



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# **NUMERICKÁ SIMULACE VÝROBY KERAMICKÝCH JADER PRO METODU LITÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL**

NUMERICAL SIMULATION OF THE CERAMIC CORE MANUFACTURING IN THE INVESTMENT  
CASTING PROCESS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**BC. MAREK KINC**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**ING. LADISLAV TOMEK**

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Marek Kinc

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:

**Numerická simulace výroby keramických jader pro technologii lití na vytavitelný model**

v anglickém jazyce:

**Numerical simulation of the ceramic core manufacturing in the investment casting process**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při výrobě odlitků technologií lití na vytavitelný model jsou v případě komplikovaných tvarů a dutin využívána keramická jádra. Tato jsou dnes nejčastěji vyráběna vstřikováním vosko-keramické směsi do kovových forem na vstřikolisech a následně vypalována. Právě fáze výroby syrového jádra patří mezi jednu z klíčových částí v samotném procesu zhotovení. Nastavení technologických podmínek procesu vstřikování, optimálně navržená forma a použitá směs jsou rozhodujícími faktory pro zhotovení jakostního syrového jádra bez vad a v dostatečné rozměrové a tvarové toleranci.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je využití numerické simulace pro popis průběhu proudění vosko-keramické směsi dutinou formy během vstřikovacího cyklu s následnou validací v reálných podmínkách.

Seznam odborné literatury:

1. KOSOUR, V. Využití numerické simulace k optimalizaci výroby voskových modelů. Disertační práce v oboru "Strojírenská technologie". Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 2012. 139 s.
2. HERMAN, A., ČESAL, M., PÍŠA, V. Problematika simulací chování voskových modelů. Slévárenství. 2012, roč. LX, č. 9-10, s. 342-345. ISSN 0037-6825.
3. KOSOUR, V., HORÁČEK, M. Numerická simulace vstřikování voskové směsi pro výrobu modelů. Slévárenství. 2010, roč. LVIII, č. 11-12, s. 374-378. ISSN 0037-6825.
4. BEELEY, P.- R., SMART, R.- F. The institute of materials. Investment Casting. London: The Universit Press Cambridge, 1995. 486 p. ISBN 0901716669.
5. CHHABRA, R.-P., RICHARDSON, J.-F.. Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications. Hungary: Elsevier, 2008. p. 501. Second edition. ISBN 978-0-7506-8532-0.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Ladislav Tomek

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 20.11.2014

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Cílem diplomové práce je validace numerické simulace výroby keramických jader pro metodu lití na vytavitelný vosk. První část práce se zabývá teoretickým popisem výroby keramických jader a popisem základních principů numerických simulací. Druhá část práce porovnává video záznam plnění dutiny formy vosko-keramickou směsí se simulací plnění vytvořenou v programu Cadmould 3D-F.

### **Klíčová slova**

keramické jádro, numerická simulace, fused silica, Cadmould 3D-F, lití na vytavitelný model

## **ABSTRACT**

The aim of this diploma thesis is validation of numerical simulation of the ceramic core manufacturing in the investment casting proces. The first part submit the theoretical description of the manufacturing of the ceramic cores and a description of the basic principles of numerical simulations. The second part compares the video recording of filling the wax-ceramic mixture to the die-casting mold and simulation of the same process created in a simulation software Cadmould 3D-F.

### **Key words**

Ceramic cores, numerical simulation, fused silica, Cadmould 3D-F, investment casting

## **Bibliografická citace**

KINC, M. *Numerická simulace výroby keramických jader pro technologii lití na vytavitelný model*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 97 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ladislav Tomek.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Numerická simulace výroby keramických jader pro metodu lití na vytavitelný model* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Bc. Marek Kinc

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto chci poděkovat firmě Láník s.r.o. a vedoucímu diplomové práce Ing. Ladislavu Tomkovi za vstřícnost a spolupráci při tvorbě diplomové práce. Děkuji panu Ing. Jiřímu Gabrieli za ochotu a cenné rady k programu Cadmould.

V neposlední řadě chci poděkovat svým rodičům za podporu a potřebné zázemí během celého studia.

Děkuji Vám

# OBSAH

|  |    |
|--|----|
| ÚVOD.....  | 9  |
| 1 TECHNOLOGIE VÝROBY KERAMICKÝCH JADER PRO METODU LITÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL..... | 11 |
| 1.1 APLIKACE KERAMICKÝCH JADER V TECHNOLOGII LITÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL.....      | 12 |
| 1.1.1 Výroba vytavitelného modelu .....  | 12 |
| 1.1.2 Vytavení vosku a vyžhání skořepiny.....                                    | 14 |
| 1.1.3 Odlévání skořepiny.....  | 14 |
| 1.1.4 Vyplavení jader z dutiny odlitku .....                                     | 14 |
| 1.2 VÝROBA KERAMICKÝCH JADER .....   | 15 |
| 1.2.1 Fused silica .....   | 15 |
| 1.2.2 Příprava keramické hmoty.....  | 16 |
| 1.2.3 Výroba keramických jader vstřikováním do kovových forem .....              | 17 |
| 1.2.4 Výpal keramických jader.....   | 20 |
| 2 NUMERICKÁ SIMULACE .....   | 22 |
| 2.1 MATEMATICKÝ MODEL.....   | 22 |
| 2.1.1 Počáteční a okrajové podmínky.....   | 23 |
| 2.2 METODY ŘEŠENÍ.....   | 24 |
| 2.2.1 Analytické řešení .....  | 24 |
| 2.2.2 Numerické řešení.....  | 24 |
| 2.2.3 Materiálová knihovna .....   | 25 |
| 2.3 METODY DISKRETIZACE .....  | 25 |
| 2.3.1 Metoda konečných prvků .....   | 25 |
| 2.3.2 Metoda konečných diferencí .....   | 26 |
| 2.4 ARCHITEKTURA SIMULAČNÍCH PROGRAMŮ .....                                      | 27 |
| 2.4.1 Preprocessing.....   | 27 |
| 2.4.2 Mainprocessing.....  | 27 |
| 2.4.3 Postprocessing .....   | 27 |
| 3 VALIDACE SIMULACE PLNĚNÍ VSTŘIKOVACÍ FORMY PRO KERAMICKÁ JÁDRA .....           | 28 |
| 3.1 SIMULAČNÍ PROGRAM CADMOULD 3D – F.....                                       | 29 |
| 3.1.1 Výpočtový model .....  | 29 |
| 3.1.2 Materiálová databáze programu Cadmould.....                                | 31 |
| 3.1.3 Postup tvorby simulace v programu Cadmould .....                           | 31 |
| 3.2 GEOMETRIE EXPERIMENTÁLNÍHO KERAMICKÉHO JÁDRA .....                           | 36 |
| 3.2.1 Vstřikovací forma .....  | 38 |
| 3.3 KERAMICKÁ HMOTA MP04 .....   | 39 |
| 3.3.1 Měrná tepelná kapacita.....  | 40 |
| 3.3.2 Teplota meze tečení.....   | 41 |
| 3.3.3 Tepelná vodivost .....   | 41 |

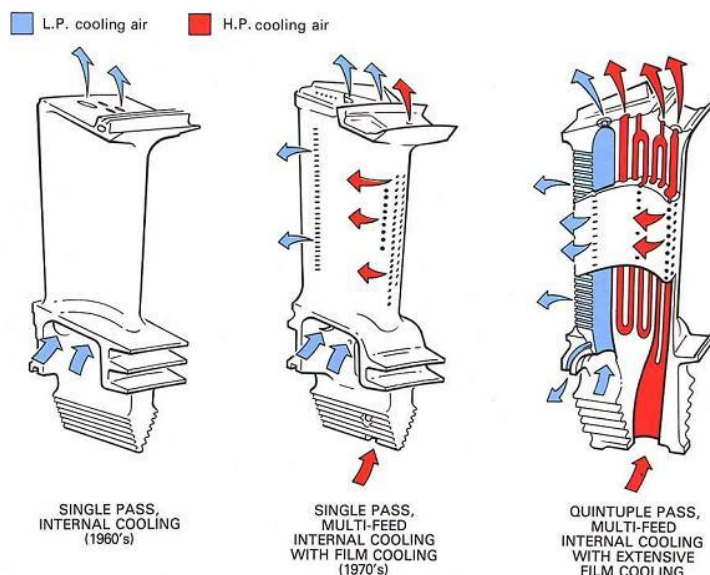
|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.3.4 | pVT Diagram.....   | 41 |
| 3.3.5 | Viskozita.....   | 42 |
| 3.4   | MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ .....  | 44 |
| 3.4.1 | Popis komponentů měřicího přístroje.....   | 45 |
| 3.4.2 | Konstrukce měřicího přístroje .....  | 50 |
| 3.5   | EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ.....   | 52 |
| 3.5.1 | Vliv nastavení parametrů vstřikovacího procesu na proudění keramické hmoty ve vstřikovací formě..... | 52 |
| 3.5.2 | Posouzení realita vs. simulace .....   | 61 |
| 3.5.3 | Optimální nastavení parametrů vstřikovacího procesu .....  | 62 |
| 3.5.4 | Nevhodné nastavení parametrů vstřikovacího procesu .....   | 74 |
| 3.5.5 | Diskuze výsledků a další návrhy .....  | 81 |
|       | ZÁVĚR.....   | 84 |
|       | POUŽITÉ ZDROJE.....  | 85 |
|       | SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....   | 87 |
|       | SEZNAM OBRÁZKŮ .....   | 88 |
|       | SEZNAM TABULEK .....   | 90 |
|       | SEZNAM PŘÍLOH .....  | 91 |
|       | PŘÍLOHY .....  | 92 |



## ÚVOD

V 70. a 80. letech 20. století došlo k velkému rozvoji leteckých proudových motorů, kdy se proudový motor stal hlavní pohonnou jednotkou všech velkých letadel. S vývojem proudových motorů souvisí také zvyšování jejich účinnosti, kdy požadujeme co nejmenší spotřebu paliva současně s co největším výkonem motoru. Tento požadavek s sebou nese potřebu zvyšování pracovní teploty uvnitř spalovací komory motoru a vysoké požadavky na použité materiály. Turbinové lopatky, hlavní pracovní části motoru ze superslitin na bázi niklu nebo kobaltu často pracují za velmi vysokých teplot přesahujících 1000 °C. Je tedy nutné zajistit účinné chlazení těchto lopatek, pomocí vnitřních kanálů rozvádějících v dutině lopatky stlačený vzduch, který zajišťuje vnitřní nebo vnější chlazení (Obr. 1). Tyto dutiny jsou uvnitř lopatek vytvořeny pomocí keramických jader, které musí zajistit přesně definovaný tvar vnitřní dutiny a perfektní povrch, který nebude nijak omezovat proudění vzduchu lopatkou. Keramická jádra také musí vydržet vyžhání keramické skořepiny a následně zalití tekutým kovem, současně však zajistit snadné vyplavení jádra z odlitku. Mimo letecký průmysl se keramická jádra používají v odlitcích pro energetiku, lékařský nebo zbrojní průmysl.

Mezi nejdůležitější parametry, které musí keramická jádra splňovat, patří odolnost proti teplotním šokům, stálost rozměrů a geometrie za vysokých teplot – tzn. nízký koeficient teplotní roztažnosti, pevnost za vysokých teplot a výbornou schopnost rozplavení z dutiny jádra po odlití. Kvůli složitosti výroby a určitým technologickým specifikům obvykle nevyrobí keramická jádra samy slévárny, ale výroba je převedena do externích firem zabývajících se touto speciální metodou [1].



Obr. 1 Chlazení turbínových lopatek [3]

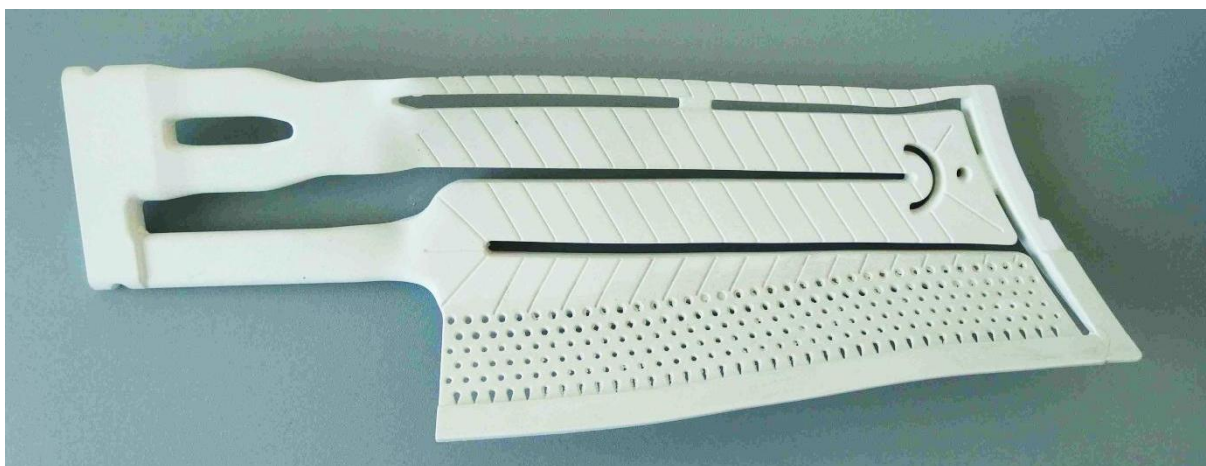
Se složitostí výroby keramických jader určených pro lopatky leteckých motorů nebo plynových turbín určených pro energetický průmysl se pojí typické potíže provázející zavádění nového jádra do výroby. Často je jedná o velmi tenkostěnné a komplexní tvary,

kteřé jsou náchylné na tvorbu studených spojů a uzavírání vzduchu v průběhu plnění nebo naopak sklon k praskání vlivem pnutí v průběhu chlazení ve formě. V případě konvenčního způsobu výroby je nutné poměrně zdlouhavým a nákladným procesem postupné optimalizace vstřikovací formy, to znamená polohou, velikostí a počtem zářezů vtokového kanálu, volbou úkosů formy nebo temperačních kanálů najít nejvhodnější řešení konstrukce. Dalším krokem je potom hledání optimálních vstřikovacích parametrů, jako je především průtok keramické hmoty plnicí tryskou, vstřikovací tlak a dotlak, doba plnění a dotlaku, doba dochlazení jádra ve formě nebo teplota vstřikovací formy a keramické hmoty. Tyto parametry je zapotřebí zkombinovat a sladit tak, aby vzniklo keramické jádro bez vnějších i vnitřních vad v rozměrové i kvalitativní toleranci.

V průběhu optimalizace konstrukce vstřikovací formy i hledání vhodných vstřikovacích parametrů může být nápomocná numerická simulace. Může pomoci jednak omezit výrobu prototypů vstřikovacích forem pomocí virtuální optimalizace, redukovat čas a energie při hledání optimálních vstřikovacích parametrů, predikovat vznik vad v keramickém jádře a v neposlední řadě pomoci rozšířit portfolium keramických jader a technologické možnosti daného výrobce keramických jader.

# 1 TECHNOLOGIE VÝROBY KERAMICKÝCH JADER PRO METODU LITÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL

Keramická jádra se vyrábí od těch nejjednodušších a nejprostších tvarů jako jsou válce, tyče nebo kroužky vyráběné většinou extruzí keramické hmoty, přes složitější geometrické tvary tvořící vnitřní dutinu ventilů nebo oběžných kol čerpadel, až po komplikované a komplexní tvary zahrnující síť kanálů, klínovité přechody materiálu k desetinám milimetru nebo tvarovou plochu dělicí roviny (Obr. 2). Tato složitá jádra jsou vyráběna technologií vstřikování těstovité keramické hmoty do dutiny kovové formy (blíže v kap. 1.2). Jejich nejčastější použití je v leteckém, kosmickém nebo energetickém průmyslu, kde tvoří dutinu turbínových lopatek. Právě při konstrukci forem a řízení vstřikovacího procesu posledně zmiňovaných jader, již často nelze spoléhat pouze na zkušenosti konstruktéra nebo technologa, ale je vhodné, ne-li nutné, využít numerickou simulaci k úspěšnému, efektivnímu a ekonomickému zvládnutí procesu výroby. Numerická simulace může pomoci odhalit místa ve formě, kde dochází k uzavírání vzduchu, tedy místa, kde je nutné umístit odvodušnění nebo úpravou konstrukce formy tato místa odstranit. Stejně tak pomůže najít optimální místo pro zaústění vtokového kanálu, aby byl celý objem dutiny rovnoměrně vyplněn, nedocházelo k zamrznutí hmoty a vzniku nezaběhnutých míst. V případě technologie vstřikovacího procesu umožní simulace zvolit optimální plnicí tlaky, rychlosti, dotlak, teplotu keramické hmoty a formy tak, aby vznikl kompletní, hutný odstřík bez bublin, studených spojů nebo nezaběhnutých míst. Tímto lze ušetřit čas při hledání optimálních parametrů metodou pokus-omyl a finanční prostředky vynaložené na úpravy vstřikovacích forem.



Obr. 2 Keramické jádro pro odlitek lopatky plynové turbíny Siemens V94.2 [4]

Pokročilejší numerická simulace dokáže optimalizovat chladicí kanály ve vstřikovací formě tak, aby nedocházelo k zamrznutí keramické hmoty, ale zároveň odstříknutý kus vychladl rovnoměrně a za nejkratší možný čas. To zajistí zkrácení doby jednoho výrobního cyklu a zefektivní využití vstřikovacího stroje. Nesmíme zapomenout, že numerická simulace umožní provést studii proveditelnosti výroby složitých komplexních jader a tím zvětšit portfolio, technologickou vyspělost a konkurenceschopnost firmy.

## 1.1 APLIKACE KERAMICKÝCH JADER V TECHNOLOGII LITÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL

Nejčastější aplikace keramických jader je v technologii lití na vytavitelný model, tedy zastříknutí voskovou směsí k vytvoření vytavitelného modelu a následné vytvoření keramické skořepiny. V průběhu této technologie jsou na jádra kladeny vysoké požadavky především v těchto fázích:

1. výroba vytavitelného modelu,
2. vytavení vosku a vyžihání skořepiny,
3. odlévání skořepiny,
4. vyplavení jader z dutiny odlitku.

### 1.1.1 Výroba vytavitelného modelu

#### 1.1.1.1 Rozměrová přesnost keramického jádra

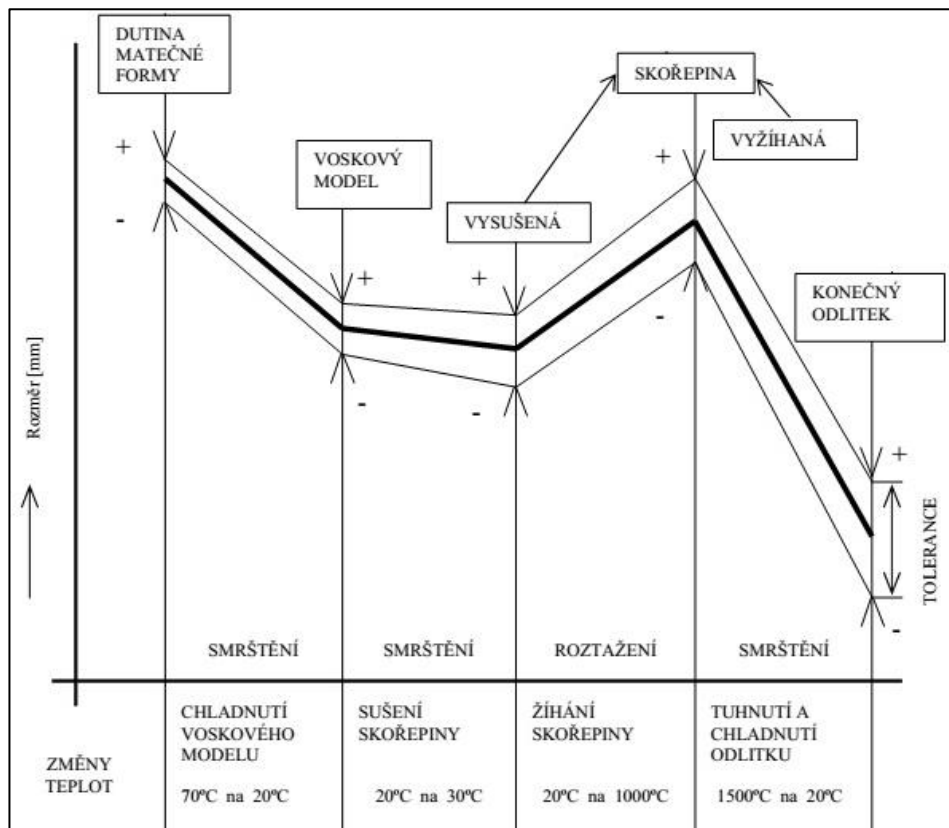
Technologie lití na vytavitelný model spadá do kategorie přesného lití, tedy lití na přesný tvar a rozměry odlitku s minimálním nebo žádným opracováním funkčních ploch. Z toho vyplývá, že voskové modely musí splnit rozměrovou toleranci užší, než je tolerance hotového odlitku. Aby toho bylo dosaženo, musí dutina vstříkovací formy pro výrobu voskových modelů splnit rozměrovou toleranci užší, než je tolerance voskového modelu. Tuto problematiku dobře zachycuje diagram (Obr. 3), který uvádí autoři Horáček a Helán [2]. Keramické jádro ve své podstatě tvoří část formy pro budoucí odlitek, proto také musí splnit toleranční pole užší, než je toleranční pole odlitku. Současně musí splnit geometrické tolerance a drsnost povrchu. Nepřesnosti a šířka tolerančních polí se zvětšuje s rostoucím jmenovitým rozměrem jádra, tedy jmenovitým rozměrem odlitku. Tyto požadavky jsou tedy přeneseny i dutinu vstříkovací formy, která musí být v toleranci opět užší, než keramické jádro.

Drsnost povrchu keramického jádra může ovlivnit řada faktorů. Podmínkou dosažení požadované drsnosti je dokonale opracovaný povrch dutiny formy a přiměřeně jemná granulometrie keramického ostříva. Nevhodně zvolená rychlost a tlak plnění způsobují turbulentní proudění keramické hmoty dutinou formy, které se projeví zvrásněním nebo pórovitostí povrchu.

Na geometrii a rozměry jádra má vliv pnutí vznikající rozdílnou rychlostí tuhnutí syrového materiálu a deformace vznikající při tuhnutí velkých kusů mimo vstříkovací formu, jako je např. prohýbání vlastní vahou. Toto se řeší speciálními relaxačními přípravky, kde jádro ztuhne v přesně definované poloze a tvaru. Také bubliny pod povrchem a v objemu materiálu mohou způsobit propadání povrchu za syrova nebo deformaci rozměrů při výpalu.

Změnu rozměrů způsobuje také výpal keramických jader, kdy může vzniknout až 2% rozdíl oproti syrovému stavu. S tímto je třeba počítat už při návrhu dutiny formy.

Numerická simulace umožňuje predikovat místa s pórovitostí nebo uzavřeným vzduchem a vizualizovat nevhodné proudění keramické hmoty v závislosti na zvoleném plnicím tlaku, dotlaku a rychlosti plnění. Lze tak optimalizovat výrobní proces a dosahovat mnohem menšího počtu neshodných jader.



Obr. 3 Rozměrové změny v technologii lití na vytavitelný model [2]

### 1.1.1.2 Zastříknutí keramického jádra voskem

Prvním krokem je usazení keramického jádra do dutiny formy pro vytavitelný model, jádro musí být usazeno velice přesně, opět v určitých tolerancích. Přesnost polohy jádra vůči voskovému modelu může být kontrolována rentgenem, především u složitějších typů turbínových lopatek. Voskový model může být zhotoven jedním ze tří způsobů [5]:

- gravitačním litím (nad teplotou likvidu vosku),
- odstříknutím za zvýšeného tlaku (0,5 – 1 MPa),
- odstříknutím za vyššího tlaku (2,5 – 5 MPa).

Keramická jádra tedy musí vydržet působení tlaku až 5MPa a značné silové namáhání vzniklé prouděním kašovitě voskové směsi. V jádru se nesmí vyskytovat žádné vady typu studený spoj nebo pórovitost, který by zapříčinily porušení materiálu a destrukci jádra. Jádro se nesmí ani ohnout nebo jinak deformovat, aby nedošlo ke špatnému zastříknutí do voskového modelu. To se odvíjí od tuhosti jádra a pevnosti materiálu v ohybu. Často se používá impregnace máčením ke zvýšení jejich pevnosti. Z voskového modelu vyčnívají pouze známky, za které je jádro zachyceno v keramické skořepině.

### 1.1.2 Vytavení vosku a vyžihání skořepiny

Vytavení vosku probíhá obvykle v autoklávu za působení vodní páry přehřáté na teplotu 135–165 °C při tlaku 0,3–0,6 MPa [5]. Jádru je působením páry vystaveno teplotnímu šoku, navíc musí odolávat tlaku od dilatace vosku, která je mnohem větší a rychlejší, než dilatace keramiky.

Po vytavení vosku je vysušená skořepina vyžihána na teplotu 900–1400 °C v závislosti na použitém materiálu ostřiva a pojiva ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$  a další), čímž dojde k vytvrzení. Pro odlévání některých speciálních superslitin může být teplota vyžihání skořepiny i vyšší [6]. Keramická jádra jsou tedy opět značně tepelně namáhána, dochází k jejich tepelné dilataci a změně rozměrů. Dilatace materiálu jádra musí být jen tak velká, aby nepoškodila skořepinu, ovšem příliš malá dilatace může způsobit prasknutí jádra, vlivem teplotní dilatace materiálu keramické skořepiny. Z tohoto důvodu se často používají kluzné spoje mezi keramickým jádrem a skořepinou.

### 1.1.3 Odlévání skořepiny

Immediately po vyžihání jsou skořepiny odlity, často podstupují některou z metod technologie řízené krystalizace odlitku. Na jádro působí dynamické zatížení od proudu kovu, vysoká teplota kovu, výdrž v tavenině kovu (výroba sloupcově orientovaných zrn nebo monokrystalů), oscilace taveniny nebo ultrazvuk (výroba rovnoosých zrn). Jádro tedy musí mít odolnost proti porušení za vysokých teplot, nesmí nastat deformace tvaru a rozměrů a být prodyšně kvůli odvodu plynů z taveniny.

### 1.1.4 Vyplavení jader z dutiny odlitku

Pro odstranění jader z dutiny se odlitky louhují ve vodném roztoku hydroxidu sodného nebo hydroxidu draselného. Koncentrace hydroxidů se pohybují přibližně v rozmezí 20–50 % [7]. Pro maximální efektivitu vyplavení jader je vhodná cirkulace roztoku v dutinách odlitku, čímž se zabrání vytvoření keramického gelu a znemožnění kompletního rozpuštění jádra. Operaci je možné provádět jak volně na vzduchu v roztocích ohřátých na teplotu varu, tak v autoklávu, kde se pracovní tlak a teplota pohybují na vyšších hodnotách – až 10 MPa a 350 °C. Výhodou je vlastnost roztoků hydroxidů, které neoxidují ani nekorodují kov odlitku, kromě hliníkových slitin, které se v roztocích hydroxidů naleptávají a rozpouštějí. Pro tyto slitiny je tedy vhodné zvolit jinou technologii odstraňování jader nebo materiál jader samotných (solná jádra).

## 1.2 VÝROBA KERAMICKÝCH JADER

### 1.2.1 Fused silica

Fused silica, neboli křemené sklo se s výhodou používá jako výchozí materiál pro výrobu keramických jader. Jeho předností je velice malá teplotní roztažnost a ohybová pevnost za vysokých teplot, také vysoká odolnost proti porušení teplotním šokem. Celkový nárůst objemu materiálu kolem teploty 1450 °C je velice malý, cca 0,15–0,25 % [8]. Ohybová pevnost (vzorek 100x15x5 mm) se při teplotě 1400 °C pohybuje mezi 15–33 MPa. Okolo 1500 °C dochází k rapidnímu poklesu pevností, až k teplotě 1600 °C, kdy pevnost v ohybu jader klesá k hodnotám 3–5 MPa. Autoři článku [8] upozorňují, že pevnost v ohybu by neměla klesnout pod kritickou hodnotu 2 MPa, kdy již může docházet k porušení jader od proudu taveniny při plnění skořepinové formy.

Uvedené vlastnosti materiálu jsou ovlivněny jeho čistotou a porozitou [8, 9]. Nečistoty ve formě oxidů nebo jiných prvků způsobují jednak pokles pevnosti jader za vysokých teplot, a také snižují odolnost proti teplotním šokům. Znečišťující oxidy a prvky mají větší teplotní roztažnost než křemenné sklo, způsobují pnutí v materiálu a jeho praskání při tepelném šoku. V problematice vlivu porozity bylo zjištěno, že množství pórů v materiálu má významný vliv na vlastnosti fused siliky. Autoři článku [9] zkoumali závislost mezi (mimo jiné) pevností v ohybu, modulem pružnosti a obsahem porozity u vzorků materiálu (70x70x12 mm) s obsahem porozity mezi 1,5–28 %. Došli k následujícím závěrům:

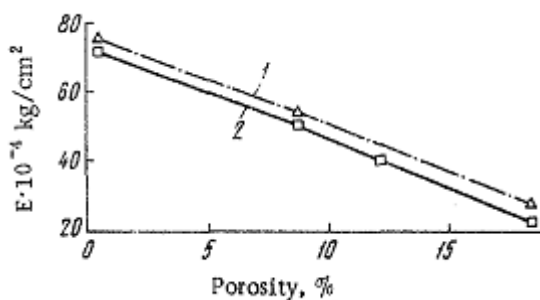
- Byla stanovena lineární závislost mezi modulem pružnosti a obsahem porozity. Nebylo potvrzeno, že teplota ovlivňuje velikost modulu pružnosti. (Obr. 4)
- Byla zjištěna závislost mezi pevností v ohybu a obsahem porozity (Obr. 5). Zjištěnou závislost lze vyjádřit vztahem [9]:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(-7,4 \cdot P),$$

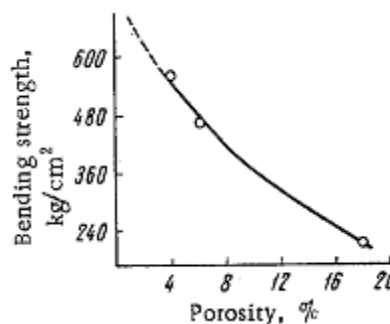
kde:  $\sigma_0 = 740 \text{ kg/cm}^2 = 72,569 \text{ MPa}$ ,

$P = \text{obsah porozity v procentech [\%]}$ .

Pozn.:  $1 \text{ kg/cm}^2 = 98066 \text{ Pa}$ .



Obr. 4 Závislost obsahu porozity a modulu pružnosti: 1. statického, 2. dynamického [9]



Obr. 5 Závislost obsahu porozity a pevnosti v ohybu [9]

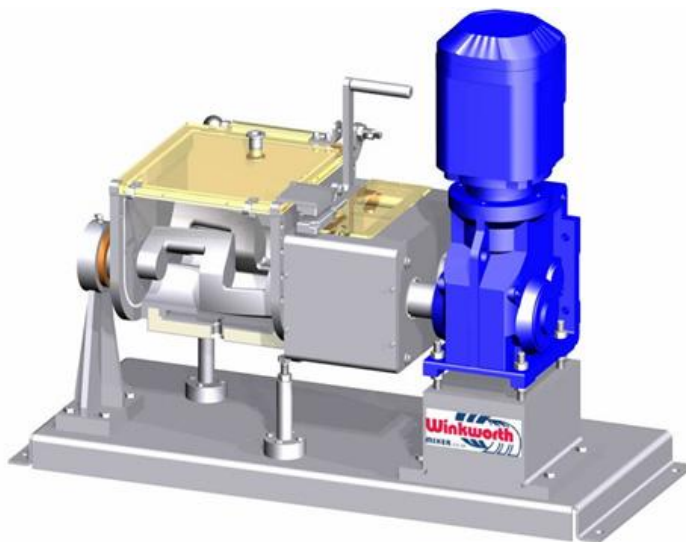
## 1.2.2 Příprava keramické hmoty

Keramická hmota, ze které jsou vyráběna keramická jádra, se skládá ze dvou hlavních složek – keramického prášku a polymerního pojiva v poměru cca 1:5. Jako pojivo je obvykle použita směs vosků a termoplastů, jejíž přesné složení je střežené know-how dodavatelských firem. Pojivo jednak umožní zpracovat sypký keramický prášek v kompaktní kašovitou hmotu, ze které lze tvarovat keramická jádra a zároveň zajišťuje potřebnou manipulační pevnost syrových jader při vyjímání z formy a přesunu k tepelnému zpracování. Keramický prášek s velikostí středního zrna ( $d_{50}$ ) 30  $\mu\text{m}$ , obsahuje dominantní podíl oxidu křemičitého –  $\text{SiO}_2$ , může obsahovat menší podíly  $\text{ZrO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , obsah zmíněných oxidických materiálů se pohybuje konkrétně v rozmezí: [7]

$\text{SiO}_2$ : 82 – 97 %,  
 $\text{ZrO}_2$ : 1,5 – 17 %,  
 $\text{Al}_2\text{O}_3$ : 0,5 – 3 %.

Příprava hmoty obvykle probíhá v bubnovém míšiči (Obr. 6), který je temperován na zvolenou teplotu a směs dokonale homogenizuje. Do bubnu míšiče vyhřátého na 80–100 °C je nejdříve vloženo polymerní pojivo, které je působením tepla roztaveno. Následně je přidáno keramické ostřívo a zahájeno mísení trvajícím 2–4 hodiny při proměnných otáčkách hnětacích nožů. Požadováno je dokonalé promísení pojiva a ostřiva a homogenizace směsi. Špatně promísená, nehomogenní a hrudkovitá směs působí negativním vlivem na reologii keramické hmoty, zhoršuje tekutost a zabíhavost ve formě, způsobuje špatnou kvalitu povrchu jádra. Na konci procesu mísení je připravená hmota vakuována pro odstranění nežádoucích vzduchových bublin a tím zlepšení jejích technologických vlastností. Vzduch uzavřený v keramické hmotě by mohl způsobit její pórovitost nebo nedokonalé a nekontinuální plnění dutiny formy.

Takto namísená hmota je přesunuta do temperovaného zásobníku vstřikovacího stroje a dále zpracovávána v procesu výroby keramických jader. Případnou nespotřebovanou hmotu



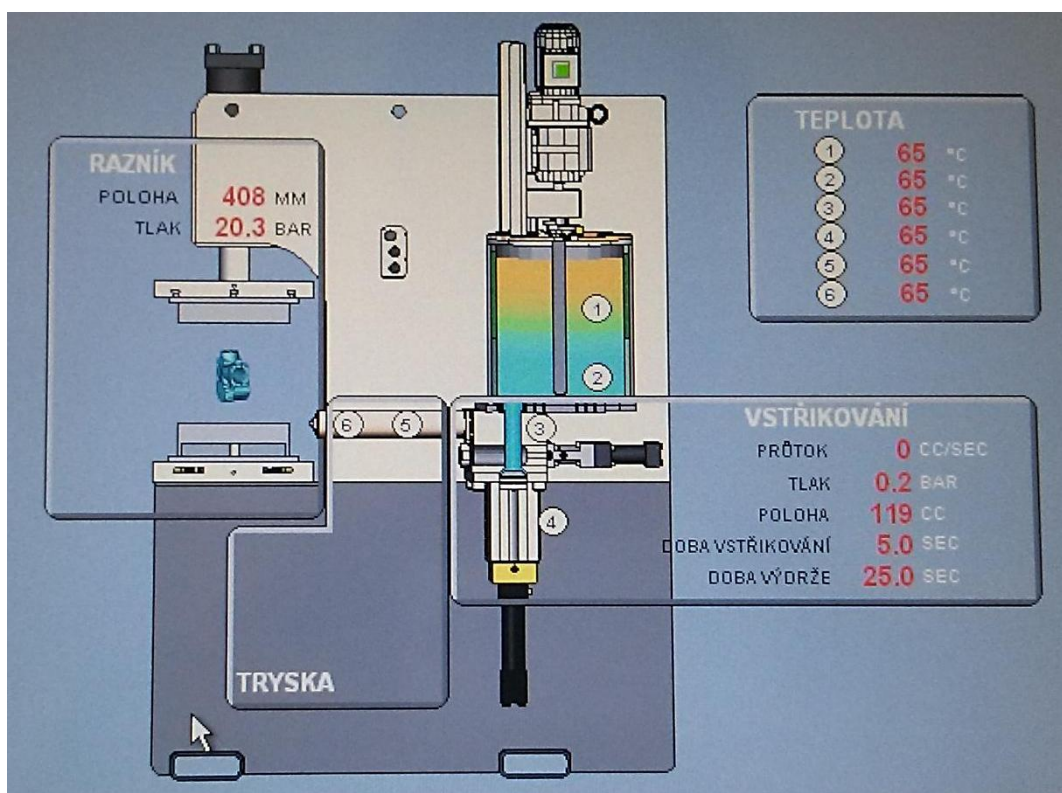
Obr. 6 Bubnový míšič keramické hmoty [10]



lze vrátit zpět do bubnu mísiče, znovu rozehrát a promísit s novým ostřivem a pojivem. Doba použití namísené směsi je v podstatě neomezená, pouze je nutné udržovat její teplotu nad teplotou tuhnutí voskového pojiva a promícháváním zamezovat sedimentaci.

### 1.2.3 Výroba keramických jader vstřikováním do kovových forem

Technologie vstřikování keramické hmoty do kovové formy je do jisté míry analogická k technologii vstřikování plastů a polymerních hmot. Tyto látky lze klasifikovat jako newtonské pseudoplastické kapaliny, kdy se zvyšujícím se smykovým napětím působícím na kapalinu roste rychlost jejich smykové deformace [11]. To znamená, že čím větší síla na kapalinu působí, tím více klesá její viskozita, tzn. kapalina teče. Toho se s výhodou využívá právě v této technologii výroby keramických jader, kde tlak vyvolaný pracovním pístem ztekucuje keramickou hmotu a umožňuje dokonalé vyplnění dutiny formy. Podrobněji jsou fyzikální a technologické vlastnosti keramické hmoty popsány v kapitole 3.3.



Obr. 7 Schéma vstřikovacího lisu MPI SA56-50-27

Proces začíná naplněním keramické hmoty do zásobníku stroje (Obr. 7), kde je udržován na zvolené konstantní teplotě a promícháván pro teplotní homogenizaci a zabránění sedimentace. Ze zásobníku odebírá keramickou hmotu šnek, který dávkuje přesně stanovené množství hmoty do pracovního válce stroje. Nadávkovanou hmotu ve válci přebírá pracovní píst, který nejdříve vytlačí přebytečný vzduch z pracovního válce a poté hmotu protlačí přes vyhřívanou trysku do kovové formy. V nastavení vstřikovacího procesu lze obvykle volit průtok materiálu tryskou, rychlost plnění, vstřikovací tlak nebo dobu a velikost dotlaku. Lze použít také nastavení jmenovaných parametrů v závislosti na čase a fázi vstřikování, například kdy je zpočátku nastaven vysoký průtok s nízkým tlakem a v závěru procesu průtok

minimální s vysokým tlakem na hmotu ve formě. Tím je dosahováno lepších výsledků při plnění formy a prevenci vad v materiálu keramického jádra.

Kovová forma je upnuta na vodou chlazené desky lisu, které odebírají teplo předávané keramickou hmotou formě. Méně časte je chlazení formy pomocí chladicích kanálů přímo v materiálu formy, v některých případech toho ovšem může být využito pro rychlejší odvod tepla z masivní části jádra. Ve formě se tedy odstříknutá hmota během krátké doby, jednotek až desítek sekund, ochladí na teplotu, při které dojde ke ztuhnutí pojiva. Jádro získá manipulační pevnost, při které je možné jej vyjmout z formy. Pevnost je ovšem stále relativně nízká, jádro je křehké, může velice snadno dojít k jeho poškození, proto je nutná maximální opatrnost při vyjímání i další manipulaci s jádrem.

V případě složitějších jader s velkým poměrem délky k průřezu, masivními částmi nebo členitými a zakřivenými tvary, typicky jádra pro turbínové lopatky, je nutné jádra po vyjmutí z formy uložit do tzv. relaxačních přípravků. Jádra jsou uložena v přesně definovaném tvaru, dojde k ochlazení na konstantní teplotu v celém průřezu a zabránění nežádoucímu průhybu nebo jiné deformace jádra. Doba uložení v přípravku se pohybuje v řádu minut, přípravky jsou často uloženy na chlazené kovové desce.

