ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka fakulta

DOI: https://doi.org/10.26552/tech.C.2025.2.10

Numerická štúdia vplyvu teploty jadra na tepelné zaťaženie vysokotlakovej formy pri výrobe odliatkov pre EC motory

Marek Matejka, Ing., PhD.*
Katedra technologického inžinierstva Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: marek.matejka@fstroj.uniza.sk ,Tel.: + 421 41 513 2771

Radka Podprocká, Ing., PhD.
Rosenberg-Slovakia s.r.o.,
Kováčska 38, 044 25 Medzev,
E-mail: podprockaradka@gmail.com, E-mail: + 421 918 085 069

Numerical study of the effect of core temperature on the thermal load of a high-pressure die casting mold in the production of EC motor components

Abstract: Thermal loading of the die in high-pressure die casting is a complex phenomenon driven by the interaction of the molten metal with the die surface. This interaction leads to cyclic temperature changes, steep thermal gradients, and thermal shock, all of which significantly impact the integrity of the die. During each injection cycle, dramatic temperature changes occur on the die surface. *Molten aluminum* comes into contact with the die surface, which can reach peak temperatures exceeding 450°C, causing high temperature fluctuations. The aim of the experiment was to investigate the influence of two different thermoregulation media - water and *ITERM 6MB* heat transfer oil - on the thermal behavior of the die cores for *EC* 75 and *EC* 55 castings. Experimental results showed that water cooling leads to more efficient heat dissipation and lower temperatures in the core, while oil tempering ensures higher and more stable temperatures. Analysis of the temperature distribution in the die closing and opening phases confirmed that while water cooling leads to more intensive cooling, oil tempering contributes to a more uniform thermal regime and a potential reduction in thermal shock, which is crucial for die life and casting quality. Significant differences were observed in the cores' thermal behavior for *EC* 75 and *EC* 55 castings, despite their differing tubular section heights.

Keywords: high-pressure die casting, thermal loading, thermoregulation, numerical simulation.

ÚVOD

Vysokotlakové odlievanie (*HPDC*) zahŕňa komplexné tepelné zaťaženie formy. Tento jav je primárne spôsobený interakciou roztaveného kovu s povrchom formy. Dôsledkom sú cyklické zmeny teploty, strmé teplotné gradienty a tepelný šok, ktoré zásadne ovplyvňujú celistvosť formy [1].

Počas každého vstrekovacieho cyklu dochádza k dramatickým teplotným zmenám na povrchu formy. Roztavená hliníková tavenina, vstrekovaná pri teplotách okolo 680 až 750°C, prichádza do kontaktu s povrchom formy, ktorý môže dosiahnuť špičkové teploty nad 450°C. Tento kontakt spôsobuje vysoké teplotné fluktuácie nielen na povrchu formy, ale aj v jej objeme. Teploty formy sa môžu v priebehu jedného cyklu výrazne meniť, napríklad od 320°C počas vstrekovania až po približne 180°C po vyhodení odliatku [2]. Tieto cyklické zmeny sa neustále opakujú s každým vstrekom. Rýchlosť ochladzovania v *HPDC* je typicky veľmi vysoká, pohybujúca sa v rozmedzí 50 až 125°C·s^{-1}. Tepelný tok (q) medzi roztaveným kovom a formou, ktorý je zodpovedný za tieto zmeny, sa riadi *Fourierovým zákonom* vedenia tepla (1) [3]:

$$q = -k \cdot \left(\frac{dT}{dx}\right), \tag{1}$$

kde k je tepelná vodivosť materiálu,
dT/dx je teplotný gradient.

To znamená, že účinnosť prenosu tepla je priamo úmerná tepelnej vodivosti formy a strmosti teplotného gradientu [4].

Kľúčovým aspektom je dynamický rozsah tepelného zaťaženia. Merania ukázali, že materiál formy v blízkosti povrchu dutiny je namáhaný teplotnými fluktuáciami (ΔT) presahujúcimi 200°C. Okrem toho, teplotné rozdiely presahujúce 50°C v rámci formy môžu viesť k významnému tepelnému napätiu. Tieto kvantifikované hodnoty podčiarkujú, že problémom

nie je len absolútna teplota formy, ale predovšetkým veľkosť a frekvencia týchto teplotných zmien. Opakované vystavenie takýmto cyklickým zmenám je hlavným hnacím motorom degradácie formy [5].

