

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave

Ing. Marián Pavlík

Autoreferát dizertačnej práce

Výskum aditívnej výroby oblúkovým naváraním hliníkovej zliatiny

na získanie akademického titulu: doktor („philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“)

v doktorandskom študijnom programe: strojárské technológie a materiály

v študijnom odbore: strojárstvo

Forma štúdia: denná

Miesto a dátum: Trnava, 31.05.2025



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave

Ing. Marián Pavlík

Autoreferát dizertačnej práce

Výskum aditívnej výroby oblúkovým naváraním hliníkovej zliatiny

na získanie akademického titulu: doktor („philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“)

v doktorandskom študijnom programe: strojárské technológie a materiály

v študijnom odbore: strojárstvo

Forma štúdia: denná

Miesto a dátum: Trnava, 31.05.2025



Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Ústave výrobných technológií Materiálovotechnologickej fakulty (MTF) STU so
sídлом v Trnave

Predkladateľ: Ing. Marián Pavlík
Ústav výrobných technológií
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave
Jána Bottu 25, 917 24 Trnava

Školiteľ: Ing. Miroslav Sahul, PhD., IWE
Ústav strojírenské technologie
Fakulta strojní, ČVUT v Praze
Technická 4, 160 00 Praha 6

Konzultant: Ing. Martin Sahul, PhD.
Ústav materiálov
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave
Jána Bottu 25, 917 24 Trnava

Autoreferát bol rozoslaný

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňao.....hod.
na Materiálovotechnologickej fakulte STU so sídlom v Trnave, Ulica Jána Bottu
č. 2781/25, 917 24 Trnava

.....
prof. Ing. Miloš Čambál, CSc.
dekan MTF STU so sídlom v Trnave

OBSAH

ÚVOD	5
1 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU V OBLASTI WAAM HLINÍKOVÝCH ZLIATIN	6
2 CIELE A VEDECKÉ PREDPOKLADY DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	8
3 METODIKA RIEŠENIA DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	10
4 EXPERIMENTÁLNY VÝSKUM.....	11
4.1 Voľba materiálov a pracovisko realizácie experimentov.....	11
4.2 Vyhodenie tenkostenných komponentov.....	12
5 VYHODNOTENIE EXPERIMENTÁLNYCH VÝSLEDKOV	14
5.1 Viackriteriálna optimalizácia experimentu.....	14
5.2 Vyhodnotenie mikroštruktúry	15
5.2.1 SEM analýza.....	16
5.3 Vyhodnotenie geometrických vlastností	18
5.4 Vyhodnotenie analýzy pórovitosti	20
5.5 Vyhodnotenie diferenčnej skenovacej kalorimetrie	22
5.6 Vyhodnotenie dilatometrickej skúšky.....	23
5.8 Vyhodnotenie náchylnosti na jamkovú koróziu.....	25
5.9 Vyhodnotenie mechanických skúšok.....	27
5.9.1 Vyhodnotenie statickej skúšky ťahom	27
5.9.2 Vyhodnotenie merania mikrotvrdoosti	30
6 DISKUSIA	31
PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE	36
ZÁVER.....	38
ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV	40
ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI	44

ÚVOD

Za ostatné dekády bolo možné sledovať prudký nárast výroby komponentov, ktorých využitie smerovalo najmä do oblastí, kde narastá záujem efektívnosti a flexibility produkcie. Technológia WAAM sa zaraďuje medzi procesy DED-Arc, pri ktorých sa navára materiál vo forme drôtu, alebo prášku spôsobom vrstva po vrstve, tzv. ukladanie návarových húseníc na seba v trajektórii budúceho obrysu. Vďaka tomu je možné navárať väčšie objemy v porovnaní s klasickou 3D tlačou kovových súčiastok metódami, ktoré sa označujú ako PBF. Takisto vstupné náklady na zaobstaranie 3D tlačiarne sú mnohonásobne vyššie a začínajú zväčša na úrovni pol milióna eur bez DPH pri súčiastkach s rozmermi 100×100 mm. To je neporovnateľne viac ako v prípade obstarania zvaracieho zdroja, resp. robotického ramena (O'Neill, 2021).

Drôt ako východisková surovina vo WAAM ponúka vysokoúčinné ukladanie materiálu, a zároveň znižuje obavy o zdravie a bezpečnosť v porovnaní s potrebným periférnym procesom recyklácie prášku, zásluhou čoho sa rapídne znižuje jeho cena za kilogram (S. Williams, 2015). Vlhkosť v oxidickej vrstve a kontaminácia na povrchu drôtu sú zdrojom vodíka, teda aj pórovitosti, ktoré sa môžu líšiť od šarže k šarži pri zváraní hliníkových zliatin metódou MIG (Ryan a kol., 2018). Vysoká úroveň pórovitosti je jednou z výziev, ktorým čelí súčasná komercializácia metódy WAAM (Williams S.W a kol., 2015).

Hliníkové zliatiny triedy 5xxx obsahujúce horčík ako hlavný legujúci prvok sú vo všeobecnosti obľúbené tepelne nespracovateľné zliatiny. Avšak obsah horčíka väčší ako 5 % vedie k zníženiu koróznej odolnosti, čo spôsobuje najmä neustále vyzrážanie Al-Mg precipitátov v mikroštruktúre (Jebaraj a kol., 2020; Kim a kol., 2013).

Dizertačná práca sa zaoberá zdokonalením a zefektívnením dostupnej aditívnej technológie WAAM-MIG, ktorá má potenciál vyrábať kovové komponenty s požadovanými geometrickými, mechanickými a funkčnými vlastnosťami pre široké spektrum aplikácií. Cieľom výskumu bolo identifikovať a optimalizovať technologické parametre s dôrazom na vplyv prietokového množstva ochranného plynu na kvalitu tenkostenných komponentov.

Výsledky experimentov umožnili identifikovať optimálne podmienky na vyhotovenie kvalitných hliníkových komponentov s homogénnou mikroštruktúrou, nízkou pórovitosťou a priaznivými fyzikálno-mechanickými parametrami, pričom zároveň poukázali na súvislosti medzi prietokovým množstvom plynu a výskytom defektov ovplyvňujúcich neskoršie dokončovacie operácie a funkčnosť dielov.

1 PREHEAD SÚČASNÉHO STAVU V OBLASTI WAAM HLINÍKOVÝCH ZLIATIN

Aditívna výroba metódou WAAM, ktorá sa zaraďuje konkrétne medzi technológie depozície priamou energiou DED-Arc, umožňuje v súčasnosti aditívnu výrobu stredne zložitých kovových komponentov s väčšími rozmermi za nižšie náklady v porovnaní najmä s obdobnou konvenčnou 3D tlačou. Jej efektívnosť spočíva takisto v podstatne vyšších naváracích rýchlostiach v porovnaní s inými alternatívnymi prístupmi ako je napríklad PBF, čím sa jej potenciál značne rozširuje (Martina a kol., 2019; Yilmaz a kol., 2016). V roku 2019 pokryla technológia DED podiel 16 % trhu aditívnej výroby kovových komponentov, pričom napríklad technológia PBF pokryla až 54 % tohto trhu (Cherdo, 2022).

Nanesené vrstvy kovu je možné následne finálne povrchovo frézovať a dosiahnuť požadovaný tvar s omnoho nižším materiálovým odpadom aj pri konštrukciách s vyššou pevnosťou a odolnosťou voči únave, ktoré by nebolo možné vyrobiť konvenčným spôsobom frézovania (Tsurumaki a kol., 2019). Až 90 % energie sa v prípade oblúkového navárania dodáva do zvaru, čo predstavuje vysoký stupeň energetickej účinnosti. Pričom pri naváraní hliníkových zliatin pomocou laserového lúča dochádza k využitiu zhruba 2 – 20 % z celkovej energie (Rännar a kol., 2007). Z hľadiska skrátenia času výroby zas pomocou metódy WAAM dochádza ku skráteniu zhruba o 40 až 60 % a skráteniu času pri následnom obrábaní o asi 15 až 20 % (Wu a kol., 2018). Metódou WAAM je možné nanášať 5 až 8 kg/h. V porovnaní s metódou PBF, s ktorou je možné nanášať 50 g/h, je to výrazne viac (Buchanan a Gardner, 2019).

Pórovitosť, ako jeden z nepriaznivých a najviac vyskytujúcich sa defektov, je považovaná za kľúčový problém a hlavnú výzvu v oblasti WAAM hliníkových zliatin. Za jej pôvod sa považujú veľmi rozdielne hodnoty rozpustnosti vodíka či už v tekutom alebo pevnom stave a jeho následnému zachyteniu v tavnom kúpeli počas navárania (Gu a kol., 2016). Kontrola nad pórovitosťou je dokonca v súčasnosti považovaná za jednu z oblastí, ktorá je potenciálne vhodná pre nový vývoj v oblasti metódy WAAM (Singh a kol., 2021). Mastnota, vlhkosť a iné vodíkové kontaminanty nachádzajúce sa na povrchu drôtu, ktoré sa vplyvom vysokej teploty premieňajú na atómový vodík a následne sa absorbujú v tavnom kúpeli, možno považovať za hlavnú príčinu tvorby pórov (Anyalebechi, 2013).

Na základe štúdie, ktorej sa venovali vedci Gu a kol., kde bola skúmaná eliminácia pórovitosti, je možné dosiahnuť nižší počet pórov napríklad prostredníctvom medzivrstvového spracovania za studena. Na rozdiel od

jednoprechodového zvarovania sa nanosený kov vytvára po vrstvách, čo spôsobuje nízko-teplotné tepelné spracovanie predtým nanasej vrstvy. To zapríčiňuje rast pórov najmä vo vytvrditeľných zliatinách hliníka (Gu a kol., 2016).

Zníženiu pórovitosti a jej koordinácii prostredníctvom vysokej rýchlosti navárania s horúcim drôtom tzv. metóde HWAAM sa venovali vedci Fu a kol. Princíp metódy spočíva v tvorbe odporového tepla, pri spojení drôtu a substrátovej podložky, ktoré sa využije na zníženie energie oblúka a zlepšenie povrchu drôtu. HWAAM metóda bola skúmaná už pri oceli a titánovej zliatine, kde dochádzalo k zvýšeniu účinnosti pri znížení vstupnej energie a zlepšeniu mechanických vlastností (Z. Li a kol., 2019; Fu a kol., 2021).

Vedci Li a kol. skúmali mikroštruktúru a vlastnosti hliníkovej zliatiny ER5356 s vysoko čistým argónom Ar (99,99 %) a vysoko čistým dusíkom N₂ (99,99 %) ako ochranným plynom pri rovnakých parametroch. Povrch zvarových húseníc pri použití N₂ ako ochranného plynu bol drsnejší v porovnaní s argónom. Pri nižšom tepelnom príkone a Ar ako ochrannom plyne bolo možné pozorovať zvlnenie na povrchu, čo nie je ideálne pre ukladanie ďalších vrstiev (Li a kol., 2020).

Čínski vedci Yang a kol. sa zaoberali vplyvom obsahu N₂ na kvalitu mikroštruktúry austenitickej koróziivzdornej ocele s vysokým obsahom dusíka (HNASS > 0,4 hm.% N₂) vyrobenej pomocou metódy WAAM. Zistili, že zvýšenie obsahu N₂ na hodnotu v rozmedzí 15 až 25 hm.% malo za následok zhoršenie kvality zvarovej húsenice. Obsah N₂ väčší ako 10 hm.% nie je možné úplne rozložiť a ionizovať, čo vedie k nestabilite horenia oblúka a zmenšeniu prievaru do substrátovej podložky (D. Yang a kol., 2021).

Multi-materiálovému naváraníu dvoch hliníkových zliatin AA6060 a AA5087 venovali svoj výskum vedci Hauser a kol., ktorí sa zamerali na všeobecné charakteristiky procesu. Prechodová zóna zo zliatiny AA6060 do zliatiny AA5087 dosahovala vyššiu tvrdosť najmä z dôvodu vyššieho obsahu Mg, ktorý spôsobuje tvorbu tuhého roztoku. Neboli pozorované žiadne významné rozdiely v mikroštruktúre zliatiny AA5087, pri režime CMT alebo CMT+P (Hauser, Reisch, Seebauer, a kol., 2021).

2 CIELE A VEDECKÉ PREDPOKLADY DIZERTAČNEJ PRÁCE

Cieľom dizertačnej práce bolo vykonať komplexnú analýzu tenkostenných komponentov z hliníkovej zliatiny AA5087 vyhotovených metódou WAAM s využitím technológie MIG, so zameraním na vplyv prietokového množstva ochranného plynu. Získanie súboru poznatkov, ktoré prispejú k optimalizácii parametrov WAAM-MIG procesu pre efektívnu výrobu komponentov z hliníkovej zliatiny AA5087 s požadovanými funkčnými a materiálovými vlastnosťami. Na splnenie uvedeného cieľa bolo potrebné splniť niekoľko čiastkových cieľov:

- Identifikovať správanie sa procesu pri jedno- a viacvrstvových návaroch v závislosti od meniacich sa parametrov.
- Modifikovať stratégie pohybu horáka s cieľom zabezpečiť požadované rozmery a stabilnú geometriu tenkostenných komponentov.
- Analyzovať jednovrstvové návary s meniacim sa prietokovým množstvom plynu, rýchlosťou podávania drôtu a rýchlosťou navárania v rámci štatistickej analýzy Taguchiho metódou na báze šedej relačnej analýzy.
- Analyzovať mikroštruktúry navarených tenkostenných komponentov, vrátane merania veľkosti zrna v rôznych oblastiach komponentu.
- Vyhodnotiť pórovitosť tenkostenných komponentov a zistiť distribúciu, veľkosť a sféricitu pórov.
- Vyhodnotiť termofyzikálne vlastnosti s cieľom definovať teplotné správanie a stabilitu materiálu počas riadeného ohreву.
- Zhodnotiť vplyv prietokového množstva plynu na mechanické vlastnosti vzoriek a porovnať vplyv smeru vyhotovenia vzoriek (horizontálne, vertikálne) na mechanické vlastnosti.

V nadväznosti na ciele dizertačnej práce boli vyvedené nasledujúce vedecké predpoklady:

Vedecký predpoklad 1

Prietokové množstvo ochranného plynu má pravdepodobne vplyv na tvorbu jemnozrnnnej štruktúry. Jemnozrnná štruktúra by mala byť výsledkom nižšej maximálnej teploty v procese navárania, kedy je obmedzená difúzia atómov, preto sa eliminuje rast zŕn v korelácii s vyšším prietokovým množstvom plynu.

Vedecký predpoklad 2

Jemnozrnná štruktúra je charakteristická vyššou pevnosťou. V horizontálnom smere dochádza k priaznivejšiemu rozloženiu teplotného poľa v porovnaní s vertikálnym smerom, kedy sa znižuje energetická náročnosť oblúka. Dochádza k odstraňovaniu vodíka na povrchu a tým zlepšeniu mechanických vlastností v horizontálnom smere. Na pevnosť v ťahu horizontálnych a vertikálnych teliesok by mal mať vplyv smer rastu zŕn, ktoré vytvárajú bariéry proti šíreniu trhlín a dislokácií. Predpokladá sa, že mechanické vlastnosti budú vyššie v horizontálnom smere a budú sa meniť zmenou prietokového množstva plynu.

