



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## OPTIMALIZACE TECHNOLOGIE VÝROBY AL ODLITKU LITÉHO METODOU VYTAVITELNÉHO MODELU

OPTIMIZING THE TECHNOLOGY OF AL CASTING MANUFACTURED BY THE "LOST WAX  
PROCESS"

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. VÍT MIKULKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MILAN HORÁČEK, CSc.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie  
Akademický rok: 2009/2010

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Vít Mikulka

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Slévárenská technologie (2301T014)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Optimalizace technologie výroby Al odlitku litého metodou vytavitelného modelu**

v anglickém jazyce:

### **Optimizing the technology of Al casting manufactured by the "lost wax process"**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Hlavním úkolem práce bude optimalizovat technologii zhotovení konkrétního odlitku ze slitiny Al vyráběného technologií vytavitelného modelu. Především se bude jednat o navržení optimální vtokové soustavy (velikosti a umístění) a dále podmínek vlastního odlévání a tuhnutí s cílem získání co nejlepších mechanických vlastností. To vše za pomoci simulací a také následné verifikace odlitím zkušebních odlitků.

Cíle diplomové práce:

Dosažení optimálních vlastností vybraného tenkostěnného odlitku ze slitiny Al zhotoveného technologií vytavitelného modelu.

Seznam odborné literatury:

1. BEELEY, PR. and SMART, RF. Investment Casting. 1st ed. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0-901716-66-9.
2. DOŠKÁŘ, J., aj. Výroba přesných odlitků. 1. vyd. Praha: SNTL, 1976. 315 s. DT 621.746.
3. CAMPBELL, J. Castings. 1st ed. Oxford: Butterworth - Heinemann, 1991. 288 p. ISBN 0-7506-1072.
4. OTI, JA. The Science, Mechanics and Construction of Investment Casting Tooling without Rework. In Proceedings of the 50th ICI Conference. Chicago: ICI, USA, 2002, p. 85-96.
5. WIMPENNY, D. RP – a route to rapid castings. In Proceedings of the 11th World Congress on Investment Casting. Edinburgh: ICI, U. K., 2004, p. 120-135.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 20.11.2009

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá možnostmi využití numerické simulace při optimalizaci výroby vysoce náročných tenkostěnných odlitků litých metodou vytavitelného modelu. Byl vybrán konkrétní odlitek ze slitiny hliníku, jehož výroba byla značně problémová (s vysokým výskytem vad typu staženina a ředina). Pomocí numerické simulace byla analyzována současná technologie výroby. Na základě této simulace byly určeny možné příčiny vzniku vad, které byly následně také potvrzeny metalografickým vyhodnocením struktury odlitku. Následoval návrh možných variant řešení, jejich simulace a diskuse dosahovaných výsledků. Porovnáním dosažených výsledků byly nakonec vybrány dvě varianty k jejich následné provozní verifikaci, při které došlo k potvrzení úspěšnosti navržených změn.

### **Klíčová slova**

přesné lití, vytavitelný model, simulace slévárenských pochodů

## **ABSTRACT**

This diploma theses deals with possibilities of using numerical simulation for optimizing production of highly demanding thin-section casting produced by investment casting process. The casting made of aluminium alloy in which the manufacturing process was very problematic (occurrence of macro and micro shrinkages) has been chosen. By numerical simulation the existing technology has been analysed and based on this the possible reasons for defects found. This was later confirmed also by metallographic examinations. Following to this several options for a new technology were proposed and again by simulation checked their suitability. By comparing all above mentioned options two versions have been chosen in the end which was later tested in production with satisfactory results.

### **Key words**

Investment casting, lost wax process, simulation of foundry processes

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

MIKULKA, V. *Optimalizace technologie výroby Al odlitku litého metodou vytavitelného modelu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 73 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Optimalizace technologie výroby Al odlitku litého metodou vytavitelného modelu vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum: 28. 5. 2010

.....

Vít Mikulka

## **Poděkování**

Děkuji tímto prof. Ing. Milanovi Horáčkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval Ing. Vlastimilu Koldovi a celému kolektivu MECAS ESI s. r. o. za předání zkušeností se simulačním softwarem ProCAST.

V neposlední řadě Ing. Dušanovi Šmídovi a dalším pracovníkům Fimes, a.s. za poskytnutí podpory nejen při výrobě a odlití vzorkové série v této slévárně.

# OBSAH

<i>Abstrakt</i> .....	3
<i>Obsah</i> .....	6
<i>1 Úvod</i> .....	7
<i>2 Teoretická část</i> .....	8
2.1 Přesné lití – metoda vytavitelného modelu.....	8
2.2 Faktory ovlivňující zdravotnost odlitku.....	14
2.2.1 Obecný rozbor problému .....	14
2.2.2 Vtoková soustava v závislosti na proudění kovu.....	16
2.2.3 Tuhnutí kovu ve skořepinové formě.....	18
2.2.4 Filtrace .....	22
2.3 Simulace ve slévárenství .....	24
2.4 Simulační software ProCast.....	26
2.4.1 Charakteristika softwaru ProCast .....	26
2.4.2 Geometrie a síťování.....	26
2.4.3 Preprocessing .....	27
2.4.4 Mainprocessing .....	27
2.4.5 Postprocessing.....	28
2.5 Slitiny Al-Si-Mg .....	29
<i>3 Praktická část</i> .....	31
3.1 Řešený odlitek .....	31
3.2 Návrhy řešení .....	40
3.2.1 Varianta 1.....	41
3.2.2 Varianta 2.....	44
3.2.3 Varianta 3.....	49
3.2.4 Varianta 4.....	53
3.3 Zhodnocení – výběr vhodné varianty .....	57
3.4 Ověření optimalizovaných variant ve výrobě.....	63
<i>4. Závěr</i> .....	70
<i>Použitá literatura</i> .....	71
<i>Seznam použitých zkratk a symbolů</i> .....	73

# 1 ÚVOD

Odlévání kovů metodou vytavitelného modelu se řadí mezi vysoce náročné technologie výroby odlitků s vysokou přidanou hodnotou. Neustále se zvyšující nároky zákazníků, společně s recesí výroby posledních let, nutí slévárny ke krokům, jež vedou ke zvýšení kvality produktů nejlépe při snížení výrobních nákladů.

Z tohoto důvodu je vhodné užití simulačních programů, které dovolují celý proces optimalizovat ještě před zahájením výroby daného odlitku, případně optimalizovat výrobu stávajících problémových kusů. Často užívaná metoda pokus-omyl nemá již v moderní slévárně místo. Každá následná úprava s sebou přináší zvýšení nákladů a také značně prodlužuje dobu dodání prvních kusů zákazníkovi, tudíž se snižuje konkurenceschopnost podniku.

Simulační software ProCast v současné době umožňuje predikovat základní fáze výroby i některé výsledné parametry odlitku – lití, tuhnutí, tvorbu ředin, zbytková pnutí a mikrostrukturu.



## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Přesné lití – metoda vytavitelného modelu

Pojem přesné lití obecně zastřešuje všechny metody výroby odlitků, jimiž lze dosáhnout užších rozměrových a tvarových tolerancí, než je běžné při užití konvenčních metod lití. Obecně se takovou tolerancí rozumí  $\pm 0,25$  % relativní přesnosti. Tento způsob výroby odlitků se tedy řadí mezi takzvané technologie „net-shape“ – „na hotovo“. Cílem je tedy minimalizovat případné obrábění, ideálně jej zcela eliminovat, a odlitek užívat přímo v litém stavu. Jednou z metod přesného lití je i metoda vytavitelného modelu. [1,2]

Přestože je přesné lití na vytavitelný model technologií, která je dnes používána na odlitky s velmi vysokými nároky, její původ sahá daleko do historie. Jedná se vůbec o jednu z prvních výrobních metod, jež si lidstvo osvojilo. Archeologické práce dokazují, že princip této technologie je znám již více jak šest milénií. Nicméně až do poměrně nedávné doby sloužila pouze k výrobě uměleckých předmětů. Od začátku 20. století byla metoda vytavitelného modelu společně s rozvojem kobaltových slitin využívána při výrobě zubních a ortopedických náhrad. Stále se ovšem jednalo jen o okrajovou metodu výroby. Skutečný rozmach přišel až s druhou světovou válkou. Vývoj v letecké technice, zejména vývoj letecké spalovací turbíny, potřeboval najít metodu, která by byla schopná splnit ty nejnáročnější požadavky. Takovou se stalo právě lití metodou vytavitelného modelu. Ovšem kromě již známé vlastnosti tohoto procesu, tedy možnosti vyrábět tvarově složité odlitky, bylo nutno splnit další požadavky dané užitím odlitků v nejnáročnějších aplikacích. [3]

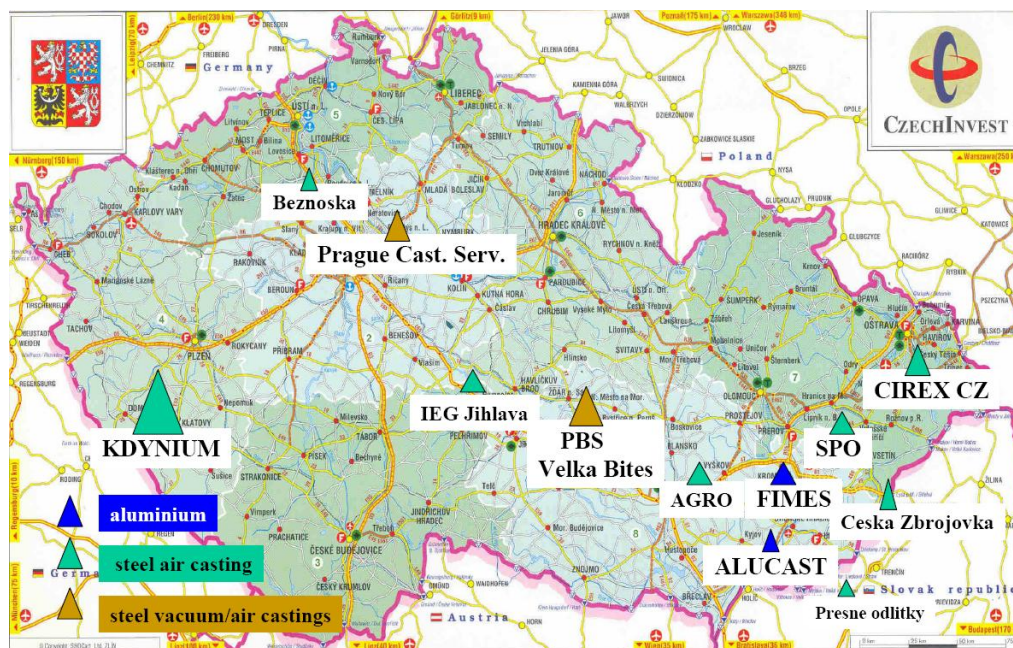
Jednalo se zejména o tyto: [3]

- a) reprodukovatelnost odlitku s vysokou rozměrovou přesností
- b) odlévání slitin s vysokým bodem tání
- c) vysoká kvalita metalurgie

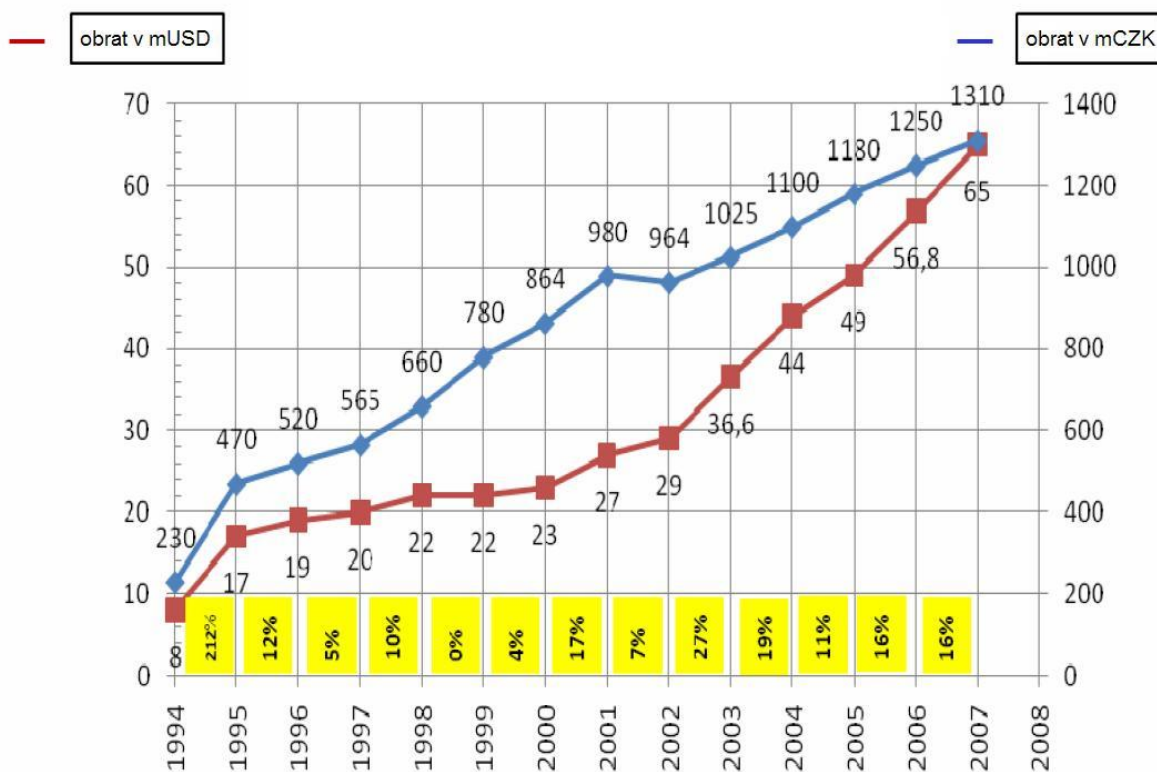
Tyto požadavky daly vzniknout moderní technologii lití na vytavitelný model, jak ji známe dnes. Vzhledem k tomu, že se jednalo zejména o výrobu pro zbrojní průmysl, byla celá technologie pečlivě utajována, a proto se i vývoj v různých zemích ubíral různými směry.

U nás se o zavedení a následný rozvoj této metody nejvíce přičinil Dr. Ing. Josef Doškář. Ten působil od roku 1937 u firmy Baťa ve Zlíně. Koncem druhé světové války byla již tato technologie rozpracována natolik, že byla připravena k průmyslovému využití. Dr. Doškář a jeho spolupracovníci vydali také několik publikací, jež pomohly rozšířit tento způsob výroby odlitků nejenom v tehdejší Československu, ale i do celé východní Evropy. První mechanizovaná slévárna na výrobu odlitků pomocí metody vytavitelného modelu vznikla v roce 1958 ve Zlíně. V roce 1960 vzniká celostátní orgán „Technický sbor sléváren přesných odlitků“, jehož dlouholetým předsedou se stává právě Dr. Doškář. K dalšímu rozvoji přispěl vznik celostátního vývojového střediska přesného lití ve Zlíně. Dr. Doškář zde pokračuje ve vývoji jednotlivých aspektů celé technologie od vstupních surovin přes voskové směsi, keramické hmoty, až po vývoj ocelí vhodných k lití do žhavých keramických forem. Po odchodu z tohoto střediska v roce 1972 je nadále aktivní v oboru přesného lití ať už jako externí spolupracovník nebo externí vědecký pracovník na slévárenské katedře Strojní fakulty VUT Brno. Dr. Doškář a další vysoce kvalitní techničtí i výrobní pracovníci se

zasloužili o to, že od samého počátku průmyslového využití přesného lití bylo Československo na předních místech světového vývoje. I dnes je Česká republika významným hráčem na trhu přesných odlitků. [4]



Obr. 2.1 Slévárny přesného lití metodou vytavitelného modelu v ČR [5]



Obr. 2.2 Vývoj obrátu sléváren přesného lití metodou vytavitelného modelu V ČR [5]

Metoda vytavitelného modelu, známá též pod názvy „investment casting process“ případně „lost wax casting“, je jednou z předních metod moderní výroby odlitků. Neustále rostoucí požadavky na jakost, rozměrovou přesnost, kvalitu povrchu, vnitřní kvalitu, úsporu materiálu, atd. ji přímo předurčují k dalšímu rozšíření. Tato metoda je obzvláště výhodná pro výrobu velmi tvarově složitých součástí. Tohoto lze využít při konstrukci součástí, jejichž užité vlastnosti jsou podpořeny řadou konstrukčních prvků, jako jsou žebra, výztuhy, vylehčení, otvory, negativní úkosy apod. U součástí navrhovaných pro klasickou výrobu, zejména tedy třískové obrábění, konstruktér přihlíží k nákladnosti, potažmo vyrobiteľnosti daného prvku, a proto takovéto prvky vypouští. Mnohé slitiny jsou také jen velmi těžko obrobiteľné, přičemž jejich odlití nečiní závažnějších problémů. Sestavy součástí, které jsou spojovány ať už rozebíratelnými či nerozebíratelnými spoji, mohou být nahrazeny jediným odlitkem. Předností odlitku je, tedy krom jiného, časté výrazné snížení hmotnosti při zachování původních užitečných vlastností součásti. Bohužel konstruktéři často netuší, jaké vlastnosti jim mohou odlitky, a to nejen ty zhotovené metodou vytavitelného modelu, nabídnout. Zde se otvírá prostor pro využití tzv. simultánního inženýrství, kdy se rozvíjí spolupráce mezi odběratelem a dodavatelem, potažmo konstruktérem a technologem. [1,6]



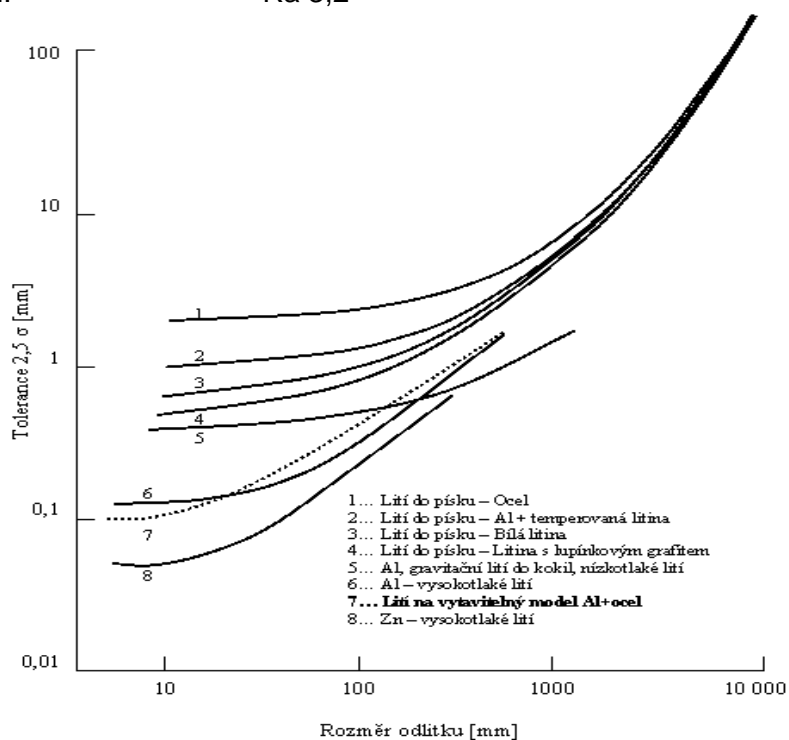
Obr. 2.3 Náhrada litinového odlitku litého do písku odlitkem z hliníkové slitiny litým metodou vytavitelného modelu [2]



Obr. 2.4 Náhrada součásti vyráběné třískovým obráběním odlitkem litým metodou vytavitelného modelu [2]

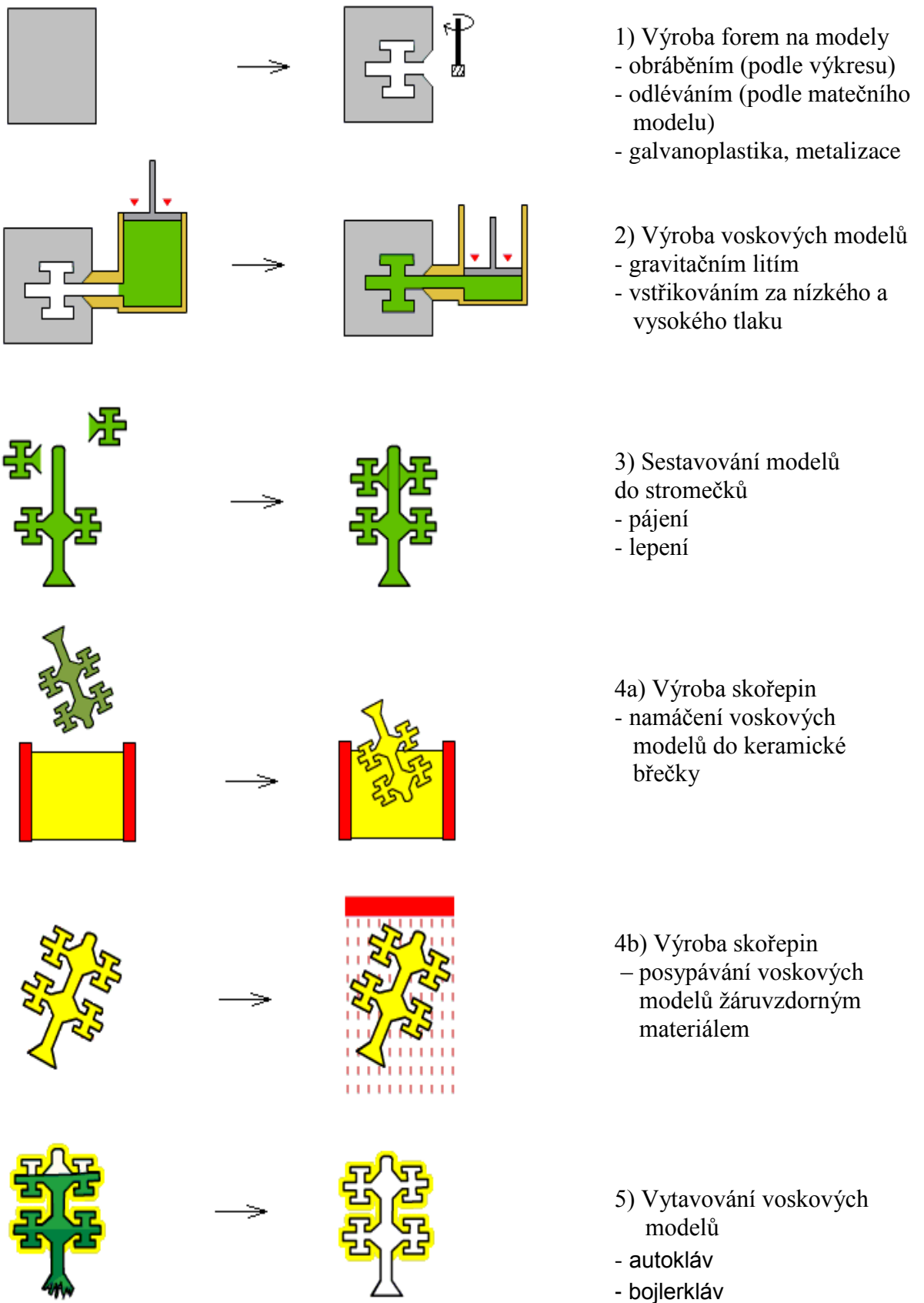
### Současné hranice přesného lití [1]

Minimální tloušťka stěny:	slitiny železných kovů 0,5 mm slitiny neželezných kovů 0,3 mm
Maximální hmotnost odlitku:	200 kg
Hmotnost běžně litých odlitků:	50 kg
Maximální velikost odlitku:	1000 mm
Drsnost povrchu:	Ra 3,2

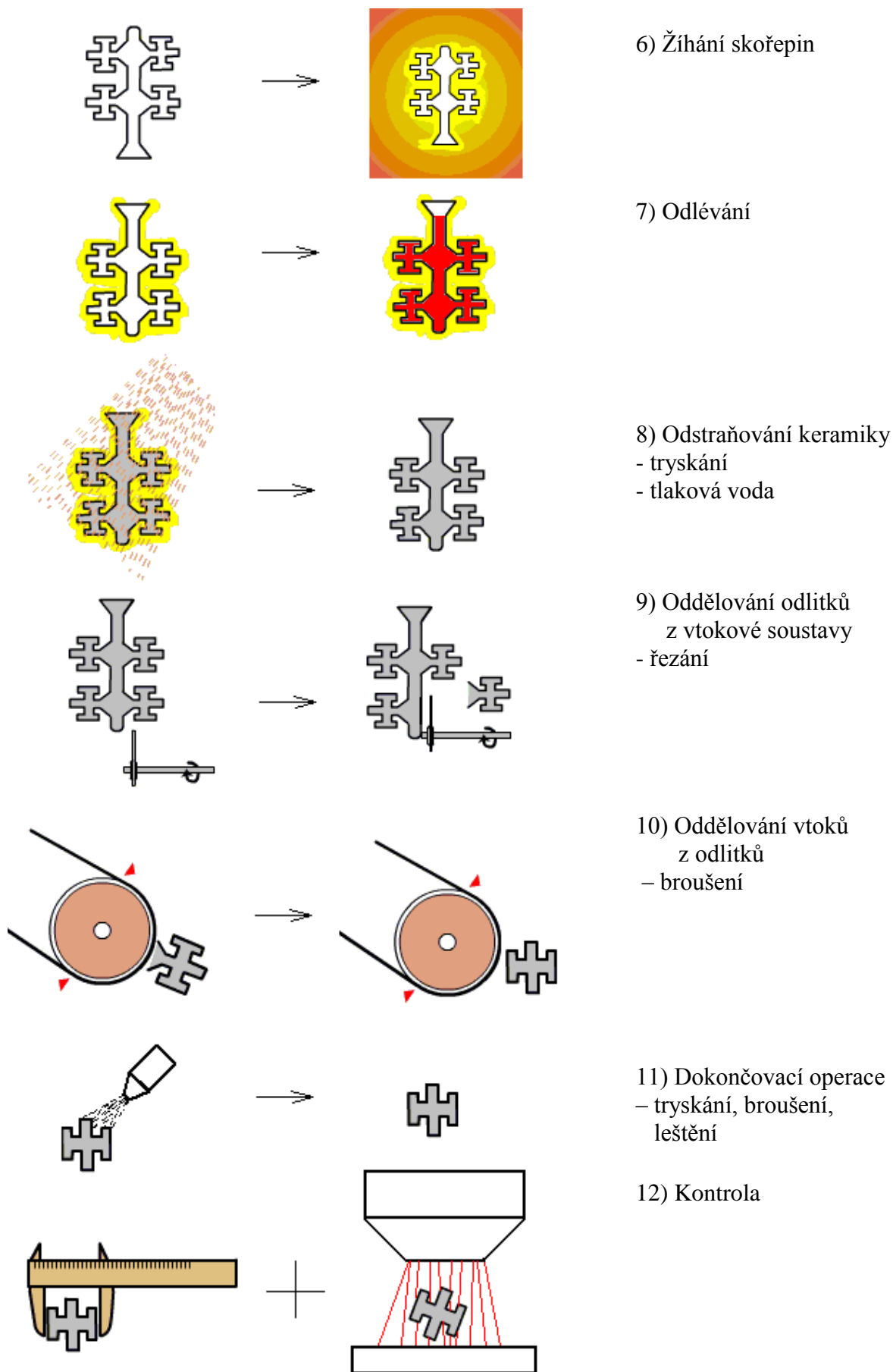


Obr. 2.5 Rozměrová přesnost odlitků vyrobených metodou vytavitelného modelu [7]

## Popis jednotlivých fází výroby odlitku metodou vytavitelného modelu



Obr. 2.6 Fáze zhotovení přesně lité součásti – část 1 [6]



Obr. 2.7 Fáze zhotovení přesně lité součásti - část 2 [6]

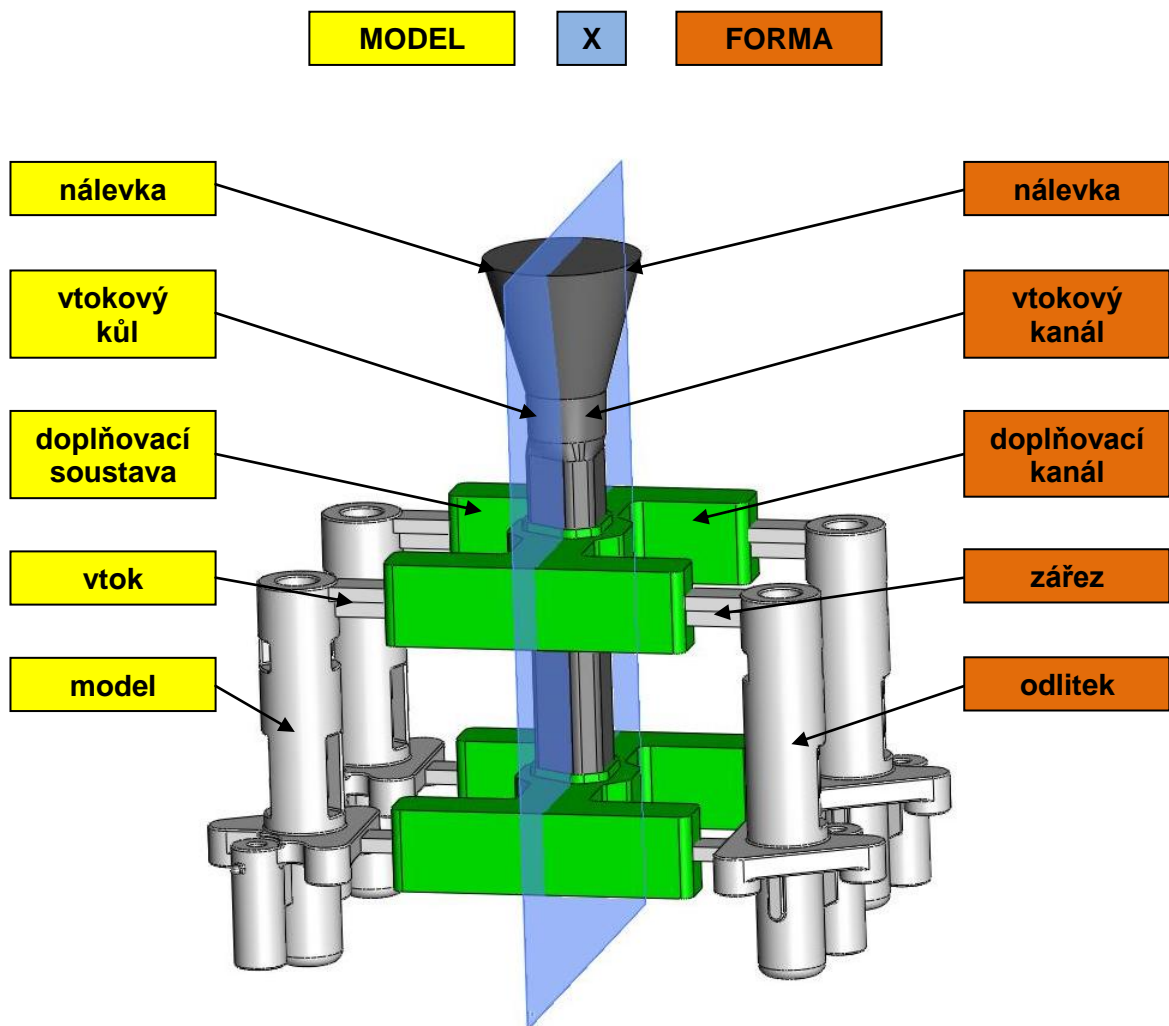
## 2.2 Faktory ovlivňující zdravotv odlitku

### 2.2.1 Obecný rozbor problému

Jedním ze základních ukazatelů popisujících jakoukoli slévárnu je zmetkovitost, tedy procentuální zastoupení odlitků obsahujících nepřijatelnou vadu. Vadou odlitku rozumíme každou odchylku rozměrů, hmotnosti, vzhledu, struktury, celistvosti, chemického složení nebo fyzikálních a chemických vlastností odlitku od příslušných norem, standardů, výkresů a technických podmínek. [8] Množství neshodných výrobků hovoří o míře kvality celého procesu výroby. Přesné lití je technologicky velmi náročným procesem, a proto musí být celé přípravě výroby i výrobě samotné věnována náležitá péče. Technolog je schopen zlepšit zdravotv odlitků vhodným nastavením některých parametrů procesu.