Opakované teplotné cykly indukujú vo forme tepelné napätie. Toto napätie, v spojení s vysokým špecifickým tlakom počas prevádzky formy, vytvára podmienky podobné vysokému dynamickému namáhaniu. Tepelné napätie vzniká v dôsledku nerovnomerného rozloženia teploty počas tuhnutia a chladenia, čo vedie k rozdielnemu rozťahovaniu a zmršťovaniu rôznych častí formy. Ak sú teplotné gradienty príliš vysoké, výsledné tepelné napätie môže prekročiť medzu pevnosti materiálu formy a spôsobiť vznik trhlín [6, 7].

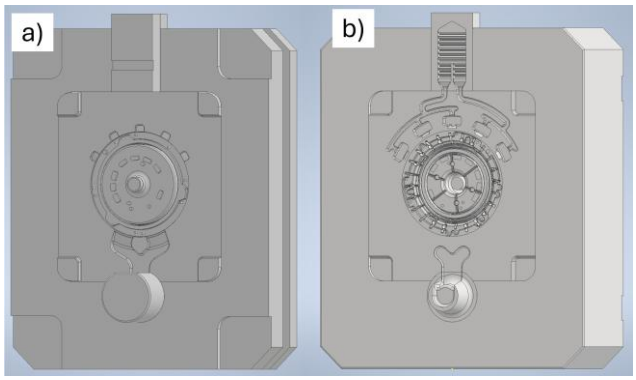
Dôležité je, že tepelné napätie nie je len okamžitým javom, ale kumuluje sa s každým cyklom, čo vedie k fenoménu tepelnej únavy. Koncept "akumulácie tepla" naznačuje, že forma má obmedzenú schopnosť efektívne odvádzať teplo. Ak sa teplo hromadí, zvyšuje to základnú teplotu formy a tým aj celkové tepelné napätie. Tento kumulatívny proces znamená, že tepelná história formy priamo ovplyvňuje jej životnosť. Okrem toho, počiatočný tepelný šok, ku ktorému dochádza počas prívodu roztaveného materiálu do nedostatočne predhriatej formy, môže výrazne skrátiť životnosť formy. Predhrievanie formy je preto kľúčové pre minimalizáciu tohto počiatočného šoku a zníženie teplotných gradientov, čím sa forma pripraví na lepšie zvládanie následných cyklických zaťažení [8, 9].

1 METODIKA EXPERIMENTU

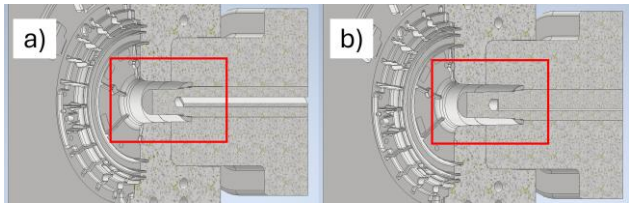
Pre experimentálne účely bola použitá vysokotlaková forma, konkrétne pre odliatok s označením *Statorbuchse EC* 112/75 a *EC* 112/55. Odliatky sú súčasťou motora EC (elektronicky komutovaný). Ide o synchrónny motor s permanentnými magnetmi a vonkajším obežným kolesom, napájaný z meniča. Tento odliatok sa vyrába pomocou jednodutinovej formy, ktorú v reálnej praxi používa firma *Rosenberg-Slovakia.* Na základe skutočnej formy bol vytvorený jej 3*D* model. Hlavným cieľom tohto 3*D* modelu bolo jeho následné využitie v simulačnom softvéri *ProCast.* Celá zostava 3*D* modelu vysokotlakovej formy sa skladala z rámu a vložiek pre pohyblivú a pevnú časť, vložiek pre vlnovec a jadra (obr. 1).

Odliatky *EC* 75 a *EC* 55 sa od seba rozlišujú rozdielnou výškou tubovej časti. Obrázok 2 zobrazuje uloženie jadra vo forme a rozdiel vo veľkosti tuby resp. použitého jadra (červený obdĺžnik).

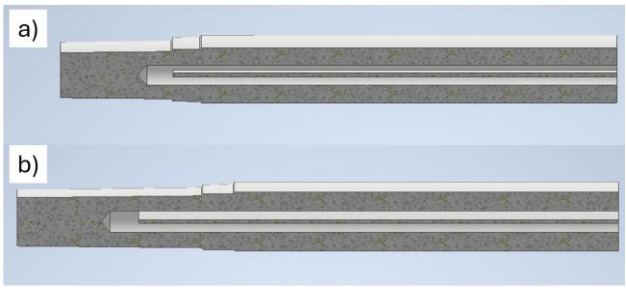
Do pohyblivej aj pevnej časti formy boli vymodelovaná termoregulácia formy. Tento termoregulačný systém zahŕňa kanáliky umiestnené v oblasti dutiny formy (vložková časť), v jadrách, pri napojení tablety do vtokovej sústavy a vo vložkách pre vlnovce v pohyblivej časti. Regulovanie teploty v jadre bolo zabezpečené pomocou špeciálnych sond s priečkou (obr. 3).