Vedecký predpoklad 3

Pórovitosť je jednou z najčastejších chýb hliníkových zliatin vyrobených metódou WAAM-MIG. Vzniká v dôsledku uvoľňovania plynov, najčastejšie vodíka, počas tuhnutia taveniny. Póry indukované vodíkom majú väčšinou globulárny tvar a ich množstvo bude možné obmedziť aj prietokovým množstvom plynu. Vodík, ktorý sa uvoľňuje počas navárania, má tendenciu migrovať smerom k povrchu taveniny. Predpokladá sa, že oblasti prechodu medzi jednotlivými vrstvami by mali byť detegované ako hlavné miesta výskytu zhlukov pórov.

Vedecký predpoklad 4

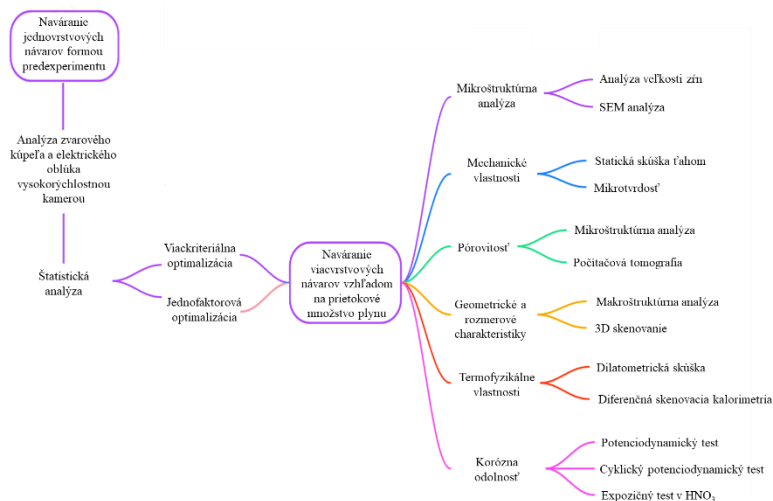
Vodík môže zohrávať takisto významnú úlohu pri termofyzikálnych vlastnostiach naváraných komponentov. V rozmedzí teplôt 250 až 350 °C môže dochádzať k uvoľňovaniu vodíka z tuhého roztoku alebo k difúzii vodíka, kedy nastávajú objemové zmeny materiálu definované ako výkyv dilatometrickej krivky.

Vedecký predpoklad 5

U Al-Mg zliatin s obsahom Mg väčším ako 4 % sa predpokladá, že v prechodovej oblasti návaru dôjde k vylúčeniu fázy β po hraniciach zŕn. To zapríčini zníženie elektrochemickej stability v okolí hraníc zŕn a koróznej odolnosti materiálu.

3 METODIKA RIEŠENIA DIZERTAČNEJ PRÁCE

Na overenie vedeckých predpokladov bola vyhotovená procesná mapa krokov riešenia dizertačnej práce na Obrázku 1. Procesná mapa zabezpečuje uskutočniteľnosť konkrétneho výskumu a otvára priestor na optimalizáciu v rámci procesného reťazca. Jednou z najdôležitejších súčastí procesnej mapy metódy WAAM-MIG je voľba parametrov a stratégií navárania vrstiev, ktorými je ovplyvňované množstvo vneseného tepla do materiálu, tvar a veľkosť vrstiev deponovaného materiálu, mikroštruktúra a hĺbka pretaveného materiálu. V rámci predexperimentu je nevyhnutné vykonať štatistickú analýzu údajov za účelom optimalizácie procesu a následne definovať jadro výskumu. Zároveň sú zobrazené konkrétne metódy použité v jednotlivých oblastiach v rámci experimentálnej časti.



Obr. 1 Schematické znázornenie procesov uskutočnených v rámci riešenia dizertačnej práce

4 EXPERIMENTÁLNY VÝSKUM

4.1 Voľba materiálov a pracovisko realizácie experimentov

V rámci experimentálnej časti bola naváraná hliníková zliatina AA5087 na substrát z hliníkovej zliatiny AA5083. Hliníkové zliatiny triedy 5xxx sú legované horčíkom, čím sa maximalizuje ich substitučné spevnenie. Z hľadiska zvariteľnosti je hlavným problémom skutočnosť, že vo zvare a v teplom ovplyvnenej oblasti dochádza k odstráneniu deformačného spevnenia, rozpusteniu precipitátov, a tým dochádza k degradácii mechanických vlastností zvarového spoja v porovnaní so základným materiálom (Kalaiselvan a kol., 2014). Prídavný materiál bol zvolený drôt, ktorého priemer bol 1,2 mm. Chemické zloženie zvaracieho drôtu je uvedené v Tabuľke 1. Stopové množstvo mangánu v hliníkových zliatinách triedy 5xxx vytvára jemné disperzoidy, ktoré zlepšujú homogenitu a vedú k účinku spevnenia disperzie. Zliatina AA5087 je legovaná takisto zirkóniom, ktorý zabezpečuje lepšiu odolnosť voči tvorbe horúcich trhlín. Zirkónium má takisto funkciu kontroly veľkosti zrna, čím zlepšuje mechanické vlastnosti ako pevnosť, húževnatosť a odolnosť voči únave, namáhaniu a korózii a podľa autorov Wanga a kol. a Pourkia a kol. môže takisto znížiť pórovitosť (Wang a kol., 2023, Pourkia a kol., 2010).

Tab. 1 Chemické zloženie zvaracieho drôtu AA5087 [hm. %] (Dutra a kol., 2015)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr	Ti	Be	Al
≤0,4	≤0,40	≤0,1	0,4-1,1	4,5-5,2	0,05-0,25	≤0,25	0,10-0,2	≤0,15	≤0,0003	Zv.

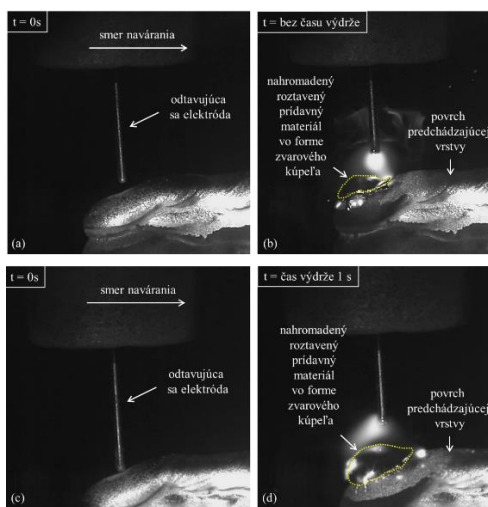
Výskum sa uskutočňoval v rámci pracoviska oblúkových a plazmových technológií (OPT) na Ústave výrobných technológií na MTF STU (Obrázok 2a). Ako zvarací zdroj bol použitý Fronius TPS600i s maximálnym zvaracím prúdom 600 A. Architektúra pracoviska, vyhotovená v programe Fusion 360 využitá na výskum, je znázornená na Obrázku 2(b).



Obr. 2 (a) Pracovisko OPT na MTF STU, (b) Schematické znázornenie experimentu

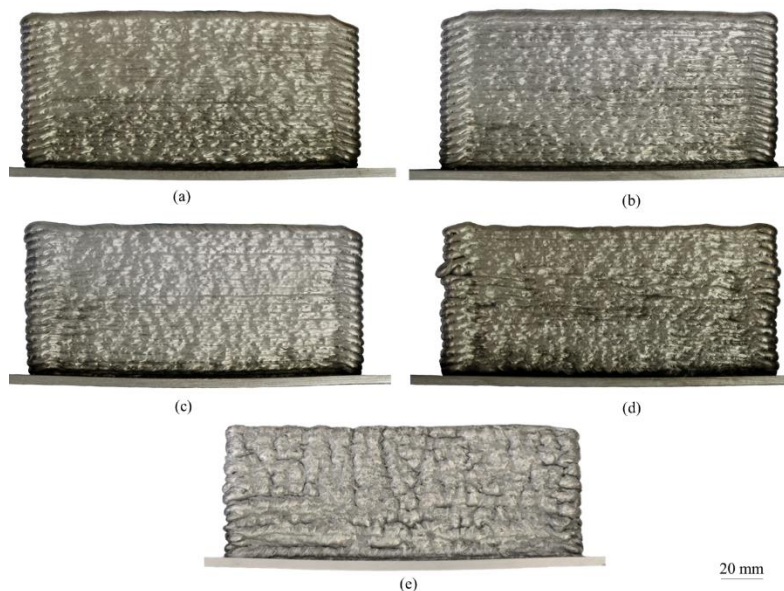
4.2 Vyhotovenie tenkostenných komponentov

Hliníková zliatina AA5087 je typická svojou nižšou hustotou v porovnaní s oceľou. Metóda WAAM je charakteristická tromi hlavnými fázami a dvomi sprievodnými. Prvou je fáza nábehu rýchlosti navárania, ktorá sa zvyšuje z nuly na požadovanú rýchlosť. V tejto fáze potrebuje zvärací zdroj viac energie v porovnaní so stabilnou fázou navárania, teda dôjde k roztaveniu a navareniu väčšieho množstva materiálu. Navyše je fáza nábehu materiálu charakteristická slabým zmáčaním substrátu z dôvodu jeho nižšej teploty. Vplyv času výdrže na tvorbu tavného kúpeľa tenkostenných komponentov vyhotovených oblúkovým naváraním možno vidieť na Obrázku 3(b, d). Pre zvýraznenie rozdielu množstva roztaveného materiálu sa snímky vyhotovili presne v čase, kedy v oboch prípadoch začal horák vykazovať pohyb v smere navárania. Boli pozorované oblasti kategorizované ako oblasti s premenlivou výškou s cieľom kompenzovať pokles výšky na okrajoch komponentov. Vyhotovili sa komponenty bez výdrže a s výdržou 1s, kedy bolo možné sledovať väčšie množstvo roztaveného nahromadeného materiálu ako v prípade navárania komponentu bez výdrže. Tento trend má so zvyšujúcim sa počtom vrstiev výraznejší efekt, ktorý zhoršuje kvalitu naváraných komponentov v dôsledku zmeny vzdialenosti medzi horákom a predchádzajúcou vrstvou.



Obr. 3 Znáznornenie hromadenia roztaveného materiálu v oblasti s premenlivou výškou (a, b) bez výdrže alebo (c, d) s výdržou

Tenkostenné komponenty vyhotovené s výdržou na začiatku navárania je možné vidieť na Obrázku 4(a-e). Na základe väčšieho nahromadeného roztaveného prídavného materiálu dochádzalo k dorovnaní okrajov komponentu do výšky rovnej stabilnej oblasti navárania. Meniace sa prietokové množstvo plynu nemenilo vplyv výdrže, teda nemožno pozorovať výrazné zmeny medzi okrajom tenkostenného komponentu a stabilnou časťou tenkostenného komponentu. Obrázok 4 zobrazuje rozdiel vo výške tenkostenného komponentu, kedy so zvyšujúcim prietokovým množstvom plynu zo 6 l/min (Obrázok 4e) na 14 l/min (Obrázok 4a) dochádzalo k viditeľnej zmene výšky tenkostenného komponentu vyhotoveného metódou WAAM.



Obr. 4 Vyrobené komponenty s prietokom plynu (a) 14 l/min, (b) 12 l/min, (c) 10 l/min, (d) 8 l/min, (e) 6 l/min po aplikovaní výdrže 1 sekunda

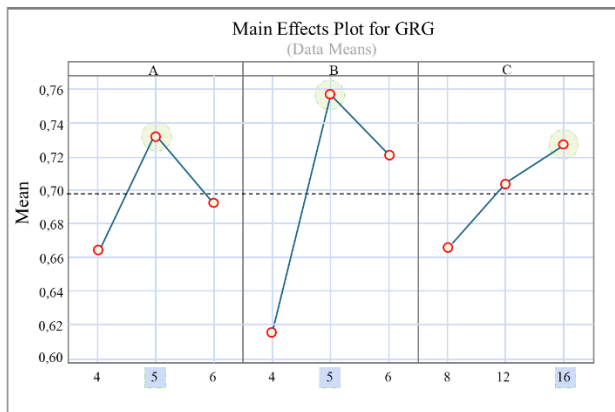
5 VYHODNOTENIE EXPERIMENTÁLNYCH VÝSLEDKOV

5.1 Viackriteriálna optimalizácia experimentu

Na získanie komplexných výsledkov v rámci celého systému bolo potrebné vykonať viackriteriálnu analýzu s ohľadom na hodnotené odozvy. Na stanovenie relatívnej dôležitosti každého parametra a zjednodušenie výberu optimálnych podmienok procesu sa vypočítal stupeň šedého relačného koeficientu (GRG). Šedý relačný koeficient vyjadruje, ako blízko je konkrétna alternatíva k ideálnemu riešeniu v rámci šedej relačnej analýzy. Teda ide o mieru podobnosti medzi skúmanými hodnotami a referenčnou (optimálnou) hodnotou. Váhy odoziev boli pridelené na základe ich významu v analýze, pričom sa zabezpečilo, aby sa ich celkový súčet rovnal 1, čím sa zachoval vyvážený príspevok ku konečnému hodnoteniu. Parametrom boli priradené rôzne váhy, ktoré odrážali ich vplyv na optimalizáciu systému. Väčšia dôležitosť (0,3) bola priradená parametrom ovplyvňujúcim šírku, výšku a pórovitosť, čím sa zdôraznila ich rozhodujúca úloha pri dosahovaní účinnosti procesu (Tabuľka 33). Vyššia hodnota šedého relačného koeficientu znamená lepšie priblíženie k ideálnemu riešeniu. Na základe údajov šedého relačného koeficientu bol zostavený rebríček skupiny parametrov s najlepším výsledkom. Najlepšie výsledky boli dosiahnuté konfiguráciou rýchlosti navárania 5 mm/s, rýchlosti podávania drôtu 5 m/min a prietokovým množstvom plynu 16 l/min. Toto nastavenie prinieslo najpriaznivejšiu rovnováhu spomedzi hodnotených odoziev s jednotlivým poradím 1, 6 a 7 a hodnotami šedého relačného koeficientu 0,777, ďalej 0,786 a 0,869. Všetky odozvy hodnotené viackriteriálnou analýzou boli pred vykonaním analýzy normalizované na škálu 0 až 1. Normalizácia sa používa pri metódach viackriteriálnych analýz, aby sa rôzne parametre mohli spravodlivo porovnávať bez ohľadu na ich pôvodné jednotky.

Obrázok 5 znázorňuje graf hlavných efektov pre viackriteriálnu analýzu na základe šedého relačného koeficientu. Je možné vidieť, ako sa hodnota šedého relačného koeficientu mení v závislosti od skúmaného parametra. Metóda identifikovala optimálne nastavenie parametrov, a teda rýchlosť navárania 5 mm/s, rýchlosť podávania drôtu 5 m/min a prietokové množstvo plynu 16 l/min, ktoré sú vyznačené svetlým zeleným kruhom na grafe hlavných efektov. Zistené hodnoty vedú k maximálnej efektívitve procesu vzhľadom na sledované odozvy ako šírka húsenice, výška húsenice, hĺbka penetrácie, pórovitosť a náklady spojené s prietokovým množstvom ochranného plynu. Tieto zistenia potvrdzujú výsledky získané z výpočtov šedej relačnej analýzy, čo posilňuje spoľahlivosť

optimalizačného procesu. Graf slúži ako dôležitý vizuálny nástroj na interpretáciu efektov na výslednú kvalitu návarov.