Ovlivnit lze zejména tyto parametry:

- tvar stromečku – uspořádání, počet a polohu jednotlivých modelů, zářezy, doplňovací kanály, případně nálitky
- teplotu odlévané slitiny a rychlost lití
- teplotu předehřátí skořepinové formy



Obr. 2.8 Názvosloví u technologie vytavitelného modelu

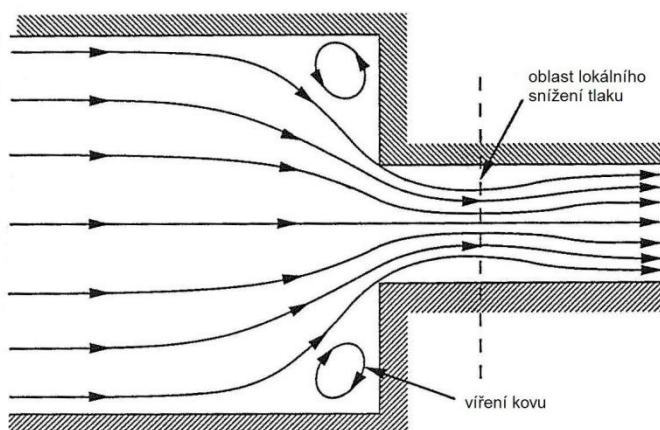
Forma pro přesné lití by měla splňovat následující požadavky: [3]

1. dovolit kovu vyplnit formu rychle, přesně a s minimem turbulencí
2. ustanovit ve formě takové teplotní gradienty, které zaručí zdravotnost odlitku
3. odstranit z kovu strusku
4. zabránit oxidaci kovu při plnění formy
5. být jednoduše vyrobitelná
6. dovolit jednoduché oddělení odlitků od vtokové soustavy
7. nedeformovat odlitek během tuhnutí

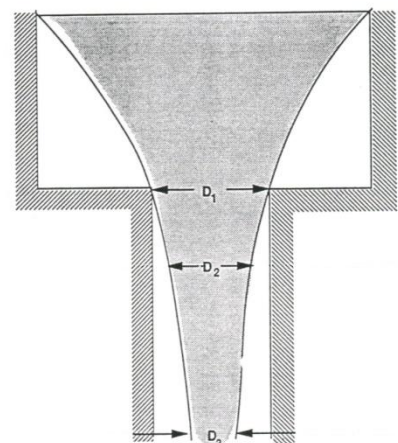
Geometrie formy a licí parametry musí zajistit v prvé řadě to, aby kov vyplnil celou dutinu formy dříve, než ztuhne. Následně zajistit takové tuhnutí odlitků, aby nedocházelo k tvorbě staženin a ředin. Během plnění by měl tvar formy zajišťovat minimalizaci styku kovu s plyny, tak aby se omezil vznik nekovových vměstků. [3]

Příkladem snahy o minimalizaci styku s kovem může být doporučení respektovat tvar licího proudu a tím zamezit styku kovu s okolní atmosférou. V praxi se často užívá licího kůlu s úhlem  $3^\circ$ . Tento úhel má zajistit přetlakovost kůlu a kov tedy nemá tendenci nasávat skrze formu vzduch. Jelikož se skořepinové formy vyznačují minimální prodyšností, ani toto doporučení se často nedodrжуje, což ovšem vede k tvorbě vzduchové mezery mezi formou a kovem. Kov se vzduchem reaguje za vzniku oxidických vměstků, které mohou být proudem kovu strhávány do odlitku. [3]

Skokové změny v příčném průřezu vtokové soustavy také zapříčiňují zhoršení kvality kovu. Kov v rozích přechodu víří namísto toho, aby postupoval dále. Za přechodem dochází vlivem náhlého zrychlení kovu a jeho hybnosti k lokálnímu snížení tlaku. Toto vede opět k nasávání vzduchu. [3]



Obr. 2.9 Skoková změna průřezu [3]



Obr. 2.10 Tvar licího proudu [3]



## 2.2.2 Vtoková soustava v závislosti na proudění kovu

Jedním z aspektů návrhu geometrie vtokového systému je proudění kovu během plnění formy. Popsat matematicky tento jev je velmi složité, protože se jedná o třídídimenzionální a značně proměnlivý systém. Ten zahrnuje rychlosti a směry proudění, popsané příslušnými vektory. Proudění je navíc v případě roztaveného kovu ovlivňováno změnou viskozity, která je značně závislá na teplotě odlévané slitiny v daném místě formy. Dříve bylo k pochopení zákonitostí proudění využíváno podobnosti proudění roztavené slitiny a náhradní tekutiny – vody. [3]

Vzhledem k proudění tekutiny je třeba rozlišovat mezi stacionárními a nestacionárními podmínkami. U odlévání kovů se téměř vždy jedná o podmínky nestacionární, značně proměnné během celé doby plnění formy. Všechny tyto výše popsané aspekty přispívají k tomu, že výpočty takovýchto dějů jsou nesmírně náročné. Vývoj na poli počítačové techniky, ať už výkonnostní růst hardware či tvorba stále kvalitnějších simulačních softwarů, nám naštěstí dnes umožňuje i takto složité děje predikovat. [3]

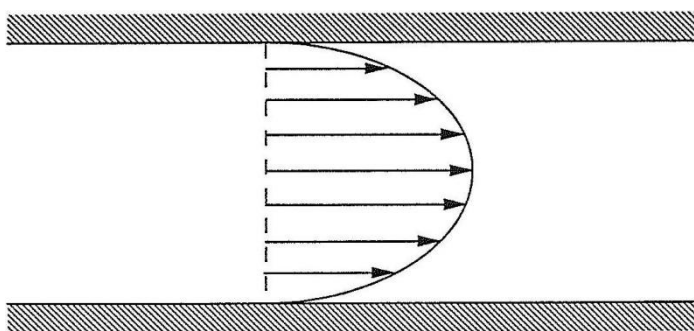
### Proudění tekutin

Pro proudění tekutin je možno uvažovat o dvou základních režimech – laminárním a turbulentním prouděním. Kritériem určení režimu proudění je tzv. Reynoldsovo číslo: [3]

$$Re = \frac{4 \cdot R_h \cdot v}{\nu} \quad (2.1)$$

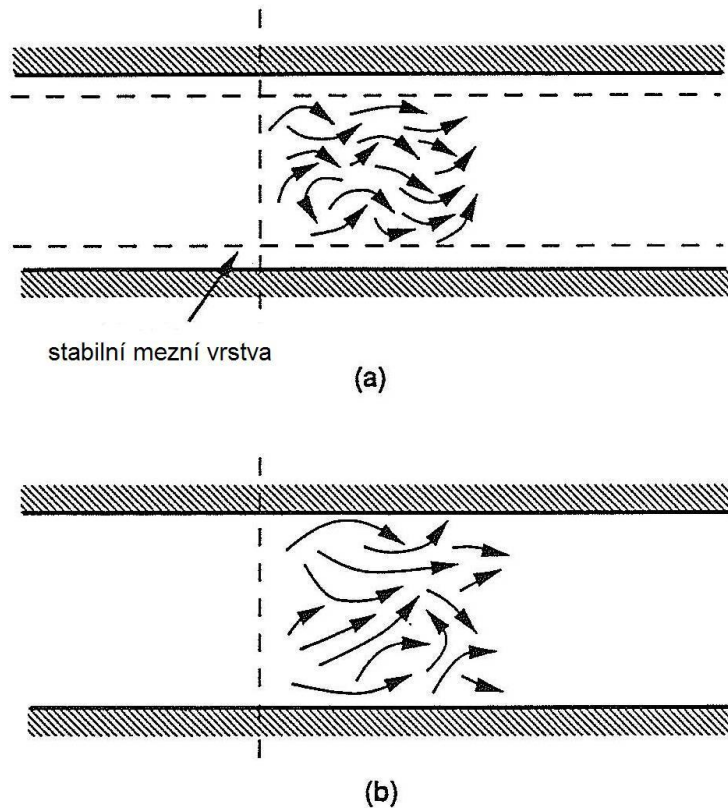
$$R_h = \frac{S}{O} \quad (2.2)$$

Při lití kovu je za nejlepší variantu z hlediska plnění obecně považováno proudění laminární. Při tomto druhu proudění jsou dráhy jednotlivých částic kapaliny navzájem rovnoběžné. Částice se pohybují, aniž by přecházely mezi jednotlivými vrstvami. V místě kontaktu taveniny s formou mají částice nulovou rychlost. Směrem od stěny, tedy místa kontaktu, se rychlost taveniny zvyšuje a dosahuje maxima v geometrické ose kanálu, kterým tavenina proudí. [3]



Obr. 2.11 Laminární proudění [3]

Při turbulentním proudění přechází částice mezi různými vrstvami kapaliny, čímž dochází k promíchávání jednotlivých vrstev kapaliny. Turbulentní proudění lze rozdělit na dva typy – se stabilní a nestabilní mezní vrstvou. [3]



Obr. 2.12 Turbulentní proudění se stabilní (a) a nestabilní (b) mezní vrstvou [3]

Pokud je mezní vrstva stabilní, tak je podobně jako u laminárního proudění rychlost na stěně formy nulová a to i přesto, že zbytek proudu taveniny se pohybuje zcela turbulentně. V případě nestabilní mezní vrstvy je vrstva proudem taveniny narušována a uvolněné objemy vtahovány do něj. Při kontaktu kovu se stěnou formy dochází k oxidaci kovu. Kov reaguje buď přímo s materiálem formy, nebo se vzduchem, jež se na rozhraní dostává pronikáním skrze formu. Tento proces se po odtrhnutí části mezní vrstvy opakuje, jelikož jsou dodávány stále další objemy kovu k oxidaci. Turbulentní proudění navíc urychluje přestup tepla skrze formu. [3]

Experimentálně bylo zjištěno, že Reynoldsovo číslo rozděluje typy proudění přibližně takto: [3]

- Re < 2000                    - laminární proudění
- 2000 < Re < 20000       - turbulentní proudění se stabilní mezní vrstvou
- Re > 20000                - turbulentní proudění s nestabilní mezní vrstvou

Jelikož je kinematická viskozita materiálovou charakteristikou, lze ve výpočtu Reynoldsova čísla ovlivnit pouze zbylé dvě veličiny – rychlost proudění a hydraulický poloměr. Snížením součinu těchto veličin lze dosáhnout laminárního proudění. Toto sebou ovšem nese jisté úskalí v podobě možného zamrznutí kovu při lití a z toho plynoucího nezběhnutí. Případně může být vlivem snížení hydraulického poloměru, např. zmenšením průřezu zářezů, odděleno tuhnutí tím, že tyto ztuhnou dříve než samotný odlitek. Vtoková soustava, jež u přesného lití současně plní funkci nálitku, nemůže dosazovat, čehož vyústěním je objemový nedostatek a vznik defektů.

Mnoho přesně litých součástí se vyznačuje velmi malou tloušťkou stěn. Plnění těchto stěn s sebou často přináší značné problémy. Zásadní vliv má v tomto ohledu tekutost. [9]

Tekutost tekutiny odpovídá převrácené hodnotě její dynamické viskozity: [9]

$$\varphi = \frac{1}{\eta} \quad (2.3)$$

Nad teplotou tavení slitiny je tekutost dostatečně velká, tudíž kov mění svůj tvar dle tvaru formy a vyplňuje ji určitou rychlostí. [9]

Pro slévárenskou praxi má význam především tekutost tavenin měřená v prostředí odpovídajícímu podmínkám lití. Takto definovaná technologická vlastnost se nazývá zabíhavost. Zabíhavost tedy charakterizuje schopnost kovu nebo slitiny vyplnit co nejdokonaleji slévárenskou formu, která je negativem odlitku. [9]

Zabíhavost souvisí zejména s tekutostí kovu nebo slitiny. Čím lepší je tekutost, tím lepší je i zabíhavost při stejných podmínkách. Tekutost slitiny se s klesající teplotou snižuje a v rozmezí teplot mezi likvidem a solidem dosahuje téměř nulové hodnoty (vysoký přetvárný odpor slitiny). Dalším faktorem, který se negativně podílí na zabíhavosti, je tvorba oxidických blan – zejména tedy u slitin hliníku. Ty proud brzdí, případně jej zcela zastaví, a také jsou důvodem tzv. studeného spoje – nespojení čel proudů. [9]

Schopnost kovu vyplnit tenkou stěnu roste s jeho teplotou a teplotou přehřátí formy, protože za těchto podmínek kovu trvá déle ztuhnout. Obě tyto teploty u přesného lití lze v rámci možností daných materiálů měnit a tím dosáhnout lepších výsledků. [9]

### **2.2.3 Tuhnutí kovu ve skořepinové formě**

Princip výroby odlitků spočívá v tuhnutí slévárenských slitin ve formě, která má dutinu ve tvaru budoucího odlitku. Proces tuhnutí slitiny je kromě vlastností této slitiny, popsány v samostatné kapitole, zcela kontrolován vlastnostmi formy, případně vnějšími vlivy, které obvykle ovlivňují tepelně-izolační vlastnosti formy. [3]

#### Šíření tepla

Šíření tepla (někdy též sdílení tepla nebo termokinetika) je jedním ze způsobů přenosu energie. [10]

*Teplo se prostředím šíří třemi základními způsoby:*

- Vedení (kondukce)

„Vzniká v důsledku pohybu a interakcí základních částic hmoty. Molekuly s vyšší kinetickou energií odevzdávají část své energie sousedním molekulám s nižší energií. Při vedení tepla dochází jen k přenosu energie, ne k přemísťování hmoty.“ [10]

- Proudění (konvekce)

„Přenos tepla je realizován proudící tekutinou. Přenos tepla konvekcí v sobě zpravidla spojuje přenos tepla vedením (výměna tepla mezi tekutinou a pevnou stěnou) a proudění kapaliny.“ [10]

Konvekci lze dále dělit dle podmínek: [10]

- volná (přirozená) konvekce – pohyb média je vyvolán jenom gradientem teploty
- nucená konvekce – pohyb média vzniká následkem gradientu tlaku
- konvekce v omezeném a neomezeném prostoru

- Záření (sálání, radiace)

„Přenos tepla je realizován prostřednictvím elektromagnetického vlnění, resp. pomocí elementárních částic (fotonů). Každé těleso, kapalné i pevné, je zdrojem elektromagnetického vlnění, tzv. tepelného záření, vznikajícího v důsledku kmitání nabitých částic, z nichž se těleso skládá.“ [10]

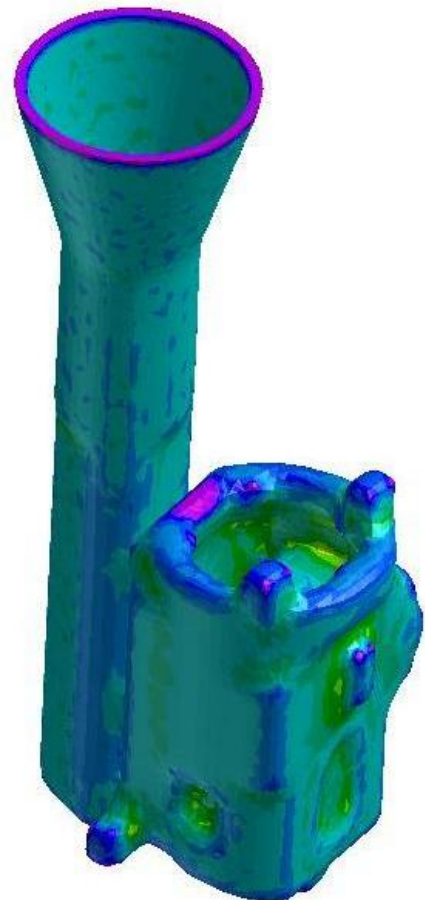
„Při interakci záření s látkou dochází ke třem jevům: část záření se odrazí, část se pohltí a část projde. V ideálním případě, kdy se všechna energie přenáší pouze jediným způsobem, dělíme tělesa na dokonale černá (vše absorbuje), dokonale bílá (vše odráží) a dokonale průteplivá (vše propouští).“ [10]

Teplu se vždy šíří od místa s vyšší teplotou k místu s nižší teplotou. Tepelná energie se může šířit vedením a prouděním pouze v prostředí, které je vyplněno látkou. Příčinou šíření je neustálý pohyb částic hmoty. Vzájemným působením mezi jednotlivými částicemi (např. srážkami) dochází k předávání kinetické energie a to po takovou dobu, dokud nedojde k vyrovnání teplot. [10]

Tepelné záření se svojí povahou odlišuje od proudění a vedení, neboť tepelná energie se může přenášet i v prostoru, který není vyplněn látkou (tedy i ve vakuu). Důvodem je skutečnost, že sálání představuje elektromagnetické záření, které ke svému přenosu hmotu nepotřebuje. [10]

#### Teplotní režim skořepinové formy

Skořepinové formy se ve finální fázi výroby žíhají v žíhacích pecích za vysoké teploty z důvodu odstranění zbytků nežádoucí látky, jako jsou vosk a voda, a zejména z důvodu dosažení vysoké pevnosti formy. Toto žíhání probíhá obvykle minimálně po dobu jedné hodiny, proto aby bylo dosaženo homogenního teplotního pole v celém průřezu formy. Teploty



Obr. 2.13 Simulace ochlazování formy před odlitím

Žihání a náběh na ni závisí na materiálu formy a druhu odlévaného materiálu. Obvyklé žihací teploty se pohybují okolo 1000°C. Vlastní odlití je vhodné provést v co nejkratším časovém úseku od vyjmutí formy z žihací pece, jelikož forma velmi rychle ztrácí teplotu a samotné teplotní pole je vlivem geometrie formy deformováno. [1]

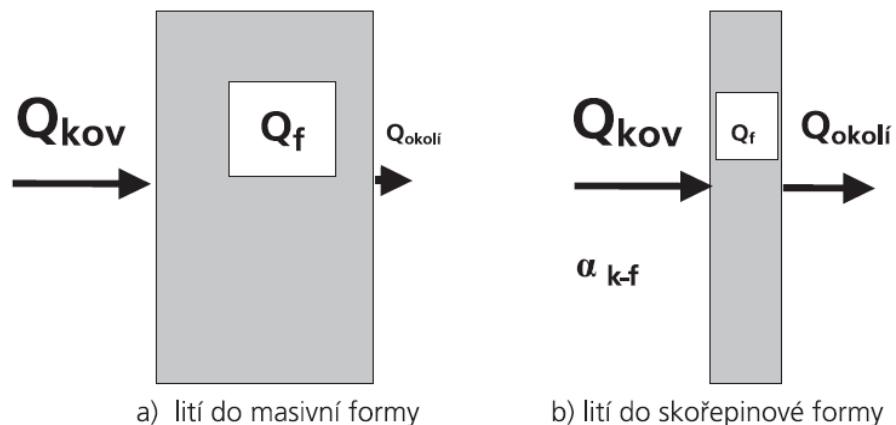
Výchozí teplotní pole odlitku po odlití je tedy určeno teplotním polem formy v okamžiku lití a způsobem plnění dutiny formy. Kov je v této fázi z největší části ochlazován akumulací tepla do stěn formy. Aby kov mohl ztuhnout, je z něj nutno odvést teplo přehřátí a krystalizační teplo. Toto, pokud nepočítáme odvod tepla skrze volnou hladinu kovu v nálevce, musí být z kovu odvedeno již zmíněnou akumulací tepla ve stěně formy a odvodem tepla přes skořepinu do okolí. [11]

*Pro tento děj platí vztah:*  $dQ_{kovu} = dQ_{formy} + dQ_{okolí}$  (2.4)

Skořepinová forma má oproti klasické pískové formě diametrálně odlišný poměr tepla odvedeného do okolí k teple akumulovanému vlastní formou. Akumulace formy závisí na její hmotnosti, materiálu a teplotě. Veličinou zastupující vliv materiálu formy je měrná tepelná kapacita. Pojem kapacita je v tomto ohledu zavádějící, protože se nedá tvrdit, že materiál formy je schopen akumulovat určité přesně stanovené teplo. Měrná tepelná kapacita i teplo nejsou stavovými veličinami. Měrná tepelná kapacita určuje, jaké množství tepla zvětší teplotu tělesa o jednotku. Množství akumulovaného tepla tedy závisí na rozdílu teplot mezi materiálem teplo odevzdávajícím a přijímajícím. Pokud je tedy mezi dvěma materiály nenulový teplotní gradient, dochází neustále k přenosu. Tento přenos bude tedy probíhat až do vyrovnání teplot materiálu. Rozdělení množství tepla, které je forma jako celek schopna akumulovat k teple, které forma předá do okolí, závisí na poměru hmotnosti kovu k hmotnosti formy a teplotě formy při lití. Význam akumulace roste se snižující se tloušťkou stěny odlitku. Vysoká teplota formy naopak významně zvyšuje vliv odvodu tepla do okolí na úkor akumulace tepla ve stěně formy. U masivních pískových forem případně při lití do kokil se většina tepla akumuluje ve stěně formy. U forem pro lití metodou vytavitelného modelu se vzhledem k vysoké teplotě formy a nižšímu poměru hmotnosti formy k odlitku ponejvíce uplatní odvod tepla do okolí. [11,12]

*Pro teplo akumulované formou platí obecně vztah:*

$$dQ_{formy} = m \cdot c \cdot dT_1 \quad (2.5)$$



Obr. 2.14 Podíly akumulovaného a odvedeného tepla u masivních forem a skořepin během tuhnutí kovu [11]

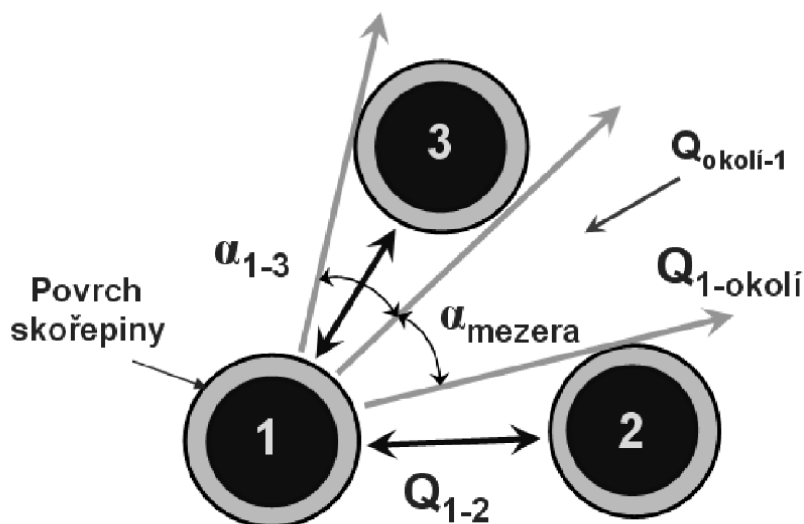
Přestup tepla ze skořepiny do okolí se může dít všemi třemi základními ději – konvekcí, sáláním i vedením. [11]

Platí vztah:

$$dQ_{okolí} = dQ_{konvekce} + dQ_{radiace} + dQ_{vedení} \quad (2.6)$$

Uplatnění odvodu tepla vedením je podmíněno kontaktem formy s podložkou a jejími vlastnostmi. Např. skořepina uložená v pískovém loži bude mít jiný odvod tepla vedením než tatáž odlévaná na kovovém roštu.