Po vyjmutí jader z formy nebo relaxačního přípravku následuje založení do žáruvzdorných boxů naplněných kaolínovou moučkou. Ta tvoří tvarovou podložku, podepírá jádra při výpalu a fixuje jejich tvar v okamžiku, kdy dojde k odpaření pojiva, jelikož keramika ještě nemá svoji pevnost. Boxy se stohují na vozík a zavážejí do pece, kde dojde k výpalu keramiky.

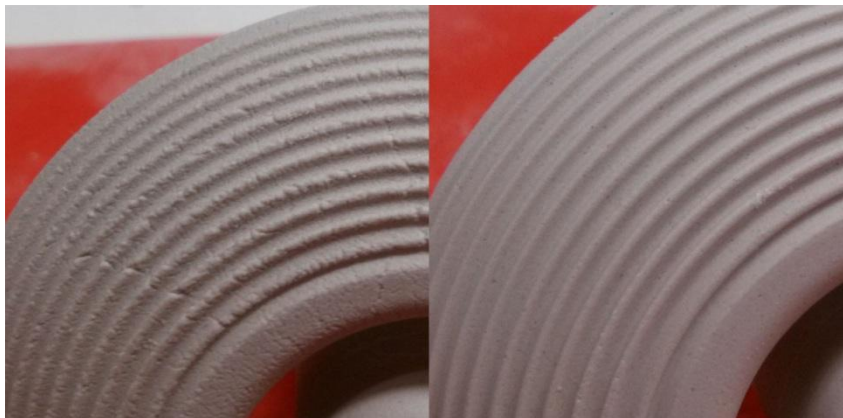
#### 1.2.3.1 Vady keramických jader vznikající při vstřikolísování

V této technologii je klíčové zvolit shora uvedené parametry jako průtok, rychlost a tlak plnění nebo jejich průběh v čase plnění formy. Keramické jádro může totiž trpět stejnými potížemi nebo vadami jako tlakově litý odlitek nebo plastový dílec vyrobený vstřikováním. To znamená studené spoje, nedolitá místa, vzduchové bubliny v mase materiálu, staženiny a také deformace způsobené chladnutím keramické hmoty vzniklé nejčastěji nevhodně zvolenými parametry vstřikovacího procesu. Mnohdy jsou tato vady odhaleny až po výpalu jader, numerická simulace tedy může být v tomto případě zvláště efektivní a pomoci snížit náklady na neshodné kusy. Nejčastější vady, které se jmenovanými parametry přímo souvisí, jsou studené spoje a drsný nebo potrhaný povrch. Každý parametr nastavení ovlivňuje vznik a rozsah jiných vad, případně jejich kombinace. Zmiňované vady lze popsat takto:

**Drsný povrch:** povrch keramického jádra je velice hrubý, připomíná brusný papír, projevuje se nejvíce v jemných konturách nebo hranách jádra (Obr. 8). Toto je nepřipustná vada, jelikož se jako negativ obtiskne do dutiny odlitku, kde zvyšuje odpor proudění chladicího vzduchu. Za jejím vznikem stojí především nízký dotlak na keramickou hmotu ve formě.

**Studené spoje:** vnikají stykem dvou front keramické hmoty při plnění formy, kdy hmota již nemá dostatečnou teplotu na to, aby došlo k pevnému spojení. Studený spoj může být povrchový (Obr. 9) nebo v celém průřezu stěny jádra, v takovém případě dochází k porušení celistvosti jádra. Vznik studených spojů je ovlivňován zejména teplotou keramické hmoty, teplotou formy, průtokem a rychlostí proudění ve formě.

**Potrhaný povrch:** tato vada tvoří velmi malé trhliny v povrchu jádra, často několik trhlín rovnoběžně za sebou, kolmo ke směru proudění hmoty. Je způsobena adhezí keramické hmoty na stěnu formy, pomalou rychlostí plnění a malou velikostí dotlaku. Vznik této vady lze omezit také aplikací separačního nástřiku na formu.



Obr. 8 Drsný a hladký povrch jádra

**Otřepy v dělicí rovině:** nejedná se přímo o vadu, ovšem odstranění otřepů a očištění dělicí roviny je pracnější a časově náročnější, čímž snižuje produktivitu práce. Otřepy jsou způsobeny příliš vysokým dotlakem, který keramickou hmotu vtlačí do spáry v dělicí rovině. V některých případech se tomuto nedostatku nelze vyhnout, protože vysoký dotlak je nutný z důvodu potlačení vzniku jiných, závažnějších vad.

**Bubliny v objemu jádra:** vzduch uzavřený v keramické hmotě vlivem nedostatečného vakuování po namísení může způsobovat vznik bublin v jádře, stejně tak může být na vině nevhodná geometrie tvaru jádra, kdy dochází k uzavírání vzduchových kapes v průběhu plnění. Vznik bublin lze omezit zvýšením plnicího tlaku a dotlaku



Obr. 9 Studené spoje na povrchu jádra

**Propadání povrchu, staženiny:** vady způsobené objemovým smrštěním keramické hmoty v masivnějších částech jádra nebo v místech, kde je v objemu jádra uzavřený vzduch (Obr. 10). Tato vada se často na povrchu objeví až po výpalu jádra, vzhledem k energetické

náročnosti výpalu jader je nutné předcházet vzniku této vady vakuováním keramické hmoty v misiči a nastavením dostatečně velkého plnicího tlaku a dotlaku.

**Praskliny:** k praskání jader dochází vlivem rozdílného času chladnutí v jednotlivých částech jádra, kdy některé mohou být velice masivní a jiné tenkostěnné, pro prevenci vzniku je nutné najít vhodnou dobu chlazení jádra uvnitř formy, případně umístěním jádra do relaxačního přípravku.

**Neúplné jádro:** vlivem nízkého průtoku nebo nízkého objemu vstříkované nemusí být dutina formy zcela vyplněna, této vadě lze většinou snadno přecházet jednoduchou úpravou vstřikovacích parametrů.



Obr. 10 Dutiny v jádrech a propadání povrchu (vlevo)

## 1.2.4 Výpal keramických jader

### 1.2.4.1 Odstranění pojiva

V přípravě a průběhu celého technologického procesu výroby keramických jader jsou do materiálu vnesena pojiva a další aditivní látky, které zajišťují tvar a manipulační pevnost jader. Tyto látky je nutné před samotným výpalem odstranit z materiálu, protože při slinování keramiky by jejich odpařování způsobilo popraskání nebo jiné defekty v jádrech.

Nejobvyklejším způsobem, který se k tomuto účelu používá, je tepelná extrakce pojiva, při které dochází k vypařování pojiva za zvýšené teploty v oxidační atmosféře, redukční atmosféře nebo pod částečným vakuem. Jádra jsou uložena do keramických boxů naplněných kaolínovou moučkou, která zajistí stálost geometrického tvaru během vyhořívání pojiva, zároveň umožní odvod plynů z jádra. Vypařování a odvod spalin z keramické hmoty musí probíhat velice klidně a pomalu, jelikož spaliny mají možnost uniknout pouze prouděním mezi jednotlivými póry, větší množství pórů tedy usnadňuje proces odstraňování pojiva.

V materiálu jader se nesmí vyskytovat žádné bubliny uzavřeného vzduchu nebo špatně promísené shluky pojiva. Vzduch v bublinách expanduje, dojde k popraskání nebo vyloupání povrchu, případně k porušení celistvosti jader. Shluky pojiva znamenají prudký vývin plynů, které působí stejným účinkem jako vzduch v bublinách. Příliš rychlé zvyšování teploty rovněž



způsobí prudkou expanzi vznikajících plynů a následně popraskání nebo lomy v keramické hmotě [12, 13].

#### 1.2.4.2 Výpal keramické hmoty

Vypalování keramiky je poměrně energeticky náročný proces, při kterém za zvýšené teploty dochází ke shlukování jemných částic keramiky, poklesu porozity a dosažení požadovaných mechanických vlastností. Doba výpalu se pohybuje mezi 70–100 hodinami s výdrží na teplotě okolo 1200 °C, smrštění jader po výpalu se pohybuje mezi 0–2 %, vzhledem k syrovému stavu [7]. Hnací silou procesu keramizace je snaha materiálu o dosažení nižší povrchové energie, kdy je energeticky náročné rozhraní **plynná fáze – pevná fáze** nahrazováno energeticky méně náročným rozhraním **pevná fáze – pevná fáze** [13]. Tento proces je uskutečňován difuzními pochody v materiálu.

Proces slinování ovlivňuje především:

- velikost teploty výdrže,
- teplotní režim – rychlost ohřevu, ochlazování, doba výdrží,
- množství pojiva a aditiv.

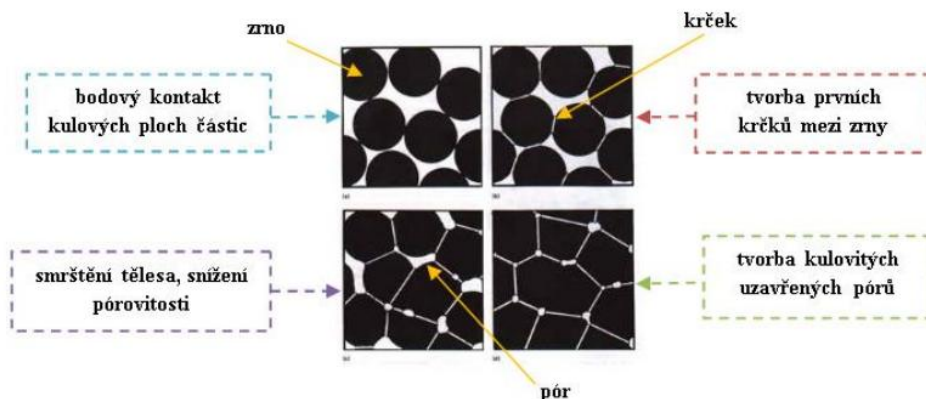
Průběh vypalovacího procesu (Obr. 11) rozdělujeme do tří fází [13]:

První fáze – přeuspořádání částic a jejich vzájemný kontakt, vytvoření „krčků“. Snahou částic je dosažení co největšího počtu kontaktních bodů, dosahováno zhutnění do 65 % teoretické hustoty slinutého materiálu.

Druhá fáze – snižování porozity a zvětšování kontaktních ploch mezi částicemi, kulatý tvar částic se mění na mnohostěn. Vznikající „zrna“ mezi sebou uzavírají prostory, vzniká „otevřená pórovitost“, těleso se výrazně smršťuje, nabývá mechanickou pevnost. Nejvyšší teploty slinování, zhutnění 65–90 %.

Třetí fáze – tvorba kulovitých uzavřených pórů, materiál nabývá maximálních hodnot mechanických vlastností, materiál smršťuje jen minimálně, zhutnění 90–100 %

Výsledná struktura keramiky a „jemnozrnost“ závisí na slinovací teplotě a především na výdrži na této teplotě. Při delší době slinování, vzniká hrubší výsledná struktura s menším množstvím pórů.



Obr. 11 Změny ve struktuře materiálu během výpalu [13]

## 2 NUMERICKÁ SIMULACE

Předchozí kapitoly zabývající se aplikací a výrobou keramických jader ukazují, že se jedná o složitý technologický proces složený z několika dílčích kroků. Jedny z nejdůležitějších kritérií, které ovlivňují výslednou kvalitu jader, jsou správně navržená vstřikovací forma a dokonale zvládnutý proces vstřikování keramické hmoty. Tyto dvě kritéria jsou úzce provázána, jelikož návrh vstřikovací formy, tedy řešení vtokových kanálů, místa zaústění vtoku do dutiny formy, místa odvodu vzduchu, chlazení formy i samotný tvar a orientace dutiny formy významně ovlivňují průběh proudění keramické hmoty formou a tím výslednou kvalitu jader. Naopak technologické parametry procesu mohou zpětně ovlivňovat návrh formy, např. potřeba určitého průtoku vstřikovacím kanálem, intenzivnější chlazení v některých místech a jiné. Při návrhu formy i nastavení optimálních hodnot v průběhu procesu většinou pracovníci vychází ze zkušeností, případně norem nebo příruček zavedených v podniku. Toto řešení je většinou spolehlivé u jednodušších tvarů jader, při návrhu složitějších, komplexních tvarů nebo řešení některých problémů vzniklých při tradičním postupu nám může s řešením pomoci právě numerická simulace.

Tradiční postup může být časově velmi náročný, je třeba otestovat vhodný návrh na prototypu nebo zjednodušených verzích jader, často jsou nutné pozdější zásahy do konstrukce formy, přidání odvodu vzduchu nebo změna vtokových kanálů. Optimální vstřikovací parametry se odzkouší vzájemnou kombinací jejich nastavení, to také zabírá určitý čas a nemusí vést ke vhodnému řešení. Numerická simulace umožňuje nalézt optimální řešení pro návrh forem i nastavení parametrů procesu v relativně krátkém čase.

Vývoj pokročil od dob, kdy výpočet simulace trval desítky hodin nebo dokonce několik dní, dnešním trendem jsou rychlé simulace možných řešení, které mezi sebou mohou technologové a konstruktéři konzultovat a v krátkém čase najít to nejvhodnější řešení. Zpětně také lze optimalizovat staré nebo problematické procesy a zefektivnit tak výrobu. Vše je možné odzkoušet a nastavit přímo v simulaci a následně zadat vyrobit konečnou podobu formy, stejně tak lze jednoduše nalézt optimální vstřikovací parametry, přenést nastavení do vstřikovacího lisu a po odstříknutí a proměření kontrolního kusu začít s výrobou. To vše ovšem za předpokladu, že simulační program dokáže dostatečně přesně predikovat reálné výsledky, které odpovídají hodnotám a průběhům naměřeným ve skutečnosti.

Nedílnou součástí zavádění simulačního programu do vývoje a výroby v podniku, je ověřování, do jaké míry se jeho výsledky přibližují nebo shodují s realitou v daných podmínkách provozu. Děje se tak obvykle pomocí validačních forem (jader), jejichž tvar vnitřní dutiny vhodně zastupuje tvar převládajícího sortimentu nebo tvar sortimentu, jehož nasazení se plánuje.

### 2.1 MATEMATICKÝ MODEL

Dnešní simulační programy umožňují analyzovat, simulovat nebo testovat širokou škálu procesů, nejen ve slévárenské technologii, ale ve všech vědních oborech. Pro všechny simulační programy je společné, že jejich základem je matematický model, který vhodně

popisuje zkoumanou oblast, objekt nebo proces – studovaný systém. Matematický model je tvořen systémem matematických vztahů, obvykle soustavou parciálních diferenciálních rovnic, které popisují chování a vlastnosti zkoumaného objektu a jeho interakci s okolím. Aby bylo možné matematický model, respektive matematické vztahy sestavit, je třeba nalézt a stanovit všechny veličiny, které charakterizují studovaný systém, působení okolí na studovaný systém a působení studovaného systému na okolí.

V případě numerické simulace výroby keramických jader je studovaným systémem proces vstřikování keramické hmoty. V průběhu procesu dochází ke změnám tlaku, objemu, teploty, nastávají fyzikální děje jako proudění hmoty nebo přenos tepla. K popisu zmíněných změn nebo dějů slouží matematický model založený na soustavě parciálních diferenciálních rovnic, vycházejících ze zákonů zachování hmoty, hybnosti a energie.

Ve většině případů matematický model popisuje studovaný systém poněkud zjednodušeně, protože není možné zjistit úplný popis všech dějů probíhajících uvnitř systému. I kdyby to možné bylo, matematický model by byl natolik složitý, že by jej nebylo možné v konečném čase vyřešit. K vytváření modelu je tedy přistupováno tak, že některé méně podstatné vlivy jsou zjednodušeny nebo zanedbány. Není nutné, aby simulace podávala naprosto přesné výsledky, ale postačuje dostatečná podobnost s realitou.

### **2.1.1 Počáteční a okrajové podmínky**

Před samotným řešením matematického modelu je zapotřebí určit počáteční a okrajové podmínky, které umožní řešený problém „zachytit“ v prostoru, čase a dalších konkrétních hodnotách ostatních veličin. Počáteční a okrajové podmínky zaručují jednoznačnost problému. Pro každou nezávisle proměnnou figurující v diferenciálních rovnicích matematického modelu, je zapotřebí určitý počet vzájemně nezávislých podmínek, jejich počet se odvíjí od nejvyššího řádu derivace dané proměnné. To znamená, kolik je nejvyšší řád derivace proměnné, tolik musí mít nezávislých podmínek.

#### **2.1.1.1 Počáteční podmínky**

Jedná se o stanovení výchozích parametrů pro numerickou simulaci, většinou v čase simulace  $\tau = 0$ . Jejich hodnoty je třeba získat měřením, experimentem nebo např. získat z technického listu materiálu. Jako příklad lze uvést počáteční teplotu formy, počáteční teplotu keramické hmoty, průtok vstřikovací tryskou, hustotu hmoty, koeficient teplotní vodivosti formy a keramické hmoty a podobně. Tyto podmínky jednoznačně vymezují hledané řešení [14].

#### **2.1.1.2 Okrajové podmínky**

V případě, že se jako neznámé proměnné v rovnicích vyskytují souřadnice, zavádíme okrajové podmínky, které umožní významné zjednodušení výpočtu. To znamená, že proměnná nabývá v určitém místě známé hodnoty, např. průhyb nosníku je v místě podpory nulový. V technologii výroby jader to znamená dokonale tuhous vstřikovací formu, nulovou tloušťku spáry v dělicí rovině a další [14].

## 2.2 METODY ŘEŠENÍ

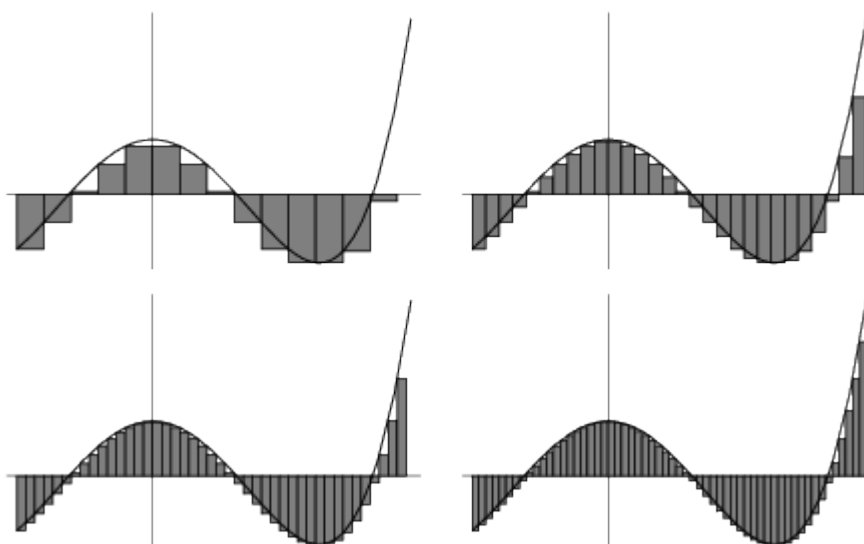
K nalezení řešení matematického modelu – parciálních diferenciálních rovnic, lze využít analytickou nebo numerickou metodu výpočtu

### 2.2.1 Analytické řešení

Principem je využití matematických početních metod k nalezení přesného řešení daného problému. V praxi je nutno často řešený problém dostatečně zjednodušit, aby bylo vůbec možné jej analytickým způsobem řešit, z toho důvodu je tento způsob řešení určen zejména pro jednodušší matematické modely. K řešení lineárních úloh běžně používá metod separace proměnných (Fourierova metoda) nebo transformace proměnných (Laplaceova nebo Fourierova transformace), nelineární úlohy se řeší variačními metodami (Ritzova metoda). Výsledkem aplikace analytické metody na řešený problém (matematický model), je obvykle matematický výraz hledané proměnné jako funkce polohy nebo času. Analytické metody jsou vhodné většinou pro jednodušší úlohy [14].

### 2.2.2 Numerické řešení

V technické praxi je nejčastěji nutné vyšetřit průběh chování určitého tělesa za působení vnějších nebo vnitřních vlivů, změnu vnitřní struktury, změnu jeho mechanických a fyzikálních vlastností, deformaci nebo porušení celistvosti. Principem numerického řešení je rozdělení spojité oblasti nebo veličiny na konečný počet samostatných podoblastí nebo hodnot v daných bodech. Jednodušeji řečeno, spojitá plocha nebo objem jsou rozděleny na množství menších ploch nebo objemů, čas je rozdělen na kratší úseky. Tato operace se nazývá diskretizace řešení. Získáme tak přímkou (simulace 1D) nebo sítí uzlových bodů (simulace ve 2D, 3D), ve kterých je možné získat řešení samostatně.



Obr. 12 Ovlivnění přesnosti aproximace spojité křivky vzdáleností uzlových bodů [18]



Výsledky řešení získané v jednotlivých uzlech jsou dosazovány za proměnné v bodech vyšetřovaných v následujícím kroku, tím je ovlivňován výpočet simulace. Řešení diskretizované oblasti nebo veličiny musí vhodně aproximovat řešení spojitě oblasti nebo veličiny. Aproximaci spojitěho řešení je následně nutné posoudit nebo ověřit praktickým experimentem, který její vhodnost potvrdí nebo vyvrátí.

Numerické řešení je řešení pouze přibližné, vzdálenosti mezi jednotlivými uzlovými body významně ovlivňují přesnost výsledku (Obr. 12). Kratší vzdálenosti podávají přesnější výsledky řešení, ale za cenu delšího výpočetního času. Delší vzdálenosti značně urychlí čas výpočtu, simulace však poskytuje pouze orientační výsledky, v praxi je vhodné nalézt optimální poměr „hustoty“ uzlových bodů vzhledem k podávaným a požadovaným výsledkům. Možná je také kombinace, kdy na důležitých místech zavedeme hustší síť a na zbytku tělesa méně hustou. Celkový výpočet numerické simulace je tedy rozdělen na obrovské množství dílčích výpočtů, sestávajících se z relativně jednoduchých lineárních rovnic, které dokáže řešit počítač. Rychlost výpočtu numerické simulace je závislá nejen na výkonu hardware, tedy kolik výpočtů zvládne za jednotku času, ale především na optimalizaci matematického modelu a metodě diskretizace, viz kapitola 2.3 [14].

### **2.2.3 Materiálová knihovna**

Pro dostatečně přesné výsledky numerického řešení je nutné získat co nejpřesnější hodnoty materiálových vlastností všech materiálů figurujících v numerické simulaci. Pro numerickou simulaci vstřikování keramické hmoty je nutné znát vlastnosti kovu vstřikovací formy, keramické hmoty, vzduchu a chladicí kapaliny. Tyto vlastnosti materiálů jsou shromažďovány v materiálové databázi, ze které je simulační program dokáže jednoduše vyvolat a použít při výpočtech. Materiálovou knihovnu může uživatel obvykle editovat, přidávat vlastní materiály a přizpůsobit tak simulační program svému provozu i používaným materiálům. Podrobněji se tomuto věnují kapitoly 3.1.2 a 3.3.

## **2.3 METODY DISKRETIZACE**

Metod diskretizace existuje celá řada, mezi nejčastěji používané metody v simulačních programech patří Metoda konečných prvků (FEM) a metoda konečných diferencí (FDM) (Obr. 13). Každá z metod má své výhody a je vhodná pro určitou oblast použití. Metoda konečných prvků mnohem lépe aproximuje zkoumanou oblast, velice dobře řeší úlohy pružnosti a pevnosti materiálu, je ovšem mnohem náročnější na výpočet. Metoda konečných diferencí je jednodušší na výpočet, ale hůře aproximuje tenkostěnné a zaoblené prvky nebo obecné křivky [15, 16].

### **2.3.1 Metoda konečných prvků**

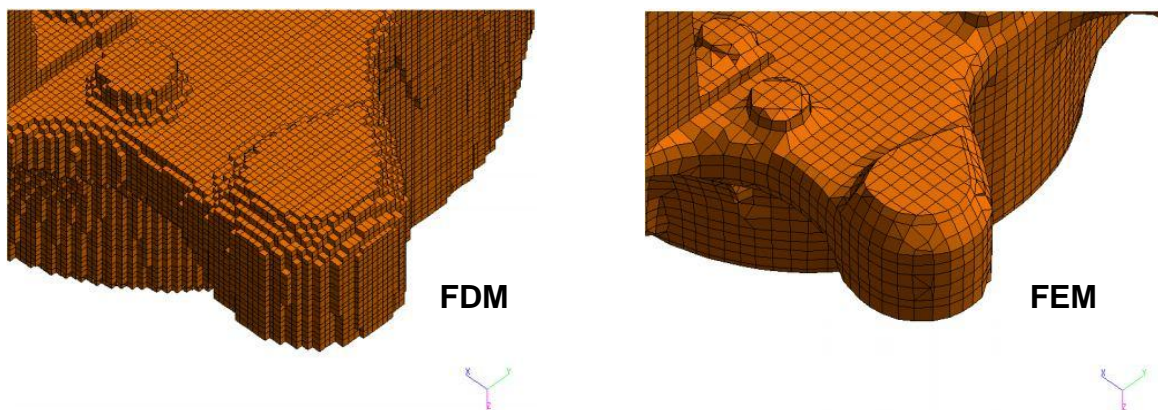
Principem metody je rozdělení řešené oblasti na konečný počet prvků, obvykle trojúhelníků (2D) nebo čtyřstěnů (3D), propojených uzlovými body, ve kterých jsou určovány hledané parametry. V uzlových bodech je řešení diferenciální rovnice, popisující zkoumanou veličinu, aproximováno jednoduššími lineárními funkcemi nebo polynomy. Následně je sestavena

a vyřešena matice těchto jednodušších funkcí. Velikost jednotlivých elementů lze lokálně zmenšovat nebo zvětšovat a tím zpřesnit výsledek nebo naopak uspořit výpočetní čas. Celý postup metody konečných prvků lze vyjádřit v několika krocích [17]:

1. Rozdělení řešené oblasti na podoblasti – konečné prvky (elementy).
2. Formulace chování jednotlivých prvků.
3. Opětovné složení a získání výsledné soustavy rovnic popisujících chování celého systému využitím rovnic získaných při analýze elementů.
4. Aplikace počátečních a okrajových podmínek.
5. Vlastní řešení systému rovnic, získání primárních neznámých.
6. Získání dodatečných, odvozených, neznámých.
7. Zpracování řešení a zobrazení výsledků.

### 2.3.2 Metoda konečných diferencí

Řešená oblast je rozdělena sítí s vhodnou vzdáleností mezi uzlovými body, je možné zavést síť s proměnlivou hustotou. V těchto uzlových bodech je základní diferenciální rovnice s příslušnými okrajovými podmínkami aproximována odpovídající diferencní rovnicí, která má tvar soustavy algebraických rovnic. Parciální derivace v diferenciálních rovnicích jsou nahrazovány diferencemi, což jsou lineární kombinace funkčních hodnot v okolních bodech. Aproximace je tím přesnější, čím přesnější výrazy jsou derivace nahrazovány [15, 16].



Obr. 13 Porovnání sítí generovaných metodami FEM a FDM [14]

## 2.4 ARCHITEKTURA SIMULAČNÍCH PROGRAMŮ

Architektura simulačních programů si je ve většině případů podobná a vychází ze stejných postupových kroků, které lze shrnout do tří bloků: Preprocessing, Mainprocessing a Postprocessing.

### 2.4.1 Preprocessing

Tento blok představuje veškerou přípravu studovaného systému, v tomto případě procesu vstřikování keramické hmoty. Do simulačního programu je nahrána geometrie vstřikovací formy, vytvořená v externím CAD systému, uložená v nějakém z podporovaných formátů (.stl, .step, .iges a podobně). Simulační program poté automaticky vygeneruje výpočtovou síť, ve které probíhá vlastní výpočet, uživatel provede její opravu nebo úpravu. Dále jsou definovány jednotlivé sekce a oblasti, které náleží jednotlivým technologickým celkům, jako jsou geometrie vstřikovací formy, určení dělicí roviny, geometrie, umístění a orientace vstřikovaného jádra (jader), geometrie vtokových kanálů a zaústění plnicích zářezů, geometrie chladicích kanálů ve formě, poloha odvodu vzduchu nebo senzorů (teplota, tlak). Každému takto definovanému celku je přiřazen materiál a jeho vlastnosti z materiálové knihovny a definovány vlastnosti dalších látek a materiálů vystupujících v simulaci (vzduch, chladicí kapalina, inertní plyny, ...).

K dokončení přípravy pro výpočet simulace je nutné zadat počáteční a okrajové podmínky. Jedná se tedy především o technologické parametry procesu jako je teplota keramické hmoty, teplota vstřikovací formy, tlak plnění, rychlost plnění, průtok hmoty plnicí tryskou, velikost dotlaku, a další fyzikální parametry – definování podmínek přestupu tepla, drsnosti povrchu formy a vtokových kanálů nebo definici teploty a tlaku okolí.

V posledním kroku je také důležité určit plochu, kterou keramická hmota vstupuje do formy a plochu, kudy může odcházet vzduch z formy ven a nastavit parametry (kritéria konvergence), při kterých se výpočet simulace zastaví – naplnění formy na 100 %, ztuhnutí hmoty (kovu) na 100 % nebo po uběhnutí určitého času simulace [14, 15, 16].

### 2.4.2 Mainprocessing

V tomto bloku kroků dochází k vlastnímu výpočtu celé simulace, obsahuje výpočtový modul, který numerickou metodou řeší úlohu sestavenou podle matematického modelu. Získané hodnoty řešení v průběhu výpočtu simulace zpracovává a ukládá na disk počítače. Viz matematický model.

### 2.4.3 Postprocessing

V tomto posledním bloku jsou získané hodnoty řešení dále zpracovány a vizualizovány do animací, obrázků a grafů. Umožňuje procházet a analyzovat výsledky simulace.

### 3 VALIDACE SIMULACE PLNĚNÍ VSTŘIKOVACÍ FORMY PRO KERAMICKÁ JÁDRA

Úkolem a cílem této diplomové práce je zjistit, zda je možné numericky simulovat výrobu keramických jader, konkrétně simulace procesu vstřikování keramické hmoty do dutiny formy, která umožní optimalizovat tvar dutiny vstřikovací formy, dimenzovat vtokový systém, optimalizovat polohu zářezů, případně predikovat vady vznikající při výrobě keramických jader.

Základní filozofií řešení zmiňovaného úkolu, je srovnání animace plnění dutiny vstřikovací formy vytvořené v simulačním programu a reálného vstřikovacího procesu s následným posouzením shody simulace versus reality.

Jako první krok bylo nutné odpovědět na základní otázky určující následující směr řešení samotného úkolu:

1. Jaký zvolit vhodný simulační program?
2. Jakou metodiku použít pro srovnání reálného a simulovaného procesu plnění?
3. Jakým způsobem měřit další parametry, jako je tlak a teplota v průběhu plnění?
4. Jak bude vypadat geometrie experimentálního keramického jádra?
5. Jak a kde budou změřeny parametry keramické hmoty potřebné pro simulační program?

Volba vhodného simulačního programu vychází z disertační práce pana Kosoura [21], která se zabývá využitím numerické simulace k optimalizaci výroby voskových modelů pro metodu lití na vytavitelný model. Pro výrobu keramických jader se používá voskokeramická směs, s obsahem vosku do 20 % vykazující chování neneutonské kapaliny podobně, jako plněný vosk pro výrobu voskových modelů. Oba dva materiály lze označit jako pseudoplastické kapaliny. K výrobě keramických jader i voskových modelů se používá podobná technologie vstřikování do kovových forem, proces probíhá za podobných teplot a tlaků. Díky jmenovaným aspektům lze problematiku numerické simulace výroby keramických jader označit za podobnou s problematikou numerické simulace výroby voskových modelů a vycházet tak z poznatků uvedených v disertační práci [21]. V práci [21] jsou srovnávány simulační programy ProCAST a Cadmould 3D-F, přičemž z výsledků lze usuzovat, že věrohodněji proces vstřikování voskové směsi popisuje program Cadmould 3D-F. Jako simulační program, který by mohl být vhodný pro simulaci výroby keramických jader, byl tedy zvolen Cadmould 3D-F. Bližší popis výpočtového modelu, vlastností programu a vytváření simulace je uveden v kapitole 4.1.

Na problematiku volby simulačního programu úzce navazuje měření termo-fyzikálních parametrů keramické hmoty, které jsou nutné pro vytvoření nového materiálu v databázi programu Cadmould (kapitola 4.3). Měření parametrů bylo zprostředkováno firmou Simcon kunststofftechnische Software GmbH, vývojářem programu Cadmould. Tím bylo zajištěno odborné a přesné změření parametrů: měrná tepelná kapacita, teplota meze tečení, tepelná vodivost, měrný objem a viskozita.

Vstřikovací forma je tvořena ze dvou materiálů – Certal a plexisklo, v kovové polovině jsou umístěny teplotní snímače a tlakový snímač, jednak pro kontrolu shody parametrů ze simulace, tak také pro kontrolu parametrů nastavených na vstřikolisu (kapitola 4.4). Dělicí rovina je řešena vertikálně, aby bylo možné proces vstřikování zaznamenat na digitální kameru. Z tohoto důvodu formu není možné otevírat strojově pohybem razníku vstřikolisu, ale ručně vyšroubováním šroubů. Kovová poloforma je pevně fixována na spodní nepohyblivý razník a průhledná poloforma je přimontována ke kovové pomocí šroubů. Konstrukci formy a geometrii keramického jádra se věnuje kapitola 4.2.

Plnění dutiny formy je zachyceno na digitální kameru, záznam následně v počítači rozstříhán na jednotlivé snímky videa. S animací ze simulace je proveden stejný proces, obě sady snímků jsou vzájemně porovnány a je analyzována shoda simulace s reálným procesem. Stejně tak je porovnávána shoda naměřených hodnot tlaku a teplot v průběhu plnění formy s hodnotami získanými ze simulace. Výsledky porovnání jsou zpracovány v kapitole 4.5.

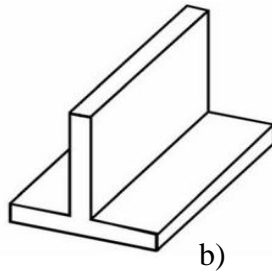
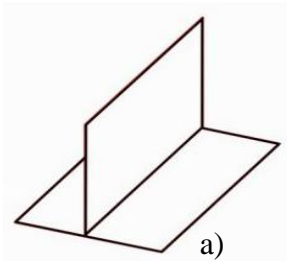
### 3.1 SIMULAČNÍ PROGRAM CADMOULD 3D – F

Simulační program Cadmould 3D-F (dále jen Cadmould) je CAE software vyvinutý pro simulaci a analýzu procesu vstřikování plastů. Mezi jeho přednosti patří jednoduché intuitivní ovládání, rychlost výpočtu díky použitému výpočtovému modelu a přesnost výsledků. Základní verzi programu Cadmould lze rozšířit mnoha dalšími moduly, které umožní analyzovat další procesy nebo speciální metody, jako jsou vstřikování pryže, reaktoplastů, vláknitých materiálů, speciální metody vstřikování (kaskádové plnění, plnění do pootevřené formy), zastříknutí zálisků, analýza vícekomponentního vstřikování, optimalizace chlazení a teploty formy, analýza smrštění a deformace dílců. Pro tuto práci byl program k dispozici ve verzi Cadmould 3D-F FILL, který umožňuje analyzovat [19]:

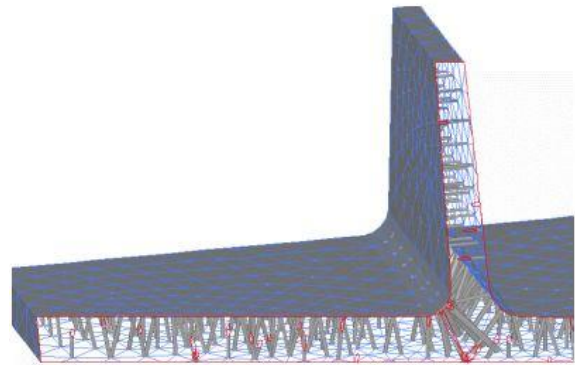
- Plnění tvarové dutiny vstřikovací formy včetně analýzy kompletního vtokového systému, analýza vícenásobných a sdružených forem.
- Dimenzování a vybalancování vtokových kanálů.
- Průběh plnění, poloha studených spojů a míst uzavírání vzduchu.
- Vstřikovací tlak a doba chlazení.
- Uzavírací síla, optimalizační výpočty.

#### 3.1.1 Výpočtový model

Výpočtový model v programu Cadmould spojuje výhody dvou základních výpočtových modelů (Obr. 14), **Objemového** (plně 3D) a **Plošného** (střední rovina stěny). Objemový model je často používán pro analýzu součástí, jejichž tloušťka stěn je zanedbatelná vzhledem k velikosti celé součásti. Plošný model, kde tloušťku stěny reprezentuje pouze rovina procházející jejím středem, je používán naopak pro součásti, jejichž tloušťka stěny je zanedbatelná vzhledem k rozměrům celé součásti. Tloušťka stěny střední rovině přiřazena jako parametr při výpočtu simulace. Typicky se jedná o plastové dílce, tenkostěnné odlitky zhotovené tlakovým litím nebo tenkostěnná keramická jádra.



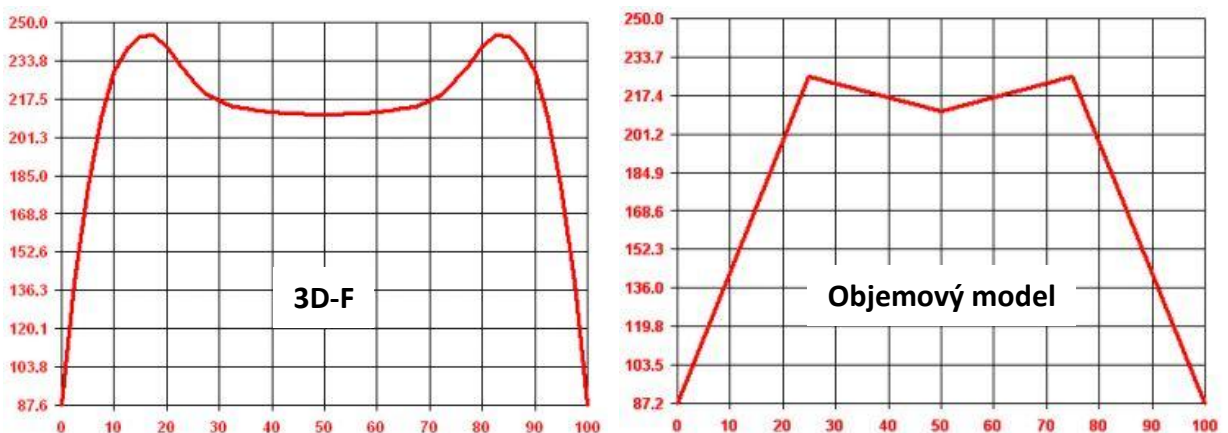
Obr. 14 Porovnání plošného (a) a objemového (b) výpočtového modelu [20]



Obr. 15 Výpočtová síť Cadmould 3D-F [20]

Do programu Cadmould je nutné nahrát 3D model, u kterého byla provedena kontrola chyb, celistvosti povrchu a vyčištění od nadbytečných prvků v některém z externích programů pro kontrolu dat. Program poté automaticky vytvoří plošnou výpočtovou síť, složenou z trojúhelníkových elementů na povrchu modelu, která je propojena množstvím „trubic“ se sítí na protilehlé straně povrchu (viz Obr. 15). Tímto způsobem je vytvořen 2,5 D geometrický model tělesa (3D-F). Srovnání simulace rozložení tepla ve stěně, vypočtené podle klasického Objemového (5 elementů ve stěně) a 3D-F výpočtového modelu, při stejné době výpočtu ukazuje obrázek (Obr. 16). Je zřejmé, že 3D-F model podává přesnější výsledek. Zvýšení množství elementů v Objemovém modelu by také přineslo „jemnější“ výpočet, ovšem za cenu prodloužení výpočetního času.

Výpočtový model předpokládá pouze laminární proudění tekutiny ve vrstvách rovnoběžných s povrchem modelu, kvůli její vysoké viskozitě (tavenina plastů, vosků, keramická hmota). Vzájemné ovlivnění vrstev třením je zanedbáno, uvažuje se pouze tření mezi povrchem formy a taveninou. Použitý 3D-F výpočtový model je vhodný pro součásti, jejichž celkový poměr délky k tloušťce stěny je větší než 10:1 [20].



Obr. 16 Porovnání 3D-F a objemového výpočtového modelu, osa x - vzdálenost bodu od stěny vyjádřená v procentech tloušťky, osa y - teplota ve °C [20]

### 3.1.2 Materiálová databáze programu Cadmould

Simulační program Cadmould umožňuje uživateli vytvořit v materiálové databázi programu vlastní materiál, který je následně použit pro výpočet simulace plnění vstřikovací formy. V průběhu plnění a chladnutí odstříknutého materiálu do vstřikovací formy, v tomto případě keramické hmoty dochází v soustavě forma – keramická hmota zejména k fyzikálním dějům:

- proudění neneutonské tekutiny,
- přenos tepla,
- mechanické napětí.

