ /5 min vs. 1xfrézovanie(Ra=14,797µm)	162,1	Yes	*	0,0172
HNO ₃ /5 min vs. 2xfrézovanie(Ra=0,367µm)	185,5	Yes	***	0,0003
HNO ₃ /5 min vs. 2xfrézovanie(Ra=1,543µm)	199	Yes	****	<0,0001
HNO ₃ /5 min vs. 2xfrézovanie(Ra=5,201µm)	181,9	Yes	***	0,0003
1xfrézovanie(Ra=5,926µm) vs. 2xfrézovanie(Ra=1,543µm)	153,2	Yes	**	0,0073

Tab. 18 Štatistické vyhodnotenie pórovitosti všetkých spôsobov úpravy povrchu medzi sebou – povrch pórov

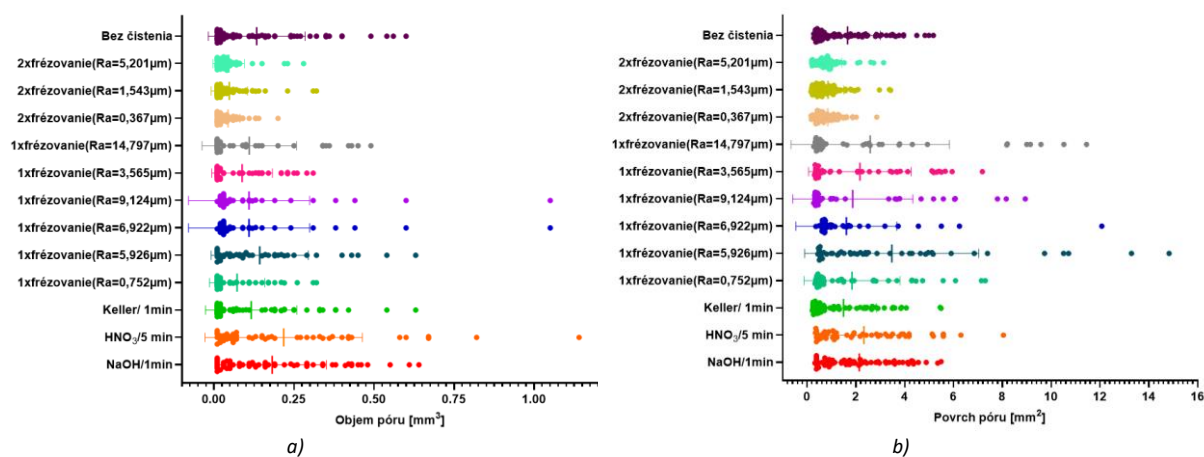
Number of families	1			
Number of comparisons per family	78			
Alpha	0,05			
Dunn's multiple comparisons test	Mean rank diff,	Significant?	Summary	Adjusted P-value
NaOH/1min vs. 1xfrézovanie(Ra=9,124µm)	166,7	Yes	**	0,0052
NaOH/1min vs. 2xfrézovanie(Ra=0,367µm)	172,3	Yes	***	0,0003
NaOH/1min vs. 2xfrézovanie(Ra=1,543µm)	186,8	Yes	****	<0,0001
NaOH/1min vs. 2xfrézovanie(Ra=5,201µm)	169,6	Yes	***	0,0004
HNO ₃ /5 min vs. 1xfrézovanie(Ra=9,124µm)	167,4	Yes	*	0,0117

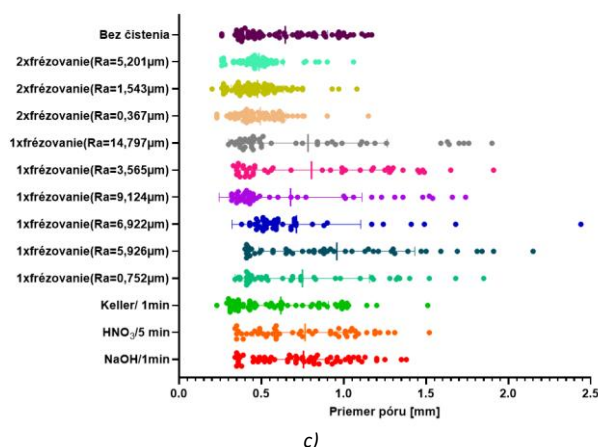
HNO ₃ /5 min vs. 2xfrézovanie(Ra=0,367μm)	173	Yes	**	0,0013
HNO ₃ /5 min vs. 2xfrézovanie(Ra=1,543μm)	187,4	Yes	****	<0,0001
HNO ₃ /5 min vs. 2xfrézovanie(Ra=5,201μm)	170,2	Yes	**	0,0015
Keller/ 1min vs. 1xfrézovanie(Ra=5,926μm)	-154,7	Yes	*	0,0169
1xfrézovanie(Ra=5,926μm) vs. 1xfrézovanie(Ra=9,124μm)	203,5	Yes	***	0,0005
1xfrézovanie(Ra=5,926μm) vs. 2xfrézovanie(Ra=0,367μm)	209,1	Yes	****	<0,0001
1xfrézovanie(Ra=5,926μm) vs. 2xfrézovanie(Ra=1,543μm)	223,6	Yes	****	<0,0001
1xfrézovanie(Ra=5,926μm) vs. 2xfrézovanie(Ra=5,201μm)	206,4	Yes	****	<0,0001

