

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

Ing. Martin Medňanský

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE
VÝSKUM VYUŽITIA PÓROVITÝCH KOVOVÝCH MATERIÁLOV
V TECHNOLOGII OVERCASTING

Na získanie akademického titulu **d o k t o r**
(„philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“)
v študijnom odbore Strojárstvo
v študijnom programe Strojárske technológie

Žilina 2025

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

Predkladateľ: Ing. Martin Medňanský
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra technologického inžinierstva

Školiteľ: doc. Ing. Marek Brůna, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra technologického inžinierstva

Oponenti: 1. prof. Ing. Augustín Sládek, PhD.
2. doc. Ing. Petr Lichý, Ph.D.
VŠB Technická univerzita v Ostrave, Fakulta materiálově-technologická,
Katedra metalurgie a slévarenství
3. Ing. Radka Podprocká, PhD.
Magna PT s.r.o.

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa 26.8.2025 o 10:00 hod. v miestnosti BA302 na SjF, Univerzitná 8215/1, 010 26, Žilina, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou odborovou komisiou v študijnom odbore Strojárstvo, v študijnom programe Strojárske technológie, vymenovanou dekanom Strojníckej fakulty, Žilinskej univerzity v Žiline.

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

prof. Ing. Dana Bolibruchová, PhD. v. r.
predseda komisie pre obhajobu dizertačnej práce

ÚVOD

Automobilový priemysel sa v dôsledku požiadaviek na uhlíkovú neutralitu aktívne usiluje aplikovať úspory energie a znižovanie emisií. Hliníkové zliatiny, ktoré predstavujú účinné riešenie úspory energie a emisií, sú dominantným materiálom pre znižovanie hmotnosti vozidiel. Takmer 60 % komponentov vozidiel sa vyrába vysokotlakovým liatím, ktorým možno dosiahnuť 30 - 50 % zníženie finálnej hmotnosti vozidla. Tlakové odlievania zliatin hliníka je však energeticky náročné a má negatívny dopad na životné prostredie.

Ďalšou, pomerne novou možnosťou znižovania hmotnosti akéhokoľvek konštrukčného prvku je tzv. topologická optimalizácia, resp. evolučná optimalizácia štruktúry. Základnou myšlienkou je odstraňovanie neefektívnych prvkov štruktúry, ktoré neovplyvňujú funkčnosť súčiastky – neovplyvňujú prenesené napätie, deformáciu, tuhosť, či rezonančnú frekvenciu súčiastky. Iteráciou a evolúciou návrhu sa získava komplexný tvar súčiastky. Nevýhodou je, že takto optimalizovaný tvar je často nevyrobiteľný konvenčnými zlievarenskými technológiami a technolog je nútený aplikovať trieskové technológie, ktoré majú znížené využitie materiálu, alebo pristúpiť k nekonvenčným technológiám, ako je aditívna výroba. Jej využitie na výrobu celej súčiastky však nemusí byť ekonomicky výhodné.

V práci je navrhovaný alternatívny postup znižovania hmotnosti súčiastky. Navrhuje sa využiť konvenčné metódy gravitačného odlievania s využitím jadier, ktoré majú nižšiu relatívnu hustotu ako základný kov – Al zliatina. Táto vlastnosť sa zabezpečí vyrobením jadier z penovej, resp. bunkovej štruktúry. Od prelomu tisícročia prebieha výskum a vývoj hliníkových pórovitých materiálov vyrobených rôznymi metódami. Výroba bunkových kovových štruktúr bola rovnako podporená rozvojom kovovej aditívnej výroby. Spojenie jadier s odliatkom bude zabezpečené metódou overcasting, teda zalievaním tuhého ľahkého pórovitého jadra tekutým kovom.

Práca sa venuje kovovým penám a bunkovým štruktúram v kontexte ich mechanických a fyzikálnych vlastností, možností ich výroby, testovania a ich implementácie do procesu odlievania. Experimentálne sú vyrobené pórovité a bunkové jadrá a hybridné odliatky. Práca sa venuje vplyvu technologických parametrov na mechanické a fyzikálne vlastnosti jadier z hliníkovej peny a vplyv geometrie bunkovej štruktúry aditívne vyrobených jadier na ich vlastnosti, rovnako vplyv týchto parametrov na hybridné odliatky. Mikroskopicky je skúmaná miera prepojenia kovov odliatku a jadra a možnosti jej optimalizácie. Cieľom dizertačnej práce je navrhnúť a vykonať komplexné testovanie vlastností hybridných odliatkov a ich súčastí.

PREHĽAD PROBLEMATIKY

V poslednom období sa mnohé odvetvia priemyslu snažia o racionálny postoj k environmentálnej otázke, a ani automobilový priemysel nie je výnimkou. Aj tu možno sledovať snahu o zníženie uhlíkovej stopy, čo sa dosahuje využívaním šetrnejších technológií výroby, alebo zmenami vyrábaných súčiastok predovšetkým znižovaním hmotnosti. Preto sa touto tematikou zaoberá aj predkladaná práca. Navrhuje využitie kovových jadier s nízkou relatívnou hustotou zabezpečenou uzatvoreným plynom v objemoch pórov, ktorými sú tvorené, a ich zaliatím tekutým kovem.

V dostupnej literatúre boli popísané technológie výroby kovových pien s ich výhodami, nevýhodami a rozličnými aplikáciami. Medzi jedny z najzaujímavejších patrí technológia výroby kovovej peny napeňovaním lisovaného kovového prášku. Výhodou je chemická homogenita lisovaného polotovaru – kov a napeňovadlo sa miešajú v tuhom stave vo forme prášku, napeňovadlo nie je vkladané do tekutého kovu, ako je tomu pri iných technológiách prípravy Al peny. Možnosť riadenia distribúcie a veľkosti pórov by mala byť relatívne dobrá pomocou zmien technologických parametrov – pôsobiaceho tlaku pri napeňovaní, teploty, ochrannej atmosféry. Touto technológiou sa získava štruktúra s uzatvorenými pórmí, ktorá je oproti štruktúre s otvorenými pórmí vhodnejšia na absorbovanie kinetickej energie.

Geometricky najpresnejšie riadené bunkové kovové štruktúry je možné vytvárať aditívnou výrobou. Pre experimentálne účely je za najvhodnejšiu možné považovať technológiu SLM (Selective Laser Melting). Zabezpečuje vysokú presnosť a výhodné mechanické vlastnosti materiálu vyplývajúce z rýchleho ochladenia malého, selektívne nataveného objemu kovu. Na experimentálne účely však bola vybraná FDM (Fused Deposition Modeling) metóda aditívnej výroby vzhľadom na jej nízke zriaďovacie náklady a moderný, no nedostatočne prebádaný prístup ku kovovej aditívnej výrobe. Princípom je 3D tlač špeciálneho tlačového média, ktoré pozostáva z prášku kovového materiálu dispergovaného v polymérovej matrici. Po vytavení podpornej matrice a spekaní prášku je nadobudnutá kovová súčiastka.

Bunkové štruktúry môžu byť vytvorené pomocou diskretných nosníkov alebo ramien mriežkovej štruktúry alebo sú tvorené tzv. minimálnymi plochami. Vzhľadom na aditívnu výrobu je vhodné vytvoriť jadro z mriežkovej štruktúry. Tieto zároveň lepšie aproximujú guľový tvar prirodzene vytvoreného póru pri výbere vhodného tvaru bunky. Vzhľadom na jednoduchú teseláciu jediného periodicky sa opakujúceho tvaru možno Kelvinovu štruktúru považovať za vhodnú pre experimentálne účely. Nakoľko mriežkové štruktúry možno považovať za štruktúry s otvorenou pórovitosťou, na zabezpečenie plynu v kovovom jadre musí byť vytvorená obalová stena.

Je známe, že roztavená hliníková zliatina pri kontakte s atmosférou na hladine vytvára oxidickú blanu, čo obmedzuje zmáčavosť a možnosť prepojenia tuhého Al jadra s tekutou Al zliatinou. Experimentálne výskumy naznačujú, že mieru prepojenia kovov je možné zvýšiť pokovovaním penového jadra. Medzi vhodné kovy na pokovovanie podľa dostupnej literatúry patrí najmä zinok, príp. nikel.

CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Ciele dizertačnej práce sú orientované na komplexnú analýzu hybridných odliatkov a ich súčastí – penové a bunkové jadrá, ktorých cieľom je znížiť celkovú hmotnosť odliatku a zvýšiť špecifické úžitkové vlastnosti.

Hlavným cieľom dizertačnej práce je výskum rozhraní medzi stuhnutým kovom hybridných odliatkov a jadrami vytvorenými aditívnou výrobou a technológiou napeňovania lisovaného kovového prášku.

Na dosiahnutie hlavného cieľa dizertačnej práce boli vytýčené nasledovné čiastkové ciele:

- Vhodne zvolenými a príp. modifikovanými skúšobnými metódami stanoviť mechanické a fyzikálne vlastnosti jadier vyrobených technológiou napeňovania lisovaného kovového prášku a aditívne vyrobených jadier – určenie relatívnej hustoty, absorpcie kinetickej energie jadier a vykonanie statickej skúšky tlakom:
 - Definovať vplyv procesných parametrov – primárne počiatočného a stabilizačného pôsobiaceho tlaku – pri napeňovaní jadier na tieto vlastnosti.
 - Definovať vplyv geometrie – prierezu nosníkov mriežky, veľkosti bunky a hrúbky obalovej steny štruktúry – aditívne vyrobených jadier na tieto vlastnosti.
- Analyzovať výsledky počítačovej tomografie napenených jadier na zistenie charakteru dosiahnutej pórovitosti vzhľadom na procesné parametre.
- Vyhodnotiť vplyv použitej zlievarenskej technológie – gravitačné odlievanie do pieskovej formy s vertikálnou deliacou rovinou – na vlastnosti hybridných odliatkov.
- Analyzovať makroštruktúru hybridných odliatkov použitím počítačovej tomografie a mikroštruktúru tranzitnej vrstvy metódami optickej a elektrónovej mikroskopie.
- Vyhodnotiť mieru prepojenia zaliateho jadra s odliatkom vzhľadom na spôsob povrchovej úpravy jadra.

EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Experimentálna časť dizertačnej práce pozostávala z viacerých na seba nadväzujúcich experimentálnych fáz. Použité experimentálne metódy sú predstavené v príslušných fázach experimentu. Vzhľadom na rozsah autoreferátu v ňom nie sú uvedené všetky výsledky experimentálnej časti.

FÁZA 1 – Kovové pórovité materiály vypenené metódou práškovej metalurgie

V prvej fáze bola pozornosť venovaná kovovým penovým súčiastkam, ktoré boli vytvorené vypeňovaním metódou práškovej metalurgie. Vstupným materiálom pre experimentálne účely tejto práce bola zmes práškov čistého Al (89,2 hm. %) s primárnym prísadovým prvkom Si (10 hm. %) a napeňovadlo TiH_2 (0,8 hm. %). Po dôkladnom premiešaní vstupných práškov bol materiál striasaný do silikónového valcového prípravku a následne zhutnený studeným izostatickým lisovaním v zariadení LiCIP 2000 pri pracovnom tlaku 150 MPa do tzv. čapov kompaktnéj hmoty s priemerom 200 mm a dĺžkou 1000 mm. V externej firme bol pretláčaním na extrúznom lise vyhotovený nekonečný pás polotovaru s prierezom 50 × 4 mm. Na vypeňovanie takto pripraveného polotovaru je použitá vypeňovacia komora vyhotovená na tento účel. Ide v princípe o autokláv s možnosťou riadenia pracovného tlaku a teploty v komore. Vypeňovanie prebieha pri určitom pracovnom tlaku. Priebeh vypeňovania je riadený termočlánkom na hornej vnútornej stene formy a to tak, že keď sa napeňovaný materiál dotkne vrchnej steny formy, termočlánok zaznamená náhly nárast teploty spôsobený dotykom povrchu napeneného materiálu. V tomto okamihu je počiatočný tlak znížený na požadovanú hodnotu stabilizačného tlaku.

Pórovitosť doskových skúšobných vzoriek

V prvom kroku boli vypenené vzorky z materiálu $\text{AlSi10TiH}_2\text{0,8}$ v tvare dosky s rozmermi 15 × 55 × 55 mm na prvotné určenie vplyvu použitého tlaku pri vypeňovaní jadier s jednoduchou geometriou na charakter pórovitosti. Teplota vypeňovania bola 680 °C. Tlak atmosféry (N_2) vo vypeňovacej komore sa skokovo menil z počiatočného tlaku na stabilizačný. Varianty vypeňovacích tlakov pri realizácii jednotlivých vzoriek sú vyjadrené v Tab. 1.