Cílem této práce je pouze validace simulace průběhu plnění dutiny formy, v simulacích není zahrnut výpočet pnutí v průběhu chladnutí ve vytvořeném keramickém jádře. Simulace byla prováděna ve výpočtovém modulu Cadmould 3D-F FILL, který pro korektní výpočet simulace plnění vyžaduje tyto termo-fyzikální materiálové parametry:

1. měrná tepelná kapacita,
2. teplota meze tečení,
3. tepelná vodivost,
4. pVT – diagram,
5. viskozita.

Detailní popis měření a výsledků naměřených termo-fyzikálních parametrů keramické hmoty je uveden v kapitole 3.3.

### 3.1.3 Postup tvorby simulace v programu Cadmould

V následující kapitole bude stručně vysvětlený postup tvorby simulace vstřikování keramické hmoty do dutiny formy v simulačním programu Cadmould 3D-F včetně interpretace vybraných výsledků.

Základní postup tvorby simulace lze rozdělit do několika kroků:

1. Otevření geometrie jádra v některém z formátů STL, STP nebo IGES.
2. Příprava a vytvoření výpočtové sítě.
3. Vytvoření a umístění vtokové soustavy, umístění zářezů.
4. Volba materiálu jádra.
5. Posouzení technologičnosti konstrukce jádra.
6. Vytvoření a volba materiálu formy.
7. Vytvoření chladících kanálů formy, nastavení parametrů chlazení.
8. Nastavení parametrů výpočtu.
9. Vlastní výpočet simulace.
10. Zhodnocení a práce s výsledky.

#### 3.1.3.1 Otevření geometrie jádra v některém z formátů STL, STP nebo IGES

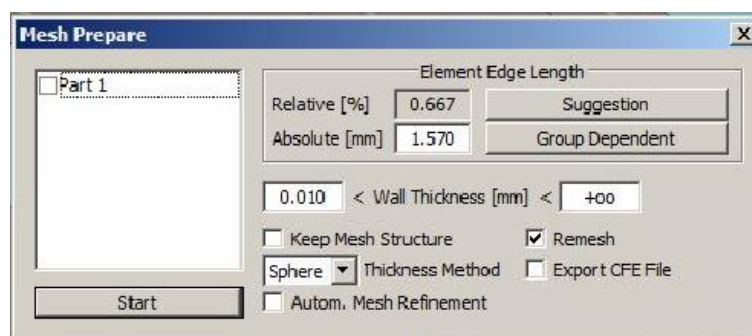
Simulační program Cadmould 3D-F pracuje s geometrií keramického jádra (nebo jiného dílce) uloženou v souborovém formátu STL, tedy široce rozšířeném formátu v technologiích rychlého prototypování (RP), počítačové podpoře obrábění (CAM), ale i jiných simulačních

programech. Lze samozřejmě otevřít i jiné formáty, jako je STEP, STP nebo IGES, ovšem vždy dojde ke konverzi do formátu STL. Důležité je používat pouze uzavřené, objemové modely.

Před otevřením geometrie je vhodné použít program na kontrolu a opravu formátu STL nebo STP, tak lze předejít následným problémům s chybami ve výpočtové síti. Cadmould sice dokáže počítat i s chybami výpočtové sítě, potom ovšem není možné sledovat plnění dutiny formy v kterémkoliv místě objemu, ale pouze po povrchu součásti – tzn. v průběhu plnění nevyplněná dutina formy není transparentní.

### 3.1.3.2 Příprava a vytvoření výpočtové sítě

V otevřeném dialogovém okně nastavení tvorby výpočtové sítě (Obr. 17) volíme délku hrany elementu sítě (Element Edge Length) a nejmenší tloušťku stěny, se kterou má program počítat. Dále lze zvolit zachování již vytvořené výpočtové sítě nebo povolit programu, aby automaticky zjemnil síť na členitých místech – tato volba prodlužuje dobu tvorby výpočtové sítě.



Obr. 17 Tvorba výpočetní sítě (Mesh)

Volba délky hrany elementu ovlivňuje hrubost nebo jemnost výpočtové sítě, ale také má zásadní vliv na čas výpočtu simulace, tedy čím kratší délka hrany elementu, tím jemnější výpočtová síť, věrnější kopírování tvaru modelu, přesnější výsledky a pomalejší výpočet. Povrch modelu lze rozdělit na jednotlivé části plochy a v každé části zvolit jinou délku hrany elementu. Tak je možné dosáhnout přesnějších výsledků ve sledovaných místech nebo více členitých místech a naopak zvolit hrubší výpočtovou síť v masivnějších místech modelu, částech s konstantním průřezem nebo tam, kde není zapotřebí tak přesných výsledků.

Volba minimální tloušťky ovlivňuje, se kterými místy ještě program počítá, tato hodnota musí korespondovat s nejmenší tloušťkou stěny modelu, měla by být cca 5x menší. Nedoporučuje se volit minimální tloušťku stěny menší než 0,01 mm.

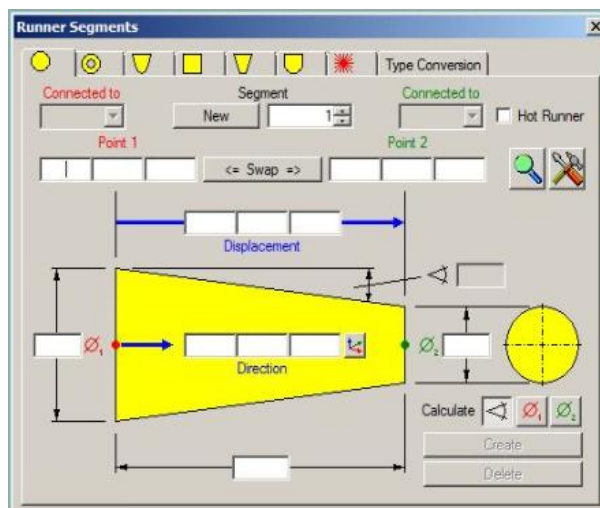
### 3.1.3.3 Vytvoření a umístění vtokové soustavy, umístění zářezů

Nástrojem „Gate Locations“ (Obr. 18) se volí místo zaústění vtokového kanálu do dutiny formy, tedy zářezy. Na výběr jsou dvě možnosti – manuální umístění a automatické umístění. V manuálním režimu lze vtok (vtoky) umístit na kterékoliv místo na modelu, většinou na místo, kde byl vtok na modelu předem vymodelován. Finální umístění lze přesně určit pomocí přepsání nebo upravení souřadnic polohy. V automatickém režimu Cadmould sám určí nejvhodnější místo zaústění vtoku, kdy dojde k optimálnímu plnění dutiny formy a hmotě



bude kladen nejmenší odpor při plnění. Tento režim je vhodný zejména tehdy, pokud nemáme předem určené místo vtoku na modelu.

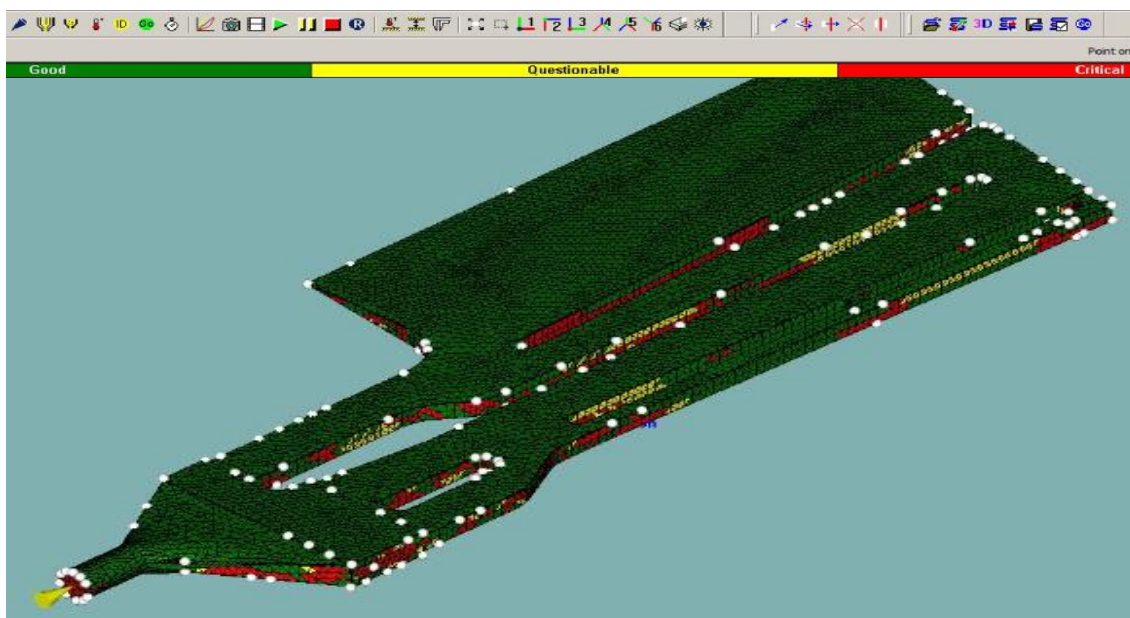
Další v pořadí postupu je vytvoření vtokového kanálu formy, cesta od vstřikovací trysky do dutiny formy. Na výběr je v nástroji „Runner Segments“ několik typů průřezu vtokového kanálu: kruhový, trubkový, čtvercový, obdélníkový, tvar U nebo V. Po výběru vhodného průřezu je nutné nastavit jeho parametry jako průměry případně rozměry průřezu, body počátku a konce, délku úseku a případně další podrobnější nastavení. Po vytvoření se vtok zobrazí vždy ve tvaru tyče reprezentující hydraulický průměr reálného (vytvořeného) vtoku.



Obr. 18 Tvorba vtokového kanálu

### 3.1.3.4 Volba materiálu jádra

V dialogovém okně volby materiálu součásti (jádra) je možnost vybrat materiál z databáze materiálů nainstalovaných v programu Cadmould nebo vytvořit či nahrát materiál vlastní. Současně lze prohlížet materiálové charakteristiky jako je viskozita, mechanické vlastnosti, teplotní křivky, pVT diagram materiálu a další a podle tohoto přehledu zvolit vhodný materiál součásti.



Obr. 19 Kontrola technologičnosti konstrukce jádra

### 3.1.3.5 Posouzení technologičnosti konstrukce jádra

Dalším krokem je posouzení technologičnosti konstrukce, v Cadmouldu funkce nazvaná „Feasibility analysis“ (Obr. 19). Jde o to, že program posoudí, ve kterých částech může

docházet k uzavření vzduchu v dutině formy a kde může být problém s vyjmutím jádra, tudíž místa, kde by bylo lepší zvolit větší úkos nebo odvzdušnění formy. Tyto informace jsou tak získány ještě před samotným výpočtem simulace, čím lze ušetřit čas, kdy by jinak tyto informace byly zjištěny až po dlouhém výpočtu simulace.

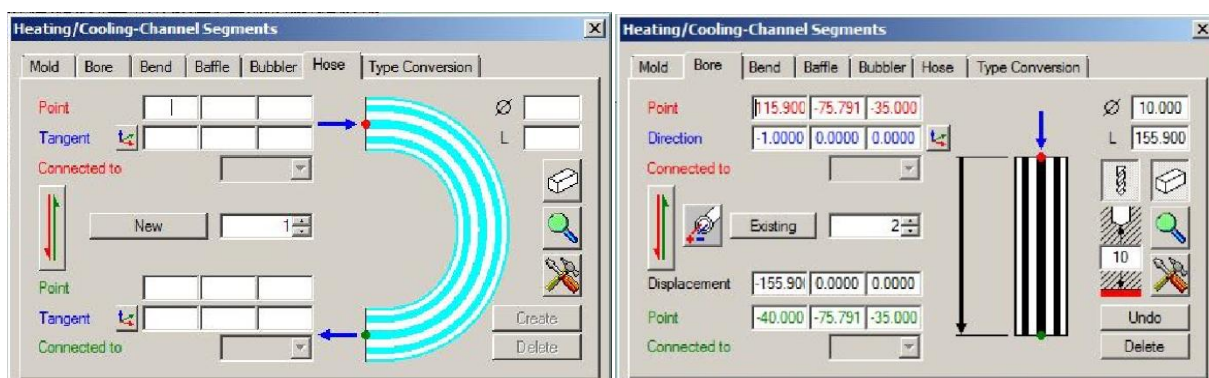
### 3.1.3.6 Vytvoření formy a volba materiálu formy

V tomto kroku je zapotřebí vytvořit formu a její materiál, kdy se vytvoří kvádr obklopující model keramického jádra a vtokovou soustavu pomocí zadání přesných souřadnic nebo pomocí minimální tloušťky stěny formy. V tomto kroku lze vytvořit polovinu formy z kovového materiálu a polovinu polykarbonátovou. Každé polovině formy lze poté přiřadit materiál opět buďto z předinstalované materiálové databáze nebo vložit či vytvořit materiál vlastní. Důležité je při volbě materiálu, aby se součinitel přestupu tepla materiálu formy v simulaci shodoval se součinitelem přestupu tepla materiálu formy v reálné situaci. Součinitel přestupu tepla je také jediný údaj bezpodmínečně nutný k úspěšnému vytvoření nového materiálu.

### 3.1.3.7 Vytvoření chladících kanálů formy, nastavení parametrů chlazení

Aby bylo možné simulovat tuhnutí keramické hmoty tak, jak se tomu děje ve skutečnosti, je nutné co nejpřesněji vytvořit a nastavit chlazení formy (Obr. 20). Při zadávání parametrů simulace je mimo jiné vyžadována volba okolní teploty vzduchu, který ochlazuje formu volným prouděním. Simulace tedy s tímto způsobem ochlazování počítá. Druhou možností je vytvoření chladících kanálů ve formě nebo simulace chlazených desek vstřikovacího stroje, ke kterým je forma upnutá. V každém případě jde o vytvoření potrubí v materiálu formy, které lze vzájemně spojovat do sítě kanálů. Důležité je také zvolit správné chladicí médium, jeho teplotu na vstupu do formy, rychlost proudění a průtok.

Při vytváření chladících kanálů je podobně jako u vtokových kanálů možnost jejich přesného umístění pomocí souřadnic, podobné je také nastavení tvaru a průřezu. Navíc lze zvolit propojení pomocí externích hadic vedoucích mimo formu nebo použití speciálních typů chladících elementů.



Obr. 20 Tvorba chladících kanálů ve formě

### 3.1.3.8 Nastavení parametrů výpočtu

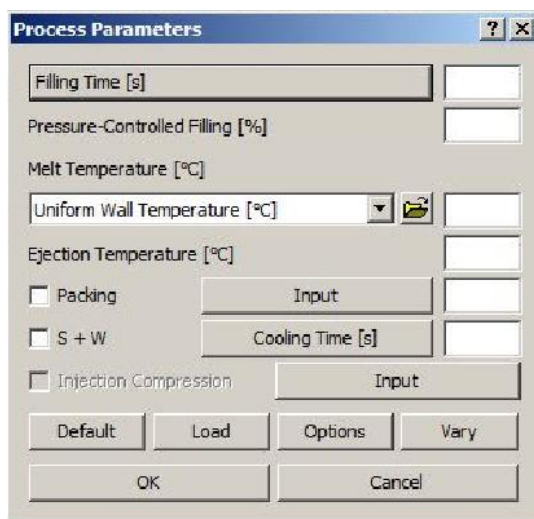
V nástroji „Process Parameters“ (Obr. 21) se volí všechny hodnoty nastavení procesu vstřikování keramické hmoty – čas plnění „filling time“, teplota keramické hmoty „Melt Temperature“, teplota v celém objemu jádra, při které dojde k otevření formy „Ejection Temperature“, velikost dotlaku „Packing“, doba chlazení jádra ve formě „Cooling Time“ a jiné upřesňující parametry jako nastavení okolní teploty, rychlost pohybu pístu vstřikolisů, uzavírací síla a jiné.

Pro parametry „filling time“ a „packing time“ jsou k dispozici další dialogová okna umožňující přesné nastavení celého průběhu plnění a dotlaku, kdy lze volit postupný náběh plnicího tlaku a dotlaku a jejich velikost v závislosti na čase, průtok keramické hmoty tryskou nebo délku konkrétní fáze celého cyklu.

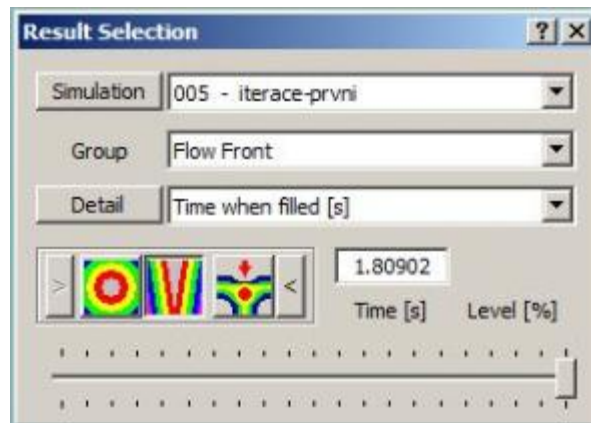
### 3.1.3.9 Vlastní výpočet simulace

Před zahájením výpočtu simulace program vyžaduje uložení současného stavu jako samostatné verze nastavení parametrů. Takto je poté uloženo několik pracovních verzí s různým nastavením parametrů, mezi kterými lze rychle přecházet a porovnávat vypočtené výsledky.

V průběhu samotného výpočtu simulace vidíme průběh plnění dutiny formy s následnou vizualizací tuhnutí. O dokončení simulace informuje dialogové okno oznamující konec výpočtu, souhrnné informace a také to, zda se v průběhu výpočtu vyskytly nějaké problémy.



Obr. 21 Parametry procesu



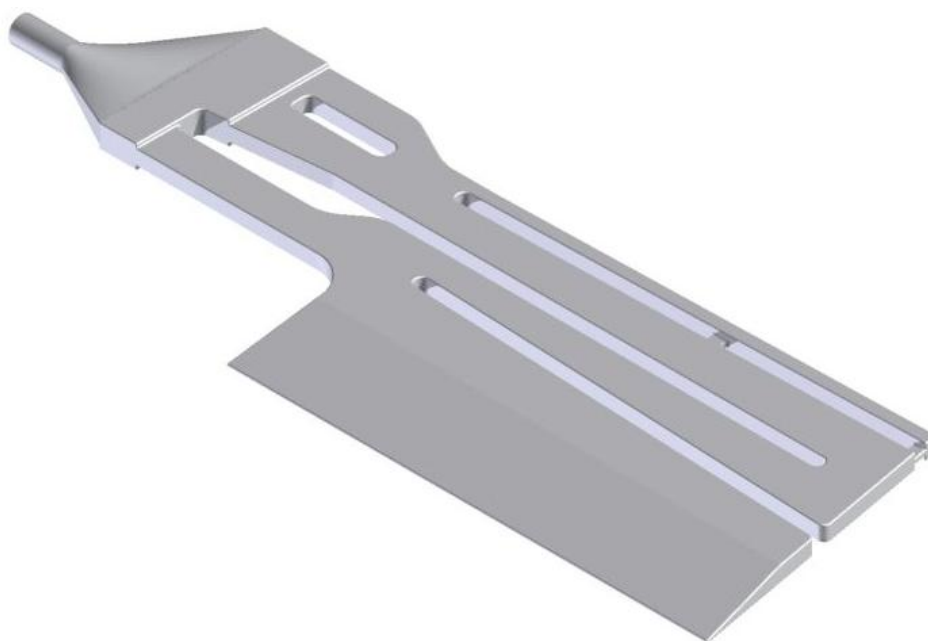
Obr. 22 Okno výběru zobrazení výsledků

### 3.1.3.10 Zhodnocení a práce s výsledky

Program Cadmould rozděljuje výsledky simulace do dvou hlavních skupin (Obr. 22) – fáze plnění a tuhnutí, dále potom podrobné zobrazení studených spojů, uzavřeného vzduchu, staženin, napětí v materiálu a jiných. Výsledky ze skupin Plnění a Tuhnutí lze zobrazit po určitých časových krocích v celé časové ose procesu plnění a tuhnutí, tyto výsledky lze také uložit jako animaci. Mezi získané výsledky patří např. čas plnění, smyková rychlost a smykové napětí, viskozita materiálu v průběhu plnění, teplota keramické hmoty po naplnění formy, průběh ochlazování nebo objemové smrštění po naplnění. Podrobněji jsou výsledky simulací a jejich interpretace popsány kapitole 3.5.

### 3.2 GEOMETRIE EXPERIMENTÁLNÍHO KERAMICKÉHO JÁDRA

Návrh vhodné geometrie experimentálního keramického jádra je klíčovým prvkem v úkolu validace simulačního programu Cadmould 3D-F, protože navržená geometrie by měla zahrnovat jednak všechny obvyklé i méně obvyklé tvary keramických jader běžné sériové výroby, ale stejně tak i specifická nebo dokonce kritická místa, ve kterých lze očekávat některé problémy, jako jsou studené spoje, uzavřený vzduch, staženiny na povrchu, zamrznutí keramické hmoty v tenkých průřezech, praskání vlivem pnutí v materiálu po ztuhnutí. První myšlenkou bylo použít stejnou nebo podobnou geometrii dutiny formy, jako je uváděna v disertační práci pana Kosoura [21], tedy univerzální tvar zahrnující přechod z masivní části, přes postupnou klínovitou část do průřezu desetin milimetru. Po diskusi k této variantě geometrie se dospělo k závěru – tento tvar nemá dostatečnou vypovídající schopnost jak o běžném portfoliu výroby, ale především o složitých komplexních tvarech keramických jader určených pro lopatky spalovacích turbín. Bylo tedy nutné najít jiný, reprezentativnější tvar. Řešení finálního tvaru experimentálního jádra tedy vychází z obecných tvarů jader pro turbínové lopatky, kdy některé detaily v povrchu jader byly zanedbány. Jedná se hlavně o drážky na povrchu jader a otvory skrz celý materiál jádra, které ve finální lopatce vytvoří „žebra“ a piny pro intenzivnější chlazení. Stejně tak je tvar jádra narovnaný do 2D roviny oproti reálným jádrům, která jsou tvarována jako obecná plocha v mírné šroubovici.



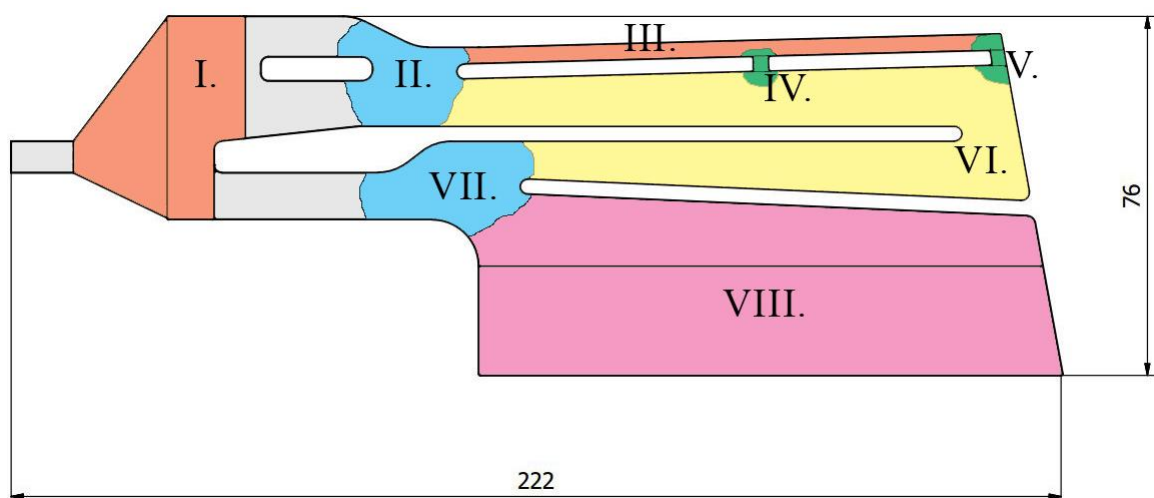
Obr. 23 Geometrie experimentálního keramického jádra

Finální tvar jádra (Obr. 23) vytvořil Ing. Vaščák – technolog výroby keramických jader ve firmě LANIK s.r.o., který vycházel ze svých zkušeností s technologií výroby keramických jader. Tvar respektuje všechny požadavky popsané v předchozím odstavci, detailně jsou jednotlivá místa jádra popsána níže v textu.

Geometrie navrženého jádra je složena z několika částí (Obr. 24), které reprezentují specifická místa vyskytující se v reálných keramických jádrech a měla by simulovat možné

reálně vznikající problémy s technologií, jako jsou studené spoje, nezaběhnutí nebo uzavřený vzduch. Zmiňované části lze popsat zhruba takto:

- I. Masivní část jádra. Místo s velkým objemem keramické hmoty, kde může docházet ke vzniku staženin a propadání povrchu. Toto místo dosáhne tuhého stavu jako poslední, vzniká pnutí mezi touto masivní částí a tenkostěnným zbytkem jádra.
- II. Spojení dvou rovnoběžných proudů keramické hmoty. Riziko vzniku studeného spoje mezi těmito dvěma proudy.
- III. Dlouhý kanál s velmi malým průřezem. Dochází k velkému ochlazení keramické hmoty, snížení její viskozity, horší zabíhavost. Hrozí zamrznutí hmoty nebo praskání vlivem pnutí.
- IV. Spojení tenkého a silného profilu, reálně kvůli zpevnění tenkého profilu. Riziko vzniku studeného spoje vlivem nízké teploty hmoty v tenkém kanálu a následné praskání vlivem pnutí.
- V. Spojení konce tenkého a silného profilu, hmota bude dříve na konci silného profilu a dojde k jejímu protlačení do prostoru profilu tenkého. Studený spoj a uzavírání vzduchu.
- VI. Dlouhý kanál tvaru „S“, v tomto místě dochází k ovlivnění kvality povrchu jádra vlivem vstřikovacího tlaku a rychlosti plnění formy. Potrhání a vysoká drsnost povrchu.
- VII. Druhá masivnější část jádra. Hrozí staženiny v povrchu, také zpomalení rychlosti proudění keramické hmoty vlivem narážení na stěnu formy a zvětšením průtočného průřezu.
- VIII. Tenká klínovitá část jádra. Průřez se zmenšuje až k cca 0,3 mm. Riziko zamrznutí keramické hmoty v klínovité části vlivem nízké teploty formy, hmoty nebo pomalého proudění. V tomto místě také dochází ke ztuhnutí hmoty jako první, roh hrany klínu je poslední zaplněné místo ve formě – uzavírání vzduchu.



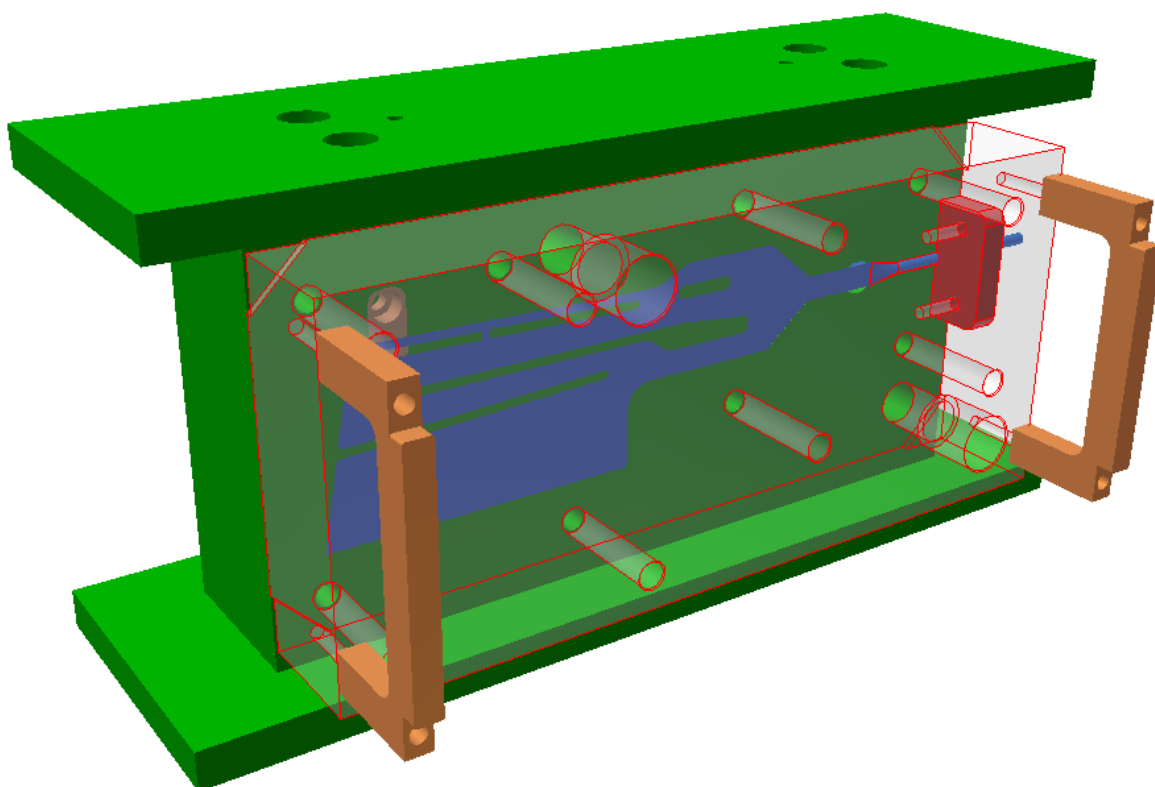
Obr. 24 Popis geometrie experimentálního jádra



### 3.2.1 Vstřikovací forma

Pro validaci plnění dutiny formy, je nutné zachytit proces plnění na digitální kameru a následně srovnat s výsledky simulace. Aby toto bylo možné, je nutné vytvořit jednu polovinu formy z průhledného polykarbonátu. Dále nesmí být v průhledné polovině formy žádná tvarová část jádra, jelikož polykarbonát obráběním zmatní a není dobře možné přes něj pozorovat proces plnění. Tedy celá dutina formy je pouze v kovové části formy (materiál CERTAL) a polykarbonát tvoří pouze krycí desku, která je ke kovové polovině připevněna šrouby (Obr. 25).

Dále jsou v kovové části vytvořeny závitové otvory pro tlakové čidlo, teplotní čidla a tvarový otvor pro zasunutí plnicí trysky. Ve vstřikolisovacím stroji je forma umístěna s vertikální polohou dělicí roviny, aby bylo možné proces zachytit na kameru, otevření a zavření formy se tedy provádí manuálně po rozevření razníků stroje a odšroubování všech šroubů držících polykarbonátovou část. Chlazení formy probíhá pouze prouděním okolního vzduchu a vedením přes horní a dolní styčné plochy formy a razníků stroje, toto omezení bylo v přípravě a nastavení simulace zahrnuto. Stejně tak simulace počítá i s rozdílnými materiály formy.



Obr. 25 Forma pro experimentální keramické jádro

### 3.3 KERAMICKÁ HMOTA MP04

Jako materiál experimentálního keramického jádra byla zvolena keramická hmota MP04, jedná se o označení firmy LANIK s.r.o. Tento materiál je určený pro odlévání odlitek ze slitin oceli a super slitin metodou vytavitelného modelu, konkrétně MP04 speciálně pro složitá a komplexní jádra určená pro letecký a energetický průmysl. Jedná se o vysoce plněnou (80–85 %) suspenzi vosku (pojivo) a keramického prášku (plnivo), určenou pro výpal, při keramizační teplotě okolo 1200 °C

Hmotu MP04 lze z pohledu mechaniky tekutin klasifikovat jako neneutronskou pseudoplastickou tekutinu, která se vyznačuje poklesem počáteční zdánlivé viskozity s rostoucím smykovým napětím. Tento jev je možné pozorovat především u suspenzí anizometrických částic. Pseudoplastické kapaliny tečou i při velmi malém působícím napětí, proto toková křivka prochází počátkem, stejně jako u newtonských kapalin (Obr. 26).

V pseudoplastických kapalinách existuje systém asociačních struktur, které představují přechod ke spojitému síťoví a tím ztuhnutí materiálu (gelaci), tyto asociační struktury vlivem tepelného pohybu neustále vznikají a zanikají. Se vzrůstajícím smykovým napětím se tyto struktury rozbíjejí, v roztoku se zmenšuje počet asociačních spojů a viskozita kapaliny klesá. S rostoucí teplotou kapaliny se pojí rychlejší pokles viskozity než u newtonských kapalin, způsobený tím, že s rostoucím tepelným pohybem klesá stupeň asociace [25, 11].

Pro popis chování neneutronských tekutin používá Cadmould viskozitní model Carreau-WLF, který popisuje závislost viskozity, smykové rychlosti a teploty [26].

#### Model Carreau-WLF:

$$\eta = \frac{a_T \cdot A}{(1 + B \cdot a_T \cdot \dot{\gamma})^C}$$

$$\log(a_T) = \frac{c_1 \cdot (T_0 - T_S)}{c_2 + (T_0 - T_S)} - \frac{c_1 \cdot (T - T_S)}{c_2 + (T - T_S)}$$

Kde:

$\eta$  [Pa · s] = dynamická viskozita materiálu.

$\dot{\gamma}$  [s<sup>-1</sup>] = smyková rychlost.

$a_T$  [-] = součinitel teplotního posunu.

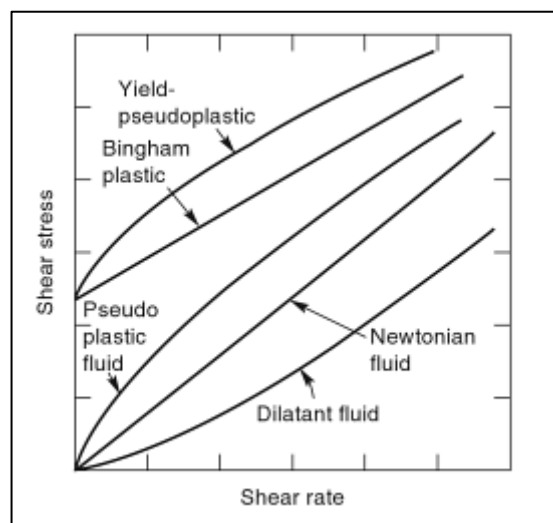
$T$  [°C] = zkoumaná teplota.

$T_0$  [°C] = teplota známé hodnoty viskozity.

$T_S$  [°C] = teplota skelného přechodu materiálu.

$c_1, c_2$  [-] = materiálové konstanty.

$A$  [Pa · s],  $B$  [s],  $C$  [-] = experimentálně určené konstanty.



Obr. 26 Závislost smykového napětí (shear stress) na smykové rychlosti (shear rate)[11]

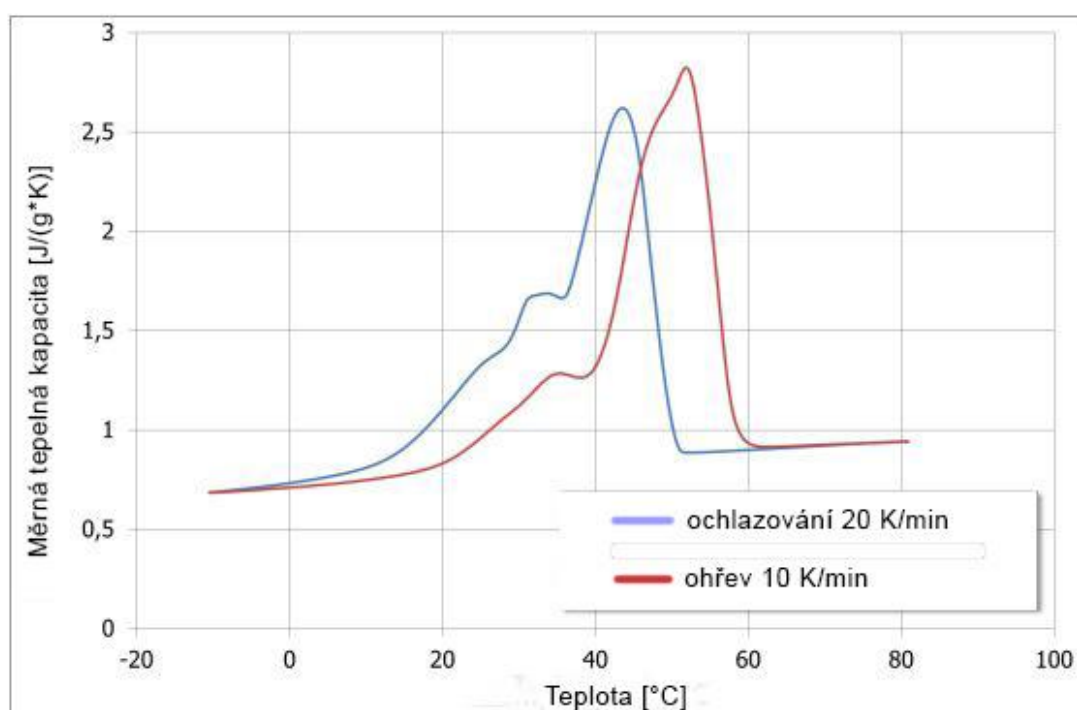
Program Cadmould 3D-F použitý pro simulaci výroby keramických jader v této práci, umožňuje v materiálové databázi programu vytvořit vlastní materiál, který je následně použit pro výpočet simulace. Je však nutné zadat fyzikální vlastnosti reálného materiálu, které Cadmould požaduje k výpočtu simulace, konkrétně:

1. měrná tepelná kapacita,
2. teplota meze tečení,
3. tepelná vodivost,
4. pVT – diagram,
5. viskozita.

Naměření výše uvedených parametrů v takové přesnosti, aby vypočtená simulace mohla být považována za věrohodnou a korespondující s realitou, je poměrně technologicky náročný proces, který lze provést pouze na přesných měřicích přístrojích kvalifikovanými a zkušenými pracovníky. Bylo tedy rozhodnuto, že změření potřebných parametrů a vytvoření materiálu LANIK MP04 pro materiálovou databázi Cadmould provede odborné pracoviště na Ústavu výzkumu a vývoje polymerních materiálů na Univerzitě v Leobenu (Lehrstuhl für Kunststoffverarbeitung, Montanuniversität Leoben) [26].

### 3.3.1 Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita byla měřena a vypočtena jako funkce teploty v rozmezí 20–80 °C dle normy ISO 11357-4. Měření byla provedena na diferenčním skenovacím kalorimetru v inertní atmosféře (N<sub>2</sub>), při středním lineárním ohřevu 10 K/min a průměrné lineární rychlosti ochlazování 20 K/min. Výsledek měření je zřejmý z obrázku (Obr. 27). Měřicí přístroj: DSC - Typ DSC1, výrobce: Mettler Toledo GmbH, Switzerland.