Tab. 19 Štatistické vyhodnotenie pórovitosti všetkých spôsobov úpravy povrchu medzi sebou – priemer pórov

Number of families	1			
Number of comparisons per family	78			
Alpha	0,05			
Dunn's multiple comparisons test	Mean rank diff,	Significant?	Summary	Adjusted P-value
NaOH/1min vs. 2xfrézovanie(Ra=0,367μm)	179,6	Yes	***	0,0001
NaOH/1min vs. 2xfrézovanie(Ra=1,543μm)	201,1	Yes	****	<0,0001
NaOH/1min vs. 2xfrézovanie(Ra=5,201μm)	182,5	Yes	****	<0,0001
HNO ₃ /5 min vs. 2xfrézovanie(Ra=0,367μm)	178,2	Yes	***	0,0007
HNO ₃ /5 min vs. 2xfrézovanie(Ra=1,543μm)	199,7	Yes	****	<0,0001
HNO ₃ /5 min vs. 2xfrézovanie(Ra=5,201μm)	181,1	Yes	***	0,0004
Keller/ 1min vs. 1xfrézovanie(Ra=5,926μm)	-175,7	Yes	**	0,0021
1xfrézovanie(Ra=0,752μm) vs. 2xfrézovanie(Ra=1,543μm)	153,3	Yes	**	0,008
1xfrézovanie(Ra=5,926μm) vs. 1xfrézovanie(Ra=9,124μm)	186,3	Yes	**	0,003
1xfrézovanie(Ra=5,926μm) vs. 2xfrézovanie(Ra=0,367μm)	238,8	Yes	****	<0,0001
1xfrézovanie(Ra=5,926μm) vs. 2xfrézovanie(Ra=1,543μm)	260,3	Yes	****	<0,0001
1xfrézovanie(Ra=5,926μm) vs. 2xfrézovanie(Ra=5,201μm)	241,7	Yes	****	<0,0001
1xfrézovanie(Ra=6,922μm) vs. 2xfrézovanie(Ra=0,367μm)	155,4	Yes	*	0,0137
1xfrézovanie(Ra=6,922μm) vs. 2xfrézovanie(Ra=1,543μm)	176,9	Yes	***	0,0006
1xfrézovanie(Ra=6,922μm) vs. 2xfrézovanie(Ra=5,201μm)	158,3	Yes	**	0,009
1xfrézovanie(Ra=3,565μm) vs. 2xfrézovanie(Ra=1,543μm)	154,2	Yes	**	0,0072
1xfrézovanie(Ra=14,797μm) vs. 2xfrézovanie(Ra=1,543μm)	141,9	Yes	*	0,0251

Signifikantný vzťah vo všetkých sledovaných parametroch pórovitosti bol zistený medzi vzorkou morenou v roztoku NaOH a vzorkami, ktoré boli frézované z oboch strán, bez rozdielu na drsnosť frézovanej plochy. Zároveň vo všetkých sledovaných parametroch sa zistil štatisticky významný vzťah medzi vzorkami frézovanými z oboch strán a vzorkou morenou v HNO₃. Štatisticky významná závislosť vo všetkých sledovaných parametroch sa zistila aj pri vzorke frézovanej z jednej strany na drsnosť Ra = 5,926 μm a vzorkou, ktorá bola frézovaná z oboch strán na drsnosť Ra = 1,543 μm. Grafické znázornenie rozptylu jednotlivých nameraných hodnôt medzi jednotlivými vzorkami je zobrazené na obr. 36.





Obr. 36 Grafická závislosť vzoriek s rôznou povrchovou úpravou: a) objem póru, b) povrch póru, c) priemer póru

Poslednou štatistickou analýzou boli Dunn testy, kedy sa porovnávali vzorky, ktorých povrch bol pred zváraním upravený rôznymi spôsobmi a vzoriek vyhotovených s použitím zváracieho materiálu. Skúmaný bol ich vzájomný vzťah pri sledovaných parametroch pórovitosti. Z dôvodu 91 porovnávaných skupín sú v tab. 20, tab. 21 a tab. 22 zobrazené len dvojice, pri ktorých bola hodnota hladiny významnosti menšia ako 0,05, a teda vzťah medzi nimi nie je náhodný.

Tab. 20 Štatistické vyhodnotenie pórovitosti všetkých spôsobov úpravy povrchu a vzoriek so zváracím materiálom medzi sebou – objem pórov

Number of families	1			
Number of comparisons per family	91			
Alpha	0,05			
Dunn's multiple comparisons test	Mean rank diff,	Significant?	Summary	Adjusted P-value
NaOH/1min vs. Zvárací materiál	211,7	Yes	****	<0,0001
HNO ₃ /5 min vs. Zvárací materiál	215,5	Yes	****	<0,0001
1xfrézovanie(Ra=5,926µm) vs. Zvárací materiál	167,1	Yes	*	0,0206

Tab. 21 Štatistické vyhodnotenie pórovitosti všetkých spôsobov úpravy povrchu a vzoriek so zváracím materiálom medzi sebou – povrch pórov