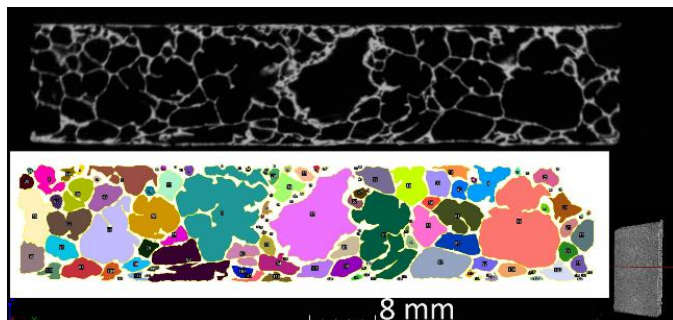
Tab. 1 Varianty tlakov vypeňovania doskových skúšobných vzoriek

Ozn. variantu	Počiatočný tlak [MPa]	Stabilizačný tlak [MPa]
A0	Atmosférický	Atm.
A1	0,1	Atm.
A2a/b/c	0,2	Atm. / 0,05 / 0,1
A3a/b/c	0,3	0,1 / 0,15 / 0,2

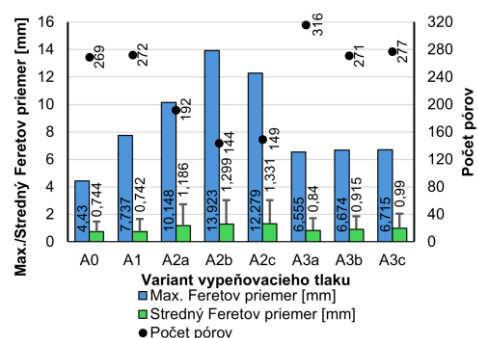
Počet a rozmery pórov v pričnom reze doskových vzoriek získaných počítačovou tomografiou na prístroji Nikon XT H225 ST boli analyzované pomocou programu ImageJ (Obr. 1 a). Ako rozhodujúci a analyzovaný rozmer pórov bol zvolený Feretov priemer. Namerané hodnoty maximálneho Feretovho priemeru x_{Fmax} , aritmetický priemer Feretovho priemeru a jeho smerodajná odchýlka boli spracované do grafu (Obr. 1 b).

Najväčší rozdiel medzi maximálnym a priemerným Feretovým priemerom pórov bol zaznamenaný vo všetkých troch subvariantoch A2. Najväčší rozmer póru (13,92 mm), ako aj najväčšia smerodajná

odchýlka (1,728 mm) boli namerané vo variante A2b . Najväčší priemerný Feretov priemer pórov bol zaznamenaný vo variante A2c (1,33 mm). Vzhľadom na zvýšený počet pórov veľkých rozmerov na konštantný objem boli vo všetkých subvariantoch A2 znížené počty pórov v porovnaní s ostatnými variantmi. Možno konštatovať, že počiatočný tlak 0,2 MPa nemá pozitívny vplyv na charakter pórovitosti.



a)



b)

Obr. 1 Hodnotenie pórovitosti doskových vzoriek

Vzorky vypeňované s počiatočným tlakom A3 (0,3 MPa) vykazovali väčšie množstvo pórov (maximálny počet pórov bol zaznamenaný vo vzorke A3a pri použití tlakov 0,3 / 0,1 MPa, 316 pórov) a všeobecne nižšie hodnoty maximálneho aj priemerného Feretovho priemeru pórov. Z A3 subvariantov bol najmenší priemerný aj maximálny Feretov priemer póru zaznamenaný vo variante A3a (0,3 / 0,1 MPa).

Relatívna hustota

Jadrá určené na zalievanie majú geometriu valca s výstupkami určenými na polohovanie v dutine formy a zlepšenie mechanického prepojenia s odliatkom. Tvar je schematicky znázornený na Obr. 2 a). Na vypeňovanie tvarových jadier je použitá trojdielna forma z bloku izostaticky lisovaného grafitu vyrobená pomocou CNC frézky. Bola navrhnutá trojdielna forma na zabezpečenie tesnosti formy a jednoduchého vyňatia valcového jadra z dutiny formy. Tvarové jadrá sa vypeňovali pri rôznych počiatočných a stabilizačných tlakoch podľa Tab. 2.

Tab. 2 Varianty vypeňovacích tlakov pri výrobe valcových pórovitých jadier

Variant	Počiatočný tlak [MPa]	Stabilizačný tlak [MPa]
B1	Atmosférický	0,005 ± 0,002
B2	0,15 – 0,2	0,15
B3/B4/B5/B6	0,1 – 0,2	0,1 / 0,15 / 0,05 / Atm.
B7	0,1 – 0,3	0,15

Pomocou laboratórnej váhy bola meraná hmotnosť piatich vzoriek každého zo 7 variantov valcových jadier na vyjadrenie relatívnej hustoty ρ/ρ_s podľa vzťahu (3) vychádzajúc zo vzťahov (1) a (2):

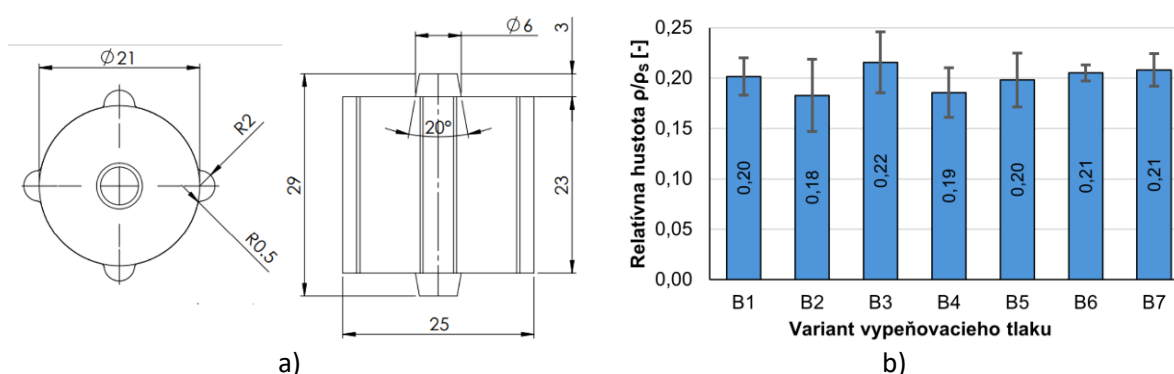
$$\rho_s = \frac{m_s}{V} \quad (1)$$

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V} \quad (2)$$

$$\frac{\rho}{\rho_s} = \frac{m}{m_s} \quad (3)$$

Kde m_0 hmotnosť pórovitej súčasti [g], ρ_0 je zdánlivá hustota [$\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$], m_s je hmotnosť pevnej súčasti [g] s rovnakým objemom V [mm^3], aký má napenená súčasť, ρ_s je hustota východiskového materiálu.

Z objemu tvaru jadra a hustoty základného materiálu bola zistená teoretická hmotnosť plného materiálu tvaru jadra m_s a spolu s nameranými hodnotami hmotností penových jadier boli použité na výpočet relatívnej hustoty pomocou rovnice (3). Priemerné hodnoty výsledkov pre každý variant a ich smerodajné odchýlky sú graficky vyjadrené v Obr. 2 b). Pozitívnym výsledkom bola nízka smerodajná odchýlka variantov B6 a B7 – najvyššia opakovateľnosť výsledkov relatívnej hustoty. Najvyššia nežiadúca variabilita výsledkov bola zistená vo variantoch B2 a B3, teda variantoch používajúcich vypeňovacie tlaky 0,15 – 0,2 / 0,15 MPa a 0,1 – 0,2 / 0,1 MPa.



Obr. 2 Valcové jadro a) navrhnutá geometria, b) výsledky analýzy relatívnej hustoty

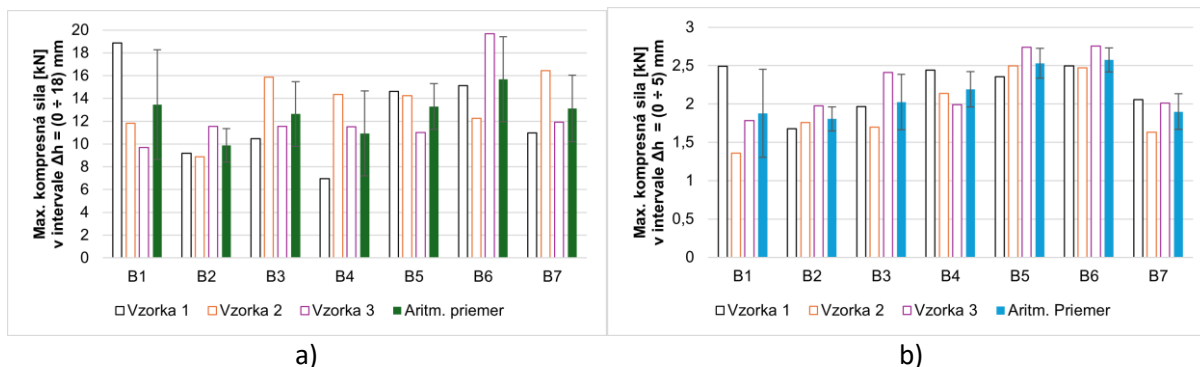
Skúška tlakom

Skúška jednoosovým tlakom bola navrhnutá na stanovenie pevnostných charakteristík a na pozorovanie priebehu deformačných mechanizmov vzoriek pripravených pri rôznych vypeňovacích tlakoch. Skúška tlakom bola vykonaná na troch vzorkách zo všetkých variantov vypeňovacieho tlaku B1 – B7 pri výrobe tvarových jadier. Jadrám boli dodatočne mechanicky odstránené výstupky na čelách valcových podstav. Tlaková skúška prebiehala na zariadení s maximálnym zaťažením 20 kN rýchlosťou $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, s limitujúcim faktorom výslednej výšky vzorky 5 mm, teda po posuve platne o 18 mm. Statická jednoosová skúška v tlaku bola vykonaná na 21 vzorkách. Pre penové materiály je charakteristický priebeh tejto skúšky pozostávajúci z troch častí – prvotné zvyšovanie pôsobiacej sily a nárast deformácie, následné vyrovnanie sily pri náraste deformácie spôsobenej postupným kolabovaním stien pórov, a finálne skompaktovanie materiálu s opäť narastajúcou pôsobiacou silou.

Sú porovnané maximálne dosiahnuté kompresné sily pre každú vzorku v intervale deformácie $\Delta h = (0 - 18) \text{ mm}$. Na určenie tzv. sily ustálenia, teda sily, kedy sa sila ustáli s narastajúcou deformáciou, je pozorovaný iba interval $\Delta h = (0 - 5) \text{ mm}$. Hodnota sily ustálenia bola zistená ako maximálna hodnota na tomto intervale. Takto určené maximálne sily meraní, ako aj namerané sily ustálenia, sú zhrnuté do grafov na Obr. 3 a) a Obr. 3 b). Hodnoty boli aritmeticky spriemerované a bola zistená smerodajná odchýlka.

Z výsledkov meraní možno pozorovať veľkú variabilitu výsledkov v rámci niektorých variantov. Opakovateľnosť výsledkov je v momentálnom kroku výskumu požadovanou vlastnosťou. Najväčšia smerodajná odchýlka výsledkov merania maximálnej sily bola zaznamenaná pri variante B1, teda pri použití neriadeného vypeňovania pri atmosférickom tlaku. Najmenšie variácie výsledkov sú sledované pri variante B2, avšak rovnako dosahuje v priemere najmenšiu prenesenú silu. Nízka priemerná

maximálna sila bola zaznamenaná aj pri variante B4 a môže byť spôsobená objemnými pórmami, ktoré vznikajú pri použití stabilizačného tlaku 0,15 MPa pri oboch variantoch. Najvyššiu priemernú hodnotu maximálnej sily vykazujú vzorky B6, avšak veľká variabilita výsledkov je nežiadúca. Za vyhovujúcu môžeme považovať aj variant B7, ktorý využil počiatočný tlak až 0,3 MPa a bola dosiahnutá vhodná kombinácia pomerne nízkej variability a vysokej dosiahnutej kompresnej sily.

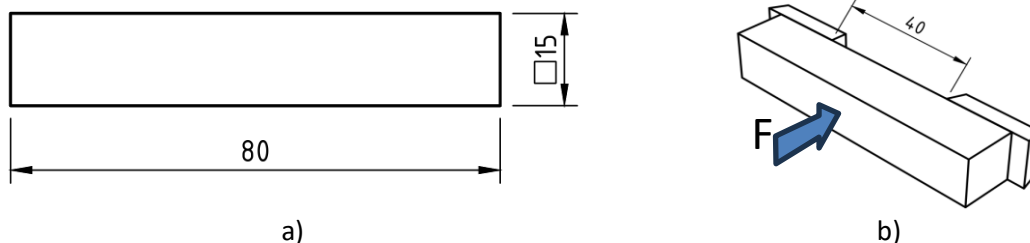


Obr. 3 Maximálna kompresná sila a) v plnom rozsahu skúšky, b) v intervale $\Delta h = (0 - 5)$ mm

Výsledky merania sily ustálenia ukazujú najväčšiu variabilitu výsledkov pri referenčnom, neriadenom spôsobe vypeňovania B1. Najvyššie hodnoty, zároveň výsledky s najnižšou variabilitou, boli dosiahnuté pri vypeňovaní B5 a B6.

Skúška rázom v ohybe

Na zisťovanie dynamických charakteristík hybridného odliatku vola navrhnutá skúška rázom. Dynamickej skúške rázom v ohybe boli podrobené štyri prizmatické pórovité vzorky a dve vzorky konvenčných odliatkov z plného materiálu zliatiny AlSi7Mg0,3 s geometriou podľa Obr. 4.