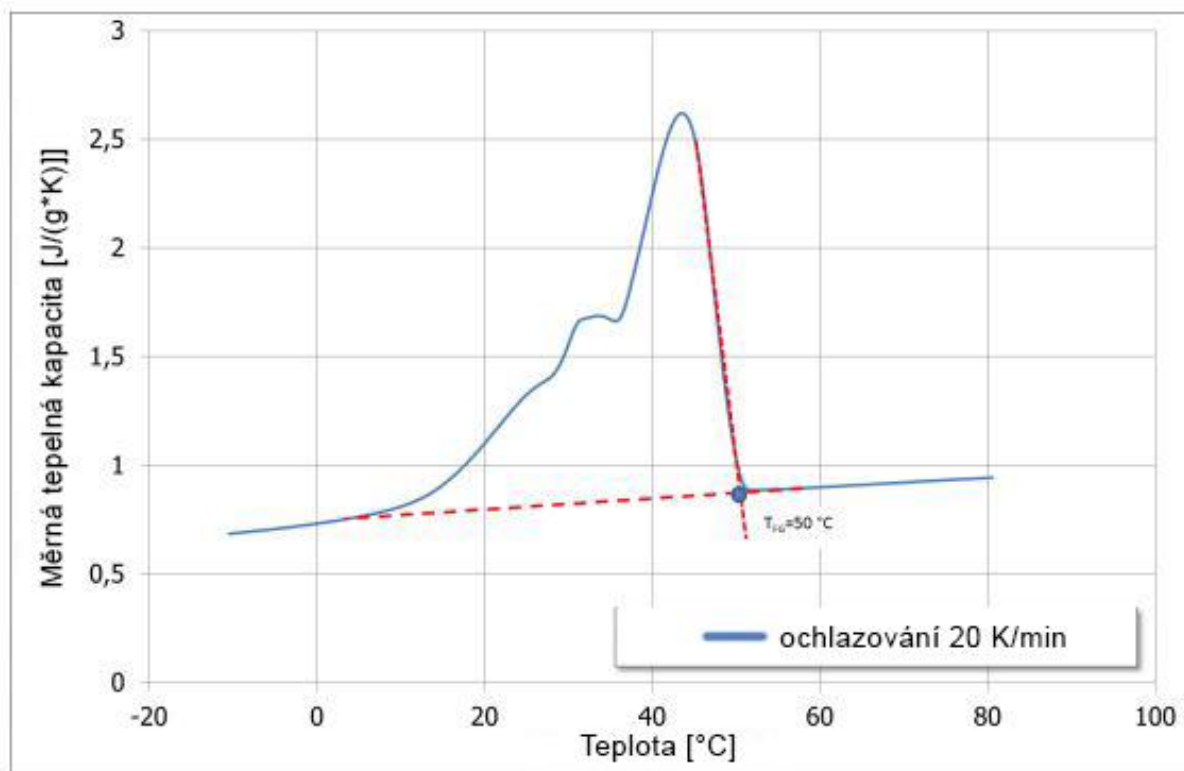


Obr. 27 Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě [26]



### 3.3.2 Teplota meze tečení

Teplota meze tečení („No-Flow Temperature“) byla stanovena na základě termogramu DSC v režimu ochlazování při lineární rychlosti ochlazování 20 K/min. U částečně krystalických plastů představuje průsečík tečny základny s pravou tečnou vrcholu krystalizace (Obr. 28). Mez tečení materiálu byla vypočtena jako  $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



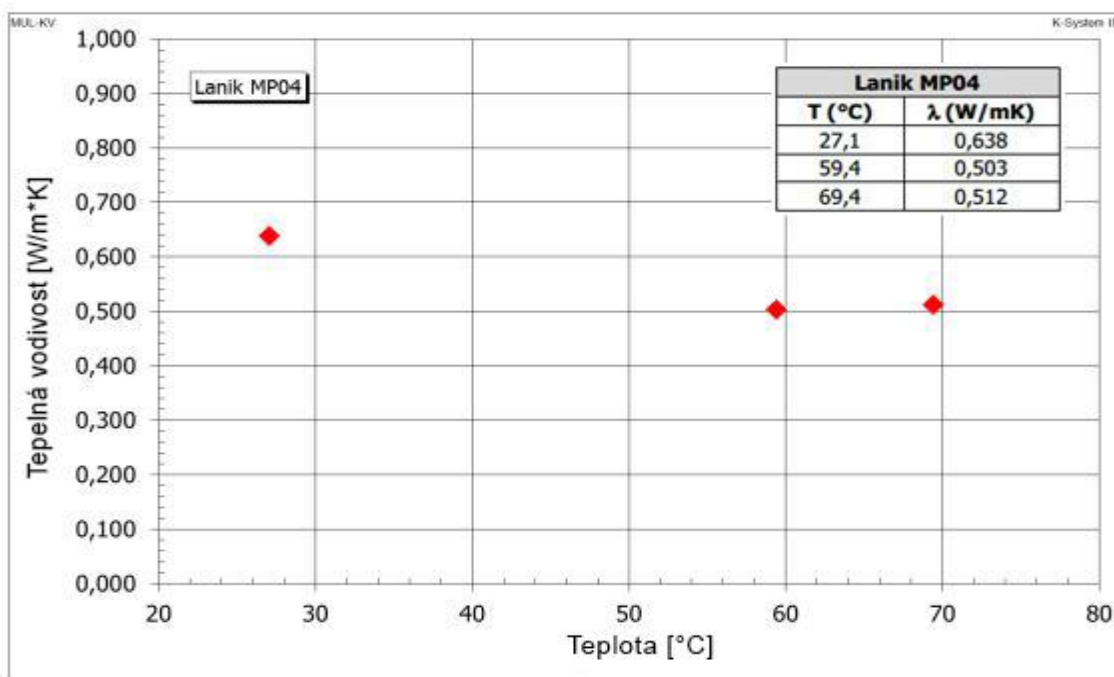
Obr. 28 Teplota meze tečení [26]

### 3.3.3 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost byla měřena v závislosti na teplotě (Obr. 29). Měření tepelné vodivosti bylo provedeno při třech teplotách (pokojová teplota ( $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) při normálním atmosférickém tlaku. Při každé teplotě byla bezprostředně po sobě provedena 4 měření, aby z nich bylo možno vypočítat střední hodnotu tepelné vodivosti, střední rozptyl je 3,4 %. Měřicí přístroj: K-System II, výrobce: Advanced CAE Technology Inc., Ithaca, USA.

### 3.3.4 pVT Diagram

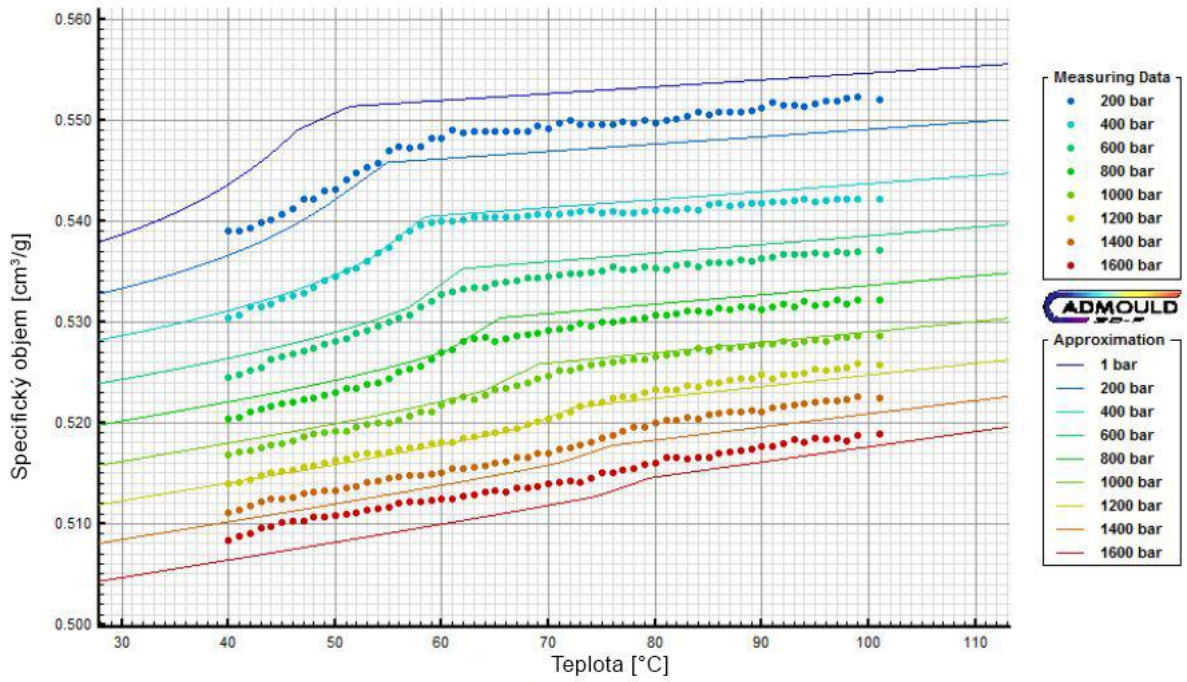
Měření měrného objemu v závislosti na teplotě a tlaku bylo provedeno dle příslušné normy ISO 17744, v rozsahu teplot  $40\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$  při izobarickém ochlazování rychlostí  $0,1\text{ K/s}$  a při tlaku 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400 a 1600 MPa. Jednotlivé pVT křivky je možné vidět v diagramu (Obr. 31) Měřicí přístroj: pvT Meter typ PVT100, výrobce: SWO polymer Technology GmbH, Krefeld, Deutschland.



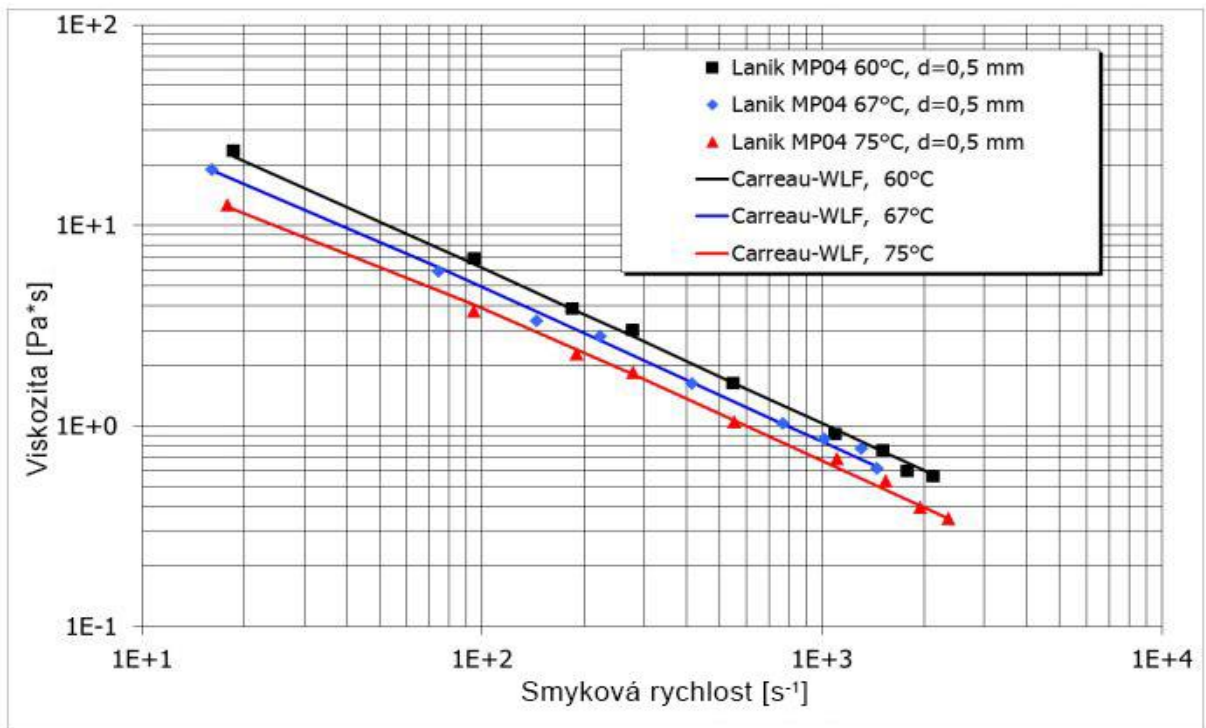
Obr. 29 Tepelná vodivost

### 3.3.5 Viskozita

Měření viskozity keramické hmoty bylo provedeno dle normy ISO 11443 v rozsahu smykové rychlosti  $10 \text{ s}^{-1}$  až  $1800 \text{ s}^{-1}$  při teplotách  $60 \text{ °C}$ ,  $67 \text{ °C}$  a  $75 \text{ °C}$  pomocí vysokotlakého kapilárního reometru. Použity byly tři délky kruhových kapilárních trysek (5 mm, 10 mm a 15 mm) o konstantním průměru 5 mm a 50-ti barový snímač tlaku měřené látky. Vyhodnocuje se adheze měřené látky na stěnu kapiláry, respektive tlak na tlakovém snímači. Při smykové rychlosti nad  $1000 \text{ s}^{-1}$  byl zaznamenán prudký nárůst tlaku s následným kolísáním, což signalizuje vytvoření aglomerátu materiálu v kapiláře a její ucpání. Z tohoto důvodu bylo měření upraveno na rozsah smykové rychlosti  $10 \text{ s}^{-1}$  až  $1000 \text{ s}^{-1}$ . Pro naměřené křivky viskozity byly vypočítány konstanty rovnice pro součinitel teplotního posuvu dle Williamse, Landela a Ferryho (rovnice WLF) a Carreauovy rovnice. Výsledky měření jsou v diagramu na obrázku (Obr. 30) Měřicí přístroj: Vysokotlaký kapilární reometr typ Rheograph 2002, výrobce: Göttfert Material Testing Machines GmbH, Buchen, Deutschland.



Obr. 31 pVT Diagram [25]

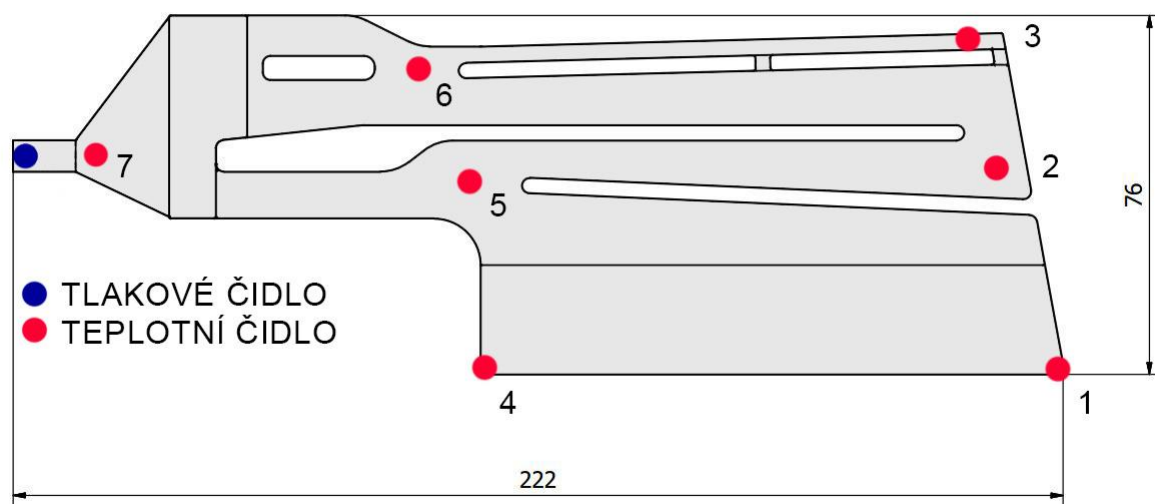


Obr. 30 Viskozita

### 3.4 MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ

Simulační program Cadmould umožňuje umístit virtuální čidla teploty a tlaku do dutiny formy a měřit tak velikost teploty a tlaku na určených místech. Bylo tedy rozhodnuto, že v experimentální části práce bude rovněž ověřena shoda virtuálně naměřených hodnot teploty a tlaku s hodnotami reálně naměřenými při experimentálním odlisování jádra. V prvním kroku bylo nutné vytipovat vhodná místa k umístění čidel. Pozice tlakového čidla byla diskutována s Ing. Gabrielem (Plasty Gabriel s.r.o.), odborníkem na simulační program Cadmould, a na základě jeho doporučení zvolena pozice na vtokovém kanálu v blízkosti vstřikovací trysky stroje. Volba tohoto umístění vychází z dlouhodobých zkušeností s konstrukcí vstřikovacích forem pro výrobu plastových dílců. V tomto místě by mělo dojít k zamrznutí keramické hmoty jako poslední, tedy čidlo by mělo být schopné měřit hodnotu tlaku od počátku plnění formy až do ukončení fáze dotlaku. Co se týká měření teploty v dutině formy, byl zvolen celkový počet sedmi teplotních čidel, umístěných na specifických místech (Obr. 32):

1. Poslední zaplněné místo dutiny formy.
2. Spojení dvou proudů keramické hmoty, studený spoj.
3. Místo pravděpodobného studeného spoje, nejslabší kanál jádra.
4. Místo prvního tuhnutí keramické hmoty, konec klínovité části, tloušťka 0,5 mm
5. Masivní část jádra, „tepelný uzel“.
6. Opětné spojení dvou proudů keramické hmoty.
7. Umístění na vtoku – kontrola teploty vstřikované keramické hmoty.



Obr. 32 Rozložení tlakového a teplotních čidel

V dalších krocích bylo zapotřebí vybrat vhodné komponenty pro realizaci měření teploty a tlaku, tedy teplotní čidla, tlakové čidlo, převodník mezi čidly a počítačem a vhodný software ke zpracování signálu. Budoucí konfigurace komponentů musela splňovat tyto základní požadavky:



1. Schopnost měření teploty v rozsahu minimálně 20–80 °C, tj. pracovní teploty při vstříkolisování keramické hmoty.
2. Schopnost měření tlaku v rozsahu 0–100 bar, tj. pracovní tlaky při vstříkolisování keramické hmoty.

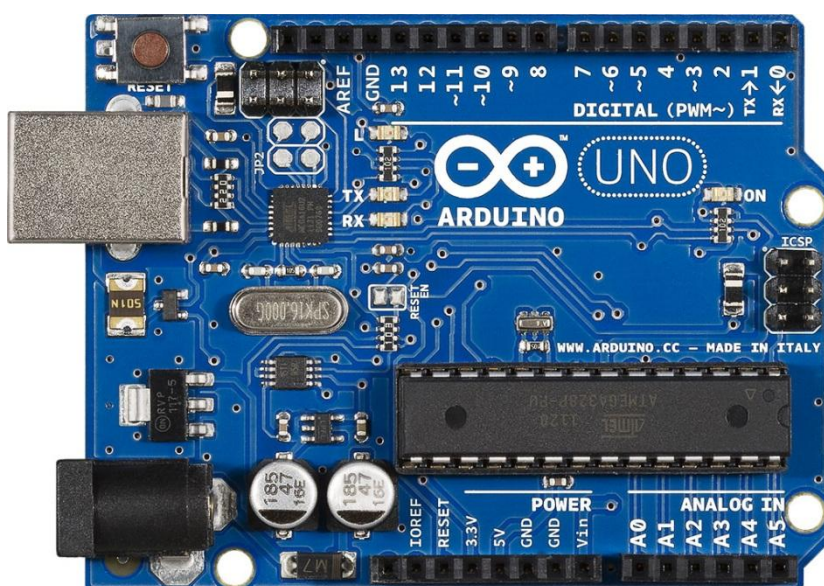
Po krátké rešerši na poli výrobců a dodavatelů vhodných komponent a možností realizace měření bylo dospěno k závěru, vytvořit vlastní měřicí zařízení včetně řídicího software s použitím dostupných komponent a open source software pro vizualizaci dat. Tedy jako základ pro měřicí zařízení slouží vývojový kit Arduino, který slouží jako převodník. Tlakové čidlo TSZ-M F12 od výrobce BHV Sensory s.r.o, teplotní čidla DS18B20 od společnosti Maxim Integrated, dále open source software Arduino IDE pro vytvoření potřebného řídicího programu a open source software SerialChart pro vykreslení výsledků měření v reálném čase. Podrobný popis konstrukce a funkce měřicího zařízení je popsán dále.

### 3.4.1 Popis komponentů měřicího přístroje

#### 3.4.1.1 Arduino UNO R3

Arduino UNO R3 (dále Arduino, Obr. 33) je vývojový kit, open source elektronická platforma založená na osmibitovém mikroprocesoru Atmel ATmega328 s taktem 16 Mhz. Jedná se o hardware, ke kterému musí být vytvořen obslužný řídicí program vytvoření v programovacím jazyku Wiring, vycházejícím z jazyku C/C++, který se následně nahraje do interní paměti vývojové desky. Díky vytvořenému programu může Arduino po připojení potřebného příslušenství provádět monitorování nebo měření veličin, sběr a zaznamenávání dat, obsluhu a řízení jiných zařízení nebo provádět jiné specifické procesy. Často bývá využíváno pro řízení 3D tiskáren, amatérských CNC frézek, web server, pokročilý termostat nebo jako počítač řídicí automatizační prvky.

Arduino má celosvětově velice širokou skupinu uživatelů, kteří sdílejí svoje programy a konstrukce v duchu open source. Arduino obsahuje 14 vstupně-výstupních digitálních pinů



Obr. 33 Mikropočítač Arduino UNO R3 [23]

a 6 analogových vstupních pinů. K těmto pinům může být připojeno veškeré externí zařízení a periferie kompatibilní s deskou Arduino, které umožní vnímat okolní prostředí a zprostředkovávat naprogramované reakce nebo funkce. Jedná se např. o senzory teploty, vlhkosti, tlaku, akcelerometry, senzory vzdálenosti, detektory pohybu, plynů, zvuku, světla, barev, kamery a dále periferie jako lcd displeje, klávesnice, wifi, bluetooth a gsm moduly, řízení krokových motorů, lineárních motorů, regulátory, relé a podobně. Pro toto příslušenství jsou napsány tzv. knihovny, které obsahují instrukce potřebné pro řídicí program, ve kterém voláme pouze funkce již vytvořené v těchto knihovnách. Pro programátora tedy odpadá značné množství práce, také to práci velice zjednodušuje pro začátečníky.

Celá tato platforma je založena na principu open source, takže i vlastní vývojová deska Arduino může být vyráběna kterýmkoli jiným než oficiálním výrobcem, výkresy plošného spoje a kusovník komponentů je volně dostupný na oficiálním webu ([www.arduino.cc](http://www.arduino.cc)). Pokud jde o kus z druhovýroby, je nazýván klon – vlastnosti jsou buďto identické s výchozí originální deskou, nebo je deska výrobcem uzpůsobena přímo pro vykonávání specifické činnosti (řízení 3D tiskárny, datalogging, webserver apod.). Pro tuto diplomovou práci byl zvolen klon Funduino UNO R3.

Hlavní výhody použití platformy Arduino:

1. Nízké pořizovací náklady – vývojový kit Arduino UNO R3 lze pořídit od 300 do 1000 Kč v závislosti na výrobcu nebo specifikaci (viz předchozí odstavec).
2. Jednoduché programování v jazyku Wiring – jazyk vychází z populárního programovacího jazyka C/C++, ovšem je upraven do jednodušší a přehlednější podoby vhodné pro začátečníky v oblasti programování. Arduino lze ovšem programovat i čistě pomocí jazyka C/C++.
3. Téměř neomezené možnosti rozšíření pomocí příslušenství.

Specifikem Arduina je, že dokáže pracovat pouze s napětím 0–5 V a proudem 0–40 mA na jednom pinu, tudíž veškeré připojené příslušenství musí tuto podmínku splňovat, jinak hrozí nevratné poškození. Toto byl tedy hlavní omezující faktor při výběru čidel teploty a tlaku.

#### 3.4.1.2 Arduino IDE – tvorba řídicího programu

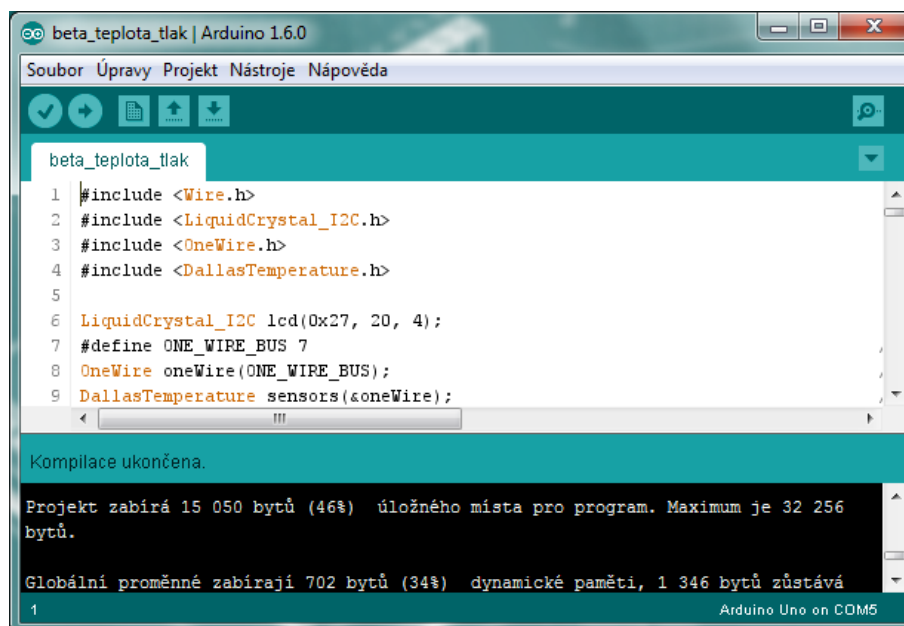
Jak již bylo řečeno v předchozím odstavci, mikropočítač Arduino je pouze hardware - mikroprocesor, operační paměť a trvalá paměť pro uložení řídicího programu, které je nutné oživit a naprogramovat k vykonávání požadované činnosti.

Program, který bude obsluhovat desku Arduino můžeme napsat v programovacím jazyku C nebo C++, ovšem tato varianta vyžaduje již určité pokročilé znalosti programování a můžeme narazit na určitá úskalí s překladem do instrukcí pro mikroprocesor. Vhodnějším řešením je využít software Arduino IDE (Obr. 34), který je volně ke stažení na oficiálním webu Arduino. Je také přímo uzpůsobený pro vývoj programového vybavení k těmto mikropočítačům, tedy práci při programování maximálně zjednodušuje. Desku Arduino potom stačí pouze připojit k počítači pomocí USB kabelu a software Arduino IDE se již postará o přeložení, kompilaci a nahrání řídicího programu do paměti mikropočítače.

Samotné psaní programu probíhá v programovacím jazyku Wiring. Základní kostra programu je vždy stejná, skládá se ze čtyř hlavních částí:

1. Deklarace všech potřebných knihoven, proměnných a konstant. Softwarové přiřazení čísel pinů k jednotlivým vodičům příslušenství (např. po fyzickém připojení LED diody k pinu 5 je nutné Arduino deklarovat, že pinu 5 odpovídá proměnná LED\_dioda, se kterou lze dále pracovat v programu).
2. Nastavení všech činností, které se mají po spuštění programu provést jenom jednou. V této části programu tedy zahájíme veškerou komunikaci Arduina a ostatních periférií. Např. spustíme komunikaci s počítačem po USB sběrnici, spustíme LCD displej, zahájíme komunikaci s čidly apod. Zde také nastavíme, který pin je vstupní a který pin je výstupní (např. analogový senzor – vstup, LED dioda – výstup).
3. Vlastní programová smyčka, instrukce zapsané v této části se budou periodicky v cyklu stále opakovat. V této části vytvoříme veškerou činnost, kterou má Arduino provádět, napíšeme všechny podmínky a práci s proměnnými.
4. Pomocné funkce – v této části můžeme vytvořit pomocné funkce, které v průběhu programu potřebujeme použít častěji. Stáčí je tedy napsat jednou v této části a v samotné programové smyčce je pouze volat.

Celé znění programu je včetně komentářů a popisu činností uvedeno v příloze práce č. 1.



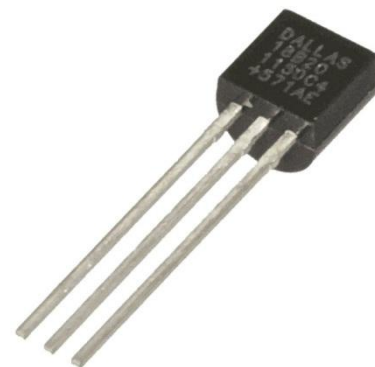
```
beta_teplota_tlak | Arduino 1.6.0
Soubor Úpravy Projekt Nástroje Nápověda
beta_teplota_tlak
1 #include <Wire.h>
2 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
3 #include <OneWire.h>
4 #include <DallasTemperature.h>
5
6 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);
7 #define ONE_WIRE_BUS 7
8 OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
9 DallasTemperature sensors(&oneWire);
Kompilace ukončena.
Projekt zabírá 15 050 bytů (46%) úložného místa pro program. Maximum je 32 256 bytů.
Globální proměnné zabírají 702 bytů (34%) dynamické paměti, 1 346 bytů zůstává
1 Arduino Uno on COM5
```

Obr. 34 Arduino IDE - pracovní okno

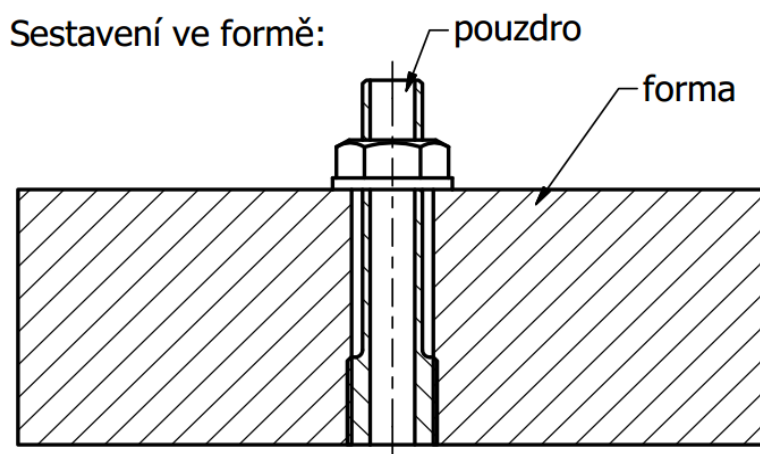
### 3.4.1.3 Teplotní čidlo DS18B20

Digitální teplotní čidlo DS18B20 (Obr. 35) bylo vybráno hned z několika důvodů. Jednak umožňuje měřit teplotu v rozsahu  $-55-125\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pracovní napětí tohoto čidla je  $3-5\text{ V}$  a navíc je pro toto čidlo již vytvořena obsáhlá knihovna pro programovací jazyk Wiring. Jelikož je toto čidlo digitální, není nutné kalibrovat rozsah teplot v závislosti na výstupním napětí jako u analogových čidel, ale jako výstup z čidla dostáváme již konkrétní hodnotu v podobě digitálního signálu. Tento digitální výstup je možné nastavit v rozsahu 9, 10, 11 a 12 bitů, přičemž zvolený rozsah ovlivňuje přesnost, rozlišení a dobu získání hodnoty velikosti teploty. Respektive rozlišení v závislosti na rozsahu jsou  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0,125\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $0,0625\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Doba získání hodnoty se pohybuje od 50ms pro 9 bitů do 750ms pro 12 bitů, dále se doba získání hodnoty prodlužuje s počtem zapojených čidel. Každé teplotní čidlo je jednoznačně identifikováno pomocí 64 bitového klíče, tudíž je možné zapojit všechna potřebná čidla na jeden datový kabel, tzv. „One-wire“, zapojení teplotních čidel je tedy realizováno pomocí tří vodičů: VDD (+5V), GND (uzemnění), a DQ (digitální vstup/výstup). Ke správné funkci teplotních čidel je nutné propojit vodiče VDD a DQ pomocí rezistoru o hodnotě  $4,7\text{ k}\Omega$ . Bez tohoto rezistoru čidlo ukazuje nesmyslné hodnoty.

Teplotní čidlo má tvar pouzdra typu TO92 (široce používané pouzdro pro polovodičové součástky), bylo tedy nutné vymyslet uchycení těchto čidel ve formě tak, aby plocha čidla byla v jedné rovině s danou rovinou dutiny formy, docházelo k jeho kontaktu s keramickou hmotou, bylo pevně fixováno ve formě, ale zároveň byla možná jeho rychlá výměna v případě poruchy. Z těchto důvodů byl zkonstruován speciální přípravek – pouzdro, do kterého je teplotní čidlo umístěno a zalito pryskyřicí. Toto pouzdro je poté našroubováno do formy a zajištěno pomocí kontra matice (Obr. 36, Obr. 37). Na druhé straně kabelu teplotního čidla



Obr. 35 Teplotní čidlo DS18B20



Obr. 36 Uchycení teplotního čidla ve formě



Obr. 37 Pouzdro pro teplotní čidlo v řezu

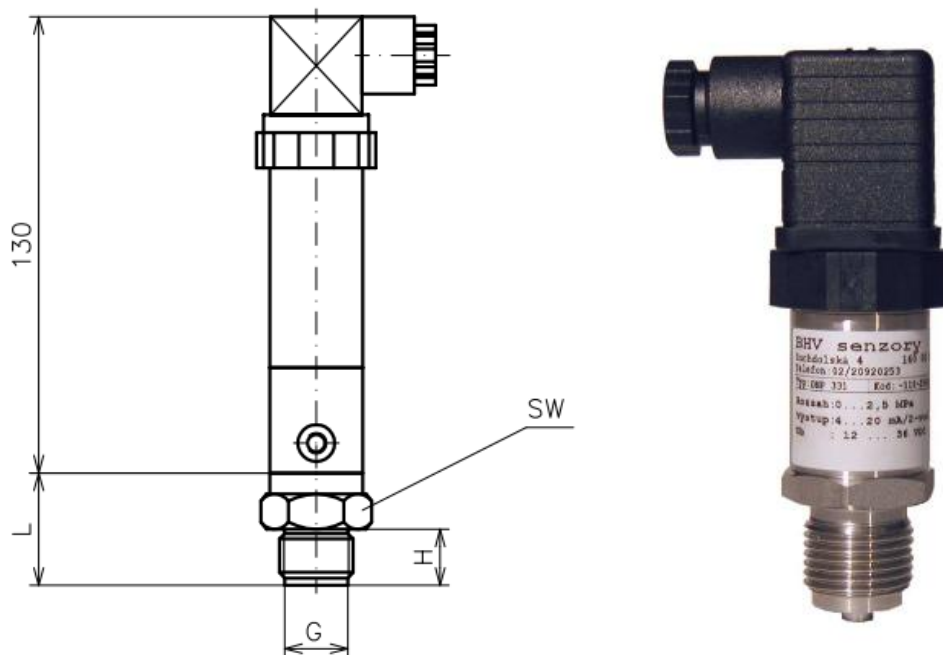


je připájený konektor JACK 3,5, takže je možná rychlá výměna čidel jednoduchým přešroubováním a přepojením kabelu. Ve formě je celkově instalováno 7 teplotních čidel.

#### 3.4.1.4 Tlakové čidlo TSZ-M F12

Jedná se o analogové tlakové čidlo, které bylo vybráno v konfiguraci, která umožňuje měřit tlak v rozsahu 0–100 bar při výstupním napětí analogového signálu se pohybujícím se mezi 0–5 V, tedy hodnota vhodná pro připojení k desce Arduino. Při volbě vhodného tlakového čidla bylo hlavním kritériem ovlivňujícím výběr to specifikum, že keramická hmota má nízkou viskozitu a v průběhu vstřikovacího cyklu musí logicky dojít k jejímu ztuhnutí. Nejde proto použít klasická tlaková čidla pro kapaliny, které se nachází stále v tekutém stavu, byť mohou mít také velice nízkou viskozitu. Řešením je použití speciálního tlakového čidla s membránovým oddělovačem (Obr. 38), které má specificky uzpůsobenou konstrukci, kdy nedochází k zatečení a kontaktu kapaliny s vnitřní dutinou čidla. Procesní část čidla tvoří jemná kovová membrána, nejčastěji nerezová, která odděluje měřenou kapalinu od pracovního oleje uvnitř čidla. Tento olej zprostředkovává přenos tlaku mezi měřenou kapalinou a vnitřním polovodičovým čidlem tlaku. Výstupní signál z tlakového čidla je zesílen v analogovém zesilovači a převeden pomocí A/D převodníku na digitální číselnou hodnotu. Pomocí vestavěného mikropočítače se signál linearizuje, kompenzují se vlivy teploty a ve výstupním D/A převodníku je generován signál ve standardním analogovém tvaru. Tento analogový signál zpracovává deska Arduino, převede na číselnou hodnotu tlaku 0–100 bar a uloží spolu s teplotami a časem.

Tlakové čidlo je připojeno pomocí čtyř vodičů: VDD (+24V), GND (-24V), AQ (analogový výstup), GND (uzemnění analogového výstupu).



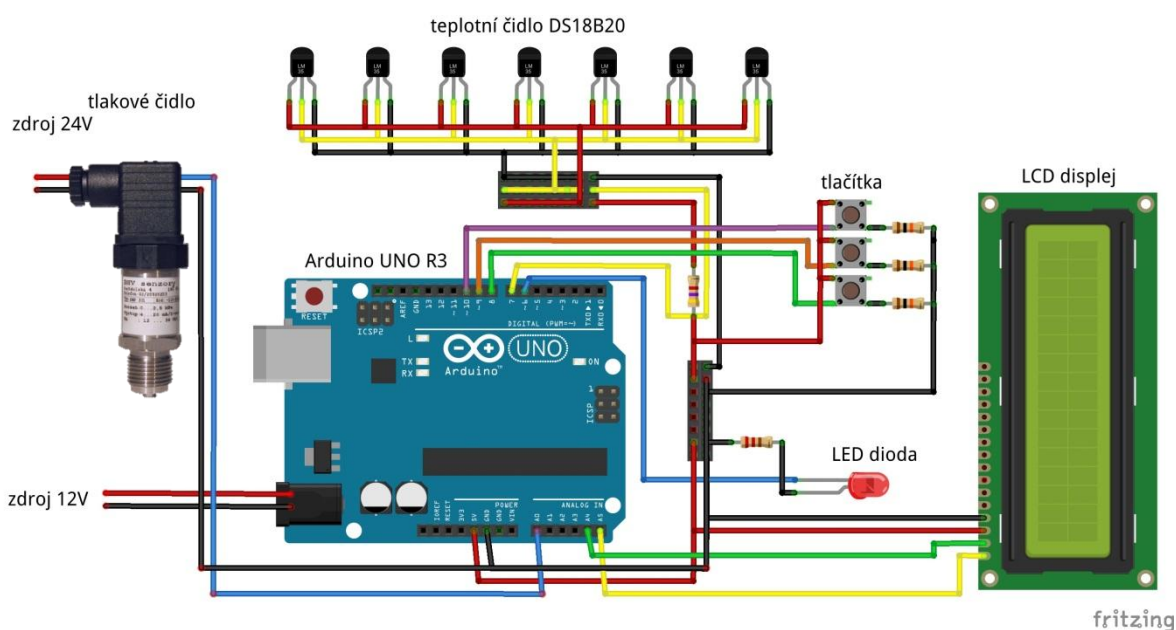
Obr. 38 Tlakové čidlo TSZ-M F12 [22]

### 3.4.2 Konstrukce měřicího přístroje

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, bylo rozhodnuto o vytvoření vlastního měřicího zařízení, schopného změřit v předem zvolených místech dutiny formy hodnoty tlaku a teploty v závislosti na čase. Zároveň schopného provést toto měření v co nejkratších intervalech (délky intervalu řádově v desítkách až stovkách milisekund). V této podkapitole bude popsána vlastní konstrukce měřicího zařízení s použitím výše popsaných komponent.

Z obrázku je patrné schématické zapojení jednotlivých komponent. Mozek celého zařízení, mikropočítač Arduino je napájen z 12V spínaného zdroje, tlakové čidlo vyžaduje vyšší napájecí napětí, je připojeno k 24V spínanému zdroji. Všech sedm teplotních čidel je napojeno na jeden vodič – digitální linku, tlakové čidlo je zapojeno na analogovou linku, všechna čidla jsou k boxu měřicího zařízení připojena konektorem JACK 3,5 mm, což velice usnadňuje manipulaci s boxem, přesun boxu a jednoduchou výměnu čidel v případě poruchy. Dále je na čelní panel boxu měřicího zařízení umístěn lcd informační displej a tři tlačítka sloužící pro jednoduché nastavení a spuštění měření. Pro usnadnění orientace je instalována červená led dioda, která signalizuje probíhající měření, takže i z větší vzdálenosti je patrné, že zařízení měří a není tedy např. vhodné s něčím manipulovat. Z levé strany boxu jsou vyvedeny otvory JACK 3,5 mm pro připojení čidel, z levé strany je vyveden USB kabel pro připojení do počítače. Oba spínané zdroje a tedy i celý měřicí box je od sítě 220 V oddělený centrálním vypínačem. Celé sestavení je patrné z obrázků, elektrotechnické schéma zapojení je na obrázku (Obr. 39).

Samotná konstrukce boxu je provedená z OSB desky o tloušťce 8 mm, jedná se o provizorní řešení vhodné pouze k odzkoušení prototypu a provedení několika experimentálních měření. Pro další praktické použití by bylo dobré vytvořit box z překližkové nebo plastové desky. 3D tisk by byl neekonomický vzhledem k jednoduchosti tvaru. Do budoucna je vhodné také zvážit výrobu PCB desky, na které by byly integrovány veškeré komponenty, včetně mikroprocesoru, lcd displeje, tlačítek, led diody a konektorů JACK 3,5 mm kvůli minimalizaci rozměrů přístroje. Jako napájení použít externí zdroj 12V pro



Obr. 39 Schéma zapojení měřicího přístroje, vytvořeno v programu Fritzing

měřicí box a externí zdroj 24V pro tlakové čidlo. Pro provoz zařízení není totiž nutná celá deska Arduino, ale pouze mikroprocesor Atmel ATmega 328, oscilační krystal 16 MHz a integrovaný obvod napájení. Obrázky měřicího zařízení jsou v příloze práce č. 2.