U technologie vytavitelného modelu je nutno brát v úvahu obvykle velmi složitou geometrii formy, tvořenou často několika členitými odlitky a složitou vtokovou soustavou. V takto prostorově složitém seskupení stěn, potažmo elementů, dochází k vzájemnému tepelnému ovlivňování jednotlivých částí – osálávání. Z tohoto důvodu je nutno tepelnou bilanci jednotlivých elementů řešit v úplně nebo částečně uzavřeném prostoru, jež zohlední tvarovou konfiguraci vlastní formy, případně radiační vliv okolního prostředí. [11]



Obr. 2.15 Přenos tepla sáláním mezi elementy formy

Celkový odvod tepla do okolí, bez uvažování vedení tepla do podložky, je závislý na rozdílu teplot vnějšího povrchu formy a teploty okolí, ochlazované ploše formy a na celkovém efektivním součiniteli přestupu tepla, který je tvořen složkou radiační a konvektivní. [11]

$$dQ_{okolí} = \alpha_{celk} \cdot S_1 \cdot dT_2 \quad (2.7)$$

$$\alpha_{celk} = (\alpha_{rad} + \alpha_{konv}) \quad (2.8)$$

Koeficient  $\alpha$  je závislý na řadě veličin, které jsou charakteristické pro danou látku a daný stav proudění. Nejde tedy o materiálovou konstantu (jako např. tepelná vodivost). Hodnota součinitele  $\alpha$  je obvykle určována experimentálně. Je třeba si uvědomit, že mezi jednotlivými částmi - elementy odlitky i skořepiny, panují značné tepelné rozdíly vlivem nehomogenity tepelných polí těchto částí. To společně se složitostí tvaru takto řešené

soustavy vede prakticky k jedinému možnému řešení tohoto komplexního problému – numerické simulaci. [11]

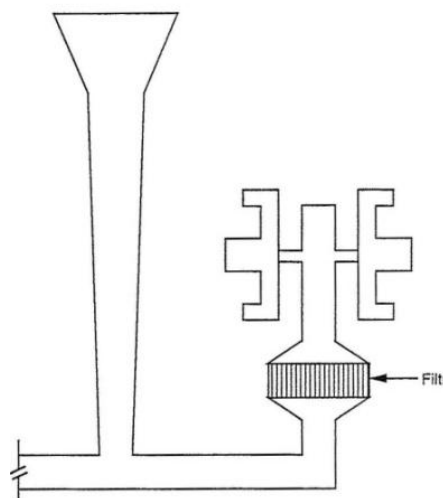
#### 2.2.4 Filtrace

Jedním z důležitých hledisek konstrukce vtokových soustav je účinnost zachycování vměstků. Většinou byla separace založena na principu různých hustot kovu a vměstků. Tohoto principu je možno využívat především u slitin železa, jelikož u nich mají vměstky značně nižší hustotu než kov. Oproti tomu u slitin s hustotou prakticky shodnou s hustotou vměstků – typicky u slitin hliníku, nelze tímto mechanismem vměstky zachycovat a je nutno uplatnit jiné principy. Často se využívá faktu, že se vměstky ve vtokové soustavě nalepují na stěnu formy. Zejména vměstky typu oxidických blan lze uspokojivě zachycovat v plochých kanálech vtokové soustavy, u přesného lití, kde se často využívá vtokové soustavy jako nálitku, nelze tento způsob z hlediska usměrňování tuhnutí doporučit. Účinnost těchto metod separace je navíc pouze omezená. [13]

Zhruba od poloviny 60. let se ve slévárnách začala používat keramická „cedítka“, která se umísťovala nejčastěji do vtokové jamky v místě přechodu do kůlu. Jejich účelem bylo v první řadě zachycení hrubých částic strusky. Koncem 70. let se začaly používat prostředky pro zachycení vměstků přímo ve vtokové soustavě v podobě keramických filtrů. V počátku byla jejich aplikace spojena s odléváním hliníkových slitin, především pro letecký průmysl. [13]

Cílem filtrace je zachycení nečistot, které se do vtokové soustavy dostávají společně s kovem, tyto vznikají během jeho tavení a další manipulace, např. z tavicí pece, licí pánve nebo odlévacího zařízení, a také zachycení nových nečistot, které vznikají až v průběhu lití při oxidaci kovu. Proto je vhodné filtr umístit co nejbližší samotnému odlitku. [13]

Při přesném lití, vyjma lití ve vakuu, se nedoporučuje umísťovat filtr přímo do licí jamky nebo kůlu. Proud kovu, který protéká filtrem, se dělí na kapičky případně na více proudů, což přispívá k vyšší oxidaci. Dále je proud kovu filtrem brzděn, tudíž se prodlužuje licí doba a to může být příčinou nezaběhnutí, zejména u tenkostěnných odlitků. Doporučuje se filtr umístit co možná nejbližší dutině budoucího odlitku. Nejlépe jej umístit tak, aby jím kov procházel směrem vzhůru, tedy aby se proud kovu netříštil. [3]



Obr. 2.16 Doporučené umístění filtru [3]

Pro přesné lití se používá zejména objemových keramických filtrů. Tyto nemají pouze funkci mechanického čištění, tedy zachycení vměstků větších než jsou otvory ve filtru, ale umožňují i hloubkovou filtraci, která spočívá v ulpívání vměstků na stěnách filtru. K tomuto přispívá zpomalení proudu kovu vlivem tlakové ztráty při průchodu filtrem, nejvíce však fakt, že výrazně klesne hydraulický rádius, jelikož filtr má velký smáčený obvod. [13]

Dalším typem filtrů užívaných pro přesné lití jsou tzv. tkaninové filtry. Tyto jsou vyrobeny ze žáruvzdorných tkanin a zachycují zejména vměstky typu oxidických blan. Pro zlepšení filtrační účinnosti je možno tkaninu filtru aktivovat napuštěním speciální pryskyřicí. Tkaninové filtry se vyznačují nízkou tepelnou kapacitou, proto je možné do jedné formy umístit několik filtrů na různých místech vtokové soustavy. To umožňuje např. na prvním filtru zachytit nečistoty vstupující do formy s tekutým kovem a na dalších filtrech odstranit drobnější vměstky, které vznikly až ve vtokové soustavě. [13]

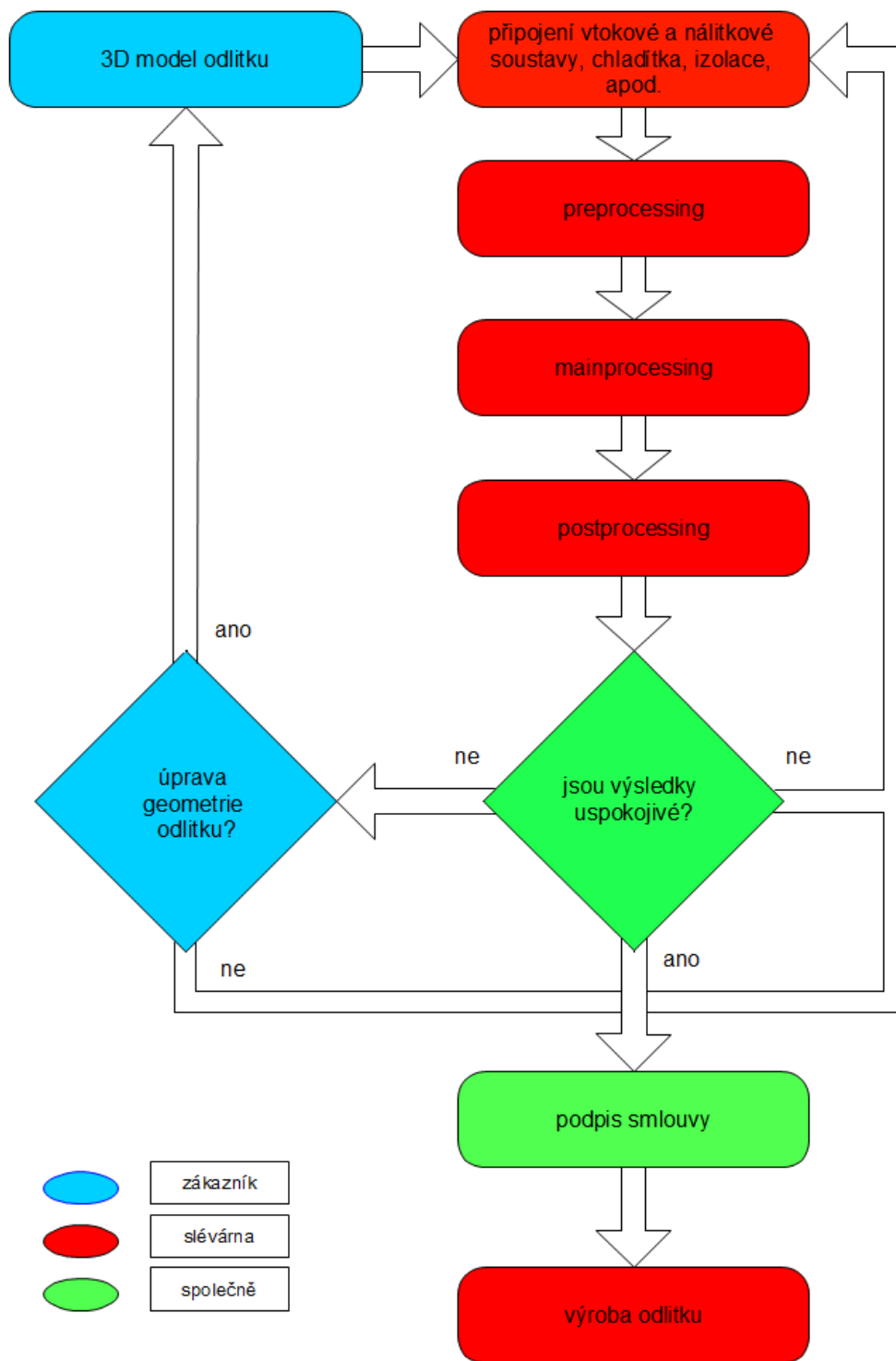


## 2.3 Simulace ve slévárenství

Slévárenskou výrobu obecně lze v současnosti charakterizovat stoupajícími nároky zákazníků, globalizací trhu, recesí objemu výroby a zvětšením poměru malosériových a středněsériových zakázek na úkor velkosériových. Pokud má být slévárna konkurenceschopná, musí za těchto podmínek hledat cesty ke snížení výrobních nákladů při zachování, lépe však zvýšení kvality produktů. Jednou z těchto cest je i numerická simulace, která si již našla své pevné místo při analýze a optimalizaci slévárenských procesů. Jejím prostřednictvím lze značně vylepšit některé parametry procesu, například zvýšit využití kovu. Dále se využití softwarů numerické simulace kladně projevuje na snížení objemu neshodné výroby. [14,15]

Obecně lze tedy hovořit o velmi pozitivním vlivu na celkovou jakost odlitků, potažmo rozvoj celého slévárenského oboru. Vzhledem ke značnému vývoji na poli počítačové techniky i samotných softwarů se dnes již nejedná o technologii nedostupnou i malým a středním podnikům. Je třeba si ovšem uvědomit, že tyto programy nenavrhují samotné řešení daného problému, nýbrž pouze simulují procesy do nich vložené. U daného procesu umožňují dosáhnout velmi přesných výsledků blízkých realitě, ovšem jen za předpokladu, že vstupní data budou co nejbližší skutečným. Práce slévárenského technologa je nezastupitelná, neboť je v procesu návrhu vstupních parametrů hybným a řídicím členem, jelikož pro koncepční rozhodování se nedají stanovit pevná pravidla a konkrétní řešení závisí na důvtipu a zkušenosti každého technologa. Numerická simulace je „pouze“ nástrojem ověřovacím, který se však v ruce schopného technologa stává neocenitelným pomocníkem. Navíc jej dále vzdělává a učí jej chápat souvislosti procesu, čímž mu umožňuje další odborný růst. Slévárenský technolog také následně zajišťuje implementaci provedených analýz do provozního prostředí a odpovídá za kvalitu a efektivnost každého jednotlivého odlitku. [15]

Simulace je zejména vývojovým prostředkem, který napomáhá vyrobit odlitek tzv. „napoprvé dobře“. To nejenom eliminuje další náklady spojené s úpravou technologie (např. úprava nebo výroba zcela nové matečné formy), ale zejména odstranění těchto případných problémů vytváří časovou úsporu, čehož důsledkem jsou kratší dodací lhůty samotných odlitků. Také je možno provést simulaci již v samotném nabídkovém řízení, zvážit její výsledky a na tomto základě následně značně snížit riziko případných sankcí ze strany odběratele za pozdní dodání či nekvalitu.



Obr. 2.17 Užití numerické simulace při výrobě odlitků

## 2.4 Simulační software ProCast

### 2.4.1 Charakteristika softwaru ProCast

Software ProCast je modulární systém založený na metodě konečných prvků, který lze využít pro simulaci valné většiny technologií používaných ve slévárenství – technologie gravitačního odlévání do pískových a kovových forem, lití do skořepin, dále pro tlakové lití (vysokotlaké, nízkotlaké), odstředivé lití, metodu Lost Foam a pro tzv. semi-solid procesy (např. Thixocasting). Umožňuje také zahrnout vliv filtrů, izolací, exo-členů a chladítek. [16]

*Software je rozdělen do tří základních částí – modulů:* [17]

1. Preprocessing – vstup dat
2. Mainprocessing – vlastní výpočet
3. Postprocessing – výstup dat

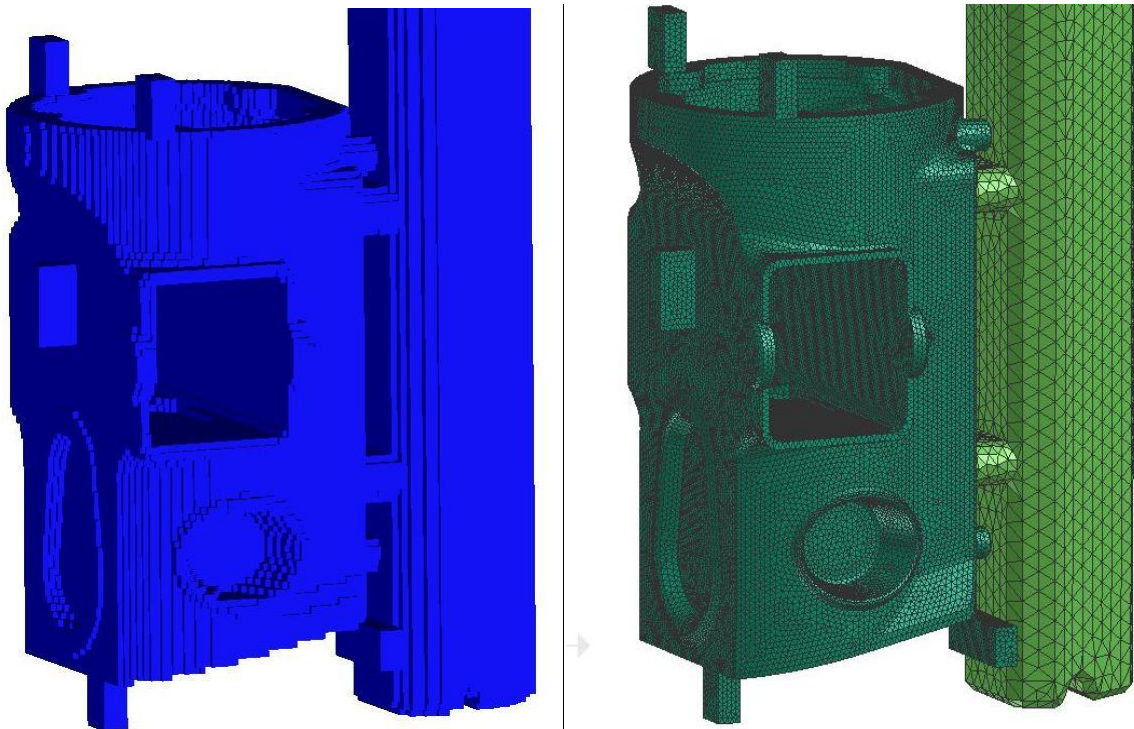
*Simulovat lze:* [17]

- teplotní toky, včetně vzájemného osálávání elementů
- proudění tekutin při plnění formy
- zbytková pnutí v odlitku
- mikrostrukturu
- porezitu

### 2.4.2 Geometrie a síťování

Software ProCast obsahuje 3D generátor tetraedrálních sítí – MeshCast. Tento umožňuje import CAD geometrií, přičemž obsahuje analytický nástroj, který usnadňuje spojení mezi touto CAD geometrií a operacemi síťování. Podporované vstupní CAD rozhraní jsou: IGES, STEP, VDA, Parasolid, Unisurf, ACIS, Unigraphics, AutoCAD, CATIA. CAD geometrie je za pomoci tohoto podprogramu převedena na konečný počet jednoduchých prvků – konečných prvků, které jsou spojeny v konečném počtu uzlových bodů na hranici těchto prvků. Pro přesné lití je zde možno automaticky vytvořit skořepinovou formu, včetně možnosti zadání jednotlivých vrstev formy s různými parametry. Konečnoprvkové sítě je také možno spojovat, případně užít Booleovských operací. [18,19]

V simulačních programech určených pro oblast slévárenství se v současné době používají v drtivé většině dvě metody tvoření sítí. Jedná se o metodu konečných prvků (MKP) a metodu konečných diferencí (MKD). Méně časté užití metody MKP, vzhledem k metodě MKD, je možné objasnit tím, že na vývoj softwarů používajících MKD bylo vynaloženo mnohem více finančních prostředků. I když jsou metody založeny na určité diskretizaci kontinua, má MKP určité přednosti. Dovoluje například přesnější geometrický popis při složitých tvarech odlitku. Také dává možnost místně zjemnit síť ve významných nebo geometricky složitých částech diskretizované oblasti. Nevýhodou MKP je značná náročnost na výpočetní výkon hardwaru. Tento problém byl ovšem již vyřešen značným rozvojem na poli výpočetní techniky. [19]



Obr. 2.18 Zesíťovaná část stroječku (vlevo MKD, vpravo MKP)

### 2.4.3 Preprocessing

V rámci tohoto kroku jsou, po načtení konečnoprvkové geometrie, uživatelem zadávána všechna vstupní data potřebná pro samotný výpočet – mainprocessing. Výstupem tohoto kroku reprezentovaného podprogramem PreCast jsou datové soubory, které je taktéž možno zpětně načíst a upravit podmínky do nich zadané. [17]

#### Materiálová databáze

Software ProCast je standardně dodáván s rozsáhlou materiálovou databází, která je stále rozšiřována. Databáze je neustále zpětně kontrolována ve spolupráci s podniky. ProCast dále obsahuje unikátní kalkulátor, který umožňuje přímo vložit chemické složení slitiny a na tomto základě vygenerovat hodnoty potřebné pro vlastní výpočet procesu. [18]

### 2.4.4 Mainprocessing

#### Výpočet plnění

Popis geometrie, založený na metodě konečných prvků, je základem k predikci proudění kovu uvnitř formy při vysoké přesnosti. Je možno simulovat charakter proudění, erozi formy, nezaběhnutí a studené spoje a také rozložení plynu ve formě. Výpočet proudění kovu je založen na Navier-Stokesově rovnici a může být spojen s teplotní a napěťovou analýzou. Výpočet zohledňuje např. změnu proudění taveniny při průchodu filtrem, vliv zpětného tlaku při tlakovém lití apod. Dále mohou být spuštěny specifické modely pro analýzu turbulentního proudění, thixotropické a polotuhé materiály, odstředivé lití, lití na spalitelný model a vstřelování jader. [18]

### Teplotní výpočet

Tento výpočet dovoluje simulovat tepelný tok, přičemž bere v úvahu všechny tři základní druhy šíření tepla prostředím – vedení, proudění, záření. Vývin tepla spojený s fázovými změnami během tuhnutí a chladnutí odlitku je popsán entalpií materiálu. Teplotní výpočet řeší problémy spojené s tepelnými uzly, porezitou, makro a mikro staženinami. Lze pomocí něj řešit cyklování u tlakového lití. [16,18]

### Napěťový výpočet

Moderní výpočet napětí v odlitku je plně propojen se simulací plnění, teplotním výpočtem a s elasticko-plastickými případně elasticko-viskoplastickými vlastnostmi materiálu. Predikovat lze: [18]

- Teplotní a mechanický kontakt
- Deformaci
- Napětí v odlitku a formě
- Zbytková pnutí
- Vznik trhlin a prasklin
- Únavu materiálu

#### **2.4.5 Postprocessing**

Analýzou výsledku výpočtu proudění kovu při plnění formy je možno určit, zda-li je charakter plnění vyhovující vzhledem k odlévanému typu slitiny. Případně dojde-li k zaplnění celé dutiny formy, či hrozí vznik studených spojů nebo zavalenin. [16]

Dále program napomáhá optimalizovat vtokovou a nálitkovou soustavu, např. určit vhodnost vtokového systému vzhledem k rozložení teplotního pole a dosazování. Z výsledků se dají určit kritická místa odlitku, ve kterých je možný výskyt vad, a tím pádem je možno navrhnout optimálnější řešení a to nejen z hlediska parametrů zadaného procesu, nýbrž i s ohledem na dimenze jednotlivých technologických prvků. Program určí možná místa výskytu staženin a ředin, ověří správnost navrhované polohy a velikosti nálitků, případně určí jejich využití a dostatečnost. Z výsledků je také možno usuzovat, zda se výsledná kvalita odlitků dá zlepšit pouhou úpravou stávajících technologických prvků, nebo je nutno například ovlivnit teplotní pole jinými prostředky (izolace, chladítka, atd.) [16]

## 2.5 Slitiny Al-Si-Mg [20]

Slitiny tohoto typu jsou charakteristické obsahem hořčíku v obvyklém rozsahu 0,25-0,45%, případně až do 0,7%. Hořčík dovoluje realizovat vytvrzování za tepla. Při obvyklé rychlosti ochlazování je hořčík ve slitině vylučován jako  $Mg_2Si$ . Většina odlitků se tepelně zpracovává, jelikož mechanické vlastnosti v litém stavu dosahují jen průměrných hodnot. Vysoké mechanické vlastnosti lze získat až vytvrzováním.

Slitiny Al-Si-Mg jsou výhradně podeutektické, přičemž se dle obsahu křemíku dělí na dva typy – slitiny AlSi7Mg a AlSi10Mg. Slitiny s nižším obsahem křemíku mají horší slévárenské vlastnosti a taktéž horší svařitelnost. Obsahy dalších doprovodných prvků jsou limitovány na velmi nízké hodnoty.

Tyto slitiny se odlévají do pískových, keramických i kovových forem. Mohou se odlévat buď gravitačně, nebo pod tlakem.

Odlitky ze slitin Al-Si-Mg se používají zejména pro vysoce namáhané součástky, ponejvíce v automobilovém a leteckém průmyslu. Vlivem vytvrzení se dosahuje vysokých mechanických vlastností  $R_m$ ,  $R_{p0,2}$  a HB. Naproti tomu se nepatrně snižuje tažnost. Vzhledem ke zvýšení pevnosti matrice působením hořčíku se zlepšuje i obrobitelnost.

### Slitina AlSi7Mg0,3

Jedná se o vysokopevnou slitinu s dobrou houževnatostí i tažností. Množství příměsí a nečistot je omezeno na minimum. Je charakteristická velmi dobrými slévárenskými vlastnostmi, dobrou odolností proti korozi, svařitelností i obrobitelností.

Nepoužívá se pro vysokotlaké lití. Doporučuje se provádět zjemnění primárního zrna očkovaním na bázi Ti a B a modifikaci eutektika. Odlitky se používají ve stavu T6 – vytvrzeném, (rozpuštěcí žíhání 12 hodin při 530-535°C, ochlazení do teplé vody, precipitace 3-5 hodin při 150-160°C) nebo T7 – vytvrzení a stabilizace (2-5 hod při 200-250°C).

Tab. 2.1

Označení slitiny		Chemické složení (%)							Obsah nečistot (%)	
číselné	chemické	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	jeden prvek	celkem
EN AC-42100	EN AC-AISi7Mg0,3	6,5-7,5	0,19	0,05	0,1	0,2-0,45	0,07	0,08-0,25	0,03	0,1

Tab. 2.2

Mechanické vlastnosti					
forma	Stav slitiny	$R_m$ (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A50 (%)	HBS
kovová	T6	290	210	4	90
písková	T6	230	190	2	75

Tab. 2.3

Slévárenské vlastnosti			
zabíhavost	odolnost proti vzniku trhlin	nepropustnost	
B	A	B	
Technologické vlastnosti			
obrobitelnost	svařitelnost	odolnost proti korozi	anodická oxidace
B	B	B	D

## 3 PRAKTICKÁ ČÁST

Hlavním úkolem této diplomové práce bylo optimalizovat výrobu odlitku litého metodou vytavitelného modelu. Tento úkol byl řešen ve spolupráci se společnostmi FIMES, a.s. a MECAS ESI s.r.o.

Společnost FIMES, a.s., dceřiná společnost MESIT Hoding, a.s., je pokračovatelem někdejších provozů SLÉVÁRNY a NÁSTROJÁRNY původní mateřské firmy MESIT a.s. Je nositelem více než padesátileté tradice přesně litých odlitků v Uherském Hradišti. [21]

Společnost MECAS ESI, s.r.o. zastupuje v zemích střední a východní Evropy společnost ESI GROUP, která vyvinula software ProCast. [22]

Jako nástroj optimalizace byl zvolen slévárenský simulační program ProCast (kapitola 2.4). Bylo zapotřebí co nejpřesněji nastavit vstupní podmínky. Ty se určily na základě dat pořízených ve společnosti FIMES, a.s. a dále na základě mnohaletých zkušeností společnosti MECAS ESI, s.r.o.

Dále byl proveden rozbor výsledků simulace a jejich porovnání se skutečností. Na základě těchto výsledků lze případně navrhnout takovou úpravu technologie výroby, která by vedla k dosažení lepších výsledků.

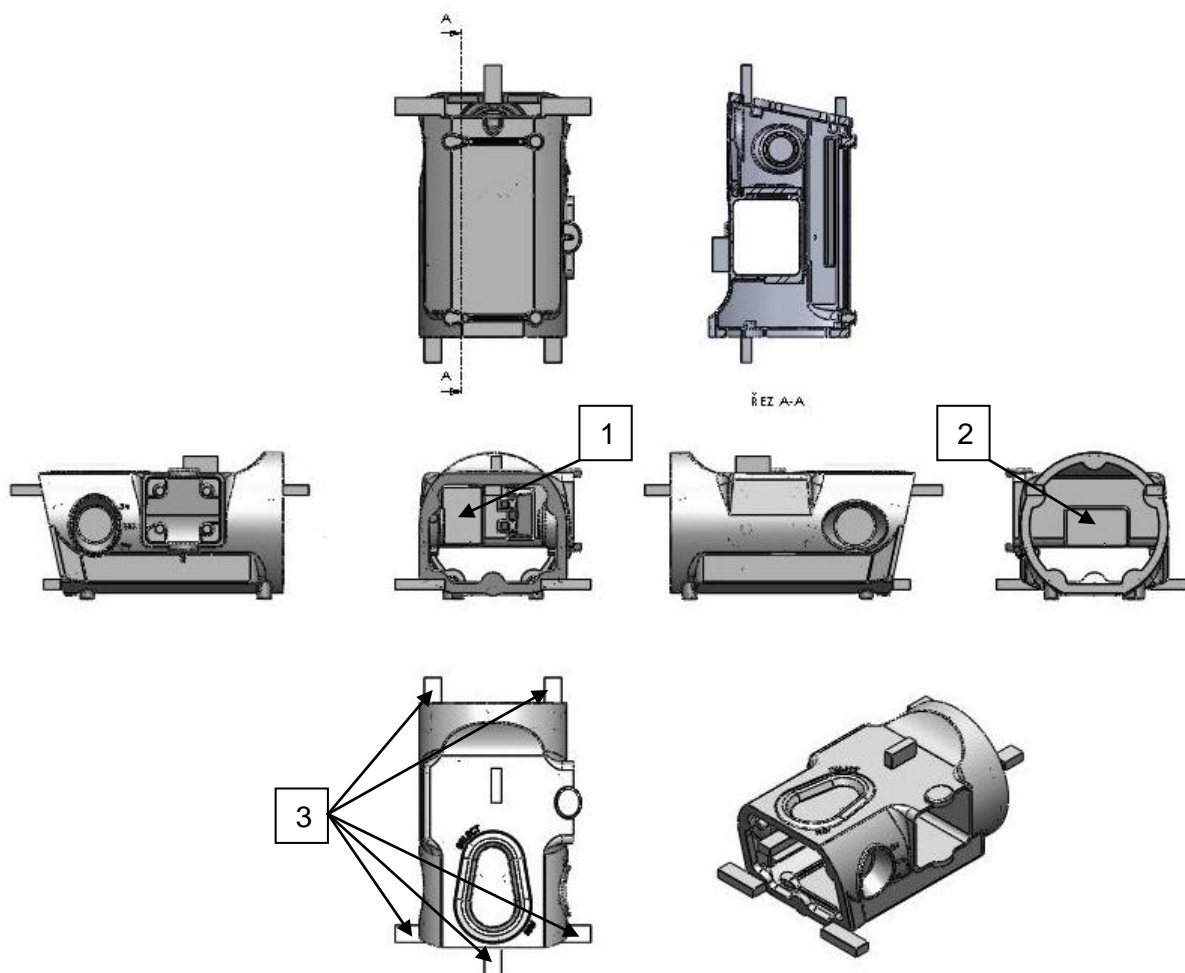
### 3.1 Řešený odlitek

Společně se slévárnou Fimes, a.s. byl k optimalizaci vybrán vhodný odlitek. Jedná se o tenkostěnný tvarově složitý kus dodávaný zahraničnímu zákazníkovi. Materiál odlitku EN AC-AISI7Mg0,3. Váha odlitku 334g.

Výroba tohoto odlitku činila značné problémy – podíl neshodné výroby ve vzorkových sériích přesahoval 90%. Jelikož se jedná o odlitek pro obranný průmysl, je tento 100% rentgenován a prochází penetrační zkouškou. Drtivá většina vad, jež byly odhaleny během rentgenového prozařování, souvisela s vnitřní neintegritou dílu. Tento fakt poukazuje prakticky na tři možné příčiny:

- a) zavalenina - nespojení vlivem příliš nízkých teplot čel proudů taveniny
- b) plyn ve slitině – naplynění taveniny nebo plyn uzavřený ve formě
- c) neusměrněné tuhnutí – špatné dosazování, vznik tepelných uzlů v odlitku

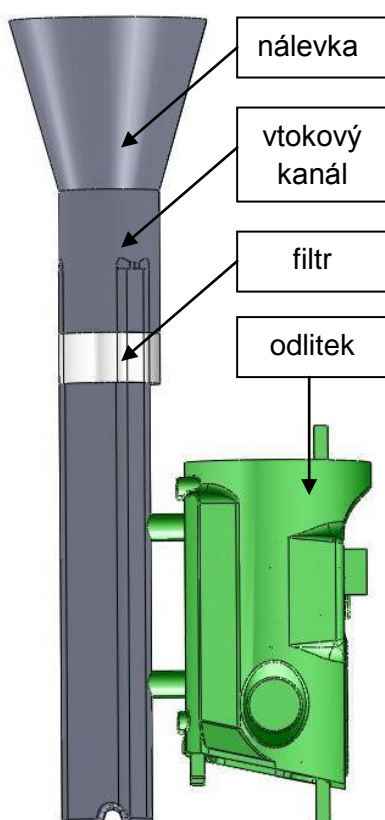




Obr. 3.1 Odlitek

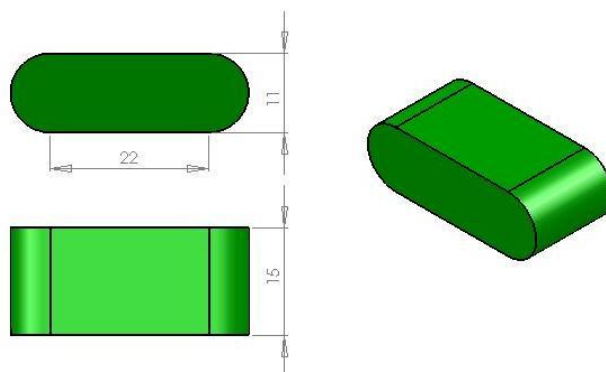
Pozn. Objemy „3“ viz obr. 3.1 složí k upínání odlitku při obrábění (tzv. referenční plochy) a po tomto úkonu jsou ze součásti odstraněny. Nejsou na ne tudíž kladeny významnější nároky z hlediska vnitřní kvality. Oproti tomu plochy „1“ a „2“ jsou dále obráběny a mají být co nejkvalitnější.