Obr. 1. Nasieťované časti formy: a) pevná časť, b) pohyblivá časť



Obr. 2. Nasieťované časti formy: a) pevná časť, b) pohyblivá časť



Obr. 3. Nasieťované časti formy: a) pevná časť, b) pohyblivá časť

V rámci experimentálnych prác boli použité dva druhy médií v termoregulačnom systéme jadra, a to voda a teplonosný olej s označením *ITERM 6MB.* Použitá voda na reguláciu teploty formy bola chemicky upravená - demineralizovaná, aby nedochádzalo k vzniku korózie na plochách kanálikoch alebo zanášanie termoregulačných okruhov vápenatými usadeninami. Hlavným rozdielom medzi vodou a teplonosným olejom je niekoľkonásobne vyšší súčiniteľ prestupu tepla vody pri porovnaní s olejom *ITERM 6MB*. Vyšší súčiniteľ prestupu tepla značí rýchlejšie ochladzovacie formy. Z daného dôvodu sa voda používa ako chladiace médium, pričom olej je používaný na cielenú temperáciu formy.

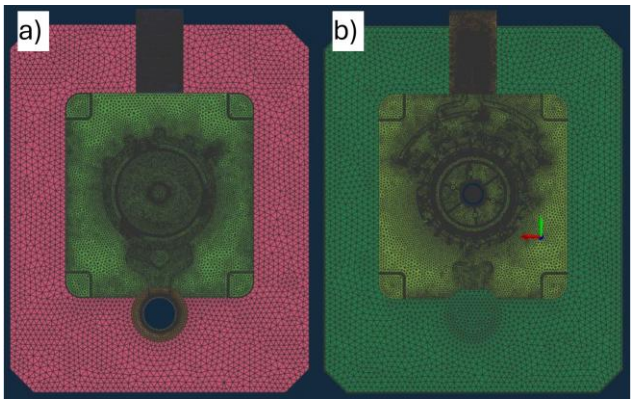
1.1 Príprava simulácie cyklovania tlakovej formy

Prvým krokom pri experimentálnom skúmaní teplotného zaťaženia formy bolo realizovanie numerických simulácií v softvéri *ProCAST*. Na

dosiahnutie čo najpresnejších výsledkov boli parametre odlievania konzultované s firmou *Rosenberg*.

V rámci simulácie boli vykonané celkovo štyri simulácie, pričom dve z nich sa týkali odliatku *EC* 75 a ďalšie dve odliatku *EC* 55 (vplyv zmeny výšky tuby). Pri každej simulácii sa menilo prúdiace médium v termoregulačnom okruhu jadra.

Sieťovanie bolo vykonané v module *MESH*, pričom všeobecným pravidlom prípravy siete bolo zvýšenie jemnosti siete v dôležitých bodoch odliatku, kde sa nachádzajú jemné detaily alebo tenké steny. Naopak, vonkajšie steny formy boli sieťované hrubšie, aby sa ušetrili výpočtové kapacity procesoru (obr. 4).



Obr. 4. Nasieťované časti formy: a) pevná časť, b) pohyblivá časť

Tab. 1. Parametre odlievania a simulácie v *ProCAST*

Parametre	*EC* 75	*EC* 55
Liací stroj	*CLH* 400.02*P*	
Materiál odliatku	*AlSi*12*Cu*1(*Fe*)	
Materiál formy	Oceľ *H*13	
Teplota kovu	705°C	
Počiatočná teplota pevnej časti	190°C	
Počiatočná teplota pohyb. časti	190°C	
Doba lisovania	5 s	
Doba tuhnutia odliatku	17 s	
Maximálna rýchlosť lisovacieho piestu	3,5 m·s^{-1}	
Hmotnosť odliatku	1 kg	0,9 kg
Maximálny tlak v komore	95 MPa	
Metóda plnenia formy	Vysokotlakové odlievanie	
Stop kritérium pre simuláciu cyklovania	Koniec 10 cyklu	

Po dokončení sieťovania boli definované parametre, ako napríklad spôsob odlievania, materiály jednotlivých objemov, počiatočné plnenie komory, spôsob prechodu tepla medzi objektmi, teplota a spôsob termoregulácie, stop kritérium pre ukončenie simulácie plnenia formy a ostatné parametre na základe reálnych podmienok.

