

Úprava chlazení komponenty formy pro tlakové lití hliníku s využitím numerických simulací

Design of Aluminium HPDC Mold Component Cooling Using Numerical Simulations

Ing. Bc. Jana Svíželová, Ph.D.¹; doc. Ing. Ladislav Socha, MBA, Ph.D.¹; Ing. Miloslav Roh²; Martin Dvořák²

¹ Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích, Okružní 517/10, 370 01 České Budějovice, Česká republika

² MOTOR JIKOV FOSTRON a.s., Kněžskodvorská 2277/26, 370 04 České Budějovice, Česká republika

Příspěvek se zaměřuje na návrh designu konformního chlazení vložky šoupátka formy pro tlakové odlévání hliníku s využitím numerických simulací. Vložka šoupátka je v přímém kontaktu s kovem při plnění formy a tuhnutí odlitku a určuje vnitřní tvar odlitku. Motivací pro návrh nového chlazení byla optimalizace provozních teplot vložky. Cílem bylo dosáhnout rovnoměrnějšího rozložení teplot a zmírnění namáhání v důsledku tepelného pnutí, při současném zachování kvality produkce. Vzhledem k širším možnostem týkajících se variability tvaru vnitřního chlazení byl pro výrobu zvolen 3D tisk. Úpravy tvaru také zahrnovaly provedení odlehčení komponenty kvůli úspoře materiálu. Postupně se vytvořily 3 geometrické návrhy vložky. Pro každou variantu byly provedeny numerické simulace teplotního pole formy v softwaru ProCAST. Na základě výsledků byly vybrány finální návrh D, u kterého se provedla kompletní numerická simulace včetně plnění a tuhnutí odlitků. Oproti původní variantě A došlo změnou chlazení ke zlepšení napětových poměrů v objemu vložky šoupátka varianty D, u které byla současně predikována vyšší únavová životnost. Simulace také ukázala, že změny v teplotním poli návrhu D nebudou mít negativní vliv na kvalitu odlitků. V další fázi výzkumu bude komponenta vyrobena a otestována v provozních podmínkách.

Klíčová slova: HPDC; konformní chlazení; teplotní pole; numerická simulace; design formy

The paper delves into High-Pressure Die Casting (HPDC) of aluminium alloys. An important part of the HPDC process is the mold. The mold, in contact with the liquid metal, plays a key role in cooling the casting. This exposes it to cyclic temperature stress, which can impact the material's mechanical properties over time. Therefore, ensuring adequate cooling of the mold and its components is essential. The paper outlines the design and validation of conformal cooling for an insert within a mold used for the HPDC process of aluminium alloys. The primary motivation for designing new cooling was to optimize the operating temperatures of the insert, aiming for a more uniform temperature distribution and reduced thermal stress while maintaining production quality. Given the flexibility in shaping internal cooling, 3D printing was chosen for production, with modifications made to lighten the component and conserve material. Three geometric designs of the insert were gradually developed, and numerical simulations of the mold's temperature field were conducted for each variant using ProCAST software. Based on the results, the final design (Design D) was chosen, and a comprehensive numerical simulation, encompassing the filling and solidification of the castings, was performed. Compared to the original variant (Design A), the cooling modifications in Design D resulted in improved stress ratios in the insert's volume and a predicted higher fatigue life. The simulation also indicated that the temperature field changes in Design D would not compromise the quality of the castings. The next phase of the research involves the manufacture and operational testing of the component.

Key words: HPDC; conformal cooling; temperature field; numerical simulation; mold design

Vysokotlaké lití je běžně využívanou technologií při velkosériové výrobě hliníkových odlitků. Při tomto procesu je tavenina hliníkové slitiny pod velkým tlakem vstříkována do formy z nástrojové oceli, ve které probíhá tuhnutí odlitku. Odlévací cyklus se skládá z několika fází: plnění formy, tuhnutí odlitku, vyjmutí odlitku, chlazení formy. Tento proces je velmi rychlý. V závislosti na velikosti odlitku se doba cyklu může pohybovat od desítek sekund po jednotky minut. Délku cyklu do velké míry určuje chlazení formy, které může činit až 80 % času cyklu [1]. Forma pro tlakové odlévání hliníkových slitin

je sofistikovaný celek, obsahující systém chladicích a temperačních kanálů, které zajišťují optimální teplotu formy s ohledem na kvalitu odlitku. Chladicí kanály jsou konstruovány tak, aby řídily tuhnutí odlitku a současně udržovaly teplotu formy v přijatelném rozmezí. V tomto ohledu se stále naráží na omezení plynoucí z konvenčních výrobních technologií. Například kanály vytvořené vrtáním jsou jednoduše vyrobitelné, ovšem jejich tvar přesně nekopíruje tvar odlitku, protože je možné vyrobit pouze přímé díry. Ty jsou navíc omezeny polohou dutiny ve formě a přítomností dalších konstrukčních částí formy.

Proto většinou neposkytují optimální chladicí účinek. Tím je ovlivněn také čas cyklu, který se řídí nejteplejším místem dutiny formy.

Dobrá chladicí účinek je velmi důležitý také z pohledu životnosti formy. Materiál formy je namáhán tepelnou únavou což posléze vede k únavovému praskání [2]. Tento mechanismus má původ v dlouhodobém působení teploty, napětí a deformace. Během cyklu je povrch formy v kontaktu s roztaveným kovem o vysoké teplotě. Díky tomu teplota v povrchových vrstvách dutiny formy stoupá, zatímco jádro zůstává studené. V povrchových vrstvách dutiny formy díky tomu působí tlakové napětí, které způsobuje pnutí materiálu. Může se objevit plastická deformace v důsledku poklesu pevnosti materiálu při vyšších teplotách. Současně klesá tvrdost povrchových vrstev dutiny formy ve srovnání se zbytkem objemu [3]. Při akumulaci plastické deformace v určitém místě se mohou začít tvořit trhliny [2]. U tenkých částí formy, které se lépe prohřívají, je situace závažnější. Nástrojové oceli pro práci za tepla vykazují po tepelném zpracování a povlakování dobrou stabilitu mechanických vlastností za provozních teplot a odolnost proti otěru [4, 5], ovšem v zájmu zvýšení životnosti formy je třeba v rámci možností minimalizovat tepelné namáhání [2, 6].

Možností, jak lze dosáhnout rychlého a rovnoměrného chlazení, je vytvoření konformních chladicích kanálů [7, 8]. Konformní chlazení získalo na popularitě s rozmachem aditivní výroby kovových materiálů [6, 9-13]. Širší možnosti designu spojené s aditivní výrobou umožňují sofistikovanější návrhy chlazení vložek forem. Při vytváření konformního chlazení je třeba brát v úvahu tvar kanálů a velikost jejich povrchu, vzdálenost od povrchu dutiny formy a vzdálenost mezi jednotlivými kanály [1]. Pro optimalizaci konstrukce konformního chlazení se nabízí využití numerických simulací [8, 10, 13-16], které umožňují přesunout primární fázi testování do virtuálního prostoru, čímž se šetří čas a finance spojené s testovací výrobou.