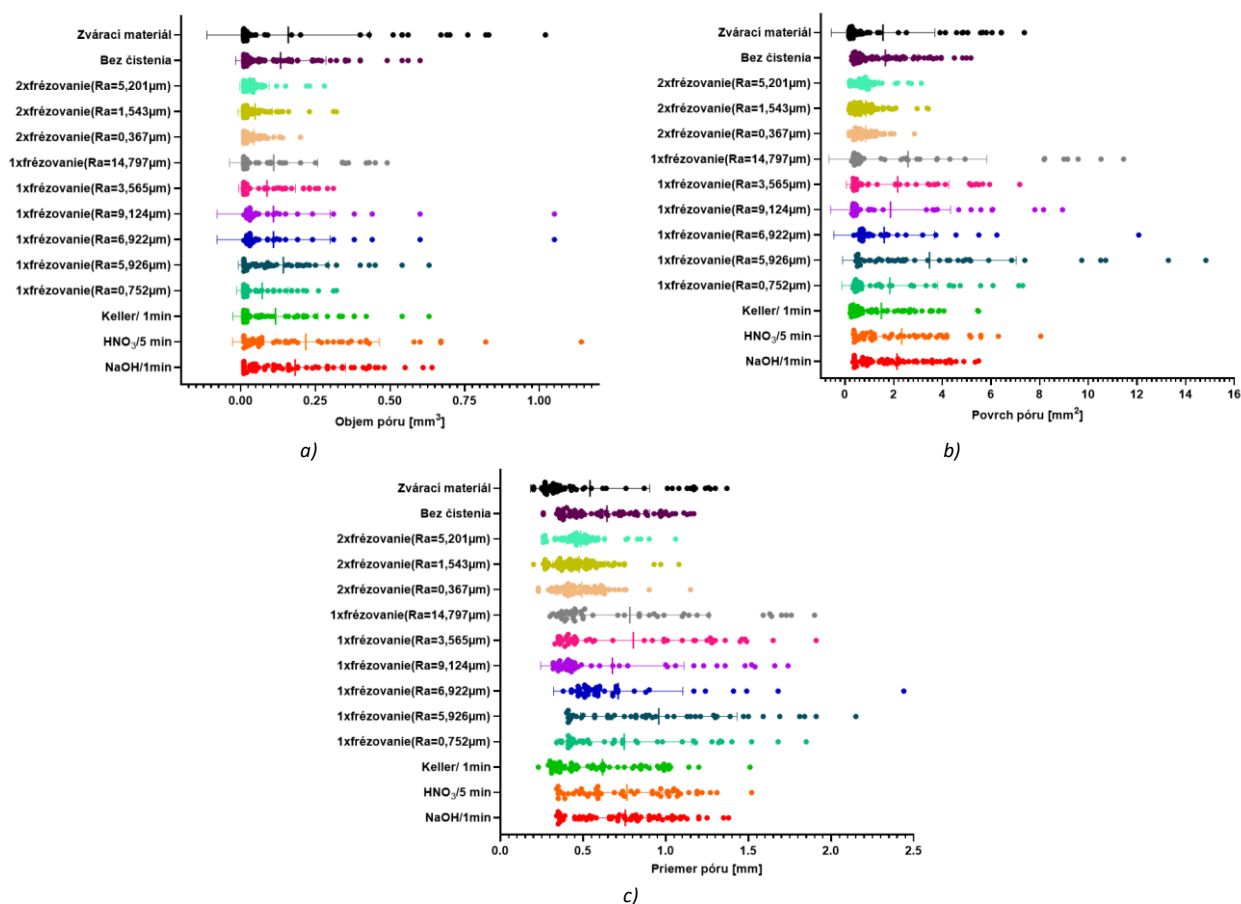
Number of families	1			
Number of comparisons per family	91			
Alpha	0,05			
Dunn's multiple comparisons test	Mean rank diff,	Significant?	Summary	Adjusted P-value
NaOH/1min vs. Zvárací materiál	223,6	Yes	****	<0,0001
HNO ₃ /5 min vs. Zvárací materiál	224,7	Yes	****	<0,0001
Bez čistenia vs. Zvárací materiál	147,1	Yes	*	0,0253

Tab. 22 Štatistické vyhodnotenie pórovitosti všetkých spôsobov úpravy povrchu a vzoriek so zváracím materiálom medzi sebou – priemer pórov

Number of families	1			
Number of comparisons per family	91			
Alpha	0,05			
Dunn's multiple comparisons test	Mean rank diff,	Significant?	Summary	Adjusted P-value
NaOH/1min vs. Zvárací materiál	232,2	Yes	****	<0,0001
HNO ₃ /5 min vs. Zvárací materiál	231	Yes	****	<0,0001
1xfrézovanie(Ra=0,752µm) vs. Zvárací materiál	184,1	Yes	**	0,0051
1xfrézovanie(Ra=5,926µm) vs. Zvárací materiál	295,5	Yes	****	<0,0001
1xfrézovanie(Ra=6,922µm) vs. Zvárací materiál	208,7	Yes	***	0,0004
1xfrézovanie(Ra=3,565µm) vs. Zvárací materiál	185,2	Yes	**	0,0046
1xfrézovanie(Ra=14,797µm) vs. Zvárací materiál	171,8	Yes	*	0,0154
Bez čistenia vs. Zvárací materiál	151,3	Yes	*	0,0167

Signifikantný vzťah vo všetkých sledovaných parametroch pórovitosti bol zistený medzi vzorkou vyhotovenou s použitím zváracieho materiálu a vzorkami morenými 1 minútu v roztoku NaOH a 5 minút v HNO₃. Grafické znázornenie rozptylu jednotlivých nameraných hodnôt medzi jednotlivými vzorkami je zobrazené

na obr. 37.