V rámci definovania procesných podmienok softvér *ProCAST* umožňuje prepočet koeficientu prestupu tepla pre vodu a olej ako prúdiace médium (HTC calculator). Prepočet koeficientu prestupu tepla pre jednotlivé média umožnil presné zadefinovanie hodnôt pre vodu a olej *ITERM 6MB* čím sa zabezpečili podmienky čo najviac približujúcim sa reálnym podmienkam. Tabuľka 2 uvádza parametre cyklovania pre obe verzie cyklovania.

Tab. 2. Parametre cyklovania v sekundách [s]

Verzia cyklovania	*EC* 75	*EC* 55
Počet cyklov	10	10
Otvorenie formy	10	10
Vyhodenie odliatku	12	12
Štart postreku formy	15	15
Koniec postreku formy	32	32
Štart ofuku formy	35	35
Koniec ofuku formy	54	54
Zatvorenie formy	57	57
Doba cyklu	61	61

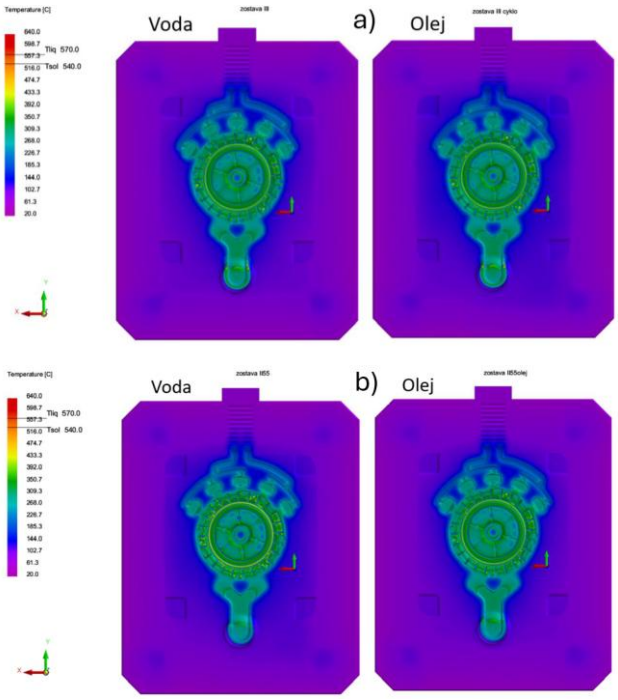
2 HODNOTENIE TEPELNÉHO ZAŤAŽENIA FORMY

V simulácii boli počiatočné podmienky nastavené na desať cyklov. Rozloženie teplôt na forme počas otvárania v desiatom cykle je zobrazené na obr. 5. Na ňom je vľavo znázornená forma pre odliatok *EC 75* (obr. 5a) s vodou chladeným jadrom a hneď vedľa forma s jadrom temperovaným teplonosným olejom. Forma pre odliatok *EC* 55 je zobrazená na obr. 5b.

Vo všetkých prípadoch sa väčšina objemu formy udržiavala v rozmedzí teplôt 20 až 110°C (znázornené fialovou farbou). V blízkosti odliatku dosahovala teplota 140 až 200°C (modrá farba). V oblasti spojenia tablety s vtokovou sústavou sa očakávane dosiahla teplota 390°C (svetlozelená farba). Podobne aj oblasť dutiny formy, ktorá je v priamom kontakte s taveninou, dosahuje teplotu okolo 350°C. Ako sa predpokladalo, rozdiel v teplotách bol zaznamenaný v oblasti jadra, kde pri chladení vodou boli teploty na čele jadra nižšie.

Pri jadre môžeme pozorovať, že najvyššiu teplotu 380°C majú jadrá používané pre odliatky *EC* 75 (obr. 6a) v mieste priameho kontaktu s tekutým kovom, čo je približne v strede odliatku. Je to spôsobené väčším objemom tekutého kovu. Smerom od okrajov sa teplota znižuje na 270 až 230°C. Jadra používané pri odliatkoch *EC* 55 (obr. 6b) dosahovali v mieste styku s tekutým kovom teplotu 330°C.