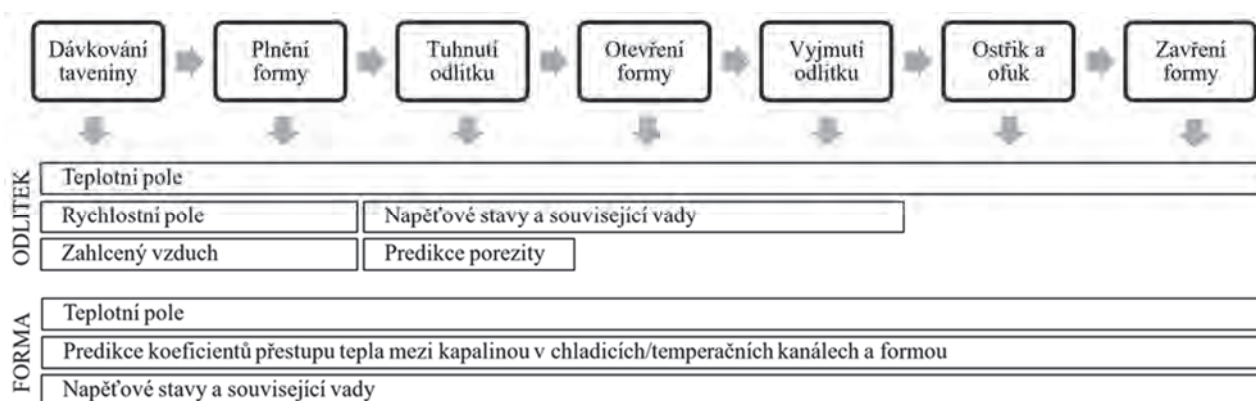
Umístění konformních chladicích kanálů vzhledem k povrchu dutiny formy lze volit také s ohledem na tvar a průběh tuhnutí odlitku a docílit tak lepšího chladicího účinku. Aplikace konformního chlazení může mít navíc vliv na vlastnosti odlitku. Bylo dokázáno, že při aplikaci

konformního chlazení může dojít ke zlepšení mechanických vlastností slitiny [17]. Důvodem tohoto zlepšení je snížení obsahu pomezity v odlitcích a změny v mikrostruktuře [12, 14]. K těmto změnám dochází v důsledku rychlejšího chlazení materiálu, kdy jsou rozptýleny velké oblasti pomezity zchlazením nejteplejších míst a současně dochází ke zjemnění dendritických zrn při tuhnutí slitiny [17]. Uvedené aspekty ve výsledku vedou ke zvýšení životnosti formy, zvýšení produktivity a snížení zmetkovitosti výroby [3, 7, 8].

Součástí modernizace výroby ve společnosti MOTOR JIKOV Fostron a.s. je zavedení 3D tisku kovů do výroby forem. Tento krok otevírá širší možnosti konstrukčního řešení forem, včetně implementace konformního chlazení. Tento příspěvek popisuje návrh konstrukce konformního chlazení vložky šoupátka, která je součástí formy pro tlakové odlévání hliníkových slitin. Cílem aplikace konformního chlazení bylo dosažení rovnoměrnějšího rozložení teplot a zmírnění namáhání v důsledku tepelného pnutí, při současném zachování kvality produkce. Součástí konstrukčních změn komponenty bylo také odlehčení jejího objemu, které současně povede ke snížení spotřeby materiálu na výrobu. Bylo navrženo několik designů, u kterých bylo sledováno teplotní a napěťové pole. K tomuto účelu byly využity numerické simulace v softwaru ProCAST.

1. Numerické simulace

Pro ověření funkce jednotlivých designů konformního chlazení byly provedeny numerické simulace prostřednictvím softwaru ProCAST. ProCAST komplexně řeší většinu slévárenských slitin a procesů odlévání, včetně tlakového lití hliníkových slitin. Samozřejmostí je simulace základních procesů při odlévání – plnění, tuhnutí a predikce pomezity v odlitcích. Díky pokročilé fyzice a metodě konečných prvků také předpovídá složité děje v průběhu odlévání, sleduje zbytková napětí a na jejich základě předpovídá deformace vedoucí k rozměrovým odchylkám a nižší životnosti formy [18]. Pro lepší představu je schéma jednotlivých fází výpočtu pro formu a odlitek v průběhu cyklu zobrazeno na obr. 1.



Obr. 1 Schéma výpočtů pro formu a odlitek v průběhu cyklu

Fig. 1 Diagram of the calculation for the mould and casting during the cycle

Teplotní výpočty v průběhu plnění a tuhnutí odlitků a predikce porezity byly řízeny modulem Thermal, který umožňuje provádět výpočet tepelného toku řešením Fourierovy rovnice vedení tepla (1), včetně uvolňování latentního tepla během tuhnutí. Užitečnou funkcí je také predikce koeficientů přestupu tepla mezi kapalinou v chladicích/temperačních kanálech a materiálem formy. Výpočet se provádí lokálně, tak aby byl správně zohledněn průtok, tvar kanálů a jejich průměr [19]. Tato funkce zajišťuje reálnější výsledky teplotního pole formy, než při použití konstantních koeficientů přestupu tepla a je velmi užitečná právě při návrhu konformního chlazení formy nebo jejích částí.

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{q}{c_p \cdot \rho} \quad (1)$$

kde: t – teplota [K], τ – čas [s], a – součinitel teplotní vodivosti [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$], x, y, z – souřadnice (m), q – hustota tepelného toku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$], c_p – tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$], ρ – hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

Fluid Flow modul zajišťuje výpočet plnění formy na základě Navier-Stokesových rovnic (2–4). V ProCAST je implementován dvofázový VOF model, určený k řešení dvou a více fází, které jsou vyšetřovány jako vzájemně se neprostupující kontinua [20–22]. Mezi funkce Flow modulu spadá také výpočet turbulence. Flow modul bývá navíc kombinován s Gas modelem kvůli predikci zahlceného vzduchu v kovu.

$$a_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) = \left(\frac{dv_x}{dt} \right) \quad (2)$$

$$a_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) = \left(\frac{dv_y}{dt} \right) \quad (3)$$

$$a_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) = \left(\frac{dv_z}{dt} \right) \quad (4)$$

kde: p – tlak (Pa), ν – kinematická viskozita ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

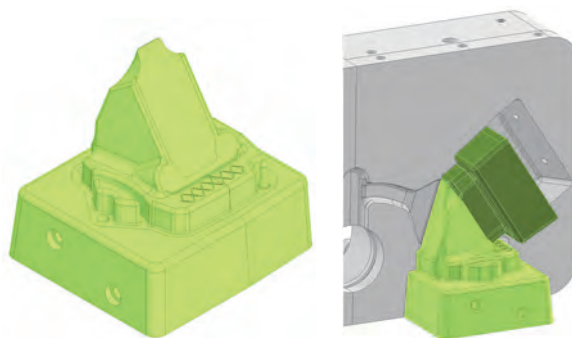
Pro výpočet napětí lze ve Stress modulu, na základě požadovaných výsledků a dostupných materiálových dat, volit mezi třemi modely – Linear-Elastic model, Elasto-Plastic model, Elasto-ViscoPlastic model. Pro účely této práce byl zvolen Elasto-Plastic model, který kromě Youngova modulu a Poissonova čísla, bere v úvahu také mez kluzu materiálu [19].

2. Vstupní data numerických simulací

Předmětem výzkumu byla vložka šoupátka formy pro tlakové odlévání hliníkových slitin. Geometrii tohoto dílu a jeho uložení ve formě zobrazuje obr. 2. Vložka šoupátka plní ve formě funkci jádra a její tvar tedy kopíruje vnitřní tvar odlitku. Současně plní funkci chlazení tekutého kovu a díky tomu má vliv na průběh tuhnutí a vnitřní kvalitu odlitků.

Díky technologii 3D tisku bylo možné do vložky šoupátka implementovat konformní chlazení. Motivací bylo dosažení rovnoměrnějšího rozložení teplot v objemu součásti a tím i snížení vnitřního prnutí a prodloužení

životnosti. Pro dosažení rovnoměrnějších teplot v objemu tvarové části vložky se přistoupilo k optimalizaci tvaru chladicích kanálů. Navrhované varianty konformního chlazení byly zacíleny na nejteplejší oblast vložky šoupátka, kterou je jeho pracovní část. Původní chlazení u varianty A bylo provedeno prostřednictvím jednoho velkého kanálu situovaného ve středu pracovní části vložky (viz obr. 3, varianta A). Celkově byly navrženy 3 optimalizované varianty chladicího okruhu, které zobrazuje obr. 3. U varianty B byla provedena poměrně hustá síť kanálů, která kopírovala tvar funkční části vložky. Varianta C testovala chlazení pomocí jedné spirály vedoucí objemem vložky až k její špičce. Jednoduchá spirála byla aplikována také u varianty D, přičemž byla odebrána jedna úroveň kanálů v horní části.