Obr. 37 Grafická závislosť vzoriek s rôznou povrchovou úpravou a vzorky zvárané so zváracím materiálom: a) objem póru, b) povrch póru, c) priemer póru

4 Výsledky a prínosy dizertačnej práce

Na základe vykonaných experimentov boli stanovené nasledovné závery:

- Procesom zvárania došlo v zliatine AW 2099 k poklesu mechanických vlastností a tvrdosti v porovnaní s vlastnosťami materiálu v dodanom stave. Experimentom sa dokázalo, že tepelným spracovaním po procese zvárania došlo k zlepšeniu mechanických vlastností skúmaných vzoriek v porovnaní so vzorkami, ktoré neboli tepelne spracované.
- Na zlepšenie mechanických vlastností (zvýšenie pevnosti) a zvýšenie tvrdosti jednotlivých oblastí zvaru sa odporúča tepelné spracovanie zvarových spojov, pozostávajúce z rozpúšťacieho žihania na teplote 540 °C počas 1,5 h a následného umelého starnutia na teplote 150 °C po dobu 12 h. Týmto tepelným spracovaním sa dosiahla pevnosť 430,5 MPa, čo je približne 96,4 % pevnosti materiálu v dodanom stave a medza klzu o 6,4 % nižšia oproti dodanej zliatiny (395,25 MPa). Pri tomto režime sa dosiahla najvyššia dohovorená medza klzu spomedzi všetkých vzoriek. Najvyššia pevnosť bola dosiahnutá pri vzorke B3, avšak z ekonomického hľadiska je odporúčaný režim tepelného spracovania výhodnejší. Tvrdosť jednotlivých oblastí zvarového spoja nebola pri tomto režime spomedzi všetkých vzoriek najvyššia, ale dosiahlo sa jej približné vyrovnanie naprieč zvarovým spojom. Tvrdosť zvarového kovu bola po tepelnom spracovaní približne 141,5 HV, v teplom ovplyvnenej oblasti 143,8 HV a v základnom materiáli 146,7 HV.
- Z hľadiska povrchovej úpravy pred procesom zvárania, a teda spôsobu odstránenia povrchovej vrstvy oxidov s cieľom potlačiť výskyt pórov, je možné ako najlepší postup odporučiť mechanické odstránenie oxidov frézovaním zváraného materiálu pred procesom zvárania z oboch strán s hĺbkou rezu 0,25 mm. Touto metódou došlo k najvýraznejšiemu potlačeniu pórovitosti spomedzi všetkých metód, avšak nedošlo k jej úplnému odstráneniu. Úplné odstránenie pórovitosti by bolo pravdepodobne možné použitím laserového lúča, ktorého výkon je vyšší ako 10 kW a zmenou parametrov zvárania, konkrétne znížením rýchlosti zvárania. Tieto predpoklady by však bolo potrebné potvrdiť ďalšími experimentmi.
- Keďže v praxi nie je vždy možné komponenty pred zváraním frézovať z oboch strán, ako ďalší spôsob, ktorým sa v experimente dosiahlo potlačenie, avšak nie úplné odstránenie pórovitosti je vhodné zvoliť zváranie s použitím zvaracieho materiálu. Pri tejto metóde sa odporúča použiť zvarací materiál z vytvrditeľnej zliatiny hliníka, pretože v opačnom prípade dôjde procesom zvárania k nezvratnému zhoršeniu mechanických vlastností zvarového spoja v dôsledku jeho zmäknutia.
- Ako dodatočný experiment k vykonaným experimentom by bolo vhodné vykonať štúdiu, ktorá by bola zameraná na stanovenie tepelného spracovania po procese zvárania vzoriek, ktoré boli zvárané laserovým lúčom s použitím vytvrditeľného zvaracieho materiálu zo zliatiny hliníka. Touto metódou sa predpokladá, že výsledné zvarové spoje budú mať mechanické vlastnosti podobné základnému materiálu a zároveň limitovanú pórovitosť vo zvarovom kove.

ZÁVER

Znižovanie prevádzkových nákladov možno považovať za súčasný trend, ktorý má priamy súvis s nahrádzaním ťažších oceľových materiálov za materiály s nižšou hmotnosťou, akými sú aj hliníkové zliatiny. Hliníkové zliatiny možno považovať za dominantný materiál používaný na konštrukcie, i keď čoraz viac možno sledovať smerovanie vývoja konštrukcií aj kompozitami. Za najvyvinutejšiu generáciu Al–Li zliatin možno pokladať práve súčasnú, tretiu. Jej vývoj súvisel nielen s optimalizáciou chemického zloženia a spracovania ale aj charakterizáciou precipitátov (Dorin, Vahid and Lamb, 2018). Použitím Al–Li zliatin je možné znížiť hmotnosť trupu lietadiel až o 10 % a prevádzku a údržbu dokonca o 30 % v porovnaní s kompozitnými materiálmi (Djukanovic, 2017).