## Výchozí stav



Obr. 3.2 Varianta 0 – Stromeček

Výchozí stav (dále varianta 0) odpovídá výrobě odlitku, jak byla prováděna v ověřovací sérii. Jediný odlitek je připojen dvojicí rozměrově shodných zářezů ke vtokovému kanálu velikosti 280 mm s nálevkou vysokou 70 mm (ve skutečnosti tvarově složitá, pro účely simulace zjednodušeno). Ve vtokovém kanálu je umístěn filtr VUKOPOR 42/37x22 A15. Jedná se o keramický pěnový filtr. Tvar a rozměry zářezů jsou na obr. 3.3



Obr. 3.3 Varianta 0 – zářez

## Parametry skořepiny

Tab. 3.1 Parametry skořepiny

obal	keramická břecha		posyp
	pojivo	moučka	
1.	R+R Customcote	50 % Zirkon 325 mesh 50 % Fused silica PR1 200 mesh	Fused silica RG 1
2.	Remasol SP Ultra 2408	Remasil 48 RP 200 C	Remasil 48 RG 50
3.	Remasol SP Ultra 2408	Remasil 48 RP 200 C	Remasil 48 RG 50
4.	Remasol SP Ultra 2408	Remasil 48 RP 200 C	Remasil 48 RG 25
5.	Remasol SP Ultra 2408	Remasil 48 RP 200 C	Remasil 48 RG 25

## Příprava taveniny

Kov je taven v elektrických odporových kelímkových pecích. Vsázka je složena z 50 % vratu a 50 % nového materiálu. Chemické složení kovu se kontroluje pomocí optického emisního spektrometru.

Úprava taveniny pro tento odlitek se děje v těchto krocích: [20]

- Rafinace

Rafinace je proces, při kterém se v tavenině snižuje množství vměstků. Používá se rafinační sůl Coveral GR 2410.

- Očkování

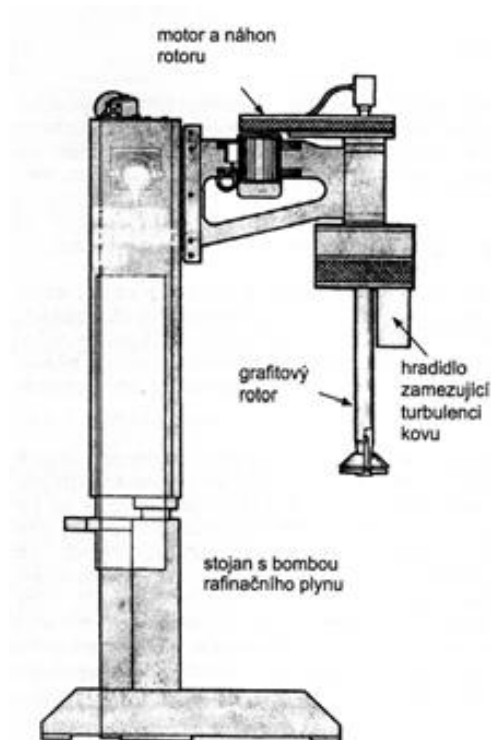
Účelem je zjemnění primární fáze. Provádí se vnášením nukleačních zárodků, resp. látek, ze kterých se nukleační zárodky tvoří. Očkování se provádí předslitinou Al-Ti-B.

- Modifikace

Modifikací se rozumí změna morfologie eutektika. Tento krok se provádí pomocí exotermických modifikačních tablet, které obsahují sodík.

- Odplyňování

Odplyňování je prováděno pomocí rotorové odplyňovací jednotky. Principem je probublávání nosného plynu, v tomto případě vysoce čistého dusíku, taveninou. Míchání taveniny společně s velkým množstvím drobných bublinek proudících z rotoru zajišťuje rychlé a účinné odplyňování.



Obr. 3.4 Rotační odplyňovací jednotka [20]

Měření naplynění je prováděno pomocí měření hustoty kovu – metodou dvojího vážení. Podnikovou normou je hodnota tzv. indexu hustoty „DI“ (z německého „Dichte Index“) omezena na  $DI < 2\%$ .

## Parametry lití

Tab. 3.2 Parametry lití

Forma – skořepina - teplota v žíhací peci - teplota při začátku lití	570 °C 565 °C
Typ odlévacího zařízení (pánev, licí výška)	Ruční pánev, 15 cm
Doba lití	4 s
Teplota lití	730 °C
Teplota okolí při lití a tuhnutí	30 °C
Průřez licího proudu	15 mm
Sklon formy, směr gravitace	Vertikální směr bez náklonu
Doba chladnutí skořepiny před litím	5 s
Licí lože - materiál - teplota	Ocelový rošt 30 °C

## Vlastní simulace

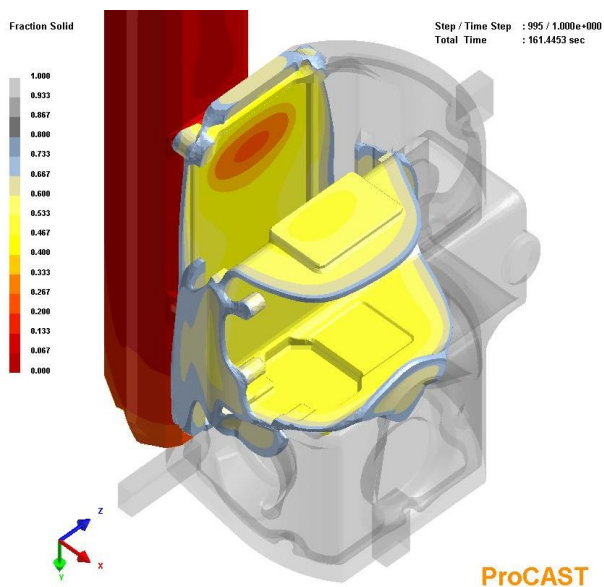
### *Plnění*

Simulaci plnění si lze prohlédnout v souboru plnění\_V0.avi na přiloženém CD. Umístění zářezů kolmo do tenké stěny není ideální volbou. Plnění nicméně probíhá klidně. Ve stěně, kde byl následně odebrán vzorek č. 3, dochází k uzavření významnějšího množství plynů, což může vést ke vzniku bublin v odlitku (keramická forma je málo prodyšná). Výhodou takto umístěných zářezů je snadná apretace.

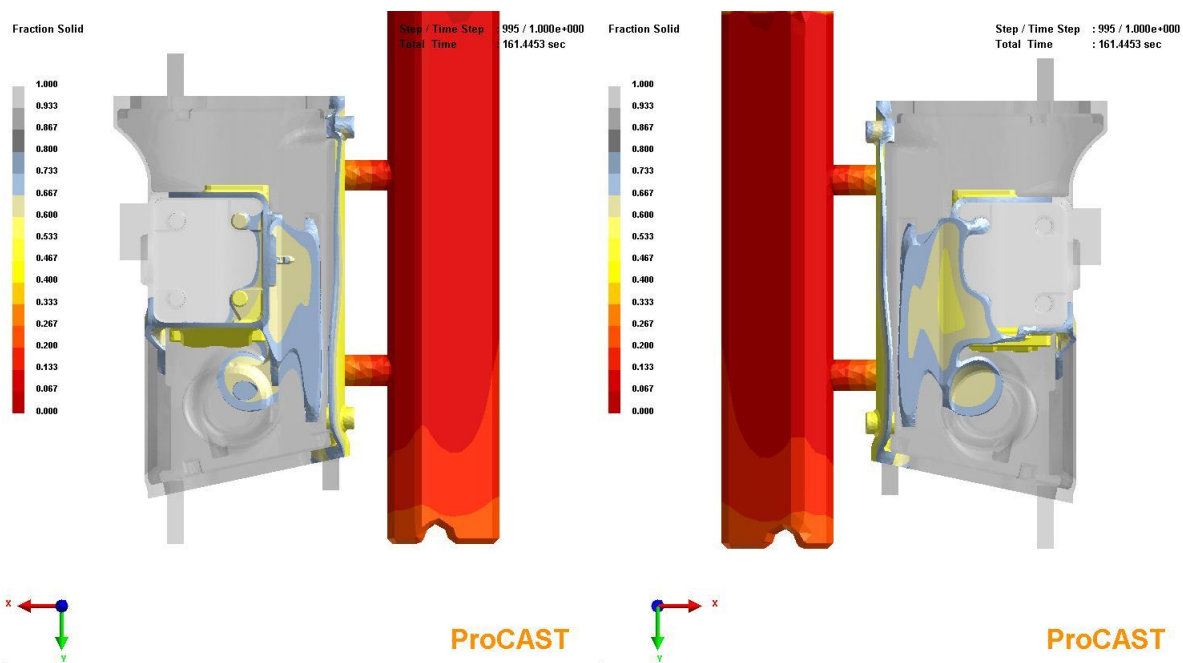
Teploty kovů jsou stále poměrně vysoko nad teplotou likvidu, tudíž by z tohoto hlediska nemělo docházet k vadám typu studený spoj a nezaběhnutí.

Soubor tuhnutí\_V0 na CD obsahuje simulaci tuhnutí. Obdobně jsou umístěny i soubory pro další varianty. Významné momenty tuhnutí každé varianty jsou zachyceny na obrázcích v diplomové práci.

# Tuhnutí

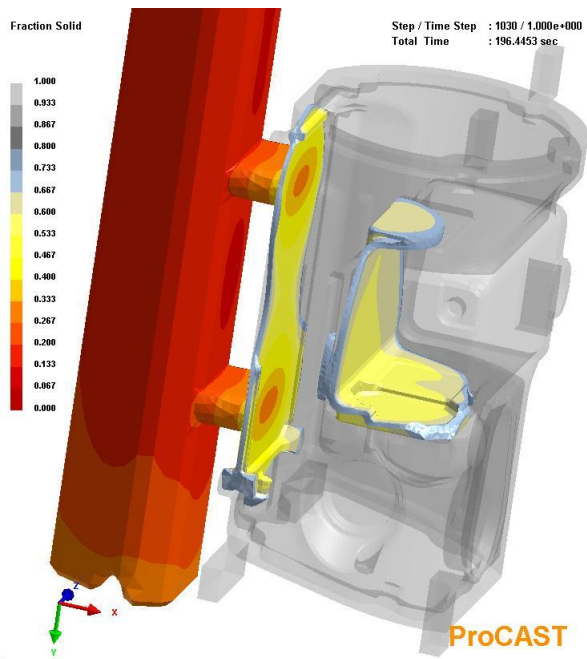


Obr. 3.5 Varianta 0 – tuhnutí\_1

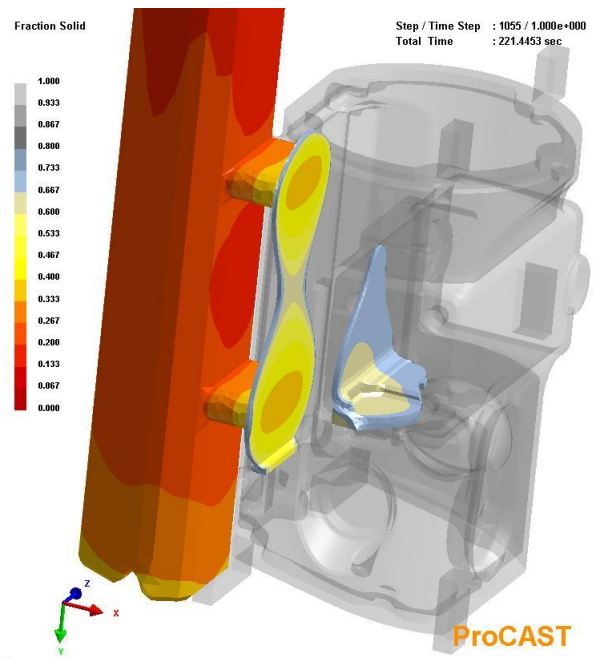


Obr. 3.6 Varianta 0 – tuhnutí\_2

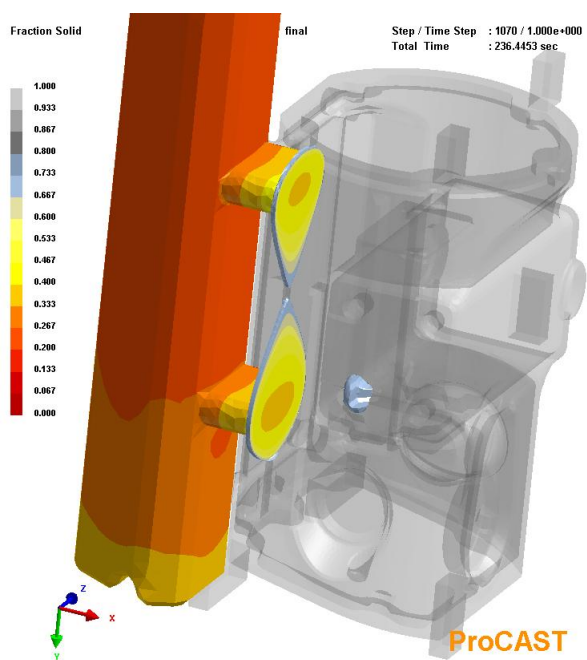
Obr. 3.7 Varianta 0 – tuhnutí\_3



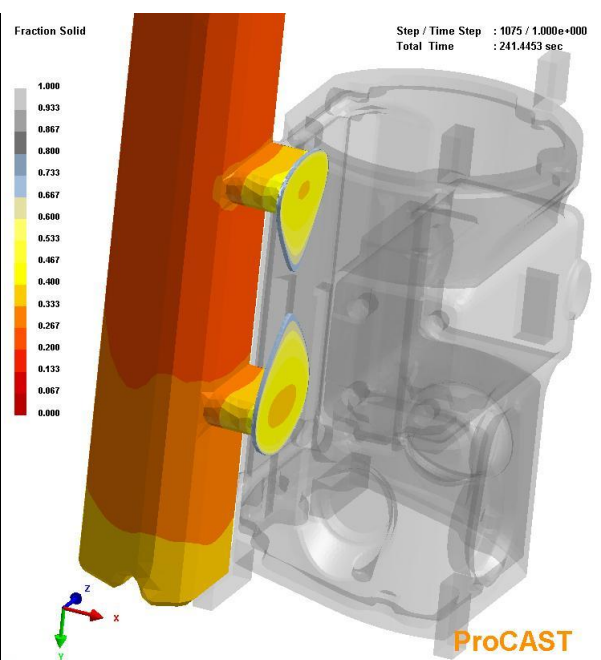
Obr. 3.8 Varianta 0 – tuhnutí\_4



Obr. 3.9 Varianta 0 – tuhnutí\_5



Obr. 3.10 Varianta 0 – tuhnutí\_6

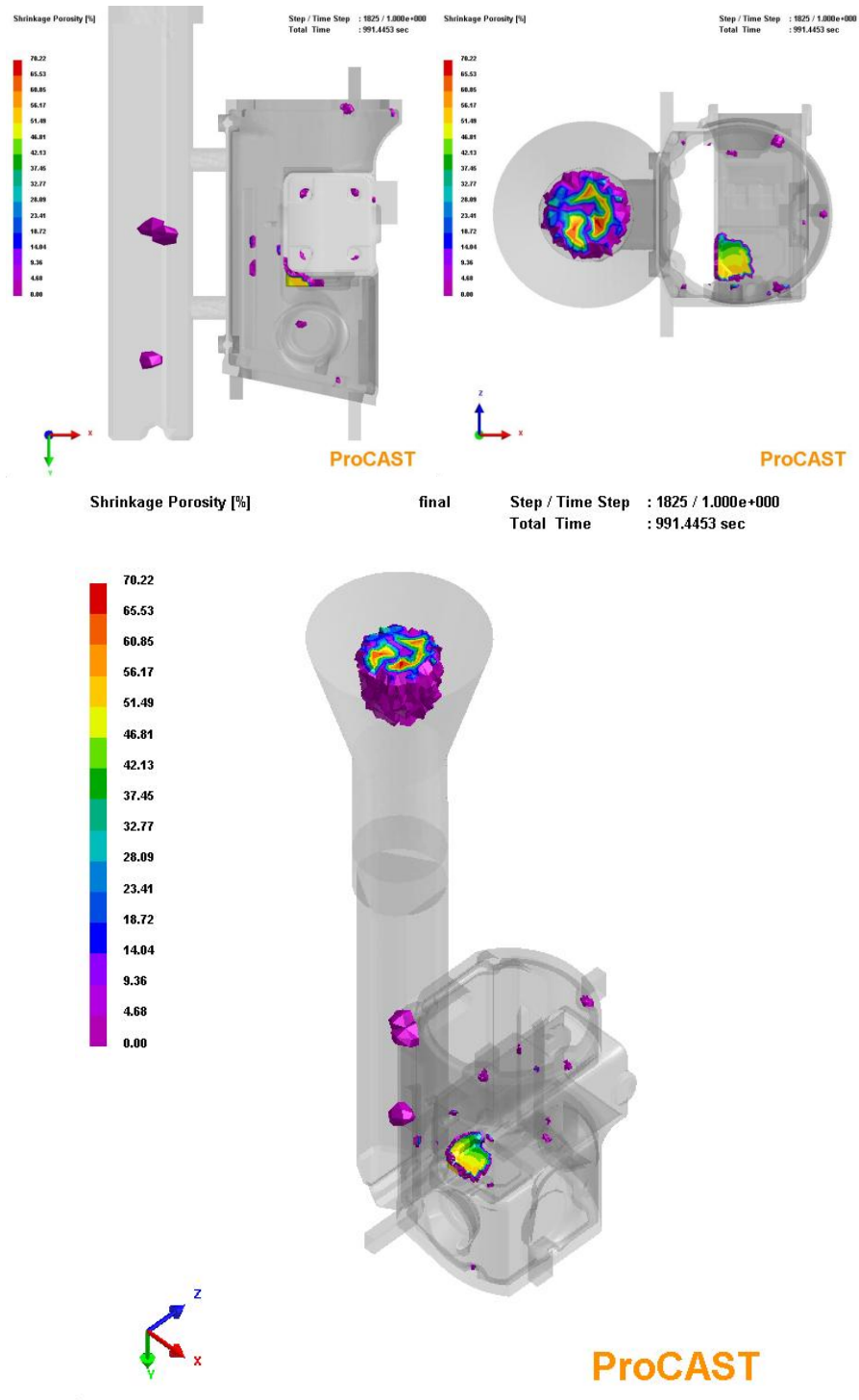


Obr. 3.11 Varianta 0 – tuhnutí\_7

### Vyhodnocení simulace tuhnutí

Z výše zobrazených kritických fází tuhnutí vyplývá, že odlitek tuhne neuspokojivě. Značný objem taveniny je zcela oddělen bez možnosti dosazování. To nepochybně vede k objemovému nedostatku vlivem smrštění taveniny během tuhnutí a s tím spojeným vznikem vnitřních vad.

## Predikce ředin v odlitku



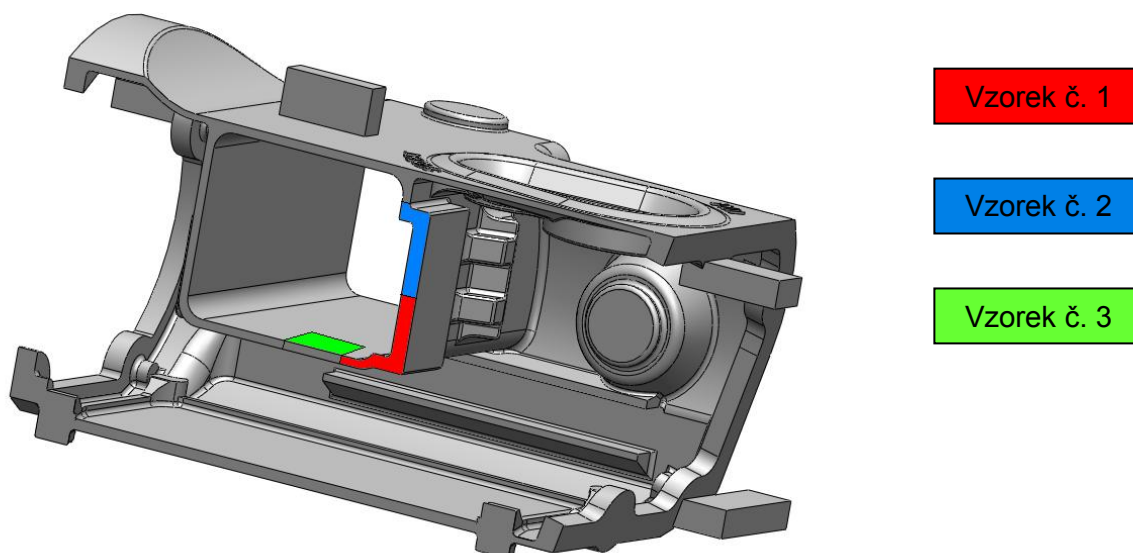
Obr. 3.12 Varianta 0 – predikce ředin v odlitku

Predikce ředin naznačuje abnormální ředinu zasahující do plochy „1“. Takto závažná ředina by byla nepřipustná nejen na této obráběné ploše, ale kdekoliv v odlitku.

Predikce ředin v odlitku je zobrazena pro tzv. cut off hodnotu 3%. Jsou tedy zobrazovány jen ty elementy, v nichž je podíl řediny vyšší než 3%. Toto platí pro všechny zobrazení predikce ředin v této práci.

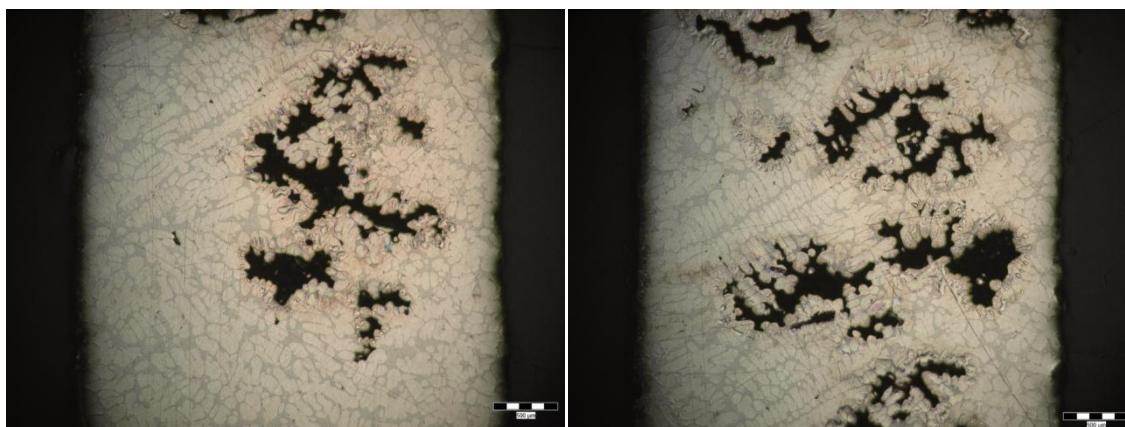
## Metalografické vyhodnocení

Dalším krokem byla preparace vzorků z kritických míst a jejich metalografické zhodnocení. Místa odběrů vzorků, včetně barevného vyznačení zkoumané plochy, jsou znázorněna na obr. 3.13. Tato místa byla vybrána na základě předchozího rentgenového snímání zařízením YXLON MU 2000 PCNC. Plocha „1“ – viz obr 3.1 (vzorky č. 2 a č. 3), patří k nejdůležitějším částem odlitku, jelikož je dále obráběna a je tudíž požadována její vysoká kvalita.



Obr. 3.13 Místa odběrů vzorků

Z pozorování vzorků na světelném metalografickém mikroskopu vyplynulo, že ve vzorku číslo 1 se jedná o vady typu mikrostaženina. Tyto vady se zde vyskytují v obrovském měřítku – na snímcích je zobrazena celá šířka stěny odlitku. Ve vzorku číslo 3 se jednalo spíše o porezitu (uzavřený vzduch a mikrostaženina). Vzorek číslo 2 byl postižen pouze drobnou rozptýlenou porezitou v nepatrném množství.

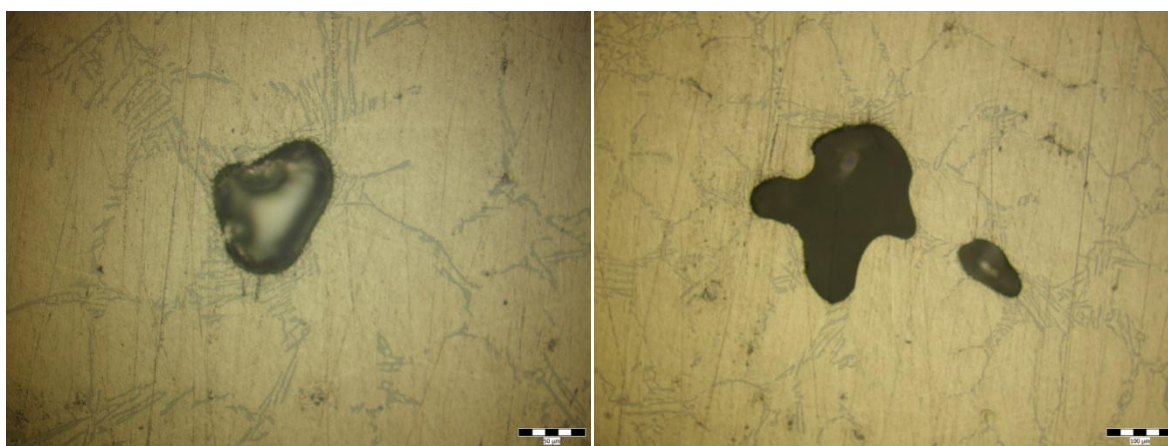


Obr. 3.14 Snímky vzorku č. 1





Obr. 3.15 Snímek vzorku č. 2



Obr. 3.16 Snímky vzorku č. 3

Lze tedy říci, že výsledky simulace jsou ve schodě s fakty zjištěnými na metalografickém výbrusu. Značné hodnoty v predikci ředin v odlitku se potvrdili. Příčinou je zcela jistě neusměrněné tuhnutí.

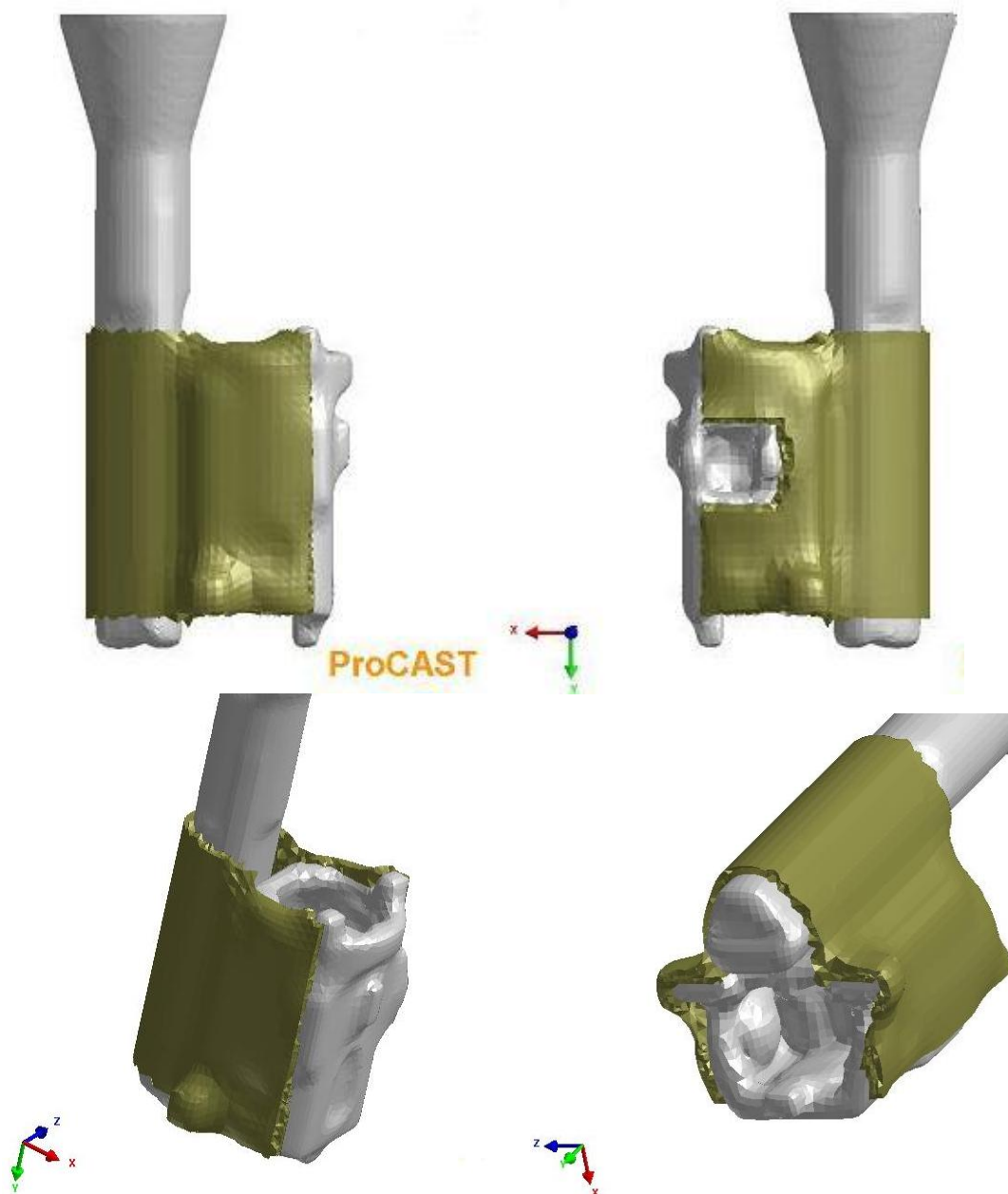
### 3.2 Návrhy řešení

Dalším krokem tedy bylo navrhnout vhodné varianty řešení. Cílem těchto variant bylo dosažení usměrněného tuhnutí, které jediné může zajistit zdravotnost odlitku z hlediska vzniku ředin. Usměrněného tuhnutí lze při stávající geometrii dosáhnout ovlivněním teplotně-izolačních vlastností formy.