Obr. 2 Geometrie vložky šoupátka a uložení ve formě
Fig. 2 Insert geometry (left) and mould fit (right)

Vzhledem k tomu, že vložka je tvořena poměrně masivním objemem kovu, bylo rozhodnuto o současném provedení odlehčení pomocí topologické optimalizace. Topologická optimalizace tvaru vybraní vložky byla provedena pro každou variantu zvlášť. Při úpravě geometrie chlazení docházelo v objemu vložky ke změně napěťových poměrů, které jsou při topologické optimalizaci stěžejní. Na obr. 3 je vidět, že se vybraní ve spodní masivní části vložky u jednotlivých variant mírně liší. Příčinou byla právě rozdílná geometrie chlazení. Hmotnostní parametry navržených variant uvádí tab. 1. U variant B a C došlo po provedení odlehčení k redukci hmotnosti až o 3,2 kg v porovnání s variantou A. Dále byla navržena varianta D, u které byl ze základny jádra vybrán větší objem materiálu. Hmotnost jádra se touto úpravou zredukovala o 7,2 kg, což představuje 28 % původní hmotnosti vložky.

Tab. 1 Hmotnostní parametry navržených designů vložek
Tab. 1 Weight parameters of insert variants

Varianta	Hmotnost	Úbytek hmotnosti ve srovnání	
	[kg]	[kg]	[%]
A	25,6	-	-
B	22,4	3,2	12,5
C	22,6	3,0	11,7
D	18,4	7,2	28,1

Se změnou provedení chladicích kanálů bylo nutné upravit také časování chlazení okruhu šoupátka. U původní varianty A byla vložka šoupátka chlazená po celou dobu

cyklu, tedy v intervalu 0 až 69 s. S tímto nastavením se pracovalo také u varianty B. Docházelo však k výraznějším poklesům teplot vložky, proto bylo u variant C a D zavedeno časování chlazení. Parametry chlazení pro všechny provedené varianty okruhů uvádí tab. 2. Časové intervaly cyklování uvádí tab. 3.

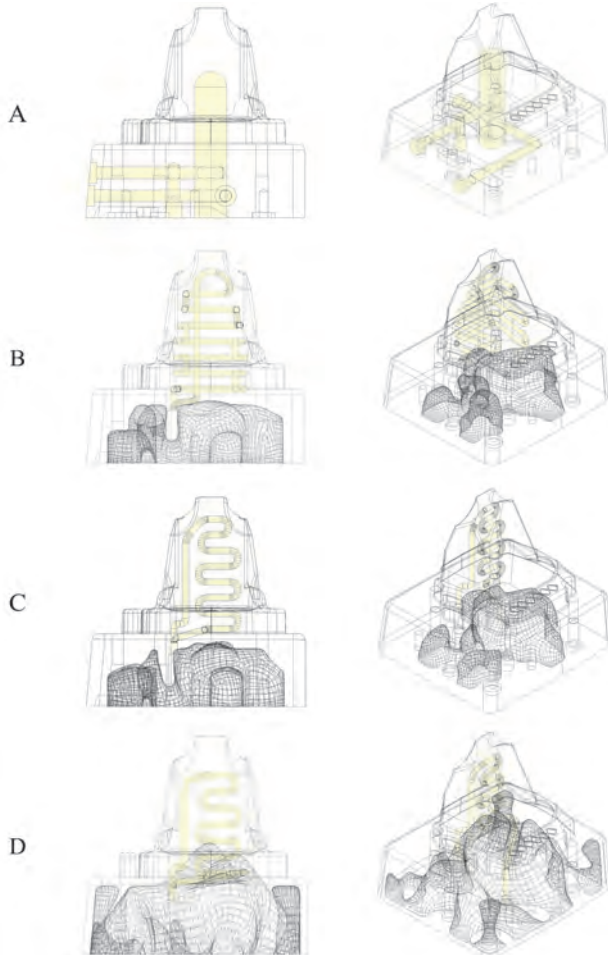


Fig. 3 Geometry of simulated gate valve insert variants
Obr. 3 Geometrie simulovaných variant vložky šoupátka

Tab. 2 Parametry chladicích okruhů
Tab. 2 Cooling channels parameters

Varianta	Médium	Průtok	Teplota	Časování
		[l·min ⁻¹]	[°C]	[s]
A	Voda	3	25	0 až 69
B	Voda	3	25	0 až 69
C	Voda	5	20	13 až 21
D	Voda	5	20	13 až 21

Tab. 3 Parametry cyklování
Tab. 3 Cycling parameters

Fáze cyklu	Start	Konec	Jednotka
Doba cyklu	0	69	s
Plnění formy	10	13	s
Tuhnutí odlitku	13	21	s
Ostřík	35	49	s
Ofuk	49	64	s

Numerické simulace byly rozděleny do dvou etap. V první fázi byl proveden výpočet cyklování pro zmapování teplotního pole a napětových stavů simulovaných variant. Parametry cyklování, uvedené v tab. 3, byly stejné pro všechny varianty. Na základě získaných výsledků byl vybrán design s nevhodnějším návrhem konformního chlazení z hlediska chlazení vložky šoupátka a současného zachování kvality odlitku. Pro tuto variantu byla, kvůli zmapování vlivu chlazení na kvalitu odlitku, provedena kompletní numerická simulace, která zahrnovala také plnění a tuhnutí odlitku včetně napětových stavů.

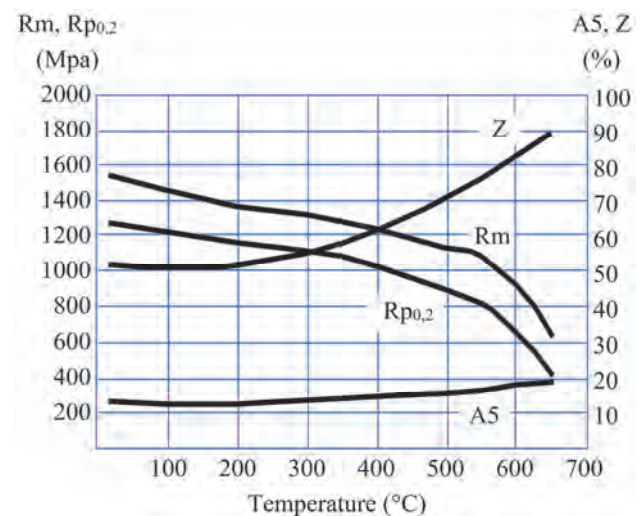
Vložka šoupátka byla dosud vyráběna konvenčními výrobními technologiemi z oceli Dievar, jejíž rámcové chemické složení uvádí tab. 4. Jedná se o nástrojovou ocel, určenou pro vysoce náročné podmínky vysokotlakého lití. Vyznačuje se vynikající houževnatostí a tažností ve všech směrech, dobrou odolností proti popouštění, pevností za vysokých teplot, rozměrovou stálostí během tepelného zpracování a povlakování a vynikající prokalitelností [24]. Tažné vlastnosti oceli Dievar uvádí obr. 4. S použitím této oceli je počítáno také při výrobě dílu 3D tiskem. Proto byla v rámci numerických simulací definována jako materiál formy u všech variant. Odlitky vyráběné technologií tlakového lití se ve společnosti MOTOR JIKOV odlévají z materiálu AISi9Cu3(Fe), jehož chemické složení uvádí tab. 5. S tímto materiálem bylo počítáno také při numerických simulacích plnění a tuhnutí odlitků.