Celkový priemer jadra bol ohriatý touto teplotou približne do 1/5 priemeru, pri *EC* 75 to bolo do 1/3 priemeru. Vplyv chladenia vodou viditeľne znížil hĺbku prehriatia materiálu jadra.



Obr. 5. Rozloženie teplôt pri fáze otvorenia formy v rámci desiateho cyklu pre: a) *EC* 75 b) *EC* 55

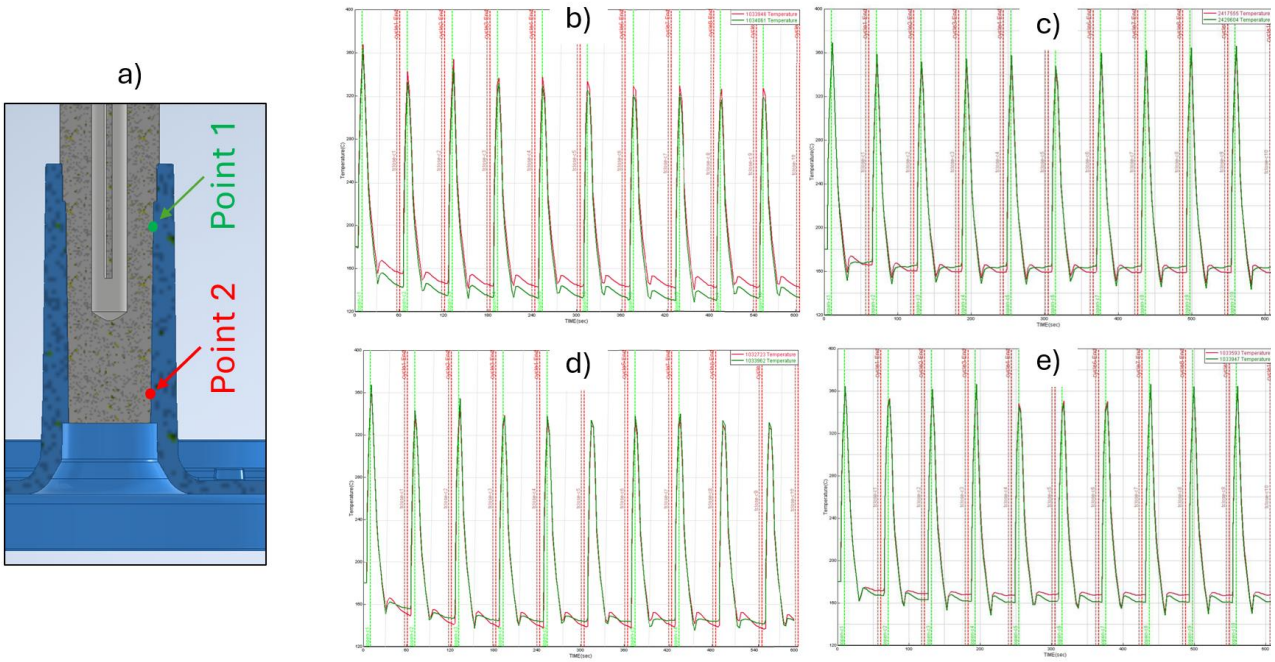
Pre komplexnú analýzu tepelného správania foriem pri vysokotlakovom odlievaní boli zaznamenané a vizualizované priebehy teplôt v závislosti od času pre vybrané body v jadrách foriem.

Na obr. 7a je schematicky znázornené umiestnenie teplotných sond, pričom "*Point* 1" reprezentuje stred jadra a "*Point* 2" povrch čela jadra, ktorý je v priamom kontakte s taveninou. Je dôležité poznamenať, že odliatky *EC* 75 a *EC* 55 sa líšia vo výške tubovej časti, ako je zobrazené na. Grafy na obr. 7b,c,d,e ilustrujú cyklické zmeny teplôt počas desiatich simulačných cyklov pre rôzne konfigurácie chladenia a typy odliatkov.

Všetky grafy vykazujú zreteľný cyklický charakter zmien teploty, typický pre proces vysokotlakového odlievania. Každý cyklus je charakterizovaný prudkým nárastom teploty počas vstrekovania roztaveného kovu a následným postupným poklesom teploty vplyvom chladenia/temperovania. Pozorovateľná je stabilizácia tepelnej bilancie po úvodných 1-2 cykloch, pričom od tretieho cyklu sú teplotné priebehy už vysoko konzistentné.