Obr. 4 Skúška rázom v ohybe a) geometria vzorky, b) princíp skúšky

Prizmatické pórovité jadrá boli vyrobené metódou práškovej metalurgie, podobne ako valcové jadrá. Boli vyrobené štyri šarže po ôsmich vzorkách pri použití tlakov podľa Tab. 3:

Tab. 3 Varianty vypeňovacích tlakov pri príprave prizmatických pórovitých jadier

Variant	Počiatočný tlak [MPa]	Stabilizačný tlak [MPa]
VP1	0,3 MPa	0,125 MPa
VP2	0,37 MPa	0,2 MPa
VP3	0,37 MPa	0,2 MPa
VP4	0,3 MPa	0,125 MPa

Na vzorkách nebol frézovaný vrub, nakoľko ide o materiál s nízkou medzou pevnosti. Skúška rázom v ohybe bola vykonaná na zariadení Charpyho kladive s maximálnou vyvinutou energiou 300 J. Po nameraní absorbovanej energie bola prepočítaná rázová húževnatosť podľa vzťahov:

$$KCO = \frac{K}{S} [J \cdot cm^{-2}] \quad (4)$$

$$\rho_{relat} = \frac{m_P}{m_S} = \frac{\rho_P}{\rho_S} = \frac{S_P}{S_S} [-] \quad (5)$$

$$S_P = S_S \cdot \rho_{relat} = S_S \cdot \frac{m_P}{m_S} [cm^2] \quad (6)$$

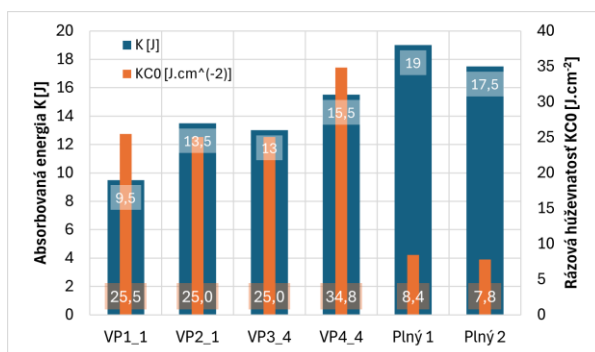
$$KCO = \frac{K}{S_S \cdot \frac{m_P}{m_S}} [J \cdot cm^{-2}] \quad (7)$$

Kde KCO je rázová húževnatosť [$J \cdot cm^{-2}$], K je absorbovaná energia [J], S je prierez vzorky bez vrubu [cm^2], ρ_{relat} je relatívna hustota [-], určená pomerom hmotnosti, hustoty alebo prierezu meranej vzorky a vzorky rovnakého objemu z plného materiálu, S_P je prierez pórovitej vzorky [cm^2], m_P je nameraná hmotnosť pórovitej vzorky [g], m_S je hmotnosť plnej vzorky rovnakého rozmeru [g], ktorú možno považovať za konštantu 43 g.

Rázová skúška v ohybe bola vykonaná na štyroch pórovitých prizmatických jadrách a dvoch konvenčných odliatkov rovnakého tvaru. Rázová húževnatosť KCO bola prepočítaná pomocou vzťahu (7). Pre plný materiál je $m_P/m_S = 1$.

Variant vypeňovania mal vplyv na pórovitosť prizmatických penových jadier. Pórovitosť je obrátená hodnota relatívnej hustoty, určenej zo vzťahu (5). V prípade použitia variantu VP1 a VP4 bola nameraná priemerná hodnota pórovitosti $84,9 \pm 1$ %. Pri vypeňovaní VP2 a VP3 bola priemerná pórovitosť vzoriek $78,6 \pm 1,3$ %.

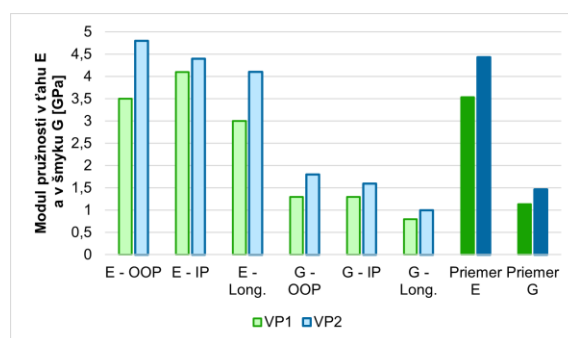
Výsledky skúšky sú zaznamenané v Obr. 5. Rozdiel medzi priemernou energiou pohltenu penovými jadrami a priemernou energiou pohltenu plným materiálom rovnakých rozmerov je 5,4 J, čo predstavuje rozdiel 42 %. Zásadná odlišnosť hustoty pórovitého a plného materiálu, ktorá je spojená so zmenšením prierezu, mala za následok zásadné rozdiely vo výsledkoch hodnoty rázovej húževnatosti. V priemere mali jadrá 3,4-krát vyššiu rázovú húževnatosť ako plný materiál. Najvyššia hodnota KCO bola zistená na vzorke variant VP3, ktorá bola vypeňovaná pri tlakoch 0,37 / 0,2 MPa a jej pórovitosť bola 80,2 %.



Obr. 5 Výsledky skúšky rázom v ohybe

Impulzná akustická skúška

Impulzná akustická skúška podľa normy ASTM E1876 je štandardná skúšobná metóda, ktorá sa zameriava na stanovenie dynamického Youngovho modulu a modulu pružnosti v šmyku materiálov pomocou impulzného vyvolania vibrácií. Táto metóda je obzvlášť užitočná vzhľadom na to, že ide o hodnotenie mechanických vlastností materiálov nedeštruktívnym spôsobom. Na dvoch prizmatických nezaliatých pórovitých vzorkách, pri vykonaní 10 meraní bol NDT impulznou akustickou skúškou na základe rezonančnej frekvencie zisťovaný modul E a G. Boli použité tri metódy merania v závislosti od umiestnenia snímača a miesta vyvolania vibrácií – pozdĺžne, priečne a mimorovinné meranie. V grafe na Obr. 6 sú výsledky jednotlivých metód meraní aritmeticky spriemerované a porovnané v závislosti od použitého tlaku vypeňovania pórovitého jadra, resp. od výslednej pórovitosti jadra.



Obr. 6 Výsledky impulznej akustickej skúšky

Hodnoty výsledkov sa líšili vzhľadom na použitú metódu zisťovania. To môže nasvedčovať anizotropnému charakteru materiálu vzhľadom na nerovnomerné rozloženie pórov vo vnútri materiálu. Všeobecne však výsledky ukazujú vyššie hodnoty E a G [GPa] v prípade vzorky vyrobenej pri použití vypeňovacích tlakov 0,37 / 0,2 MPa (VP2).

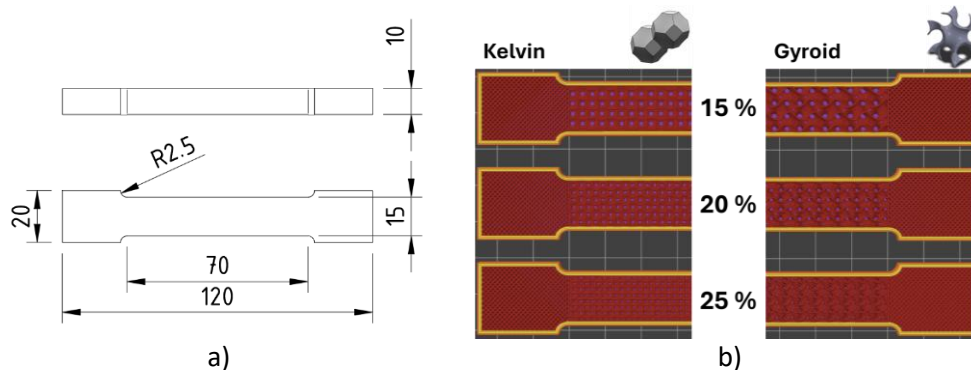
FÁZA 2 – Aditívna výroba hliníkovej bunkovej štruktúry

V tomto kroku experimentu je pozornosť venovaná aditívnej výrobe bunkových štruktúr. Aditívnou výrobou je možné veľmi efektívne vyrábať komplexné tvary a štruktúry, ktorých tvar je jasne definovaný modelom. Opakovateľnosť výsledkov je hlavnou výhodou oproti stochastickému charakteru pórovitých štruktúr získaných vypeňovaním. Na výrobu kovových súčastí možné využiť najrozšírenejšiu technológiu aditívnej výroby Fused Deposition Modeling (FDM) pri použití špeciálneho tlačového média s komerčným označením Filamet Aluminium 6061 firmy Virtual Foundry. V tlačovom médiu – vysoko plnenom filamente (highly filled filament) – je v matrici rovnomerne rozptýlený prášok hliníkovej zliatiny. Po vytavení spojiva je nutné materiál spekať, aby boli dosiahnuté požadované mechanické vlastnosti kompaktného materiálu.

Vplyv bunkovej štruktúry na medzu pevnosti v ťahu

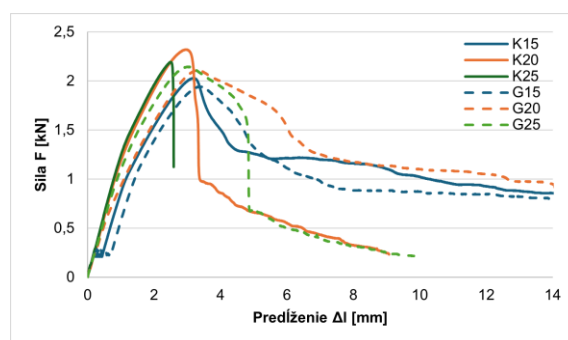
V prvom kroku experimentu je hodnotený vplyv tvaru vnútornej mriežky na výslednú pevnosť v ťahu, respektíve silu potrebnú na pretrhnutie vzorky. Materiál použitý pre tento predbežný experiment bol zvolený materiál PLA, pre jeho dostupnosť a jednoduchosť realizácie vzoriek pred tým, než budú vzorky zhotovené z filamentu s prídavkom hliníkového prášku. Na aditívnu výrobu bola použitá komerčne dostupná tlačiareň Prusa i3 MK3S+.

Bunkové štruktúry určené na porovnanie boli zvolené Kelvinova štruktúra a Gyroid. Rozmery vzorky určenej na jednoosovú skúšku ťahom sú načrtnuté v Obr. 7 a). Aby čeľuste trhacieho stroja nepoškodili vzorku v mieste kontaktu, výplň v týchto miestach bola zvýšená na 90 %. Výplň testovanej časti vzorky o dĺžke 70 mm bola menená v závislosti od možností sliceru v percentuálnych inkrementoch 15, 20 a 25 % (Obr. 7 b).



Obr. 7 Vzorky na ťahovú skúšku a) rozmery vzorky, b) použité bunkové štruktúry pre ťahovú skúšku

Nakoľko kritický prierez pozorovaných vzoriek sa menil v závislosti od použitej výplňovej štruktúry, bola porovnávaná sila potrebná na pretrhnutie jednotlivých vzoriek. Ako zo zaznamenaného priebehu skúšky na Obr. 8 vyplýva, že pri vzorkách G15, K15 a G20 nedošlo k absolútnemu pretrhnutiu materiálu.



Obr. 8 Jednoosová skúška ťahom

Z vizuálneho pozorovania priebehu skúšky a výsledného tvaru vzorky ale vyplýva, že po predĺžení väčšom ako 10 mm sa pôsobiaca sila prenáša primárne pomocou perimetrov a vrchných a spodných vrstiev, nie vnútornou štruktúrou. Podobný priebeh možno pozorovať aj pri variante G20, pri ktorom došlo k náhlemu poklesu pôsobiacej sily pri predĺžení 3,25 mm a do pretrhnutia materiálu prenášali sily najmä perimetre. Za najmenej húževnatý možno považovať variant K25, pri ktorom k pretrhnutiu materiálu došlo pri predĺžení $d = 2,59$ mm. Najvyššia sila bola prenesená variantom K20.

Vplyv relatívnej hustoty na výsledky ťahovej skúšky bol menší pri verzii využívajúcej štruktúru Gyroid. Tvar kriviek všetkých troch variantov Gx má podobný charakter až do 4,5 mm predĺženia vzorky. Predpokladá sa, že od tohto momentu namáhania začína mať vplyv vygenerovaný počet a dĺžka kotiev – miest styku perimetrov a výplne. Tento parameter nebol vzatý do úvahy pri generovaní G-kódu, nakoľko ide o automaticky generovanú súčasť programu na preprocessing (PrusaSlicer 2.7.1).

Aditívna výroba vzoriek so spekaním bez ochrannej plynnej atmosféry

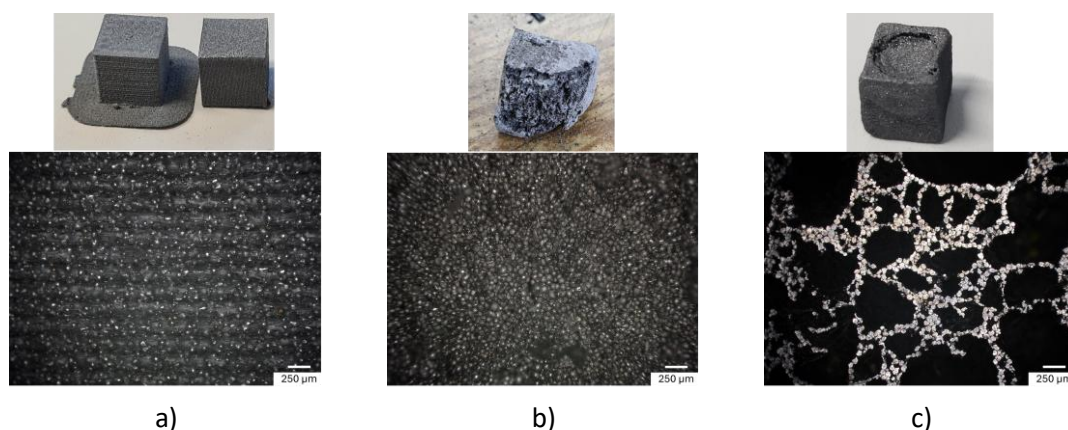
Filament použitý v experimente je The Virtual Foundry Filamet 6061 Aluminum. Patrí medzi tzv. highly filled (HF) filaments, teda tlačové médiá pozostávajúce z dvoch hlavných zložiek – spojiva

a požadovaného tlačového materiálu. Obsah kovového prášku je v použitom experimentálnom materiáli približne 64 %. V tomto kroku experimentu nebolo snahou replikovať tvar a geometriu PLA skúšobných telies. Tomuto zabraňuje aj výrobcom odporúčená najmenšia hrúbka steny 1,8 mm, ktorá je násobne väčšia ako hrúbka steny výplne v PLA skúšobných telesách.