Druhou variantou je změna geometrie formy, tedy změna umístění zářezů. Jelikož je odlitek tvarově složitý a tenkostěnný, je zde velmi málo ploch vhodných k umístění zářezů. Pro jednoduchou apretaci odlitků je vhodné prakticky jen zaústění na rovinnou plochu. Nevýhodou těchto řešení je nutnost úpravy matečné formy pro model odlitku.

### 3.2.1 Varianta 1

Varianta 1 vychází z geometrického uspořádání varianty 0 – není tedy třeba měnit matečnou formu voskového modelu ani postupy během jednotlivých fází výroby skořepinové formy. Usměrněné tuhnutí má být dosaženo ovlivněním tepelného toku v některých částech formy. K tomuto účelu bylo použito izolování stěn, v nichž se oddělil tepelný uzel. Jediným úkonem navíc je tedy připevnění izolace před žiháním skořepinové formy.

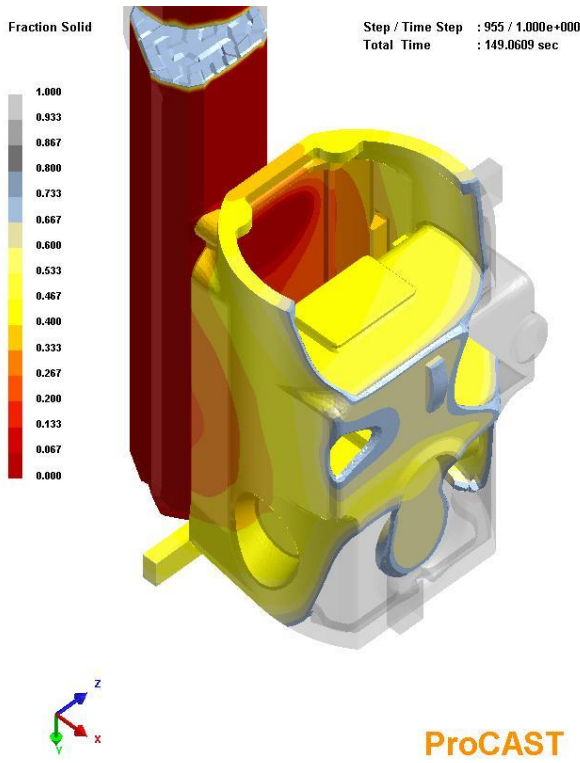


Obr. 3.17 Varianta 1 – umístění izolace

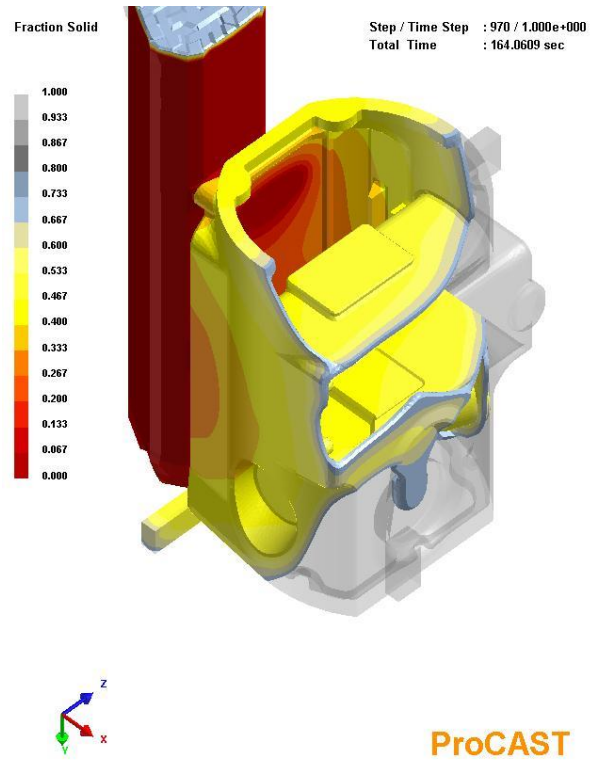
#### Plnění

Simulaci plnění si lze prohlédnout v souboru plnění\_V1.avi na přiloženém CD. Jelikož je geometrické uspořádání stejné s předchozí variantou nelze čekat významné změny. Umístění izolace se může projevit nepatrným snížením ztrát teploty taveniny během plnění formy.

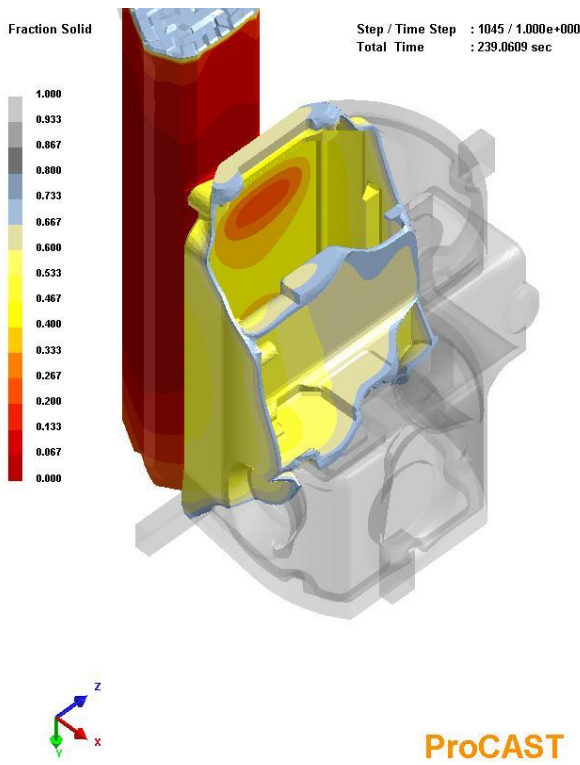
# Tuhnutí



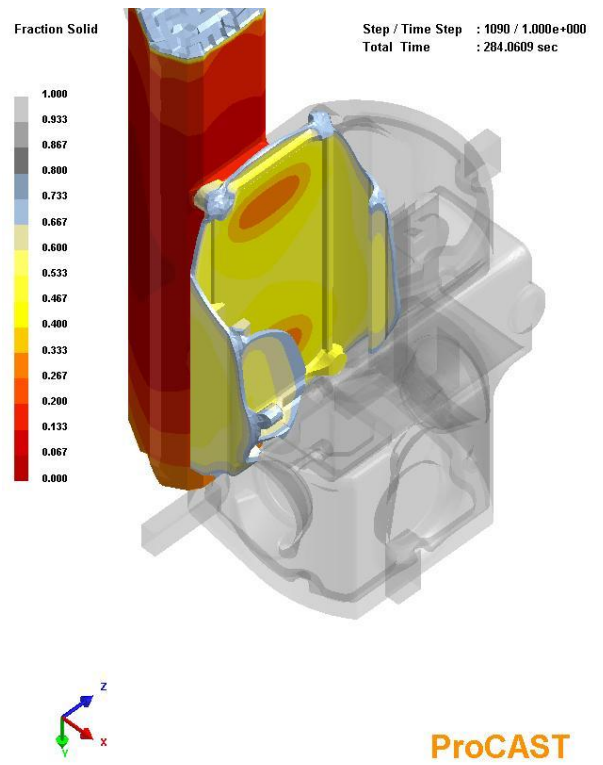
Obr. 3.18 Varianta 1 – tuhnutí\_1



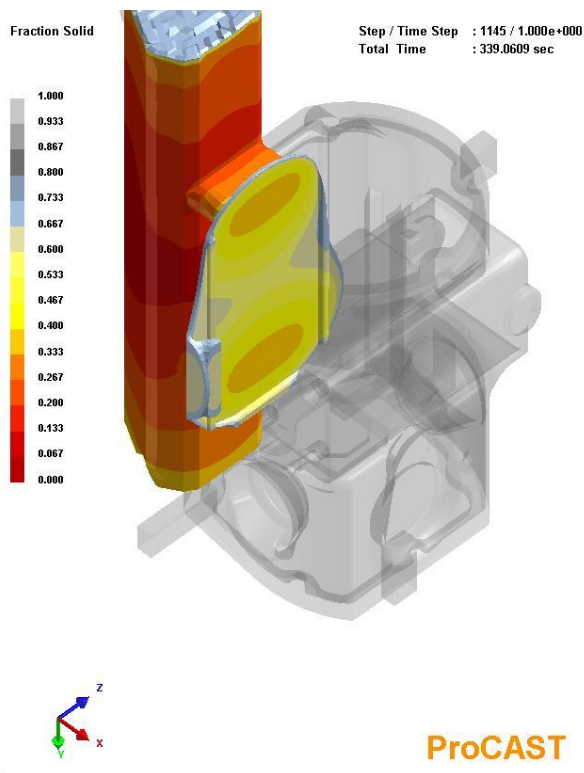
Obr. 3.19 Varianta 1 – tuhnutí\_2



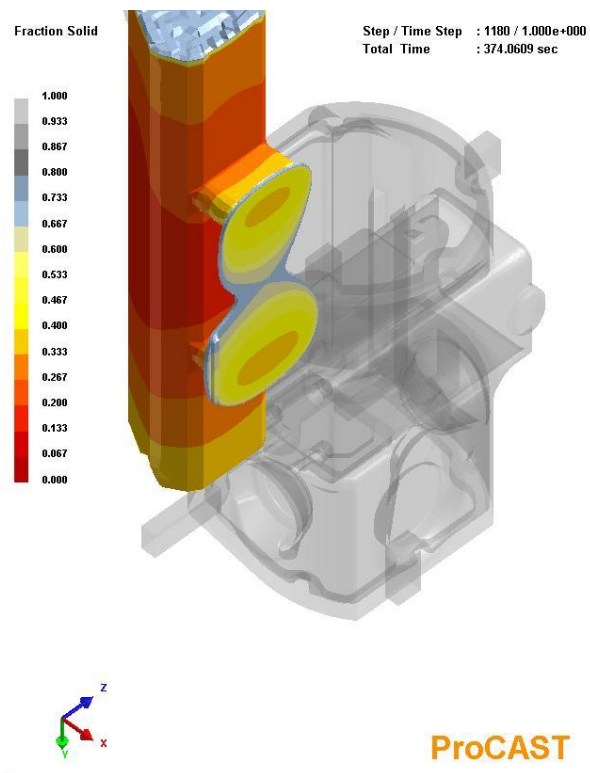
Obr. 3.20 Varianta 1 – tuhnutí\_3



Obr. 3.21 Varianta 1 – tuhnutí\_4



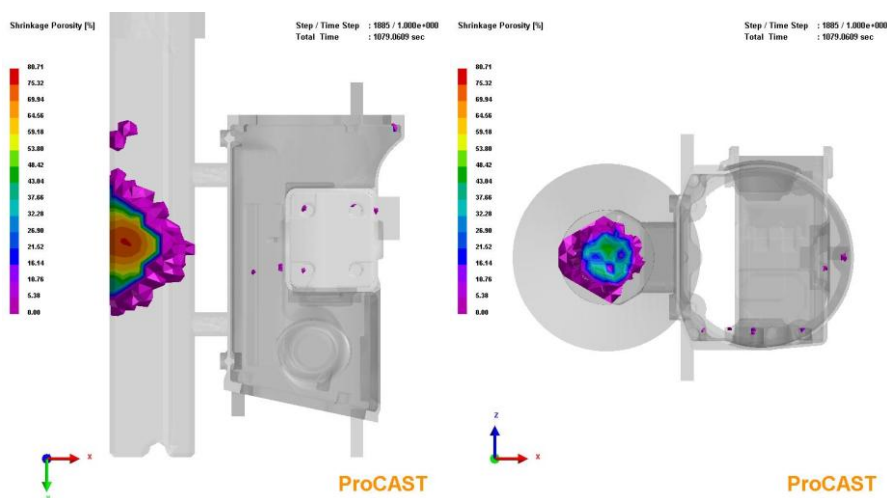
Obr. 3.22 Varianta 1 – tuhnutí\_5



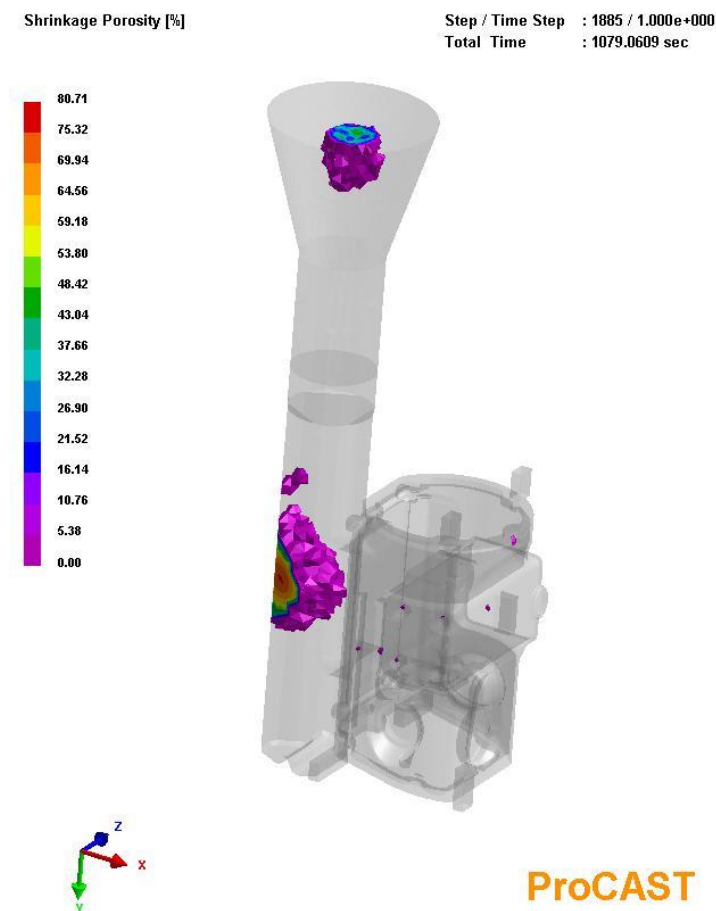
Obr. 3.23 Varianta 1 – tuhnutí\_6

Ze simulace tuhnutí plyne, že bylo dosaženo usměrněného tuhnutí. Toto by se mělo odrazit ve zdravoti kusu.

### Predikce ředin v odlitku



Obr. 3.24 Varianta 1 – predikce ředin v odlitku\_1



Obr. 3.25 Varianta 1 – predikce ředin v odlitku\_2

Predikce ředin v odlitku potvrdila předchozí domněnku. Řediny se vyskytují ve velmi omezeném množství navíc jen v místech, kde je jejich výskyt zapříčiněn ze slévárenského hlediska nevhodnou geometrií odlitku a tudíž je lze jen stěží odstranit. Tyto místa by také dle simulace měla ležet mimo obráběné části kusu.

Významná ředina leží až ve vtokovém kanále, nicméně nijak neovlivňuje zdravotnost odlitku. Je způsobena tím, že izolace není protažena až k nálevce. Izolace navíc by neměla na odlitek vliv a prodražovala by výrobu.

Izolace také přispívá k snížení ochlazování skořepinové formy během doby od jejího vytažení z žhací pece do vlastního odlití. Toto rozšiřuje časový interval vhodný pro odlití.

Závěrem lze říci, že výsledky simulace jsou uspokojující. Variantu 1 lze tedy doporučit jako jednoduchou a přitom účinnou možnost úpravy postupu výroby.

### 3.2.2 Varianta 2

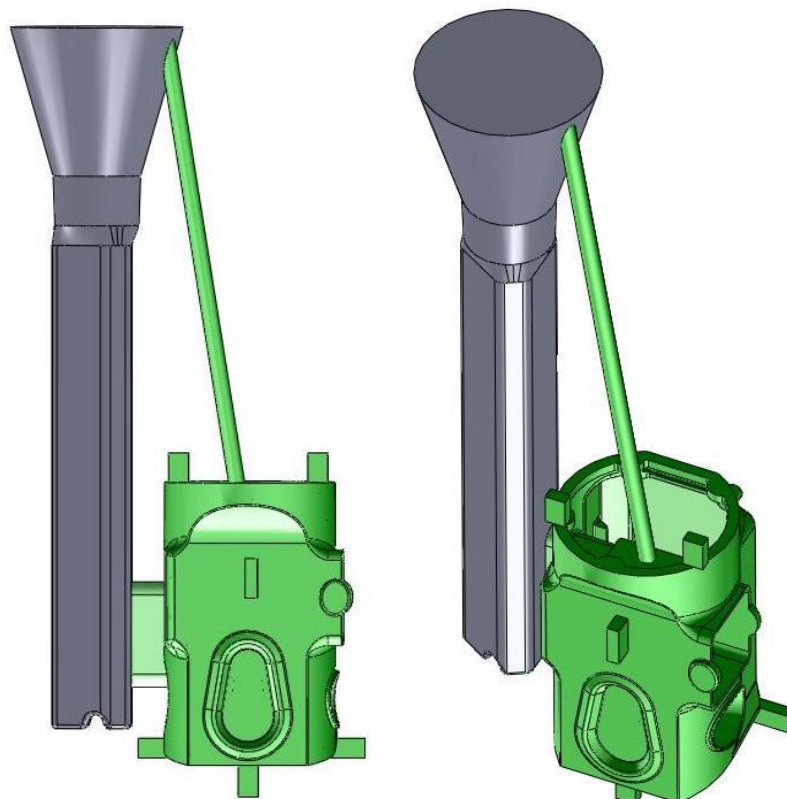
Tato varianta spoléhá na změnu vtokové soustavy, která ovlivní rozložení teplotního pole ve formě po odlití i během tuhnutí. Dvojice zářezů z předchozích variant byla nahrazena jedním zářezem, jenž ústí do jedné ze stěn, kde se oddělovalo tuhnutí. Účelem této změny je

docílit nastolení teplotních gradientů, které povedou ke zdravosti odlitku. Jinými slovy dosáhnout usměrněného tuhnutí odlitku.

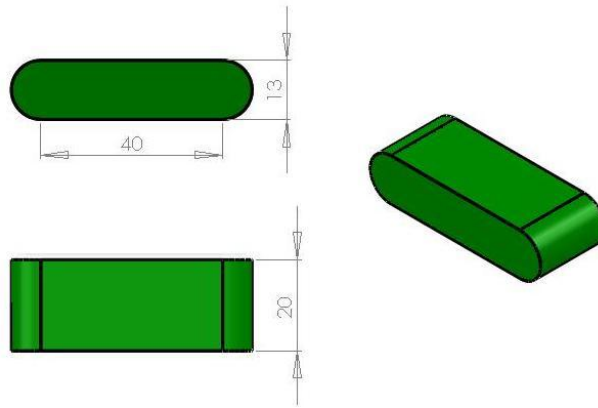
Další změnou oproti výchozímu stavu je přidání kanálku (výfuku), sloužícího ke zlepšení odvodu plynů z dutiny skořepinové formy. Vychází z plochy viz obr. 3.26, přičemž tato plocha je dále obráběna a je požadována její vysoká kvalita. Kanálek je zaústěn do nálevky pro zvýšení pevnosti celé sestavy (voskový model, forma). Pracovníci budou instruováni k opatrnosti při lití, tedy aby nedošlo k zalití kanálku dříve, než se zaplní celá forma a nebyla tak znemožněna jeho funkčnost.

Ve všech následujících variantách bylo upuštěno od použití filtru. Ten při současném umístění výrazně nepřispívá k vyšší kvalitě kovu, ba naopak sám může být příčinou vzniku vměstků. Změna jeho umístění by sebou přinášela vysoké náklady v podobě výroby nových matečných forem pro vtokovou soustavu.

Odstraněním filtru byl odstraněn také tzv. priming – tedy doba nutná k průniku taveniny filtrem. Tato doba ovšem nedosahuje významných hodnot, jelikož je filtr do skořepiny umístěn před žíháním a je tedy dostatečně prohřátý. Navíc se jedná o poměrně hrubý filtr – 15 PPI.



Obr. 3.26 Varianta 2 - stromeček

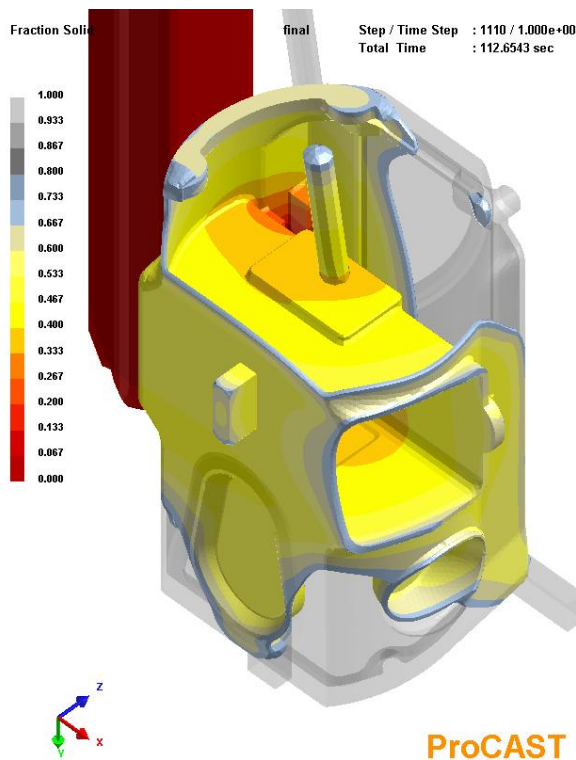


Obr. 3.27 Varianta 2 - zářez

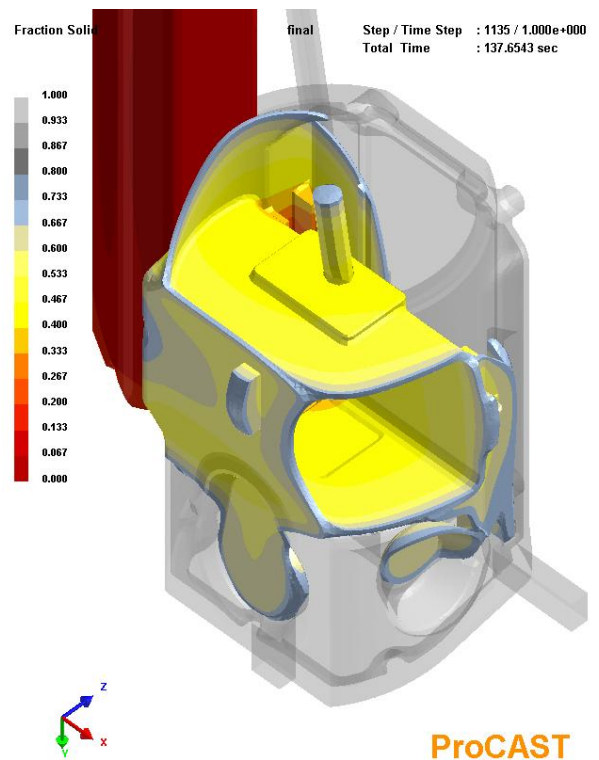
### Plnění

Simulaci plnění je k zhlédnutí v souboru plnění\_V2.avi na přiloženém CD. Lze pozorovat určité uzavírání plynů, výhodou ovšem oproti variantám 1 a 2 je to, že vnitřní stěny odlitku – stěny ploch „1“ a „2“ a stěna mezi nimi, jsou průtočné, tudíž je velká pravděpodobnost, že případně vzniklé vměstky budou posunuty proudem kovu mimo tyto obráběné plochy.