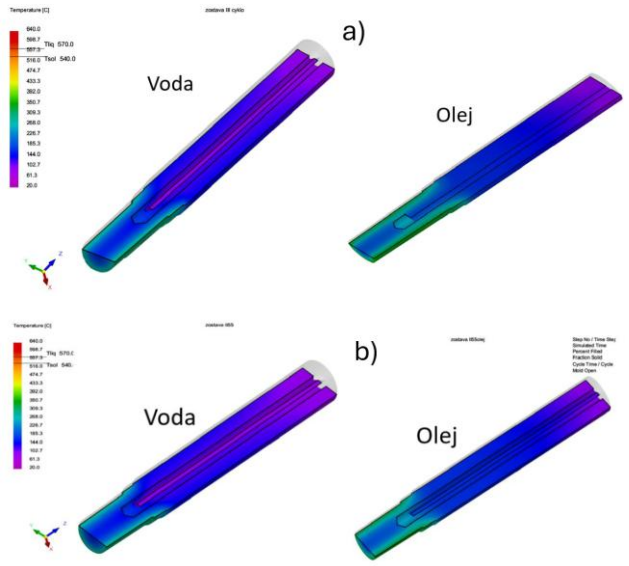
Krivky pre "*Point* 2" (povrch čela jadra) konzistentne dosahujú vyššie teplotné špičky a väčšie amplitúdy výkyvov v porovnaní s krivkami pre "*Point* 1" (stred jadra), čo potvrdzuje existenciu významného teplotného gradientu v rámci jadra v dôsledku jeho priameho kontaktu s horúcou taveninou.

Pri porovnaní foriem chladených vodou (grafy b pre *EC* 75 a d pre *EC* 55) s formami temperovanými olejom (grafy c pre *EC* 75 a pre *EC* 55) sú zrejmé kľúčové rozdiely. Jadrá temperované olejom dosahujú celkovo vyššie prevádzkové teploty, a to ako v špičkách, tak aj v minimálnych hodnotách. Navyše, teplotné priebehy pri olejovom temperovaní sú výrazne stabilnejšie a "hladšie", s menšími fluktuáciami v rámci cyklu, čo svedčí o efektívnejšej regulácii teploty a ustálenejšom tepelnom stave jadra vďaka cielenému temperovaniu. Naopak, pri chladení vodou je badateľné rýchlejšie ochladzovanie po dosiahnutí teplotnej špičky, čo je spôsobené vyššou tepelnou kapacitou a prestupnosťou tepla vody. Charakteristickým rysom vodou chladených jadier je



Obr. 7. Graf teploty v závislosti od času: a) umiestnenie bodov, b) voda *EC* 75, c) olej *EC* 75, d) voda *EC* 55, e) olej *EC* 55

aj mierny postupný pokles minimálnej povrchovej teploty v prvých cykloch (približne do 5. cyklu), kým dôjde k úplnému ustáleniu tepelnej bilancie.

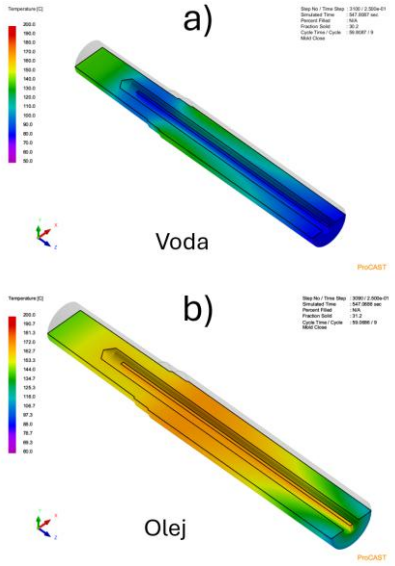


Obr. 6. Rozloženie teplôt v jadre pri fáze otvorenia formy v rámci desiateho cyklu pre: a) *EC* 75 b) *EC* 55

Vizuálna analýza grafov nepreukázala zásadné rozdiely v celkovom teplotnom správaní jadier pre odliatky *EC* 75 a *EC* 55 pri porovnateľných podmienkach chladenia/temperovania. Hoci môžu existovať minimálne rozdiely v absolútnych hodnotách teplotných špičiek alebo miním.