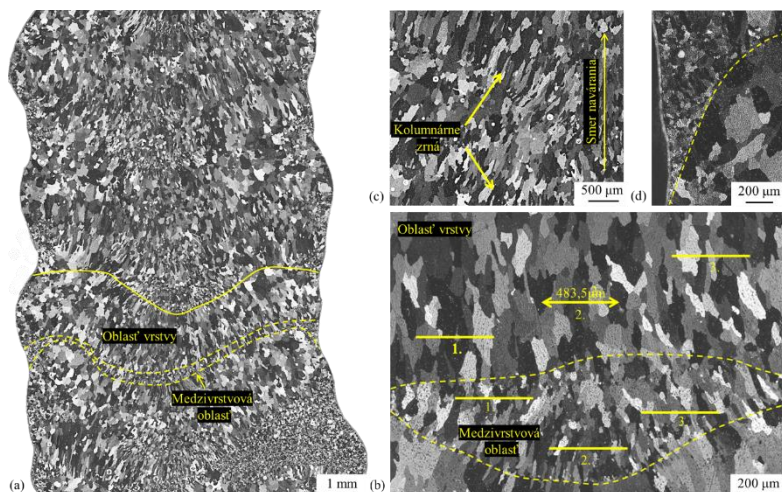


Obr. 5 Graf hlavných efektov viackriteriálnej analýzy na základe šedého relačného koeficientu

5.2 Vyhodnotenie mikroštruktúry

Začiatok procesu navárania na substrát je charakteristický relatívne vysokou rýchlosťou ochladzovania. Je možné sledovať kolumnárny rast zŕn, ktorý je zhodný k smeru tepelného toku, a zároveň kolmý na rozhranie. S naváraním jednotlivých vrstiev je možné ignorovať vplyv substrátu. Naopak účinok uvoľňovania tepla predtým nanesených stuhnutých vrstiev sa v rámci tohto procesu zvyšuje. Akumulácia tepla sa postupne začína prejavovať v dôsledku klesajúcej rýchlosti ochladzovania. Dochádza k postupnému prechodu mikroštruktúry z kolumnárnych zŕn na rovnoosé. Vplyv akumulácie tepla je najzreteľnejší v hornej časti tenkostenného komponentu, kde sú zrná v oblasti vrstvy najviac kolumnárne. Na Obrázku 6(d) možno vidieť jemnozrnnú štruktúru v okrajovej časti tenkostenných komponentov. Záhyby a výbežky tenkostenných komponentov majú väčší povrch na jednotku objemu, teda odvádzajú teplo rýchlejšie, ako časti s menším povrchom na jednotku objemu. Vyššia rýchlosť chladnutia vedie k tvorbe väčšieho množstva nukleačných centier, čo má za následok rast menších zŕn. Záhyby a výbežky dosahujú kritickú teplotu pre nukleáciu skôr, čím sa zrná nestacia zväčšiť. Zároveň počas chladnutia vzniká teplotný gradient v smere od povrchu komponentu do vnútra s výsledkom jemnozrnejšej štruktúry. Metóda merania veľkosti zŕn je znázornená na Obrázku 6(b). Bola meraná oblasť vrstvy a medzivrstvová oblasť, kedy v každej oblasti boli vyhotovené tri merania pre každé prietokové množstvo plynu v rámci

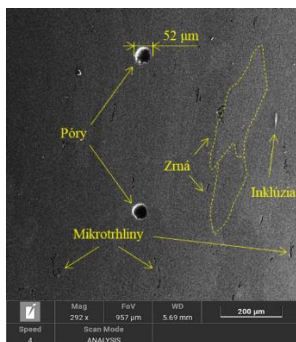
dizertačnej práce. Išlo o priesečníkovú lineárnu metódu, kedy sa meral počet priesečníkov prechádzajúcich cez hranice zŕn s testovacou čiarou dĺžou 483,5 μm .



Obr. 6 (a) prierez tenkostenného komponentu, (b) postup merania veľkosti zŕn, (c) kolumnárne zrná v medzivrstvovej oblasti a (d) morfológia zŕn vo výbežku tenkostenného komponentu

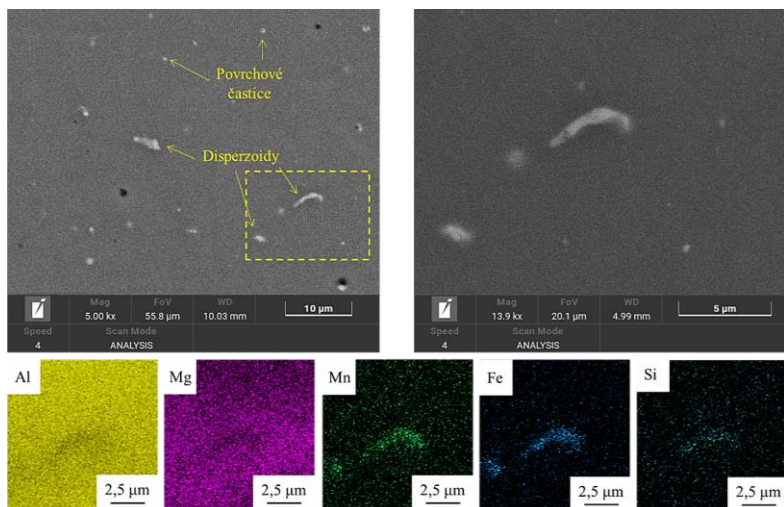
5.2.1 SEM analýza

Na SEM snímke z Obrázka 7 je možné vidieť mikroštruktúru navareného tenkostenného komponentu metódou WAAM. Na snímke sú zreteľne vyznačené zrná s jemným kontrastom, čo charakterizuje hranice týchto zŕn a ich orientáciu. Takisto je možné vidieť krehkú mangánovú inklúziu, ktorá môže byť iniciátorom vzniku trhlín a zníženia pevnosti. Niekedy sú považované za disperzoidy, avšak pri nevhodnom tuhnutí dochádza k tvorbe väčších, tenkých a ihličkovitých fáz po hraniciach zŕn nazývaných inklúzie. Mangán je ťažký prvok, ktorý je charakterizovaný na SEM snímke ako svetlá oblasť. Takisto je možné vidieť vyznačené póry s približným priemerom 52 μm . Mikrotrhliny sa šíria pri metóde WAAM-MIG hliníkovej zliatiny AA5087 intergranulárne, teda pozdĺž hraníc zŕn. Pri WAAM-MIG dochádza k epitaxiálnemu rastu stĺpcovitých zŕn, ktoré smerujú kolmo na podložku.



Obr. 7 Mikroštruktúra hliníkovej zliatiny AA5087 pri WAAM-MIG metóde

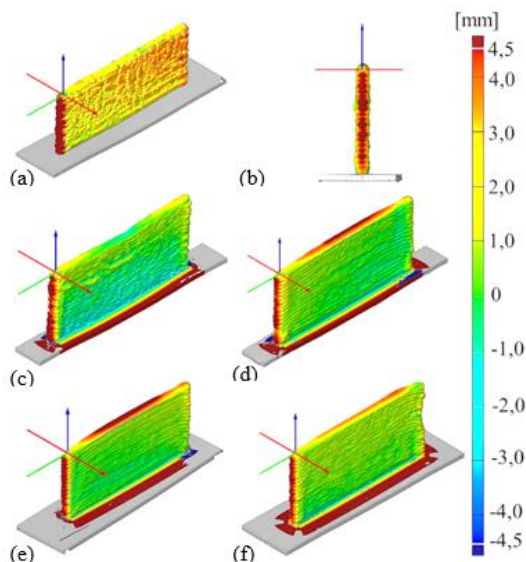
Bola vykonaná plošná EDS analýza zobrazená na Obrázku 8. Disperzoidy sú jemné častice, ktoré vznikajú precipitáciou a pôsobia ako spevňujúce častice. Na základe analýzy možno demonštrovať, že došlo k vzniku disperzoidov na báze Mn a Fe.



Obr. 8 Mikroštruktúrna analýza hliníkovej zliatiny AA5087 vyrobenej metódou WAAM

5.3 Vyhodnotenie geometrických vlastností

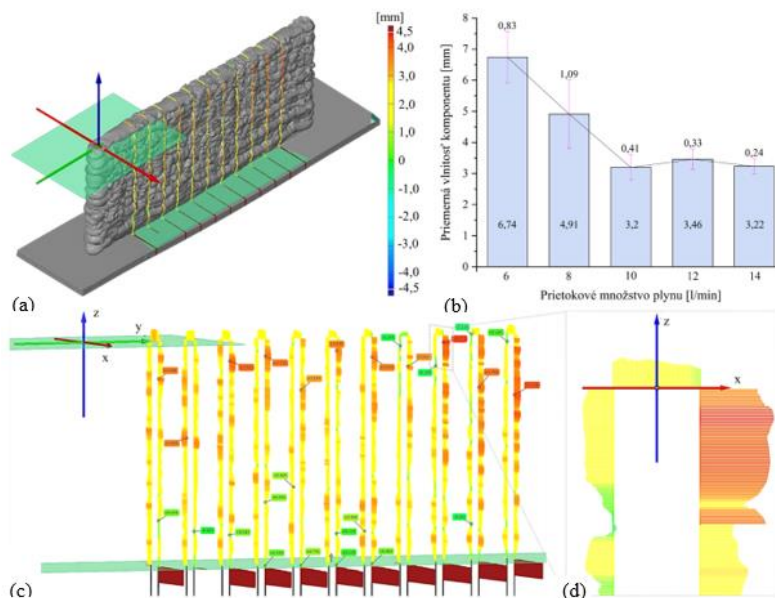
Na základe požadovaného komponentu vybraného na základe predexperimentu bola vytvorená mapa odchýlok tenkostenných komponentov. Zelené a modré časti na tenkostenných komponentoch predstavujú chýbajúci objem materiálu, a naopak žlté a červené časti predstavujú miesta s nadmerným množstvom navareného materiálu. Tenkostenný komponent vyhotovený s prietokovým množstvom plynu 6 l/min z boku a z profilu je znázornený na Obrázku 9(a,b). Je možné vidieť, že okraje komponentov predstavujú charakteristické miesta nadmerného množstva materiálu pri všetkých prietokových množstvách plynov. So zvyšujúcim sa prietokovým množstvom plynu dochádza k redukcii materiálu v okrajových častiach tenkostenných komponentov.



Obr. 9 Mapy odchýlok navarených tenkostenných komponentov vzhľadom na vložený objekt s prietokovým množstvom plynu (a, b) 6 l/min, (c) 8 l/min, (d) 10 l/min, (e) 12 l/min a (f) 14 l/min

Z dôvodu získania čo najpresnejších dát, bol model podrobený analýze prostredníctvom virtuálnych rezov, v programe GOM Inspect V7.5, rovnobežných s osou z. Prvý virtuálny rez bol vyhotovený vo vzdialenosti 20 mm od súradnicového systému, ktorý bol vložený do stredu krátera, ako najideálnejší merateľný bod. Vzdialenosť od okraja bola nastavená z dôvodu zníženia

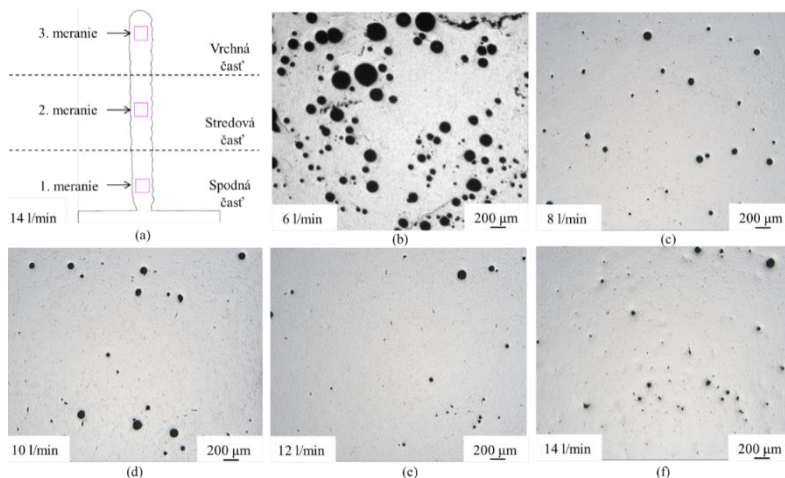
variability dát a ich spresnenia v stabilnej časti navárania. Každý ďalší rez bol umiestnený 10 mm od predchádzajúceho s konečným počtom 11 virtuálnych rezov (Obrázok 10a). Teda posledný virtuálny rez bol vzdialený opäť 20 mm z druhej strany tenkostenného komponentu. Na jednotlivých rezoch boli analyzované minimálne a maximálne odchýlky pomocou funkcie „min a max deviation label“ ako je znázornené na Obrázku 10(c). Funkciou „calliper“ sa zistili celkové a efektívne výšky a šírky komponentov, na základe ktorých je možné vypočítať priemernú vlnitosť komponentu vyobrazenú na Obrázku 10(b). Je možné vidieť, že so zvýšením prietokového množstva plynu nad 10 l/min dochádza k relatívne stabilizovaným hodnotám priemernej vlnitosti komponentu. So zvyšujúcim sa prietokovým množstvom plynu dochádzalo k poklesu hodnoty priemernej vlnitosti komponentu. Takisto samotné smerodajné odchýlky zobrazujúce variabilitu procesu boli pri vyšších prietokoch plynov nižšie s hodnotami okolo 0,3.