Pomocou zariadenia Prusa i3 MK3S+ boli vytvorené testovacie vzorky tvaru kocky s rozmermi 10 × 10 × 10 mm určené na zistenie vplyvu tepelného režimu odstránenia spojiva a spekania na výsledné vlastnosti materiálu. Na rozdiel od iných materiálov, ktoré výrobca poskytuje, pre Filamet 6061 Aluminum výrobca nedodáva žiadny odporúčený režim spekania. Podľa režimov spekania iných materiálov boli navrhnuté tri rôzne režimy spekania. Režimy V1 a V2 boli vykonané v žihacej elektrickej odporovej peci, režim V3 bol vykonaný v tégliku indukčnej pece s maximálnym výkonom 5 kW pri 33,4 kHz. Čas spekania v navrhnutom režime V3 bol obmedzený možnosťami chladenia zariadenia tak, aby nedošlo k prehriatiu zariadenia, na 2,5 minúty. Pre zvýšenie efektivity indukčného ohrevu boli do grafitového zásypu vložené oceľové vložky, ktoré obkolesili vložené testovacie teleso.

Tri vzorky tvaru kocky boli podrobené trom režimom spekania. Na mikrosnímke (Obr. 9 a) možno pozorovať častice 6061 Aluminium rozptýlené v PLA matrici. Možno pozorovať vrstvy tlače, nakoľko bola vzorka pozorovaná bez brúsenia alebo leštenia.

Pri použití režimu V1 nebola získaná spekaná vzorka. Predpokladá sa, že došlo k vyhoreniu PLA matrice bez dostatočného ohrevu na previazanie kovových častíc. Dlhšia výdrž na spekacej teplote pri režime V2 (Obr. 9 a) sa prejavila získaním vzorky, avšak ani táto nemala žiadne mechanické vlastnosti a rozpadávala sa už pri manipulácii. Za najúspešnejší režim spekania bez použitia ochranného plynu možno považovať režim V3 (Obr. 9 c), nakoľko spekaná súčiastka získala pevnosť. Predpokladá sa, že krátka a intenzívna vysoká teplota ohrevu natavila oxidickú vrstvu Al_2O_3 na povrchu častíc a došlo k požadovanému previazaniu častíc.

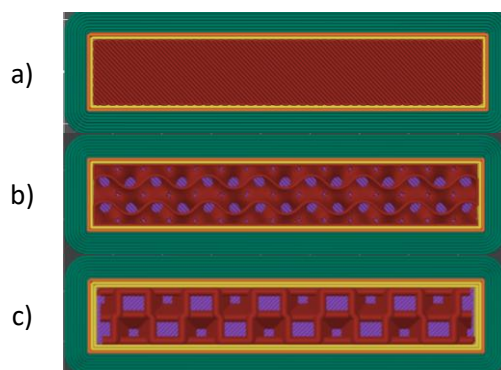


Obr. 9 Vizuálne a mikroskopické pozorovanie vzoriek a) súčastí pred spekaním, b) režim V2, c) režim V3

Aditívna výroba vzoriek so spekaním v ochrannej plynnej atmosfére

Ďalší krok experimentu sa zaoberá výrobou pórovitého jadra, resp. jadra s bunkovou vnútornou štruktúrou. Na výrobu bol určený tvar prizmatického jadra kvôli nižšej komplexnosti tvaru, teda 15 × 15 × 80 mm. Na tlač boli použité rovnaké tlačové parametre a zariadenie ako pri príprave vzoriek tvaru kocky v predošlej podkapitole. Vzhľadom na výsledky vplyvu tvaru a hustoty vnútornej bunkovej štruktúry boli pri návrhu jadier použité bunkové Gyroid a Kelvinova štruktúra s nastavením 25 %

hustoty výplne. Bola navrhnutá aj vzorka s plnou priamočiарou výplňou s hustotou 100 %. Vnútorne štruktúry sú zobrazené na snímke z programu na preprocessing na Obr. 10.

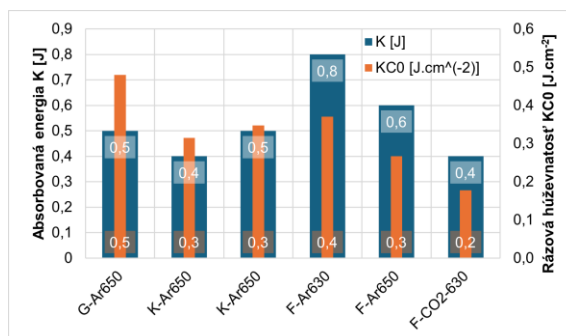


Obr. 10 Vnútorne štruktúry vzoriek v polovičnom reze a) plná, b) gyroid štruktúra, c) Kelvinova štruktúra

Pre ďalšie tvarové vzorky bolo použité spekanie v ochrannej atmosfére v trubicovej elektrickej odporovej peci LAC LT 50/500/13. Tento spôsob spekania je výhodný práve možnosťou použitia ochrannej atmosféry, ktorá je do pracovného priestoru vháňaná dýzou cez veko trubice pece. režim vybraných vzoriek Pozostával z predohrevu na 175 °C s výdržou 90 minút, nárastom teploty na teplotu odstránenia spojiva 300 °C s výdržou 180 minút, spustenia prietoku ochranného plynu, ďalšieho zvýšenia teploty na 630, resp. 650 °C s výdržou 120 minút, po ktorom nasledovalo chladnutie rýchlosťou 5 °C.min⁻¹ Vzorky boli spekané za použitia rôznych kombinácií použitej maximálnej teploty spekania a použitého plynu ochrannej atmosféry. V experimente boli použité plyny Ar a CO₂.

Skúška rázom v ohybe aditívne vyrobených vzoriek

Na hodnotenie rázovej húževnatosti ako dynamickej charakteristiky vzoriek po spekaní bola vykonaná skúška rázom v ohybe pomocou Charpyho kladiva. Vzhľadom na krehký charakter materiálu, ktorý sa prejavil znehodnotením jednej zo spekaných vzoriek ešte pred meraním hmotnosti, rozmeru a rázovej húževnatosti, boli opäť použité vzorky bez vrubu. Na experimentálne použitie bolo zvolené Charpyho kladivo s maximálnou kinetickou energiou hlavy $K = 50 \text{ J}$. Namerané hodnoty absorbovanej energie sú zhrnuté a graficky v Obr. 11. Rázová húževnatosť $KC0$ vzhľadom na prierez bola vypočítaná podobne, ako pri pórovitých prizmatických jadrách vyrobených metódou vypeňovania pomocou vzťahu pomeru hmotnosti bunkovej vzorky a vzorky plného materiálu.



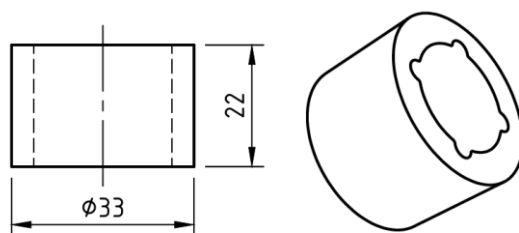
Obr. 11 Výsledky rázovej skúšky

Berúc do úvahy prierez materiálu, najvyššia nameraná rázová húževnatosť bola nameraná na vzorke s gyroidnou štruktúrou pri použití Ar ochrannej atmosféry a vyššej teploty spekania. Vzhľadom na výsledné namerané hodnoty možno konštatovať, že spekaním aditívne vyrobených vzoriek neboli

žiadnou kombináciou režimu spekania, použitého ochranného plynu a vnútornej štruktúry vzorky dosiahnuté požadované vlastnosti materiálu.

FÁZA 3 – Proces zalievania

Cieľom tretej fázy experimentu je realizovať hybridné odliatky procesom zalievania (technológiou overcasting). Boli navrhnuté dva tvary hybridných odliatkov – valcový a prizmatický – každý určený na špecifické analýzy a skúšky. Vtoková sústava bola navrhnutá s dôrazom na minimalizáciu turbulentného prúdenia, berúc do úvahy čas a rýchlosť plnenia formy, rýchlosť taveniny na začiatku a na konci vtokového kanála a najmä rýchlosť taveniny v plochách zárezov. Tvar odliatku získaného procesom overcasting bol navrhnutý tak, aby pórovité jadro bolo zaliate 5 mm vrstvou tekutého kovu (Obr. 12). Na zabezpečenie polohy vo forme boli využité výstupky na čelných plochách jadra.



Obr. 12 Geometria hybridného odliatku

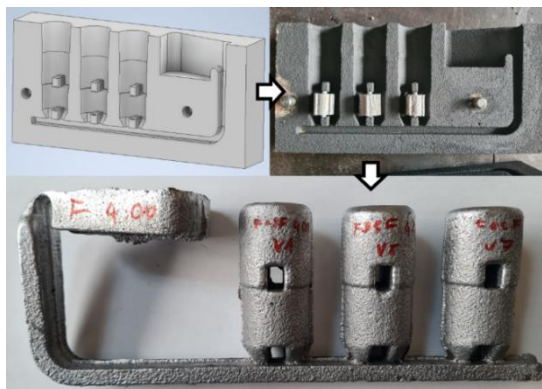
Bola navrhnutá trojdutinová forma na zabezpečenie výroby troch zaliatych vzoriek v jednom kroku. Na zalievanie napenených jadier technológiou gravitačného odlievania bola zvolená zliatina AlSi7Mg0,3. Tavenie materiálu prebiehalo v elektrickej odporovej peci a teplota liatia bola 760 ± 10 °C. Tavenina nebola metalurgicky upravovaná ani odplynená. Tesne pred samotným odlievaním bola mechanicky odstránená oxidická vrstva z hladiny taveniny. Vzhľadom na nevykonávanie odplynovania bola nameraná hodnota Dichte indexu DI = 9,4 – 10,2 %.

Formy II. generácie boli vyrobené zo samotvrdnúcej zmesi pozostávajúcej z kremičitého piesku a fenolformaldehovej živice. Do bloku takto pripravenej zmesi bola po jej vytvrdnutí frézovaná dutina formy a vtokovej sústavy s rozmermi podľa návrhu. Na deliacu rovinu bol nanesený grafitový náter. Predohrev formy bol zvolený na teplotu 150 ± 10 °C po dobu 15 – 20 minút. Kroky zalievania sú znázornené v Obr. 13. Na zabezpečenie lepšieho previazania materiálu tekutého kovu a jadra boli navrhnuté tri povrchové úpravy jadier s označením /N, /F, /P1 a /P4, podľa Tab. 4:

Tab. 4 Postup variantov povrchovej úpravy pórovitých jadier

Krok č.	/N	/F	/P1	/P4
1	Odmastenie 99,5 % isopropylalkoholom			
2	Sušenie			
3	X	Ponorenie každej strany do 0,5 % HF po dobu 20 s	Ponorenie každej strany do 10 % H ₃ PO ₄ po dobu 1,5 min pri 50 °C	Ponorenie každej strany do 10 % H ₃ PO ₄ po dobu 4 min pri 50 °C
4	X	Sušenie		
5	X	Čistenie 99,5 % isopropylalkoholom		
6	X	Sušenie		
7	Predhrev v EOP pri 150 ± 10 °C po dobu 20 minút			

Na základe zistení z hodnotenia pórov a pórovitosti boli na zalievanie vybrané 3 varianty tvarových jadier. B1 ako referenčná vzorka vypeňovaná pri atmosférickom tlaku, ďalej B7, ako vzorka, ktorá bola vypeňovaná pri podmienkach podobných, ako dosková vzorka A3a (0,1 – 0,3 / 0,15 MPa), a vzorka B5, ktorá posluží ako kontrolná vzorka pri použití vypeňovacích tlakov približne polovičných (0,1 – 0,2 / 0,05 MPa). Tieto varianty v kombinácii s povrchovou úpravou boli určené na najrozšírenejšie pozorovanie.