2.1 Fáza zatvorenia formy

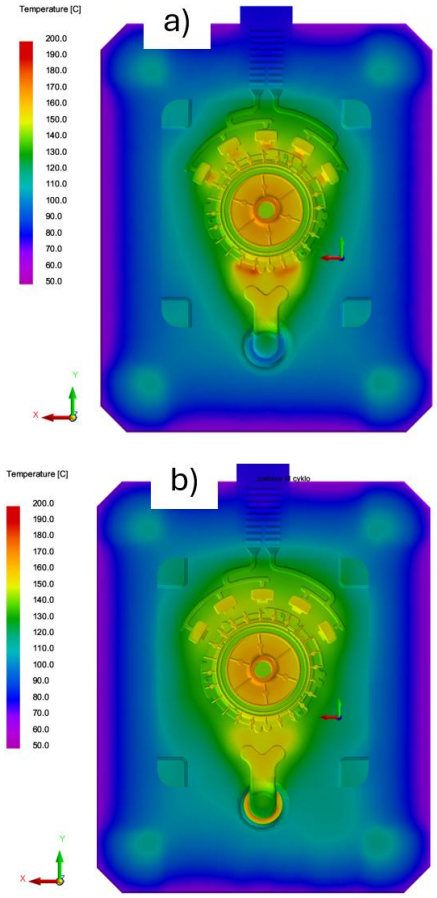
Obrázok 8 prezentuje simulované tepelné rozloženie v jadre odliatku *EC* 55 v deviatom cykle, konkrétne počas fázy zatvorenia formy, pre dva odlišné typy termoregulačného systému jadra.



Obr. 8. Rozloženie teplôt v jadre pri fáze zatvorenia formy v rámci deviateho cyklu pre odliatok *EC* 55: a) voda, b) olej

Fáza zatvorenia formy, počas ktorej je jadro zobrazené, je mimoriadne dôležitá pre celý proces vysokotlakového odlievania z hľadiska tepelného režimu. Teplota jadra v momente uzavretia formy a prípravy na ďalšie vstrekovanie taveniny predstavuje kritický počiatočný stav. Táto teplota priamo ovplyvňuje rýchlosť tuhnutia taveniny po jej kontakte s jadrom.

V prípade vodného chladenia (obr. 8a) je jadro výrazne chladnejšie, čo sa prejavuje prevládajúcimi modrými a zelenými odtieňmi, indikujúcimi teploty približne v rozmedzí 60 až 120°C. Je zreteľný výrazný teplotný gradient; najchladnejšie oblasti (modrá farba) sú lokalizované v blízkosti vnútorných chladiacich kanálov. Teplota postupne stúpa smerom k vonkajšiemu povrchu jadra, ktorý je v kontakte s dutinou formy, kde dosahuje zelené a žlté odtiene (okolo 100 až 140°C). Táto vysoká efektivita odvádzania tepla je spôsobená vysokou tepelnou vodivosťou vody ako chladiaceho média, čo vedie k celkovo nižším teplotám a rýchlejšiemu odvodu tepla z jadra.



Obr. 9. Nasieťované časti formy: a) pevná časť, b) pohyblivá časť

Jadro temperované olejom (obr. 8b) je naopak výrazne teplejšie, s prevládajúcimi žltými, oranžovými a červenými odtieňmi, čo naznačuje teploty v rozsahu približne 120 až 180°C. Aj keď existuje teplotný gradient, jadro je celkovo rovnomernejšie a vyššie temperované. Najhorúcejšie miesta (oranžová/červená farba) sú sústredené na vonkajšom povrchu jadra, ktorý je v priamom kontakte s taveninou, čo je v súlade s cieľom

temperovania. Vnútorné oblasti jadra sú o niečo chladnejšie, no stále podstatne teplejšie ako pri vodnom chladení. Olejové temperovanie má za cieľ udržiavať jadro na vyššej a stabilnejšej teplote, čo je dôležité pre zníženie tepelného šoku na jadro počas vstrekovania, zlepšenie toku taveniny a optimalizáciu tvorby mikroštruktúry, ako aj kvality povrchu odliatku.

Simulácie rozloženia teplôt v deviatom cykle počas kriticky dôležitej fázy zatvorenia pohyblivej časti formy pre odliatky *EC* 55 a *EC* 75 odhalili konzistentné trendy (obr. 9). Vonkajšie časti formy udržiavali teploty 20 až 110°C pre štrukturálnu integritu, zatiaľ čo oblasti dutiny a vtokovej sústavy dosahovali 140 až 390°C v priamom kontakte s taveninou. Analýza potvrdila, že geometria odliatkov (*EC* 55 a *EC* 75) nemala zásadný vplyv na tepelné správanie jadier a formy pri porovnateľných podmienkach.