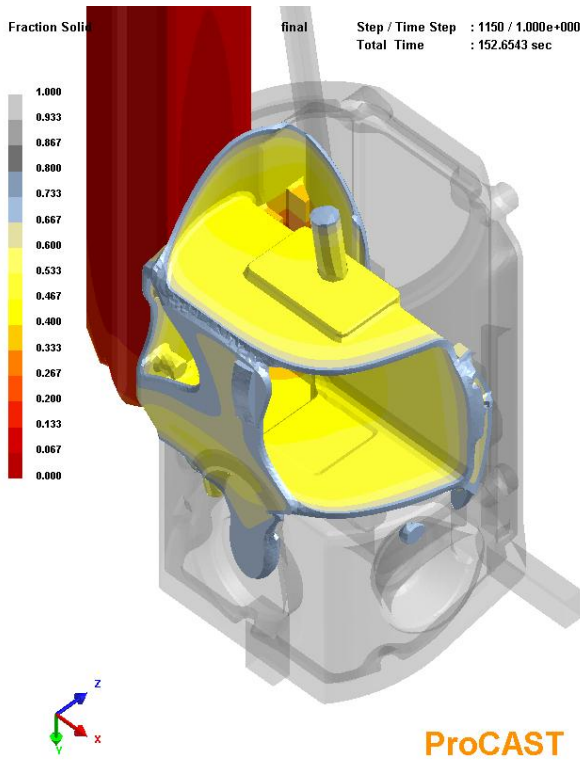
### Tuhnutí



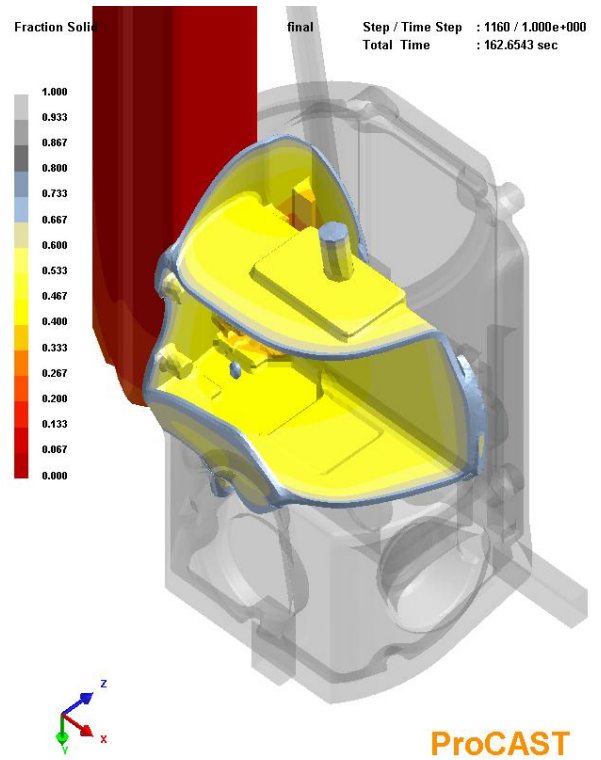
Obr. 3.28 Varianta 2 – tuhnutí\_1



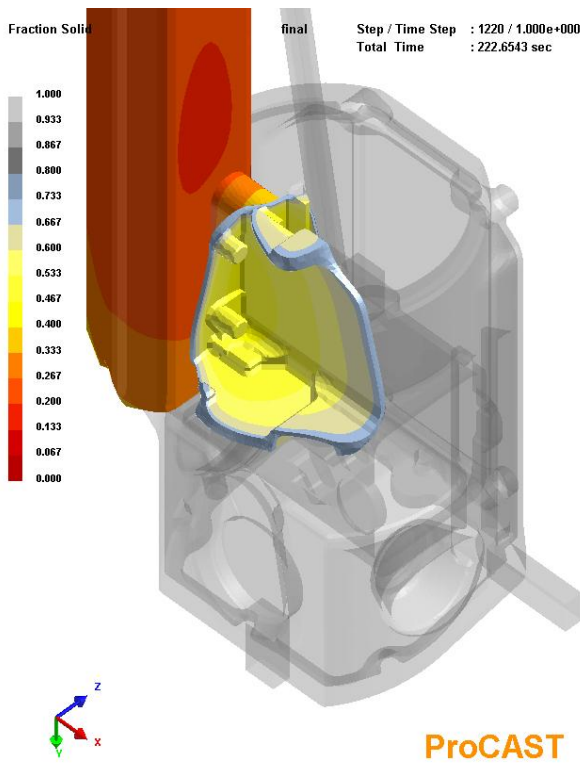
Obr. 3.29 Varianta 2 – tuhnutí\_2



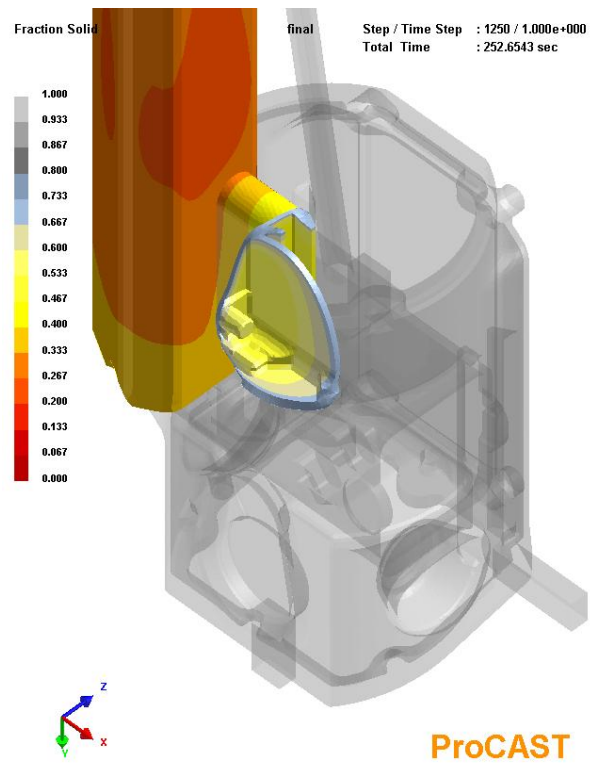
Obr. 3.30 Varianta 2 – tuhnutí\_3



Obr. 3.31 Varianta 2 – tuhnutí\_4



Obr. 3.32 Varianta 2 – tuhnutí\_5

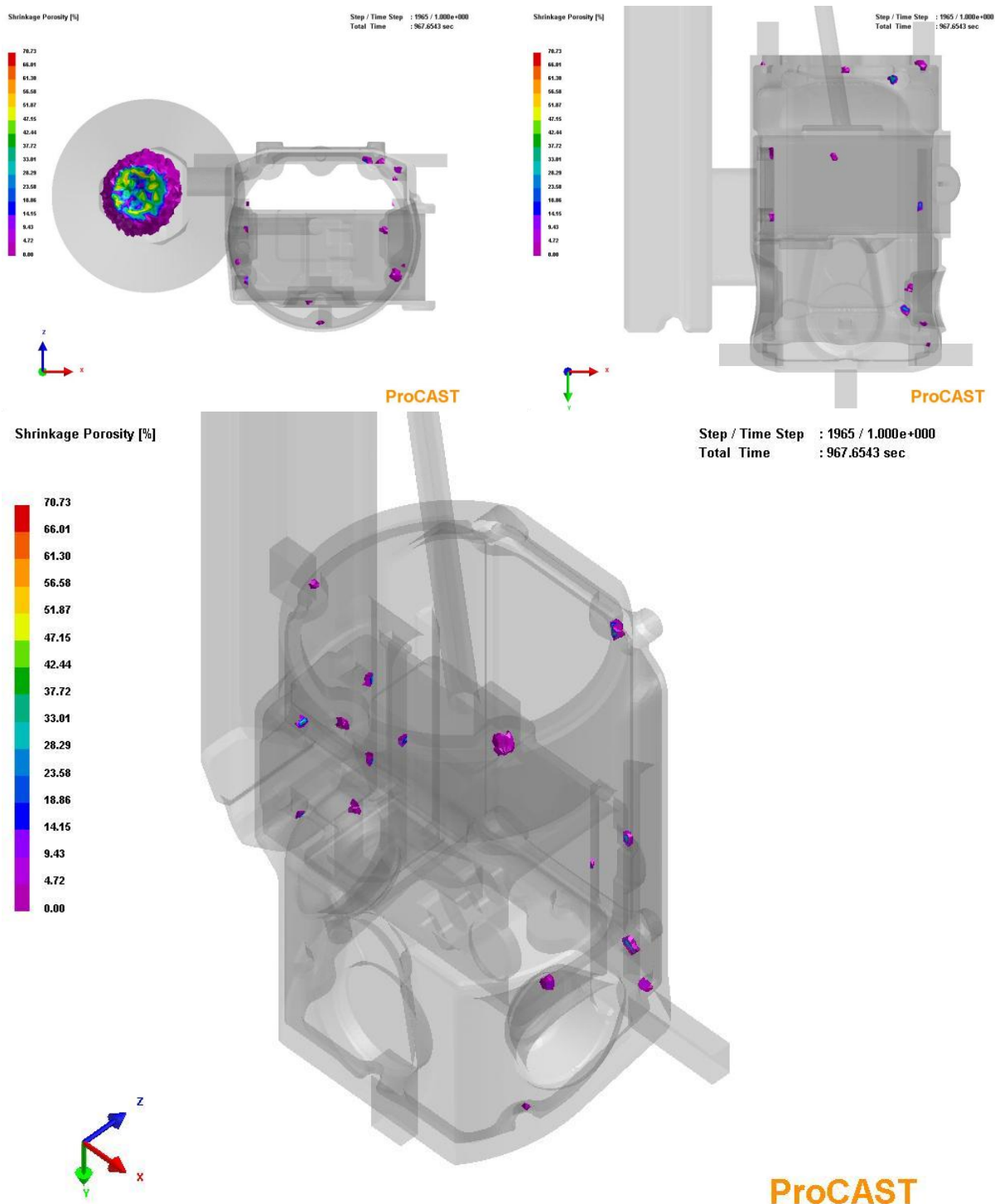


Obr. 3.33 Varianta 2 – tuhnutí\_6



Ze simulace tuhnutí vyplývá, že tepelný uzel byl vytažen až do kůlu a odlitek tudíž tuhne usměrněně. Toto by se mělo odrazit ve zdravoti kusu.

*Predikce ředin v odlitku*

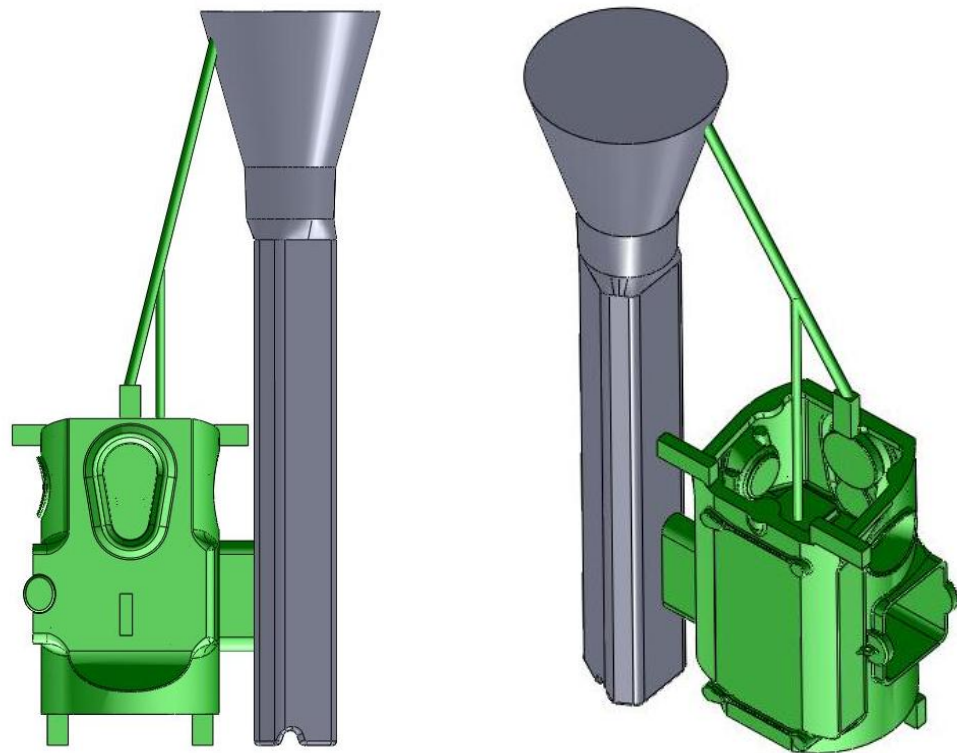


Obr. 3.34 Varianta 2 – predikce ředin v odlitku

Predikované množství ředin se oproti předchozí variantě 1 mírně zvýšilo. Nicméně se žádná nenachází na plochách „1“ a „2“.

### 3.2.3 Varianta 3

Varianta 3 vychází z varianty 2. Změnila se pouze pozice odlitku, kdy byl tento otočen o 180°. Rozměry zářezu zůstaly zachovány, ten je ovšem nyní zaústěn v jiné výšce odlitku. Cílem je ověřit vliv změny orientace na plnění a tuhnutí odlitku. Z hlediska plnění by se měla, po zaplnění spodní geometricky jednoduché části, horní geometricky složitější část odlitku plnit klidněji a zesponu. Toto by mělo přispívat k menšímu uzavírání plynů v dutině formy. Také se změnila poloha kanálku. Tento nyní vychází z plochy viz obr. 3.35 a také z referenční plochy jednoho z úchytů, přičemž se tento předpokládá jako poslední místo plnění.

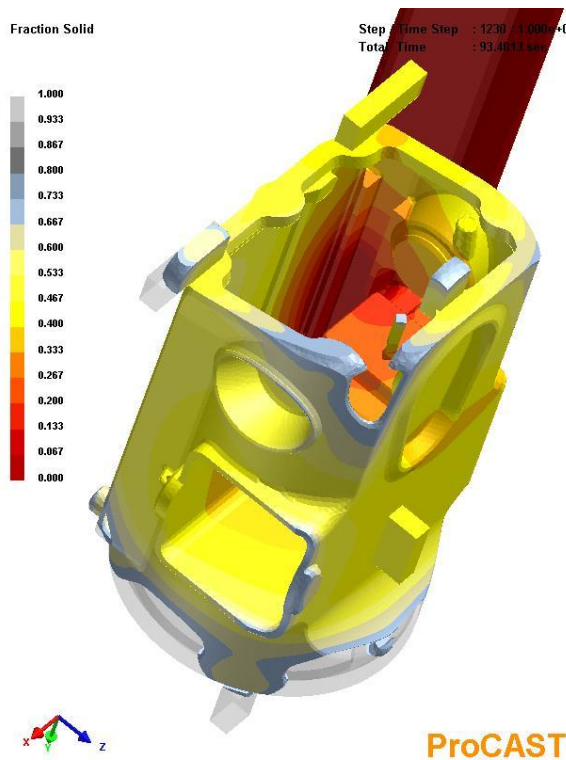


Obr. 3.35 Varianta 3 - stromeček

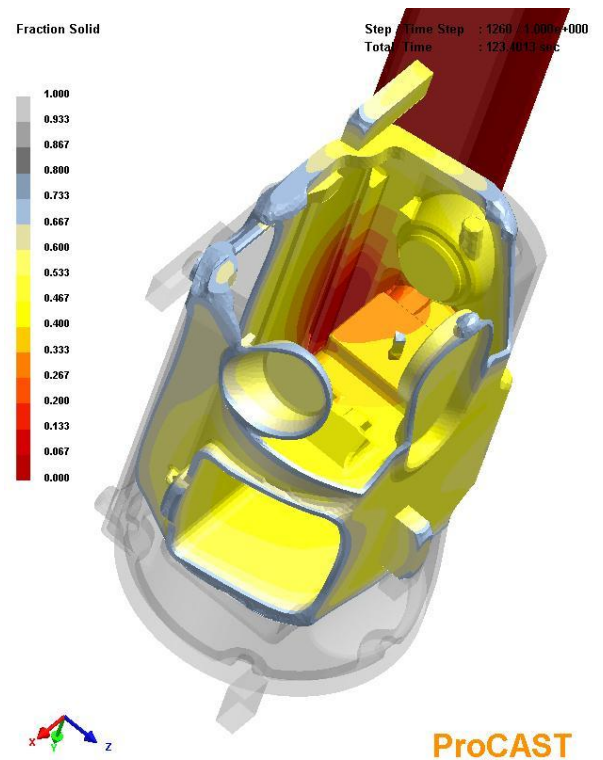
#### *Plnění*

Simulaci plnění si lze prohlédnout v souboru plnění\_V3.avi na přiloženém CD. Původní předpoklad lepšího plnění se nenaplnil, spíše naopak. Ve vnitřních stěnách odlitku je uzavíráno značné množství plynu. Celkově se zdá být plnění nepříznivější oproti variantě 2.

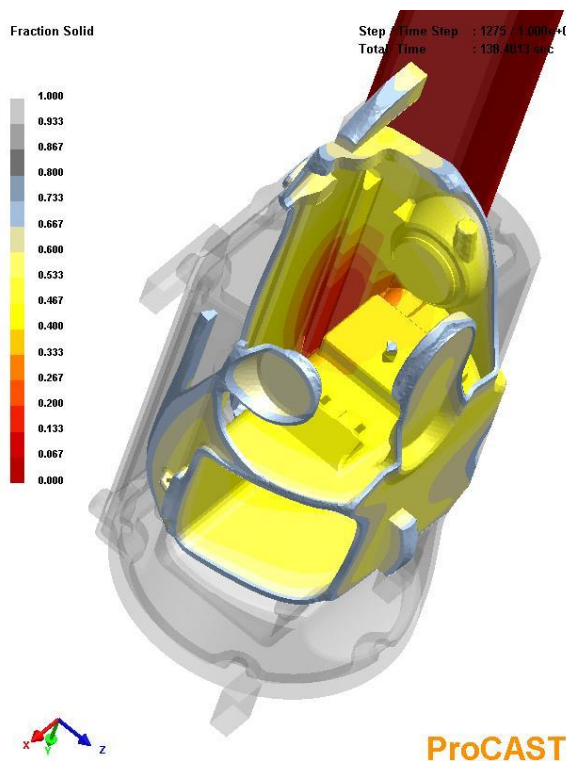
# Tuhnutí



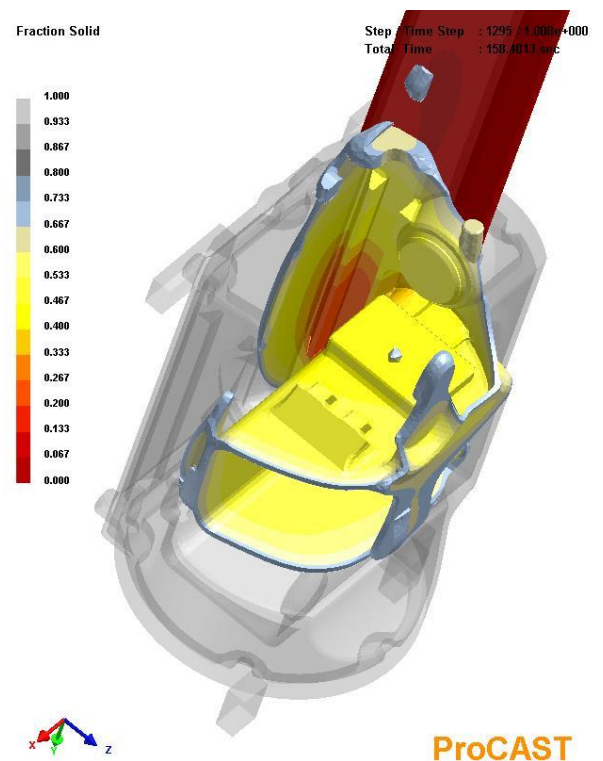
Obr. 3.36 Varianta 3 – tuhnutí\_1



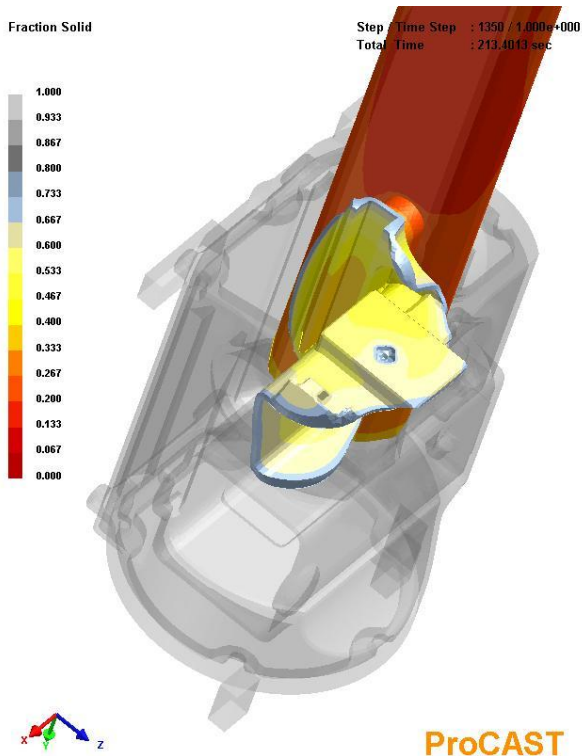
Obr. 3.37 Varianta 3 – tuhnutí\_2



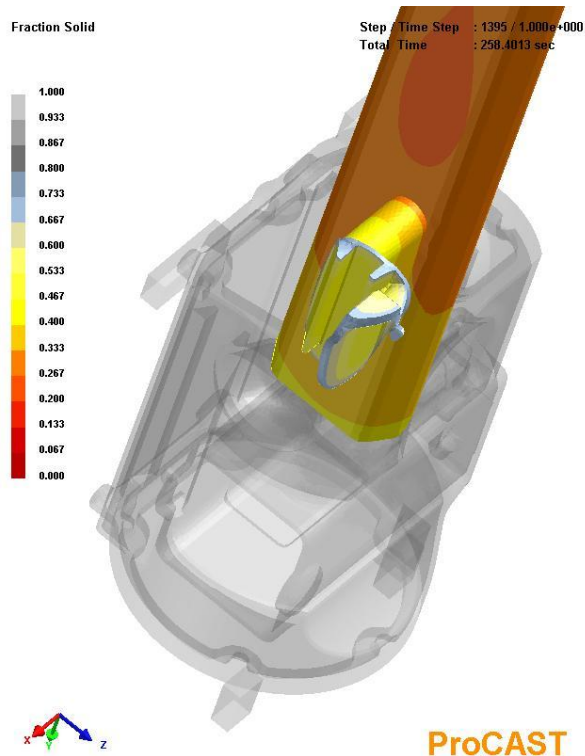
Obr. 3.38 Varianta 3 – tuhnutí\_3



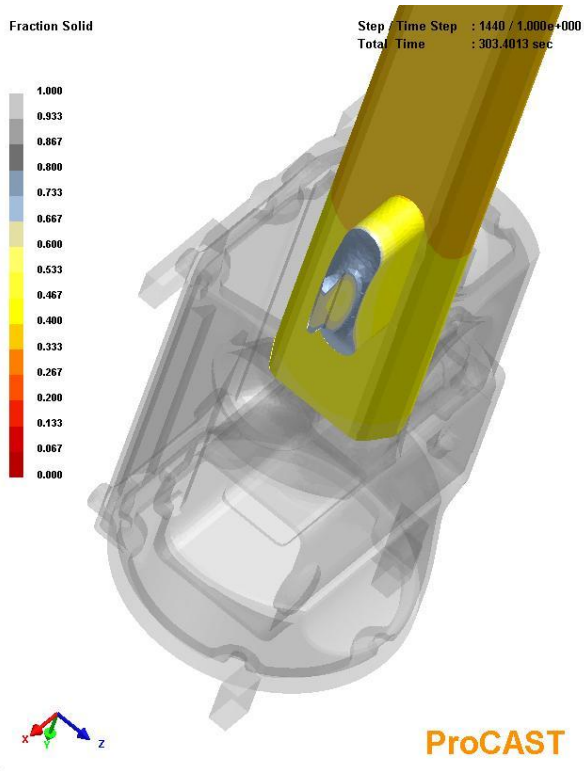
Obr. 3.39 Varianta 3 – tuhnutí\_4



Obr. 3.40 Varianta 3 – tuhnuti\_5

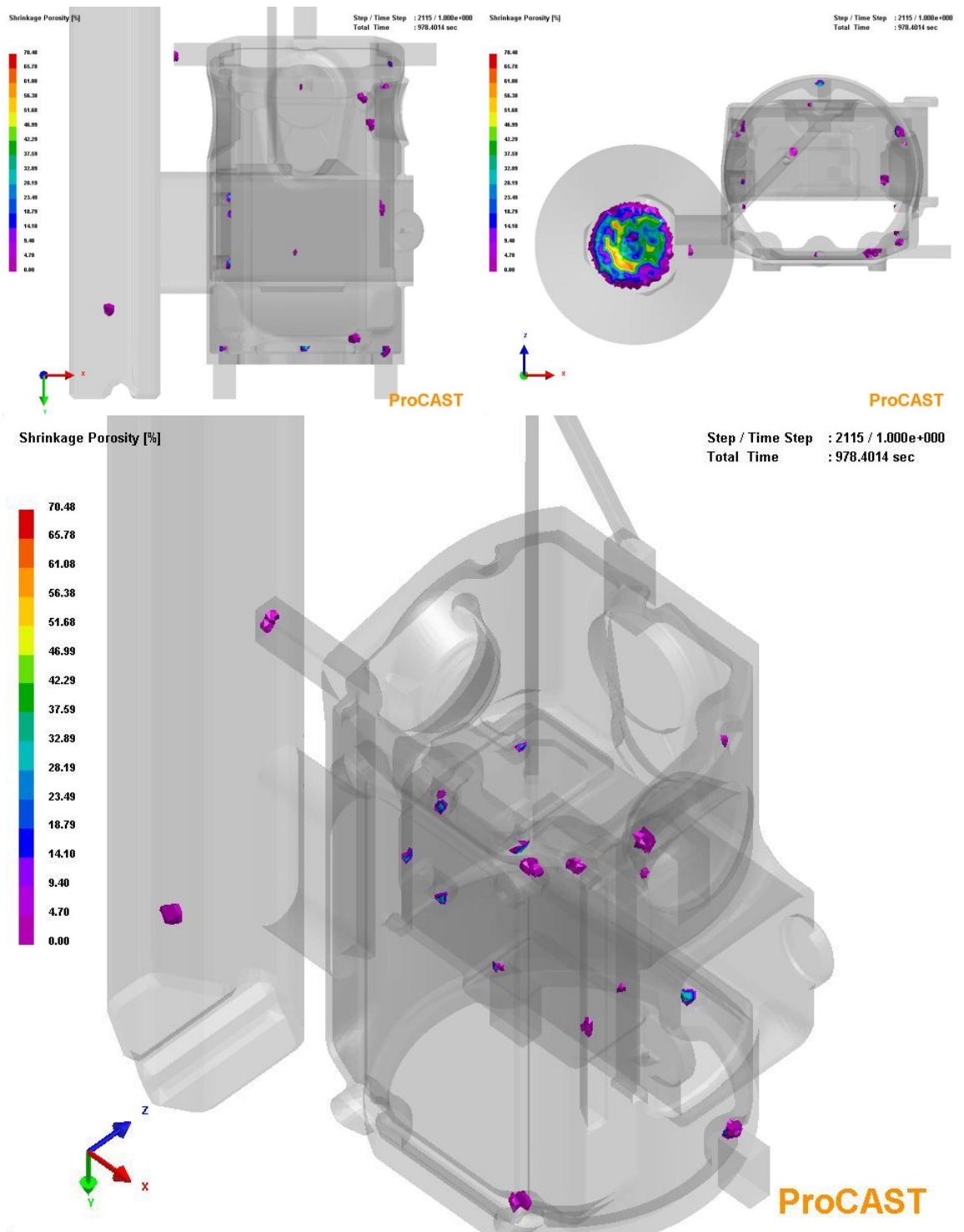


Obr. 3.41 Varianta 3 – tuhnuti\_6



Obr. 3.42 Varianta 3 – tuhnuti\_7

### Predikce ředin v odlitku



Obr. 3.43 Varianta 3 – predikce ředin v odlitku

Predikované množství ředin se oproti variantě 2 zvýšilo. Nicméně se žádná opět nenachází na plochách „1“ a „2“.

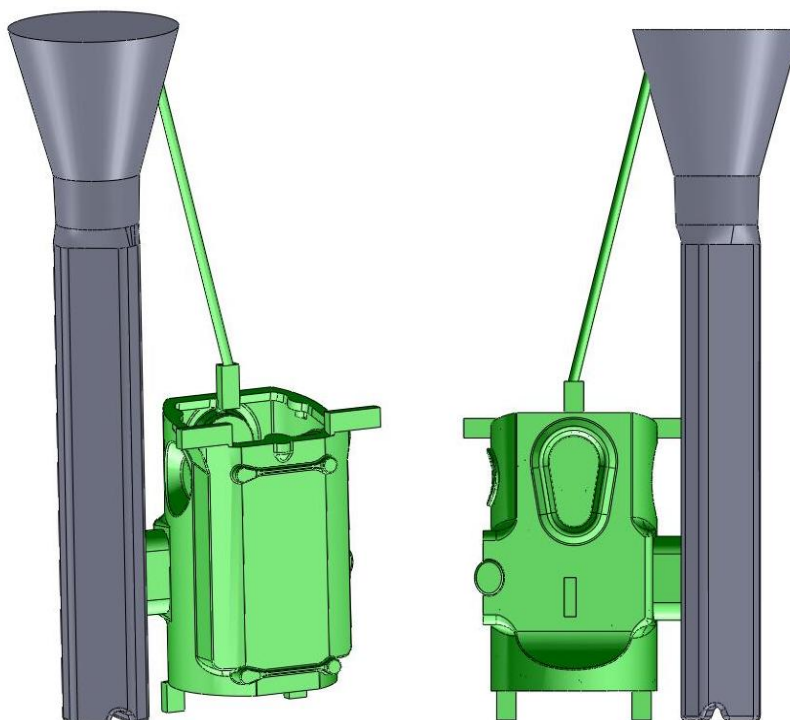
Dalším problémem, který vznikl vlivem změny orientace odlitku, je vznik tepelného uzlu v místě nahromadění skořepiny mezi vtokovým kanálem a jedním z referenčních objemů.

Toto lze řešit pouze zvětšením délky zářezu, což ovšem může vést k jeho předčasnému ztuhnutí.

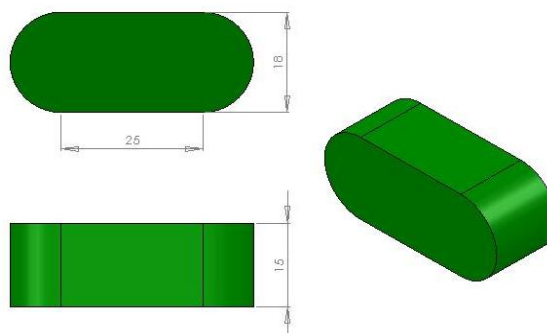
Závěrem lze tedy říci, že tato varianta nepřinesla očekávanou změnu k lepšímu.

### 3.2.4 Varianta 4

Tato varianta spoléhá na umístění zářezu do druhé prakticky použitelné plochy, viz obr. 3.44. Odlitek je orientován stejně jako ve variantě 3. Kanálek pro únik plynů je vyveden z nejvyššího bodu odlitku – jedné z referenčních ploch. Posunutí vtoku také vyřešilo problém s nahromaděním skořepiny ve variantě 3.