Není nezbytně nutné připojit všechna teplotní čidla a tlakové čidlo pro každé měření. Měřicí zařízení dokáže měřit už od jednoho zapojeného libovolného čidla. Lze tak měřit jen tlak, jen teplotu nebo kombinace tlaku a teploty pouze na vybraných místech.

### 3.4.2.1 Navigace v menu měřicího zařízení

Po připojení všech potřebných čidel a zapojení USB kabelu do počítače je možné zapnout centrálním vypínačem měřicí zařízení. Není doporučeno připojovat nebo odpojovat čidla, pokud je zařízení pod napětím. Na lcd displeji se objeví jednoduché menu nastavení, kde lze provést tyto operace:

1. Vyvolání aktuálních hodnot teploty a tlaku na displej. Po stisknutí tlačítka „aktuálně“ se na displeji zobrazí pole teplot jednotlivě označených jako TmpA až TmpG a jedna hodnota tlaku označená jako BAR (Obr. 40). Jedná se o hodnoty naměřené v momentě stisknutí tlačítka „aktuálně“, informace o teplotě a tlaku se zobrazí na 3 sekundy, poté dojde opětovnému zobrazení základního menu. Tato funkce je vhodná zejména v případě, když je zapotřebí zjistit aktuální teplotu formy mezi jednotlivými vstřikovacími cykly.

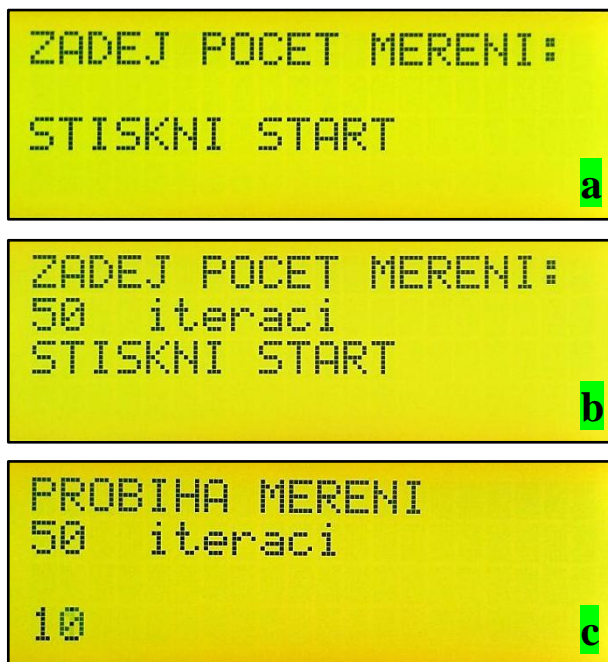


|      |      |      |      |
|------|------|------|------|
| TMPA | TMPB | TMPC | TMPE |
| 22.0 | 22.0 | 21.5 | 22.0 |
| TMPF | TMPG | Bar1 |      |
| 21.5 | 22.0 | xxxx | 0.56 |

Obr. 40 Aktuální teploty a tlak, čidlo G je mimo provoz

2. Provedení měření. Po spuštění displeje a kalibraci čidel (během intra na displeji) se zobrazí instrukce „ZADEJ POCET MERENI:“ a „STISKNI START“ (Obr. 41 – a). Stisknutím tlačítka „volba“ je možné nastavit potřebný počet jednotlivých provedených měření. Jedno stisknutí tlačítka „volba“ navýší počet měření o 10, což znamená, že měřicí zařízení 10x za sebou přečte hodnoty teplot, tlaku a času od začátku spuštění programu a naměřená data odešle do připojeného počítače. 10 měření odpovídá přibližně 1,5 sekundy času. Po stisknutí tlačítka „start“ dojde ke spuštění cyklu a je proveden zvolený počet měření, zároveň je rozsvícená červená led dioda (Obr. 41 – b). V počítači je nutné spustit program RS232 Data Logger. Po provedení zvoleného počtu měření je počítadlo měření vynulováno a připraveno pro další nastavení a opakování procesu, červená led dioda zhasne. V průběhu měření je tlačítko „aktuálně“ neaktivní.

Pro restart měřicího zařízení je nutné nejdříve odpojit USB kabel a poté vypnout a zapnout centrální vypínač. Potom opět připojit USB kabel.



Obr. 41 Obrazovky nastavení a průběhu měření: a) čeká na zadání počtu iterací, b) zadáno 50 iterací, c) probíhá měření, aktuálně desátá iterace

## 3.5 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

### 3.5.1 Vliv nastavení parametrů vstřikovacího procesu na proudění keramické hmoty ve vstřikovací formě

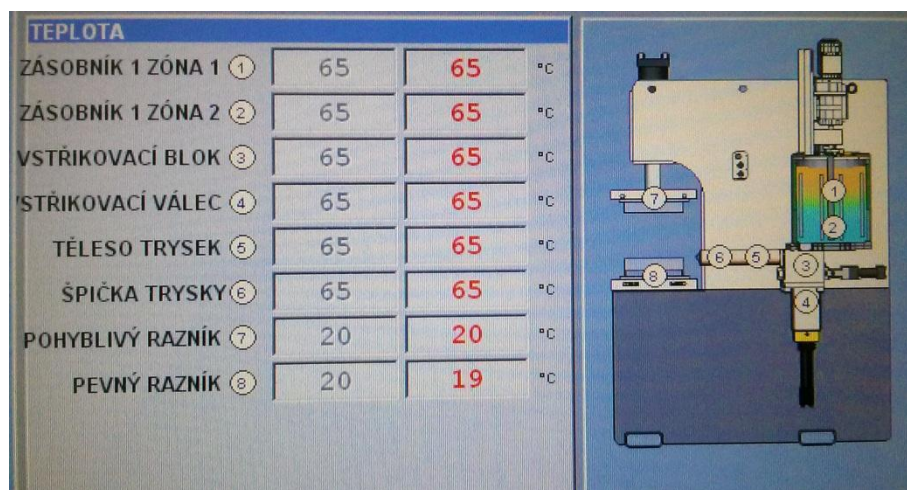
Podoba a vlastnosti proudění keramické hmoty ve vstřikovací formě je ovlivňována mnoha faktory, které jsou jednak přímo ovlivnitelné nastavením vstřikovacího stroje, ale i nepřímo ovlivnitelné okolím nebo obsluhou vstřikovacího stroje. Jednotlivé faktory budou následně popsány a v dalších podkapitolách rozebrán vliv nastavení velikosti průtoku keramické hmoty vstřikovací tryskou, plnicího tlaku a dotlaku a teploty formy na tvar proudění keramické hmoty ve vstřikovací formě.

Vstřikolis **MPI SA56-57-20** umožňuje detailně nastavit všechny důležité parametry ovlivňující proces plnění, aby bylo možné najít optimální nastavení pro každou vstřikovací formu a produkovat keramická jádra v požadované kvalitě.

Prvním z důležitých parametrů je **teplota keramické hmoty** a **teplota formy**, která má přímý vliv na viskozitu keramické hmoty a ovlivňuje tak plnění formy. Na vstřikovacím stroji lze nastavit teplotu na osmi různých místech viz Obr. 42, přičemž při všech experimentálních měřeních byla ponechána teplota v místech č. 1–6 na hodnotě 65 °C. Měnila se pouze teplota razníků a to 20 nebo 25 °C, vždy stejně na obou raznících. Teplota 65 °C, tedy teplota

keramické hmoty a všech součástí stroje, který jsou s hmotou ve styku, je předchozí praxí výroby stanovena jako optimální pro testovanou hmotu MP04.

Teplota formy je závislá na teplotě razníků, teplotě okolního vzduchu a dále na vstřikovacím procesu – teplotě keramické hmoty a době mezi jednotlivými cykly. V průběhu experimentů se doba mezi jednotlivými odstřiky pohybovala v řádu minut, aby vždy došlo k temperování formy na požadovanou teplotu (20 nebo 25 °C) a byly tak zajištěny stejné podmínky pro každý experiment, nastavená teplota byla kontrolována pomocí teplotních čidel instalovaných ve formě (Obr. 44).



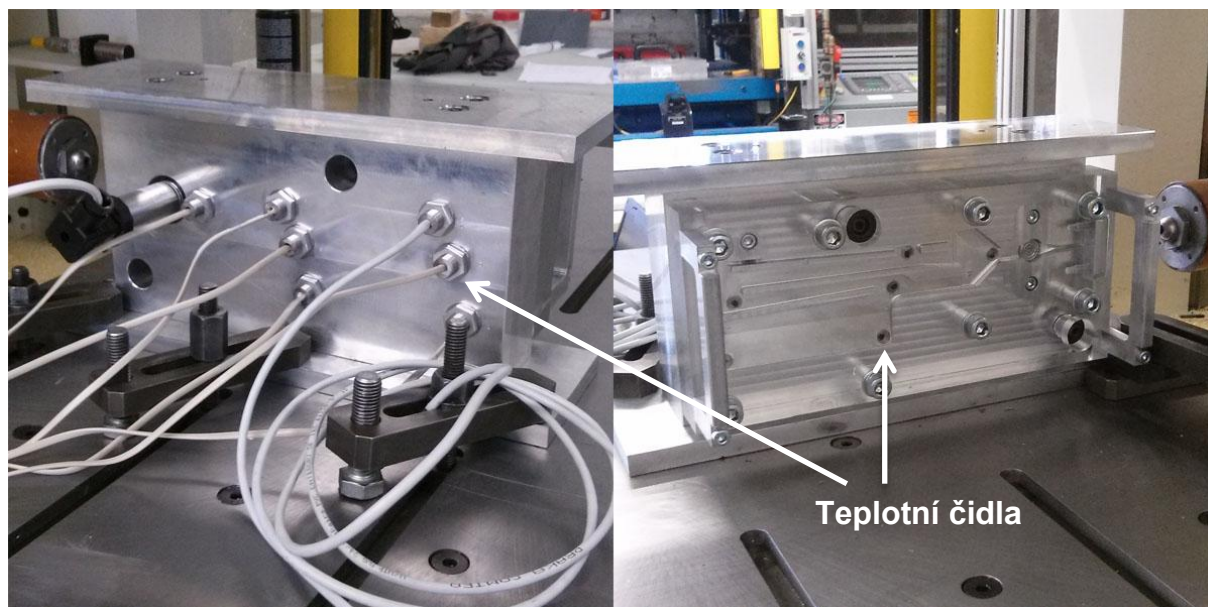
Obr. 42 Nastavení teplot vstřikolisu

**Průtok** hmoty vstřikovací tryskou stroje, je další parametr, který určuje především dobu naplnění dutiny formy, tento lze nastavit v rozmezí 0–300 cm<sup>3</sup>/s. Průtok je možné volit v kroku 1 cm<sup>3</sup>/s. Zároveň je nutné nastavit objem hmoty vstřikované v jednom cyklu. Bližší rozbor vlivu velikosti průtoku na plnění formy je v kap. 4.5.1.2.

Použitý vstřikovací stroj umožňuje nastavit **tlak** a **dotlak** pouze jako jeden parametr, to znamená tlak, kterým bude vstřikovací píst působit od začátku plnění po zvolenou dobu. Tato doba zahrnuje jak fázi plnění, tak fázi dotlaku, tlak nelze nastavit pro každou fázi jednotlivě. V praxi potom proces plnění probíhá tak, že je nastaven požadovaný průtok, tlak a **doba fáze plnění** (zahrnující i fázi dotlaku), vstřikovací stroj začne plnit dutinu formy zvoleným průtokem a zároveň na hmotu vyvíjet tlak, toto probíhá po nastavenou dobu (v řádu sekund). Tedy nastavením délky fáze plnění je suplována fáze dotlaku. Detailní rozbor vlivu tlaku na plnění formy je v kap. 4.5.1.3.

Odstříknuté keramické jádro následně zůstává v uzavřené formě po zvolenou **dobu fáze chlazení**, trvající v řádu desítek sekund, hmota předává teplo formě a jádro získává manipulační pevnost. Správnou délku doby chlazení je u některých jader problematické zvolit správně, jelikož v některých částech jádra může docházet k praskání vlivem pnutí, zatímco masivnější části jádra mohou být ještě kašovitá.





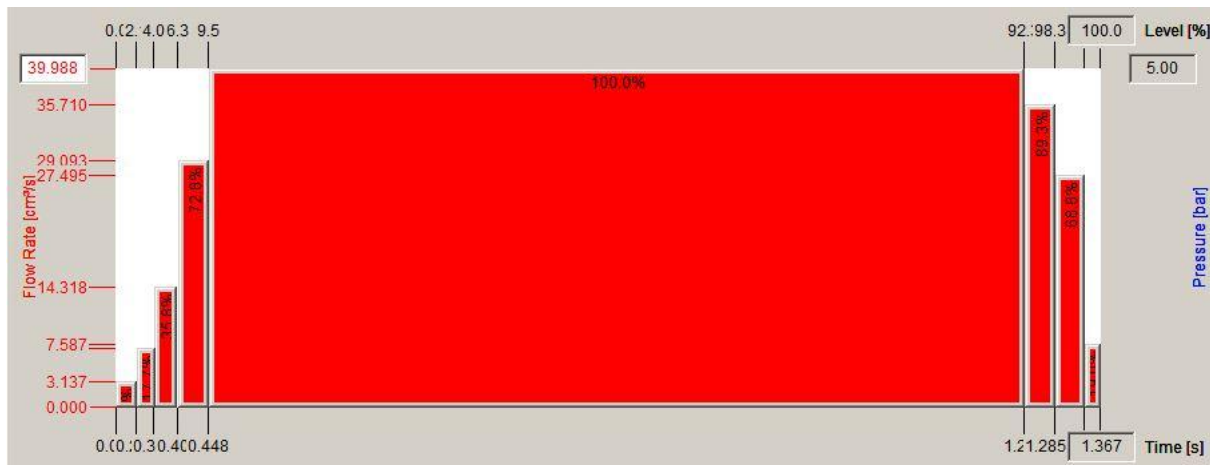
Obr. 44 Vstřikovací forma osazená snímači



Obr. 43 Umístění formy mezi razníky vstřikolisu

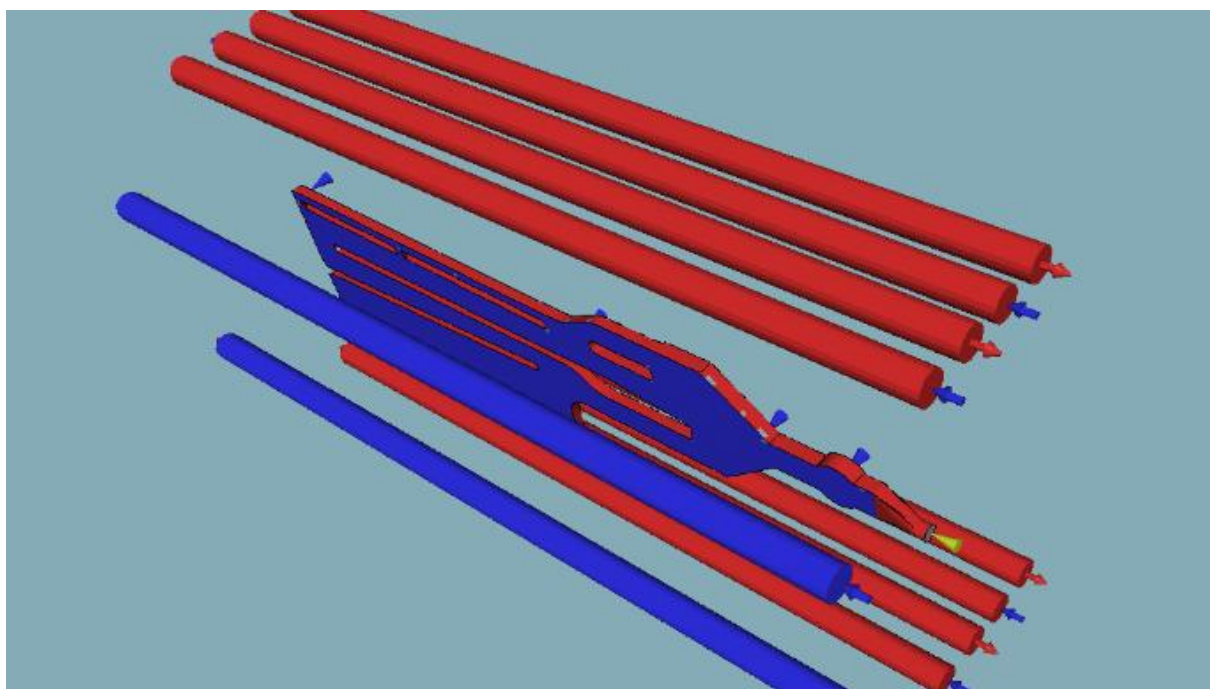
Parametry, které nelze přímo ovlivnit, nebo nastavit vyplývají především z manuální obsluhy vstřikovacího stroje při experimentu. Po každém vyjmutí odstříknutého jádra je dutina formy ofouknuta stlačeným vzduchem a část z plexiskla očištěna hadrem, následně je na obě poloviny formy aplikován separační nástřik silikonového oleje. Poté je forma složena a zajištěna proti otevření pomocí osmi šroubů. I přes snahu provádět tyto kroky vždy stejně, je pravděpodobné, že se bude množství naneseného separačního prostředku pohybovat v určitých mezích. Stejně tak měnit prodyšnost formy v dělicí rovině vlivem rozdílného dotažení šroubů mezi jednotlivými experimenty. Tyto vlivy ale lze považovat za okrajové a minimálně ovlivňující průběh plnění formy. Ověření tohoto tvrzení bylo provedeno vzájemným porovnáním pěti experimentů se stejným nastavením vstřikovacích parametrů, kdy rozdíly v průběhu plnění byly minimální.

Simulační program Cadmould umožňuje v nastavení vstřikovacích parametrů přizpůsobit průběh plnicího průtoku, tlaku a dotlaku v závislosti na čase. Při tvorbě simulací byla tato možnost využita v případě průtoku. Křivka závislosti průtoku na čase, kterou lze zjistit z ovládacího panelu vstřikolisu, se v reálném případě skládá ze tří částí – náběh průtoku, pracovní průtok a doběh. Tento průběh byl tedy nastaven také v simulaci (Obr. 45).



Obr. 45 Nastavení plnicího průtoku -  $40 \text{ cm}^3/\text{s}$

V simulaci bylo také vytvořeno odpovídající chlazení formy pomocí chladicích kanálů a virtuálního rozdělení formy na polovinu ze slitiny Certal a polovinu z polykarbonátu (Obr. 46). Červené chladicí kanály představují razníky vstřikolisu a jsou prostorově ve stejných místech, kde dochází ke kontaktu razník – forma, elementy jádra v kontaktu s kovovou poloformou jsou obarveny červeně. Modré chladicí kanály představují polykarbonátovou část. Protože Cadmould neumožňuje vytvořit polykarbonátovou část bez chladicích kanálů, je jako chladicí médium použita voda o teplotě okolí s průtokem  $1 \text{ l}/\text{min}$ .



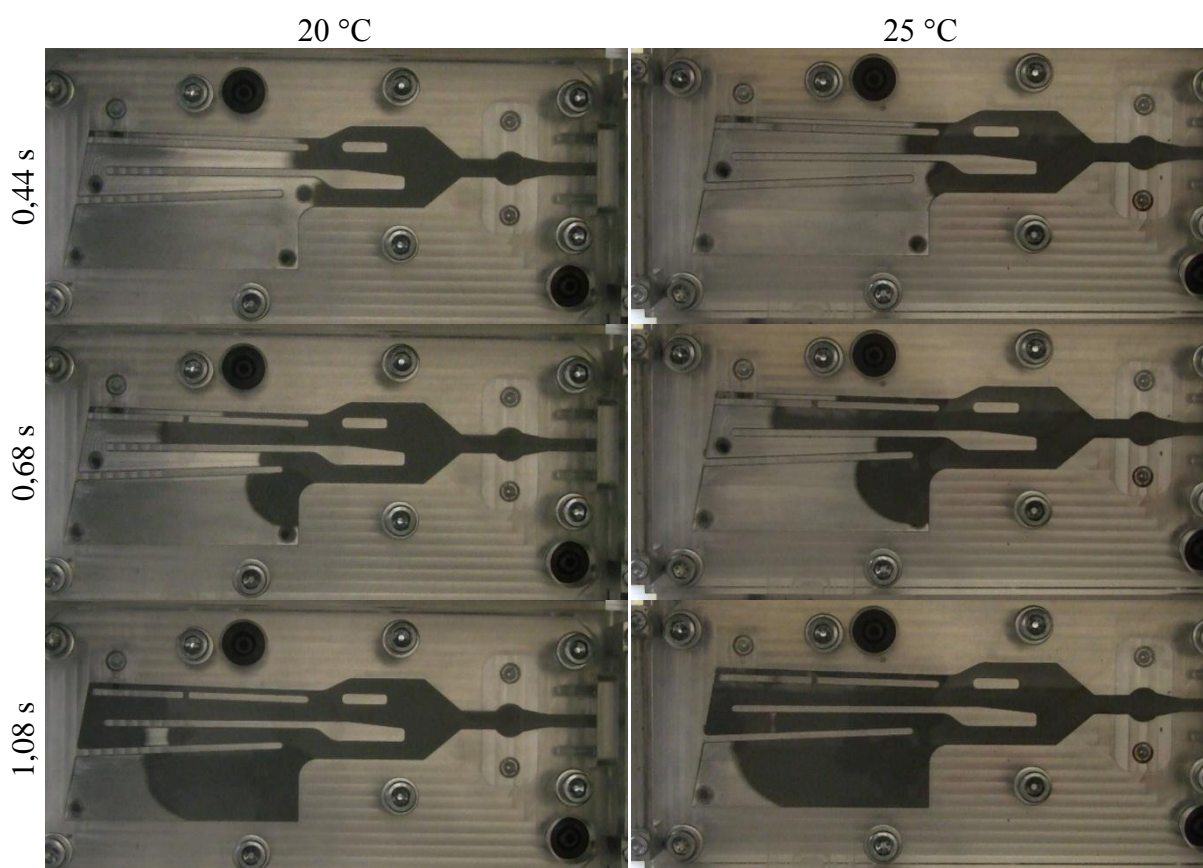
Obr. 46 Chlazení vstřikovací formy v simulaci

### 3.5.1.1 Vliv teploty formy na proudění ve formě

Jak již bylo řečeno, teplota keramické hmoty byla u všech experimentů nastavena na 65 °C, vliv teploty hmoty na průběh plnění formy nebyl zjišťován z důvodu časové náročnosti změny teploty hmoty, nicméně mohl by to být jeden z úkolů pro další experimenty prováděné v budoucnu. Průběh plnění dutiny formy byl zaznamenáván při teplotě razníků, potažmo vstřikovací formy 20 a 25 °C a nastavením vstřikovacích parametrů uvedených v tabulce (Tab. 1) Teplota formy ovlivňuje plnění podle očekávání, při nižší teplotě je plnění pomalejší, velký rozdíl v rychlosti plnění je vidět zejména v klínovitém zúžení jádra. Je nutné zmínit, že při teplotě 25 °C nebylo možné jádro vyjmout z formy bez poškození, docházelo k lámání a přilepování na plexisklo, oproti tomu při teplotě 20 °C jádro na plexiskle nezůstávalo přilepené a z formy ho bylo možné vyjmout bez poškození.

Tab. 1 Nastavení parametrů vstřikovacího procesu

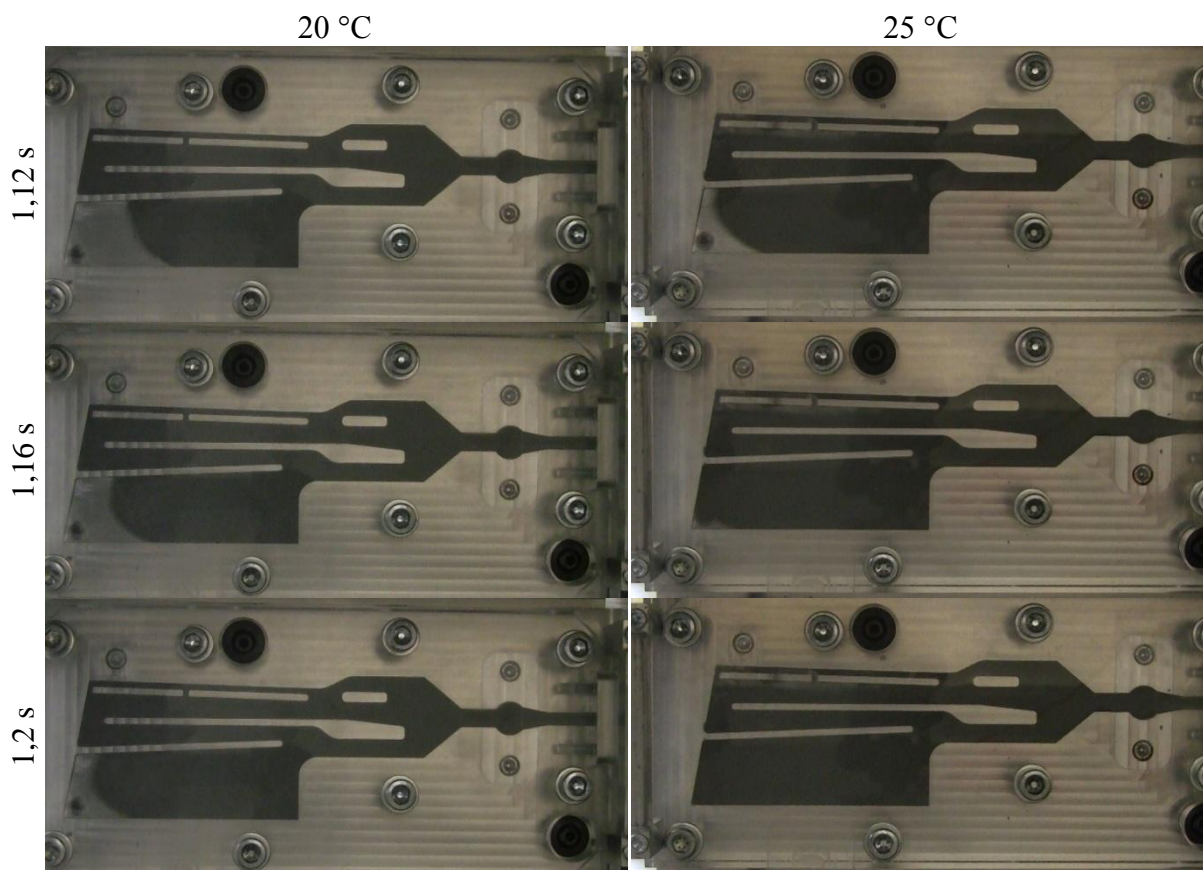
|                                |    |                    |        |
|--------------------------------|----|--------------------|--------|
| Průtok [cm <sup>3</sup> /s]    | 40 | Doba plnění [s]    | 5      |
| Tlak plnění [bar]              | 20 | Doba chlazení [s]  | 25     |
| Tlak dotlaku [bar]             | 20 | Teplota formy [°C] | 20, 25 |
| Objem dávky [cm <sup>3</sup> ] | 50 | Teplota hmoty [°C] | 65     |



Obr. 47 Porovnání plnění formy při teplotě 20 a 25 °C

Z obrázků (Obr. 47) je patrné, že plnění kanálů trvá přibližně stejně dlouhou dobu, rozdíly jsou minimální. Ovšem v plnění klínovité části se značně liší, je zřejmé zpoždění při teplotě 20 °C.





Obr. 48 Porovnání plnění formy při teplotě 20 a 25 °C

Na snímcích druhé poloviny plnění formy (Obr. 48) je zachyceno plnění klínovité části, zde je již patrné velké zpoždění, pokud je forma temperována na 20 °C oproti temperování na 25 °C. Tato klínovitá část má velice malou tloušťku, pozvolný přechod od 4 mm k 0,3 mm, navíc se jedná o velkou plochu, teplota formy má tudíž v této části velký vliv na rychlost ochlazování keramické hmoty a rychlost proudění.

V obou případech keramická hmota dobře vyplnila dutinu formy, ovšem na snímku 27 je viditelné spojení dvou proudů taveniny tzv. „na tupo“, tedy je pravděpodobné, že pokud čelo taveniny nebude mít dostatečnou teplotu, hrozí vznik studeného spoje. Tomuto lze předcházet temperováním formy na teplotu 25 °C. Vyšší teplota formy již snižuje manipulační pevnost jádra při vyjímání. Paradoxně vinnou malých úkosů v této experimentální formě nebylo dost dobře možné při teplotě formy 25 °C vyjmout jádro v neporušeném stavu, docházelo k nalepování části jádra na plexisklo (klínovitá část) a část jádra ulpívala ve formě. Při teplotě formy 20 °C jádro na plexiskle neulpívalo a vlivem většího objemového smrštění bylo jádro možné relativně snadno vyjmout.

### 3.5.1.2 Vliv velikosti průtoku na proudění ve formě

Bylo provedeno osm experimentálních odstříků s proměnnou velikostí průtoku vstřikovací tryskou, ostatní parametry zůstávaly konstantní (Tab. 2). Velikost průtoku byla měněna s krokem 5 cm<sup>3</sup>/s v rozmezí 5–40 cm<sup>3</sup>/s včetně. V tabulce (Tab. 3) jsou uvedeny časy plnění pro každý průtok, v případě nastavení průtoku 5 a 10 cm<sup>3</sup>/s nebyla forma zaplněna na 100 % objemu a došlo k zamrznutí hmoty (Obr. 49). Jádro vytvořené za průtoku 15 cm<sup>3</sup>/s mělo

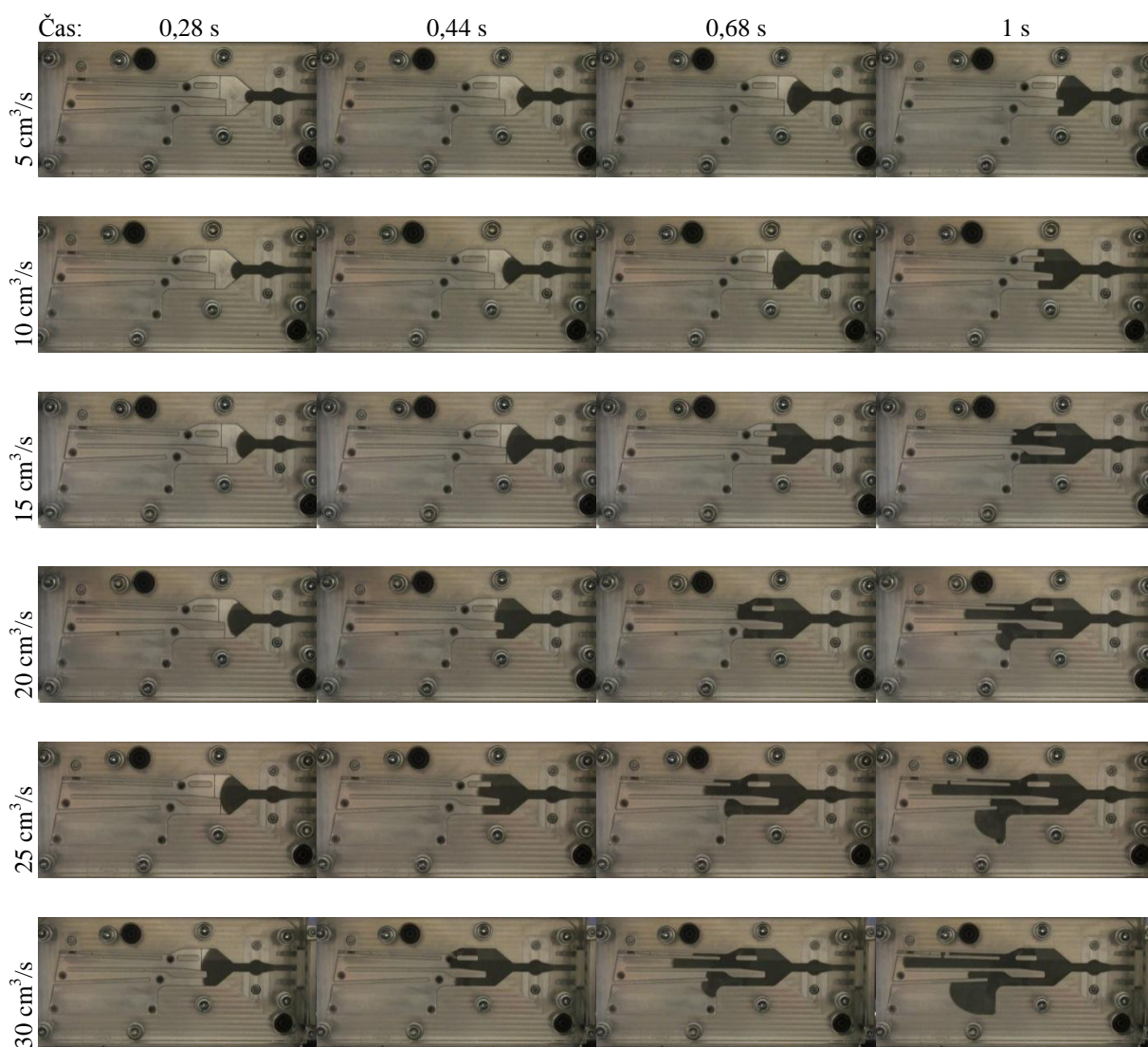
nepřesné kontury a hrany, na povrchu neslo stopy pomalého proudění, průtok 20 cm<sup>3</sup>/s rovněž nesl stopy pomalého proudění (viz kap. 1.2.3.1). V praxi výroby keramických jader je obvykle požadováno rychlé zaplnění formy, kdy dojde jen k malému ochlazení keramické hmoty a tím ke snížení rizika studených spojů nebo vad na povrchu jádra.

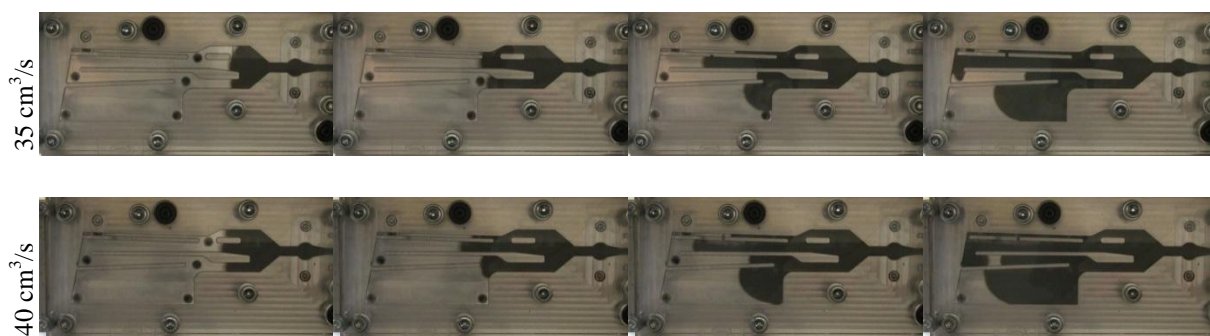
Tab. 2 Nastavení parametrů vstřikovacího procesu

|                                |          |                    |    |
|--------------------------------|----------|--------------------|----|
| Průtok [cm <sup>3</sup> /s]    | proměnný | Doba plnění [s]    | 5  |
| Tlak plnění [bar]              | 20       | Doba chlazení [s]  | 25 |
| Tlak dotlaku [bar]             | 20       | Teplota formy [°C] | 25 |
| Objem dávky [cm <sup>3</sup> ] | 50       | Teplota hmoty [°C] | 65 |

Tab. 3 Porovnání doby plnění formy

|                             |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Průtok [cm <sup>3</sup> /s] | 5    | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   | 35   | 40   |
| Čas do zaplnění [s]         | 3,88 | 3,68 | 3,12 | 2,28 | 1,88 | 1,56 | 1,36 | 1,16 |
| 100% zaplněno?              | ne   | ne   | ano  | ano  | ano  | ano  | ano  | ano  |





Obr. 49 Porovnání plnění formy při konstatním tlaku

Jako vyhovující pro výrobní praxi lze označit nastavení průtoku 30 a 35 cm<sup>3</sup>/s, které již zajišťuje požadovanou kvalitu povrchu jádra, optimálních parametrů je dosahováno při nastavení průtoku 40 cm<sup>3</sup>/s, protože tak lze získat požadovanou kvalitu povrchu jádra i velice krátký čas plnění. Hodnota 40 cm<sup>3</sup>/s byla tedy zvolena jako optimální parametr pro validaci vytvořené simulace.

### 3.5.1.3 Vliv velikosti vstřikovacího tlaku a dotlaku na proudění ve formě

Vstřikovací tlak a následný dotlak vyvinutý na keramickou hmotu v zásadě nemá velký vliv na tvar proudění a rychlost plnění dutiny formy. Ovšem dostatečně vysoký tlak dotlaku dokáže doplnit materiál i do míst, kam se ve fázi plnění nedostal vlivem uzavření vzduchu nebo nízké teploty hmoty. Stejně tak optimálně zvolená velikost dotlaku dokáže vytlačit vzduch uzavřený v jádře a předejít tak následnému propadání povrchu jader nebo jejich praskání při výpalu, rovněž dokáže vylepšit kopírování kontur dutiny formy hmotou a zlepšit drsnost povrchu. Příliš vysoký dotlak naopak protlačí hmotu i do dělicí roviny, vznikají velké otřepy nebo k propojení jemných kanálů a kontur jádra přes dělicí rovinu. Takové jádro vyžaduje delší čas na apretaci, která je pracnější nebo jádro není použitelné vůbec.

Pro porovnání vlivu velikosti plnicího tlaku a dotlaku bylo provedeno sedm experimentálních měření v rozsahu tlaků 5–35 bar s krokem 5 bar, ostatní parametry zůstávaly konstantní pro všechna měření (Tab. 4).

Tab. 4 Nastavení parametrů vstřikovacího procesu

|                                |          |                    |    |
|--------------------------------|----------|--------------------|----|
| Průtok [cm <sup>3</sup> /s]    | 40       | Doba plnění [s]    | 5  |
| Tlak plnění [bar]              | proměnný | Doba chlazení [s]  | 25 |
| Tlak dotlaku [bar]             | 20       | Teplota formy [°C] | 25 |
| Objem dávky [cm <sup>3</sup> ] | 50       | Teplota hmoty [°C] | 65 |





Obr. 50 Porovnání plnění formy při konstantním průtoku

Z obrázku (Obr. 50) je zřejmé, že velikost plnicího tlaku a dotlaku má minimální vliv na tvar plnění formy, u všech měřených experimentů postupuje fronta keramické hmoty v závislosti na čase prakticky stejně. Větší rozdíly jsou patrné pouze v závěru plnění, kdy již na chladnou hmotu začíná působit nastavená velikost tlaku a urychlí plnění dutiny formy. V průběhu plnění působí na hmotu relativně nízký tlak, o velikosti cca 2–3 bar, nastavená velikost tlaku se začíná projevovat až při zvýšení viskozity hmoty vlivem jejího ochlazení nebo zaplnění formy. Při nastavení dotlaku 30 a 35 bar již docházelo k protlačení hmoty skrz dělicí rovinu a propojení všech kanálů v jednolitý kus, při 25 bar se v dělicí rovině vyskytovaly otřepy. Optimálních výsledků, co se týče zaplnění dutiny formy, velikosti otřepů v dělicí rovině a drsnosti povrchu bylo dosaženo při nastavení plnicího tlaku a dotlaku na

hodnotu 20 bar. Hodnota 20 bar tedy byla zvolena jako optimální pro validaci numerické simulace.