Medzi hliník–lítiové zliatiny s atraktívnymi vlastnosťami pre letecký a kozmický priemysel patrí aj zliatina AW 2099, ktorej zvariteľnosť bola skúmaná v tejto práci. Letecký a kozmický priemysel sa okrem moderných materiálov s čoraz výhodnejšími vlastnosťami zameriava aj na aplikovanie progresívnejších spôsobov spájania, ktorými sú napríklad zváranie laserovým lúčom a trecie premiešavacie zváranie. Keďže trecie premiešavacie zváranie nie je možné použiť pri všetkých aplikáciách, táto práca bola zameraná na zváranie zliatiny AW 2099 laserovým lúčom.

Zváranie laserovým lúčom Al–Li zliatin zo sebou prináša niekoľko problémov, ktoré je potrebné brať do úvahy vzhľadom na výslednú kvalitu a následné použitie zvarového spoja. Práve zmena mechanických vlastností po procese zvárania je jedným z nich. Touto zmenou je najmä zmäknutie, teda zníženie pevnosti a tvrdosti v dôsledku zvárania, čo možno považovať za veľmi nežiadúce pre oblasť praktického využitia. V práci bol skúmaný spôsob obnovenia mechanických vlastností zvarových spojov zliatiny AW 2099 po procese zvárania laserovým lúčom. Nakoľko táto zliatina patrí medzi vytvrditeľné, tak jej mechanické vlastnosti boli v práci obnovované tepelným spracovaním po procese zvárania. Na základe makro- a mikroskopickej analýzy, statickej skúšky ťahom a merania mikrotvrdosti bol v práci stanovený odporúčaný režim tepelného spracovania zvarových spojov. Ten pozostáva z rozpúšťacieho žihania na teplote 540 °C počas 1,5 hodiny a následného umelého starnutia na teplote 150 °C počas 12 hodín. Týmto režimom je možné dosiahnuť mechanické vlastnosti zvarového spoja, ktoré sú takmer rovnaké ako mechanické vlastnosti zliatiny AW 2099 v dodanom stave.

Dizertačná práca sa v pomerne rozsiahlej miere zaoberá aj problematikou pórovitosti pri zváraní Al–Li zliatin. Pri týchto zliatinách vzniká pórovitosť najmä vplyvom nízkej rozpustnosti vodíka vo zvarovom kove. Vodík sa do zvaru dostáva zo vzdušnej atmosféry, mastnôt, nečistôt a oxidickej vrstvy na povrchu zváraných materiálov. Experiment bol preto zameraný na minimalizovanie, prípadne úplné odstránenie pórovitosti ako takej, prostredníctvom rôznych metód čistenia povrchu a aplikácie zvaracieho materiálu. Zo všetkých týchto spôsobov odstraňovania povrchových oxidov bol na základe štatistického spracovania výsledkov z CT analýz zvolený ako optimálny spôsob odstraňovania povrchových oxidov proces frézovania materiálu z oboch strán. V práci sa odporúča frézovaním odstrániť 0,25 mm vrstvu z oboch strán a následne očistiť plechy technickým benzínom. Vzhľadom na limitované použitie spomínaného spôsobu pri rôznych zváraných aplikáciách, bola preskúmaná ďalšia možnosť eliminácie pórovitosti vo zvarových spojoch využívajúca použitie zvaracieho materiálu (zliatina AW 5087). Ukázalo sa, že použitie zvaracieho materiálu neodstráni pórovitosť úplne, ale umožní ju znížiť. Z

hľadiska mechanických vlastností použitie zvaracieho materiálu vedie k zhoršeniu mechanických vlastností zvarových spojov v porovnaní pôvodnými vlastnosťami zliatiny AW 2099. V prípade použitia zvaracieho materiálu z vytvrditeľnej zliatiny by bolo možné túto nevýhodu odstrániť. V tomto ohľade by bolo preto potrebné vykonať ďalšie experimenty.

Ďalšie experimenty, ktoré na základe výsledkov tejto práce je možné odporučiť by sa mali zamerať na kombináciu mechanických a chemických spôsobov odstraňovania povrchových oxidov, resp. kombinácie rôznych spôsobov odstraňovania povrchových oxidov použitím zvaracieho materiálu. V neposlednom rade by bolo vhodné overiť zníženie pórovitosti použitím laserového lúča s vyšším výkonom a znížením rýchlosti zvarovania za účelom predĺženia času na uniknutie vzniknutých pórov zo zvarového kovu.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