Obr. 10 Meranie vlnitosti vzhľadom na virtuálne rezy v prostredí GOM Inspect V7.5
 (a) 3D model s 11 virtuálnymi rezmi, (b) grafické znázornenie priemernej vlnitosti komponentu,
 (c) zistené odchýlky vzhľadom na požadovaný komponent a (d) detail na virtuálny rez

5.4 Vyhodnotenie analýzy pórovitosti

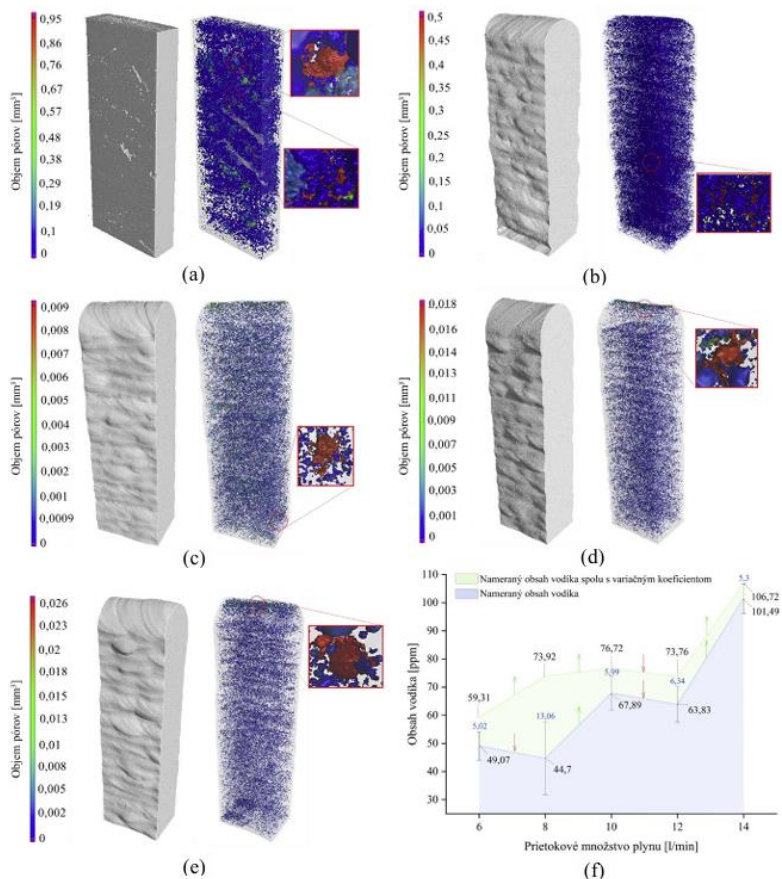
V rámci experimentu bola vyhodnocovaná plošná analýza pórovitosti ako je znázornené na 2D mikrosnímках z Obrázka 11. Analýza sa vykonávala vždy na troch miestach komponentov vyhotovených s rôznymi prietokovými množstvami plynu ako je znázornené na obryse tenkostenného komponentu vyhotoveného s prietokovým množstvom 14 l/min z Obrázka 11(a). Teda, aby bolo možné urobiť čo najpresnejšiu komparáciu veľkosti, počtu a rozloženia pórov na jednotlivých pričných rezoch tenkostenných komponentov. Mikrosnímky znázornené na Obrázku 11(b-f) boli vyhotovené vo vrchnej časti jednotlivých komponentov. Je možné vidieť redukciu počtu a veľkosti pórov so zvyšujúcim sa prietokovým množstvom plynu medzi 6 l/min na 14 l/min.



Obr. 11 Mikroskopická analýza pórovitosti pričných rezov
(a) obrys komponentu vyhotoveného so 14 l/min, zobrazenie počtu a rozloženia pórov pri prietokových množstvách (b) 6 l/min, (c) 8 l/min, (d) 10 l/min, (e) 12 l/min a (f) 14 l/min

Na Obrázku 12 sú znázornené trojrozmerné rekonštrukčné projekcie vzoriek, s rôznym prietokovým množstvom plynu. Vzorka vyrobená s prietokovým množstvom plynu 6 l/min (Obrázok 12a) bola kategorizovaná ako vzorka s najväčšou porozitou, a to až 7,29 %. Najmenší objem detegovaný pri 6 l/min bol $0,00032 \text{ mm}^3$. Zvýšením prietokového množstva plynu na hodnoty od 8 do 14 l/min boli dosahované hranice detegovateľnosti $0,0001 \text{ mm}^3$. Póry s najväčším priemerom lokalizované vo vrchnej časti vzorky boli pozorované pri prietokových množstvách plynu 12 a 14 l/min (Obrázok 12d,e).

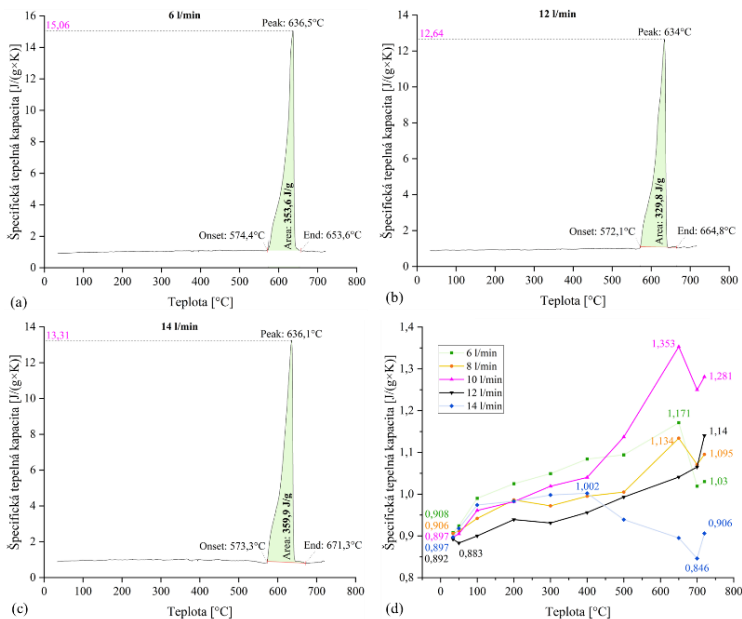
Možno pozorovať, že najväčšie póry boli lokalizované vo vrchnej časti vzorky, pričom k zhlukovaniu väčšieho množstva pórov dochádzalo v prechodových oblastiach medzi jednotlivými vrstvami. To charakterizuje smer unikania pórov z roztaveného kovu počas tuhnutia. Unikaniu pórov z roztaveného kovu môžu zabráňovať dendritické ramená a oxidické filmy (J. Gu a kol., 2020).



Obr. 12 Znáozornenie pórov z CT analýzy (a) 6 l/min, (b) 8 l/min, (c) 10 l/min, (d) 12 l/min, (e) 14 l/min, (f) vyhodnotenie obsahu nameraného vodíka vzhľadom na prietokové množstvo plynu

5.5 Vyhodnotenie diferenčnej skenovacej kalorimetrie

Výsledky diferenčnej skenovacej kalorimetrie (DSC) hliníkovej zliatiny AA5087 vyhotovenej metódou WAAM-MIG sú znázornené na Obrázku 13. Vyššia hodnota maximálnej intenzity tepelnej absorpcie 15,06 J/(g×K), bola zaznamenaná pri prietokovom množstve plynu 6 l/min. Vyššia hodnota maximálnej intenzity tepelnej absorpcie bola pravdepodobne zapríčinená väčším množstvom oxidačných produktov. Vo všetkých grafoch možno pozorovať absorpciu tepla cez výrazný endotermický pík v oblastiach v rozmedzí 633,9 až 636,5 °C, ktorý zodpovedá teplote tavenia zliatiny na základe rovnovážneho binárneho diagramu Al-Mg (Straumal a kol., 2010). Ide o teplotu, pri ktorej je maximálna hodnota absorpcie tepla. Najnižšia teplota začiatku tavenia bola zaznamenaná pri 12 l/min, a to 572,1 °C. Následne sa zvýšením prietokového množstva plynu na hodnotu 14 l/min dosiahne, v dôsledku dynamickejšieho prúdenia zvarového kúpeľa a ochladzovania, zvýšenie začiatočnej teploty tavenia na hodnotu 573,3 °C. Teplota likvidu (end) bola pozorovaná v rozmedzí hodnôt 653,6 °C pre prietokové množstvo plynu 6 l/min až do hodnoty 671,3 °C pre 14 l/min.

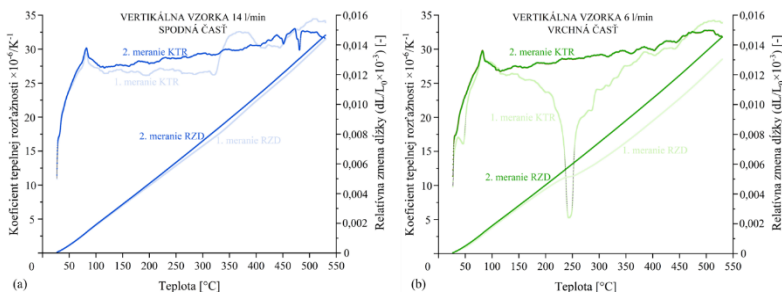


Obr. 13 Závislosť špecifickej tepelnej kapacity od teploty pre
(a) 6 l/min, (b) 12 l/min, (c) 14 l/min a (d) podrobný graf špecifickej tepelnej kapacity
Autoreferát dizertačnej práce

Zintegrovaná plocha pod krivkou predstavuje entalpiu tavenia, teda prechod z pevnej fázy do kvapalnej. Zistilo sa, že teplo potrebné na roztavenie materiálu na jednotku hmotnosti sa pohybuje v rozmedzí od 329,8 J/g pre prietokové množstvo ochranného plynu 12 l/min až do 363,2 J/g pre prietokové množstvo ochranného plynu 10 l/min. Teda možno proces klasifikovať ako relatívne energeticky náročný, čo súvisí s prítomnosťou fáz, prípadne zložiek v zliatine. Podrobnejšie hodnoty špecifickej tepelnej kapacity vzhľadom na meniace sa prietokové množstvo plynu sú zobrazené na Obrázku 13(f). Najväčšia hodnota špecifickej tepelnej kapacity bola dosiahnutá pri prietokovom množstve plynu 10 l/min, a to 1,353 J/(g×K) pri teplote 650 °C. Naopak najnižšia hodnota špecifickej tepelnej kapacity 0,846 J/(g×K) bola zistená pri teplote 700 °C s prietokovým množstvom plynu 14 l/min.

5.6 Vyhodnotenie dilatometrickej skúšky

V rámci dilatometrickej skúšky bolo možné pozorovať výraznejšie zmeny hodnôt koeficientu tepelnej rozťažnosti v oblasti okolo 350 °C (Obrázok 14a). Pri prietokovom množstve plynu 6 l/min bola pozorovaná výrazná odchýlka pri teplote približne 250 °C (Obrázok 14b). Z tohto dôvodu sa vykonali opakované merania pri rovnakých podmienkach. Pri opakovaných meraniach sa už výkyvy neprejavili, čo naznačuje výskyt jednorazového javu ako uvoľnenie vnútorného napätia. V prípade prietokového množstva plynu 6 l/min mohol výkyv spôsobiť vysoký stupeň pórovitosti. S náhlou zmenou hodnoty koeficientu tepelnej rozťažnosti (pri stúpaní, či klesaní) dochádzalo pri rovnakých teplotách tiež k výkyvom relatívnej zmeny dĺžky, kedy sa zmena dĺžky vzorky menila rýchlejšie alebo pomalšie s rastúcou teplotou.

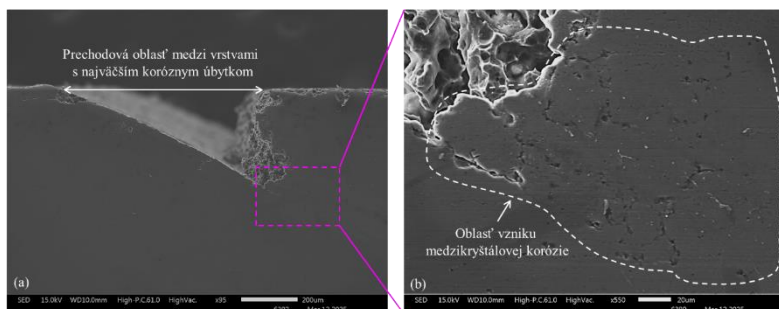


Obr. 14 Porovnanie dilatometrických kriviek pre prvé a opakované meranie vertikálnych vzoriek
(a) 14 l/min spodná časť (b) 6 l/min vrchná časť

Rovnovážny binárny diagram pre systém Al-Mg popisuje pre zliatinu AA5087 prechod cez solvusovú čiaru pri teplotách približne 230 až 250 °C. Teda dochádza k prechodu z dvojfázovej oblasti α -Al+Al₃Mg₂ naspäť do jednofázovej oblasti α -Al. Pri prvom náraste teploty a prechode cez solvus dochádza k rozpusteniu precipitátov Al₃Mg₂, ak boli prítomné. Prípadne k uvoľneniu zvyškových napätí, difúznemu preskupeniu atómov Mg alebo objemovým zmenám v štruktúre. Pri druhom meraní je materiál už v rovnovážnom stave, teda prebehli všetky fázové prechody, precipitáty sa rozpustili a nevznikli znovu. Difúzne homogenizovaný roztok zostal stabilný, v dôsledku čoho možno pozorovať hladký a predvídateľný priebeh dilatometrickej krivky bez výraznejších výkyvov. V prípade viac deformovanej štruktúry so zvyškovými napätiami pri metóde WAAM-MIG, či vytvorenými veľmi jemnými precipitátmi mohlo dôjsť k oneskorenému rozpúšťaniu pri vyššej teplote než predpokladal rovnovážny solvus.

5.7 Vyhodnotenie náchylnosti na medzikryštálovú koróziu

Bola vykonaná expozičná skúška v roztoku HNO₃ pri stálom ponorení na zistenie náchylnosti komponentu z hliníkovej zliatiny AA5087 vyhotoveného metódou WAAM-MIG na medzikryštálovú koróziu. Kyselina dusičná vyššej koncentrácie (67–69 %) prednostne rozpúšťa sekundárnu fázu β -Al₃Mg₂ namiesto tuhého roztoku horčika v hliníkovej matici. Ak sa táto zlúčenina vylučuje v pomerne súvislej sieti pozdĺž hraníc zŕn, tak sa preferenčný korózný úbytok zameriava práve na tieto hranice. To vedie k oddeľovaniu jednotlivých zŕn a ich následnému vypadávaniu. SEM snímka znázorňuje oblasti selektívneho rozpúšťania pozdĺž rozhraní vrstiev. Koróziou poškodené oblasti boli následne skúmané SEM analýzou. Išlo o analýzu vzorky s najväčším koróznym úbytkom (10 l/min), a teda najväčšou náchylnosťou na medzikryštálovú koróziu. Je možné vidieť, že povrch vzorky nebol náchylný na medzikryštálovú koróziu, avšak smer vzniku medzikryštálovej korózie bol z miest s najväčším koróznym úbytkom ako je interpretované Obrázkom 15. Pravdepodobne došlo k vytvoreniu optimálnych podmienok pre vylúčenie β -Al₃Mg₂ fázy na hraniciach zŕn, ktorá je elektrochemicky aktívnejšia ako matrica. Pri nižšom prietoku (6 l/min) a vyššom prietoku (14 l/min) pravdepodobne nenastala dostatočná segregácia β -fázy, čo znížilo náchylnosť na medzikryštálovú koróziu. Zároveň bolo pozorované silné sfarbenie roztoku do oranžova, čo naznačovalo intenzívnu oxidáciu hliníka a β -fázy a tvorbu NO_x plynov, ako dôkaz silnej medzikryštálovej korózie v tomto prípade.