### 3.5.2 Posouzení realita vs. simulace

Pro posouzení shody reálně zaznamenaného procesu plnění a vytvořené simulace byly vybrány dvě konfigurace nastavení parametrů pro vstřikování keramické hmoty (kap. 3.5.2.1, 3.5.2.2). První konfigurace odpovídá optimálnímu nastavení, se kterým by se toto jádro běžně vyrábělo, tedy parametry zaručující vhodný průběh plnění a povrch jádra bez studených spojů, drsného povrchu a podobně. Druhá konfigurace odpovídá celkově nevhodnému nastavení s nízkým průtokem a dotlakem v závěru plnění, dutina formy v tomto případě není zcela naplněna, proudění ve formě je velice pomalé. Tato konfigurace byla vybrána z toho důvodu, aby bylo možné ověřit, zda simulační program Cadmould dokáže predikovat i takto nevhodný průběh plnění a jestli dojde k zamrznutí ve stejných místech, jako v reálné formě. Pro tato dvě nastavení byl pořízen záznam reálného plnění formy a zaznamenán průběh teplot a tlaku na povrchu jádra v průběhu plnění formy. Dále byla vytvořena numerická simulace v programu Cadmould pro obě nastavení, respektující rozdílný druh materiálů jednotlivých polovin formy a skutečnost, že chlazená je pouze kovová polovina formy prostřednictvím kontaktu s razníky vstřikolisu. V simulaci je použit stejný 3D model keramického jádra ve formátu .step, který byl použit pro výrobu reálné dutiny formy na obráběcím stroji. Reálný záznam i animace simulace byly rozstříhány na jednotlivé snímky videa a vzájemně porovnán průběh plnění. Stejně tak hodnoty naměřených teplot a tlaků byly porovnány s hodnotami získanými ze senzorů umístěných v simulaci. V tabulkách jsou uvedeny parametry obou konfigurací (Tab. 5, Tab. 6). Postup záznamu vstřikovacího procesu a měření hodnot tlaku a teplot probíhal následujícím způsobem:

1. Forma fixována na razníky lisu a připravena k plnění, temperovaná na teplotu razníků. Snímače tlaku a teploty připojeny k měřicímu zařízení, to připojeno k notebooku a spuštěn program RS232 Data logger pro záznam hodnot. Měřicí zařízení nastaveno na záznam hodnot po dobu 120 s.
2. Digitální kamera Canon LEGHIRA HF200 připravena na stativu, nastaven záznam ve formátu 1080i, 50 snímků/sekunda.
3. V ovládacím panelu vstřikolisu nastaveny potřebné parametry vstřikovacího procesu.
4. Spuštění měření teplot a tlaku, spuštění záznamu na digitální kameře a spuštění plnění formy.
5. Po skončení plnění formy zastaven záznam videa, vyčkání na konec záznamu teplot a tlaku (120 s), uložení naměřených hodnot.
6. Odšroubování poloformy z plexiskla, vyjmutí vytvořeného jádra (ne vždy bylo toto možné bez porušení celistvosti jádra), vyčištění formy a aplikace separačního prostředku na obě poloviny formy. Opětovné sešroubování formy.

Tab. 5 Optimální nastavení parametrů vstřikovacího procesu

|                                |    |                    |    |
|--------------------------------|----|--------------------|----|
| Průtok [cm <sup>3</sup> /s]    | 40 | Doba plnění [s]    | 5  |
| Tlak plnění [bar]              | 20 | Doba chlazení [s]  | 25 |
| Tlak dotlaku [bar]             | 20 | Teplota formy [°C] | 20 |
| Objem dávky [cm <sup>3</sup> ] | 50 | Teplota hmoty [°C] | 65 |

Tab. 6 Nevhodné nastavení parametrů vstřikovacího procesu

|                                |    |                    |    |
|--------------------------------|----|--------------------|----|
| Průtok [cm <sup>3</sup> /s]    | 10 | Doba plnění [s]    | 5  |
| Tlak plnění [bar]              | 5  | Doba chlazení [s]  | 25 |
| Tlak dotlaku [bar]             | 5  | Teplota formy [°C] | 20 |
| Objem dávky [cm <sup>3</sup> ] | 50 | Teplota hmoty [°C] | 65 |

### 3.5.3 Optimální nastavení parametrů vstřikovacího procesu

V následující kapitole bude porovnána animace z vytvořené simulace s reálným procesem. Parametry nastavení procesu shodné pro simulaci i realitu jsou v tabulce (Tab. 5). Reálné plnění dutiny formy trvalo **1,66 sekundy**, plnění v simulaci **0,93 sekundy**. Dále budou srovnány hodnoty teplot a tlaku naměřené na čidlech ve formě a v simulaci.

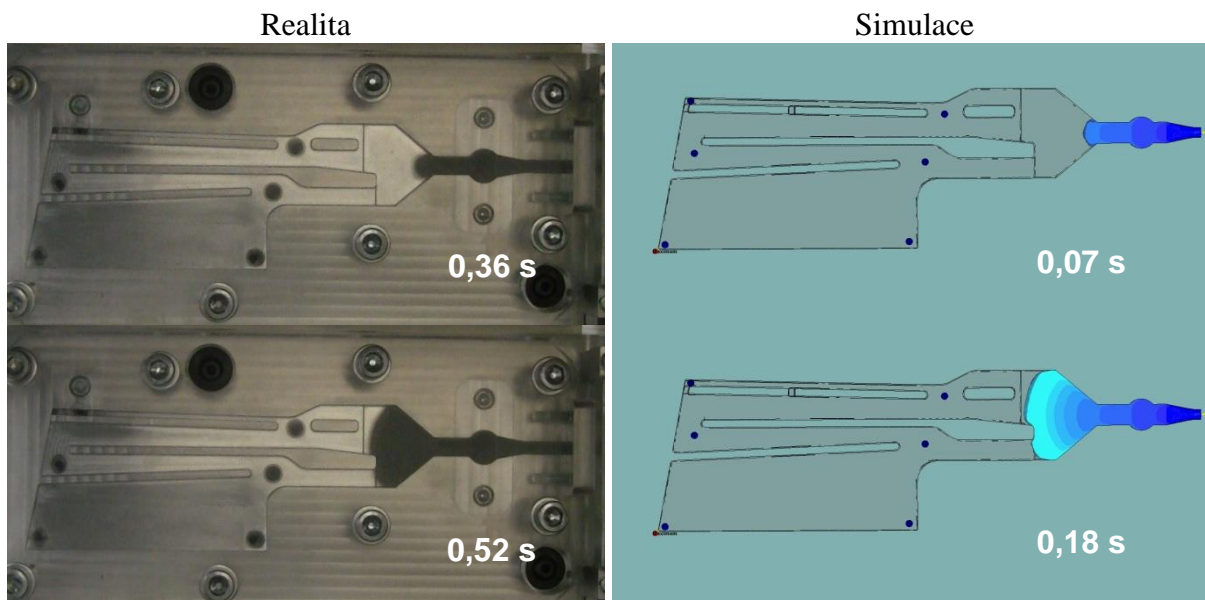
Nulový bod časové osy byl zvolen ze záznamu reálného plnění, konkrétně se jedná o snímek videa, kdy se v dutině formy poprvé objeví keramická hmota. Dále bylo z videa vybráno 10 snímků, které dobře reprezentují průběh plnění, těmto snímkům byl přiřazen čas od počátku plnění. Každý z vybraných snímků zobrazuje určité specifikum v průběhu proudění, jehož popis je uveden vždy v textu vztahujícím se ke konkrétnímu snímku. Průběh reálného procesu je zobrazen vždy v levém sloupci obrázků srovnání reality versus simulace (Obr. 51, Obr. 52, Obr. 53, Obr. 54).

Animaci simulace bylo nutné přizpůsobit videu reálného procesu, jelikož Cadmould animace neukládá v reálném čase, ale vždy požaduje určit počet snímků, do kterých bude simulace uložena. Zvolen byl tedy počet 200 snímků, ve kterých je zachycena 0,93 sekund trvající animace plnění, 0,00464 sekundy na jeden snímek. Poté byl ke každému snímku reálného procesu vyhledán snímek z animace, tak aby odpovídal zachycenému specifiku v proudění. Ve finále byla získána řada snímků reality a simulace, každá s vlastní časovou osou.

Bylo vyzkoušeno proces analyzovat i na společné časové ose, to znamená spustit oba záznamy paralelně a následně vybírat snímky se stejným časovým odstupem od počátku plnění. Ovšem vzhledem k velmi rozdílnému času plnění se tento způsob srovnání ukázal jako nevhodný

### 3.5.3.1 Srovnání procesu plnění dutiny formy:

Při popisu je vždy konkrétní řádek srovnání volán časem snímků reality, ve snímcích simulace je zobrazena interpretace výsledků z programu Cadmould nazvaná Flow front: level when filled (%).

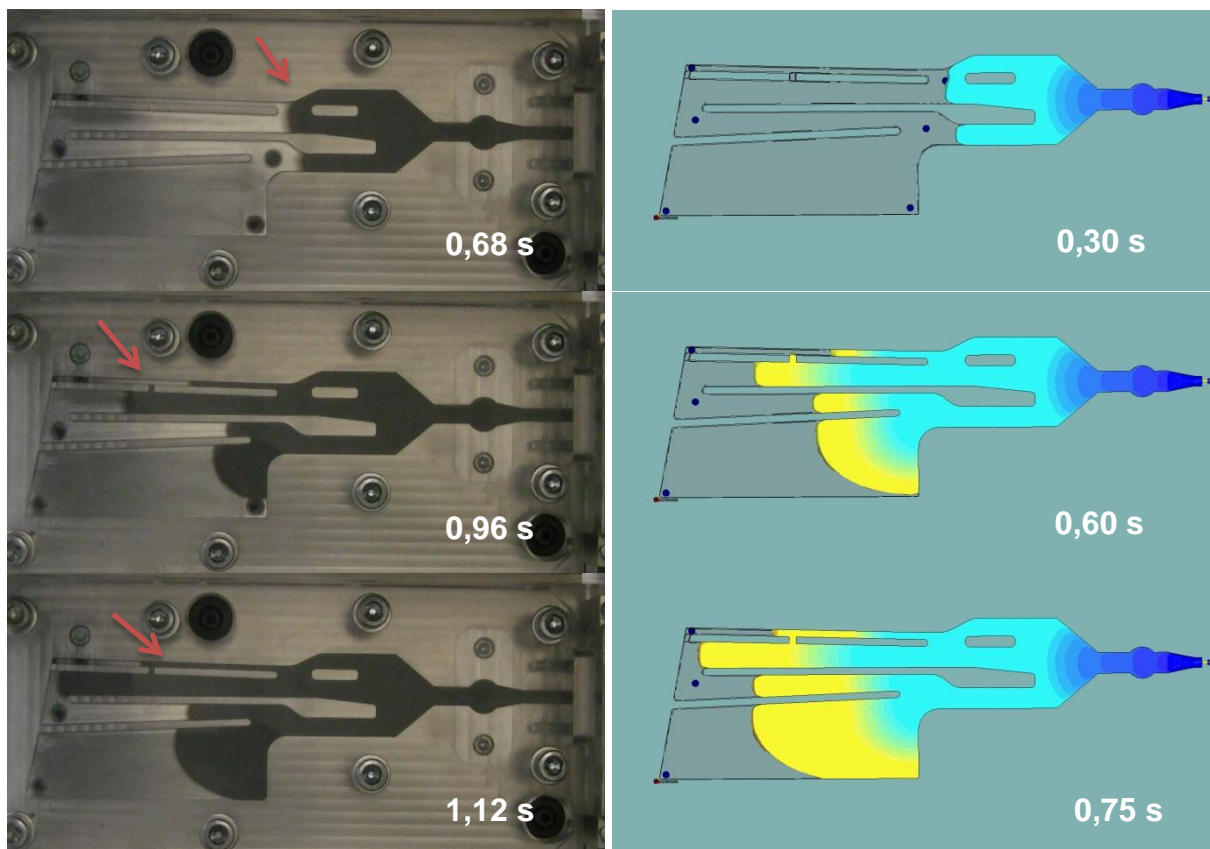


Obr. 51 Porovnání realita versus simulace - optimální nastavení - 0,36–0,52 s

V prvotní fázi plnění je dobře vidět pomalejší průběh plnění v realitě - naplnění vtokového kanálu je v realitě o 0,29 sekundy pomalejší oproti simulaci. Tento časový rozdíl je pravděpodobně způsobený prodlevami a pomalejším náběhem průtoku na vstříkolisu. V čase **0,52 sekundy** je hmota zachycena v okamžiku počátku dělení na dva proudy, spodní větev má menší průtočný průřez, tudíž by rychlost plnění měla být rychlejší, na druhou stranu střední kanál (v horní větvi) je umístěn přímo proti zaústění vtoku do dutiny formy. V konečném výsledku je tedy rychlost plnění největší v tomto středním kanálu, což potvrzují další snímky níže. Srovnáním časů naplnění objemu mezi zaústěním vtoku a rozdělením proudu hmoty, bylo zjištěno:

1. realita:  $0,52 - 0,36 = 0,16$  sekundy,
2. simulace:  $0,18 - 0,07 = 0,11$  sekundy,

tedy v celkovém měřítku je doba plnění v simulaci mnohem kratší, než v realitě, ale současně je dobře patrné zpomalování rychlosti plnění v simulaci. Zatímco doba naplnění vtokového kanálu byla v simulaci 5,14x kratší, naplnění další fáze je jenom 1,45x kratší.



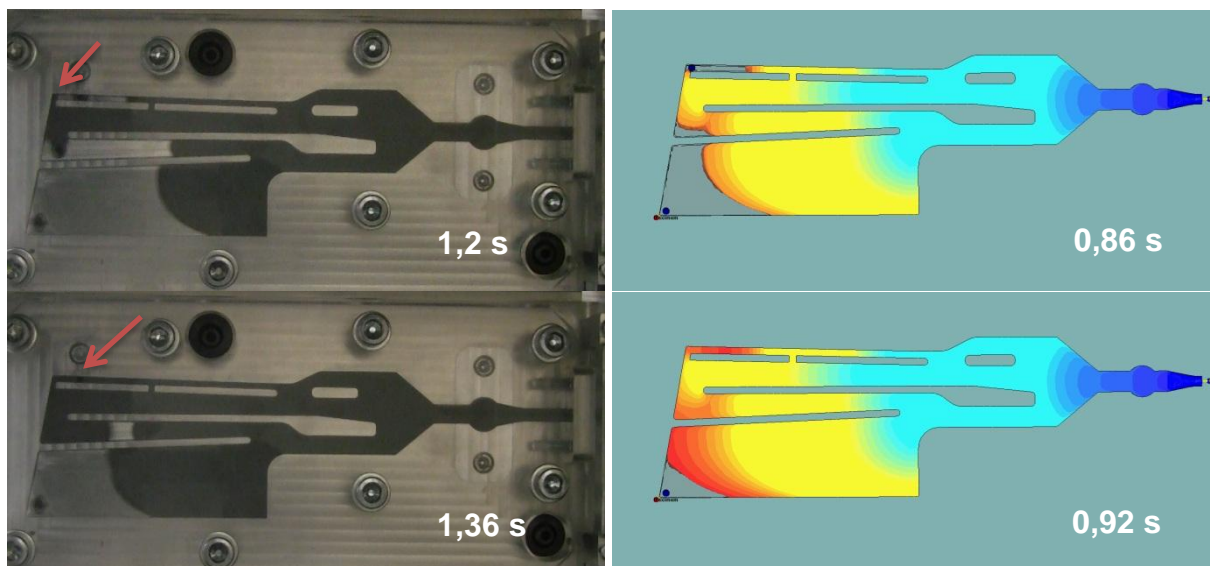
Obr. 52 Porovnání realita versus simulace - optimální nastavení - 0,68–1,12 s

V časovém okamžiku **0,68 sekund** reality je zachyceno spojení dvou proudů keramické hmoty, spojení probíhá v realitě i simulaci rovnoměrně, jedno rameno proudu nepředbíhá druhé. Stejně tak keramická hmota ve spodní větvi proudí ve stejné úrovni společně s ramenem horním. Doba naplnění této fáze je 0,16 sekund v realitě a 0,12 sekund v simulaci, rychlosti plnění se tedy srovnávají.

Snímek z času **0,92 sekund** zachycuje moment, kdy dochází k zaplnění prvního spojovacího kanálku, který ani v jednom z případů nezamrzá. Je vidět značný rozdíl ve spodní větvi, klínovitá část je v simulaci zaplněna do cca jedné třetiny plochy, v kanálu spodní větve je hmota také mnohem dále, než v realitě. Horní větev vykazuje minimální rozdíly. Plnění této fáze již v simulaci trvá nepatrně delší dobu než v realitě, tj. 0,28 oproti 0,30 sekundy.

V okamžiku **1,12 sekund** dochází k propojení proud keramické hmoty ve slabém kanálu horní větve s hmotou ze spojovacího kanálku, celá situace v horní větvi se shoduje se simulací. V dolní větvi pokračuje trend z předcházejícího snímku, klínovitá část v simulaci je zaplněna za zhruba polovinou plochy, klínovitá část v realitě odpovídá snímku simulace v čase 0,60 s. Doba plnění této fáze je vyrovnaná.

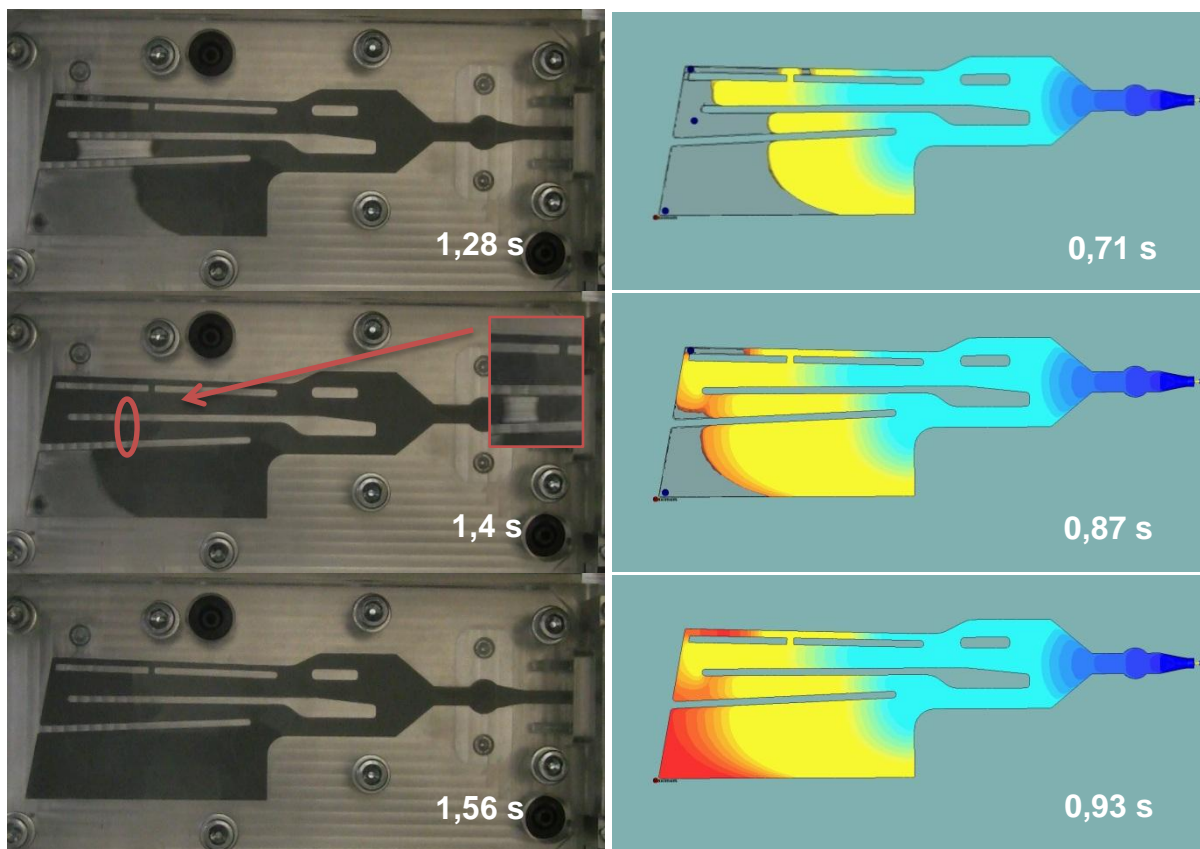




Obr. 53 Porovnání realita versus simulace - optimální nastavení – 1,2–1,36 s

Na snímku **1,2 sekundy** je vidět zaplnění druhého spojovacího kanálku, od posledního snímku z času 1,12 se liší zejména posunem fronty keramické hmoty v klínovité části přibližně před jednu polovinu plochy. Tvar horní větve se mění jen minimálně. Situace v simulaci je zcela odlišná, došlo ke spojení proudů horní a spodní větve, tento průběh spojení by neměl způsobit studený spoj. V klínovité části v simulaci je keramická hmota mnohem dále, zaplňuje asi tři čtvrtiny plochy.

V čase **1,36 sekund** dochází ke spojení proudu keramické hmoty ve slabém kanálu horní větve s hmotou z druhého spojovacího kanálku, v simulaci dochází ke stejnému spojení. V kanálu spodní větve (realita) je možné pozorovat střetávání dvou proudů keramické hmoty, které signalizují riziko vzniku studeného spoje, v simulaci došlo již k tomuto propojení v čase 0,89 sekundy. Reálně vyrobené jádro bylo v tomto místě neporušené, kompaktní, ovšem na povrchu byl zřetelný tvar studeného spoje, navíc tato oblast byla na pohled lesklá s povrchově mnohem nižší drsností povrchu než zbytek jádra. Vliv v tomto případě mohl mít i separační nástřík na formu – silikonový olej, částečně shrnutý proudem keramické hmoty do místa studeného spoje, kde byl vytlačen na povrch hmoty a vytvořil tuto hladkou plochu. V simulaci jsou místa možných studených spojů vyznačena bílou čarou, ve zmiňovaném styku dvou proudů hmoty je vyznačen pouze částečný studený spoj (Obr. 55).



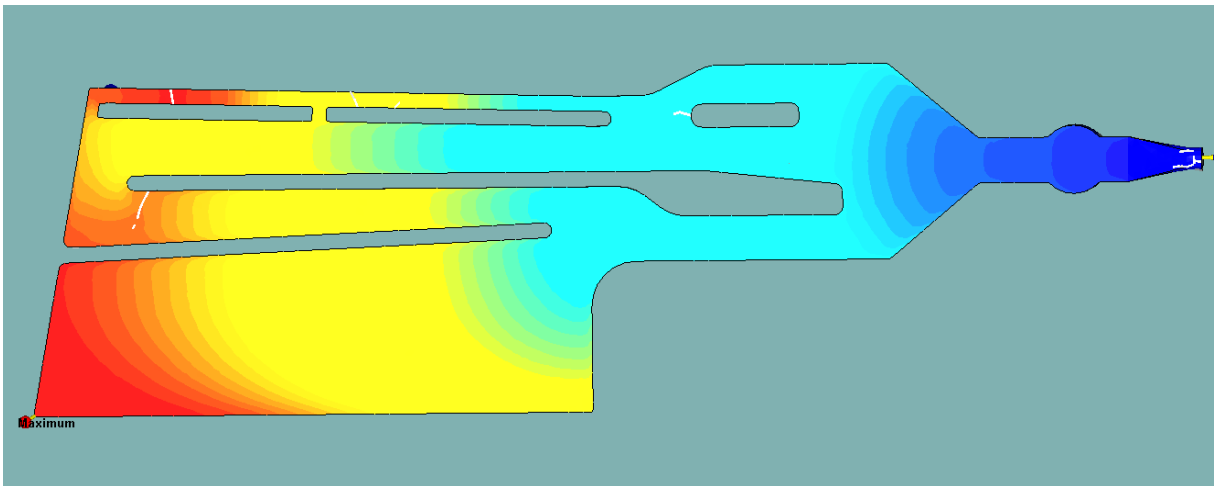
Obr. 54 Porovnání realita versus simulace - optimální nastavení - 1,28–1,56 s

Poslední série snímků se vrací před propojení kanálů horní a spodní větve, a zobrazuje zaplnění klínovité části do poloviny plochy, konkrétně do času **1,28 sekund**. K tomuto snímku byl vyhledán snímek simulace, který také zachycuje okamžik naplnění jedné poloviny plochy klínovité části. Při bližším pohledu je patrné, že tvar proudění v horní větvi neodpovídá realitě. Je to dáno zpožděním plnění klínovité části oproti zbytku kanálů v reálné situaci, takže ve chvíli, kdy hmota dosáhne v této části úrovně jedné poloviny, je již zbytek dutiny formy téměř zaplněn.

V čase **1,4 sekundy** dochází ke spojení proudů horní a spodní větve, blíže rozebrané v popisu snímku 1,36 sekundy. K tomuto snímku reality nebylo dost dobře možné vyhledat odpovídající snímek simulace, jelikož poloha a typ spojení horní a spodní větve je v simulaci odlišná.

Závěrečný snímek času **1,56 sekund** představuje konec plnění dutiny formy. Lze říci, že objem dosud nezaplňené dutiny formy je ve snímku 1,4 sekundy reality a 0,87 sekundy simulace přibližně stejný. Potom doba zaplnění tohoto prázdného objemu je 0,16 sekund pro realitu a 0,06 sekund pro simulaci. V závěru tedy rychlost plnění v simulaci opět prudce vzrostla.

Lze říci, že simulace plnění je podobná reálnému plnění formy, vzhledem k velmi odlišné poloze a tvaru studeného spoje ji ovšem nelze označit za věrohodnou predikci reálného plnění.



Obr. 55 Predikce studených spojů - optimální nastavení parametrů vstřikování – studené spoje vyznačeny bíle

### 3.5.3.2 Měření průběhu teplot a tlaku

Současně s video záznamem plnění byl zaznamenáván i průběh teplot a tlaku ve formě, typ a umístění snímačů ve formě byl rozebrán v kapitole *Popis komponentů měřicího přístroje* (kap. 3.4.1). V průběhu zaznamenávání teplot je každé změřené teplotě přiřazen čas od začátku měření, ve výsledku je tedy ukládáno pole hodnot ve tvaru: *čas od začátku měření; teplota 1 – teplota 7; tlak*, v časovém úseku 0–120 sekund. Virtuální senzory v simulaci plnění byly umístěny na stejné pozice jako při reálném procesu. Jejich výhodou je, že jsou univerzální a dokážou snímat několik veličin z jednoho bodu (teplotu, tlak, viskozitu apod.). Pro účely validace byl použit pouze záznam teplot na všech pozicích teplotních snímačů a tlaku v místě reálného tlakového snímače.

Záznam měření v simulaci se spouští přesně v okamžik, kdy začíná plnění formy, hodnoty tak lze vynést přímo do grafu bez nutnosti úprav nulového bodu času. Oproti tomu záznam reálných hodnot začíná ještě před samotným začátkem plnění (viz výše - Postup záznamu vstřikovacího procesu), je tedy nutné v záznamu hodnot najít tento okamžik začátku.

Vyhledání začátku bylo provedeno pomocí video záznamu reálného plnění formy a záznamu měření teplot ve formě. V záznamu teplot byla první změna teploty na snímači č. 7 zaznamenána čase 5,28 s. Z video záznamu plnění lze určit dobu od chvíle, kdy se keramická hmota objeví ve formě, až do prvního kontaktu se snímačem č. 7. Tento časový úsek je dlouhý přesně 0,36 sekundy. To znamená, že plnění formy v záznamu teplot začíná v čase 5,28 – 0,36 s. V záznamu teplot a tlaku byl vyhledán čas 4,92 s a stanoven jako čas 0 s (počátek plnění). K tomuto nulovému bodu byly přepočteny časové údaje ostatních změřených teplot a tlaku, všechny grafy tak začínají v momentě začátku plnění.

V průběhu měření se objevil problém, snímač č. 3 přestal pracovat, pravděpodobně došlo k mechanickému poškození kontaktů během montáže do formy. Měření tedy pokračovalo dále bez měření teplot v bodě 3, protože nebyl odstupný náhradní snímač.

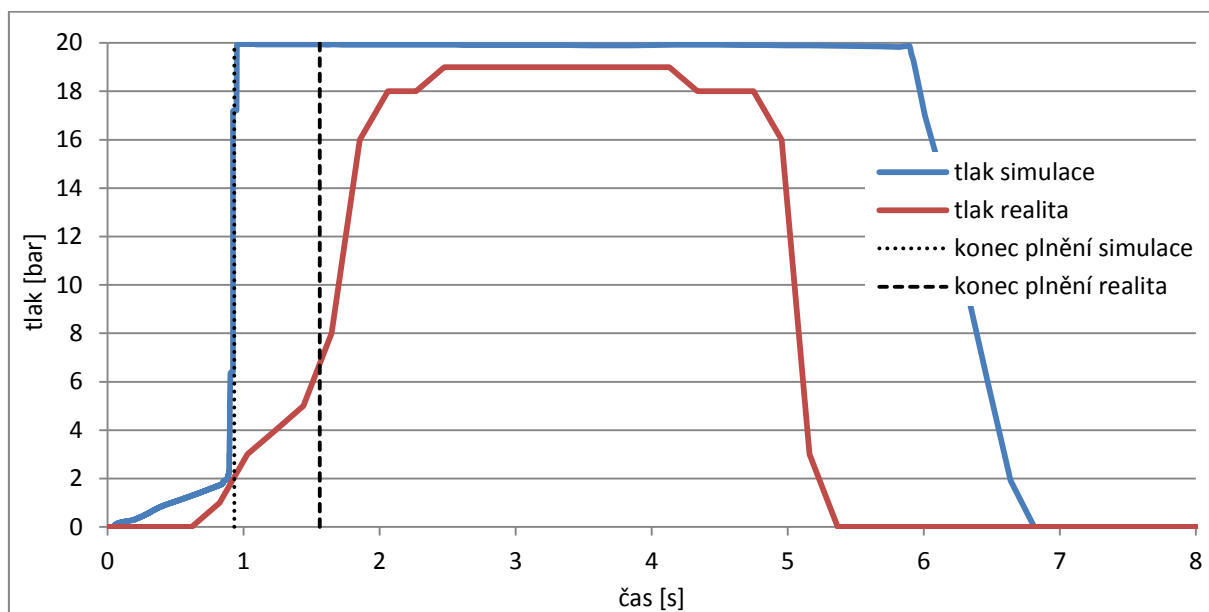
Teplotní senzory umístěné ve formě jsou schopny zaznamenávat teplotu pouze na povrchu keramického jádra, proto nelze použít přímě srovnání s virtuálními senzory v simulaci, které měří teplotu ve střední tloušťce jádra. Je nutné z programu Cadmould získat hodnoty

povrchových teplot ve vybraných bodech (body odpovídají umístění reálných teplotních senzorů). Pro budoucí měření by bylo vhodné reálná teplotní čidla nahradit za termočlánky typu K, to s sebou nese potřebu vhodně upravit konstrukci a program měřicího zařízení. Z časových důvodů již uvedená výměna teplotních čidel za termočlánky nebyla provedena.

Současně byla zjištěna velká setrvačnost teplotních čidel. Výrobce teplotních čidel udává rychlost měření teploty 50 ms, zkonstruované měřicí zařízení je nastavené na měření teploty v intervalu 220 ms, takže teoretické předpoklady pro vysokou frekvenci měření teploty jsou v pořádku. Jak se ukázalo, problémem je způsob umístění teplotního čidla v montážním pouzdře (Obr. 36) a také plastový obal samotného teplotního čidla. Než dojde k prohřátí plastového obalu teplotního čidla od keramické hmoty, je již tato ochlazována formou. Výsledkem jsou zkreslené hodnoty teplot, přesněji jejich opožděná reakce, lépe je tato jejich vlastnost patrná z grafů teplot v průběhu plnění (Obr. 57, Obr. 58, Obr. 67). I přes to si ovšem uchovávají schopnost zachytit chladnutí hmoty se vzdáleností od vtoku v průběhu plnění.

Pro lepší přehlednost jsou tlak a teploty rozděleny do grafů vždy po skupinách – oblast vtoku (tlak), střední oblast jádra (teplota č. 4, 5, 6, 7) a konec jádra (teplota č. 1, 2), teplota č. 3 je zobrazena pouze v grafech teplot ze simulace. Doba měření hodnot teplot a tlaku v simulaci je závislá na zvolé délce fáze chlazení jádra, v tomto případě byla nastavená délka chlazení 25 sekund, tomu odpovídá i časová osa grafu.

### 3.5.3.3 Průběh tlaku



Obr. 56 Optimální nastavení - graf tlaku – realita a simulace

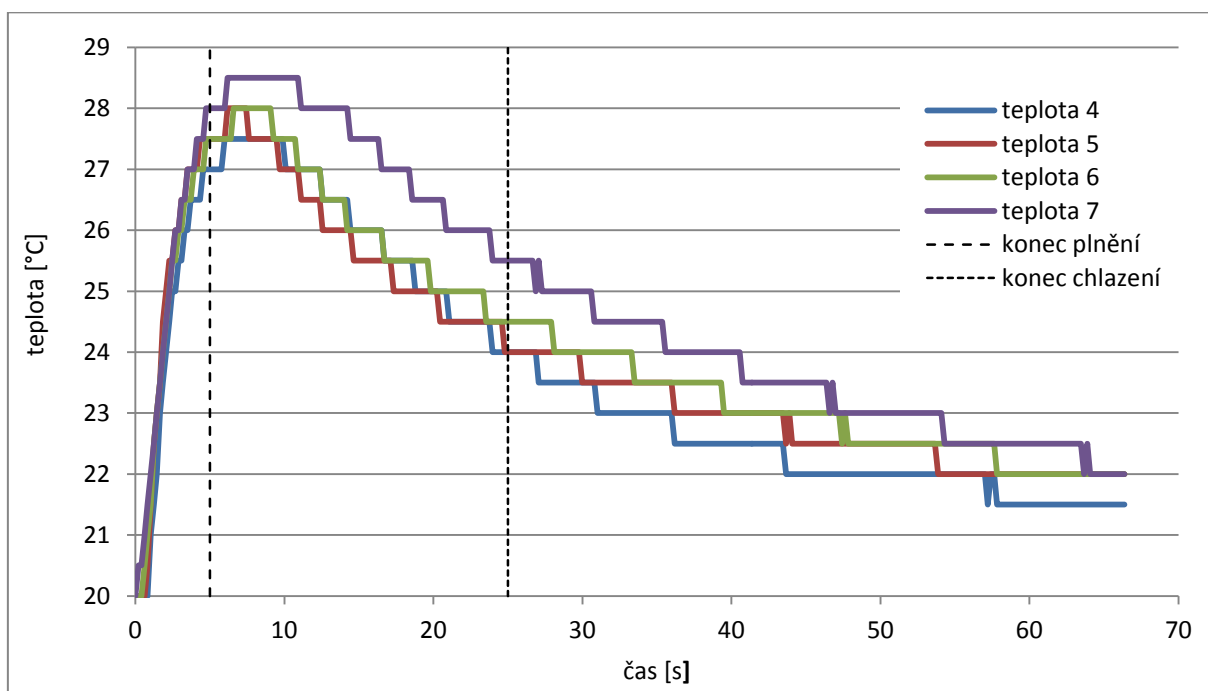
V obou dvou případech, realitě i simulaci je nastavena fáze plnění formy průtokem  $40 \text{ cm}^3/\text{s}$  a dotlak 20 bar po dobu 5 sekund. V grafu (Obr. 56) jsou vyneseny průběhy tlaků v závislosti na čase a vyznačen konec plnění dutiny formy pro reálný i simulovaný proces. Zásadní rozdíl mezi reálným a simulovaným procesem je takový, že vstříkolis počítá fázi plnění i dotlaku jako jednu operaci. Tedy pokud je v nastavení stroje navolen čas plnění

5 sekund, znamená to, že proběhne naplnění formy nastaveným průtokem a stroj se dále snaží tlačít hmotu do formy nastaveným tlakem až do doby 5 sekund. Simulace počítá tyto časy zvlášť, tedy nejdříve zvoleným průtokem (a plnicím tlakem) naplní formu a následně nechá 5 sekund působit dotlak.

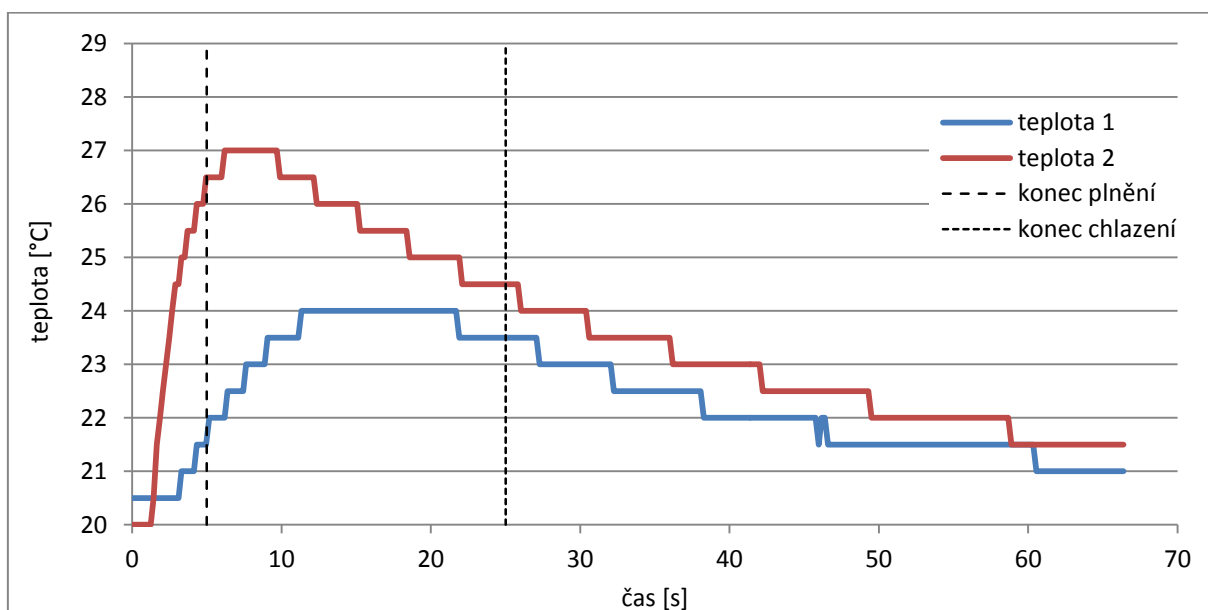
V grafu (Obr. 56) je v obou případech patrný nízký plnicí tlak, kdy keramická hmota nejdříve nemusí překonávat žádný velký odpor proti plnění. V tomto trendu pokračuje simulace až k samému závěru plnění, kdy plnicí tlak prudce vzroste a dále začíná působit dotlak nastavený na hodnotu 20 bar. Simulace navíc neuvažuje žádný vzduch uvnitř formy a hmota tak na rozdíl od reálné situace nemusí vytlačovat vzduch z formy ven dělicí rovinou.

V průběhu reálného procesu musí keramická hmota nejdříve stlačovat vzduch uvnitř dutiny formy a následně vytlačovat ven dělicí rovinou. Tento odpor zpomaluje rychlost plnění, což je zřejmé z pozvolného nárůstu tlaku během plnění, kdy v momentě plné formy ukazuje tlakový snímač hodnotu přibližně 6,5 bar. Následuje další nárůst tlaku a výdrž na hodnotě 19 bar, rozdíl jednoho baru oproti nastavené hodnotě (20 bar) je daný tolerancí stroje a také tolerancí tlakového snímače a měřicího zařízení, které převádí napětí signálu na jednotku bar, kterou zaokrouhluje na celá čísla. Dotlak v závěrečné fázi klesá nejdříve pozvolna, později strmě, reálná doba výdrže dotlaku je reálně pouze 1,66 sekundy. V simulaci dotlak působí konstantně celých 5 sekund.

### 3.5.3.4 Průběh teplot v reálném procesu vstřikování



Obr. 57 Optimální nastavení – graf teplot č. 4, 5, 6, 7 – **realita**

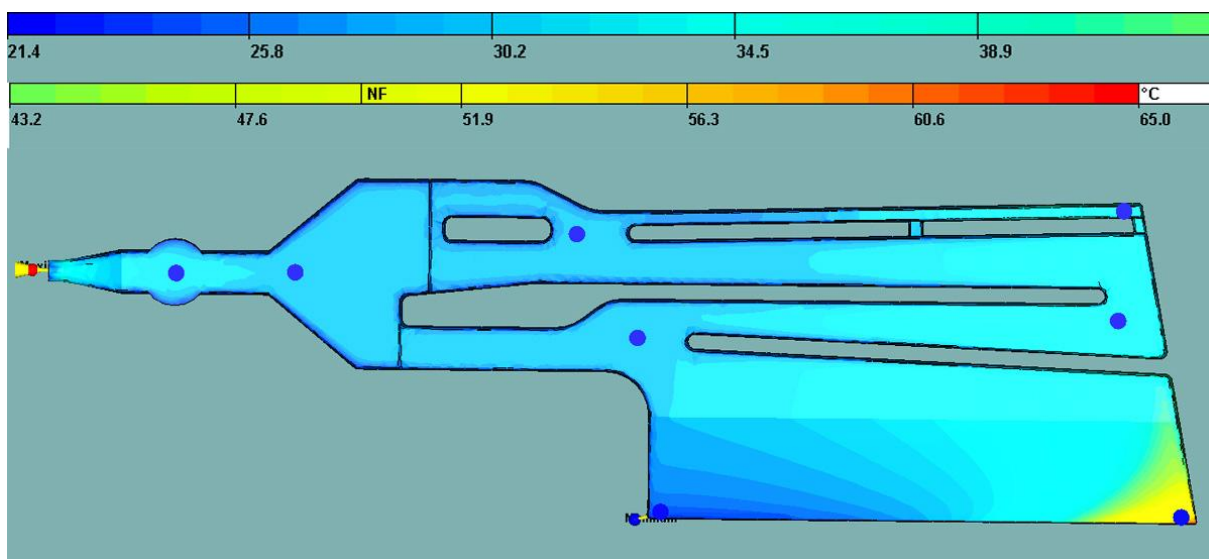


Obr. 58 Optimální nastavení - graf teplot č. 1 a 2 – **realita**

V grafu teplotních křivek (Obr. 57, Obr. 58) lze pozorovat reakce jednotlivých teplotních čidel na kontakt s keramickou hmotou. Dobře viditelné je také výše popsané zpoždění teplotních čidel, která jsou od keramické hmoty izolována jejich plastovým obalem. Nejvyšší teploty na povrchu jader jsou tedy naměřeny mezi 4–10 sekundami, jakmile došlo k prohřátí jejich obalu. Ovšem i přesto je dobře patrné, že největší teplotu si udržela oblast okolo zaústění v toku, jelikož má největší objem hmoty a navíc je po celou dobu plnění průtočná.