- Ahmed Obeidi, M. *et al.* (2019) 'Effect of Surface Roughness on CO2 Laser Absorption by 316L Stainless Steel and Aluminum', *Materials Performance and Characterization*, 8(6), p. 20180091. doi: 10.1520/MPC20180091.
- Ahn, J. *et al.* (2017) 'Effect of filler metal feed rate and composition on microstructure and mechanical properties of fibre laser welded AA 2024-T3', *Journal of Manufacturing Processes*, 25, pp. 26–36. doi: 10.1016/j.jmapro.2016.10.006.
- Dorin, T., Vahid, A. and Lamb, J. (2018) 'Aluminium Lithium Alloys', in *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*. Elsevier, pp. 387–438. doi: 10.1016/B978-0-08-102063-0.00011-4.
- Dursun, T. and Soutis, C. (2014) 'Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys', *Materials & Design (1980-2015)*, 56, pp. 862–871. doi: 10.1016/j.matdes.2013.12.002.
- European Aluminium Association (2015) 'EAA Aluminium Automotive Manual – Joining', *The Aluminium Automotive Manual*, pp. 1–5.
- Fragomeni, J., Wheeler, R. and Jata, K. V. (2005) 'Effect of Single and Duplex Aging on Precipitation Response, Microstructure, and Fatigue Crack Behavior in Al-Li-Cu Alloy AF/C-458', *Journal of Materials Engineering and Performance*, 14(1), pp. 18–27. doi: 10.1361/10599490522329.
- Gable, B. . *et al.* (2001) 'The role of plastic deformation on the competitive microstructural evolution and mechanical properties of a novel Al-Li-Cu-X alloy', *Journal of Light Metals*, 1(1), pp. 1–14. doi: 10.1016/S1471-5317(00)00002-X.
- Gable, B. ., Csontos, A. . and Starke, E. . (2002) 'A quench sensitivity study on the novel Al-Li-Cu-X alloy AF/C 458', *Journal of Light Metals*, 2(2), pp. 65–75. doi: 10.1016/S1471-5317(02)00024-X.
- Giummarra, Thomas, R. (2007) 'NEW ALUMINUM LITHIUM ALLOYS FOR AEROSPACE APPLICATIONS', in *Proceedings of the Light Metals Technology Conference 2007*. Available at: <http://morita1950.info/akio/data/Al-li Alloy.pdf>.
- Goebel, J., Ghidini, T. and Graham, A. J. (2016) 'Stress-corrosion cracking characterisation of the advanced aerospace Al-Li 2099-T86 alloy', *Materials Science and Engineering: A*, 673, pp. 16–23. doi: 10.1016/j.msea.2016.07.013.
- Goran Djukanovic (2017) *Aluminium-Lithium Alloys Fight Back, Aluminium Insider*. Available at: <https://aluminiuminsider.com/aluminium-lithium-alloys-fight-back/> (Accessed: 19 May 2022).
- Gula, N. (2013) *Welding light alloy*.
- Hrivňák Ivan (2009) *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. Bratislava: STU.
- IGAWA, H. (2017) 'Arc Welding of Non-Ferrous Metals', *Journal of the Society of Mechanical Engineers*, 73(616), pp. 708–717. doi: 10.1299/jsmemag.73.616_708.
- Kah, P. *et al.* (2015) 'Investigation of weld defects in friction-stir welding and fusion welding of aluminium alloys', *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 10(1), p. 26. doi: 10.1186/s40712-015-0053-8.
- Katayama, S., Kawahito, Y. and Mizutani, M. (2010) 'Elucidation of laser welding phenomena and factors affecting weld penetration and welding defects', *Physics Procedia*, 5, pp. 9–17. doi: 10.1016/j.phpro.2010.08.024.
- Kertz, J. E., Gouma, P. I. and Buchheit, R. G. (2001) 'Localized corrosion susceptibility of Al-Li-Cu-Mg-Zn alloy AF/C458 due to interrupted quenching from solutionizing temperature', *Metallurgical and Materials Transactions A*, 32(10), pp. 2561–2573. doi: 10.1007/s11661-001-0046-5.
- Kutsuna, M. *et al.* (2006) 'Improvement of the Joint Performance in Laser Welding of Aluminium Alloys', *Welding in the World*, 50(1–2), pp. 22–27. doi: 10.1007/BF03266511.
- Lin, Y., Zheng, Z. Q. and Li, S. C. (2014) 'Effect of solution treatment on microstructures and mechanical properties of 2099 Al-Li alloy', *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 14(1), pp. 61–71. doi: 10.1016/j.acme.2013.07.005.