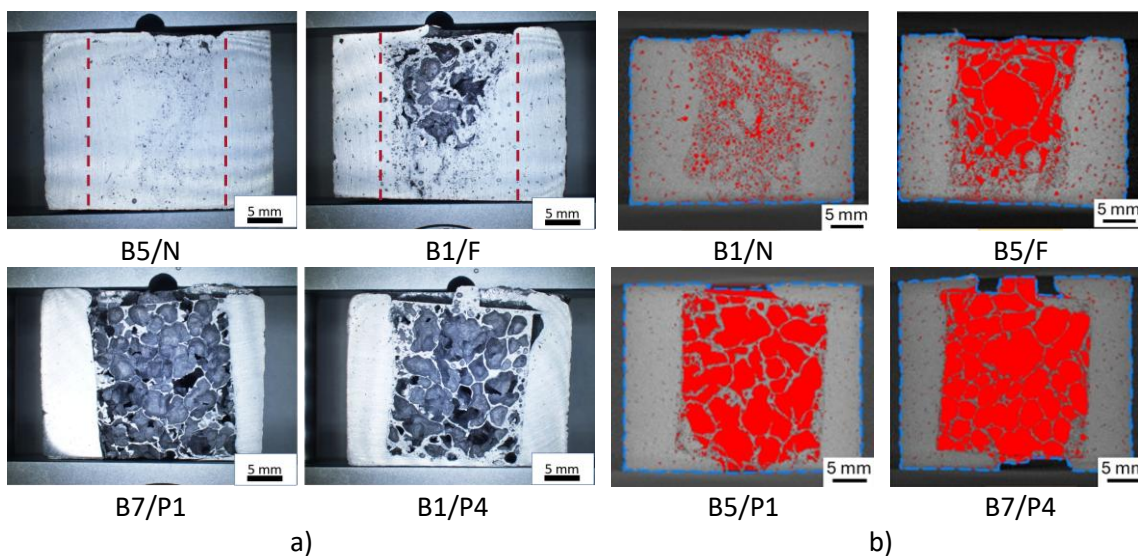


Obr. 13 Priebeh realizácie zalievania

Pórovitosť valcových hybridných odliatkov

Pórovitosť hybridných odliatkov bola pozorovaná deštruktívne a nedeštruktívne. Deštruktívne bola pozorovaná na vzorkách B1/F (teda na vzorke, ktorá bola vyrobená zaliatím jadra vyrobeného pri použití variantu vypeňovania B1 a povrchovo upravené kys. 0,5 % HF), B5/N, B1/P1 a B7/P4. Účelom tohto pozorovania, vykonaného na stereolupe Olympus SZX16, bola vizuálna kontrola vplyvu povrchovej úpravy na výsledok procesu zalievania Obr. 14 a). Povrchová úprava sa javí potrebnou.

Povrchovo neupravené jadro bolo takmer v plnom rozsahu penetrované tekutým kovom pri plnení dutiny formy. Aby sa vylúčila možnosť, že neupravené jadro bolo mechanicky poškodené, pórovitosť sa pozorovala aj pomocou počítačového tomografu na vzorkách B1/N, B5/F, B5/P1 a B7/P4 (Obr. 14 b).



Obr. 14 Pozorovanie pórovitosti hybridných odliatkov a) makroskopicky, b) CT analýza

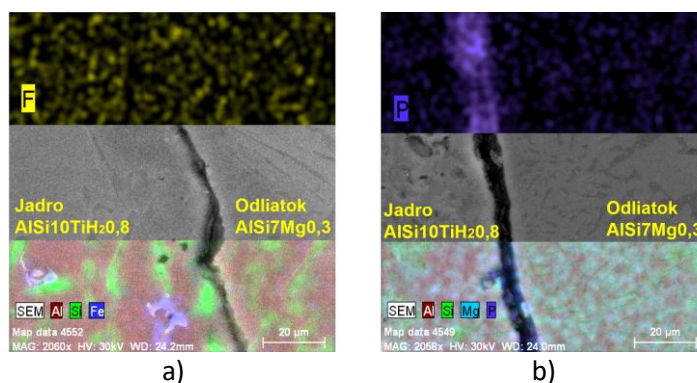
Hodnoty plošnej pórovitosti v rezoch stredom vzorky v rôznych rovinách sú zaznamenané v Tab. 5. V tabuľke bola vyhodnotená plošná pórovitosť v rovinách XY (pričný rez), XZ a YZ (pozdĺžne rezy) prechádzajúcich stredom vzorky. Výsledky sú v súlade s makroskopickým pozorovaním na stereolupe. Povrchová úprava slúži ako bariéra zabraňujúca narušeniu povrchovej obálky tekutým kovom. V B1/N je pozorovaná vysoká pórovitosť v časti obalového kovu, čo bolo pripísané disperzií H_2 z pôvodných dutín jadra.

Tab. 5 Plošná pórovitosť v hybridných odliatkoch [%]

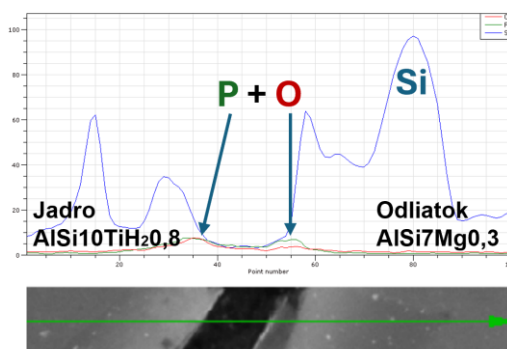
Vzorka	Rovina YZ	Rovina XZ	Rovina XY
Bez povrchovej úpravy	9,2	9,7	12,0
HF	26,5	28,9	18,1
H_3PO_4 1,5 min	39,8	39,7	28,8
H_3PO_4 4 min	46,7	47,0	35,2

EDX analýza valcových hybridných odliatkov

Na vzorkách hybridných odliatkov, v ktorých boli použité jadrá povrchovo upravené HF a H_3PO_4 s dobou leptania 1,5 minúty, bola realizovaná EDX analýza (Obr. 15). V prípade úpravy /F nebola na rozhraní pozorovaná zvýšená koncentrácia F, v prípade úpravy /P1 možno pozorovať zvýšenú koncentráciu P na rozhraní medzi jadrom a odliatkom, ako na mappingu, tak aj na čiarovej analýze (Obr. 16).

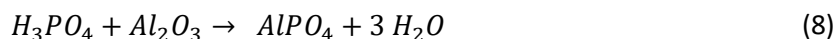


Obr. 15 EDX analýza rozhrania a) jadro ošetrené 0,5 % HF, b) jadro ošetrené H_3PO_4



Obr. 16 Čiarová EDX analýza rozhrania medzi pórovitým jadrom a odliatym materiálom

Čiarová EDX analýza preukázala zvýšenú koncentráciu prvkov P a O na stenách materiálu jadra a odliatku v mieste rozhrania. Predpokladá sa preto prítomnosť produktu reakcie pri povrchovej úprave jadra – $AlPO_4$, ako produkt reakcie:

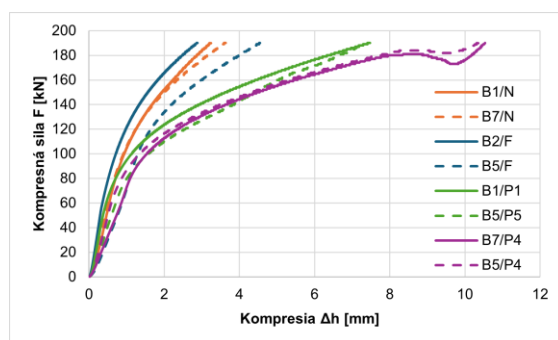


Túto povrchovú úpravu jadra možno považovať za riadenú pasiváciu. Z analýzy pórovitosti hybridných odliatkov možno tvrdiť, že táto chemická pasivácia povrchu pôsobí ako bariéra a obmedzuje penetráciu taveniny do pórovitej štruktúry jadra, nakoľko je jeho teplota tavenia 1800 °C.

Statická skúška tlakom hybridných odliatkov

Na zistenie charakteru mechanických vlastností hybridných odliatkov bola navrhnutá statická skúška jednoosovým tlakom, vykonaná na vzorkách s geometriou určenou pri návrhu vtokovej sústavy.

Skúška tlakom bola vykonaná s limitným prvkom použitej sily – po dosiahnutí maxima 190 kN pri rýchlosti posuvu 1 mm.min⁻¹. Pozorovateľný je parameter maximálnej deformácie pri dosiahnutí maxima sily. Priebeh skúšky tlakom je zaznamenaný na Obr. 17.



Obr. 17 Výsledky skúšky tlakom hybridných odliatkov

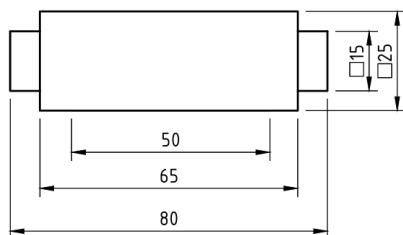
Hybridné odliatky, ktorých pórovité jadrá neboli ošetrované úpravou povrchu (varianty /N), vykazujú najvyššiu pevnosť s najnižšou deformáciou. Naopak, najväčšej deformácii boli podrobené hybridné odliatky pri použití povrchovej úpravy jadra pomocou 10 % H₃PO₄. Tento jav je vysvetlený v Obr. 14, kde sa nachádzajú tomografické snímky prierezu hybridných odliatkov. Možno pozorovať značnú penetráciu materiálu pórovitého jadra v prípade variantu bez povrchovej úpravy. Tavenina prerazila obalovú vrstvu pórovitého materiálu a zatiekla do dutín pórov. Plyn z pórov bol vytlačený do tuhnuceho kovu obkolesujúceho jadro, čo malo za následok zvýšenú pórovitosť plnej obalovej časti vzorky. Podobný výsledok možno pozorovať pri použití 0,5 % HF na povrchu pórovitého jadra.

Za najlepší výsledok skúšky v tlaku, rovnako CT pozorovania, možno považovať varianty /P1 a /P4, pri ktorých bola na povrchovú úpravu jadra použitá kyselina H₃PO₄. Vzhľadom na zásadný vplyv tohto parametra nemožno hodnotiť vplyv iných použitých parametrov, napr. variantu použitých tlakov pri vypeňovaní.

Výroba prizmatických hybridných odliatkov a hodnotenie pórovitosti

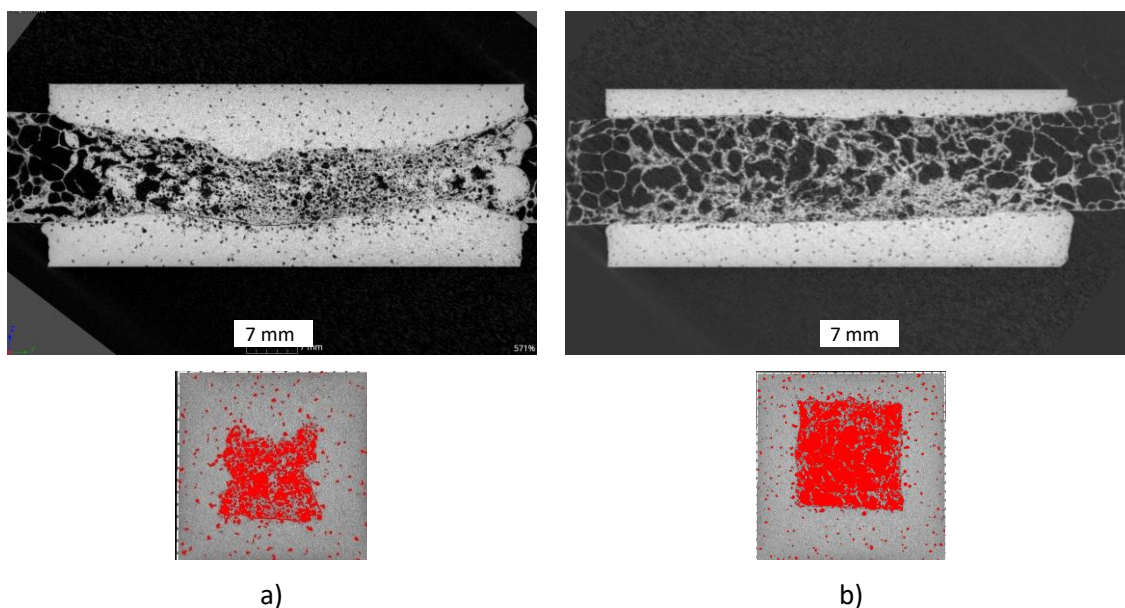
Na realizáciu ďalších mechanických skúšok a štruktúrnych analýz bol navrhnutý prizmatický tvar hybridných odliatkov. Dutiny formy mali rozmery 30 × 30 × 65 mm so zahĺbeniami tvaru štvorca na zabezpečenie polohy jadra. Nový tvar vzoriek je vhodný pre navrhnutú skúšku cyklickým namáhaním. Riešenie procesu zalievania prizmatických jadier bolo obdobné riešeniu procesu zalievania valcových jadier. V tomto kroku experimentu bola používaná už iba jedna povrchová úprava jadra, a to použitie 10 % H₃PO₄, vzhľadom na doteraz najlepšie výsledky dosiahnuté pri jeho použití. Bolo vytvorených 8 hybridných odliatkov, ktorých povrch bol frézovaný na jednotný tvar 25 × 25 × 65 mm (Obr. 18). Ďalej

budú označené písmenom H a číslo označuje, ktorý variant vypeňovania bol použitý pri vložení jadra (č. 1 pre VP1 a VP4, č. 2 pre VP2 a VP3).



Obr. 18 Geometria vzoriek na cyklickú skúšku trojbodovým ohybom

Vybrané vzorky boli podrobené hodnoteniu pórovitosti pomocou počítačovej tomografie. Boli vyhotovené pozdĺžne a priečne rezy stredom každej vzorky. V prípade použitia jadier s priemernou pórovitosťou 85 % bola pozorovaná penetrácia jadier taveninou, resp. deformácia steny jadra taveninou v smere od zárezu (Obr. 19 a).