Postupným plněním formy docházelo ke kontaktu s dalšími snímači a současně k chladnutí keramické hmoty, zachycují to křivky teploty 4–6, ale především teploty 1 a 2.

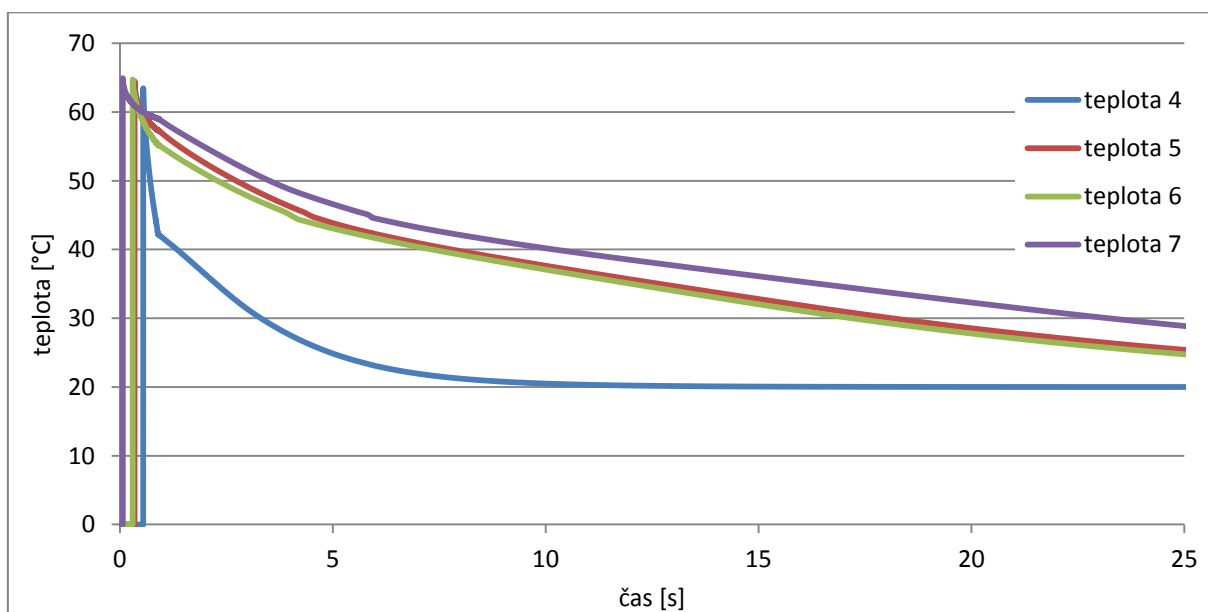
Zajímavá je křivka teploty 1. Na snímač přichází keramická hmota již tak ochlazená, že nejvyšší teplotu 24 °C teplotní snímač naměří až 11 sekund po naplnění formy, kdy dojde k dostatečnému prohřátí čidla. Takto velké zpoždění je pravděpodobně způsobeno velice tenkou vrstvou keramické hmoty, která nemá šanci teplotní čidlo rychleji prohřát. Virtuální teplotní snímače měří teplotu ve středu tloušťky stěny v místě, ve kterém jsou umístěny, přímé srovnání s reálně naměřenými hodnotami tedy není možné. Cadmould ovšem nabízí také zobrazení teplotního rozložení v okamžiku naplnění formy s možností zobrazit povrchové teploty odstříknutého kusu – keramického jádra (Obr. 59). Další možností je zobrazit průběh teplot ve zvoleném místě průřezu stěny v okamžiku naplnění dutiny formy. Byla tedy vybrána místa teplotních snímačů a teploty v průřezu stěny vyneseny do grafu (Obr. 70, Obr. 71).



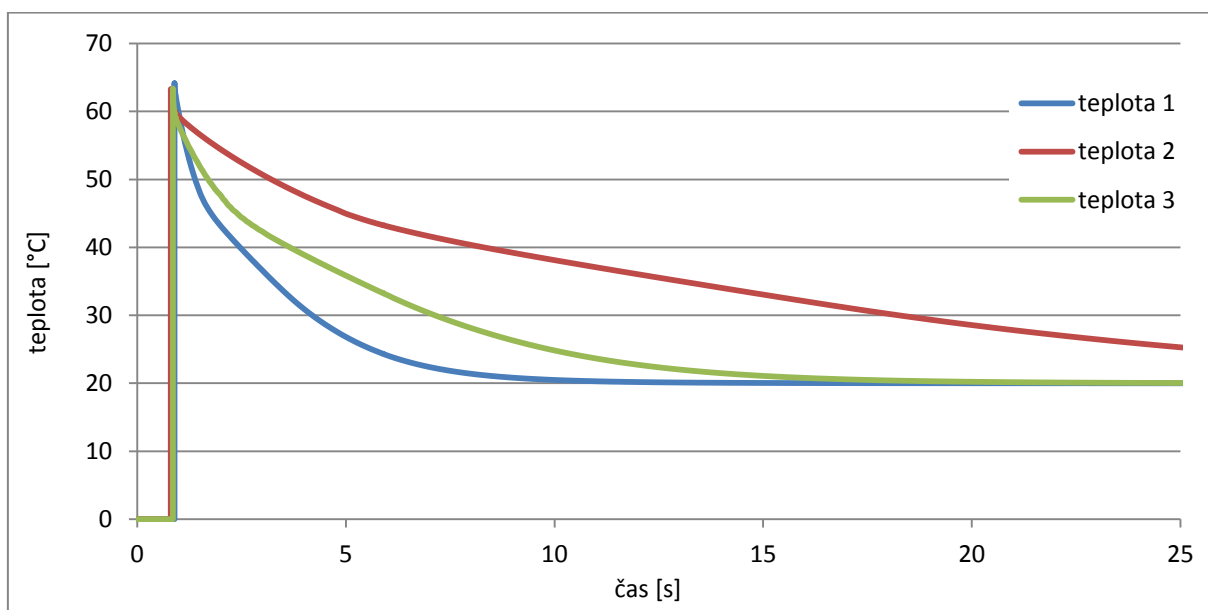
Obr. 59 Rozložení teplotního pole na povrchu jádra v okamžiku naplnění formy



### 3.5.3.5 Průběh teplot v simulaci procesu vstřikování



Obr. 60 Optimální nastavení – graf teplot č. 4, 5, 6, 7 - **simulace**



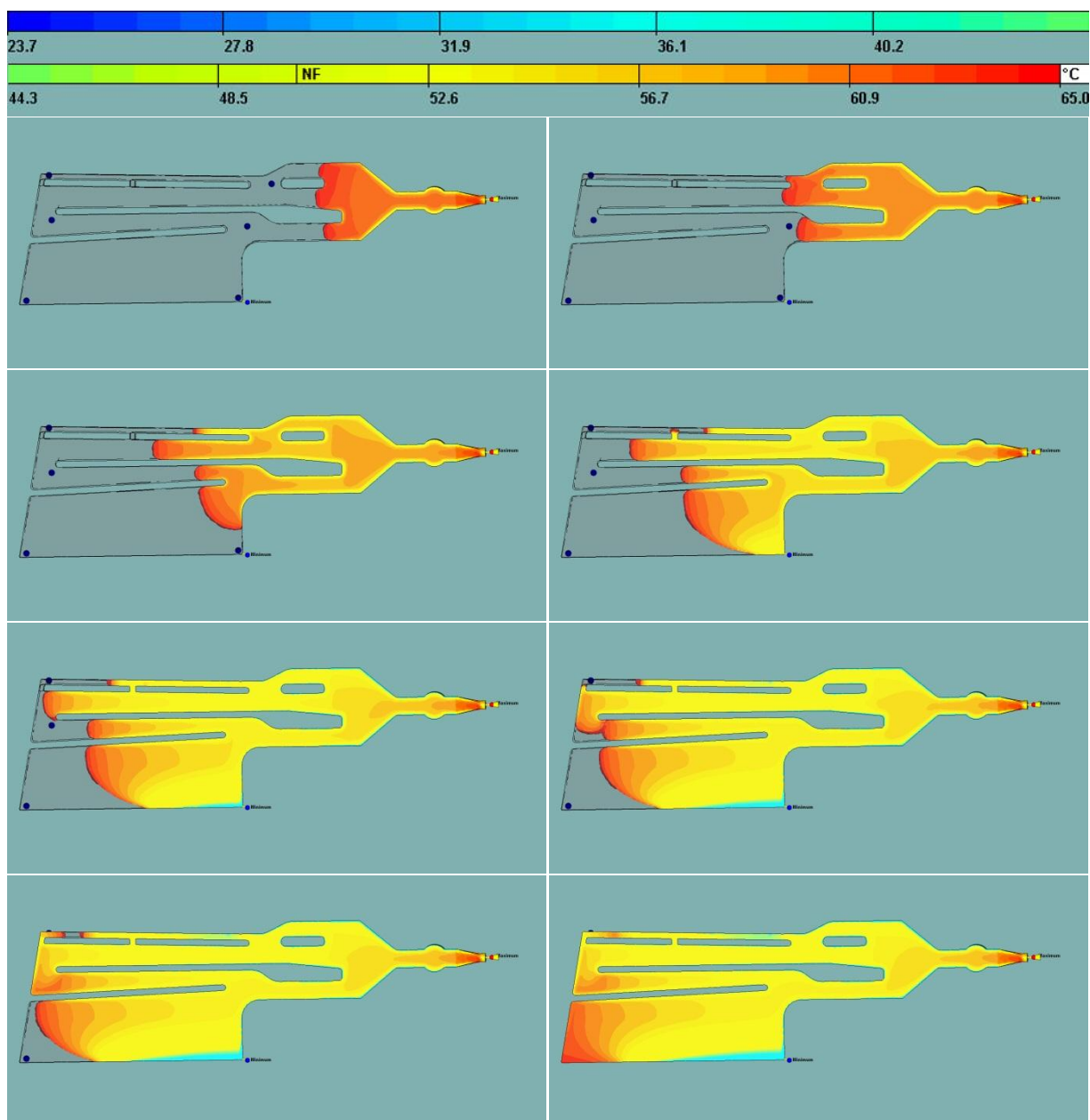
Obr. 61 Optimální nastavení - graf teplot č. 1, 2, 3 – **simulace**

Grafy na obrázcích (Obr. 60, Obr. 61) zaznamenávají průběh teplot ve středu tloušťky stěny keramického jádra v místech, kde jsou umístěny virtuální teplotní snímače. Opět je vidět reakce na postupné plnění dutiny formy, současně lze dobře rozlišit, jaký objem keramické hmoty se nachází pod každým teplotním čidlem. Především v místech čidel č. 1 a 4 je dobře patrná rychle chladnoucí klínovitá část, prakticky ihned po kontaktu snímače s hmotou teplota prudce klesá.

Zajímavé je, proč teplota 4 klesá rychleji než teplota 1, když podle logiky věci na teplotní snímač č. 1 musí přitékat chladnější hmota, protože je o přibližně 100 mm dále od vtoku než



teplotní snímač č. 4. Navíc keramická hmota musí vyplnit celou tenkostěnnou klínovitou část, než dorazí ke snímači č. 1, forma je vytvořena z teplotně dobře vodivé hliníkové slitiny, tudíž odvod tepla by měl být značný. Odpověď je možné nalézt analyzováním simulace plnění v režimu zobrazení teplotního pole v keramické hmotě, viz rozfázování plnění v obrázku (Obr. 62).



Obr. 62 Rozložení teplotního pole v průběhu plnění formy

Rozložení teplotního pole v průběhu plnění, ve středu tloušťky stěny, bylo rozfázováno do osmi snímků (Obr. 62). Snímky jednoznačně ukazují, že v průběhu plnění nedochází k chladnutí čela proudu keramické hmoty, teplota se po celou dobu plnění drží okolo teploty 65 °C, má tedy stejnou teplotu, se kterou opouští vstřikovací trysku. Je také patrné, že na teplotní snímač č. 1 přitéká hmota s vyšší teplotou než na teplotní snímač č. 4. To také může vysvětlovat snímek z času **0,86 sekund** (Obr. 53), který ukazuje polohu setkání dvou proudů

keramické hmoty, ta je na rozdíl od reality posunuta dále od vtoku. Pokud teplota čela proudu v průběhu plnění neklesá, znamená to, že si keramická hmota udržuje nízkou viskozitu a díky tomu umožňuje rychlejší proudění hmoty. To má zásadní vliv na tvar proudění a rychlost plnění formy, a tedy i na spolehlivost a věrohodnost simulace.

#### 3.5.4 Nevhodné nastavení parametrů vstřikovacího procesu

V této kapitole bude porovnána simulace a reálný proces s nevhodně nastavenými parametry, s tímto nastavením by v praxi jádro nikdy nemohlo být vyrobeno, protože dojde k zamrznutí keramické hmoty přibližně v 50 % objemu dutiny formy. Parametry nastavení procesu shodné pro simulaci i realitu jsou v tabulce (Tab. 6). Reálné plnění dutiny formy trvalo **3,44 sekundy**, plnění v simulaci **3,69 sekundy**. Dále budou srovnány hodnoty teplot a tlaku naměřené na čidlech ve formě a v simulaci.

Nulový bod časové osy byl zvolen ve videu reálného plnění, konkrétně se jedná o snímek videa, kdy se v dutině formy poprvé objeví keramická hmota. Dále bylo z videa vybráno 9 snímků, které dobře reprezentují průběh plnění, k těmto snímkům byl přiřazen čas od počátku plnění. Každý z vybraných snímků zobrazuje určité specifikum v průběhu proudění, jehož popis je uveden vždy v textu vztahujícím se ke konkrétnímu snímku. Tyto snímky jsou v levém sloupci obrázku srovnání reality versus simulace (Obr. 63, Obr. 64, Obr. 65).

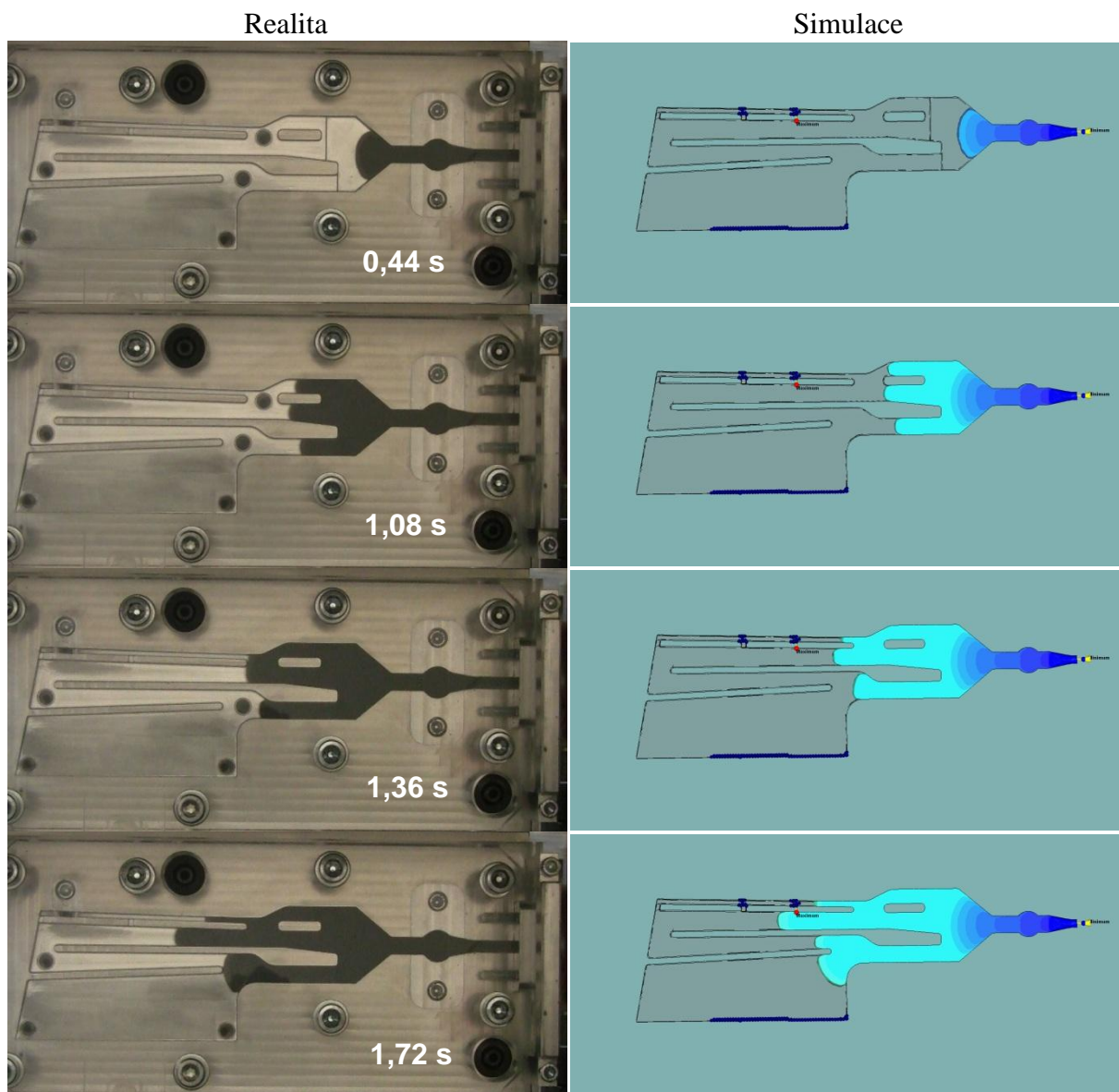
Animaci simulace bylo opět nutné přizpůsobit videu reálného procesu, v tomto případě ale jiným způsobem. I v tomto případě byla animace simulace uložena do 200 snímků, ve kterých je zachyceno 3,69 sekund trvající plnění, jeden snímek představuje časový úsek 0,0185 sekundy. Následně byl ke každému snímku reálného procesu přiřazen snímek z animace, tak aby byla dodržena časová osa. Pro lepší představu je uveden příklad:

1. Video reálného procesu: snímek č. 11 = 0,44 sekund od počátku plnění.
2. Animace simulace procesu:
  - Je požadován snímek v okamžiku 0,44 sekundy:  $0,44 \text{ s} / 0,0185 \text{ s} = 23,8$
  - Snímku č. 11 reálného procesu tedy přibližně odpovídá snímek č. 24 z animace simulace

Podle tohoto principu jsou analogicky přiřazeny i všechny ostatní snímky.

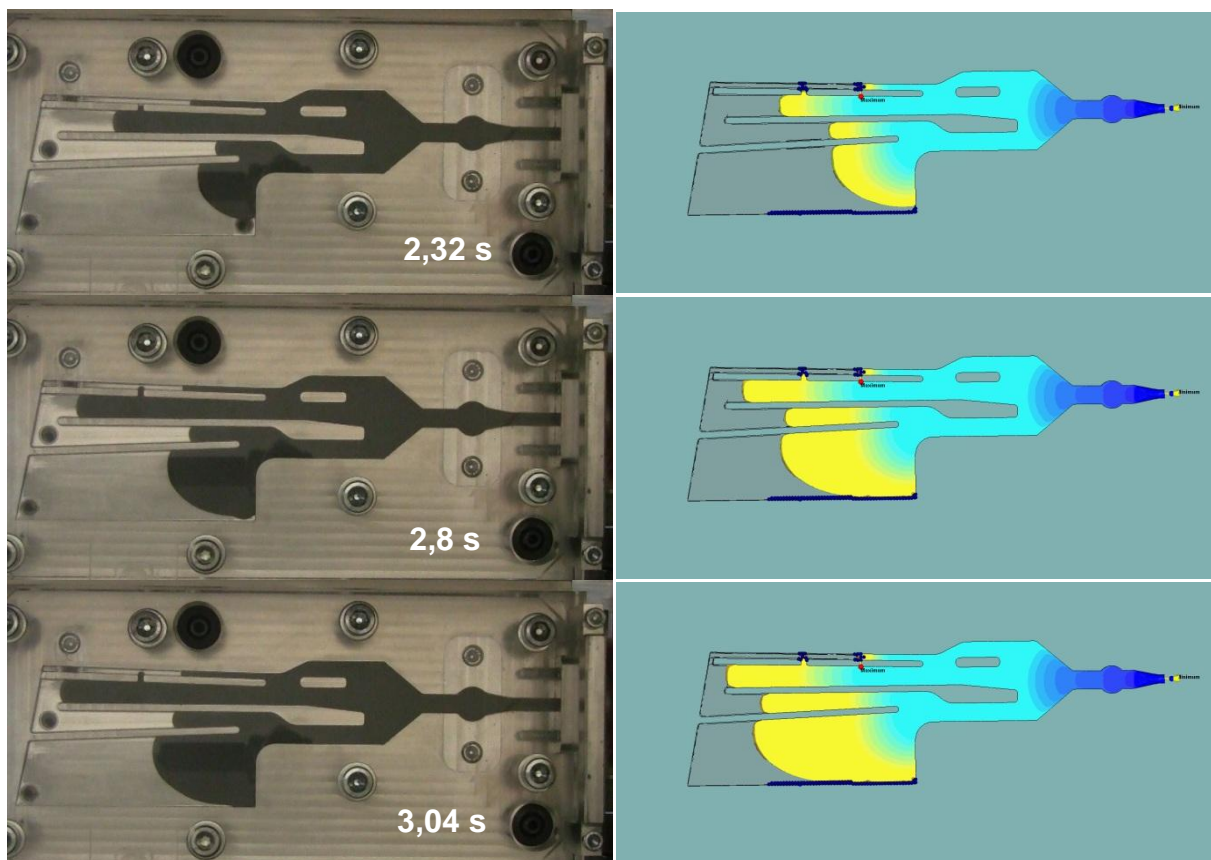
### 3.5.4.1 Srovnání procesu plnění dutiny formy

Při popisu je vždy konkrétní řádek srovnání volán časem snímků reality, ve snímcích simulace je zobrazena interpretace výsledků z programu Cadmould nazvaná Flow front: level when filled (%). Tmavě modré značky v obrázcích simulace označují místa zamrznutí keramické hmoty.



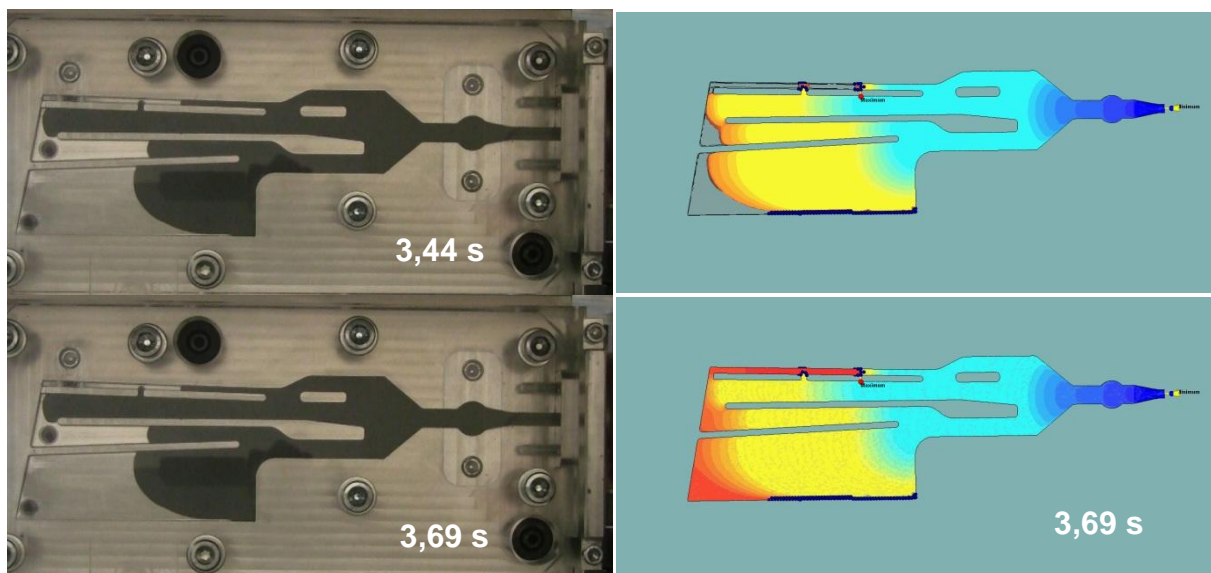
Obr. 63 Porovnání realita versus simulace - nevhodné nastavení 0,44–1,72 s

Od počátku plnění až do času **1,72 sekundy** je vidět relativně dobrá shoda tvaru proudu keramické hmoty mezi reálným a simulovaným plněním formy. Simulace ovšem začíná od času **1,08 sekundy** nepochybně zrychlovat. Výraznější rozdíl nastává až v čase plnění **1,72 sekundy** v dolní větvi dutiny formy, kdy se v simulaci začíná klínovitá část plnit rychleji.



Obr. 64 Porovnání realita versus simulace - nevhodné nastavení 2,32–3,04 s

Od **2,32 sekundy** pokračuje zrychlování plnění v simulaci, především ve spodní větvi dutiny formy. Naopak v reálné situaci zpomaluje proudění až úplnému zastavení, které proběhne náhlým zastavením ve všech kanálech. Toto značí, že již proběhlo nastavených 5 sekund fáze plnění a vstříkolis přestal doplňovat keramickou hmotu ještě před naplněním dutiny formy, ale aby bylo možné vzájemné srovnání jednotlivých experimentů, byla dodržována konstantní doba fáze plnění 5 sekund. Při srovnání obou případů je dobře vidět jednak zamrzající nejslabší kanál a spojovací kanálek v horní větvi, ale také zamrzající spodní okraj klínovité části, v tomto se realita i simulace shodují.

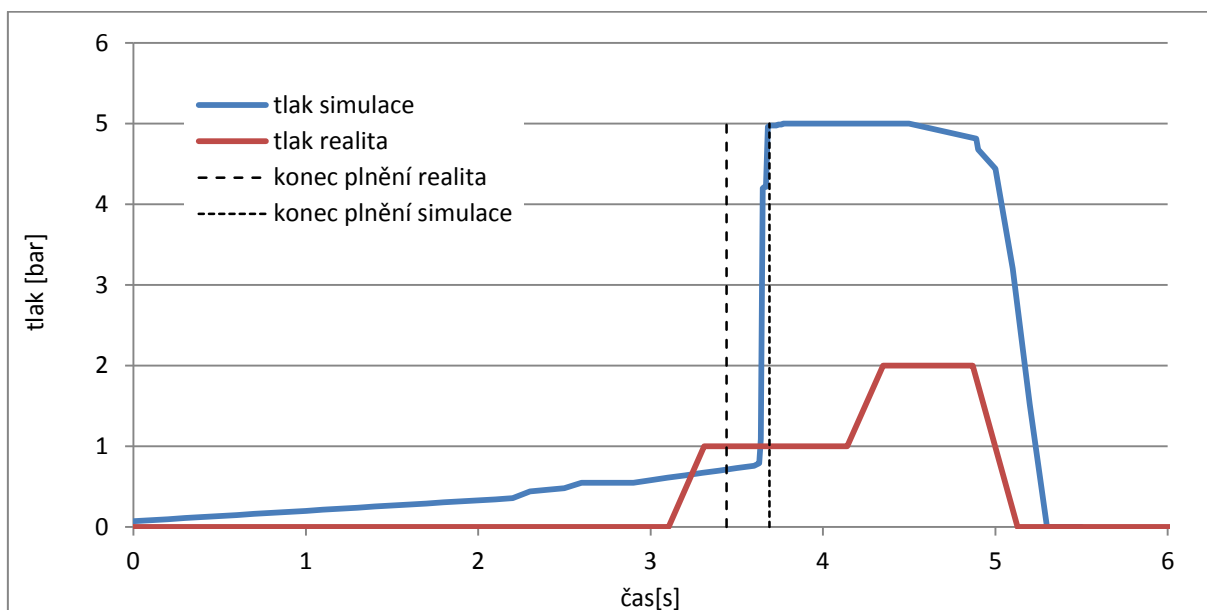


Obr. 65 Porovnání realita versus simulace - nevhodné nastavení 3,44- 3,69 s

V čase **3,44 sekundy** dochází v reálné situaci k úplnému zastavení proudění, forma je naplněna z přibližně 60–70 % objemu dutiny. V případě simulace plnění pokračuje dále až k 100 % naplnění dutiny formy (3,69 sekundy). Keramická hmota dokonce nezamrzá v druhém spojovacím kanálku, ale naopak doplní zbytek nejslabšího kanálu, jediné nezaplňené místo dutiny je tak spodní hrana klínovité části.

Simulace plnění tedy neodpovídá reálné situaci, to jak rychlostí plnění, tak faktem, že na rozdíl od reality dojde k úplnému zaplnění formy.

### 3.5.4.2 Průběh tlaku



Obr. 66 Nevhodné nastavení vstřikovacích parametrů- graf tlaku – realita a simulace

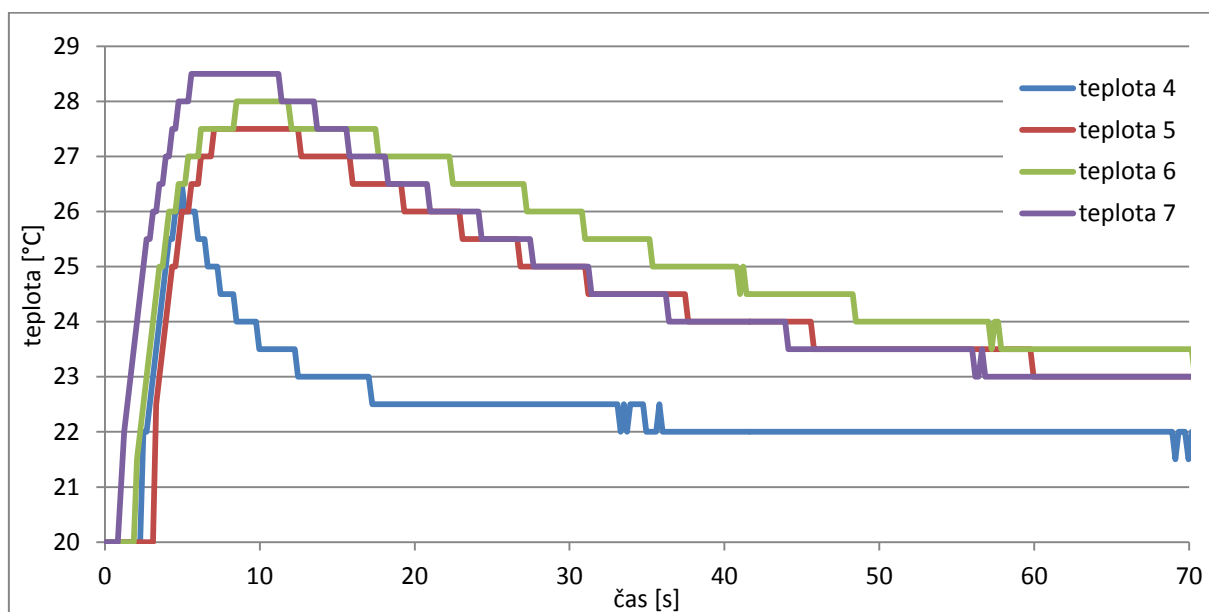


Graf průběhu tlaku na obrázku (Obr. 66) ukazuje vývoj působení tlaku na keramickou hmotu v průběhu fáze plnění a fáze dotlaku. V obou případech byly nastaveny shodné vstřikovací parametry. V případě simulace byla doba dotlaku nastavena na dobu 1,4 sekundy, aby celkové trvání fází vstřikování a dotlaku trvalo 5 sekund a výsledek mohl být srovnán s měřením reality. Tlakové čidlo umístěné v reálné vstřikovací formě měří pouze na celé bary, v takto malém rozsahu se to jeví jako nedostatek, křivka průběhu tlaku je velice hrubá.

Rozdíl mezi oběma křivkami velmi výrazný, zatímco tlak v simulaci dosáhne nastavené hodnoty 5 bar, v reálné situaci dosáhne hodnoty pouze okolo 2 bar. Toto je důsledek značného rozdílu v plnění formy, kdy v reálné situaci probíhá plnění velice pomalu. Tlak reálně nemůže dosáhnout vysoké hodnoty, jelikož se forma za nastavených 5 sekund nestihne zaplnit celá, proti pístu tedy nezačne působit žádný velký odpor, pouze odpor tření hmoty o stěny formy a odpor stlačování vzduchu uvnitř formy. Odpor vzduchu není velký, ten nastává až v pozdější fázi naplnění dutiny formy, kdy musí být vytlačen přes dělicí rovinu ven.

Toto je tedy další rozpor mezi záznamem reality a simulací. Výsledek simulace vývoje působení tlaku na keramickou hmotu v průběhu plnění nemůže být považován za shodný ani podobný s reálným procesem.

### 3.5.4.3 Průběh teplot v reálném procesu vstřikování



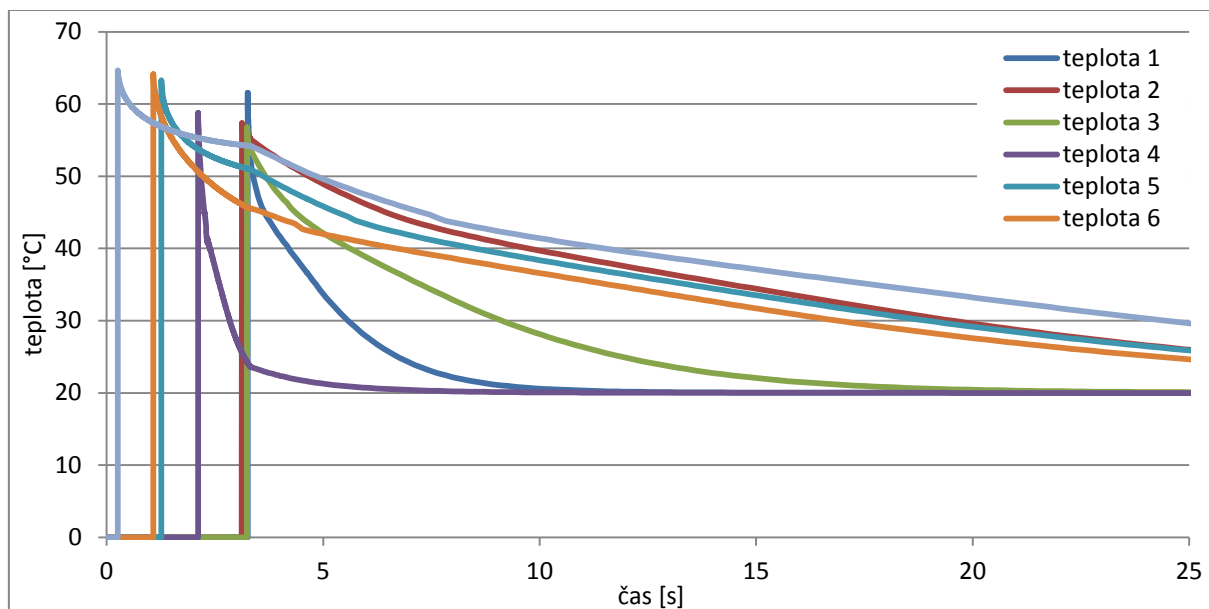
Obr. 67 Nevhodné nastavení – graf teplot č 4 – 7 - **realita**

Graf na obrázku (Obr. 67) zobrazuje průběh teplot na povrchu keramického jádra v průběhu plnění dutiny formy. Naměřeny byly pouze teploty 4 – 7, jelikož se teplotní snímače č. 1 – 3 nedostaly do kontaktu s keramickou hmotou. Maxima teplotních křivek jsou obecně nižší než v případě nastavení optimálních vstřikovacích parametrů, to značí celkově pomalejší plnění, kdy je více času na odvod tepla z keramické hmoty do materiálu formy. Zejména křivka teploty č. 4 ukazuje velice rychlý odvod tepla, protože jak je patrné ze snímku 3,44 sekundy plnění (Obr. 65), dojde pouze k částečnému zaplnění rohu klínovité části, kde je



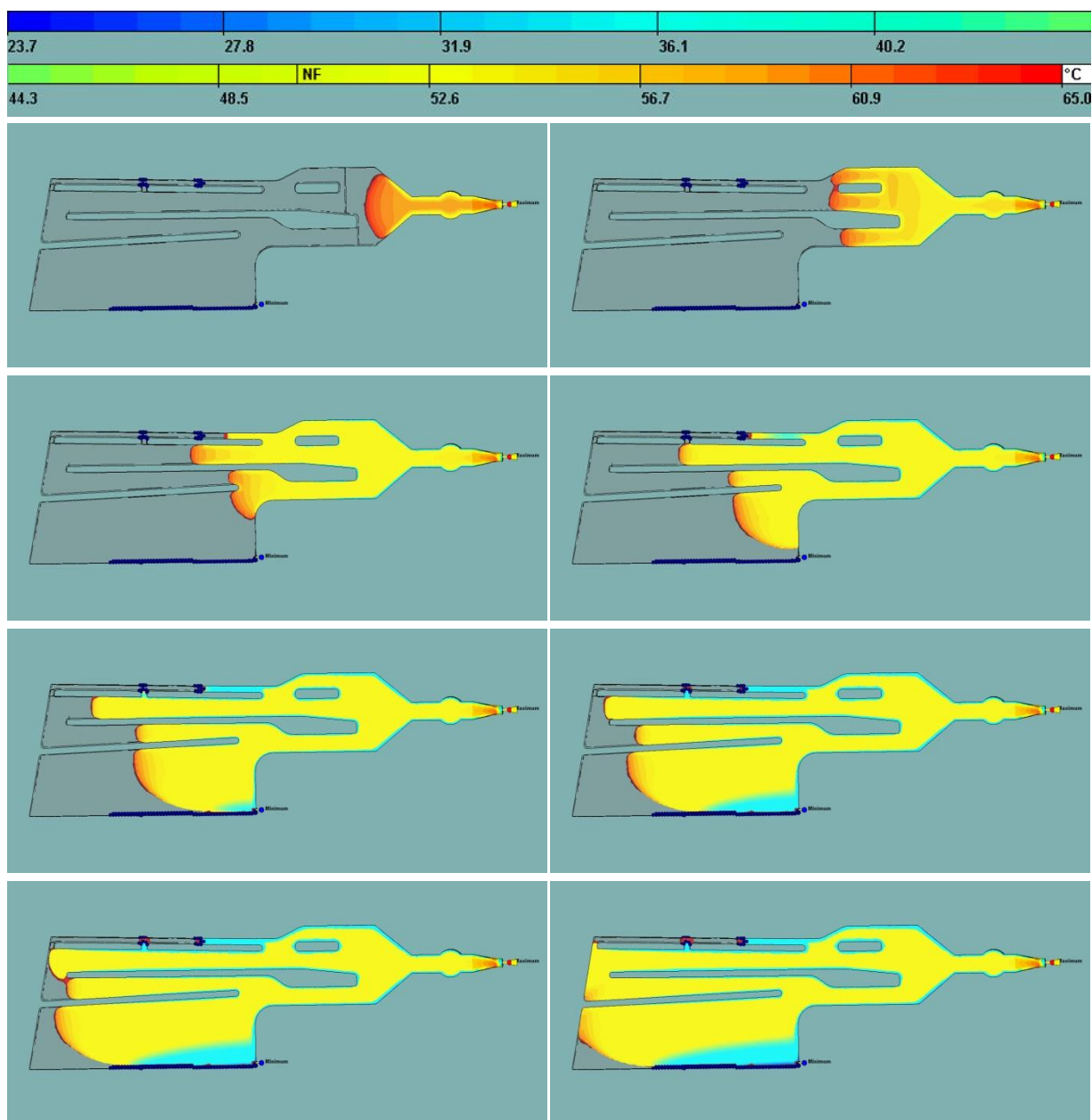
umístěný teplotní snímač č. 4. Toto malé množství materiálu v okolí teplotního snímače nese malé množství tepla, které je velice rychle odvedeno do materiálu formy.