Obr. 15 Znážornenie medzikryštálovej korózie
(a) prechodová oblasť s najväčším koróznym úbytkom,
(b) šírenie medzikryštálovej korózie z prechodovej oblasti

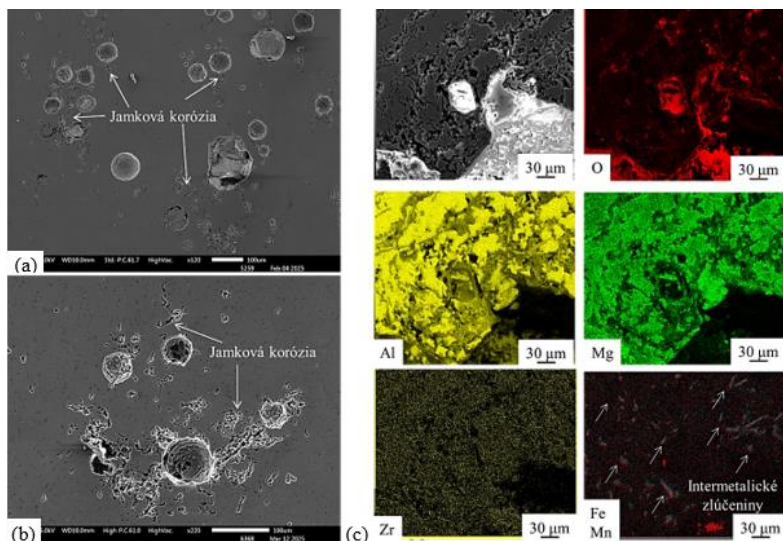
Prepočty úbytku koróznej hmotnosti v mg/cm^2 podľa normy ASTM G67 sú znázornené v Tabuľke 2. Bolo možné vidieť výraznú odchýlku pri prietokovom množstve plynu 10 l/min na hodnotu 119,87 mg/cm^2 . Vykonalo sa aj druhé meranie podľa normy, pri ktorom sa so zvyšujúcim prietokovým množstvom ochranného plynu zo 6 l/min na 14 l/min znižoval korózný úbytok o približne 60 % na hodnotu 3,92 mg/cm^2 .

Tab. 2 Úbytky koróznej hmotnosti pre 1. a 2. meranie

Prietokové množstvo plynu [l/min]	Korózný úbytok [mg/cm^2] 1.meranie	Korózný úbytok [mg/cm^2] 2.meranie
6	10,24	9,91
8	5,43	5,99
10	119,87	7,61
12	6,33	5,94
14	9,59	3,92

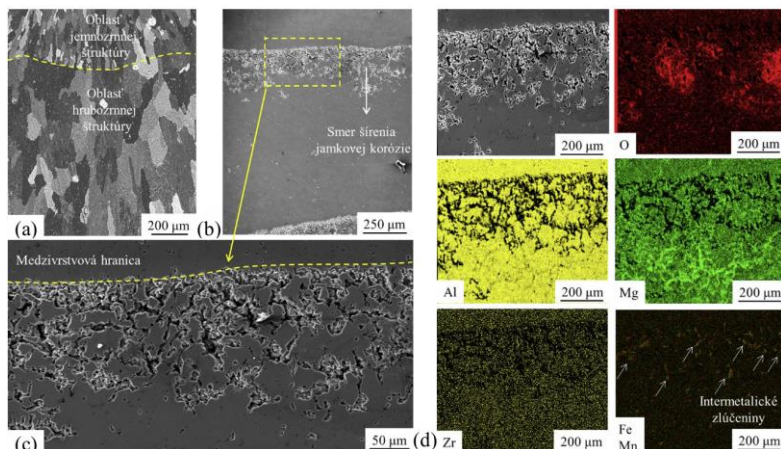
5.8 Vyhodnotenie náchylnosti na jamkovú koróziu

Jamková korózia je typ lokálnej korózie, ktorá sa prejavuje vznikom malých, ale hlbokých otvorov na povrchu. Prostredníctvom SEM analýzy sa vyhotovili snímky na posúdenie vzniku jamkovej korózie (Obrázok 16). Je možné vidieť, že jamková korózia vznikala v blízkosti pórov, ako iniciačných miest a koncentrátorov napätia. Toto pozorovanie bolo zistené pri vzorkách vyhotovených s prietokovým množstvom plynu 6 a 8 l/min. Na základe literatúry existujú dva hlavné typy intermetalických zlúčenín, a to precipitáty bohaté na Mg a precipitáty bohaté na Fe (Arthanari a kol., 2019; Engler a kol., 2018).



Obr. 16 SEM snímky výskytu jamkovej korózie pre
(a) 6 l/min a (b) 8 l/min, (c) EDS analýza jamkovej korózie v blízkosti póru

Pri zvýšení prietokového množstva ochranného plynu na hodnotu 10, 12 a 14 l/min sa jamková korózia začala šíriť prostredníctvom medzivrstvových oblastí. Bol zistený jednoznačný smer šírenia jamkovej korózie do hrubozrnnej štruktúry, ako je možné vidieť na Obrázku 17(b). Hrubozrná štruktúra je v porovnaní s jemnozrnou štruktúrou charakteristická menším množstvom hraníc zŕn, ktoré pôsobia ako bariéry voči šíreniu korózie, ako je zobrazené na Obrázku 17(a). V oboch prípadoch možno hovoriť o rovnakej morfológii jamkovej korózie. Smer šírenia jamkovej korózie do hrubozrnnej štruktúry možno odôvodniť takisto obsahom vysegregovaných legujúcich prvkov v okolí hraníc zŕn, čím vznikajú miesta s rozdielnym elektrochemickým potenciálom. EDS analýzou bol zistený vznik intermetalických zlúčenín Al(Fe, Mn), v blízkosti ktorých bol nameraný kyslík (Obrázok 17d). V hrubozrnnej štruktúre takisto vznikajú väčšie vnútorné napätia, ktoré vedú k mikrotrhlinám ľahko napadnuteľným koróziou. Jemnozrná štruktúra je charakteristická lepšimi pasívačnými schopnosťami. Tieto zistenia podporujú vznik a šírenie lokálnej jamkovej korózie smerom do hrubozrnnej štruktúry.



Obr. 17 Znáozornenie jamkovej korózie pri prietokovom množstve plynu 10 l/min
(a) znázornenie jemnozrnnej a hrubozrnnej štruktúry, (b) vznik a šírenie jamkovej korózie,
(c) detail na vznik a šírenie jamkovej korózie,
(d) EDS analýza jamkovej korózie a intermetalických zlúčenín

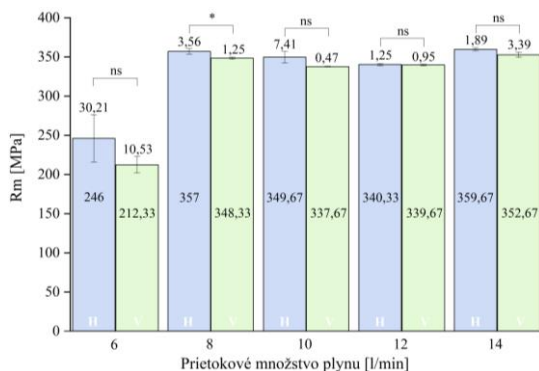
5.9 Vyhodnotenie mechanických skúšok

Mechanické vlastnosti naváraných vzoriek boli vyhodnotené prostredníctvom statickej skúšky ťahom a merania mikrotvrdosti. Výsledky poskytli informácie o pevnostných parametroch materiálu a detailné sledovanie zmien v jednotlivých oblastiach navarenej štruktúry.

5.9.1 Vyhodnotenie statickej skúšky ťahom

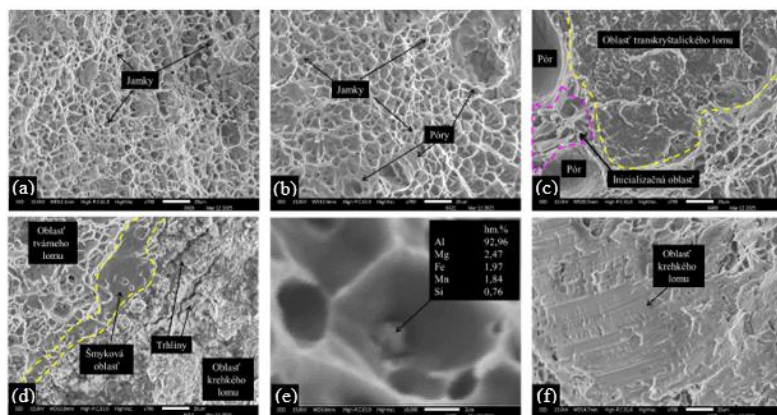
Vplyv rôznych prietokových množstiev plynov na výslednú pevnosť v ťahu je zobrazený na Obrázku 18. Ťahová skúška bola vykonaná v dvoch rôznych orientáciách, a to vertikálnej (kolmo na smer navárania) a horizontálnej (v smere navárania). Vo všeobecnosti možno konštatovať, že pevnosť v ťahu horizontálnych vzoriek bola vyššia v porovnaní so vzorkami vyhotovenými vo vertikálnom smere. Bolo teda pozorované anizotropné správanie pre hodnoty pevnosti v ťahu. Je to najmä kvôli konzistencii navarenej vrstvy. Vertikálne vzorky sú tvorené viacerými prechodmi jednotlivých vrstiev, ktoré znižujú pevnosť v ťahu, pretože sú to miesta, kde najčastejšie dochádza k výskytu defektov. Z tohto dôvodu sú tieto medzivrstvové oblasti považované za slabšie miesta z pohľadu mechanických vlastností tenkostenných komponentov.

Orientácia navarenej vrstvy teda určovala orientáciu defektov vzhľadom na smer zaťaženia, kde zohrala dôležitú úlohu pri určovaní mechanickej odozvy. Najvyššia pevnosť v ťahu bola zaznamenaná v prípade horizontálnej vzorky vyhotovenej s prietokom plynu 14 l/min, a to až 359,67 MPa. Najnižšia pevnosť v ťahu horizontálnych vzoriek bola zaznamenaná v prípade vzorky vyhotovenej s prietokom plynu 6 l/min, a to 246 MPa. To predstavuje vyššiu pevnosť v ťahu v porovnaní so vzorkami vyhotovenými vo vertikálnom smere, kedy bola nameraná pevnosť v ťahu iba 212,33 MPa. Rozdiel medzi vertikálnymi a horizontálnymi vzorkami nie je veľký, keďže spevňujúci účinok zjemňovaním zŕn je pre zliatiny Al relatívne nízky (Huang a kol., 2015). Čo bolo potvrdené štatistickou analýzou formou t-testu. Štatisticky významný rozdiel medzi horizontálnymi a vertikálnymi vzorkami bol sledovaný iba pri prietokovom množstve plynu 8 l/min, kedy bola p-hodnota = 0,03. Koeficient korelácie medzi vertikálnymi a horizontálnymi vzorkami bol $r = 0,996$, čo predstavuje vysokú mieru lineárnej závislosti medzi horizontálnou a vertikálnou R_m . Pri nižšom prietoku plynu dochádzalo k vyššej akumulácii tepla, čo zrejme spôsobilo rast väčších zŕn. Väčšie zrná vedú k menšej hustote hraníc zŕn pozdĺž vertikálneho smeru, kde dochádza k zníženiu pevnosti v ťahu. Vzorky vyhotovené s prietokmi plynov 8, 10, 12 a 14 l/min dosahovali porovnateľné hodnoty pevnosti v ťahu. Vzorky vo vertikálnom smere vykazovali najnižšie hodnoty, s poklesom predstavujúcim približne 27 % v porovnaní s horizontálnymi vzorkami, ako zistili autori Tonelli a kol. Pokles v predĺžení pri vertikálnych vzorkách predstavoval 64 % v porovnaní s horizontálnymi vzorkami (Tonelli a kol., 2021).



Obr. 18 Závislosť pevnosti v ťahu pre vertikálne a horizontálne telieska od prietoku plynu 6, 8, 10, 12 a 14 l/min

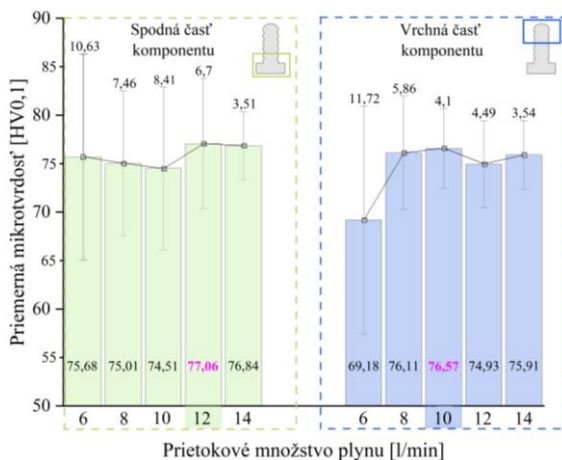
Obrázok 19 znázorňuje SEM snímky teliesok po skúške pevnosti v ťahu. Vytvorené jamky vzniknuté plastickou deformáciou a rastom mikropórov pred pretrhnutím možno považovať za tvárny lom. Je možné vidieť jemnejšie a rovnoosejšie jamky pri horizontálnej vzorke (Obrázok 19a) v porovnaní s vertikálnou vzorkou (Obrázok 19b) (Tonelli a kol., 2021). Pri prietokovom množstve plynu 6 l/min bol pozorovaný transkryštalický krehký lom, ktorý sa šíril cez zrná pozdĺž preferovaných rovín. Je možné takisto vidieť inicializačnú oblasť medzi dvomi pórmí, ktorá súvisí so sústredením lokálnych napätí, ako je vyobrazené na Obrázku 19(c). Oblasť je z morfológického hľadiska charakteristická pretiahnutou jamkovitou štruktúrou, ktorá definuje mikrošmykový mechanizmus porušenia. Na Obrázku 19(d) je znázornený tvárny, a takisto krehký lom, kedy sa lom mohol iniciovať v póre, prípadne sa šíriť po vrstve v šikmom smere. Medzi týmito lomami vidieť šmykovú oblasť, ktorá sa objavuje pri kombinácii plastickej deformácie a náhleho porušenia materiálu. Detailný pohľad na vnútornú časť jamky pri vzorke vyhotovenej s prietokovým množstvom plynu 12 l/min je možné vidieť na Obrázku 19(e). Vo vnútornej oblasti sa nachádzala malá častica o priemere približne 1 μm . Analýza EDS odhalila obohatenie tejto častice o Fe, Mn a malé množstvo Si v porovnaní s hliníkovou maticou. To je v súlade s intermetalickými zlúčeninami zistenými na základe mikroštruktúrnej analýzy. Hladký povrch znázornený na Obrázku 19(f) charakterizuje dôsledok lokálneho plastického toku, kedy sa materiál počas ťahovej skúšky deformoval pred úplným pretrhnutím.