ZÁVER

Numerická štúdia detailne analyzovala vplyv rôznych termoregulačných médií na tepelné zaťaženie jadier aj samotnej vysokotlakovej formy pri výrobe odliatkov *EC* 75 a *EC* 55. Experimentálne výsledky jasne preukázali, že výber média má zásadný dopad na tepelné správanie jadra aj celkovej formy. Vodné chladenie efektívnejšie odvádza teplo, čo vedie k celkovo nižším teplotám a rýchlejšiemu ochladzovaniu jadra. To sa prejavilo výraznejšími teplotnými gradientmi v rámci jadra a nižšími teplotami na čele jadra v porovnaní s olejovým temperovaním. Naopak, použitie teplonosného oleja *ITERM* 6*MB* viedlo k vyšším a stabilnejším prevádzkovým teplotám jadra. Tento ustálenejší priebeh je výhodný pre zníženie tepelného šoku na jadro počas vstrekovania a môže potenciálne predĺžiť životnosť formy. Analýza tepelného rozloženia vo fáze zatvorenia formy potvrdila, že teplota jadra v tomto momente je kritická pre ďalšie plnenie a tuhnutie taveniny, ovplyvňujúc rýchlosť tuhnutia, mikroštruktúru a kvalitu povrchu odliatku. Vo fáze otvorenia formy bolo pozorované, že systém dosiahol ustálený stav tepelnej bilancie už po relatívne nízkom počte cyklov, čo naznačuje stabilitu procesu. Napriek geometrickým rozdielom (výška tubovej časti) medzi odliatkami *EC* 75 a *EC* 55, neboli zaznamenané zásadné rozdiely v celkovom teplotnom správaní jadier pri porovnateľných podmienkach. Tieto zistenia potvrdzujú, že cielená termoregulácia jadra a formy je kľúčová pre optimalizáciu procesu vysokotlakového odlievania, znižovanie chybovosti a zlepšenie kvality finálnych odliatkov.

Poďakovanie

Článok vznikol v rámci projektu grantovej agentúry VEGA: VEGA 1/0160/22 a bol financovaný EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti pre Slovensko pod projektovým číslom 09I03-03-V05-00002. Autori ďakujú za túto podporu..

LITERATÚRA

[1] DAS, S. - BHAMANIA, S. - PARATE, S. (2025): *Evaluating Die Life in High-Pressure Die Casting: Correlating Temperature Dynamics and Durability through Altair Inspire Cast and SIMSOLID*. In: Journal of Materials and Engineering: 3(4), pp. 349.364.

[2] BONOLLO, F. - GRAMEGNA, N. - TIMELLI, G. (2015): *High-Pressure Die-Casting: Contradictions and Challenges.* In: The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 67, pp. 901–908.

[3] BERGMAN T, - LAVINE A, - INCROPERA F, et al. (2011):Fundamentals of heat and mass transfer. John Wiley & Sons.

[4] MAJERNÍK, J. - PODARIL. M. - MAJERNIKOVA, M. (2024): *Evaluation of High Pressure Die Casting Mold Temperature Relations Depending on the Location of the Tempering Channels.* In: Archives of Foundry Engineering, 24(1), pp. 115–120.

[5] DOU, K. - LORDAN, E. - ZHANG, Y., et al. (2021): *A novel approach to optimize mechanical properties for aluminium alloy in High pressure die casting (HPDC) process combining experiment and modelling*. In: Journal of Material Processing Technology, 296, 117193.

[6] BHASKAR, M. - GOBIRAMAN, A. - NALLUSAMY, T. - PERIYASAMY, S. (2022). *Die Life in Aluminium High-Pressure Die Casting Industries*. In: Journal of The Institution of Engineers: Series D. 103(1), pp.1-7.

[7] MAJERNÍK, J. - PODARIL. M. - MAJERNIKOVA, M. - SRAMHAUSE, K. (2025): *Temperature Conditions Change in the High Pressure Die Casting mold Volume Depending on the Gating System Volume*. In: Archives of Foundry Engineering, 25(1), pp. 52-58.

[8] CASAROTTO, F. - FRANKE, A. J. - FRANKE, R. (2012): *High-pressure die-cast (HPDC) aluminium alloys for automotive applications*. In: Advanced Materials in Automotive Engineering, pp. 109-149.

[9] LIU, W. - ZHANG, W. - WANG, P. et al. (2024): *Effect of slow shot speed on externally solidified crystal, porosity and tensile property in a newly developed high-pressure die-cast Al-Si alloy.* In: China Foundry, 21, pp. 11-19.