Obr. 19 CT snímky prizmatických hybridných odliatkov a hodnotenie plošnej pórovitosti a) vzorka H1-2, pôvodná pórovitosť jadra 85 %, b) vzorka H2-2, pórovitosť jadra 80 %

Na kvantifikáciu tohto javu bola hodnotená plošná pórovitosť v pozdĺžnom a priečnom reze stredom vzoriek pomocou softvéru QuickPhoto Industrial. Výsledky merania sú zhrnuté v Tab. 6.

Tab. 6 Plošná pórovitosť hybridných prizmatických odliatkov

Vzorka	Pozdĺžny rez	Priečny rez
H1-2	27,9 %	15,8 %
H1-4	37,9 %	22,2 %
H2-2	52,4 %	38,2 %
H2-4	44,7 %	26,6 %

Výsledky merania preukázali všeobecne vyššiu celkovú plošnú pórovitosť vzoriek H2-x s jadrami, ktoré boli vypeňované pri vyšších vypeňovacích tlakoch. Minimalizovanie penetrácie jadier je požadované vzhľadom na zabezpečenie opakovateľnosti výsledkov procesu zalievania.

Cyklická skúška trojbodovým ohybom

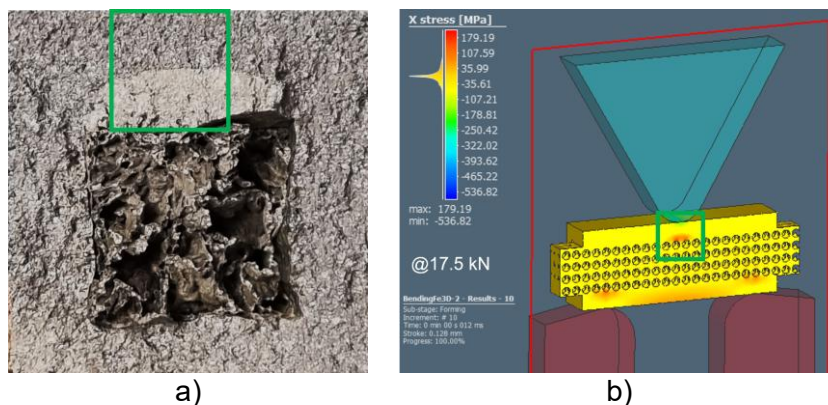
Vzorky boli po CT hodnotení podrobené cyklickej skúške trojbodovým ohybom. Skúšky boli vykonané na rezonančnom únavovom stroji Zwick/Roell Amsler 150 HFP 5100, ktorý umožňuje testovanie pri vysokých frekvenciách. Prístroj využíva princíp rezonančného pohonu, vďaka čomu je možné efektívne simulovať dlhodobé zaťaženie materiálov v značne skrátenej dobe. Skúšané vzorky boli uložené na dvoch podperách vzdialených 40 mm, pričom zhora na ne pôsobil klin, ktorý generoval cyklické zaťaženie v trojbodovom ohybe. Bolo zvolené vždy kladné pulzujúce zaťažovanie podľa Tab. 7, v ktorej sú zhrnuté aj namerané počty cyklov pri prerušení vzorky.

Tab. 7 Parametre a výsledky cyklickej skúšky

Ozn. vzorky	Predpätie [kN]	Amplitúda zaťaženia [kN]	Počet cyklov do porušenia [-]
H1-2	20	$\pm 12,5$	80 531
H1-3	17,5	$\pm 12,5$	747 833
H1-1	15	± 10	3 354 401
H1-4	15	± 10	20 000 000 bez porušenia
H2-2	20	$\pm 12,5$	184 301
H2-4	17,5	$\pm 12,5$	496 507
H2-1	15	± 10	2 315 369

Vo výsledkoch cyklickej skúšky je pozorovaná nesúvislosť medzi výsledkami vzoriek, s jadrami vyrobenými pri nižších vypeňovacích tlakoch. Variabilita plošnej pórovitosti v priečnom reze zistená počítačovou tomografiou môže vysvetľovať túto nesúvislosť. V prípade vzorky H1-4 bol vysoký podiel zaliateho jadra dôvodom, prečo nedošlo k porušeniu ani po 20 000 000 cykloch.

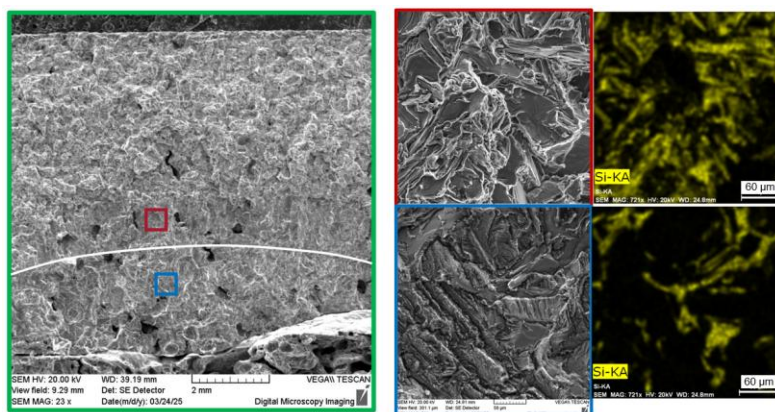
Na lomových plochách po cyklickej únave bola voľným okom sledovaná nehomogenita charakteru lomovej plochy (Obr. 20 a), ktorá bola pozorovaná aj REM mikroskopom. Na simuláciu prvotného statického predpätia bol použitý simulačný softvér Simufact Forming 2024. Simulácia bola vykonaná na idealizovanom tvare vzorky za predpokladu dokonalého prepojenia povrchu jadra a zaliateho materiálu. Simulácia bola vykonaná do momentu dosiahnutia statického predpätia 17,5 kN a bolo pozorované miesto so zvýšenou koncentráciou ťahového napätia. Ťahové napätie je rozložené na spodnej stene vzorky, ale primárne v hornom mieste spojenia jadra a zaliateho materiálu (Obr. 20 b).



Obr. 20 Lomová plocha H2-1a) makrosnímka, b) simulácia predpätia

Pri 700-násobnom zväčšení bol pozorovaný rozdielny charakter oblastí lomovej plochy (Obr. 21). V pozorovanej oblasti horného prepojenia medzi jadrom a zaťažovanou stenou zaliateho materiálu

možno pozorovať kaskádovitý povrch, ktoré pôsobia ako II. štádium lomu – radiálne stupne. V štádiu dolomenia možno pozorovať doskové útvary kremíka, potvrdené EDX analýzou daného miesta.



Obr. 21 REM a EDX pozorovanie lomovej plochy vzorky H2-1

Metalografické výbrusy určené na pozorovanie mikroštruktúry boli získané z priečného rezu vzorky vzdialeného 10 mm od lomu vzniknutého pri cyklickom skúšaní. Primárne boli pozorované rozhrania medzi pórovitým jadrom a zaliatym kovom pri 100-násobnom zväčšení. Boli zhotovené snímky po obvodě jadra – tri snímky horného rozhrania medzi jadrom a materiálom, tri z bočného rozhrania a tri zo spodného rozhrania. Na každej snímke boli merané rozmery štyroch najprominentnejších chýb na rozhraní medzi jadrom a zaliatym kovom. Hodnoty boli spriemerované vzhľadom na umiestnenie a zhrnuté v Tab. 8.

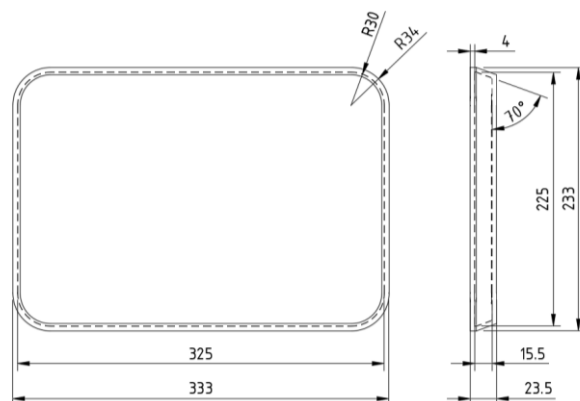
Tab. 8 Rozmery dutinových chýb na rozhraní

Hybridný odliatok	H1-2				H2-4			
Pozícia rozhrania	Spodná	Bočná	Horná	Aritm. priemer	Spodná	Bočná	Horná	Aritm. priemer
Priemerná dĺžka chyby [μm]	226,9	189,9	183,4	200,1	119,8	70,5	167,3	119,2
Priemerná šírka chyby [μm]	40,6	35,1	34,2	36,6	42,3	23,4	46,5	37,4

Výsledky merania preukázali takmer dvojnásobnú priemernú dĺžku chýb vyskytujúcich sa na rozhraní medzi jadrom a zaliatym materiálom v prípade hybridného odliatku H1-2 v porovnaní s H2-4. Tento jav mohol byť spôsobený uvoľnením plynu z jadra pri penetrácii alebo deformácii jadra. V prípade nadmernej deformácie je ťažké určiť, či ide o pór jadra, alebo o chybu na rozhraní. Tento jav je však nežiaduci, nakoľko znižuje kontaktnú plochu prepojenia jadra so zaliatym materiálom.

FÁZA 4 – Hybridný odliatok monokoku

Štvrtá fáza sa venuje výrobe konkrétneho odliatku, pričom pri jeho výrobe budú aplikované praktické poznatky z predošlých experimentov. Kľúčovou inováciou počas výroby je vytvorenie tzv. monokoku kombinujúceho kovové jadro na báze zliatiny $\text{AlSi10TiH}_{2,8}$ s liatym plášťom zo zliatiny typu AlSi12 . Toto riešenie môže priniesť zásadné zlepšenie mechanických charakteristík, predovšetkým zvýšenú pevnosť a tuhosť, čo je pre mnohé technické aplikácie kritické. Náčrt navrhnutého hybridného odliatku je zobrazený na Obr. 22. Vzhľadom na celkový objem hybridného odliatku možno povedať, že objem zaliateho kovu bude približne 40 %.



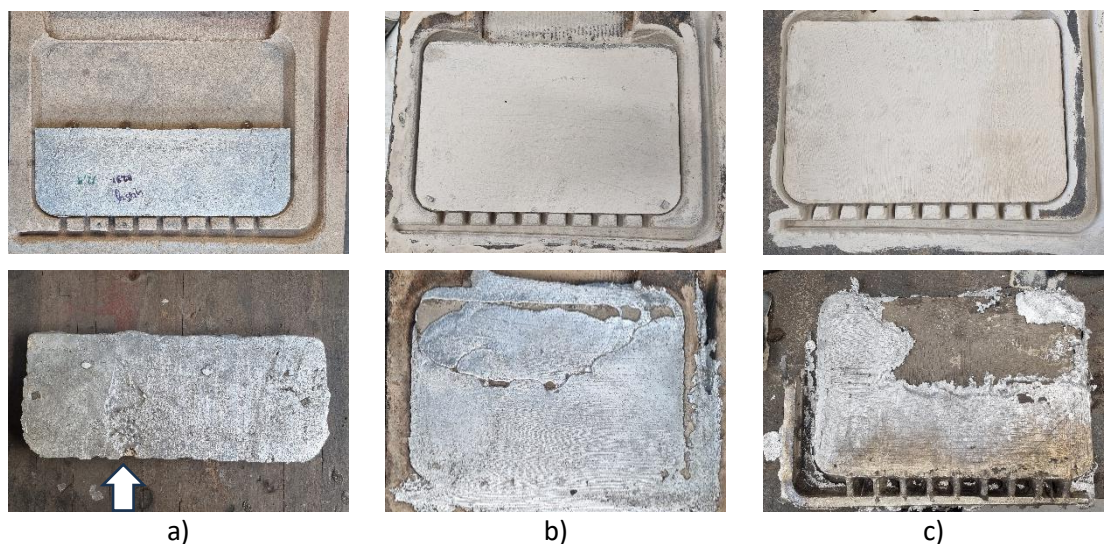
Obr. 22 Schéma požadovaného hybridného odliatku

Pristúpilo sa k viacerým postupom. V prvom kroku bolo jadro pripravené spôsobom, ktorý bol zistený ako vyhovujúci v predošlých krokoch experimentu pri príprave prizmatických hybridných odliatkov. Povrch pórovitého jadra bol upravený 10 % kys. fosforečnou. Na zvýšenie zabiehavosti taveniny do dutiny formy bola navrhnutá orientácia dutiny formy pod uhlom 20° . Vzhľadom na možnosť zmeny parametrov zalievania bola na účely zaliatia platní použitá eutektická hliníková zliatina AlSi12 so zámerom zlepšiť zabiehavosť v tejto fáze experimentu. Na zabezpečenie polohy jadra v dutine formy boli použité dištančné vložky s rozmermi $4 \times 4 \times 4$ mm z materiálu AlSi7Mg0,3.

Vzhľadom na zatiaľ nedostatočne prebádanú metodiku realizácie technológie overcasting a prvotný výsledok sa pristúpilo k alternatívnym prístupom. Bolo zistené, že pri navrhnutom pomere objemu tekutého kovu a plochy jadra bola povrchová úprava príliš reaktívna, výsledkom čoho bol nepodarok. Ďalším možným zdôvodnením nežiadúceho výsledku môže byť náhly ohrev plynu v uzatvorených póroch jadra. Existuje predpoklad, že náhlým rozpínaním uzatvoreného plynu došlo k prerušeniu povrchu jadra a došlo k naplynieniu okolitej taveniny. V ďalších variantoch zalievania (1 až 3) bol na pórovité jadro namiesto kyseliny nanosený zirkónový náter Thermocoat, ktorý mechanicky oddelí povrch jadra a tekutého kovu. Rovnako bola navrhnutá zmena uloženia dutiny formy a metóda jej plnenia spodným vtokom, zmena druhu formy na formu II. generácie, zmenšenie výšky požadovaného rozmeru výrobku a jadra, otvorenie hornej časti jadra na odvod plynov rozpínajúcich sa pri náhlom ohreve, zvýšenie teploty predohrevu jadra a formy, zvýšenie teploty a výšky liatia

K zásadnému zlepšeniu výsledku zalievania došlo pri použití variantu zalievania 1, ktorého hlavnou zmenou bolo delenie jadra, čím sa zmenšila výška odliatku na polovičnú oproti potenciálnemu zalievaniu celej platne. Rovnako tým bolo dosiahnuté otvorenie povrchu jadra, teda usmernenie prípadného rozpínajúceho sa plynu v dutinách jadra počas procesu zalievania.

Relatívne úspešný výsledok zalievania pri použití parametrov variantu 1 viedol k experimentálnemu zalievaniu celých platní pri použití nadobudnutých poznatkov variantmi 2 a 3. Taktiež vzhľadom na zväčšenie výšky odliatku bolo navrhnuté použitie vtokovej jamky, ktorá zväčšila výšku vtokového kanála a slúžila na kontinuálne a riadené plnenie dutiny formy. Horná skosená stena jadra bola v oboch variantoch odrezaná na usmernenie rozpínajúceho sa plynu. Výsledné hrubé hybridné odliatky možno pozorovať na Obr. 23. Ďalej budú označované skratkou HP a číslom variantu zalievania, ktorý bol na ich realizáciu použitý.



Obr. 23 Pripravná fáza a výsledky zalievania a) HP1, b) HP2, c) HP3

Pri hybridnom odliatku HP1 možno pozorovať šípkou označený povrchovú chybu, ktorú pravdepodobne spôsobila oprava formy medzi zárezmi pomocou vodného skla, ktoré pri procese zalievania nežiaduco reagovalo s taveninou.

V oboch prípadoch HP2 a HP3 nedošlo k úspešnému zaliatu celej výšky jadra. V prípade HP2 došlo k studeným spojom – predpokladá sa, že tavenina mala tendenciu plniť dutinu formy primárne prvými dvomi zárezmi, pomocou ktorých vystúpala až k otvorenej hornej stene jadra. Potom došlo k stretu materiálu stečeného po čelných plochách a materiálu, ktorý naplnil dutinu formy zospodu a došlo k studenému spoju. V prípade Variantu 3 je možné od určitej výšky pozorovať len oxidickú blanu na povrchu jadra.

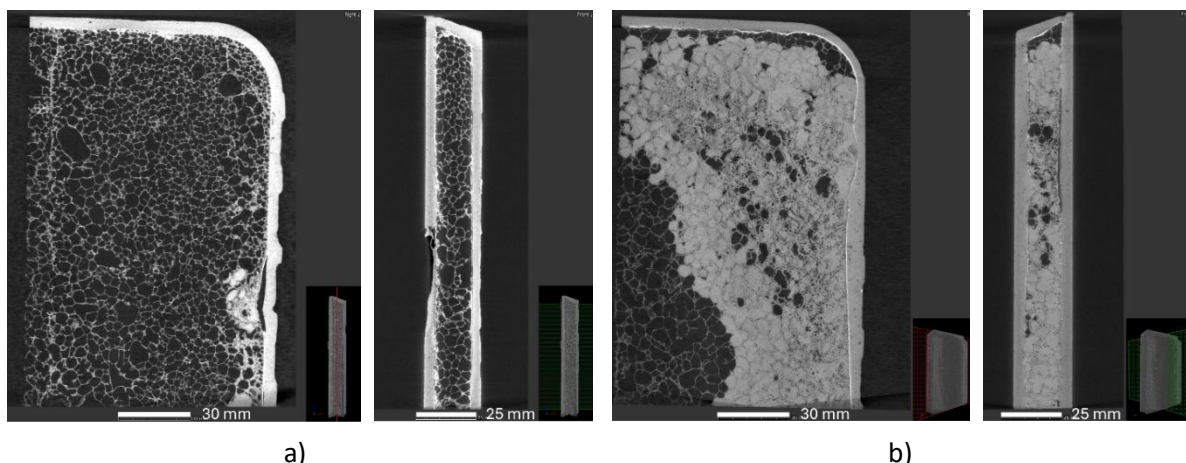
Vzhľadom na charakter výsledkov odlievania boli ďalej hodnotené iba spodné polovice odliatkov HP2 a HP3. Všetky tri hybridné odliatky boli rezané na zhodnú výšku $h = 120$ mm. Bola porovnaná hmotnosť takto upravených hybridných odliatkov. Na základe výsledkov merania hmotnosti zhrnutých v Tab. 9 možno predpokladať, že jadrá v hybridných odliatkoch HP2 a HP3 boli penetrované taveninou, nakoľko ich hmotnosť je o viac než 500 g vyššia oproti HP1.

Tab. 9 Výsledky procesu zalievania

	Variant 0	HP1	HP2	HP3
Hmotnosť jadra	508,9 g	495 g	383,6 g	546,4 g
Pórovitosť jadra	82,4 %	82,9 %	85,8 %	81,1 %
Hmotnosť hybridného odliatku	x	1013,1 g	1561,9 g	1590,4 g

1.1.1 CT analýza

Vzorky HP1 a HP2 boli ďalej podrobené pozorovaniu počítačovou tomografiou na zariadení Nikon XT H225 ST. Vzhľadom na možnosti zariadenia boli odliatky delené na polovicu dĺžky $l = 165$ mm. Boli nasnímané rezy stredom novovzniknutej vzorky v priečnom a pozdĺžnom reze (Obr. 24).



Obr. 24 CT rezy a) vzorka HP1 b) vzorka HP2

Na reze vzorkou HP1 možno pozorovať povrchovú chybu. Okrem pozdĺžnej dutiny v jeho blízkosti je však prepojenie medzi jadrom a zaliatym kovom priaznivé. CT rez potvrdil predpoklad, že vzorka HP2 podľahla určitej miere penetrácie jadra taveninou. Na Obr. 24 b) je možné pozorovať charakter vyplňovania pórov – v pozdĺžnom reze penetrácia jadra dokonale opisuje steny pórov. Predpokladá sa, že je tento jav spôsobený odporom plynu v póroch. V prípade použitého jadra vo vzorke HP2, ktoré malo pórovitosť približne 85 %, sa na základe predošlých zistení očakáva tenšia vrstva celistvého povrchu materiálu a zároveň nižšia pevnosť stien pórov. Tie mohli kolabovať pod pôsobením prúdu taveniny, avšak odvod plynov bol spomalený mechanickým odporom väčšieho množstva stien pórov, vzhľadom na dvojnásobnú výšku jadra oproti HP1. V oboch variantoch bol odvod rozpínaného plynu usmernený otvorenou vrchnou stenou.

Význam a univerzálnosť nami vyvinutého odliatku podčiarkuje aj jeho potenciálne využitie v dvoch špecifických, no veľmi rozdielnych aplikáciách. Prvou je balistická ochrana budov alebo vozidiel, kde zvýšená pevnosť a tuhosť v kombinácii so schopnosťou absorbovať energiu sú prvoradé pre zaistenie bezpečnosti. Druhou oblasťou je implementácia odliatku do akustických stien komôr určených na zníženie hlučnosti zariadení, akými sú napríklad kompresory. V tomto prípade je kľúčová práve schopnosť materiálu účinne tlmiť vysokofrekvenčné vibrácie, čím môže prispieť k výraznému zníženiu hluku.

ZÁVER

Predložená doktorandská dizertačná práca bola zameraná na komplexné zhodnotenie technológie zalievania pórovitých jadier s cieľom vyhotovenia hybridných odliatkov. Experimentálna časť dizertačne práce bola rozdelená do štyroch fáz.

V prvej fáze bola centrom záujmu technológia prípravy hliníkových penových jadier metódou práškovej metalurgie. Bol zisťovaný vplyv parametrov vypeňovania na vlastnosti pórovitých vzoriek.

- Z merania početnosti a rozmerov pórov prvotných doskových vzoriek vyplýva, že použitie počiatočného tlaku 0,2 MPa je nevhodné kvôli vysokej variabilite rozmerov dosiahnutých pórov. V dôsledku veľkých rozmerov pórov bol ich počet najmenší, čo sa premieňa na nízkom počte stien pórov, čo znižuje pevnosť materiálu. Nízka variabilita výsledkov bola dosiahnutá pri variantoch s použitým počiatočným vypeňovacím tlakom 0,3 MPa.
- Z pozorovaní vykonaných na tvarových valcových pórovitých jadrách pri použití inej sady variácií vypeňovacích tlakov vyplýva, že najmenšia variabilita zisťovanej pórovitosti bola dosiahnutá pri použití kombinácie počiatočného tlaku 0,1 – 0,2 MPa a atmosférického stabilizačného tlaku. Najvyššiu pevnosť pri statickej skúške jednoosovým tlakom vykazovali varianty V5 a V6. Rovnako bola pri týchto nameraná najvyššia sila, pri ktorej dochádza k ustáleniu sily pri narastajúcej deformácii.
- Z pozorovaní vykonaných na tvarových prizmatických pórovitých jadrách pri použití dvoch rôznych variantov vypeňovacích tlakov vyplýva, že oproti plnému materiálu AlSi7Mg0,3 rovnakého tvaru majú pórovité jadrá v priemere 3,4-násobnú rázovú húževnatosť. Vyššiu rázovú húževnatosť dosiahli vzorky VP2, pri ktorých vypeňovaní bol použitý vyšší tlak. Bola dosiahnutá pórovitosť rádovo 80 %. Vyššia pórovitosť vzoriek VP1 negatívne ovplyvnila pevnosť materiálu. Tento trend bol pozorovaný aj pri nedeštruktívnej impulznej akustickej skúške, ktorou boli zistené moduly E a G. Vzorka VP2 s pórovitosťou 80 % dosahovala vyššie zistené hodnoty E a G, pričom namerané hodnoty modulov boli zásadne odlišné v závislosti od metódy zostavenia merania, čo nasvedčuje vnútornej nehomogenite materiálu vzhľadom na stochastický charakter pórov.

V druhej fáze experimentu bola pozornosť venovaná FDM aditívnej výrobe bunkových štruktúr a kovových súčastí na báze AlMg1SiCu. Z výsledkov experimentov môžu byť vyvedené tieto závery:

- Z vybraných štruktúr bola pri skúške ťahom PLA vzoriek najväčšia sila prenesená Kelvinovou štruktúrou pri hustote výplne 20 %. Pri takmer všetkých variantoch bola po prekonaní prvotného poškodenia vnútornej štruktúry sila prenášaná už len vonkajšími obvodovými vrstvami materiálu. Pri Kelvinovej štruktúre s 25 % výplňou mala vnútorná výplň dostatočnú pevnosť na to, aby došlo k pretrhnutiu vzorky ešte pred javom prenášania sily obvodovými vrstvami.
- Na spekanie kovového prášku rozptýleného v polymérovej matrici zelenej súčasti boli použité viaceré prístupy. Výrobcom odporúčaný prístup ohrevu v odporovej peci za použitia dreveného uhlia na zabezpečenie ochrannej atmosféry sa javil ako nevhodný. Bolo experimentálne potvrdené, že efektívne spájanie hliníkových častíc s perzistentnou oxidickou vrstvou Al_2O_3 vyžaduje špecifické podmienky ohrevu, presahujúce jednoduché dosiahnutie bodu tavenia základného kovu. Iba extrémne rýchly a koncentrovaný príkon energie, charakteristický pre indukčný ohrev (s vysokou rýchlosťou nárastu teploty (dT/dt) a objemovou hustotou výkonu), je schopný lokálne prekonať vysokú tepelnú stabilitu a teplotu tavenia oxidickej vrstvy Al_2O_3 . Tento intenzívny ohrev vedie k jej dočasnému pretaveniu, narušeniu integrity v dôsledku rozdielnej tepelnej rozťažnosti, alebo

výraznému zmäknutiu (viskóznemu toku), čím sa eliminuje jej funkcia difúznej bariéry. Následne sa umožní priamy kovový kontakt a kineticky zrýchlené difúzne procesy medzi hliníkovými jadrami častíc, čo je nevyhnutné pre dosiahnutie makroskopického metalurgického spojenia.

- Prístup spekania indukčným ohrevom bol rozmerovo a časovo zásadne obmedzený. Pristúpilo sa k odporovému ohrevu v plynných ochranných atmosférach. Z pohľadu rozmerovej stability po spekaní možno za najvyhovujúcejšiu považovať kombináciu vnútornej štruktúry, teploty spekania a použitého ochranného plynu, považovať Gyroid štruktúru spekanú pri 650 °C za použitia Ar. Skúška rázom v ohybe kvantifikovala krehký charakter spekaného materiálu. Všetky namerané hodnoty absorbovanej energie boli < 1 J. Nemožno tvrdiť, že by ktorákoľvek zo vzoriek dosahovala požadované alebo očakávané mechanické vlastnosti.

Vzhľadom na dosiahnuté výsledky boli na experimentálny proces zalievania vo fáze 3 určené len jadrá vyrobené metódou práškovej metalurgie. Z výsledkov fázy 3 možno konštatovať:

- Zásadný vplyv na výslednú kvalitu a vlastnosti výsledných hybridných jadier má použitá povrchová úprava pórovitého jadra. V prípade povrchovo neošetreného jadra dochádza k dôkladnejšiemu prepojeniu s odliatym materiálom, avšak na úkor nežiaducej penetrácie jadra tekutým kovom v procese liatia. Povrchová úprava vytvára chemicko-mechanickú bariéru a zabraňuje tekutému kovu preraziť súvislú obálku pórovitého jadra. EDX analýza nasvedčuje prítomnosti fosforečnanu AlPO_4 ako produktu reakcie pri zalievaní. Od tohto faktu sa odvíjali aj výsledky mechanických skúšok. Skúška tlakom hybridných odliatkov preukázala väčšiu pevnosť vzoriek, ktoré kvôli neupravenému povrchu jadra boli penetrované, s pórmi takmer úplne vyplnenými.
- Pri cyklickej skúške trojbodovým ohybom bolo odhadnuté miesto iniciácie trhlin na hornom rozhraní jadro/odliaty materiál v osi cyklického namáhania. Zvýšené ťahové napätie v tomto mieste bolo zistené aj simuláciou idealizovanej vzorky.
- Hybridné odliatky s prizmatickými jadrami podliehali vlastnostiam týchto jadier – jadrá ktorých bola dosiahnutá priemerná pórovitosť 85 % boli prúdom tekutého kovu pri zalievaní deformované, čím sa zvyšovala variabilita výsledkov cyklickej skúšky. Vzhľadom na nízky počet vzoriek nemožno vyvodiť konkrétny záver, ale možno pozorovať trend menšej variability výsledkov pri použití jadier s 80 % pórovitosťou. Výsledky merania elektrickej vodivosti korešpondujú s pórovitosťou materiálu. Vzorky pórovitých prizmatických jadier s nižšou pórovitosťou má všeobecne vyššiu elektrickú, v dôsledku čoho aj tepelnú, vodivosť. Tento trend bol pozorovaný aj pri zaliatych hybridných odliatkoch.

Vo fáze 4 boli prekonané viaceré problémy vzniknuté pri snahe zalievania pórovitého jadra s väčším objemom, než aký mali dovtedy skúmané testovacie vzorky, nakoľko išlo o hybridný odliatok s potenciálnym aplikačným využitím. Po experimentálnom zisťovaní vhodných podmienok prípravy jadra a procesu zalievania bol vyhotovený jeden vyhovujúci hybridný odliatok. Na jeho vytvorenie bolo nutné použiť viacero zmien prístupu:

- Jadro bolo povrchovo upravené Zr náterom, čo eliminuje materiálové prepojenie povrchu jadra a zaliateho kovu. Výška jadra musela byť znížená o polovicu, aby boli dosiahnuté priaznivé výsledky zalievania. Jadro muselo byť v hornej časti otvorené na odvod rozpínajúcich sa plynov. Plnenie dutiny formy spodným vtokom vykazovalo podstatne lepšie výsledky zalievania.

PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE

Dizertačná práca bola riešená v rámci projektov KEGA 008ŽU-4/2022, KEGA 029ŽU-4/2023, KEGA 018ŽU-4/2025, VEGA 1/0241/23 a Grantového projektu UNIZA č. 1/2023 (18760). Z výsledkov získaných počas riešenia experimentálnych prác možno vyvodiť tieto prínosy práce:

Prínosy pre vedný odbor

- Analýza vplyvu procesných parametrov na charakter pórovitosti a tuhosť kovových pórovitých súčastí vyrobených metódou práškovej metalurgie.
- Návrh metodiky aditívnej výroby bunkových štruktúr z hliníkovej zliatiny využitím FDM tlače na komerčne dostupnom zariadení.
- Analýza vplyvu vnútornej štruktúry na mechanické vlastnosti polymérneho materiálu PLA.
- Návrh režimu spekania neštandardného kompozitného tlačového materiálu na báze hliníkového prášku v polymérnej matici a návrh metodiky zisťovania mechanických vlastností skúmaného materiálu.
- Identifikácia kinetiky ohrevu ako kritického faktora pre destabilizáciu povrchových oxidov a aktiváciu interdifúzných procesov pri spekaní aditívne vyrobených jadier.
- Návrh metodiky technológie zalievania a realizácie hybridných odliatkov gravitačným odlievaním.
- Analýza rozhrania povrchovo upravených a neupravených pórovitých jadier a ich interakcii s taveninou experimentálneho hybridného odliatku.

Prínosy pre prax

- Odporúčenie využívať na výrobu hybridných odliatkov napenené jadrá s pórovitosťou maximálne 80 % vzhľadom na väčšiu pevnosť stien pórov.
- Zhodnotenie využiteľnosti nedeštruktívnej metodiky zisťovania mechanických vlastností materiálu pomocou impulznej akustickej skúšky.
- Odporúčenie využívať povrchovú úpravu jadra pred procesom zalievania na zníženie rizika penetrácie pórovitého jadra.
- Odporúčenie realizácie hybridných odliatkov s využitím spodného vtoku.

Odporúčania pre ďalší výskum

- Do ďalšieho výskumu sa odporúča využitie gravitačného liatia do kovovej formy a zisťovanie vplyvu rýchlosti ochladzovania na výsledné štruktúry v hybridnom odliatku.
- Využitie near-net shape zlievarenských technológií – liatie na vytaviteľný model, nízkotlakové liatie, vysokotlakové liatie.
- Vedecky zaujímavým výskumom je skúmanie možnosti spojenia vypeňovania polotovaru a zalievania do jedného kroku.
- Využitie kovovej FDM aditívnej výroby na realizáciu hybridných odliatkov s jadrami na báze kovu iného, než hliník – bronz, mosadz, meď, oceľ.
- Využitie aditívnej technológie SLM na výrobu bunkových jadier na realizáciu hybridných odliatkov.

HLAVNÁ POUŽITÁ LITERATÚRA

- Banhart, J. 2001.** Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science*, 46, 6, 559–632.
- Banhart, J. 2007.** Metal Foams - from Fundamental Research to Applications. In *Frontiers in Design of Materials*. 1. vydanie, CRC Press. ISBN 9781420047301
- Campbell, J. 2015.** Complete Casting Handbook. Druhé vydanie. Oxford: Elsevier Ltd, 2015. ISBN: 978-0-444-63509-9.
- Dizon, J.R.C., Espera, A.H. Jr., Chen, Q., Advincula, R.C. 2018.** Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive manufacturing*, 20, 44-67. doi: 10.1016/j.addma.2017.12.002.
- Frazier, W.E. 2014.** Metal Additive Manufacturing: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance* 23(6), 1917-1928. doi: 10.1007/s11665-014-0958-z
- García-Moreno, F. 2016.** Commercial Applications of Metal Foams: Their Properties and Production. *Materials*. 2016, 85, 9. doi: 10.3390/ma9020085
- Gibson L, Ashby M. 1997.** Cellular solids: structure and properties. Druhé vydanie. Cambridge University Press. ISBN 9781139878326
- Gupta, N., Zeltmann, S.E., Doddamani, M. 2019.** Testing of Foams. *Handbook of Mechanics of Materials*, s. 2083-2122. Springer Verlag. ISBN: 9789811068843.
- Lefebvre, L.-P., Banhart, J., & Dunand, D. C. 2008.** Porous metals and metallic foams: Current status and recent developments. *Advanced Engineering Materials*, 10(9), 775–787 doi: <https://doi.org/10.1002/adem.200800241>
- Papis, K., Hallstedt, B., Löffler, J., & Uggowitzer, P. 2008.** Interface formation in aluminium–aluminium compound casting. *Acta Materialia*, 56(13), 3036–3043. doi: 10.1016/j.actamat.2008.02.042
- Papis, K., Löffler, J., & Uggowitzer, P. 2010.** Interface formation between liquid and solid Mg alloys—An approach to continuously metallurgic joining of magnesium parts. *Materials Science and Engineering: A*, 527(9), 2274–2279. doi: 10.1016/j.msea.2009.11.066
- Rajak, D. K., Gupta, M. 2020.** An Insight Into Metal Based Foams: Processing, Properties and Applications. Springer Nature – Singapore. ISBN: 978-981-15-9068-9.

PUBLIKAČNÁ ČINNOSŤ AUTORA

- [1] **V3 - Brůna, M.; Medňanský, M.; Matejka, M.; Podprocká, R. 2023.** Influence of HPDC process parameters on the microstructure of EC electromotor housing. *Metals*, 2023, 13, 2, 295, ISSN 2075-4701.
- [2] **V2 – Medňanský, M.; Brůna, M.; Matejka, M. 2023.** Electromotor housing microstructure dependence on HPDC process parameters. *Transportation Research Procedia*, 2023, 74, 680-687, DOI: 10.1016/j.trpro.2023.11.197.
- [3] **V3 - Brůna, M.; Vasková, I.; Medňanský, M. 2024.** Research of the new laboratory methodology for measuring the disintegration of mixtures with inorganic binders hardened by dehydration. *Archives of Foundry Engineering*, 2024, 24, 1, 80-87, DOI: 10.2445/afe.2024.149524.
- [4] **V3 – Brůna, M.; Galčík, M.; Medňanský, M.; Kasińska, J. 2024.** Unconventional elements in the gating system and their influence on the melt flow and casting quality. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2024, 69, 3, 1143-1149, DOI: 10.24425/amm.2024.150936.
- [5] **V3 - Brůna, M.; Medňanský, M.; Oslanec, P. 2024.** Research of hybrid aluminium castings with the use of porous cores. *Archives of Foundry Engineering*, 2024, 24, 3, 18-24, DOI: 10.24425/afe.2024.151286.
- [6] **V3 – Medňanský, M.; Brůna, M.; Matejka, M. 2023.** Štruktúra hliníkových zliatin pre vysokotlakové odlievanie. *Technológ*, 2023, 15, 1, 72-75, ISSN 1337-8996.
- [7] **V3 - Medňanský, M.; Brůna, M.; Matejka, M. 2022.** Numerické simulácie vplyvu technologických faktorov na štruktúru vysokotlakových odliatkov. *Technológ*, 2022, 14, 3, 82-85, ISSN 1337-8996.
- [8] **V3 – Medňanský, M.; Brůna, M. 2024.** Výskum hybridných hliníkových odliatkov s použitím penových jadier. *Technológ*, 2024, 16, 2, 87-90, ISSN 1337-8996.
- [9] **V3 - Galčík, M.; Brůna, M.; Medňanský, L. 2023.** Accompanying phenomena during casting of aluminium alloys. *Technológ*, 2023, 15, 1, 65-68, ISSN 1337-8996.
- [10] **V3 – Medňanský, M.; Brůna, M.; Matejka, M. 2023.** Hodnotenie vplyvu technologických parametrov na mikroštruktúru vysokotlakových odliatkov. *Technológ*, 2023, 15, 2, 52-57, ISSN 1337-8996.
- [11] **V3 – Medňanský, M.; Brůna, M. b.r.** Overcasting ako inovatívna metóda spájania kovových materiálov. *Technológ*, b.r., ISSN 1337-8996.
- [12] **V3 – Medňanský, M.; Brůna, M.; Kuriš, M.; Oslanec, P. b.r.** Additive manufacturing of cellular cores for overcasting technology. *Transportation Research Procedia*, b.r.

RESUMÉ

Dizertačná práca sa zaoberá progresívnou technológiou odlievania s cieľom realizácie hybridných odliatkov využitím pórovitých a bunkových kovových jadier. V práci bol analyzovaný vplyv technologických parametrov výroby na výsledné vlastnosti penových jadier. Preukázalo sa, že kombinácia vyšších vypeňovacích tlakov mala pozitívny vplyv na vlastnosti jadier. Aditívne vyrobené jadrá technológiou FDM vykazovali vysokú krehkosť a technológia sa za použitých podmienok javí nevhodnou. V prípravnom procese technológie overcasting bola zistená nutnosť povrchovej úpravy pórovitého jadra. Najlepšie výsledky boli zistené pri použití úpravy kyselinou H_3PO_4 . Pórovité jadrá s pórovitosťou >85 % boli charakteristické nízkou pevnosťou a deformáciou a deštrukciou pri procese zalievania.

Kľúčové slová: Hybridné odliatky. Zalievanie. Kovové peny. Bunkové štruktúry.

RESUMÉ

The dissertation thesis deals with progressive casting technology with the aim of producing hybrid castings using porous and cellular metal cores. The thesis analyzes the influence of technological parameters on the final properties of foam cores. The results show that a combination of higher foaming pressures had a positive effect on the properties of the cores. Additively manufactured cores using FDM technology exhibited high brittleness, and the technology appears unsuitable under the chosen conditions. In the preparatory process of the overcasting technology, the need for surface treatment of the porous core was identified. The best results were obtained using H_3PO_4 acid treatment. Porous cores with a porosity higher than 85% were characterized by low strength and deformation and destruction during the overcasting process.

Keywords: Hybrid castings. Overcasting. Porous metals. Cellular structures.