- Lincoln, T. and Company, E. (2014) 'Aluminum MIG Welding Tips', p. 32.
- Löveborn, D., Larsson, J. K. and Persson, K.-A. (2017) 'Weldability of Aluminium Alloys for Automotive Applications', *Physics Procedia*, 89, pp. 89–99. doi: 10.1016/j.phpro.2017.08.011.
- Madhusudhan Reddy, G. and Gokhale, A. A. (2014) 'Welding Aspects of Aluminum–Lithium Alloys', in *Aluminum-lithium Alloys*. Elsevier, pp. 259–302. doi: 10.1016/B978-0-12-401698-9.00009-4.
- Malikov, A. et al. (2019) 'Manufacturing of high-strength laser welded joints of an industrial aluminum alloy of system Al-Cu-Li by means of post heat treatment', *Journal of Manufacturing Processes*, 41, pp. 101–110. doi: 10.1016/j.jmapro.2019.03.037.
- Metinvest (2020) *The Use of Metal in Aircraft Construction: Steel, Aluminium and Composites*. Available at: <https://metinvestholding.com/en/media/news/metalli-v-samoletostroenii-stal-j-alyuminij-kompoziti>.
- Pinto, L. A. et al. (2010) 'Laser Welding of Dissimilar Aluminium Alloys with Filler Materials', *Welding in the World*, 54(11–12), pp. R333–R341. doi: 10.1007/BF03266747.
- Rioja, R. J. and Liu, J. (2012) 'The Evolution of Al-Li Base Products for Aerospace and Space Applications', *Metallurgical and Materials Transactions A*, 43(9), pp. 3325–3337. doi: 10.1007/s11661-012-1155-z.
- Sahul, Miroslav et al. (2019) 'Analysis of the Properties of AW2099 Aluminium-Lithium Alloy Welded by Laser Beam with AW5087 Aluminium-Magnesium Filler Material', *Acta Polytechnica*, 59(6), pp. 580–586. doi: 10.14311/AP.2019.59.0580.
- Shan, J. (2010) 'Laser welding of magnesium alloys', *Welding and Joining of Magnesium Alloys*, (May 2014), pp. 306–350. doi: 10.1016/B978-1-84569-692-4.50017-1.
- Smiths metals centers (2018) *Technical Datasheet 2099*. Available at: <https://www.smithmetal.com/pdf/lithium/2099-lithium.pdf>.
- Sokolov, M. et al. (2012) 'Laser welding of structural steels: Influence of the edge roughness level', *Optics & Laser Technology*, 44(7), pp. 2064–2071. doi: 10.1016/j.optlastec.2012.03.025.
- Starke, E. A. (2014) 'Historical Development and Present Status of Aluminum–Lithium Alloys', in *Aluminum-lithium Alloys*. Elsevier, pp. 3–26. doi: 10.1016/B978-0-12-401698-9.00001-X.
- WANG, S., HUANG, Y. and ZHAO, L. (2018) 'Effects of different aging treatments on microstructures and mechanical properties of Al-Cu-Li alloy joints welded by electron beam welding', *Chinese Journal of Aeronautics*, 31(2), pp. 363–369. doi: 10.1016/j.cja.2017.07.002.
- Warner, T. (2006) 'Recently-Developed Aluminium Solutions for Aerospace Applications', *Materials Science Forum*, 519–521, pp. 1271–1278. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.519-521.1271.
- Welding the Nonferrous Metals: General Overview* (2002). Available at: <http://www.totalmateria.com/Article52.htm>.
- Williams, J. C. and Starke, E. A. (2003) 'Progress in structural materials for aerospace systems11The Golden Jubilee Issue—Selected topics in Materials Science and Engineering: Past, Present and Future, edited by S. Suresh.', *Acta Materialia*, 51(19), pp. 5775–5799. doi: 10.1016/j.actamat.2003.08.023.
- XIAO, R., ZHANG, X. (2014) 'Problems and issues in laser beam welding of aluminium – lithium alloys', *Journal of manufacturing processes*, 16(2)(1526 – 6125), pp. 166–175.
- Xie, J. (2002) 'Dual beam laser welding', *Welding Journal*, 81(0043–2296), pp. 223–230. Available at: <http://files.aws.org/wj/supplement/10-2002-XIE-s.pdf>.
- Zahradníček Rudolf (2016) *Letecké materiály- neželezné*. Available at: [http://web.tuke.sk/lf-kltp/Ucitelia/Zahradnicek Rudolf/ Avio - casti strojov + materialy/Skript%E1 pre Patr 66 modul 6 - PDF/02-Leteck%E9 materi%E1ly ne%E9Eelezn%E9.pdf](http://web.tuke.sk/lf-kltp/Ucitelia/Zahradnicek%20Rudolf/Avio%20-%20casti%20strojov%20+%20materialy/Skript%E1%20pre%20Patr%2066%20modul%206%20-%20PDF/02-Leteck%E9%20materi%E1ly%20ne%E9%20zelezn%E9.pdf).

ZOZNAMPUBLIKAČNEJ ČINNOSTI**ADM Vedecké práce v zahraničných časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS**

ADM01 LOPATKOVÁ, Michaela - BÁRTA, Jozef - MARÔNEK, Milan - ŠUGRA, Filip - KRITIKOS, Michaela [Samardžiová, Michaela,] - SAMARDŽIČ, Ivan - MARIČ, Dejan. The influence of surface roughness on laser beam welding of aluminium alloys. In *Tehnički Vjesnik - Technical Gazette*. Vol. 28, iss. 3 (2021), s. 934-938. ISSN 1330-3651 (2020: 0.783 - IF, Q4 - JCR Best Q, 0.239 - SJR, Q3 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.17559/TV-20201102100726 ; SCOPUS: 2-s2.0-85108176263 ; WOS: 000675889900029. [Vnútrofakultná kategória: M*A].

ADF Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch

ADF01 ŠUGRA, Filip - MARÔNEK, Milan - BÁRTA, Jozef - LOPATKOVÁ, Michaela - MIČIAN, Miloš. Influence of surface roughness on selected geometric characteristics of laser beam welded joints of AW 2099 alloy. In *Vedecké práce MTF STU v Bratislave so sídlom v Trnave. Research papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology in Trnava*. Roč. 28, č. 47 (2020), s. 56-64. ISSN 1336-1589. V databáze: DOI: 10.2478/rput-2020-0019 ; INSPEC. [Vnútrofakultná kategória: M*B].