Obr. 19 Zobrazenie lomových plôch pre (a) 14 l/min, horizontálna, (b) 14 l/min, vertikálna, (c) 6 l/min, horizontálna, (d) 6 l/min, vertikálna, (e) 12 l/min, vertikálna, (f) 10 l/min, vertikálna

5.9.2 Vyhodnotenie merania mikrotvrдости

Priemerná mikrotvrdosť podľa Vickersa je znázornená na Obrázku 20. Najväčšia priemerná mikrotvrdosť dosiahnutá v spodnej časti komponentu bola pri použití prietokového množstva plynu 12 l/min, a to 77,06 HV_{0,1}. Pre vrchnú časť komponentu bola najvyššia priemerná mikrotvrdosť dosiahnutá s prietokovým množstvom plynu 10 l/min, kedy sa dosiahla hodnota 76,57 HV_{0,1}. Možno teda pozorovať pokles mikrotvrlosti pri prietokovom množstve plynu 14 l/min v spodnej časti komponentu, kedy bola rýchlosť chladnutia príliš vysoká a dochádzalo k menšej tvorbe vylúčených fáz a k poklesu priemernej mikrotvrlosti. Pokles priemernej mikrotvrlosti bol zaznamenaný pri prietokovom množstve plynu 10 l/min v prípade spodnej časti komponentu. Nižšiu mikrotvrdosť mohli podporiť nehomogenita navarených vrstiev, tvorba defektov, v prípade hliníkových zliatin najmä póry, alebo rozpad niektorých tuhých roztokov. V prípade vrchnej časti komponentu bol zaznamenaný pokles priemernej mikrotvrlosti pri prietokovom množstve plynu 6 l/min. Nižší prietok plynu vo vrchnej časti komponentu, kde dochádzalo ku kumulácii tepla viedol k pomalšiemu chladnutiu. To mohlo podporovať tvorbu hrubozrnnej mikroštruktúry a nižšie dosiahnuté hodnoty mikrotvrlosti.



Obr. 20 Priemerné hodnoty mikrotvrlosti podľa Vickersa (HV_{0,1}) v závislosti od prietokového množstva plynu pre spodnú (vľavo) a vrchnú (vpravo) časť komponentu

6 DISKUSIA

Dizertačná práca sa zaoberala posúdením vplyvu prietokového množstva plynu na výsledné mikroštruktúrne, mechanické a termofyzikálne vlastnosti, a tiež koróznú odolnosť komponentov vyrobených metódou WAAM. Geometrické vlastnosti návaru sú ovplyvnené optimalizáciou procesu a vyhotovenie konzistentných komponentov metódou WAAM môže viesť k rýchlejšiemu aplikovaniu metódy do priemyslu. Na základe Tukeyho testu vyhodnotenia štatistickej významnosti vlnitosti komponentu, na základe zmeny prietokového množstva plynu, možno vidieť identifikovanie v troch skupinách (Tabuľka 3). Je možné vidieť, že v skupine C, kde sa nachádzajú prietokové množstvá plynov 10, 12 a 14 l/min, nebola pozorovaná štatistická významnosť, teda sú od seba navzájom homogénne. Jednotlivé skupiny sa od seba odlišujú štatisticky významne na hladine významnosti $\alpha = 0,05$. Modelom sa vysvetlilo 78,85 % variability.

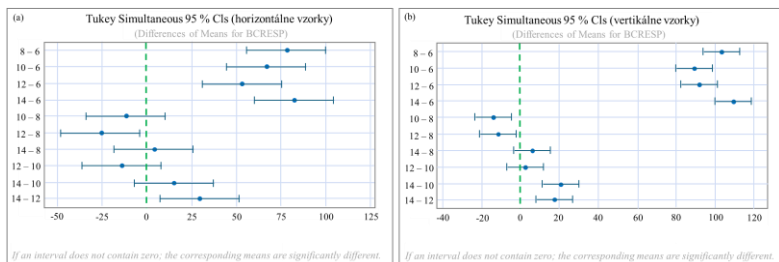
Tab. 3 Vyhodnotenie štatistickej významnosti vplyvu prietokového množstva plynu na výslednú vlnitosť komponentu

Prietokové množstvo plynu [l/min]	N	Mean	Grouping
6	11	-0,39	A
8	11	-0,46	B
10	11	-0,54	C
12	11	-0,56	C
14	11	-0,56	C

*N – počet pozorovaní v danej skupine

Vplyv rýchlosti navárania a zloženia prietokového množstva plynu na výsledné geometrické charakteristiky sledovali autori Gierth a kolektív. Zlepšenie vlnitosti jednovrstvového návaru v kombinácii s nízkou úrovňou pórovitosti bolo dosiahnuté pri znížení rýchlosti navárania v prvej vrstve na hodnotu 0,6 m/min a kombinácie prietokového množstva plynu s použitím 70 % argónu a 30 % hélia v prvých dvoch vrstvách. Zvýšenie rýchlosti podávania drôtu v prvých dvoch vrstvách viedlo k najnižšej vlnitosti, avšak dochádzalo k nárastu úrovne pórovitosti. Najrovnomornejší obrys tenkostenného komponentu bol zaznamenaný pri metóde CMT-PADV. Naopak najviac nerovnomerný povrch bol zistený pri metóde CMT-ADV, kedy dochádza k presnejšiemu riadeniu tepla (Gierth a kol., 2020). V rámci mechanických vlastností boli sledované telieska

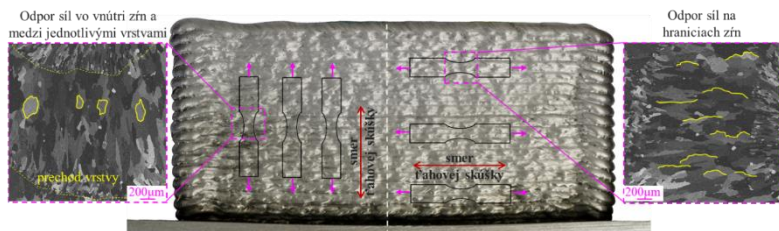
odobrané vo vertikálnom smere, kedy boli dosahované nižšie hodnoty pevnosti v ťahu v porovnaní s horizontálnym smerom odberu teliesok. Na základe Tukeyho testu, ktorý je znázornený na Obrázku 21, bola pozorovaná štatistická významnosť medzi dvojicami prietokového množstva plynu pre horizontálne vzorky (Obrázok 21a) a vertikálne vzorky (Obrázok 21b). Pri horizontálnych vzorkách bolo možné pozorovať štatisticky významný rozdiel medzi prietokovým množstvom plynu 6 l/min a ostatnými prietokovými množstvami plynu 8, 10, 12 a 14 l/min. Takisto nebol pozorovaný štatisticky významný rozdiel medzi prietokovým množstvom plynu 8 l/min a 12 l/min pre horizontálne vzorky. Model vykazoval veľmi dobré vlastnosti, kedy boli $R^2 = 99,53 \%$, $R^2(\text{adj}) = 99,34 \%$ a $R^2(\text{pred}) = 98,93 \%$. Naopak vo vertikálnom smere bola zistená štatistická významnosť medzi dvojicami prietokových množstiev plynu 8 l/min a 14 l/min, a takisto medzi 10 l/min a 12 l/min. V ostatných prípadoch nebola zistená štatistická významnosť. Regresný model vysvetľuje $R^2 = 95,01 \%$ variability závislej na premennej, $R^2(\text{adj}) = 93,02 \%$ a $R^2(\text{pred}) = 88,78 \%$.



Obr. 21 Tukeyho test štatistickej významnosti v závislosti od prietokového množstva plynu s ohľadom na (a) horizontálny, (b) vertikálny smer vyhotovenia teliesok pre statickú skúšku ťahom

Predpokladalo sa, že prietokové množstvo ochranného plynu bude ovplyvňovať mikroštruktúru navareného kovu, konkrétne vyšší prietok bude podporovať vznik jemnozmnejšej štruktúry. Výsledky experimentu potvrdili tento predpoklad, kedy bola pri vyššom prietokovom množstve plynu pozorovaná štruktúra s jemnejším znom, čo korešponduje s očakávaným mechanizmom redukcie difúzie a rastu zŕn v dôsledku nižšej maximálnej teploty. Očakávaná bola vyššia pevnosť v ťahu pri vyššom prietokovom množstve plynu, kedy dochádza k obmedzeniu difúzie vodíka, a teda rastu zrna. Táto rovnomernosť je nápomocná pri prevencii lokalizovaných koncentrácií napätia, čo zase zmierňuje riziko predčasnej deformácie a praskania (J. Wang a Nakato, 2023). Vertikálne telieska odolávajú silám vo vnútri zŕn a silám medzi nanesenými vrstvami. Horizontálne telieska odolávajú silám na hraniciach zŕn (Obrázok 22). Vyššie hodnoty pevnosti

horizontálnych teliesok naznačujú vyššiu súdržnosť a odpor voči pretrhnutiu, v prípade síl pôsobiacich vo vnútri zrn, v porovnaní so silami na hraniciach zrn (W. Wu a kol., 2019).



Obr. 22 Znáznornenie síl pôsobiacich pri skúške pevnosti v ťahu pre horizontálne a vertikálne skúšobné telieska

Vplyv mikroštruktúry a rastu zrn bol sledovaný prostredníctvom merania mikrotvrdości. Zmena priemernej mikrotvrdości komponentov, s meniacim sa prietokovým množstvom plynu, od hodnoty 8 l/min nebola výrazná. Na základe štatistickej analýzy bol pozorovaný štatisticky významný vplyv meranej oblasti na priemernú mikrotvrdość tenkostenného komponentu pri prietokovom množstve plynu 6 l/min, kedy bola p-hodnota = 0,03. Nižšie prietokové množstvo plynu nezabezpečilo dostatočnú ochranu zvarového kúpeľa, čo negatívne ovplyvnilo homogenitu komponentu a výslednú mikrotvrdość. So zvýšením prietokového množstva plynu na hodnoty 8, 10, 12 a 14 l/min nebol potvrdený štatisticky významný vplyv, zmenou merania pri spodnej a vrchnej oblasti tenkostenného komponentu. Takisto nebol pozorovaný štatisticky významný vplyv prietokového množstva plynu na výslednú mikrotvrdość. Wang a kolektív skúmali vplyv vývoja mikroštruktúry na mikrotvrdość hliníkovej zliatiny AA5356. Zistili, že hodnoty mikrotvrdości nanosených vrstiev boli vo všeobecnosti vyššie ako 78 HV. Pozorovali, že mikrotvrdość medzivrstvy je vyššia, v porovnaní s mikrotvrdoťou vnútornej vrstvy, z dôvodu výskytu rovnoosých zrn, zatiaľ čo oblasť vrstvy navareného tenkostenného komponentu, pozostávala zo zmesi rovnoosých a stĺpcových zrn (J. Wang a kol., 2023).

Pórovitosť je všeobecným problémom pri spracovaní väčšiny hliníkových zliatin, pričom cieľom je eliminovať ju a tým zvyšovať mechanické vlastnosti. Tie sú ovplyvňované počtom, veľkosťou a tvarom pórov (Toda a kol., 2009). So zvyšujúcim sa prietokovým množstvom plynu dochádzalo k zoskupovaniu metalurgicky indukovaných pórov smerom k hodnote sféricity 1. Zatiaľ čo póry súvisiace so zmršťovaním mali tendenciu mať nižšie hodnoty sféricity (McLean a kol., 2022). Priemerná sféricita dosahovala hodnotu 0,6.

Autori Gu a kolektív pozorovali vyššiu hodnotu sféricity pri hliníkovej zliatine AA5087, po tepelnom spracovaní s hodnotou 0,82 (J. Gu, a kol., 2016). Pri nižšom prietokovom množstve plynu 6 l/min boli pozorované póry s väčším priemerom v dôsledku hrubšej štruktúry stĺpcových zŕn v oblasti vrstvy (Fang, a kol., 2018). Väčšina indukovaných pórov v hliníkovom zvarovom kove je nerozpustený vodík, čo je dôsledkom veľkého rozdielu rozpustnosti v kvapalnom a pevnom stave.

Zvýšenie prietoku plynu o 2 l/min viedlo k približne 4 % zníženiu pórovitosti pri vyšších prietokoch, zatiaľ čo podobné zvýšenie pri nižších prietokoch plynu (6, 8 a 10 l/min) znížilo pórovitosť približne o 28,12 %. Štatisticky významné rozdiely boli pozorované najmä medzi skupinami s nižším prietokovým množstvom plynu, a to 6 a 8 l/min. To naznačuje, že zvýšenie prietokového množstva plynu vedie k zmenšeniu priemeru pórov v naváraných tenkostenných komponentoch. Predpokladalo sa, že pórovitosť v navarených komponentoch bude ovplyvnená prítomnosťou vodíka, pričom množstvo a distribúcia pórov budú závisieť aj od prietokového množstva plynu. Najnižšia pórovitosť bola zaznamenaná pri prietokovom množstve plynu 12 l/min, čo potvrdzuje predpoklad, že zvýšenie prietokového množstva plynu do určitej miery prispieva k eliminácii pórovitosti v hliníkovej zliatine AA5087 vyrobenej metódou WAAM. Póry sa prednostne vyskytovali v prechodových oblastiach medzi jednotlivými vrstvami. Napriek tomu najvyšší obsah vodíka bol detegovaný pri prietokovom množstve plynu 14 l/min. To nepotvrdzuje vedecký predpoklad, i keď morfológia a ich sústredenie v prechodových oblastiach naznačujú, že by mohli byť dôsledkom vodíkom indukovaného mechanizmu. Výsledky preto poukazujú na potrebu ďalšej analýzy s dôrazom na dynamiku uvoľňovania plynov počas tuhnutia zvarového kúpeľa.

Na základe grafického znázornenia korózných skúšok možno interpretovať náchylnosť tenkostenných komponentov z hliníkovej zliatiny AA5087 vyhotovených WAAM-MIG na koróznú odolnosť. Najlepšia korózná odolnosť pri potenciodynamickom teste bola zaznamenaná pri prietokovom množstve plynu 12 l/min. Najlepšiu koróznú odolnosť pri cyklickom potenciodynamickom teste a expozičnom teste v HNO_3 dosiahli vzorky vyhotovené s prietokovým množstvom plynu 14 l/min. Pri cyklickom potenciodynamickom teste bolo pri nižších prietokových množstvách plynu (6 a 8 l/min) pozorované zhlukovanie jamkovej korózie v blízkosti pórov, ako iniciátorov korózie. So zvyšujúcim sa prietokovým množstvom plynu dochádzalo k presunu jamkovej korózie do oblastí medzivrstvy, odkiaľ sa šírila smerom do hrubozrnnej štruktúry. Jamky vznikali v dôsledku prítomnosti intermetalických

zlúčenín na báze Fe a Mn, ktoré reagujú s kyslíkom a spôsobujú úbytok hliníka. Kciuk a kolektív porovnávali odolnosť troch hliníkových zliatin ($\text{AlMg}_{2,5}$, $\text{AlMg}_{5\text{Mn}}$, $\text{AlZn}_{5\text{Mg}1}$) proti jamkovej korózii. Autori vyhodnocovali náchylnosť zliatin $\text{AlMg}_{2,5}$ a $\text{AlMg}_{5\text{Mn}}$ proti jamkovej korózii v 3,5 % roztoku NaCl. Najlepšiu odolnosť proti jamkovej korózii preukázala zliatina $\text{AlZn}_{5\text{Mg}1}$ ($I_{\text{COR}} = 0,0022 \text{ mA/cm}^2$), kedy sa zinok správal ako anóda vo vzťahu k hliníkovej matici. Zároveň zistili, že so zvyšujúcim sa množstvom Mg v hliníkovej zliatine dochádza k poklesu koróznej odolnosti v dôsledku vylučovania intermetallickej fázy Al_3Mg_2 (Kciuk a kol., 2010).

PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE

Dizertačná práca prispela k získaniu nových poznatkov v oblasti oblúkového navárania metódou WAAM-MIG hliníkovej zliatiny AA5087.

Prínosy dizertačnej práce pre vedu:

- Výskum dopĺňa chýbajúce poznatky o správaní zliatiny AA5087, ktoré sú v odbornej literatúre menej preskúmané v porovnaní s bežnejšími zliatinami ako AA5356 alebo AA2319.
- Určenie vplyvu rýchlosti navárania a prietokového množstva plynu na výsledné geometrické charakteristiky jednovrstvových návarov.
- Predikcia procesu prostredníctvom štatistickej metódy formou multikriteriálnej analýzy na geometrické charakteristiky, pórovitosť a náklady spojené s prietokovým množstvom plynu.
- Určenie vplyvu prietokového množstva plynu na výsledné geometrické charakteristiky, mechanické vlastnosti, mikroštruktúru, koróznú odolnosť a termofyzikálne vlastnosti.
- Nové poznatky v oblasti vzniku pórov a vplyvu vodíka na pórovitosť hliníkovej zliatiny AA5087 vyhotovenej metódou WAAM-MIG.

Dizertačná práca bola riešená v rámci projektov:

- Výskum hybridnej výroby komponentov progresívnymi metódami navárania (Garant: Ing. Martin Sahul, PhD.)
- Charakterizácia geometrických a rozmerových vlastností tenkostenných komponentov z hliníkovej zliatiny vyrobených oblúkovým naváraním (Garant: Ing. Marián Pavlík)
- Vplyv vybraného ochranného plynu na pórovitosť hliníkových zliatin vyrobených metódou WAAM (Garant: Ing. Marián Pavlík)

Prínosy dizertačnej práce pre prax:

- Optimalizácia nákladov súvisiacich s prietokovým množstvom plynu v závislosti od geometrických, mechanických a korózných vlastností tenkostenných komponentov.
- Prostredníctvom pochopenia vplyvu prietokového množstva plynu možno predchádzať defektom (pórom, tvarovej nepresnosti) v procese výroby tenkostenných komponentov.
- Výsledky korózne odolnosti možno využiť pri výrobe komponentov určených do námorného, chemického alebo automobilového priemyslu, kde je zvýšená korózna odolnosť nevyhnutná.

- Na základe výsledkov 3D skenovania a merania vlnitosti, efektívnej šírky a celkovej šírky možno výrazne znížiť materiálový odpad po následnom obrábaní.

Prínosy dizertačnej práce pre pedagogiku:

- Výsledky dizertačnej práce možno využiť v oblasti výrobných technológií a materiálového inžinierstva v rámci výučby predmetov Teória zvarovania, Metalografia a fraktografia zvarových spojov, ako aj predmetov majúcich v obsahovej náplni simulačné procesy, 3D kovovú tlač, 3D skenovanie, či degradačné procesy a ich vplyv na vlastnosti materiálov.
- Realizácia výskumu v rámci dizertačnej práce prispela k riešeniu štyroch bakalárskych prác s názvami:
 1. *Štúdium geometrických vlastností tenkostenných komponentov z hliníkovej zliatiny vyhotovených oblúkovým naváraním.* (študent: Dalibor Benko, vedúci práce: Ing. Marián Pavlík)
 2. *Naváranie hliníkových zliatin.* (študent: Andrej Bartek, vedúci práce: doc. Dr. Ing. Pavel Kovačócy, konzultant: Ing. Marián Pavlík)
 3. *Vplyv stratégií WAAM na geometriu návarov.* (študent: Samuel Hrebíček, vedúci práce: doc. Dr. Ing. Pavel Kovačócy, konzultant: Ing. Marián Pavlík)
 4. *Charakteristika defektov komponentov vyhotovených metódou WAAM* (študent: Dávid Magula, vedúci práce: Ing. Ján Urminský, PhD., IWE, konzultant: Ing. Marián Pavlík)
- Riešeniu troch diplomových prác s názvami:
 1. *Štúdium vlastností komponentov z hliníkovej zliatiny vyrobených aditívnou výrobou oblúkovým naváraním.* (študent: Bc. Matúš Stiller, vedúci práce: Ing. Miroslav Sahul, PhD., IWE)
 2. *Optimalizácia procesu WAAM hliníkovej zliatiny.* (študent: Bc. Daniel Dvorák, vedúci práce: doc. Dr. Ing. Pavel Kovačócy, konzultant: Ing. Marián Pavlík)
 3. *Aditívna výroba komponentov zo zliatiny hliníka.* (študent: Bc. Tomáš Blažíček, vedúci práce: doc. Dr. Ing. Pavel Kovačócy, konzultant: Ing. Marián Pavlík)

ZÁVER

Súčasný vývoj konštrukčných materiálov smeruje k znižovaniu prevádzkových nákladov, pričom je tento cieľ vo veľkej miere dosahovaný nahrádzaním tradičných konštrukčných ocelí ľahšími, ale dostatočne pevnými a odolnými kovovými materiálmi. Medzi takéto materiály zaradujeme aj hliníkové zliatiny, ktoré sa stávajú základom pre vývoj moderných konštrukcií v leteckom, automobilom, námornom a energetickom priemysle. Osobitnú pozornosť si zaslúžia hliníkové zliatiny triedy 5xxx, konkrétne AA5087, ktorá patrí medzi nevytvrditeľné hliníkové zliatiny s vyšším obsahom horčíka a nižšou hustotou. Vďaka horčíku dosahuje zliatina výbornú koróznú odolnosť, najmä v prímorskom prostredí, a lepšie mechanické vlastnosti, ako pevnosť a húževnatosť.

V súlade s technologickým pokrokom výrobných procesov sa zvyšuje záujem o aditívne technológie spracovania kovových materiálov do veľkorozmerných komponentov s výrazne redukovaným odpadom a skráteným výrobným cyklom. Cieľom smerovania dizertačnej práce bolo nadviazať na tento súčasný technologický vývoj a vytvoriť experimentálny koncept vplyvu prietokového množstva ochranného plynu argónu na výsledné mechanické, mikroštruktúrne, korózne a termofyzikálne vlastnosti v rámci tenkostenných komponentov vyhotovených metódou WAAM-MIG. Metóda WAAM je v súčasnosti vysoko aktuálna vedecká téma, o čom hovorí aj vzrastajúce množstvo svetových časopiseckých publikácií. Experiment pozostával z navárania tenkostenných komponentov drôtom s priemerom 1,2 mm z hliníkovej zliatiny AA5087 na substrátovú podložku AA5083 s hrúbkou 4 mm.

Jedným z kľúčových faktorov, ktorý zásadne ovplyvňuje presadzovanie aditívnej výroby oblúkovým naváraním je kvalita naneseného materiálu. Tú ovplyvňuje aj prietokové množstvo ochranného plynu, ktoré má priamy vplyv na mikroštruktúru návaru a jej formovanie do dendritickej, či celulónej štruktúry v závislosti od podmienok ochladzovania a ochrany pred oxidáciou. Zmenou prietokového množstva plynu dochádza k zmene veľkosti zŕn, distribúcie precipitačných fáz, ako aj úrovne pórovitosti a iných defektov, ktoré sú kritické z hľadiska konečnej integrity tenkostenného komponentu. Priamy dopad na výber materiálu v aplikáciách so zvýšenými teplotnými gradientmi majú aj termofyzikálne vlastnosti, ktoré sa so zmenou prietokového množstva plynu menia.

S prihliadnutím na komplexné vyhodnotenie jednotlivých charakteristík bolo možné identifikovať rozdiely spôsobené meniacim sa prietokovým

množstvom ochranného plynu na kvalitu navarených tenkostenných komponentov. Najnižšia úroveň pórovitosti, ako aj najvýhodnejšie výsledky diferenčnej skenovacej kalorimetrie (DSC), boli zaznamenané pri prietokovom množstve plynu 12 l/min, čo naznačuje priaznivé podmienky tuhnutia a nižšiu mieru tvorby defektov v mikroštruktúre. Koeficient tepelnej rozťažnosti vykazoval vyššie hodnoty pri vyšších prietokových množstvách plynu, to charakterizuje zvýšenú náchylnosť k rozmerovým zmenám pri tepelnom zaťažení. Horizontálne orientované vzorky pritom preukázali konzistentnejší priebeh dilatometrických kriviek v porovnaní s vertikálnymi vzorkami, čo môže súvisieť so smerom tuhnutia a odvodom tepla. Najvyššia pevnosť v ťahu, bez ohľadu na orientáciu vrstiev, bola dosiahnutá pri prietokovom množstve plynu 14 l/min, pričom mikrotvrdosť vykazovala maximálne hodnoty v dolnej časti komponentu pri 12 l/min a vo vrchnej časti pri 10 l/min. Z pohľadu koróznej odolnosti boli výsledky variabilné, kedy najlepšia odolnosť proti medzikryštálovej aj jamkovej korózii bola dosiahnutá pri prietokovom množstve plynu 14 l/min. Zatiaľ čo najnižšia korózna reaktivita v klasickej potenciodynamickom teste bola zaznamenaná pri prietokovom množstve plynu 12 l/min. Geometrické charakteristiky ukázali najnižšiu vlnitosť pri prietokovom množstve plynu 10 l/min, pričom najmenšia odchýlka od požadovaného komponentu bola pri prietokovom množstve 12 l/min. Na základe uvedeného možno konštatovať, že prietokové množstvo plynu 12 l/min predstavuje optimálny kompromis medzi mikroštruktúrnou kvalitou, koróznou odolnosťou, rozmerovou presnosťou a termofyzikálnymi vlastnosťami naváraných komponentov, pričom pevnostné charakteristiky možno ďalej optimalizovať úpravou iných technologických premenných.

Na základe výsledkov dizertačnej práce nejde o maximalizovanie prietokového množstva plynu, ale o jeho optimalizovanie na úroveň rovnovážneho stavu medzi účinným tavením a stabilitou procesu prostredníctvom procesného systému, ktorý podporí tvorbu homogénnej štruktúry s minimálnym výskytom defektov. Stabilita procesu WAAM-MIG následne zabezpečí presnosť a opakovateľnosť komponentov, čo zásadne ovplyvňuje požiadavky na následné dokončovacie operácie.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

- Anyalebechi, P. N. (2013). Hydrogen-induced gas porosity formation in Al-4.5 wt% Cu-1.4 wt% Mg alloy. *Journal of Materials Science*, 48(15), 5342–5353. <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7329-2>
- Arthanari, S., Jang, J. C., Shin, K. S. (2019). Corrosion performance of high pressure die-cast Al-Si-Mg-Zn alloys in 3.5 wt% NaCl solution. *Journal of Alloys and Compounds*, 783, 494–502. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.313>
- Buchanan, C., Gardner, L. (2019). Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. *Engineering Structures*, 180, 332–348. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.045>
- Dutra, J. C., e Silva, R. H. G., Savi, B. M., Marques, C., Alarcon, O. E. (2015). Metallurgical characterization of the 5083H116 aluminum alloy welded with the cold metal transfer process and two different wire-electrodes (5183 and 5087). *Welding in the World*, 59(6), 797–807. <https://doi.org/10.1007/s40194-015-0253-0>
- Engler, O., Kuhnke, K., Westphal, K., Hasenclever, J. (2018). Impact of chromium on the microchemistry evolution during solidification and homogenization of the Al-Mg alloy AA 5052. *Journal of Alloys and Compounds*, 744, 561–573. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.02.125>
- Fang, X., Zhang, L., Chen, G., Dang, X., Huang, K., Wang, L., Lu, B. (2018). Correlations between microstructure characteristics and mechanical properties in 5183 aluminium alloy fabricated by wire-arc additive manufacturing with different arc modes. *Materials*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/ma11112075>
- Fu, R., Tang, S., Lu, J., Cui, Y., Li, Z., Zhang, H., Xu, T., Chen, Z., Liu, C. (2021). Hot-wire arc additive manufacturing of aluminum alloy with reduced porosity and high deposition rate. *Materials & Design*, 199, 109370. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109370>
- Gierth, M., Henckell, P., Ali, Y., Scholl, J., Bergmann, J. P. (2020). Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Aluminum Alloy AlMg5Mn with Energy-Reduced Gas Metal Arc Welding (GMAW). *Materials (Basel, Switzerland)*, 13(12), 2671. <https://doi.org/10.3390/ma13122671>
- Gu, J., Ding, J., Williams, S. W., Gu, H., Ma, P., Zhai, Y. (2016). The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 230, 26–34. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.11.006>

- Gu, J., Yang, S., Gao, M., Bai, J., Zhai, Y., Ding, J. (2020). Micropore evolution in additively manufactured aluminum alloys under heat treatment and inter-layer rolling. *Materials & Design*, 186, 108288. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108288>
- Hauser, T., Reisch, R. T., Seebauer, S., Parasar, A., Kamps, T., Casati, R., Volpp, J., Kaplan, A. F. H. (2021). Multi-Material Wire Arc Additive Manufacturing of low and high alloyed aluminium alloys with in-situ material analysis. *Journal of Manufacturing Processes*, 69, 378–390. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.08.005>
- Huang, K., Zhao, Q., Li, Y., Marthinsen, K. (2015). Two-stage annealing of a cold-rolled Al–Mn–Fe–Si alloy with different microchemistry states. *Journal of Materials Processing Technology*, 221, 87–99. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.02.016>
- Cherdo, L. (2022). Metal 3D printers in 2022: a comprehensive guide. Aniwa. <https://www.anywa.com/buyers-guide/3d-printers/best-metal-3d-printer/>
- Jebaraj, A. V., Aditya, K. V. v, Kumar, T. S., Ajaykumar, L., Deepak, C. R. (2020). Mechanical and corrosion behaviour of aluminum alloy 5083 and its weldment for marine applications. *Materials Today: Proceedings*, 22, 1470–1478. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.505>
- Kalaiselvan, K., Elango, A., Nagarajan, N. M., Mathiyazagan, N. (2014). Studies on Ti/Al sheet joint using Laser beam welding-A Review. In *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electronics and Communication Engineering* (Vol. 8, Issue 11).
- Kciuk, M., Kurc-Lisiecka, A., Szweczenko, J., Kciuk, M., Kurc, A., Szweczenko, J. (2010). Structure and corrosion resistance of aluminium AlMg2.5; AlMg5Mn and AlZn5Mg1 alloys. www.journalamme.org
- Kim, S. J., Jang, S. K., Han, M. S., Park, J. C., Jeong, J. Y., Chong, S. O. (2013). Mechanical and electrochemical characteristics in sea water of 5052-O aluminum alloy for ship. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 23(3), 636–641. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62510-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62510-8)
- Li, S., Zhang, L.-J., Ning, J., Wang, X., Zhang, G.-F., Zhang, J.-X., Na, S.-J., Fatemeh, B. (2020). Comparative study on the microstructures and properties of wire+arc additively manufactured 5356 aluminium alloy with argon and nitrogen as the shielding gas. *Additive Manufacturing*, 34, 101206. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101206>
- Li, Z., Liu, C., Xu, T., Ji, L., Wang, D., Lu, J., Ma, S., Fan, H. (2019). Reducing arc heat input and obtaining equiaxed grains by hot-wire method during arc additive manufacturing titanium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 742, 287–294. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.022>

- Martina, F., Ding, J., Williams, S., Caballero, A., Pardal, G., Quintino, L. (2019). Tandem metal inert gas process for high productivity wire arc additive manufacturing in stainless steel. *Additive Manufacturing*, 25, 545–550. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.022>
- McClean, N., Bermingham, M. J., Colegrove, P., Sales, A., Soro, N., Ng, C. H., Dargusch, M. S. (2022). Effect of Hot Isostatic Pressing and heat treatments on porosity of Wire Arc Additive Manufactured Al 2319. *Journal of Materials Processing Technology*, 310, 117769. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117769>
- O'Neill, B. (2021). What's the total cost of ownership for metal 3D printing? Aniwa. <https://www.aniwa.com/insight/3d-printers/total-metal-3d-printing-cost/>
- Pourkia, N., Emamy, M., Farhangi, H., Ebrahimi, S. H. S. (2010). The effect of Ti and Zr elements and cooling rate on the microstructure and tensile properties of a new developed super high-strength aluminum alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 527(20), 5318–5325. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.05.009>
- Rännar, L., Glad, A., Gustafson, C. (2007). Efficient cooling with tool inserts manufactured by electron beam melting. *Rapid Prototyping Journal*, 13(3), 128–135. <https://doi.org/10.1108/13552540710750870>
- Ryan, E. M., Sabin, T. J., Watts, J. F., Whiting, M. J. (2018). The influence of build parameters and wire batch on porosity of wire and arc additive manufactured aluminium alloy 2319. *Journal of Materials Processing Technology*, 262, 577–584. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.07.030>
- Singh, S., Sharma, S. kumar, Rathod, D. W. (2021). A review on process planning strategies and challenges of WAAM. *Materials Today: Proceedings*, 47, 6564–6575. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.632>
- Toda, H., Hidaka, T., Kobayashi, M., Uesugi, K., Takeuchi, A., Horikawa, K. (2009). Growth behavior of hydrogen micropores in aluminum alloys during high-temperature exposure. *Acta Materialia*, 57(7), 2277–2290. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.01.026>
- Tonelli, L., Laghi, V., Palermo, M., Trombetti, T., Ceschini, L. (2021). AA5083 (Al–Mg) plates produced by wire-and-arc additive manufacturing: effect of specimen orientation on microstructure and tensile properties. *Progress in Additive Manufacturing*, 6(3), 479–494. <https://doi.org/10.1007/s40964-021-00189-z>
- Tsurumaki, T., Tsukamoto, S., Chibahara, H., Sasahara, H. (2019). Precise additive fabrication of wall structure on thin plate end with interlayer temperature monitoring. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 13(2), JAMDSM0028–JAMDSM0028. <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2019jamdsm0028>

Wang, J., Nakato, R. (2023). Comprehensive multiomics analyses reveal pervasive involvement of aberrant cohesin binding in transcriptional and chromosomal disorder of cancer cells. *IScience*, 26(6). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106908>

Wang, J., Zhu, K., Zhang, W., Zhu, X., Lu, X. (2023). Microstructural and defect evolution during WAAM resulting in mechanical property differences for AA5356 component. *Journal of Materials Research and Technology*, 22, 982–996. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.116>

Williams, S. (2015). REPORT Wire +arc additive manufacturing vs. traditional machining from solid: a cost comparison.

Williams, S. W., Martina, F., Addison, A. C., Ding, J., Pardal, G., Colegrove, P. (2016). Wire + Arc Additive Manufacturing. *Materials Science and Technology*, 32(7), 641–647. <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>

Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Xu, J., Norrish, J. (2018). A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. *Journal of Manufacturing Processes*, 35, 127–139. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>

Wu, W., Xue, J., Wang, L., Zhang, Z., Hu, Y., Dong, C. (2019). Forming process, microstructure, and mechanical properties of thin-walled 316L stainless steel using speed-cold-welding additive manufacturing. *Metals*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/met9010109>

Yang, D., Huang, Y., Fan, J., Jin, M., Peng, Y., Wang, K. (2021). Effect of N₂ content in shielding gas on formation quality and microstructure of high nitrogen austenitic stainless steel fabricated by wire and arc additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 61, 261–269. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.11.020>

Yilmaz, O., Uğla, A. A. (2016). Shaped metal deposition technique in additive manufacturing: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230(10), 1781–1798. <https://doi.org/10.1177/0954405416640181>

ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI

ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

ADC01 PAVLÍK, Marián [27 %] - SAHUL, Miroslav [27 %] - SAHUL, Martin [27 %] - NAGY - TREMBOŠOVÁ, Veronika [7 %] - PAŠÁK, Matej [6 %] - HODÚLOVÁ, Erika [1 %] - ENZINGER, Norbert [1 %] - PIXNER, Florian [2 %] - KOLARÍK, Ladislav [2 %]. Influence of Electron Beam Welding Parameters on the Properties of Dissimilar Copper–Stainless Steel Overlapped Joints. In Journal of Materials Engineering and Performance. Vol. 32, iss. 15 (2023), s. 6974-6994. ISSN 1059-9495 (2023). V databáze: DOI: 10.1007/s11665-022-07585-8 ; SCOPUS: 2-s2.0-85141204342 ; WOS: 000878023600004 ; CC: 001033209400031.

ADC02 SAHUL, Martin [35 %] - SAHUL, Miroslav [25 %] - PAVLÍK, Marián [25 %] - KOLARÍK, Ladislav [5 %] - BERÁNEK, Libor [5 %] - HORVÁTH, Jakub [5 %]. The effect of direct energy deposition arc mode on the porosity of AA5087 aluminum alloy. In Materials Letters. Vol. 363, (2024), art. no. 136224, s. 1-5. ISSN 0167-577X (2023). V databáze: DOI: 10.1016/j.matlet.2024.136224 ; SCOPUS: 2-s2.0-85187791589 ; WOS: 001221926400001 ; CC: 001221926400001.

ADC03 SAHUL, Miroslav [25 %] - PAVLÍK, Marián [25 %] - SAHUL, Martin [25 %] - KOVAČÓCY, Pavel [10 %] - MARTINKOVIČ, Maroš [15 %]. Effect of Travel Speed on the Properties of 5087 Aluminum Alloy Walls Produced by Wire and Arc Additive Manufacturing. In Journal of Materials Engineering and Performance. Vol. 33, iss. 16 (2024), s. 8582-8600. ISSN 1059-9495 (2023). V databáze: DOI: 10.1007/s11665-024-09166-3 ; SCOPUS: 2-s2.0-85185918488 ; WOS: 001173682700005 ; CC: 001304188100012.

ADE Vedecké práce v ostatných zahraničných časopisoch

ADE01 PAVLÍK, Marián [50 %] - MLKVA, Miroslava [50 %]. Proposal of measures for implementing the 7s method in chemical storage cabinets in Ikea Industry Slovakia s.r.o., Trnava branch establishment. In Acta Logistica Moravica. Roč. 9, č. 2 (2019), s. 34-41. ISSN 1804-8315.

ADE02 ZAKHAR, Ronald [50 %] - ČACHO, František [15 %] - VRETNÁR, Viliam [15 %] - PAVLÍK, Marián [10 %] - HUDEC, Pavol [10 %]. Porovnanie rôznych adsorpčných materiálov pri odstraňovaní päťmocného arzenu z vôd. In Vodní hospodářství. Roč. 71, č. 9 (2021), s. 7-11. ISSN 1211-0760 (2021).

ADF Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch

ADF01 SAHUL, Miroslav [20 %] - SAHUL, Martin [20 %] - PAVLÍK, Marián [20 %] - KOVAČÓCY, Pavel [20 %] - LUDROVCOVÁ, Barbora [Bočáková, Barbora] [20 %]. Výroba komponentov aditívnou výrobou oblúkovým naváraním. In Zvárač - profesionál. Roč. 19, č. 3 (2022), s. 9-11. ISSN 1336-5045.

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

ADM01 PAVLÍK, Marián [20 %] - LUDROVCOVÁ, Barbora [Bočáková, Barbora] [20 %] - SAHUL, Martin [20 %] - SAHUL, Miroslav [20 %] - KOTIANOVÁ, Janette [20 %]. Effect of WAAM parameters on the aluminum alloy single layer bead geometry. In MM Science Journal. March (2025), s. 8217-8224. ISSN 1803-1269(P) (2023). V databáze: DOI: 10.17973/MMSJ.2025_03_2025014 ; SCOPUS: 2-s2.0-105000047176 ; WOS: 001436564900001.

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

AFC01 PAVLÍK, Marián [25 %] - SAHUL, Miroslav [25 %] - SAHUL, Martin [25 %] - NOVÁK, Vít [25 %]. Influence of CMT overlay welding mode on the microstructure and mechanical properties of 5087 aluminium alloy fabricated by Wire and Arc Additive Manufacturing. In The 76 IIW Annual Assembly and International Conference on Welding and Joining (IIW 2023) : 16-21 July 2023, Singapore. 1. vyd. Singapore : Research Publishing, 2023, S. 237-244. ISBN 978-981-18-7859-6.

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

AFD01 BEHÚLOVÁ, Mária [16,66 %] - BABALOVÁ, Eva [16,66 %] - SAHUL, Miroslav [16,66 %] - SAHUL, Martin [16,66 %] - PAVLÍK, Marián [16,66 %] - NĚMEC, Tomáš [16,66 %]. Modelling and numerical simulation of temperature fields during WAAM production of an aluminum part. In Journal of Physics: Conference Series. Vol. 2931, 33rd Joint Seminar Development of Materials Science in Research and Education (DMSRE33) 09/09/2024 - 13/09/2024 Tatranská Štrba, Slovakia (2024), s. 1-13. ISSN 1742-6588 (2023). V databáze: DOI: 10.1088/1742-6596/2931/1/012025 ; SCOPUS: 2-s2.0-85214028008.

AFG Abstrakty príspevkov zo zahraničných konferencií

AFG01 ZAKHAR, Ronald [50 %] - DERCO, Ján [20 %] - ČACHO, František [20 %] - PAVLÍK, Marián [10 %]. Modeling of the Adsorptive Removal of Pentavalent Arsenic from Drinking Water. In Water Research and Innovations in a Digital Era : Book of abstracts. 1. vyd. Riga, Latvia : Riga Technical University, 2021, S. 98-99. ISBN 978-9934-22-618-2.

BEF Odborné práce v domácich zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

BEF01 PAVLÍK, Marián [21 %] - SAHUL, Miroslav [21 %] - SAHUL, Martin [21 %] - KOVAČOCY, Pavel [12 %] - MARTINKOVIČ, Maroš [10 %] - KOTIANOVÁ, Janette [10 %] - ČERVEŇANSKÁ, Zuzana [5 %]. Analysis of the properties of overlapped welded joints of dissimilar Cu ETP - AISI304 austenitic stainless steel. In Zváranie 2022 : 49. medzinárodná konferencia, 09. - 11. november 2022, Tatranská Lomnica, SR. 1. vyd. Bratislava : Slovenská zvaračská spoločnosť, 2022, S. 62-69. ISBN 978-80-89296-26-2.

BFA Abstrakty odborných prác zo zahraničných podujatí (konferencie...)

BFA01 PAVLÍK, Marián [30 %] - SAHUL, Miroslav [10 %] - SAHUL, Martin [30 %] - LUDROVCOVÁ, Barbora [Bočáková, Barbora] [30 %]. Mapping of Geometric Characteristics of Overlay Welded Walls of Aluminum Alloy AA5087. In Nanomaterials: Applications & Properties (NAP 2024) [Book of Abstracts] : 2024 IEEE 14th International Conference "Nanomaterials: Applications & Properties" (IEEE NAP-2024), September 8–13, 2024, Riga, Latvia. 1. vyd. Piscataway, New Jersey, USA : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2024, S. 418.

BFA02 PAVLÍK, Marián [30 %] - SAHUL, Miroslav [10 %] - SAHUL, Martin [30 %] - LUDROVCOVÁ, Barbora [Bočáková, Barbora] [30 %]. The Influence of Interlayer Waiting Time on the Temperature Distribution in Aluminium Alloy made with Wire and Arc Additive Manufacturing. In Nanomaterials: Applications & Properties (NAP 2024) [Book of Abstracts] : 2024 IEEE 14th International Conference "Nanomaterials: Applications & Properties" (IEEE NAP-2024), September 8–13, 2024, Riga, Latvia. 1. vyd. Piscataway, New Jersey, USA : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2024, S. 419.

BFA03 SAHUL, Miroslav [60 %] - STILLER, Matúš [1 %] - PTAČINOVÁ, Jana [10 %] - KOLAŘÍK, Ladislav [1 %] - PAVLÍK, Marián [15 %] - SAHUL, Martin [10 %] - KOVAČOČY, Pavel [1 %] - POGREBNJAK, Alexander [1 %] - VOPÁT, Tomáš [1 %]. Study of the Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured 5087 Aluminium Alloy. In Nanomaterials: Applications & Properties 2022 : 12th International Conference "Nanomaterials: Applications & Properties" (IEEE NAP - 2022), 11-16 September 2022. Kraków, Poland. 1. vyd. Kraków, Poland : Silesian University of Technology, 2022, S. 165.

BFB Abstrakty odborných prác z domácich podujatí (konferencie...)

BFB01 BEHÚLOVÁ, Mária [16,66 %] - BABALOVÁ, Eva [16,66 %] - SAHUL, Miroslav [16,66 %] - SAHUL, Martin [16,66 %] - PAVLÍK, Marián [16,66 %] - NĚMEC, Tomáš [16,66 %]. Modelling and numerical simulation of temperature fields during WAAM production of an aluminium part. In DMSRE 2024 [Book of Abstracts] : Development of Materials Science in Research and Education, 33rd Joint Seminar, Tatranská Štrba, 9-13 September 2024. 1. vyd. Bratislava : FCHPT STU, 2024, S. 19. ISBN 978-80-8208-129-2 (printed).

BFB02 SAHUL, Miroslav [35 %] - SAHUL, Martin [25 %] - KOLAŘÍK, Ladislav [5 %] - PAVLÍK, Marián [20 %] - NOVÁK, Vít [10 %] - PIXNER, Florian [5 %]. Analysis of Mechanical Properties of Wire and Arc Additively Manufactured AA5087 Aluminium Alloy. In Nanomaterials: Applications & Properties : 2023 IEEE 13th International Conference (IEEE NAP 2023), 10-15 september 2023, Bratislava, Slovakia. 1. vyd. Bratislava : Institute of Electrical and Electronics Engineering, 2023, S. 128.

Štatistika podľa kategórie publikačnej činnosti do roku 2021

ADC	Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch	3
ADE	Vedecké práce v ostatných zahraničných časopisoch	2
ADF	Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch	1
ADM	Vedecké práce v zahraničných časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS	1
AFC	Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách	1
AFD	Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách	1
AFG	Abstrakty príspevkov zo zahraničných konferencií	1
BEF	Odborné práce v domácich zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)	1
BFA	Abstrakty odborných prác zo zahraničných podujatí (konferencie...)	3
BFB	Abstrakty odborných prác z domácich podujatí (konferencie...)	2
Súčet		16

Štatistika kategórie ohlasov od roku 2022

Citácie v publikáciách registrovaných v citačných indexoch	13
Zahraničné	13
Spolu	13

Zdroje metrik: Clarivate, Scopus a Journalmetrics