#### 3.5.4.4 Průběh teplot v simulaci procesu vstřikování



Obr. 68 Nevhodné nastavení – graf teplot č 1 – 7 - **simulace**

Z teplotních křivek teplot 1–7 (Obr. 68) lze soudit, že keramická hmota je v průběhu plnění ochlazována formou. Největší teplotní rozdíl, tj. mezi teplotou č. 7 (64,6 °C) a teplotou č. 3 (56,7 °C) činí 7,9 °C. Zajímavé je, proč teplota č. 1, jejíž snímač přijde do kontaktu s keramickou hmotou jako poslední, ukazuje o 4 °C, respektive 3 °C a 2 °C vyšší hodnotu, než je tomu u snímačů č. 3, 2 a 4. Přitom podle logiky věci by měla být právě teplota č. 1 nejnižší. Je to poslední zaplněné místo s nejdelší dráhou, kterou musí keramická hmota urazit od vtoku, navíc v tenké klínovité části jádra. Pravděpodobně se jedná o nějaký problém v matematickém modelu přenosu tepla nebo naměřených termo-fyzikálních parametrech keramické hmoty. V rozporu s hodnotami z virtuálních teplotních snímačů je i obrázek postupného plnění dutiny formy z pohledu teploty (Obr. 69).



Obr. 69 Rozložení teplotního pole v průběhu plnění formy

V rozboru průběhu plnění z pohledu teploty keramické hmoty (Obr. 69) je zřejmý stejný problém jako v předchozím případě (Obr. 62) – čelo proudu keramické hmoty se po celou dobu plnění udržuje přibližně na teplotě 65 °C. Oproti předchozí simulaci plnění je sice vidět, že v tomto případě je oblast s teplotou 65 °C menší, tudíž k určitému přenosu tepla mezi čelem proudu keramické hmoty a materiálem formy pravděpodobně dochází. Přesto tento přenos není dostatečně velký, aby simulace dokázala věrně predikovat reálný průběh plnění. Podrobnější vyjádření a diskuze k tomuto problému je v kapitole 3.5.3.

### 3.5.5 Diskuze výsledků a další návrhy

Vzhledem ke značným rozdílům mezi simulací a realitou uvedených v kapitolách 3.5.3 a 3.5.4 bylo nejprve ověřeno správné nastavení parametrů simulací, zejména:

1. ověření rozměrů 3D modelu versus dutina reálné formy,
2. materiál formy (Cortal + polykarbonát),
3. teplota formy během procesu,
4. teplota chladicí kapaliny v chladicích kanálech formy,
5. teplota keramické hmoty,
6. nastavený vstřikovací průtok keramické hmoty a jeho závislost v čase,
7. nastavený vstřikovací tlak a dotlak,
8. délka fáze plnění formy, délka dotlakové fáze,

Správnost naměřených termo-fyzikálních parametrů keramické hmoty nemohla být ověřena, jelikož měření bylo provedeno externě na Ústavu výzkumu a vývoje polymerních materiálů na Univerzitě v Leobenu.

Ve snaze odhalit příčinu rozdílu mezi simulací a realitou bylo provedeno několik dalších simulací. Vyzkoušeno bylo různé nastavení závislosti průtoku na čase plnění (viz Obr. 45), jelikož velikost průtoku největší měrou ovlivňuje právě rychlost a tvar proudění v dutině formy. Vždy byly pozorovány pouze jemné rozdíly mezi jednotlivými variantami. Také byl proveden pokus, plnit dutinu formy pouze tlakově, to znamená, že forma nebyla naplněna zvoleným průtokem, ale během fáze dotlaku – toto řešení také nepřineslo žádný pokrok. Ve všech případech došlo k zaplnění dutiny formy s přibližně stejným průběhem plnění.

V kapitolách 3.5.3 a 3.5.4 je popsán problém, kdy čelo proudu keramické hmoty v průběhu plnění nechladne a drží si stále teplotu okolo 65 °C. Tento zmiňovaný fakt může mít příčinu v nesprávném výpočtu přestupu a vedení tepla mezi keramickou hmotou a formou nebo ve výpočtu vedení tepla v keramické hmotě samotné. Další příčinou mohou být nesprávně nebo nepřesně naměřené termo-fyzikální parametry keramické hmoty. Z výsledků průběhů teplot v kap. 3.5.3 byly vytvořeny grafy, které ukazují průběh teploty ve stěně keramického jádra pod každým z teplotních snímačů v časech:

1. ukončení plnění dutiny formy – 0,93 sekundy (Obr. 70),
2. konec fáze chlazení keramického jádra – 26 sekundy (Obr. 71).

Vždy na pravé straně grafu je kovová poloforma s umístěnými teplotními snímači, nalevo je poloforma z polykarbonátu (plexi).

Z grafu pro čas 0,93 sekundy (Obr. 70), je zřetelné, že v průběhu celého plnění se teplota ve středu stěny jádra pohybuje v blízkosti 65 °C, což může potvrzovat teorii nesprávného výpočtu přestupu a vedení tepla. Zajímavá je teplota č. 4, která se výrazně odlišuje od ostatních a především od teploty č. 1. Vzhledem k tomu, že jsou teplotní snímače č. 1 a 4 umístěny v podobných místech a snímač č. 1 dokonce dále od vtoku, měly by být tyto dvě teplotní křivky přinejmenším podobné. V případě grafu pro čas 26 sekund (Obr. 71) je situace taková, že keramická hmota i po 26 sekundách od počátku plnění dosahuje v místech

teplotních snímačů č. 2, 5, 6 a 7 značně vysoké teploty. V místě snímače č. 7 dokonce v blízkosti teploty meze tečení (50 °C), tedy stále ještě v kašovitém stavu.

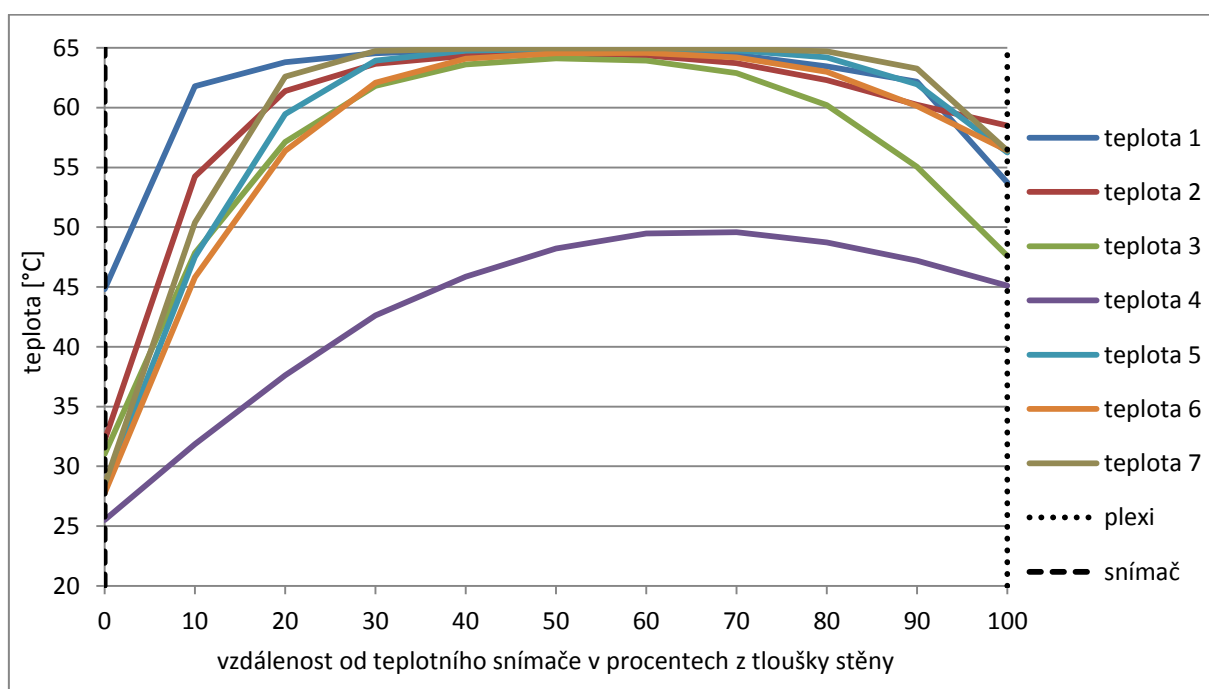
Pokud jsou grafy průběhu teploty ve stěně jádra porovnány s reálně naměřenými teplotami na povrchu jádra, je zjištěna přibližná shoda v teplotách reality a simulace. V reálné situaci se teplota po 26 sekundách od počátku plnění pohybuje mezi 24–26 °C, stejně tak simulace se teplota povrchu jádra pohybuje mezi 20–26 °C.

K ověření správnosti teplot ve středu keramického jádra a u polykarbonátové části formy je nutné do dutiny formy instalovat klasické termočlánky, které budou zasahovat do potřebné hloubky. Díky tomu bude možné zjistit, zda keramická hmota v průběhu plnění v reálné situaci ve středu jádra chladne, případně o jakou hodnotu. Bude tak možné potvrdit nebo vyvrátit, jestli je příčinou rozdílu mezi průběhem plnění v simulaci a realitě nesprávný výpočet přestupu a vedení tepla.

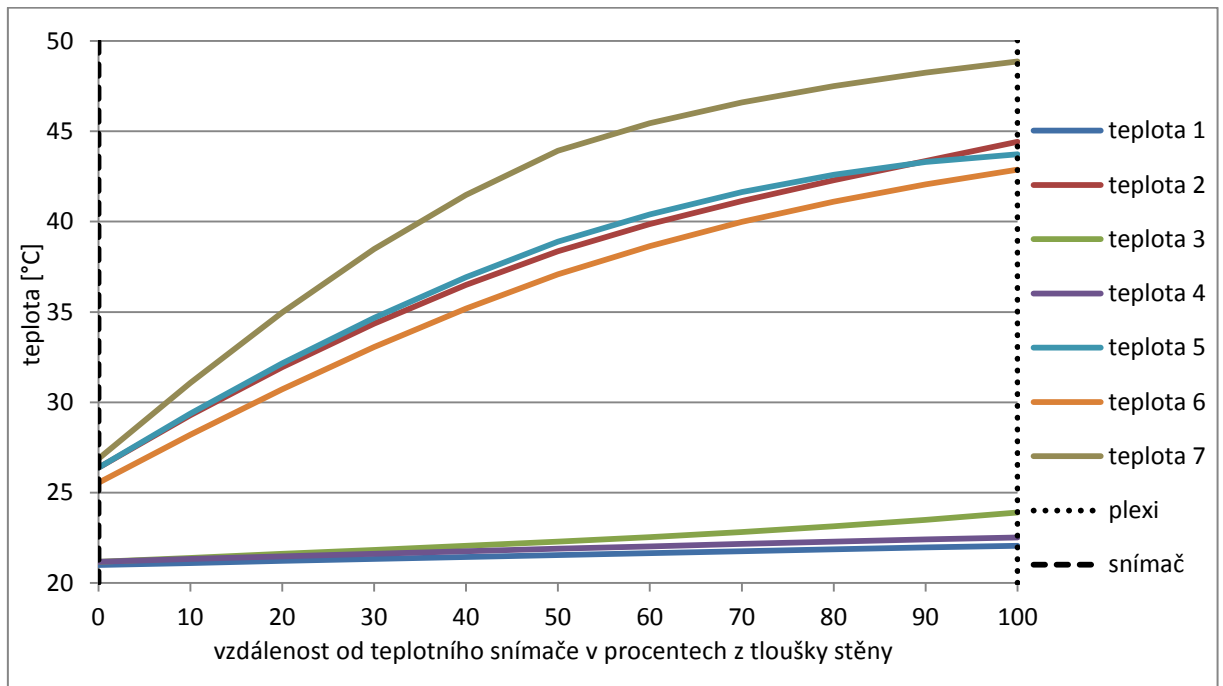
Dále je nutné prověřit, jestli je použitý viskozitní model Carreau-WLF vhodný pro popis zkoumané keramické hmoty. Model Carreau-WLF je sice vhodný pro popis neneutonských pseudoplastických tekutin (do této kategorie spadá i zkoumaná hmota), ovšem problém může být v plnivu a stupni plnění této keramické hmoty. Plnivo, tedy keramický prášek ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) má špatnou tepelnou vodivost a navíc obsah tohoto plniva je až 80 %.

Pokud se ukáže, že Carreau-WLF viskozitní model je pro popis vyhovující a teploty průběhu plnění v simulaci správné, bude nutné prověřit správnost naměřených termofyzikálních parametrů.

Prozatím tedy simulace průběhu plnění dost dobře neodpovídá reálnému procesu plnění. Z naměřených parametrů a porovnání simulace s realitou není možné jednoznačně určit příčinu tohoto rozdílu.



Obr. 70 Průběh teplot po tloušťce stěny – 0,93 s



Obr. 71 Průběh teplot po tloušťce stěny – 26 s

## ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo posoudit, zda je možné využít numerickou simulaci k podpoře a optimalizaci výroby keramických jader pro metodu lití na vytavitelný model, zhotovovaných metodou vstřikolisování keramické hmoty do kovové formy.

Simulační program Cadmould 3D-F byl vybrán na základě výsledků disertační práce *Využití numerické simulace k optimalizaci výroby voskových modelů* [21], která hodnotí Cadmould 3D-F jako vhodný pro numerickou simulaci výroby voskových modelů. Materiál pro výrobu keramických jader – keramická hmota je složen ze dvou hlavních složek – voskového pojiva a keramického plniva. Keramická hmota vykazuje podobné reologické vlastnosti a parametry právě jako materiál pro výrobu voskových modelů. Změření potřebných reologických a termo-fyzikálních parametrů je relativně náročné na potřebné laboratorní vybavení, proto bylo zprostředkováno prostřednictvím vývojáře programu Cadmould 3D-F, společností Simcon kunststofftechnische Software GmbH.

Jako metoda pro validaci simulace byl použit záznam průběhu plnění dutiny formy na digitální kameru, doplněné o měření teplot a tlaku v průběhu procesu. Z tohoto důvodu bylo nutné vytvořit formu, která je složena z kovové poloformy (materiál Certal) a průhledné poloformy (materiál polykarbonát). Pro záznam teplot a tlaku bylo zkonstruováno vlastní měřicí zařízení, postavené na mikropočítači Arduino UNO R3.

Pro pochopení vlivu jednotlivých vstřikovacích parametrů (průtok, tlak, teplota formy) bylo nejdříve zaznamenáno a vyhodnoceno množství zkušebních odstříků keramických jader vždy s jedním proměnným a dalšími konstantními parametry. Ze získaných poznatků byly vybrány dvě konfigurace pro vytvoření numerické simulace. Optimální nastavení, při kterém je vyrobeno jádro splňující rozměrové a kvalitativní požadavky a nevhodné nastavení, při kterém dojde k zamrznutí keramické hmoty ve fázi přibližně 65 % naplnění formy, vzniká tedy neshodný kus.

Dále byla vytvořena numerická simulace pro každou konfiguraci. Animace simulace a záznam z digitální kamery byl rozstříhán na jednotlivé snímky a vzájemně porovnány. V simulaci byly také měřeny parametry teplot a tlaku ve stejných místech jako při reálném procesu, následně také porovnány s realitou.

Z porovnání záznamů plnění vyplynulo, že numerická simulace prozatím nepodává věrohodnou predikci reálného plnění, zvláště v konfiguraci nevhodného nastavení se simulace a realita značně liší. Příčina tohoto rozdílu by mohla být způsobená problémy v přestupu a vedení tepla v keramické hmotě a na rozhraní hmota – forma vinou nesprávně naměřených reologických a termo-fyzikálních parametrů nebo použitého viskozitního modelu Carreau-WLF. Tuto domněnku se ovšem z naměřených hodnot teplot a záznamu plnění nepodařilo potvrdit.

Byly navrženy další opatření a postupy, které by mohly vést k úspěšnému použití numerické simulace výroby keramických jader v simulačním programu Cadmould 3D-F.

V současné době (květen 2015) probíhá komunikace a spolupráce se zástupcem společnosti Simcon, firmou Plasty Gabriel, za účelem nalezení hlavní příčiny neshody mezi simulací a realitou.



## POUŽITÉ ZDROJE

- [1] BEELEY, P. R., SMART, R. F. THE INSTITUTE OF MATERIALS. Investment Casting. London: The Universit Press Cambridge, 1995. 486 p. ISBN 0901716669
- [2] HORÁČEK, M., HELÁN, J. Dimensional Accuracy and Stability of Investment Casting, 46th Annual Technical Meeting, ICI, 1998, Orlando
- [3] Blades cooling. [online]. [cit. 2015-02-18]. Dostupné z WWW: <[goo.gl/MwQ9OU](http://goo.gl/MwQ9OU)>.
- [4] Silica SiO<sub>2</sub>. In: *Morgan technical ceramics* [online]. [cit. 2015-02-18]. Dostupné z WWW: <<http://www.morgantechnicalceramics.com/materials/silica-sio2>>.
- [5] HORÁČEK, M. Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu [online]. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2009 [cit. 2015-02-22]. Dostupné z WWW: <<http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/download/technologie-vytavitelneho modelu.pdf>>.
- [6] ZEMČÍK, Ladislav. Speciální slévárenské procesy. 2. přeprac. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1987, 125 s.
- [7] LANIK S.R.O. *Technický list: Keramická jádra MP*. Boskovice, 2014.
- [8] LÁNÍK, B. a kol. Testování keramických jader za vysokých teplot. In *Sborník přednášek z 51. slévárenských dnů Blok E – Sekce technologická*. Brno: Česká slévárenská společnost, 2014. s. 33-42. ISBN: 978-80-02-02570-2.
- [9] ROMASHIN, A. G. a Yu. E. PIVINSKII. Properties of fused silica ceramics. *Refractories* [online]. 1968, vol. 9, 9-10, s. 590-595 [cit. 2015-02-12]. DOI: 10.1007/bf01283506.
- [10] Z blade mixer. In: *Winkworth mixer* [online]. [cit. 2015-02-18]. Dostupné z WWW: <<http://www.mixer.co.uk/mixers/detail.aspx?item=laboratory-z-blade-mixer>>.
- [11] CHHABRA, R., RICHARDSON, J. Non-Newtonian flow and applied rheology: engineering applications. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008, xiv, 518 s. ISBN 978-0-7506-8532-0.
- [12] KAŠTYL, J. *Vytlačování vrstevnatých keramických těles*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 69 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Martin Trunec, Dr..
- [13] OVČÁČÍKOVÁ, H., VLČEK, J. *Speciální keramické materiály*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013, 111 s. ISBN 978-80-248-3365-1.

- [14] BEŇO, J., ŠPIRUTOVÁ, N. *Počítačová podpora lití a tuhnutí odlitků*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013, 103 s. ISBN 978-80-248-3355-2
- [15] KRUTIŠ, V. *Simulace slévárenských procesů: přednáška pro 1. ročník magisterského studia* [prezentace ve formátu PDF]. [cit. 2015-02-14].
- [16] KRUTIŠ, V. *Numerická simulace slévárenských procesů: přednáška pro 1. ročník magisterského studia* [prezentace ve formátu PDF]. [cit. 2015-02-14].
- [17] FUSEK, M., HALAMA, R. *Metoda konečných prvků a hraničních prvků* [online]. 2011 [cit. 2015-02-14].  
Dostupné z WWW: <[http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/mkpmhp\\_obr.pdf](http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/mkpmhp_obr.pdf)>
- [18] Integral. [online]. [cit. 2015-02-18]. Dostupné z WWW: <<http://www.nerix.org/problema-integral/>>.
- [19] GABRIEL, J. Software pro analýzu vstřikování plastů. In: *PlasticPortal.eu* [online]. 2011 [cit. 2015-02-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.plasticportal.cz/cs/software-pro-analyzu-vstrikovani-plastu/c/747>>.
- [20] SIMCON KUNSTSTOFFTECHNISCHE SOFTWARE GMBH. *Cadmould 3D-F Fill: User Manual Version 6.0*. Wurselen, 2012, 213 s.
- [21] KOSOUR, V. *Využití numerické simulace k optimalizaci výroby voskových modelů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 139 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
- [22] BHV Sensory. *Produktový list: Digitální snímač tlaku TSZ-M s procesním připojením*. [online]. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.bhvsensory.cz/data/products/file/tsz-m-katalog.pdf>>.
- [23] Arduino UNO R3. [online]. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.forefront.io/attachments/uno.jpg>>.
- [24] DS18B20. [online]. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z WWW: <<http://goo.gl/70TGZP>>.
- [25] BARTOVSKÁ, L., ŠIŠKOVÁ, M. *Co je co v povrchové a koloidní chemii* [online]. VŠCHT Praha, 2005 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: [http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid\\_es-001/hesla/pseudoplasticita.html](http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/pseudoplasticita.html)
- [26] KREMPL, N. Zkušební zpráva: *Stanovení termodynamických a reologických parametrů směsi křemene a vosku pro přesné odlitky typu Lanik MP04*. Simcon kunststofftechnische Software GmbH. Leoben, 2014. 15 s.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

| Značka         | Jednotka       | Popis                               |
|----------------|----------------|-------------------------------------|
| $\eta$         | $[Pa \cdot s]$ | dynamická viskozita materiálu       |
| $\dot{\gamma}$ | $[s^{-1}]$     | smyková rychlost                    |
| $a_T$          | $[-]$          | součinitel teplotního posuvu        |
| $T$            | $[^{\circ}C]$  | zkoumaná teplota                    |
| $T_0$          | $[^{\circ}C]$  | teplota známé hodnoty viskozity     |
| $T_S$          | $[^{\circ}C]$  | teplota skelného přechodu materiálu |
| $c_1, c_2$     | $[-]$          | materiálové konstanty               |
| $A$            | $[Pa \cdot s]$ | experimentálně určená konstanta     |
| $B$            | $[s]$          | experimentálně určená konstanta     |
| $C$            | $[-]$          | experimentálně určená konstanta     |

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|   |    |
|---|----|
| Obr. 1 Chlazení turbínových lopatek [3] .....   | 9  |
| Obr. 2 Keramické jádro pro odlitek lopatky plynové turbíny Siemens V94.2 [4] .....  | 11 |
| Obr. 3 Rozměrové změny v technologii lití na vytavitelný model [2] .....  | 13 |
| Obr. 4 Závislost obsahu porozity a modulu pružnosti: 1. statického, 2. dynamického [9] .....  | 15 |
| Obr. 5 Závislost obsahu porozity a pevnosti v ohybu [9].....  | 15 |
| Obr. 6 Bubnový míšič keramické hmoty [10] .....   | 16 |
| Obr. 7 Schéma vstřikovacího lisu MPI SA56-50-27 .....   | 17 |
| Obr. 8 Drsný a hladký povrch jádra .....  | 19 |
| Obr. 9 Studené spoje na povrchu jádra.....  | 19 |
| Obr. 10 Dutiny v jádrech a propadání povrchu (vlevo).....   | 20 |
| Obr. 11 Změny ve struktuře materiálu během výpalu [13] .....  | 21 |
| Obr. 12 Ovlivnění přesnosti aproximace spojité křivky vzdáleností uzlových bodů [18] .....  | 24 |
| Obr. 13 Porovnání sítí generovaných metodami FEM a FDM [14].....  | 26 |
| Obr. 14 Porovnání plošného (a) a objemového (b) výpočtového modelu [20].....  | 30 |
| Obr. 15 Výpočtová síť Cadmould 3D-F [20] .....  | 30 |
| Obr. 16 Porovnání 3D-F a objemového výpočtového modelu, <b>osa x</b> - vzdálenost bodu<br>od stěny vyjádřená v procentech tloušťky, <b>osa y</b> - teplota ve °C [20] ..... | 30 |
| Obr. 17 Tvorba výpočetní sítě (Mesh) .....  | 32 |
| Obr. 18 Tvorba vtokového kanálu .....   | 33 |
| Obr. 19 Kontrola technologičnosti konstrukce jádra.....   | 33 |
| Obr. 20 Tvorba chladicích kanálů ve formě .....   | 34 |
| Obr. 21 Parametry procesu .....   | 35 |
| Obr. 22 Okno výběru zobrazení výsledků .....  | 35 |
| Obr. 23 Geometrie experimentálního keramického jádra .....  | 36 |
| Obr. 24 Popis geometrie experimentálního jádra .....  | 37 |
| Obr. 25 Forma pro experimentální keramické jádro .....  | 38 |
| Obr. 26 Závislost smykového napětí (shear stress) na smykové rychlosti (shear rate)[11] .....   | 39 |
| Obr. 27 Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě [26].....   | 40 |
| Obr. 28 Teplota meze tečení [26] .....  | 41 |
| Obr. 29 Tepelná vodivost .....  | 42 |
| Obr. 30 Viskozita.....  | 43 |
| Obr. 31 pVT Diagram [25].....   | 43 |
| Obr. 32 Rozložení tlakového a teplotních čidel .....  | 44 |
| Obr. 33 Mikropočítač Arduino UNO R3 [23] .....  | 45 |
| Obr. 34 Arduino IDE - pracovní okno.....  | 47 |
| Obr. 35 Teplotní čidlo DS18B20.....   | 48 |
| Obr. 36 Uchycení teplotního čidla ve formě .....  | 48 |
| Obr. 37 Pouzdro pro teplotní čidlo v řezu .....   | 48 |
| Obr. 38 Tlakové čidlo TSZ-M F12 [22] .....  | 49 |
| Obr. 39 Schéma zapojení měřicího přístroje, vytvořeno v programu Fritzing.....  | 50 |
| Obr. 40 Aktuální teploty a tlak, čidlo G je mimo provoz.....  | 51 |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| Obr. 41 | Obrazovky nastavení a průběhu měření: a) čeká na zadání počtu iterací,<br>b) zadáno 50 iterací, c) probíhá měření, aktuálně desátá iterace | 52 |
| Obr. 42 | Nastavení teplot vstřikolisu   | 53 |
| Obr. 43 | Umístění formy mezi razníky vstřikolisu  | 54 |
| Obr. 44 | Vstřikovací forma osazená snímači  | 54 |
| Obr. 45 | Nastavení plnicího průtoku - $40 \text{ cm}^3/\text{s}$  | 55 |
| Obr. 46 | Chlazení vstřikovací formy v simulaci  | 55 |
| Obr. 47 | Porovnání plnění formy při teplotě 20 a 25 °C  | 56 |
| Obr. 48 | Porovnání plnění formy při teplotě 20 a 25 °C  | 57 |
| Obr. 49 | Porovnání plnění formy při konstantním tlaku   | 59 |
| Obr. 50 | Porovnání plnění formy při konstantním průtoku   | 60 |
| Obr. 51 | Porovnání realita versus simulace - optimální nastavení - 0,36–0,52 s  | 63 |
| Obr. 52 | Porovnání realita versus simulace - optimální nastavení - 0,68–1,12 s  | 64 |
| Obr. 53 | Porovnání realita versus simulace - optimální nastavení - 1,2–1,36 s   | 65 |
| Obr. 54 | Porovnání realita versus simulace - optimální nastavení - 1,28–1,56 s  | 66 |
| Obr. 55 | Predikce studených spojů - optimální nastavení parametrů<br>vstřikování – studené spoje vyznačeny bíle                                     | 67 |
| Obr. 56 | Optimální nastavení - graf tlaku – <b>realita a simulace</b>   | 68 |
| Obr. 57 | Optimální nastavení – graf teplot č. 4, 5, 6, 7 – <b>realita</b>   | 70 |
| Obr. 58 | Optimální nastavení - graf teplot č. 1 a 2 – <b>realita</b>  | 70 |
| Obr. 59 | Rozložení teplotního pole na povrchu jádra v okamžiku naplnění formy   | 71 |
| Obr. 60 | Optimální nastavení – graf teplot č. 4, 5, 6, 7 – <b>simulace</b>  | 72 |
| Obr. 61 | Optimální nastavení - graf teplot č. 1, 2, 3 – <b>simulace</b>   | 72 |
| Obr. 62 | Rozložení teplotního pole v průběhu plnění formy   | 73 |
| Obr. 63 | Porovnání realita versus simulace - nevhodné nastavení 0,44–1,72 s   | 75 |
| Obr. 64 | Porovnání realita versus simulace - nevhodné nastavení 2,32–3,04 s   | 76 |
| Obr. 65 | Porovnání realita versus simulace - nevhodné nastavení 3,44- 3,69 s  | 77 |
| Obr. 66 | Nevhodné nastavení vstřikovacích parametrů- graf tlaku – realita a simulace  | 77 |
| Obr. 67 | Nevhodné nastavení – graf teplot č 4 – 7 – <b>realita</b>  | 78 |
| Obr. 68 | Nevhodné nastavení – graf teplot č 1 – 7 – <b>simulace</b>   | 79 |
| Obr. 69 | Rozložení teplotního pole v průběhu plnění formy   | 80 |
| Obr. 70 | Průběh teplot po tloušťce stěny – 0,93 s   | 82 |
| Obr. 71 | Průběh teplot po tloušťce stěny – 26 s   | 83 |

## SEZNAM TABULEK

|  |    |
|--|----|
| Tab. 1 Nastavení parametrů vstřikovacího procesu.....            | 56 |
| Tab. 2 Nastavení parametrů vstřikovacího procesu.....            | 58 |
| Tab. 3 Porovnání doby plnění formy.....                          | 58 |
| Tab. 4 Nastavení parametrů vstřikovacího procesu.....            | 59 |
| Tab. 5 Optimální nastavení parametrů vstřikovacího procesu ..... | 62 |
| Tab. 6 Nevhodné nastavení parametrů vstřikovacího procesu .....  | 62 |



## **SEZNAM PŘÍLOH**

**Příloha č. 1** Program pro měřicí přístroj

**Příloha č. 2** Měřicí zařízení

# PŘÍLOHY

## Příloha č. 1 Program pro měřicí přístroj:

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);
#define ONE_WIRE_BUS 7 //teplotni cidla na pinu 7
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS); //inicializace onewire sbernice
DallasTemperature sensors(&oneWire); //inicializace teplotnich senzoru

//Adresy teplotnich senzoru:
DeviceAddress jedna = { 0x28, 0xFF, 0x9C, 0xD9, 0x3E, 0x04, 0x00, 0x5D };
DeviceAddress dva = { 0x28, 0xFF, 0xF2, 0x85, 0x3B, 0x04, 0x00, 0x11 };
DeviceAddress tri = { 0x28, 0xFF, 0xCA, 0x00, 0x4B, 0x04, 0x00, 0x1C };
DeviceAddress ctiri = { 0x28, 0xFF, 0x47, 0x11, 0x52, 0x14, 0x00, 0xA4 };
DeviceAddress pet = { 0x28, 0xFF, 0x4E, 0x01, 0x4E, 0x04, 0x00, 0x72 };
DeviceAddress sest = { 0x28, 0xFF, 0xAC, 0x37, 0x52, 0x14, 0x00, 0x77 };

//Nastaveni tlacitek:
const int tlacitkoA = 2;
const int tlacitkoB = 3;
const int tlacitkoC = 4;

//Nastaveni LED:
const int ledA = 8;
const int ledB = 9;

//Nastaveni promennych:
unsigned long time; //promena pro cas od spusteni
int stavTlacitkoA = 0;
int stavTlacitkoB = 0;
int stavTlacitkoC = 0;
int delka = 0;

int tlak; //promenne pro tlak
int napetiSenzor;

//Nastaveni-----
void setup() {
  Serial.begin(9600);

  lcd.init();
  lcd.backlight();

  pinMode(tlacitkoA, INPUT);
```

```

pinMode(tlacitkoB, INPUT);
pinMode(tlacitkoC, INPUT);
pinMode(ledA, OUTPUT);
pinMode(ledB, OUTPUT);

sensors.begin();
//Nastaveni rozliseni senzoru: 9 bit = po 0,5 C; 10 bit = po 0,25 C; 11 bit = po 0,1 C; 12 bit = po 0,01 C
sensors.setResolution(jedna, 9);
sensors.setResolution(dva, 9);
sensors.setResolution(tri, 9);
sensors.setResolution(ctyri, 9);
sensors.setResolution(pet, 9);
sensors.setResolution(sest, 9);
intro(); //prehrat intro grafiku
}

//Program -----
void loop() {

stavTlacitkoA = digitalRead(tlacitkoA); //zjist stav tlacitka A
stavTlacitkoB = digitalRead(tlacitkoB); //zjist stav tlacitka B
stavTlacitkoC = digitalRead(tlacitkoC); //zjist stav tlacitka C

lcd.setCursor(0, 0); //instrukce na lcd
lcd.print("ZADEJ POCET MERENI:");
lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print("STISKNI START");

if (stavTlacitkoB == HIGH) { //stisknuti tlac. B, nastavi delku o +1 iterace,
                             //ktera se ale ve vypoctu nasobi 10

delka++; //prida k delce +1 iterace
delay(200); //ceka 200ms kvuli debounce
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(delka*10); //vypise nastavenou delku na lcd
lcd.setCursor(4, 1);
lcd.print("iteraci");
}

if (stavTlacitkoA == HIGH) { //kdyz stisknu tlac. A, spusti se smycka která
                             //meri teploty a tlak
                             //vymazani napisu "stiskni start"
                             //napis "probiha nove mereni"

lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print(" ");
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("PROBIHA MERENI ");

Serial.print("Nove mereni: ");
for (int x = 0; x <= (delka*10); x++) { //provede pocet mereni nastavene tlacitkem B x
                                         //10 (abych dostal vetsi cislo)

lcd.setCursor(0, 3);

```

```

lcd.print(x); //vypsani aktualniho kroku mereni na lcd
digitalWrite(ledA, HIGH);

sensors.requestTemperatures(); //vyzadani mereni teploty, musi byt tady ve
//smycce, jinak nameri jen jednu teplotu

String cas = String(millis()); //vypise aktualni cas od spusteni mereni do stringu
napetiSenzor = analogRead(A0); //precte hodnotu napeti na senzoru tlaku
tlak = constrain(napetiSenzor, 0, 1023); //upravi rozsah hodnot na 0 - 1023 (prevod 0 - 5 V
//na digitalni 0 - 1023 hodnot)

tlak = map(tlak, 0, 1023, 0, 100); //prevede stupnici 0 - 1023 na 0 - 100 bar

String data = cas + "; " + sensors.getTempC(jedna) + "; " + sensors.getTempC(dva) + "; " +
sensors.getTempC(tri) + "; " + sensors.getTempC(ctyri)
+ "; " + sensors.getTempC(pet) + "; " + sensors.getTempC(sest) + "; " + tlak;

Serial.println(data); //vypise cely string do serial portu
}
delka = 0; //nastavi hodnotu zpet na vychozi, = 0
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(" "); //prepise lcd na prazdny radek
lcd.setCursor(4, 1);
lcd.print(" "); //prepise lcd na prazdny radek
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(delka); //prepise na lcd
delay(1000); //pocka pro cas na precteni
lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print(" "); //prepise lcd na prazdny radek

digitalWrite(ledA, LOW);
}

if (stavTlacitkoC == HIGH) { //pri stisku tlacitka C zobrazi aktualni teploty
lcd.clear();

digitalWrite(ledB, HIGH); //rozsviti led na znameni
sensors.requestTemperatures(); //vyzada teploty

lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("TmpA");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(sensors.getTempC(jedna));
lcd.setCursor(4, 1); //mezery mezi hodnotami teplot
lcd.print(" ");

lcd.setCursor(5, 0);
lcd.print("TmpB");
lcd.setCursor(5, 1);
lcd.print(sensors.getTempC(dva));
lcd.setCursor(9, 1);
lcd.print(" ");

```

```

lcd.setCursor(11, 0);
lcd.print("TmpC");
lcd.setCursor(11, 1);
lcd.print(sensors.getTempC(tri));
lcd.setCursor(15, 1);
lcd.print(" ");

lcd.setCursor(16, 0);
lcd.print("TmpD");
lcd.setCursor(16, 1);
lcd.print(sensors.getTempC(ctyri));

lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print("TmpE");
lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print(sensors.getTempC(pet));
lcd.setCursor(4, 3);
lcd.print(" ");

lcd.setCursor(5, 2);
lcd.print("TmpF");
lcd.setCursor(5, 3);
lcd.print(sensors.getTempC(sest));
lcd.setCursor(9, 3);
lcd.print(" ");

lcd.setCursor(11, 2);
lcd.print("TmpG");
lcd.setCursor(11, 3);
lcd.print("xxx");
lcd.setCursor(15, 3);
lcd.print(" ");

lcd.setCursor(16, 2);
lcd.print("Bar1");
lcd.setCursor(16, 3);
napetiSenzor = analogRead(A0);
tlak = constrain(napetiSenzor, 0, 1023);

tlak = map(tlak, 0, 1023, 0, 100);
lcd.print(tlak);

delay(3000);
lcd.clear();
digitalWrite(ledB, LOW);
}
}

//Pomocne funkce-----

```

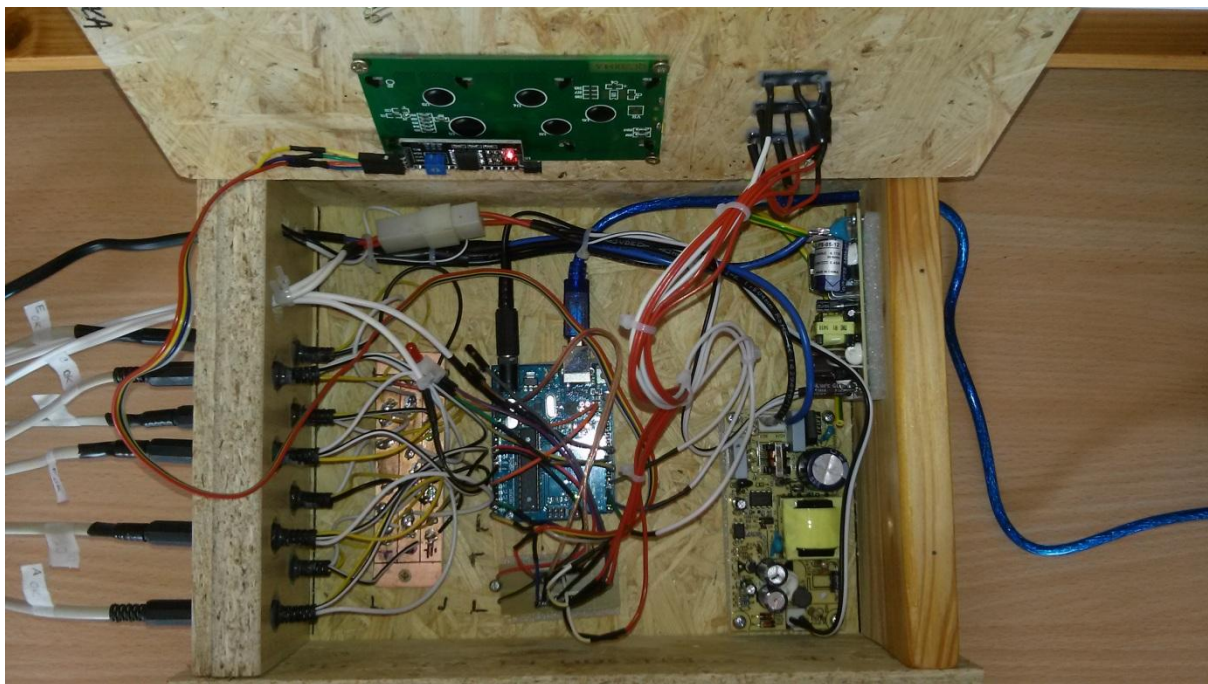
//prectehodnotu napeti na senzoru tlaku  
//upravi rozsah hodnot na 0 - 1023 (prevod 0 - 5 V  
na digitalni 0 - 1023 hodnot)  
//prevede stupnici 0 - 1023 na 0 - 100 bar

```
void intro() {  
  lcd.setCursor(0,0);  
  lcd.print("=====");  
  delay(200);  
  lcd.setCursor(0,0);  
  lcd.print("      ");  
  delay(20);  
  
  lcd.setCursor(0,1);  
  lcd.print("=====");  
  delay(200);  
  lcd.setCursor(0,1);  
  lcd.print("      ");  
  delay(20);  
  
  lcd.setCursor(0,2);  
  lcd.print("=====");  
  delay(200);  
  lcd.setCursor(0,2);  
  lcd.print("      ");  
  delay(20);  
  
  lcd.setCursor(0,3);  
  lcd.print("=====");  
  delay(200);  
  lcd.setCursor(0,3);  
  lcd.print("      ");  
  delay(20);  
  
  lcd.clear();  
}
```



## Příloha č. 2 Měřicí zařízení

Pohled na elektroniku měřicího zařízení:



Pohled na ovládací panel:

