

Výskum hybridných hliníkových odliatkov s použitím penových jadier

Martin Medňanský, Ing.*

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: martin.mednansky@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2771

Marek Brúna, doc. Ing., PhD.

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: marek.bruna@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2756

Research of hybrid aluminium castings using foam cores

Abstract: The paper focuses on the technological challenges posed by the production of experimental hybrid castings by overcasting technology. Theoretically, using this technology provides lower casting weight while maintaining positive mechanical properties and improves the energy absorption capability of the component. The effect of the pressure used during the foaming of the cores on the relative density of the metal foam component was experimentally evaluated. The challenge of the technology is the interface between the casting and the oxide coated core surface. Surface-treated cores were cast and their interfaces were observed microscopically. The experimental results showed a positive effect of the presence of $AlPO_4$ in the interface to prevent the penetration of liquid metal into the pores of the foam core.

Keywords: aluminium foam, hybrid castings, overcasting.

ÚVOD

S nástupom 21. storočia sa zvýšil záujem o ekologické a energeticky úsporné materiály. Penový hliník sa stáva vďaka svojim vlastnostiam predmetom stále intenzívnejšieho výskumu a vývoja, aj keď sa počiatok technológií výroby tohto materiálu datuje od polovice minulého storočia. Pozitívne vlastnosti kovových pien podnietili realizáciu aj výskumu autorov tohto článku, ktorý skúma ich využitie v zlievarenstve realizáciou hybridných odliatkov.

1 KOVOVÉ PENY

Kovové peny sú materiály s celulárnou štruktúrou, skladajú sa z kovového skeletu a pórov, ktoré tvoria viac ako 70 % celkového objemu materiálu. Charakter pórov zásadným spôsobom ovplyvňuje vlastnosti týchto materiálov - podstatnými parametrami sú tvar, veľkosť a orientácia pórov a hrúbka stien kovového skeletu.

Bunkové štruktúry možno kategorizovať podľa charakteru pórov na (1) štruktúry s otvorenými pórmí, tiež nazývané kovové špongie, ktorých póry sú medzi sebou prepojené; (2) štruktúry s uzatvorenými pórmí - póry sú diskkrétne, obalené kovovou maticou.

V dôsledku toho sú tieto kovové peny schopné plávať na vodnej hladine.

Podľa rozmiestnenia pórov sa kovové bunkové štruktúry delia na štruktúry s pravidelným usporiadaním pórov a štruktúry so stochastickým usporiadaním pórov. Póry sú v štruktúre rozmiestnené náhodne. Väčšina kovových pien má tento charakter, čo je spôsobené spôsobom ich výroby [1].

Pre kovové peny sú špecifické tri vlastnosti - nízka merná hmotnosť, schopnosť tepelnej a akustickej izolácie a absorpcie energie a sú najvýznamnejšími prednosťami kovových pien [2].

Výsledné vlastnosti a s nimi spojené aplikácie týchto materiálov závisia najmä od charakteru pórovitosti, stupni prepojenia pórov, ich rozloženia a veľkosti. Kovové peny s otvorenými pórmí majú výbornú tepelnú vodivosť, vďaka čomu nachádzajú uplatnenie ako výmenníky tepla, tepelné štíty, vysokoteplotné filtre a iné [3, 4]. Kovové peny s uzatvorenými pórmí sú využívané napr. v lodnom priemysle a iných špecifických aplikáciách. Ďalej sa využívajú vo väčšej miere na absorbovanie nárazovej energie, podobne ako polymérne peny [5].

1.1 Technológia zalievania

V súčasnosti sa kovy (chemicky zhodné i odlišné) spájajú metódami, ktoré možno klasifikovať do troch hlavných skupín: (1) Spájanie pevných látok s pevnými: spájkovanie, valcovanie, zváranie trením, zváranie laserom, explozívne zváranie, povrchovo aktivované spájanie a hydrostatická extrúzia; (2) Spájanie pevných látok s kvapalnými: ponáranie za tepla (*hot dipping*) a zalievanie (*Overcasting, Compound casting*); (3) Spájanie kvapalných látok s kvapalnými: kontinuálne odlievanie a odlievanie s priamym chladením (*direct chill casting*) [6].

Zalievanie je definované ako výrobná technológia, pri ktorej sa dva kovy, jeden v pevnom stave a druhý v kvapalnom stave, dostávajú do vzájomného kontaktu, takže medzi týmito dvoma materiálmi vzniká zóna difúznej reakcie, a tak dochádza k plynulému prechodu z jedného kovu do druhého. Z dôvodu konštrukčnej flexibility, efektívnosti výroby, úspory hmotnosti a nízkych výrobných nákladov sa v poslednom čase venuje veľká pozornosť *Overcasting* technológii v rôznych systémoch a konštrukčných riešeniach [7].

Prepojenie tuhého jadra a tekutého kovu hliníkových zliatin je problematické z dôvodu prítomnosti vrstvy oxidu hlinitého (Al_2O_3) na povrchu tuhej hliníkovej zliatiny [8]. Táto povrchová vrstva má vyššiu teplotu tavenia ($2072\text{ }^\circ\text{C}$) ako roztavený kov, čo obmedzuje zmáčavosť pri zalievaní roztaveného materiálu. Navrhnuté riešenia tejto komplikácie zahŕňajú nahradenie vrstvy Al_2O_3 vrstvou zinku s nízkou teplotou tavenia ($420\text{ }^\circ\text{C}$) alebo použitie tlaku pri zalievaní - technológia *Squeeze overcasting* [9].

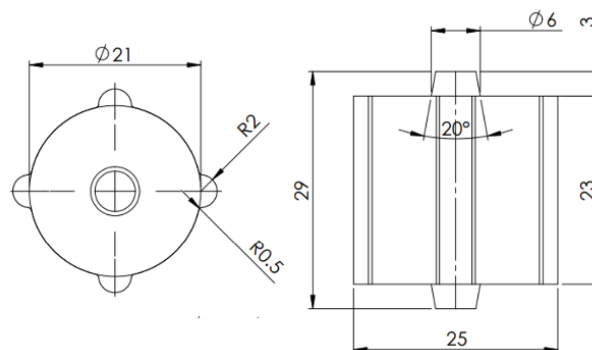
V článku sa pozornosť venuje vplyvu tlaku pôsobiaceho pri vypeňovaní na výslednú relatívnu hustotu a možnosť jej riadenia. V článku je predstavený princíp chemického narušenia oxidickej vrstvy leptaním povrchu na zabezpečenie požadovaného charakteru prepojenia odliatku a penového jadra.

2 METODIKA EXPERIMENTU

Na realizáciu napenených jadier bola použitá technológia výroby ohrevom lisovaného kovového prášku. Jej princípom je ohrev izostaticky listovanej zmesi práškov zliatiny hliníka a napeňovača TiH_2 na teplotu blízku bodu tavenia základnej zliatiny. Pôsobením teploty a tlaku dochádza k uvoľňovaniu plynného vodíka. Vyvinutý tlak rozpína polotovar do vysoko pórovitej štruktúry s uzavretými pórmí. Základom použitej práškovej zmesi bol prášok $Al99,5$ (s priemernou frakciou $< 400\text{ }\mu\text{m}$) s prídavkom 10 hm. % Si prášku ($< 20\text{ }\mu\text{m}$) a 0.8 hm. % napeňovača - TiH_2 prášku ($< 5\text{ }\mu\text{m}$).

Na zabezpečenie tvaru penových jadier (obr. 1) bola navrhnutá a frézovaná viacnásobne použiteľná trojdielna

forma z bloku 99,9 % grafitu. Teplota vypeňovania bola $680\text{ }^\circ\text{C}$. Tlak atmosféry (N_2) vo vypeňovacej komore sa skokovo menil z počiatočného tlaku na stabilizačný, ktorý pôsobí ako protitlak voči bublinám uvoľňovaného vodíka.



Obr. 1. Rozmery napeneného jadra

Tvarové jadrá sa vypeňovali pri rôznych počiatočných a stabilizačných tlakoch podľa tab. 1.

Tab. 1. Varianty tlakov použitých pri vypeňovaní

Variant	Počiatočný tlak [MPa]	Stabilizačný tlak [MPa]
V1	Atmosférický	$0,005 \pm 0,002$
V2	$0,15 \div 0,20$	0,15
V3/V4/V5/V6	$0,10 \div 0,20$	$0,1 / 0,15 / 0,05 / \text{Atm.}$
V7	$0,10 \div 0,30$	0,15

Pomocou laboratórnej váhy bola meraná hmotnosť piatich vzoriek z každého variantu na vyjadrenie relatívnej hustoty ρ/ρ_S podľa vzťahu (3) vychádzajúceho zo vzťahov:

$$\rho_S = m_S / V \quad (1)$$

$$\rho = m / V \quad (2)$$

$$\rho / \rho_S = m / m_S \quad (3)$$

kde m [g] je hmotnosť

ρ [$\text{g}\cdot\text{mm}^{-3}$] zdanlivá hustota napenenej súčasti,

m_S [g] je hmotnosť pevnej súčasti s rovnakým objemom V [mm^{-3}], aký má napenená súčasť,

ρ_S [$\text{g}\cdot\text{mm}^{-3}$] je hustota východiskového materiálu.

Napenené jadrá určené na zalievanie boli povrchovo upravené: odmastené *izopropylalkoholom* a sušené, leptané vybraným leptadlom, umyté *izopropylalkoholom*, sušené a predhriate v elektrickej odporovej peci na teplote $150\text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 20 minút. Okrem povrchovo neupravenej varianty boli na povrchovú úpravu použité: kyselina HF 0,2 % po dobu 20 sekúnd a H_3PO_4 po dobu 1,5 minúty a 4 minúty.

Formy určené na zalievanie boli vyrobené *patternless procesom* z blokov formovacej zmesi vytvrdenej pomocou CO_2 . Predhriate jadrá sa vložili do dutiny

formy a forma bola predhriata pri teplote $150\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 15 minút.

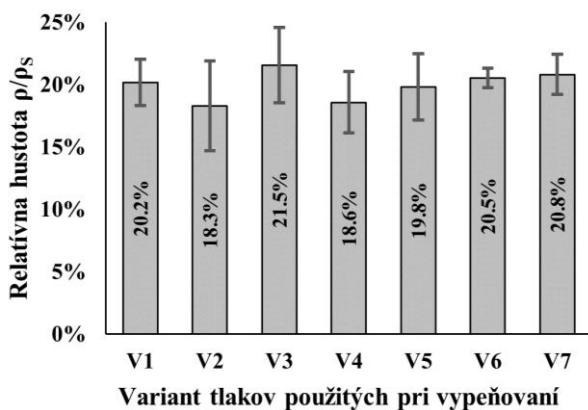
Na zalievanie napenených jadier technológiou gravitačného odlievania bola zvolená zliatina $AlSi7Mg0,3$. Tavenie materiálu prebiehalo v elektrickej odporovej peci a teplota liatia bola $760\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pomocou počítačového tomografu *Nikon XT H225 ST* bola analyzovaná plošná pórovitosť (podiel pórov v štruktúre vzhľadom k celkovému obsahu plochy rezu).

3 VÝSLEDKY A DISKUSIA

3.1 Relatívna hustota napenených jadier

Bola meraná hmotnosť piatich vzoriek všetkých siedmich variantov valcových jadier. Namerané hodnoty a hmotnosť plného valcového telesa, ktorá bola zistená z vlastností CAD modelu, 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.



Obr. 2. Vplyv použitého tlaku na výslednú relatívnu hustotu napeneného jadra

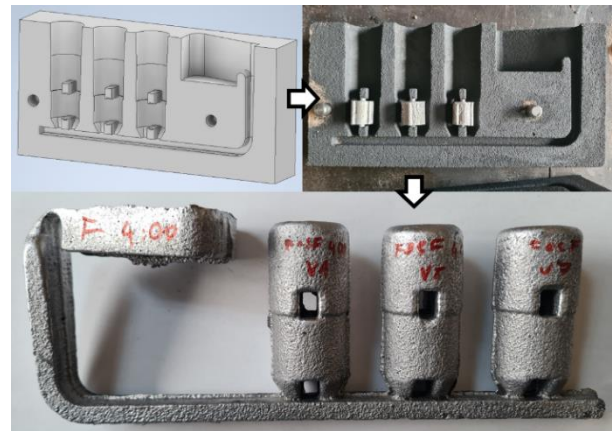
Najmenšia priemerná hodnota relatívnej hustoty (takže najväčšia hodnota pórovitosti), bola nameraná vo variante V2 ($\pm 18,3\%$), avšak merania na tomto variante sa prejavili s najväčšou smerodajnou odchýlkou ($\pm 3,6\%$). Najmenšia smerodajná odchýlka, ktorá má za následok najmenšiu variabilitu výsledkov v rámci jedného variantu, bola zistená pri variante V6 ($\pm 0,8\%$). Nízka variabilita bola zistená aj pri variante V7 ($\pm 1,6\%$). Najvyššia priemerná hodnota relatívnej hustoty bola zistená pri vzorkách variantu V3 (21,5%), avšak opäť bol tento výsledok zaťažený veľkou odchýlkou ($\pm 3,6\%$).

3.2 Výsledky procesu zalievania

Vybrané napenené jadrá boli povrchovo upravené. Na jadrách upravených H_3PO_4 bola pozorovaná zmena farby povrchu jadra na matne striebristú. Existuje predpoklad, že na povrchu došlo k acidobázickej neutralizačnej reakcii:



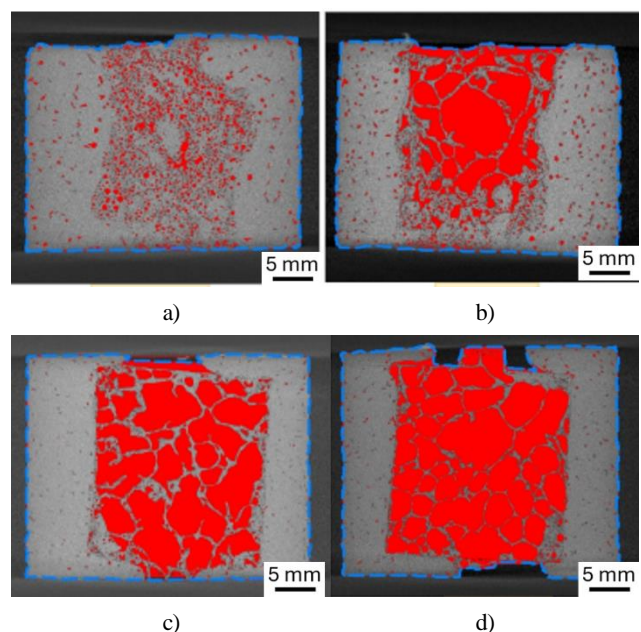
Forma na zalievanie bola navrhnutá s vertikálnou deliacou rovinou, s mierne pretlakovou vtokovou sústavou s plnením formy zospodu, s tromi dutinami a atmosférickými náliatkami (obr. 3). Polohovanie napenených jadier bolo zabezpečené navrhnutými stĺpkami integrovanými do frézovaného tvaru formy.



Obr. 3. Proces zalievania: CAD model, polforma so zaploňovanými penovými jadrami, 3 vzorky hybridných odliatkov

3.3 CT hodnotenie pórovitosti hybridného odliatku

Hodnotenie pórovitosti bolo hodnotené počítačovým tomografom. Pozorovaním vzoriek počítačovou tomografiou bola zistená nežiadúca penetrácia taveniny Al zliatiny do objemu pórov napeneného jadra takmer v plnom rozsahu odliatku s neleptaným jadrom (obr. 4a). Na snímke variantu s jadrom leptaným HF (obr. 4b) možno pozorovať penetráciu taveniny zo spodnej strany. Rozmiestnenie penetrovaného kovu v priestore jadra naznačuje, že prúd taveniny pri vstupe do dutiny formy rozrušil povrch jadra. Na oboch variantoch bolo možné pozorovať odlišné sfarbenie štruktúry jadra a zatečenej taveniny.



Obr. 4. Počítačová tomografia

Najlepším výsledkom zalievania sa javí byť variant leptaný kyselinou fosforečnou po dobu štyri minúty (obr. 4d), pri ktorom nedošlo k nežiaducej penetrácii jadra taveninou.

Pórovitosť bola hodnotená v troch rovinách rezu X, Y, Z. Pomocou programu *Quickphoto Industrial 3.2* bol vyhodnotený podiel pórov v štruktúre vzhľadom k celkovému obsahu plochy rezu. Výsledky sú zaznamenané v tab. 2.

Tab. 2. Pórovitosť v hybridných odliatkoch v %

Vzorka	Rovina X	Rovina Y	Rovina Z
Bez povrch. úpravy	9,23	9,66	12,00
HF	26,48	28,99	18,10
H ₃ PO ₄ 1,5 min	39,82	39,66	28,82
H ₃ PO ₄ 4 min	46,73	47,04	35,19

Najväčší podiel pórov na celkovú plochu rezu bol zaznamenaný vo vzorke povrchovo upravenej kyselinou fosforečnou po dobu štyroch minút.

ZÁVER

Práca bola zameraná na hodnotenie vplyvu tlaku atmosféry pôsobiacej počas vypeňovania materiálu na výslednú pórovitosť a relatívnu hustotu penového materiálu. Zámerne bola použitá široká škála vypeňovacích tlakov ako pri doskových, tak aj tvarových vzorkách. Na základe nadobudnutých výsledkov možno konštatovať, že:

- najmenšia variabilita výsledkov relatívnej hustoty tvarových vzoriek bola dosiahnutá pri variante jadra V6 a V7, teda pri použití štartovacieho /stabilizačného tlaku 0,1 ÷ 0,2 MPa / atm. tlak, a 0,1 ÷ 0,3 / 0,15 MPa.
- z výsledkov experimentálneho zalievania sa javí potrebným použitie povrchovej úpravy na zamedzenie penetrácie tekutého kovu do hĺbky pórov napeneného jadra. Najlepší výsledok v tomto ohľade bol dosiahnutý povrchovými úpravami použitím H₃PO₄. Existuje predpoklad, že vzniknutý produkt reakcie - povlak AlPO₄, slúži ako bariéra prúdu taveniny.

Prácu možno považovať za počiatok rozsiahlejšieho výskumu možností realizácie hybridných odliatkov, ich výziev a aplikačných možností. Boli získané výsledky, ktoré môžu byť aplikované pre ďalší experimentálny výskum tejto tematiky, ktorá zatiaľ nie je do hĺbky prebádaná.

Pod'akovanie

Táto práca vznikla aj za podpory grantových projektov KEGA 029ŽU-4/2023: Rozvoj dištančnej formy vzdelávania pre študentov strojárkeho zamerania na báze interaktívnej platformy vo

svetových jazykoch a VEGA 1/0241/23: Vývoj a výskum inovatívnej metodiky pri výrobe konštrukcií z hliníkových zliatin za účelom zvýšenia stability procesu ich vzájomného spájania.

LITERATÚRA

- [1] BANHART, J. (2013): *Light-Metal Foams History of Innovation and Technological Challenges*. In: *Advanced Engineering Materials*, 15, 82-111.
- [2] LEFEBVRE, L.-P. - BANHART, J. - DUNAND, D. C. (2008): *Porous metals and metallic foams: Current status and recent developments*. In: *Advanced Engineering Materials*, 10(9), 775-787
- [3] AMJAD, S. (2001): *Thermal Conductivity and Noise Attenuation in Aluminium Foams*. Cambridge. Dizertačná práca. University of Cambridge.
- [4] ELZEY, D.M. - WADLEY, H.N.G. (2001): *The limits of solid state foaming*. In: *Acta Materialia*. 46, 849-859.
- [5] ASHBY, M. (2000): *Metal foams: A Design Guide*. Elsevier: Burlington, 267 s., ISBN 978-0-7506-7219-1
- [6] ALI, M. A. - JAHANZAIB, M. - WASIM, A. - HUSSAIN, S. - ANJUM, N. A. (2018): *Evaluating the effects of as-casted and aged overcasting of Al-Al joints*. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(1-4), 1377-1392.
- [7] PAPIS, K. - HALLSTEDT, B. - LÖFFLER, J. - UGGOWITZER, P. (2008): *Interface formation in aluminium-aluminium compound casting*. In: *Acta Materialia*, 56(13), 3036-3043.
- [8] PAPIS, K. - LÖFFLER, J. - UGGOWITZER, P. (2010): *Interface formation between liquid and solid Mg alloys—An approach to continuously metallurgic joining of magnesium parts*. In: *Materials Science and Engineering: A*, 527(9), 2274-2279.
- [9] ZHANG, H. - CHEN, Y. - LUO, A. A. (2014): *A novel aluminum surface treatment for improved bonding in magnesium/aluminum bimetallic castings*. In: *Scripta Materialia*, 86, 52-55.