Obr. 3.44 Varianta 4 - stromeček

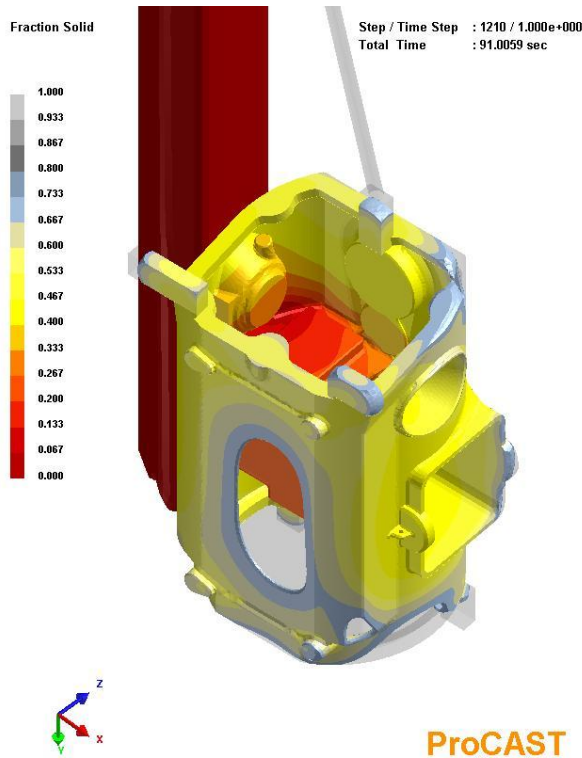


Obr. 3.45 Varianta 4 - zářez

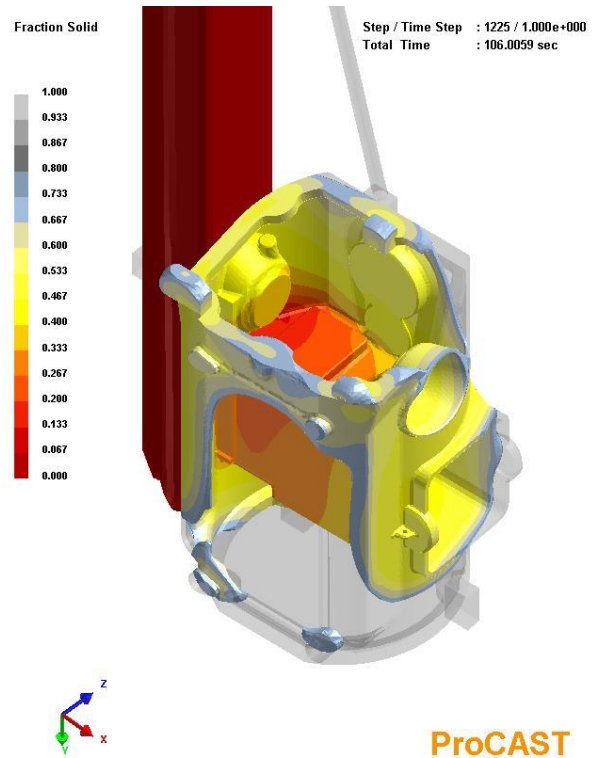
### Plnění

Simulaci plnění si lze prohlédnout v souboru plnění\_V4.avi na přiloženém CD. Lze pozorovat značné uzavírání plynů ve stěnách ploch „1“ a „2“, avšak tyto jsou průtočné.

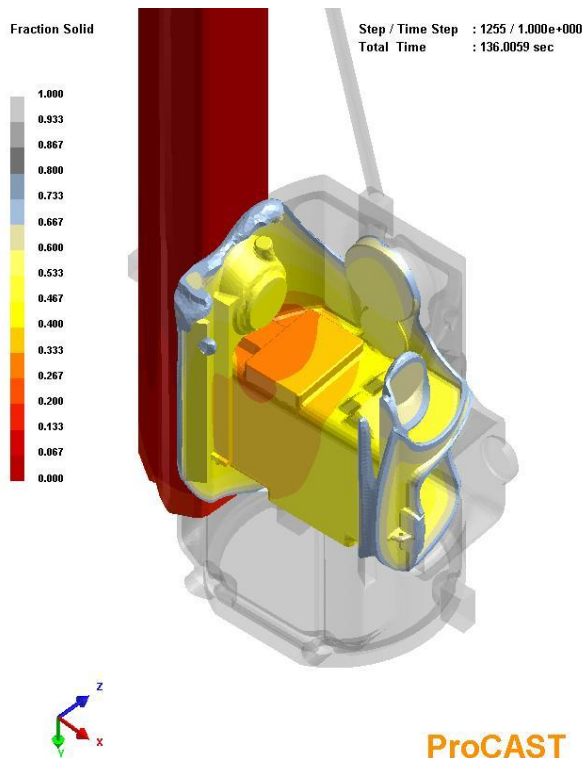
# Tuhnutí



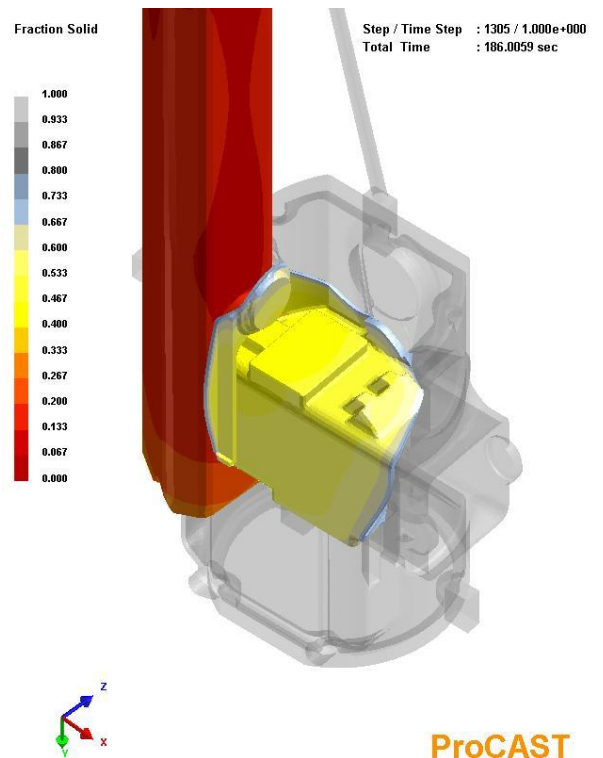
Obr. 3.46 Varianta 4 – tuhnutí\_1



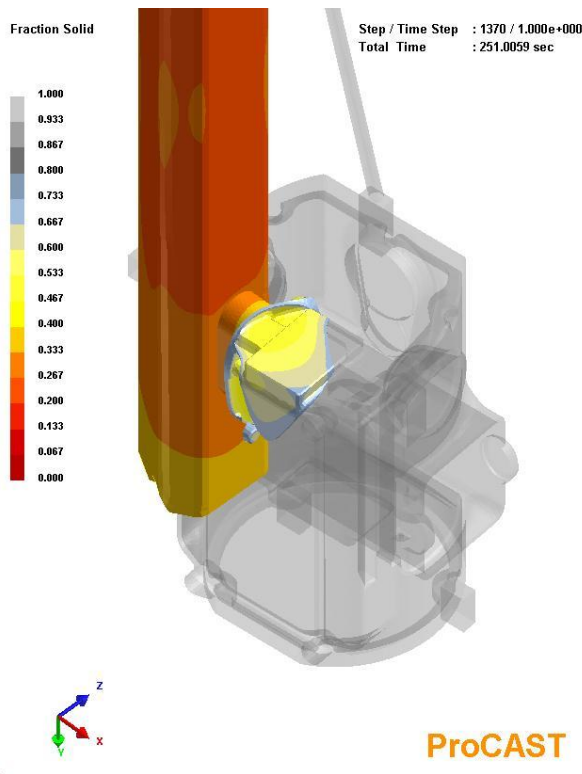
Obr. 3.47 Varianta 4 – tuhnutí\_2



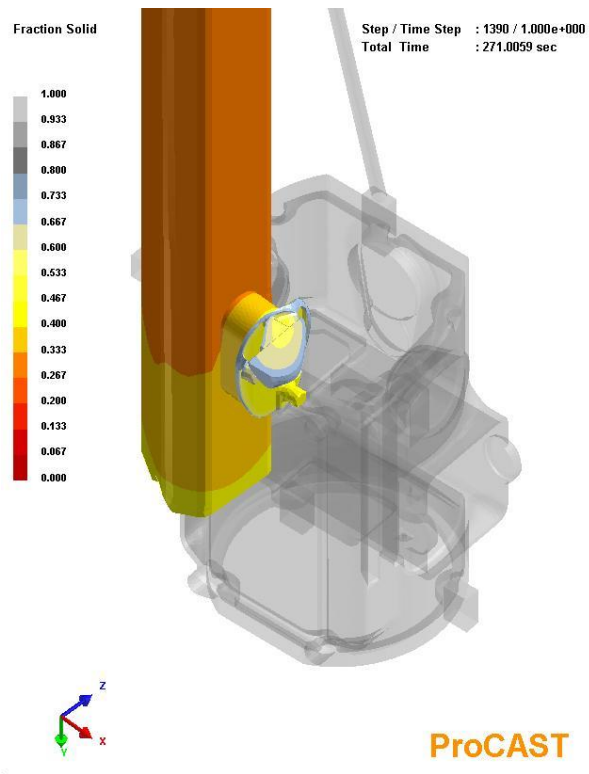
Obr. 3.48 Varianta 4 – tuhnutí\_3



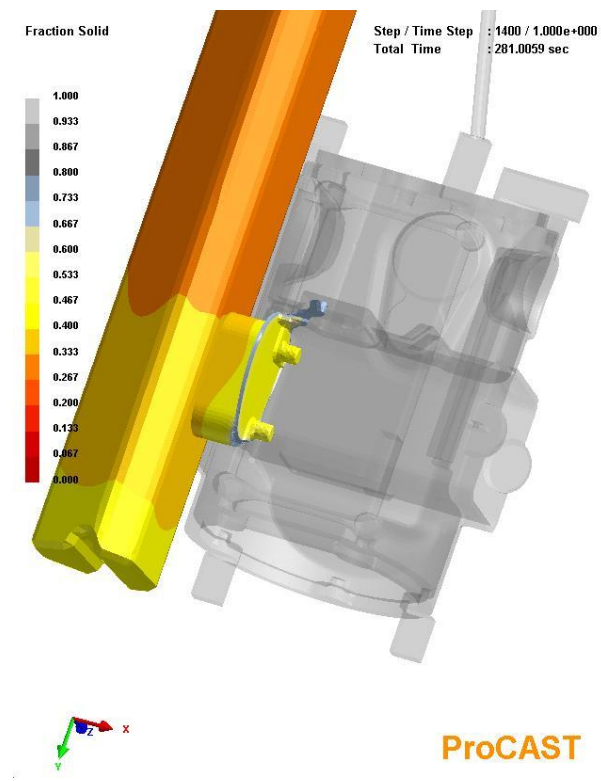
Obr. 3.49 Varianta 4 – tuhnutí\_4



Obr. 3.50 Varianta 5 – tuhnutí\_5



Obr. 3.51 Varianta 4 – tuhnutí\_6

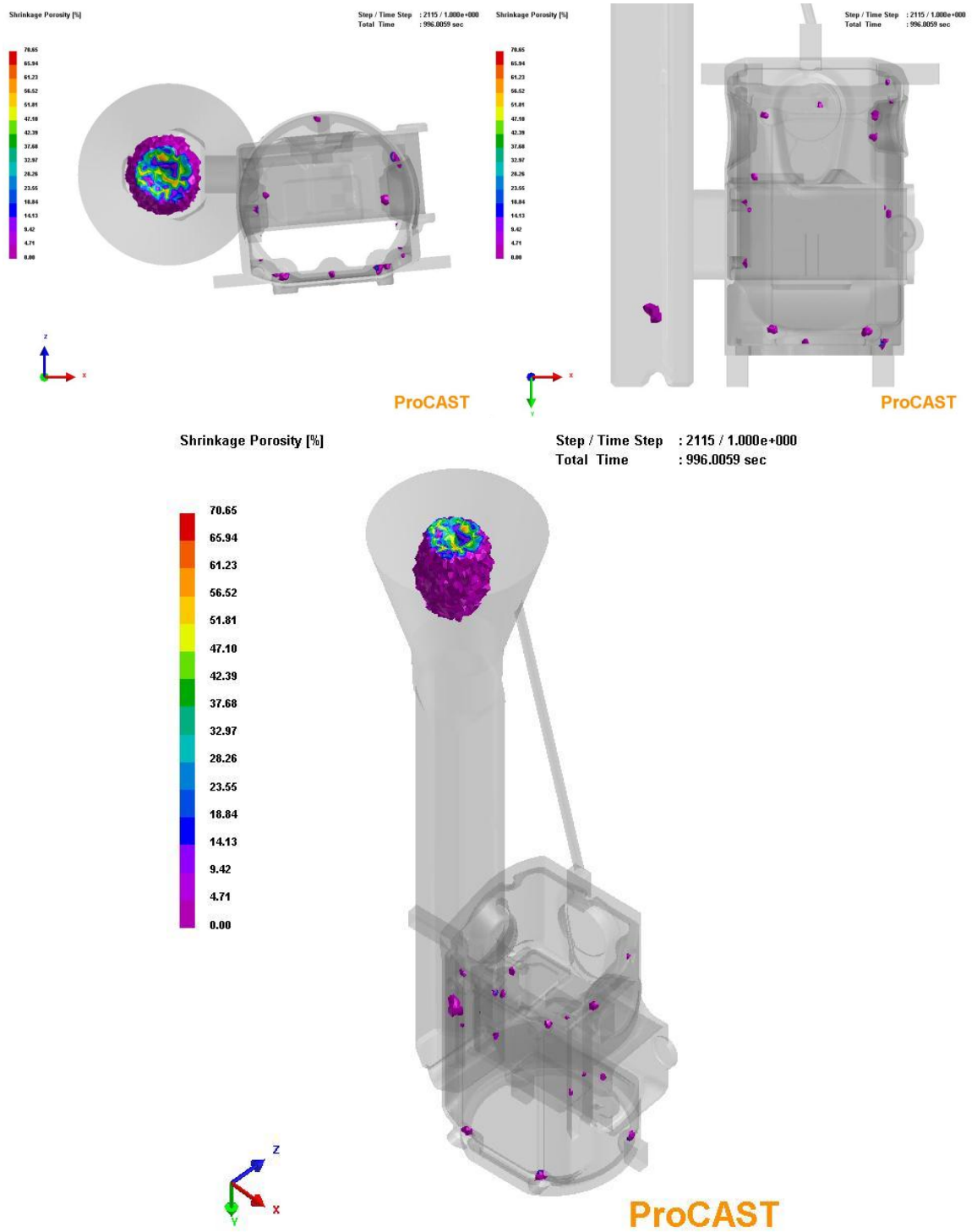


Obr. 3.52 Varianta 4 – tuhnutí\_7

Odlitek tuhne vcelku uspokojivým způsobem, nicméně na obr. 3.52 lze spatřit potenciální problém. Zřejmě zde vznikne malá ředina, která bude v obráběné ploše „1“, případně v její těsné blízkosti.



### Predikce ředin v odlitku



Obr. 3.53 Varianta 4 – predikce ředin v odlitku

Předpoklad se potvrdil a je predikována ředina v jedné z důležitých ploch, což je nepřijatelné. Tuto variantu nelze doporučit k výrobě.

### **3. 3 Zhodnocení – výběr vhodné varianty**

Na základě předchozích simulací byly po poradě se zainteresovanými stranami vybrány dvě varianty k verifikaci výsledků. Jedná se o tyto:

#### Varianta 1

Zde simulace predikuje nejmenší množství vad. Pro hovoří také celková jednoduchost jejího zavedení a minimální navýšení nákladů na výrobu.

#### Varianta 2

Důvodem je, že z možných variant změny vtokové soustavy dává nejlepší výsledky. Po poradě byla tato varianta modifikována – počet odlitků na vtokovém kanálu byl zvýšen na tři. Odlitek by měl tuhnout velmi podobně, navíc bude mezi odlitky a kulem docházet k vzájemnému osálávání, což ještě podpoří usměrněnost tuhnutí. Pro kontrolu byly tyto předpoklady ověřeny simulací (viz varianta 5).

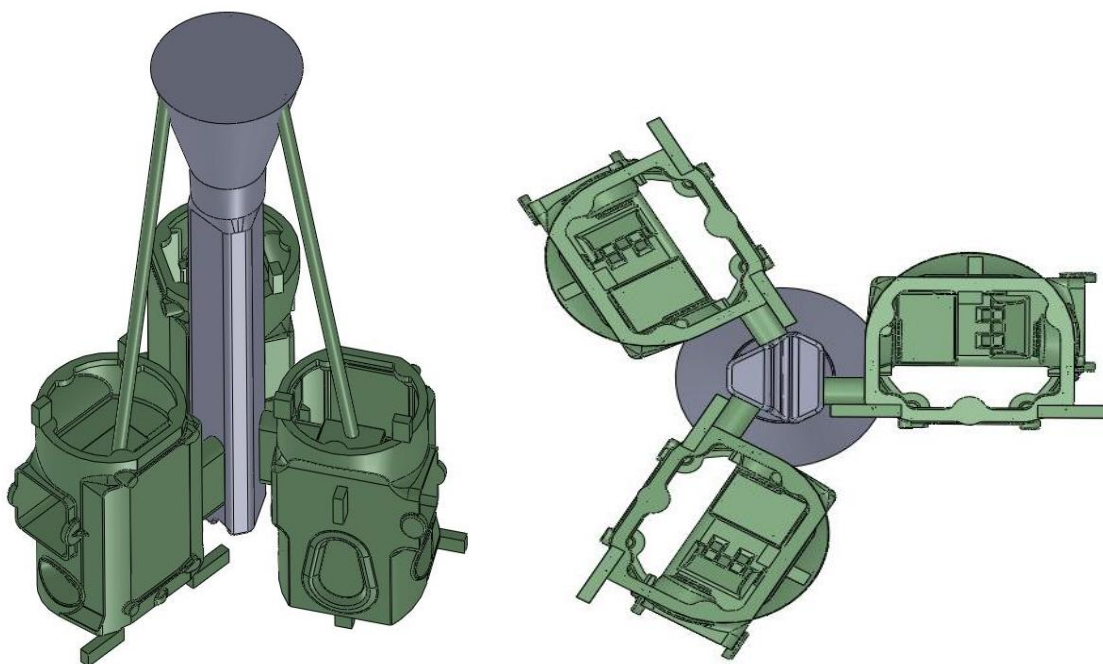
#### *Ostatní varianty*

Varianta 3 založená na variantě 2 měla ověřit vliv změny orientace odlitku. Z hlediska odlití nebylo naplněno očekávání klidnějšího plnění. Dle simulace se navíc oproti výchozí variantě zvýšil objem ředin v odlitku. Verifikace varianty 3 nebyla provedena.

Simulace varianty 4 predikuje výskyt řediny v ploše „1“, navíc se objem ředin celkově oproti variantě 2 nezmenšil. Ani ze strany simulace plnění nelze tuto variantu považovat za výhodnou. Odlití varianty 4 tedy nebylo provedeno.

#### Varianta 5

Tato varianta vychází z varianty 2. Kvůli ekonomii výroby byly na vtokovou soustavu umístěny tři odlitky. Výhodou tohoto řešení je krom vyššího využití tekutého kovu také stabilita celé skořepinové formy na licím roštu. Pro zachování správnosti výpočtů je důležité právě dodržení symetričnosti celého stromečku. Důležitá je svislost kůlu a také přesnost umístění voskových modelů při výrobě stromečku. Při nedodržení těchto podmínek by docházelo při lití k nestejnému plnění dutin budoucích odlitků, což by vedlo k deformacím teplotních polí.

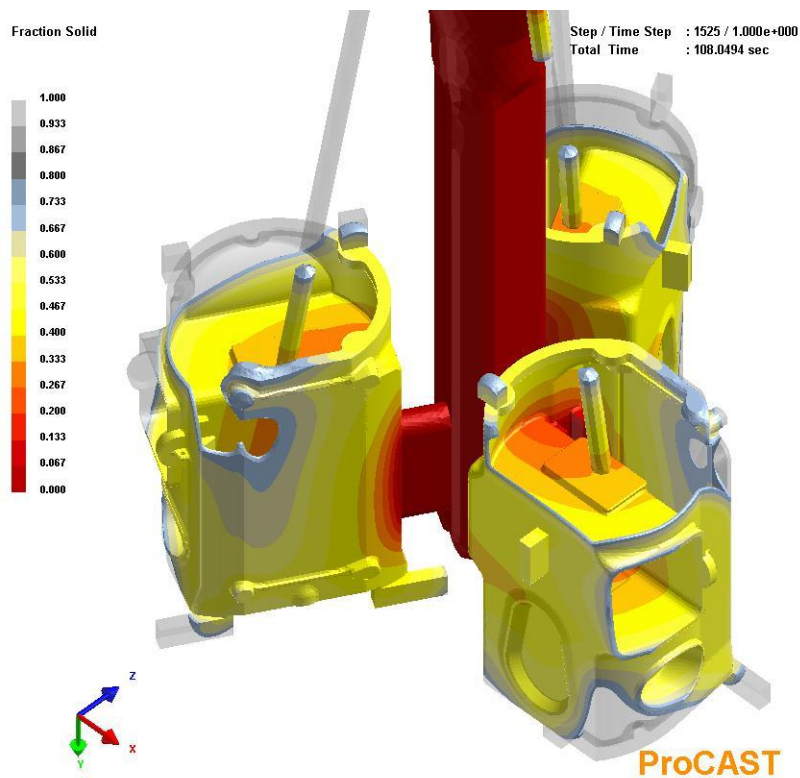


Obr. 3.54 Varianta 5 - stromeček

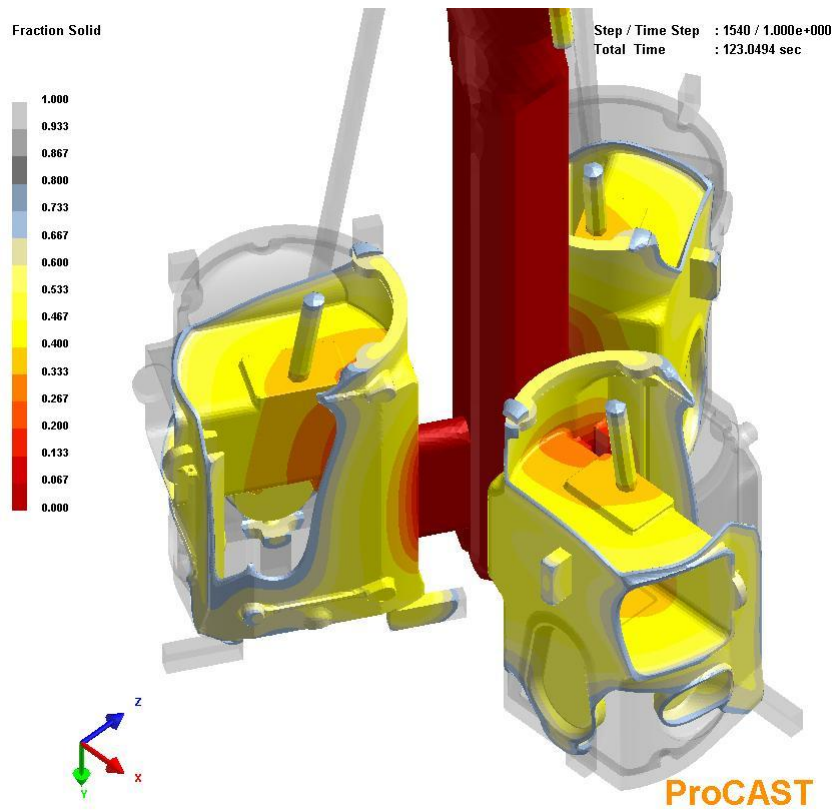
### Plnění

Simulaci plnění si lze prohlédnout v souboru plnění\_V5.avi na přiloženém CD. Její průběh fakticky odpovídá plnění varianty 2.