Tab. 4 Chemické složení nástrojové oceli Dievar [hm. %] [24]
Tab. 4 Chemical composition of Dievar tool steel [wt. %] [24]

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,35	0,20	0,50	5,00	2,30	6,60

Tab. 5 Chemické složení slitiny AISi9Cu3(Fe) [hm. %] [25]
Tab. 5 Chemical composition of AISi9Cu3(Fe) alloy [wt. %] [25]

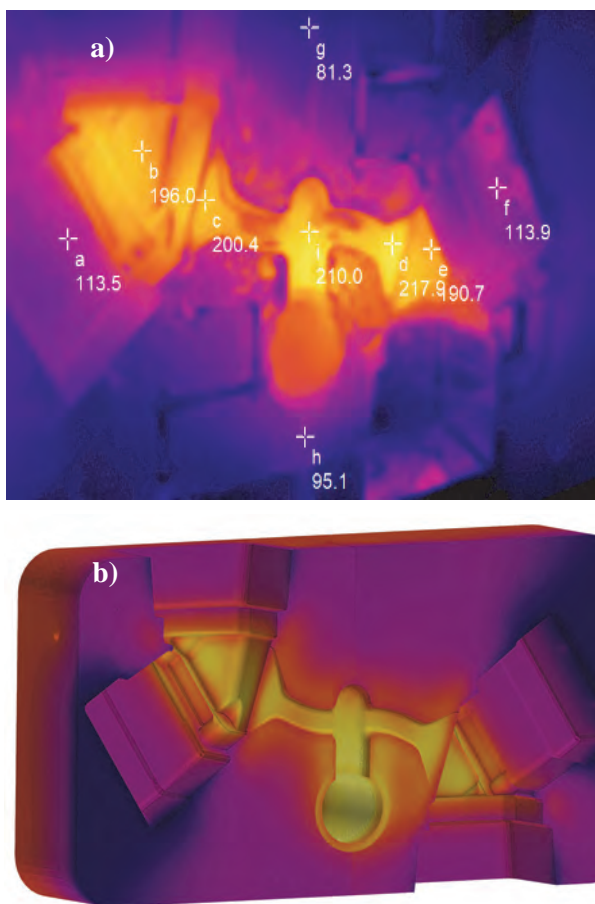
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
Min	8,0	-	2,0	-	0,05	-	-	-	-	-	-
Max	11,0	1,3	4,0	0,55	0,55	0,15	0,55	1,2	0,35	0,15	0,25



Obr. 4 Tažné vlastnosti oceli Dievar za vyšších teplot [24]
Fig. 4 Tensile properties of Dievar at elevated temperature [24]

3. Ověření numerických simulací

Za účelem ověření nastavení numerických simulací byly v provozních podmínkách termokamerou pořízeny snímky teplotního pole formy. Vzhledem k omezenému přístupu k formě během licího procesu, byla forma nasnímána zhruba v 49. s cyklu, tedy po ukončení ostříku (viz tab. 3). Porovnání snímků z termokamery s teplotním polem původní varianty A vypočteným numerickou simulací uvádí obr. 5. Na snímcích z termokamery byla stanovena teplota formy ve vybraných bodech, zobrazených na obr. 5a. V analogických bodech se zjistila teplota vypočtená numerickým modelem. Porovnání těchto hodnot uvádí tab. 6. V oblasti dutiny formy se odchylka od provozních teplot pohybovala zhruba v rozmezí 2 až 7 %. Více se odchylovaly teploty v bodech g a h, umístěných mimo dutinu formy. Vzhledem k jejich umístění však byly body g a h při vyhodnocení shody méně podstatné. Lze konstatovat, že bylo dosaženo dobré shody výsledků numerických simulací s reálným teplotním polem.



Obr. 5 Teplotní pole formy varianty A: a) snímek z termokamery, b) teplotní pole vypočtené numerickou simulací

Fig. 5 Mold temperature field: a) image from a thermal camera, b) temperature field calculated by numerical simulation

Porovnáním teplotního pole bylo ověřeno, že zvolené nastavení výpočtu varianty A poskytuje dobré výsledky. Stejně nastavení bylo proto zachováno i u zbylých simulovaných variant. Měnila se tedy pouze geometrie

vložky šoupátka a parametry chladicích okruhů, uvedené v tab. 2.

Tab. 6 Porovnání teplot z termokamery a numerické simulace

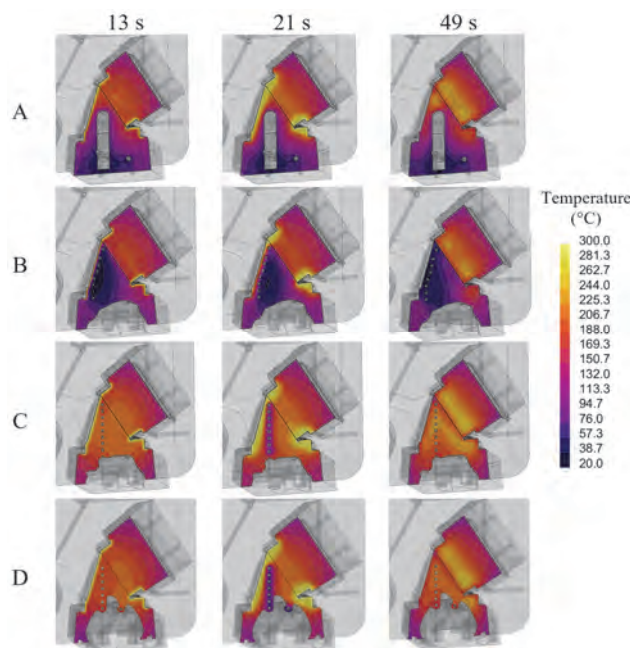
Tab. 6 Comparison of temperatures from a thermal camera and numerical simulation

	Teplota provoz	Teplota ProCAST	Absolutní hodnota odchylky
	[°C]		[%]
a	113,5	118,7	4,4
b	196,0	200,8	2,4
c	200,4	201,6	0,6
d	217,9	203,3	7,2
e	190,7	179,2	6,4
f	113,9	111,5	2,2
g	81,3	102,1	20,4
h	95,1	111,4	14,6
i	210,0	214,0	1,9

4. Diskuse výsledků simulací

4.1. Teplotní pole

Na obr. 6 je zobrazeno teplotní pole srovnávaných variant na řezu vložkou šoupátka ve vybraných fázích cyklu, obr. 7 zobrazuje teplotní profily ve 3 definovaných bodech vložky pro všechny simulované varianty.

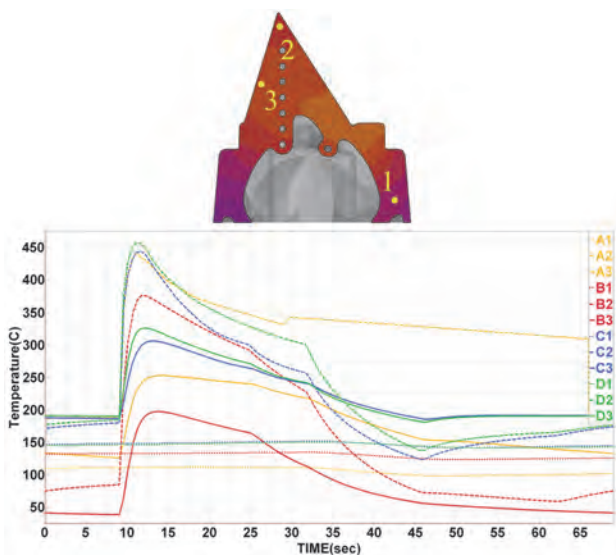


Obr. 6 Teplotní pole simulovaných variant na řezu vložkou

Fig. 6 Temperature fields of the variants on the insert section

Varianta A představuje aktuální provedení chlazení, používané v provozních podmínkách. Při srovnání s dalšími variantami na obr. 6 a obr. 7 lze konstatovat, že chlazení varianty A nejlépe odvádělo teplo ze spodní části vložky. Při pohledu na variantu B bylo ve srovnání s variantou A zřejmé podstatné zvýšení intenzity chlazení

pracovní části vložky. Z obr. 7 je zřejmé, že u varianty B bylo v bodech 1 a 3 na pracovní části vložky dosaženo nejnižších teplot. Ve srovnání s variantou A pokles teplot činil zhruba 50-70 °C, a to zejména mezi 10. až 15. s cyklu, kdy probíhá plnění formy a tuhnutí odlitku. Za těchto podmínek existovalo riziko přechlazení kovu, což by ve výsledku mohlo vést k tvorbě povrchových vad (závaly). Problematické by mohlo být také umístění chladicích kanálů, které od povrchu vložky dělila tenká vrstva materiálu a mohlo by zde působit pnutí, které by časem vedlo ke vzniku trhlin. U varianty C se zredukovanou délkou chladicích kanálů a zkráceným časováním chlazení došlo ke zvýšení teplot v celém objemu vložky s výjimkou oblasti bodu 1 na špičce vložky. Chladicí účinek na špičce vložky u varianty C se projevil poklesem teplot v pozdějších fázích cyklu (cca od 25. s), kdy u varianty A teploty setrvaly na hodnotách 300-350 °C. Konformní chlazení varianty C tyto teploty zredukovalo až o 200 °C. V této fázi cyklu už chlazení formy nemělo vliv na kvalitu odlitku. Na druhou stranu, horní patro kanálů u varianty C opět dělila od povrchu vložky tenká vrstva materiálu. Za těchto podmínek by opět mohlo docházet k obdobným problémům, jako u varianty B, proto bylo rozhodnuto o provedení dalších úprav. Tento problém se vyřešil odebráním jedné úrovně chladicího kanálu ze špičky vložky varianty D, přičemž teploty v oblasti bodu 1 při plnění formy setrvaly na podobné úrovni, jako v případě varianty C. V dalších fázích cyklu (cca od 17. s) konformní chlazení varianty D vykazovalo na špičce vložky dobrý chladicí účinek i při zkráceném časování chlazení (viz tab. 2.). Ve srovnání s variantou A došlo k redukcí teplot až o 190 °C. Je možné si všimnout, že u variant s konformním chlazením byly teploty ve spodní nepracovní části vložky vyšší, než u varianty A. To bylo způsobeno úběrem materiálu při odlehčení. Zmenšený objem spodní části vložky se lépe prohříval. Navíc došlo ke zmenšení spodní styčné plochy vložky doléhající na další komponenty šoupátka, do kterých se odváděla část tepla vedením.

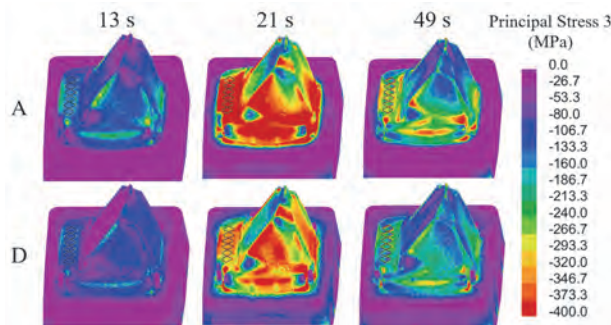


Obr. 7 Teplotní profily ve vybraných bodech vložky
Fig. 7 Temperature profiles at selected points in the insert

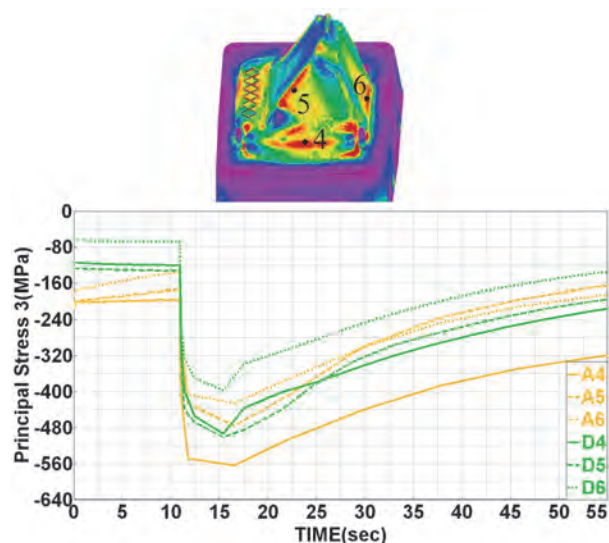
Na základě uvedených výsledků byla pro další zkoumání vybrána varianta D, která měla dobrý chladicí účinek na pracovní části vložky i při redukcí intervalu chlazení a redukcí rizik plynoucích z konstrukčního řešení. Současně bylo u této varianty provedeno odlehčení, které znamená 28% úsporu materiálu na každé vyrobené vložce. Další analýza tak bude zaměřena na porovnání původního designu vložky varianty A a varianty D s konformním chlazením.

4.2. Napět'ové stavy

Obr. 8 srovnává výsledek Principal Stress 3 variant A a D. Tento výsledek identifikuje oblasti, ve kterých působí tlakové napětí a platí, že čím je hodnota zápornější, tím vyšší je tlakové napětí. Obr. 9 zobrazuje profily tlakového napětí Principal Stress 3, ve vybraných bodech oblastí nejvíce namáhaných tlakovým napětím. Jak je vidět, působení tlakového napětí se týkalo především pracovní části vložky. Pracovní část vložky byla v průběhu cyklu ve styku s tekutým kovem, který působí zvyšování teplot v povrchových vrstvách materiálu (viz obr. 6). Důsledkem byl vznik tlakového pnutí, které bylo nejvyšší mezi 11. a 21. s cyklu, kdy probíhalo plnění a tuhnutí odlitků (viz tab. 3). Po vyjmutí odlitku vlivem ochlazování vložky tlakové pnutí postupně vyrelaxovalo.



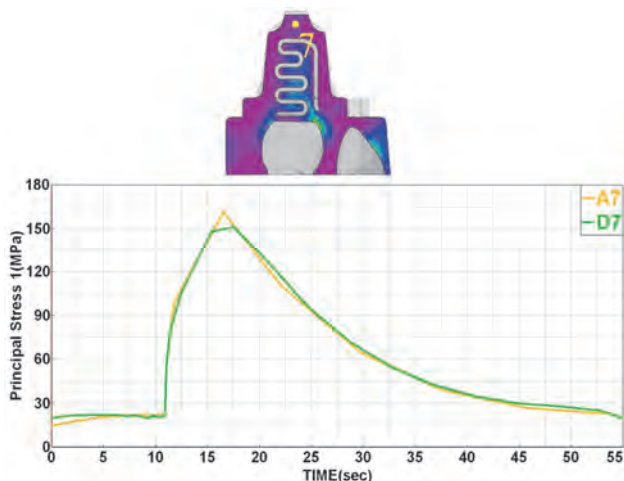
Obr. 8 Principal Stress 3 na vložce varianty A a D
Fig. 8 Principal Stress 3 in insert variants A and D



Obr. 9 Profily Principal Stress 3 ve vybraných bodech vložky
Fig. 9 Profiles of Principal Stress 3 at selected insert points

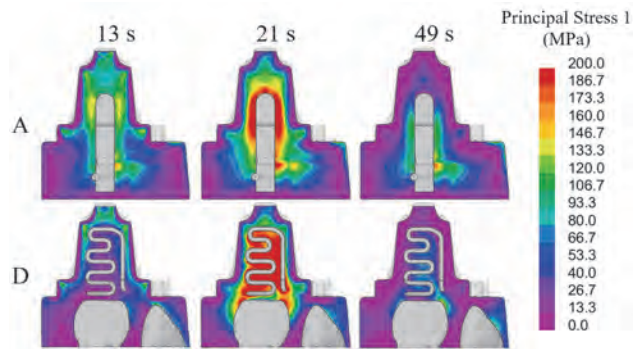
Z obr. 9 je zřejmé, že tlakové napětí u varianty D s konformním chlazením dosahovalo vyšších hodnot v bodě 4 a 6. To znamená, že vložka varianty D byla v těchto oblastech méně zatížena tlakovým napětím. K nejvýraznějšímu zvýšení hodnot tlakového pnutí došlo v oblasti bodu 4, kdy po startu plnění formy rozdíl činily až přes 100 MPa. V bodu 5 bylo naopak u varianty D tlakové napětí nižší o nižší desítky MPa.

Obr. 10 zobrazuje Principal Stress 1 na řezu vložkou varianty A a D v různých fázích cyklu. Tento výsledek znázorňuje oblasti nejvíce namáhané tahovým pnutím. Tahové pnutí působilo převážně v objemu vložky. Vznik tahových napětí opět souvisel s teplotním režimem formy. Nejvyšší tahové napětí bylo pozorováno mezi 13. a 21. s cyklu, kdy probíhalo plnění a tuhnutí odlitku. V tomto údobí ve vložkách existovaly největší teplotní rozdíly mezi vnějšími vrstvami materiálu a chlazeným objemem vložky. Oblasti materiálu kolem chladicích kanálů měly vlivem nižší teploty tendence se smršťovat, což působilo vznik tahových pnutí. U varianty A působila, ve srovnání s variantou D, vyšší tahová pnutí po celou dobu cyklu. Tento jev byl způsoben časováním chlazení. Varianta A byla chlazená konstantním průtokem vody po celou dobu cyklu (viz tab. 2), tedy i ve fázích, kdy vložka nebyla ve styku s horkým kovem. Po vyjmutí odlitku nedošlo k úplnému ochlazení vložky na teplotu okolí, a proto je i zde vidět vliv chladicího kanálu v jehož okolí teploty vložky dosahovaly nižších hodnot. To se projevilo vznikem tahových pnutí v okolí chladicího kanálu. V tomto ohledu byl napěťový stav varianty D příznivější. Je třeba konstatovat, že ve zkoumaných vložkách nebylo zjištěno napětí, které by překračovalo mez kluzu materiálu. Současně nebylo ve zkoumaných vložkách predikováno riziko vyčerpání plastické deformace.



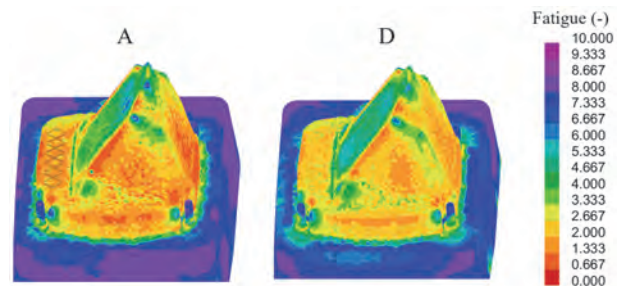
Obr. 10 Profily Principal Stress 1 na špičce vložky
Fig. 10 Profile of Principal Stress 1 in the tip of the insert

Obr. 11 uvádí profil tahového napětí ve špičce vložky varianty A a D. Průběh tahového napětí ve špičce vložky se vlivem konformního chlazení téměř nezměnil. V této oblasti byla zjištěna pnutí dosahující maximálně 160 MPa u varianty A a 150 MPa v případě varianty D. Tyto hodnoty jsou za daných teplot hluboko pod mezí kluzu materiálu.



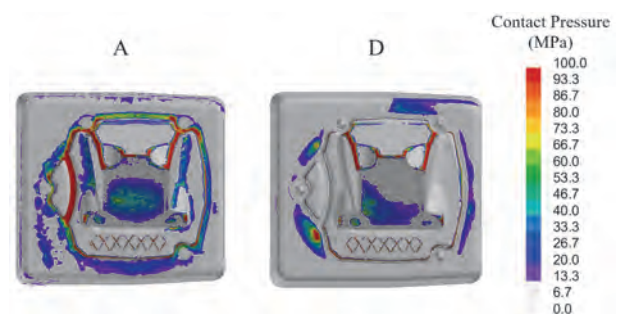
Obr. 11 Principal Stress 1 na řezu vložkami variant A a D
Fig. 11 Principal Stress 1 on insert sections of variants A and D

Obr. 12 porovnává výsledek Fatigue, který poskytuje kvalitativní odhad únavové životnosti jader varianty A a D. Jak dokazují předchozí výsledky, největšímu namáhání byla v průběhu cyklu vystavena pracovní část vložky, která je ve styku s kovem. V této oblasti také existuje největší riziko překročení únavové pevnosti u obou srovnávaných variant. Na základě výsledků na obr. 12 má potenciál vyšší životnosti vložka varianty D s konformním chlazením.



Obr. 12 Porovnání únavové životnosti vložek variant A a D
Fig. 12 Comparison of fatigue life of inserts of variants A and D

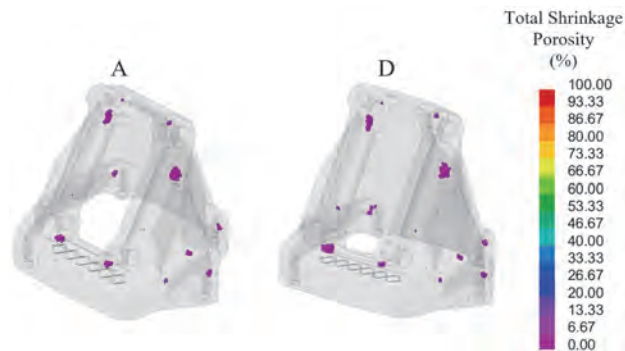
Obr. 13 zobrazuje výsledky Contact Pressure, tedy kontaktní tlak, který vzniká mezi vložkou, odlitkem a přiléhajícími částmi formy vlivem deformace jednotlivých komponent. Působení Contact Pressure mezi komponentami formy může působit jejich opotřebení vlivem tření při otvírání formy. V případě odlitku může docházet k poškození povrchu při vyjímání z formy. Jak je vidět na obr. 13, v případě hodnocené vložky šoupátka působil kontaktní tlak hlavně mezi vložkou a odlitkem, přičemž u varianty A byla oblast působení rozsáhlejší. U varianty D se oblast působení kontaktního tlaku mezi vložkou a dalšími komponentami podstatně zmenšila.



Obr. 13 Porovnání Contact Pressure u variant A a D
Fig. 13 Comparison of Contact Pressure of variants A and D

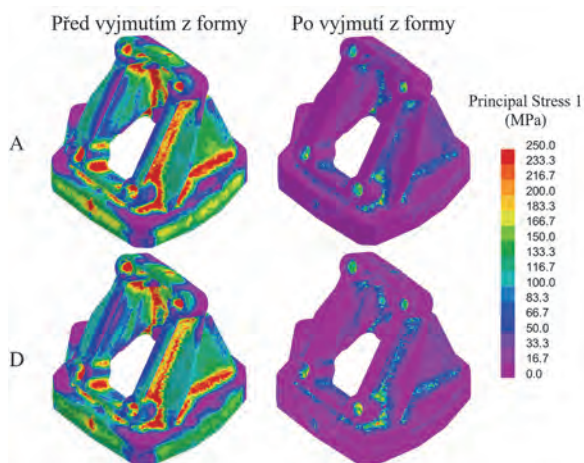
3. Kvalita odlitku

Pro zmapování účinku konformního chlazení vložky na kvalitu odlitků byly provedeny numerické simulace plnění formy a tuhnutí odlitku. Na plnění formy neměla změna chlazení vliv, proto zde výsledky nebudou prezentovány.



Obr. 14 Predikce porezity v odlitcích variant A a D (Cut Off > 5 %)
Fig. 14 Porosity prediction in variant A and D castings (Cut Off > 5 %)

Obr. 14 uvádí výsledky predikce porezity v odlitcích varianty A a D. Na výskyt porezity měla úprava chlazení minimální vliv. Poloha oblastí s pravděpodobným výskytem porezity se neměnila. Došlo ke změně velikosti některých oblastí porezity, ovšem v takové míře, která je v kontextu reálných provozních podmínek zanedbatelná. Lze říci, že z hlediska porezity zůstala po změně chlazení jakost odlitku zachována.

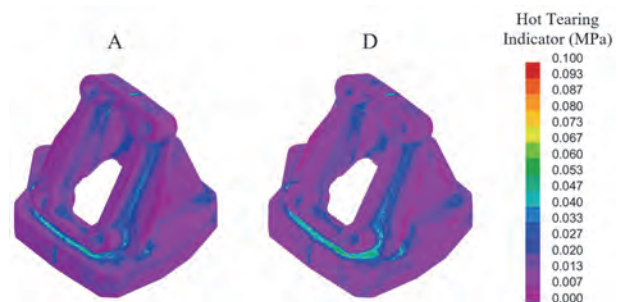


Obr. 15 Principal Stress 1 v odlitku varianty A a D
Fig. 15 Principal Stress 1 in casting variants A and D

Obr. 15 uvádí výsledky tahového napětí v odlitcích varianty A a D před a po vyjmutí z formy. Před vyjmutím z formy existovala v odlitcích obou variant vyšší tahová pnutí, která v některých místech přesahovala mez pevnosti materiálu (240 MPa [25]). To bylo způsobeno setrváním odlitku ve formě, která brzdila jeho deformaci. Po vyjmutí z formy byla většina tahového napětí vyrelaxována a odlitek se dostal do příznivějšího napěťového stavu. Stále však v odlitcích existovala místa, která by dle simulace mohla být riziková a mohlo by zde dojít k překročení meze kluzu materiálu (140 MPa [25]). Při srovnání odlitků varianty A a D je zřejmé, že nedošlo k významné změně napěťových poměrů v odlitcích. Lze říci, že po aplikaci

konformního chlazení došlo k mírnému poklesu tahových napětí v odlitku varianty D, avšak tento pokles by se v reálných podmínkách pravděpodobně neprojevil.

Kvůli přítomnosti vyšších tahových napětí v odlitcích bylo dále analyzováno kritérium Hot Tearing Indicator, které predikuje náchylnost odlitků ke vzniku trhlin za tepla. Výsledky Hot Tearing Indicator představuje obr. 16. V odlitcích obou variant byly vypočteny nízké hodnoty kritéria, což znamená nízké riziko vzniku trhlin v odlitcích. To odpovídá také stavu výroby v provozních podmínkách. V případě studovaného odlitku dosud nebylo zaznamenáno snížení jakosti vlivem přítomnosti trhlin.



Obr. 16 Hot Tearing Indicator u odlitků varianty A a D
Fig. 16 Hot Tearing Indicator in variant A and D castings

5. Závěr

Příspěvek se zabýval návrhem konformního chlazení vložky šoupátka, která je součástí formy pro vysokotlaké lití hliníkových slitin. Pro ověření chladicího účinku byly provedeny numerické simulace v softwaru ProCAST. Celkem byly simulovány 4 varianty, z nichž varianta A obsahovala současnou geometrii chladicího kanálu a zbylé 3 varianty obsahovaly různé návrhy designu konformního chlazení. U variant s konformním chlazením bylo provedeno také odlehčení vložky šoupátka, kvůli úspoře materiálu na výrobu. Numerické simulace byly rozděleny do dvou fází. V první fázi bylo simulováno cyklování se zaměřením na teplotní pole formy. Na základě těchto výsledků byl vybrán návrh s nejvhodnějším provedením konformního chlazení, pro který byla dále provedena simulace plnění formy a tuhnutí odlitku včetně napěťových stavů. Pozornost byla věnována také kvalitativním parametrům odlitku. Zjištěné poznatky lze shrnout do následujících bodů:

- Z porovnání teplotního pole formy v provozních podmínkách a numerické simulace byla vyhodnocena dobrá shoda výsledků.
- Na základě výsledků teplotního pole při cyklování byla pro další analýzu vybrána varianta D vložky šoupátka s konformním chlazením. Tato varianta měla dobrý chladicí účinek na pracovní části vložky i při redukcí intervalu chlazení. V podstavě vložky došlo k celkovému nárůstu teplot vlivem úběru materiálu při odlehčení. To však nemělo negativní účinek, jak bylo potvrzeno další analýzou.
- Vložka šoupátka byla v průběhu cyklu nejvíce namáhána tlakovým napětím, přesahujícím 400 MPa,

kteřé vznikalo v důsledku prohřátí povrchových vrstev pracovní části vložky a rozpínání materiálu. Při aplikaci konformního chlazení varianty D se zatížení tlakovým napětím na pracovní části vložky snížilo.

- Tahové napětí, vznikající vlivem smršťování materiálu při poklesu teploty, působilo převážně v blízkém okolí chladicích kanálů. Ve fázi největšího teplotního zatížení vložky (11. a 21. s cyklu), bylo tahové napětí varianty A a D na podobné úrovni. Po zbylou dobu cyklu působila vyšší tahová napětí u varianty A, která byla chlazená po celou dobu cyklu. Úpravou intervalu chlazení tak bylo u varianty D částečně sníženo zatížení tahovým napětím.
- Nejnižší únavová životnost vložky šoupátka byla predikována v oblasti působení nejvyšších napětí, v tomto případě tlakových napětí v povrchových vrstvách pracovní části vložky. Vlivem poklesu tlakových napětí u varianty D s konformním chlazením se prodloužila predikovaná únavová životnost vložky.
- U varianty D došlo k redukci oblasti působení Contact Pressure mezi vložkou šoupátka, odlítkem a přilehlými komponentami formy. To znamená, že u této varianty existuje nižší riziko opotřebení komponent formy vlivem tření a poškození povrchu odlitku.
- Nebyl zjištěn negativní dopad změny chlazení vložky šoupátka na kvalitu odlitku. Predikované oblasti porezity se téměř nezměnily. V oblasti napětových stavů také nedošlo k významným změnám. Vady zapříčiněné působením pnutí nebyly u tohoto typu odlitku predikovány.
- Výhodou varianty D bylo také provedení odlehčení, díky kterému dojde k úspoře materiálu 7,2 kg na každé vyrobené vložce, což představuje 28 % původní hmotnosti vložky.

Na základě zjištěných výsledků byla varianta vložky šoupátka D s konformním chlazením doporučena k výrobě 3D tiskem. Po tepelném zpracování, obrobení a povlakování bude v další fázi výzkumu podrobena testování životnosti v provozních podmínkách společnosti MOTOR JIKOV.

Poděkování

Práce vznikla za podpory Technologické agentury České republiky v rámci programu TREND a projektu FW03010609 „Výzkum a vývoj tvarových forem z materiálu H-13 a DIEVAR pro tlakové lití hliníkových slitin při aplikaci moderních technologií aditivní výroby, tepelného zpracování, povrchových úprav a numerických simulací.“

Literatura

- [1] FENG, S., KAMAT, A.M. and PEI, Y. Design and fabrication of conformal cooling channels in molds: Review and progress updates. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 171 (2021). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121082
- [2] KLOBČAR, D., TUŠEK, J. and TALJAT, B. Thermal fatigue of materials for die-casting tooling. *Materials Science and*

Engineering: A. 472 (2008) 1-2, 198-207. DOI: 10.1016/j.msea.2007.03.025.

- [3] ANAND, A., NAGARAJAN, D., EL MANSORI, M. and SIVARUPAN, T. Integration of Additive Fabrication with High-Pressure Die Casting for Quality Structural Castings of Aluminium Alloys; Optimising Energy Consumption. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 76 (2023) 2, 347-379. DOI: 10.1007/s12666-022-02750-y.
- [4] CHEN, G., WANG, J., WANG, D., XUE, L., ZENG, B. and QIN, B. Effect of liquid oxy-nitriding at various temperatures on wear and molten aluminum corrosion behaviors of AISI H13 steel. *Corrosion Science*. 178 (2021). DOI: 10.1016/j.corsci.2020.109088.
- [5] BHASKAR, M., ANAND, G., NALLUSWAMY, T. and SURESH, P. Die Life in Aluminium High-Pressure Die Casting Industries. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*. 103 (2022) 1, 117-123. DOI: 10.1007/s40033-021-00317-7.
- [6] ANDRONOV, V., BERÁNEK, L., ZAJÍC, J., ŠOTKA, P. and BOCK, M. Case Study of Large Three-Dimensional-Printed Slider with Conformal Cooling for High-Pressure Die Casting. *3D Printing and Additive Manufacturing*. 10 (2023) 4, 587-608. DOI: 10.1089/3dp.2022.0225.
- [7] JARFORS, A.E.W., SEVASTOPOL, R., SESHENDRA, K., ZHANG, Q., STEGGO, J. and STOLT, R. On the Use of Conformal Cooling in High-Pressure Die-Casting and Semisolid Casting. *Technologies*. 9 (2021) 2. DOI: 10.3390/technologies9020039.
- [8] FIORENTINI, F., CURCIO, P., ARMENTANI, E., ROSSO, C. and BALDISSERA, P. Study of two alternative cooling systems of a mold insert used in die casting process of light alloy components. *Procedia Structural Integrity*. 24 (2019), 569-582. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.02.050.
- [9] STOLT, R., POUR, M.A. and SIAFAKAS, D. Making Additively Manufactured Cores with Conformal Tooling Directly on a Die-base. *Procedia Manufacturing*. 55 (2021), 200-204.
- [10] BARREIRO, P., ARMUTCU, G., PFRIMMER, S. and HERMES, J. Quality improvement of an aluminum gearbox housing by implementing additive manufacturing. *Forschung im Ingenieurwesen*. 86 (2022) 3, 605-616. DOI: 10.1007/s10010-021-00541-3.
- [11] SHINDE, M. S. and ASHTANKAR, K.M. Additive manufacturing-assisted conformal cooling channels in mold manufacturing processes. *Advances in Mechanical Engineering*. 9 (2017) 5. DOI: 10.1177/1687814017699764.
- [12] ARMILLOTTA, A., BARAGGI, R. and FASOLI, S. SLM tooling for die casting with conformal cooling channels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 71 (2014) 1-4, 573-583. DOI: 10.1007/s00170-013-5523-7.
- [13] ZENG, T., ABO-SERIE, E., HENRY, M. and JEWKES, J. Cooling channel free surface optimisation for additively manufactured casting tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 127 (2023) 3-4, 1293-1315. DOI: 10.1007/s00170-023-11402-4.
- [14] KARAKOC, C., DIZDAR, K. C. and DISPINAR, D. Investigation of effect of conformal cooling inserts in high-pressure die casting of AlSi9Cu3. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 121 (2022) 11-12, 7311-7323. DOI: 10.1007/s00170-022-09808-7.
- [15] ANGLADA, E., MELÉNDEZ, A., VICARIO, I., ARRATIBEL, E. and AGUILLO, I. Adjustment of a High Pressure Die Casting Simulation Model Against Experimental Data. *Procedia Engineering*. 135 (2015), 966-973. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.584.
- [16] NORWOOD, A., DICKENS, P., SOAR, R., HARRIS, R., GIBBONS, G. and HANSELL, R. Analysis of cooling channels performance. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 17 (2004) 8, 669-678. DOI: 10.1080/0951192042000237528.
- [17] PIEKŁO, J., BURBELKO, A. and GARBACZ-KLEMPKA, A. Shape-Dependent Strength of Al Si9Cu3FeZn Die-Cast Alloy in Impact Zone of Conformal Cooling Core. *Materials*. 15 (2022) 15. DOI: 10.3390/ma15155133.

- [18] ESI Group. (2024, April). *ProCAST*. Retrieved April 05, 2024, from <https://www.esi-group.com/products/procast>.
- [19] ESI Group. (2021, August). *ProCAST 2021.0 – User Guide*. Retrieved April 05, 2024, from <https://myesi.esi-group.com/downloads/software-documentation/procast-2021.0-user-guide-visual-cast-procast-rev-b-online-online-online-online>.
- [20] INGHAM, D.B. and MA, L. Fundamental equations for CFD in river flow simulations. In P.D. Bates, S.N. Lane, R.I. Ferguson (Eds.). *Computational Fluid Dynamics: Applications in Environmental Hydraulics*. 2005, New Jersey: Wiley.
- ALHENDAL, Y. and TURAN, A. Volume-of-Fluid (VOF) Simulations of Marangoni Bubbles Motion in Zero Gravity. In R. Petrova (Ed.). *Finite Volume Method - Powerful Means of Engineering Designs*. 2012, Rijeka: InTech.
- [22] YEOH, G.H. and TU, J. *Computational Techniques for Multiphase Flows*. 2019, Cambridge: Elsevier.
- [23] Ranade, V. V. *Computational Flow Modeling for Chemical Reactor Engineering*. 2002, Cambridge: Elsevier.
- [24] UDDEHOLM. (2018, May). *Uddeholm Dievar*. Retrieved April 10, 2024, from <https://www.uddeholm.com/czech/cs/products/uddeholm-dievar/>
- [25] ČSN EN 1706+A1. (2022). *Hliník a slitiny hliníku – Odlitky – Chemické složení a mechanické vlastnosti*. Praha: Česká agentura pro standardizaci.

Nizozemsko podporuje zelené dotace pro Tata Steel Ijmuiden ve výši 3 miliard eur

Nizozemský parlament schválil zhruba 3 miliardy eur v podobě ekologických dotací společnosti Tata Steel Ijmuiden, dceřiné společnosti globálního výrobce oceli Tata Steel. Tata Steel v Ijmuidenu je druhou největší ocelárnou v Evropě a jedním z největších průmyslových zaměstnavatelů v Nizozemsku. Společnost má významný dopad na životní prostředí v okolních regionech díky velkým emisím pomocí zastaralé technologie vysokých pecí.

Státní prostředky budou použity na dekarbonizaci závodu a zvýšení udržitelnosti ocelářského průmyslu v zemi. Cesta k největší ekologické dotaci komerční společnosti v poslední době je považována za otevřenou, zatímco parlament požaduje pevné záruky splnění. Emise a dopady nizozemského závodu Tata Steel na životní prostředí byly dlouho zdrojem kontroverzí, ale dekarbonizace závodu vyžaduje velké investice. Vláda k této otázce po mnoho let přistupuje liberálně, protože se obává, že zásah může stát tisíce pracovních míst.

Kapacita ocelárny Ijmuiden se odhaduje na 6 milionů tun surového železa ročně ze dvou vysokých pecí. BF č. 6 je schopna vyrobit 2,5 milionu tun surového železa ročně. Výroba oceli v závodě se odhaduje na 7,5 milionu tun ročně. Společnost se specializuje na výrobu za studena válcovaných, žárově zinkovaných a lakovaných svitků a pocínovaných výrobků.

Zdroj: GMK Center

Závod Thyssenkrupp v Hagenu bude odebírat elektřinu přímo z větrné farmy

Závod Thyssenkrupp Steel v Hagenu (Thyssenkrupp Hohenlimburg) se stal prvním německým průmyslovým podnikem, který je přímo napojen na větrnou farmu. Díky zelené energii ze čtyř nových větrných turbín instalovaných partnerem projektu SL NaturEnergie může společnost nyní pokrýt 40 % své průměrné roční potřeby elektřiny. Projekt zelené elektřiny v závodě Thyssenkrupp Hohenlimburg má podle společnosti potenciál snížit v první fázi emise CO₂ o 11 % a je zde prostor pro další expanzi.

Čtyři větrné turbíny, každá až 160 metrů vysoká a s průměrem rotoru 138 metrů, jsou spojeny se zařízeními Thyssenkrupp Hohenlimburg 3 km dlouhou linkou. Větrná farma vyrábí více než 55 milionů kWh ročně, což umožňuje většinu této energie využít přímo, aniž by se spoléhala na národní síť. Přebytek je dodáván do ostatních zařízení skupiny prostřednictvím veřejné sítě pouze v případě vysokých rychlostí větru nebo snížené poptávky v podniku.

Závod Hagen společnosti Thyssenkrupp Steel, který zaměstnává 1000 lidí, vyrábí přesné ocelové pásy válcované za tepla. Zákazníky společnosti jsou především výrobci za studena válcované oceli, automobilový průmysl a jeho dodavatelé.

Loni na podzim oficiálně zahájil provoz větrný park v Rakousku (Štýrsko), který dodává elektřinu ocelářské firmě Voestalpine.

Zdroj: GMK Center