AEC Vedecké práce v zahraničných recenzovaných vedeckých zborníkoch, monografiách

AEC01 URMINSKÝ, Ján - MARÔNEK, Milan - BÁRTA, Jozef - LOPATKOVÁ, Michaela - HRUŠECKÝ, Róbert. Influence of electron beam technological movements on aluminium alloy AW2099 welded joints properties. In *Novel Trends in Production Devices and Systems VI. NTPDS VI*. 1. vyd. Zürich : Trans Tech Publications, 2020, S. 36-43. ISSN 1662-9752. ISBN 978-3-0357-1726-6 (2020: Q4 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85086757047 ; DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.994.36. [Vnútrofakultná kategória: M*B].

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

AFC01 MARÔNEK, Milan - BÁRTA, Jozef - LOPATKOVÁ, Michaela - BARTOVÁ, Katarína - PAŠÁK, Matej - SAHUL, Miroslav - URMINSKÝ, Ján. Mechanical properties of laser beam welded AW2099 alloy joints. In *Zborník Radova : 10. International Scientific-Professional Conference, SBW 2019 „Engineering Technologies in Manufacturing of Welded Constructions and Products, SBW 2019“ : Slavonski Brod, 16. - 18.10.2019*. Slavonski Brod : Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod, 2019, S. 17-26. ISBN 978-953-6048-95-3. [Vnútrofakultná kategória: M*C].

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

AFD01 BÁRTA, Jozef - MARÔNEK, Milan - SAHUL, Miroslav - DOMÁNKOVÁ, Mária - LOPATKOVÁ, Michaela - URMINSKÝ, Ján - PAŠÁK, Matej. Microstructure analysis of heat treated AW2099 Al-Li alloy laser beam welded joints. In *72nd IIW Annual Assembly and International Conference : Proceedings of International Conference, 7-12 July 2019, Bratislava, Slovakia*. 1. vyd. Bratislava : Welding Research Institute, 2019, S. 1-8. ISBN 978-80-907442-1-9. [Vnútrofakultná kategória: M*B].

AFD02 LOPATKOVÁ, Michaela - ŠIMEKOVÁ, Beáta - MARÔNEK, Milan - SAHUL, Miroslav - BÁRTA, Jozef. Štúdium zvariteľnosti titánovej zliatiny Grade 2 elektrónovým lúčom. In *Zváranie 2018 [elektronický zdroj] : 46. medzinárodná konferencia, Tatranská Lomnica, 21.-23.november 2018 : zborník prednášok*. 1. vyd. Bratislava : Slovenská zvaračská spoločnosť, 2018, CD-ROM, s. 151-159. ISBN 978-80-89296-22-4. [Vnútrofakultná kategória: M*C].

AFD03 LOPATKOVÁ, Michaela - MARÔNEK, Milan - BÁRTA, Jozef - PAŠÁK, Matej. Vplyv tepelného spracovania na vlastnosti zliatiny AW2099. In *Technológia zvárania 2019 - Technológia rozvoja priemyslu Európskej únie*. 1.vyd. Trnava : AlumniPress, 2019, S. 1-11. ISBN 978-80-8096-265-4. [Vnútrofakultná kategória: M*D].

AFD04 MARÔNEK, Milan - URMINSKÝ, Ján - LOPATKOVÁ, Michaela - ŠUGRA, Filip - GRACIK, Tomáš. Vplyv stavu povrchu zváraného materiálu na zmenu pracovných parametrov oblúkového zvárania. In *Technológia zvárania 2021 : Technológia rozvoja priemyslu Európskej únie, 10.novembra 2021, Bratislava*. 1. vyd. Trnava : AlumniPress, 2021, S. 1-6. ISBN 978-80-8096-287-6. [Vnútrofakultná kategória: M].

- AFD05 URMINSKÝ, Ján - MARÔNEK, Milan - BÁRTA, Jozef - SAHUL, Miroslav - LOPATKOVÁ, Michaela. Determination of the influence of electron beam technological movements on geometrical characteristics of bead on plate welded joints. In *72nd IIW Annual Assembly and International Conference : Proceedings of International Conference, 7-12 July 2019, Bratislava, Slovakia*. 1. vyd. Bratislava : Welding Research Institute, 2019, S. 1-5. ISBN 978-80-907442-1-9. [Vnútrofakultná kategória: M*B].

BDF Odborné práce v ostatných domácich časopisoch

- BDF01 LOPATKOVÁ, Michaela. Zvariteľnosť titánovej zliatiny Grade 2 elektrónovým lúčom. In *Strojárstvo - Strojírenství*. Roč. 23, č. 7-8 (2019), s. 70-71. ISSN 1335-2938. [Vnútrofakultná kategória: M*D].

Štatistika: kategória publikačnej činnosti

ADF	Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch	1
ADM	Vedecké práce v zahraničných časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS	1
AEC	Vedecké práce v zahraničných recenzovaných vedeckých zborníkoch, monografiách	1
AFC	Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách	1
AFD	Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách	5
BDF	Odborné práce v ostatných domácich časopisoch	1
Súčet		10