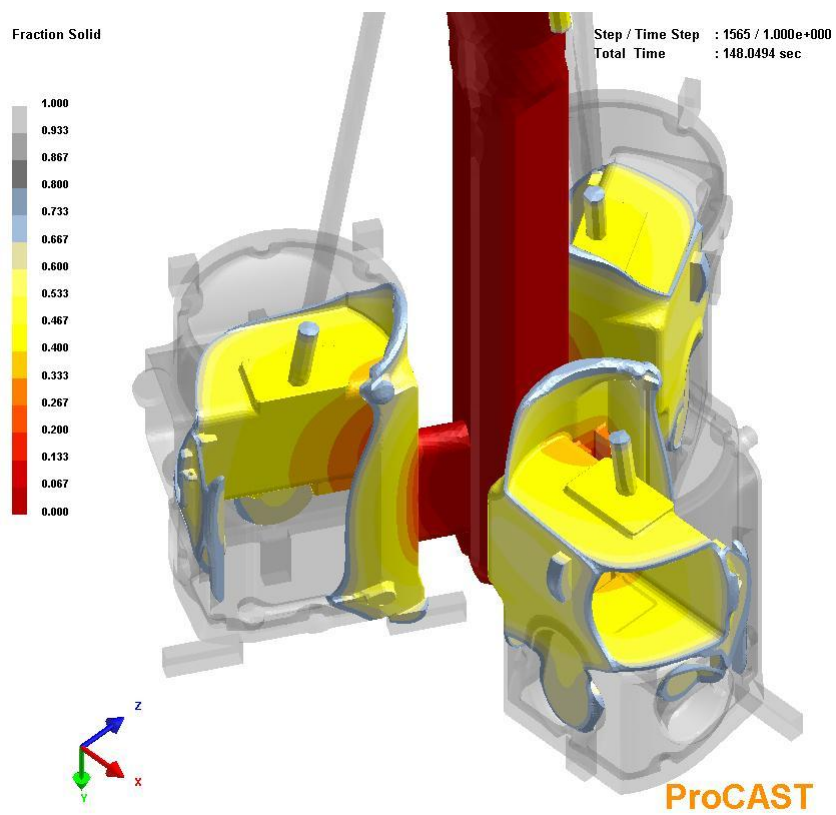
### Tuhnutí



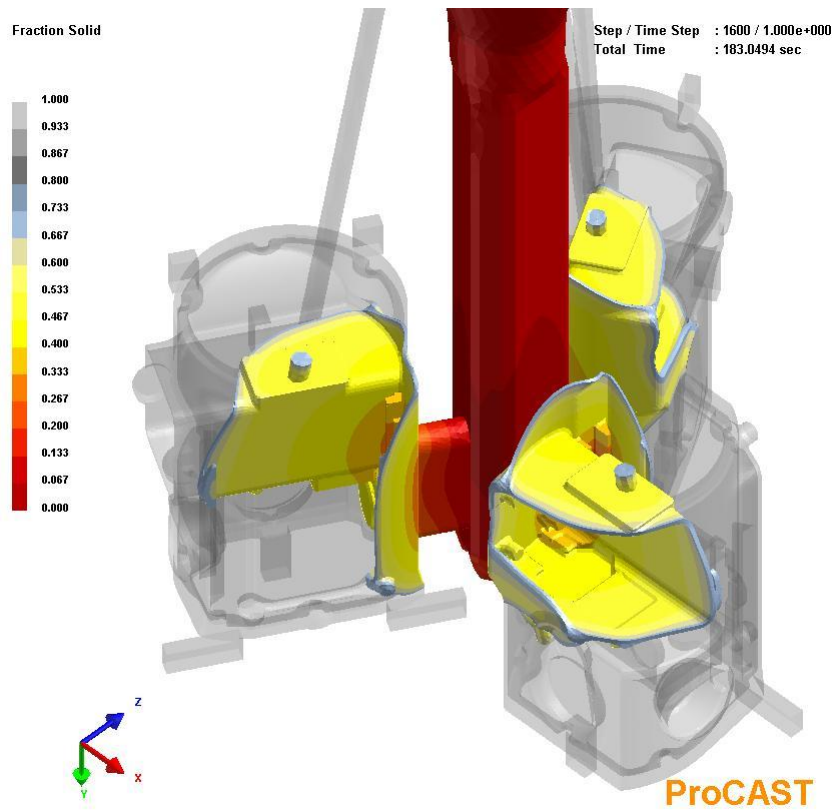
Obr. 3.55 Varianta 5 – tuhnutí\_1



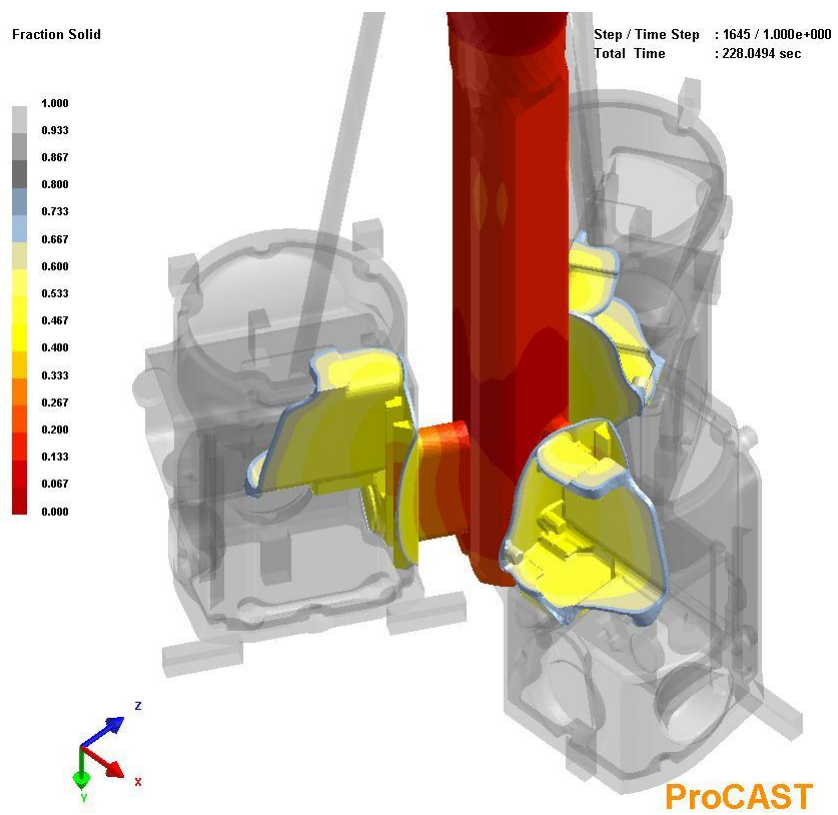
Obr. 3.56 Varianta 5 – tuhnutí\_2



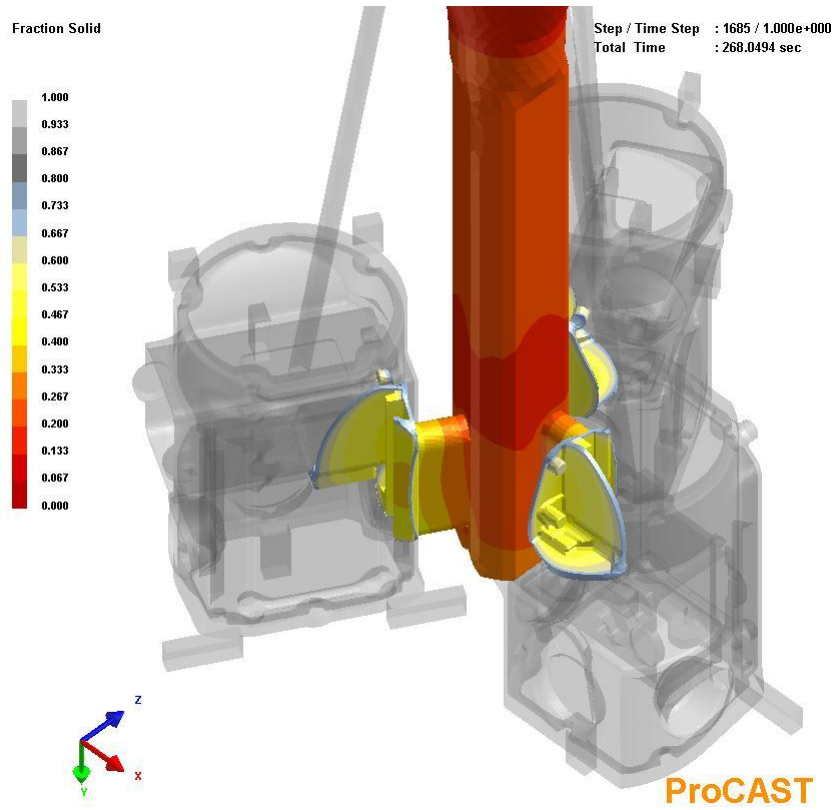
Obr. 3.57 Varianta 5 – tuhnutí\_3



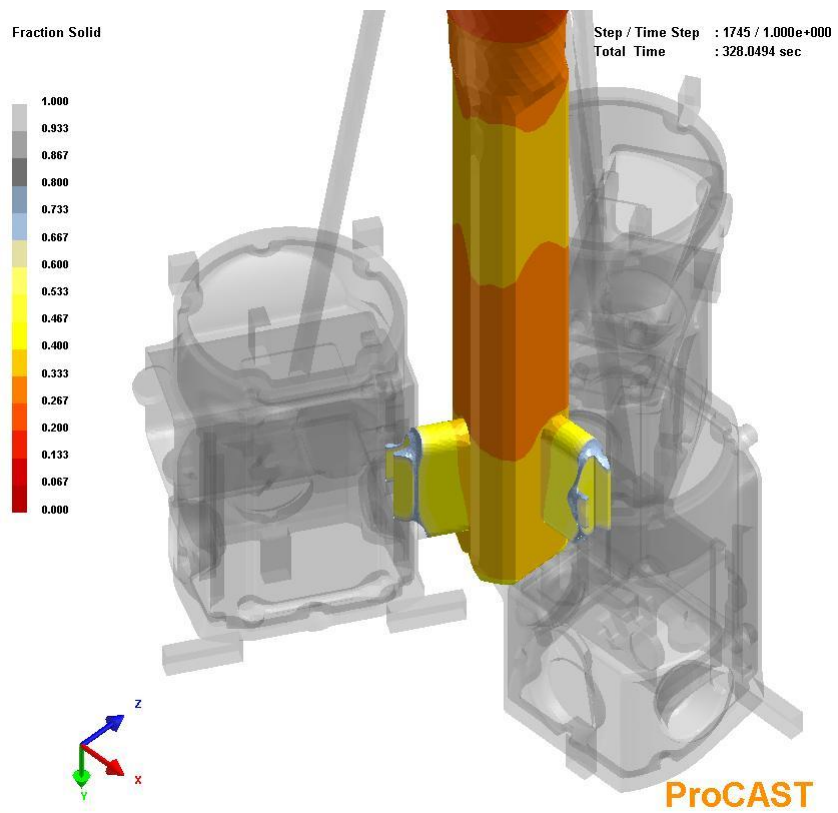
Obr. 3.58 Varianta 5 – tuhnutí\_4



Obr. 3.59 Varianta 5 – tuhnutí\_5



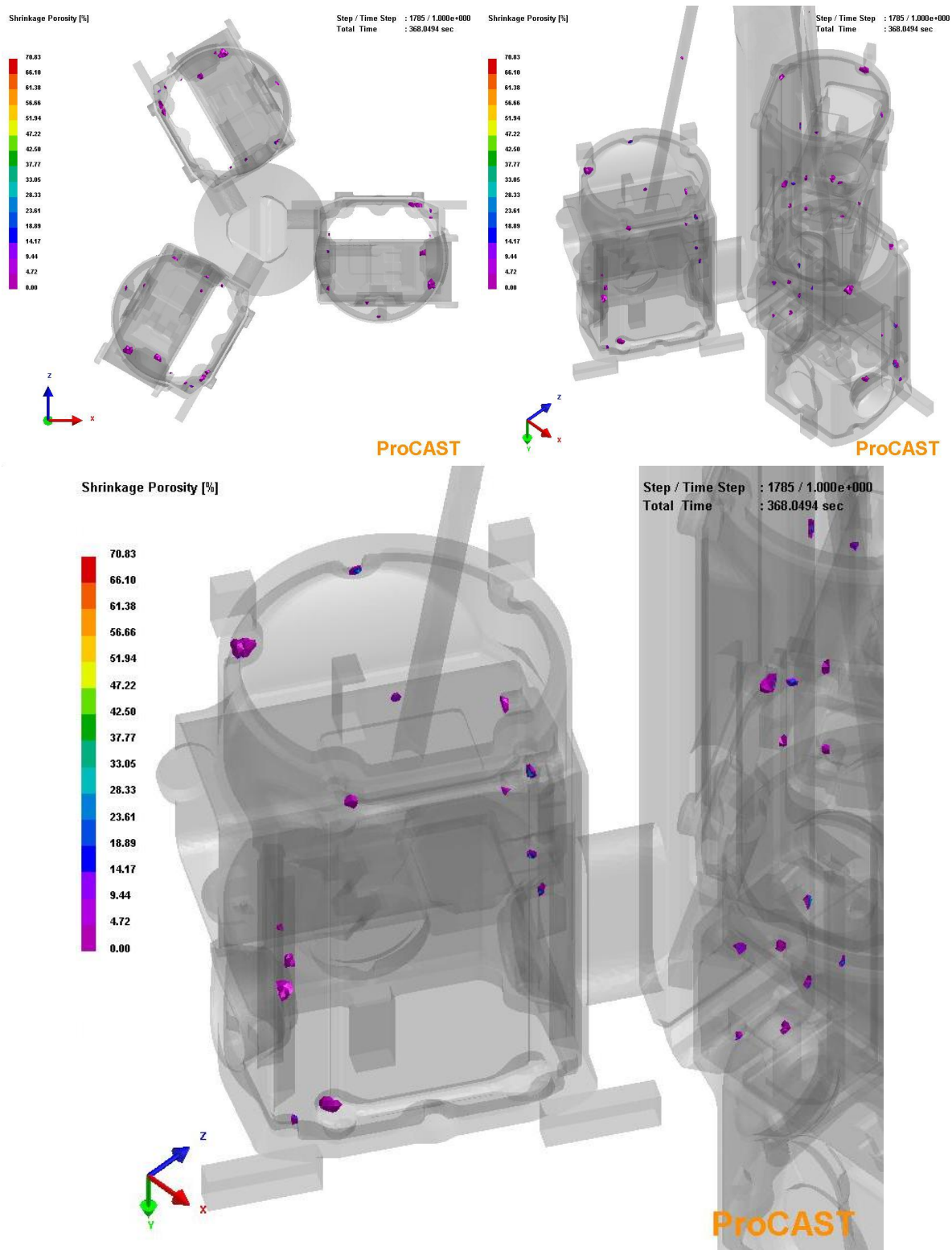
Obr. 3.60 Varianta 5 – tuhnutí\_6



Obr. 3.61 Varianta 5 – tuhnutí\_7

Odlitky tuhnu velmi podobně jako v případě varianty 2. Předpoklad vyslovený v kapitole 2.3 se potvrdil.

### Predikce ředin v odlitku



Obr. 3.62 Varianta 5 – predikce ředin v odlitku

Výsledky simulace jsou uspokojující a proto je možno tuto variantu doporučit k ověření.

### 3.4 Ověření optimalizovaných variant ve výrobě

#### Vzorková série

Na základě uspokojujících výsledků simulace bylo provedeno odlití vzorkové série. Jednalo se o čtyři kusy stromečků dle varianty 1 a dva kusy stromečků dle varianty 5. Cílem bylo ověřit správnost numerické simulace.

Tato malá série může dát jisté informace, nicméně opravdu relevantní posouzení může poskytnout až sériová výroba, za předpokladu, že by se jedna z těchto variant stala variantou produkční.

#### Varianta 1



Obr. 3.63 Varianta 1 – forma před vložením do žíhací pece

Na skořepinovou formu byla pomocí drátu připevněna izolace Insulfrax S Blanket hustoty  $96 \text{ kg.m}^{-3}$  o tloušťce 13 mm. Jedná se o izolaci na bázi vápníku, hořčíku a křemičitanů. Je schopna nepřetržitě odolávat teplotám až do výše  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ , pro danou aplikaci je tedy více než dostačující.[23]



Tab. 3.3 Tepelná vodivost izolace [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ] [23]

Objemová hmotnost Střední teplota	64 $kg \cdot m^{-3}$	96 $kg \cdot m^{-3}$	128 $kg \cdot m^{-3}$	160 $kg \cdot m^{-3}$
400 °C	0.12	0.11	0.10	0.09
600 °C	0.18	0.17	0.16	0.15
800 °C	0.27	0.26	0.23	0.21
1000 °C	0.43	0.36	0.31	0.29

Bylo také upuštěno od použití keramického filtru, jehož prospěšnost je při současně používaném umístění sporná. Důsledek tohoto rozhodnutí ať už při plnění nebo tuhnutí odlitku je minimální.

#### Varianta 5



Obr. 3.64 Varianta 5 – skořepinová forma

U varianty 5 byl tvar stromečku sestaven do požadované podoby úpravou původního modelu varianty 1, který obsahuje dva zářezy. Ty byly odstraněny a byl připojen pouze jeden zářez požadovaných rozměrů. Dále byly připojeny výfukové tyčinky (budoucí kanálky pro odvod plynů z formy). Při těchto operacích hrozí poškození modelu a tím výroba nehodného kusu, jelikož je většina povrchů tohoto odlitku lita tzv. „na hotovo“. Pro ověření vhodnosti této varianty toto řešení dostačuje, ovšem pro sériovou výrobu by bylo nutno upravit matečnou formu modelu a vyrobit formu pro požadovaný rozměr modelu kanálku (tyčinky).

### Parametry při lití

Aby byla ověřena správnost numerické simulace, bylo nutno dodržet podmínky při odlévání co nejlépe vstupním parametřům výpočtu. V tomto směru byly podniknuty následující kroky:

- a) Aby byla dosažena požadovaná teplota skořepinové formy při lití (565 °C) byla na základě měření pyrometrem a ze zkušenosti pracovníků slévárny nastavena na panelu žíhací pece cílená hodnota teploty na 580 °C (původně 570 °C), důvodem je nehomogenita teplotního pole pece a ochlazování formy již během otevírání pece. K zamezení rozdílu v teplotě jednotlivých forem, se na jedno otevření pece odlévalo malé množství forem a poté se pec nechala naběhnout na požadovanou teplotu a ponechal se také čas na opětovné prohřátí forem. Varianta 1 se odlévala vždy po dvou kusech. Varianta 5 po jednom stromečku.
- b) Před každým litím se provádělo kontrolní měření teploty taveniny pomocí ponorného termočláčku.
- c) Původní rošt nebyl schopen zajistit správné ustavení forem. Pro dodržení požadované polohy lití byl proto improvizovaně sestaven nový licí rošt. Poloha roštu byla ustavena pomocí vodováhy. Jelikož formy varianty 1 nebyly dostatečně stabilní, byl rošt doplněn ohrádkou.



Obr. 3.65 Improvizovaný licí rošt

## Tavenina

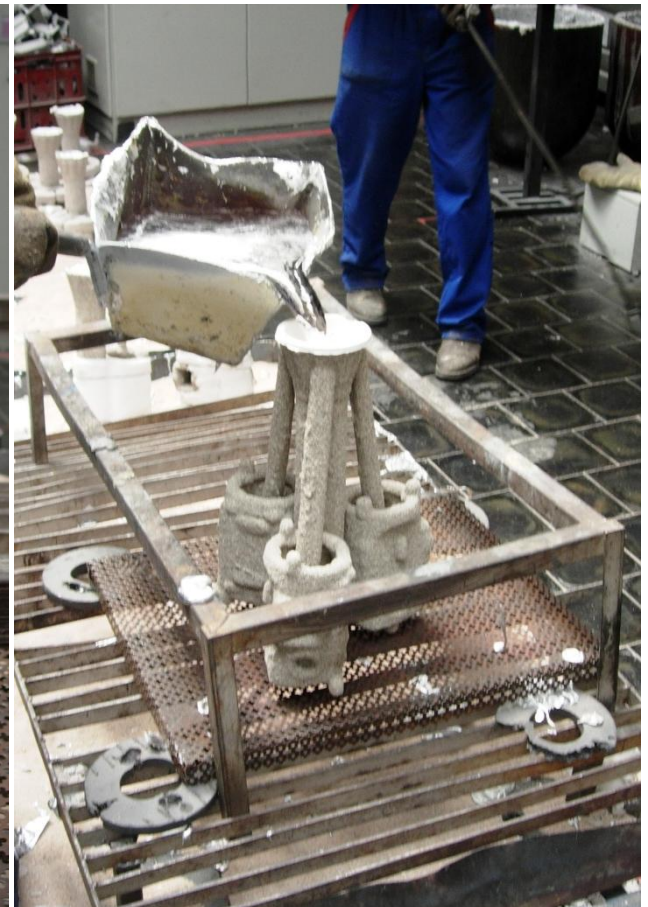
Byly provedeny všechny úkony nutné k přípravě taveniny (viz kapitola 3.1). Chemické složení dle normy. Naplynění  $DI = 1,13$



Obr. 3.66 Skořepinové formy v žíhací peci



Obr. 3.67 Ustavení formy na licím roštu



Obr. 3.68 Odlití stromečku – varianta 5

## Kontrola odlitků



Obr. 3.69 Odlitky varianty 1



Obr. 3.70 Odlitý stroměček varianty 5

## RTG hodnocení

Odlitky byly po apretaci podrobeny rentgenové zkoušce. Z časového důvodu se neprováděla penetrační zkouška ani metalografické hodnocení. Nicméně při výrobě tohoto kusu je hlavním ukazatelem zdravoti odlitku RTG prozařování.

Varianta 1:

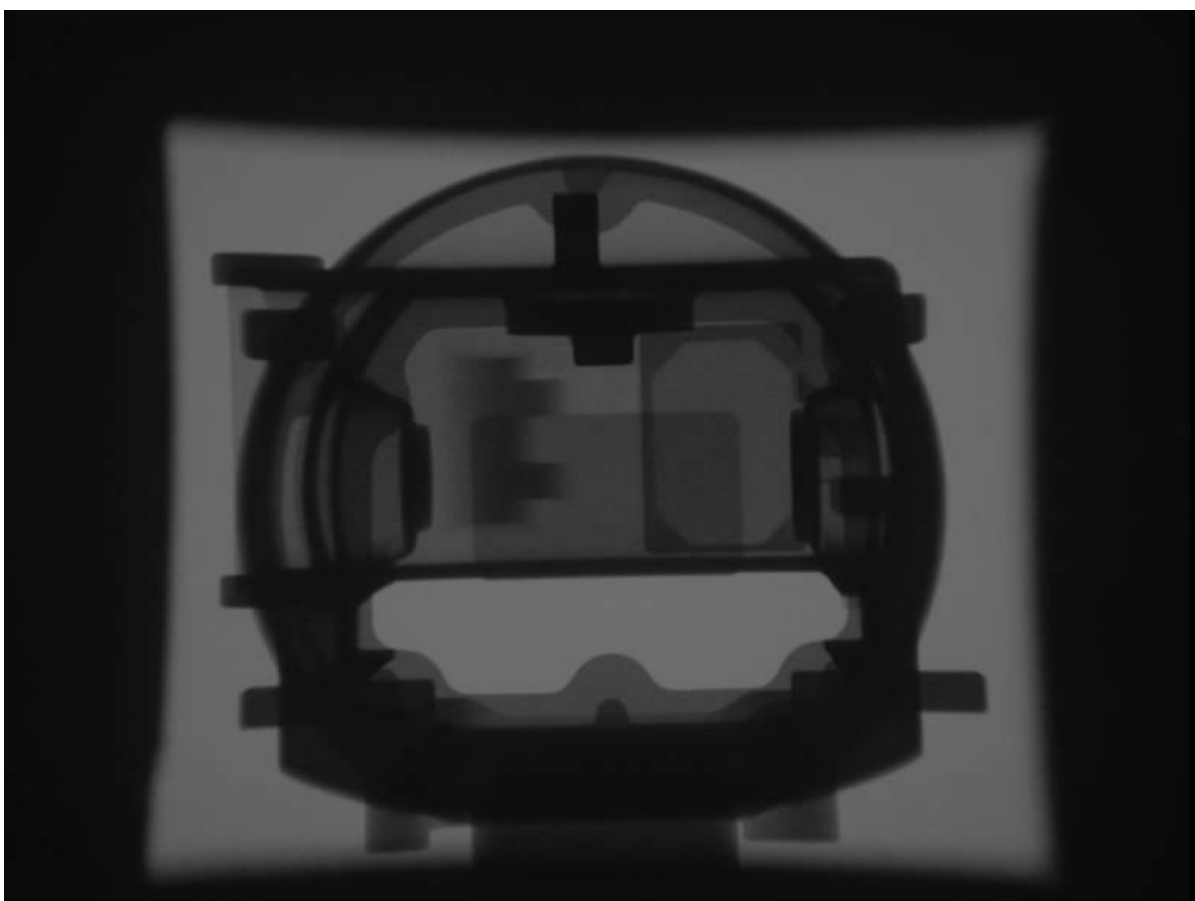
Jeden ze čtyř odlitků byl postižen trhlinou. K tomuto poškození zřejmě došlo předčasnou manipulací s formou po odlití. Nicméně co se týče výskytu staženin a ředin byly kusy posouzeny jako vysoce jakostní.



Obr. 3.71 Trhlina



Obr. 3.72 RTG snímek trhliny



Obr. 73 RTG snímek kusu dle varianty 1

Varianta 5:

Jeden ze šesti kusů obsahoval ředinu v ploše „2“ a proto byl označen jako neshodný výrobek. Tato ředina byla zřejmě způsobena příliš masivní výfukovou tyčinkou, která ovlivnila tuhnutí této plochy. Ostatní kusy byly prosté staženin či ředin.

#### Zhodnocení

Z verifikačního procesu tedy plyne, že úpravy provedené na základě numerické simulace přispěly k výrazně nižší zmetkovitosti procesu. Výběr lepší z obou variant je ovšem poněkud složitý. Jako kritérium se nabízí počet zákazníkem objednaných kusů. Pro malý počet je vhodné vyrábět dle varianty 1, která je jednoduchou úpravou stávající varianty 0. Spotřeba materiálu navíc zahrnuje pouze vázací drát a izolaci, přičemž ta může být po odlití formy použita znovu. Pro variantu 5 hovoří odlití tří kusů najednou, tedy menší spotřeba voskových vtokových elementů, obalovacích hmot i samotného kovu. Nevýhodou je nutná úprava formy a výroba formy pro výfukové tyčinky. Vhodné by bylo ověřit, zda jsou potřeba a případně od jejich užití upustit.

## 4. ZÁVĚR

Úvod práce je zaměřen na technologii vytavitelného modelu. Velmi stručně je popsán její princip a je zde také proveden rozbor faktorů, které mohou ovlivnit výslednou zdravotnost odlitku z hlediska plnění a tuhnutí kovu uvnitř skořepinové formy.

Následuje popis možných užití numerické simulace ve vztahu ke slévárenským procesům. Dále je charakterizován slévárenský simulační software ProCast. Jsou popsány jeho jednotlivé části – moduly.

Praktickým úkolem práce bylo optimalizovat odlitek litý metodou vytavitelného modelu. Jednalo se o tenkostěnný tvarově složitý kus pro zahraniční společnost působící v obranném průmyslu. Výroba tohoto odlitku se ve vzorkové sérii vyznačovala zmetkovitostí až 90%. Vady se v drtivé většině řadily mezi vady vzniklé při lití nebo krystalizaci. Z tohoto pohledu se nabízelo využití numerické simulace jako prostředku k optimalizaci.

Za pomoci software ProCast byl analyzován výchozí stav. Na základě simulace a z metalografického hodnocení byla určena příčina vzniku vad – neusměrněné tuhnutí. Následoval návrh možných variant řešení. Pro každou z variant byla provedena simulace a diskuze těchto výsledků. Jednotlivé výstupy simulací byly mezi sebou porovnány.

K verifikaci byly vybrány dvě varianty, které dávaly největší předpoklad zdravotnosti vyrobených kusů. Po odlití byla pomocí rentgenového prozařování provedena kontrola. Byla zjištěna až překvapivá jakost těchto odlitků.

Numerická simulace má ve slévárnách své opodstatnění. Náklady na pořízení software i hardware dnes již nejsou závratné, navíc je tato technologie jakožto moderní a inovativní prostředek podporována ať již ze strany státu nebo Evropské unie.

Jedinou překážkou numerické simulace ve slévárenství tak zůstává lidský faktor. Ať už v podobě nedostatečně vyškolených technických pracovníků nebo nedostatečné osvěty pro dělníky. Za předpokladu nedodržení technologické kázně totiž nelze očekávat odpovídající výsledky - pokud nejsou dodrženy vstupní parametry simulace, pak simulace samotná ztrácí smysl.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MRÁZEK, Martin. Technologie přesného lití. *Slévárství*. 2008, 56, 9-10, s. 468-470. ISSN 0037-6825.
- [2] HORÁČEK, Milan. LATEST TRENDS IN INVESTMENT CASTING TECHNOLOGY. In . [s.l.] : [s.n.], 2008 [cit. 2010-04-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl6.pdf>>.
- [3] Beeley, Peter R. Investment Casting /London :The Institute of Materials,1995. 1st ed. 486 s. ISBN 0-901716-6-9.
- [4] PAVELKA, Miroslav. 100. výročí narození Dr. Ing. Josefa Doškáře – průkopníka postupu přesného lití na vytavitelný model. *Slévárství*. 2008, 56, 9-10, s. 470-471. ISSN 0037-6825.
- [5] HORÁČEK, Milan INVESTMENT CASTING INDUSTRY IN CENTRAL EUROPE. In *12th World Conference on Investment Casting*. Dallas : [s.n.], 19-22.10.2008 [cit. 2010-04-01]. Dostupné z WWW: <<http://www.investmentcastingwax.com/downloads/ml28.pdf>>.
- [6] HERMAN, Aleš. *Lití na vytavitelný model* [online]. [s.l.], 2007. 30 s. Podklad ke studiu. ČVUT. Dostupné z WWW: <<http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20na%20vytavitelny%20model.pdf>>.
- [7] HORÁČEK, Milan. *VUT FSI Brno : Studijní opory - Výroba přesných odlitků technologií vytavitelného modelu* [online]. 2006 [cit. 2010-05-11]. Odbor slévárství. Dostupné z WWW: <<http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/download/vyroba-presnych-modelu.pps>>.
- [8] ELBEL, Tomáš, et al. *Vady odlitků ze slitin železa*. Vyd. 1. Brno : Matecs, 1992. 340 s.
- [9] HORÁČEK, Milan; ČECH, Jaroslav; ZEMČÍK, Ladislav. *Teorie slévárenských procesů : Návody do cvičení*. Vyd. 1. Brno : Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1987. 110 s. ISBN 55-558/1-87.
- [10] HLAVÁČOVÁ, Irena. *VŠB-TU Ostrava : Materiály k předmětu Aplikovaná fyzika* [online]. 2009 [cit. 2010-05-11]. Institut fyziky. Dostupné z WWW: <[if.vsb.cz/Kontakt/Hlavacova/termokinetika.doc](http://if.vsb.cz/Kontakt/Hlavacova/termokinetika.doc)>.
- [11] ROUČKA, Jaromír, et al. Tepelné procesy při odlévání do samonosných skořepinových forem a jejich numerická simulace. *Slévárství*. 2008, 56, 9-10, s. 405-411. ISSN 0037-6825.
- [12] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. *Fyzika : vysokoškolská učebnice obecné fyziky.část 2,Mechanika-Termodynamika*. Vyd. 1. Brno : Vysoké učení technické v Brně – Nakladatelství VUTIUM, 2000. 283 s. ISBN 80-214-1868-0.
- [13] Igor Láník : Techservis Boskovice [online]. 2008 [cit. 2010-04-11]. Dostupné z WWW: <<http://lanik.cz/>>.
- [14] Vyplatí se investovat do simulačních softwarů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2001, 1, [cit. 2010-04-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/vyplati-se-investovat-do-simulacnich-softwaru>>.
- [15] KRUTIŠ, Vladimír; KUZMA, Zbyněk. Numerická simulace ve slévárenské technologii. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2009, 10, [cit. 2010-04-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/numericka-simulace-ve-slevarenske-technologie>>.
- [16] KRUTIŠ, Vladimír. Numerická simulace slévárenského procesu. *Podnikatel* [online]. 2006, 3, [cit. 2010-04-25]. Dostupný z WWW: <[http://www.esi-group.com/cz/doc/podnikatel\\_32\\_03\\_2006.pdf](http://www.esi-group.com/cz/doc/podnikatel_32_03_2006.pdf)>.
- [17] ProCAST User Manual. Version 2009.1. Revised version (July 2009) - CL/PRCA/09/05/01/A. ESI Group.
- [18] Casting Simulation Suite. [online]. [cit. 2010-04-25]. Dostupný z WWW: <[http://www.esi-group.com/products/casting/procast/benefits/files/Brochure\\_casting\\_BD.pdf](http://www.esi-group.com/products/casting/procast/benefits/files/Brochure_casting_BD.pdf)>.



- [19] NOVÁ, Iva; KOSEK, Petr; ŠMRHA, Jan. Slévárenské simulační programy. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2005, 11, [cit. 2010-04-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/slevarenske-simulacni-programy>>.
- [20] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Vyd. 1. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2004. 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
- [21] [www.fimes.mesit.cz](http://www.fimes.mesit.cz) [online]. c2008 [cit. 2010-04-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.fimes.mesit.cz/cs>>.
- [22] *MECAS ESI s.r.o.* [online]. c2008 [cit. 2010-04-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.esi-group.com/cz/>>.
- [23] *Unifrax.com* [online]. 2009 [cit. 2010-04-26]. Insulfrax S Blanket. Dostupné z WWW: <[http://www.unifrax.com/web/UnifraxWebEU.nsf/By+Trade+Name/31DBA39D4FBF8D59802576C0004F705A/\\$File/Insulfrax%20S%20Blanket%20CZ.pdf](http://www.unifrax.com/web/UnifraxWebEU.nsf/By+Trade+Name/31DBA39D4FBF8D59802576C0004F705A/$File/Insulfrax%20S%20Blanket%20CZ.pdf)>.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
Re	[ - ]	Reynoldsovo číslo
R <sub>h</sub>	[ m ]	hydraulický poloměr
$\nu$	[ m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	kinematické viskozita
v	[ m.s <sup>-1</sup> ]	rychlost kovu
S	[ m <sup>2</sup> ]	obsah průřezu proudu
O	[ m ]	smáčený obvod
$\varphi$	[ N <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> .m <sup>2</sup> ]	tekutost
$\eta$	[ Pa.s ]	dynamická viskozita
m	[ kg ]	hmotnost formy
c	[ J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	měrná tepelná kapacita formy
dT <sub>1</sub>	[ K ]	rozdíl teplot kovu a formy
$\alpha_{celk}$	[ W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]	celkový efektivní součinitel přestupu tepla
$\alpha_{rad}$	[ W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]	radiální složka celkového efektivního součinitele přestupu tepla
$\alpha_{konv}$	[ W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]	konvektivní složka celkového efektivního součinitele přestupu tepla
dT <sub>2</sub>	[ K ]	rozdíl teploty mezi vnějším povrchem formy a teplotou okolí
S <sub>1</sub>	[ m <sup>2</sup> ]	ochlazovaná plocha formy