

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**TEZE  
DISERTAČNÍ  
PRÁCE**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

Verifikace simulace vstřikování voskových modelů

*Ing. Irena Kubelková*

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Strojírenská technologie

Školitel: *doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.*

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha

únor 2019

Název anglicky:  
Verification of Wax Model Injection Simulation

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na Ústavu strojírenské technologie Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: Ing. Irena Kubelková  
Ústav strojírenské technologie, Fakulta strojní ČVUT v Praze  
Technická 4, Praha 6, 160 00

Školitel: doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.  
Ústav strojírenské technologie, Fakulta strojní ČVUT v Praze  
Technická 4, Praha 6, 160 00

Oponenti:

prof. Ing. Karel Hrbáček, DrSc. (Ústav fyziky materiálů AV ČR)  
prof. Ing. Františka Pešlová, Ph.D. (FS ČVUT v Praze)  
prof. Ing. Augustín Sládek, Ph.D. (Žilinská univerzita v Žilině)

Teze byly rozeslány dne: .....

Obhajoba disertace se koná dne ..... v ..... hod.  
v zasedací místnosti č. 17 (v přízemí) Fakulty strojní ČVUT v Praze,  
Technická 4, Praha 6  
před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Strojírenská  
technologie.

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní  
ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

Prof. Ing. Jan Suchánek, CSc.  
předseda oborové rady oboru Strojírenská technologie  
Fakulta strojní ČVUT v Praze

## **Anotace**

Tato disertační práce je zaměřena na problematiku možnosti využití numerické simulace pro predikci chování vstříkovaných voskových modelů lopatek plynových turbín. Byly zjištěny vlastnosti panenské a rekonstituované voskové směsi, které byly jako materiálový model naimportovány do simulačního softwaru Cadmould. Výsledky provedené simulace byly verifikovány pomocí výsledků z 3D skenovacího měření voskových modelů. Výzkum zveřejněný v disertační práci byl podpořen projektem TRIO č. FV10105, Výzkum zvýšení tvarové přesnosti voskových modelů pro odlitky lopatek turbodmychadel a stacionárních plynových turbín v rámci spolupráce s firmou První brněnská strojírna Velká Bíteš, a.s.

## **Klíčová slova**

Přesné lití, voskový model, numerická simulace, zkoušky voskových směsí

## **Summary**

This doctor thesis focused on the possibility of using numerical simulation for predicting the behaviour of injected wax models of gas turbine blades. The properties of the virgin and reconstituted wax mixture were found to be imported into the Cadmould simulation software as a material model. The results of the simulation were verified using the results from 3D scanning of wax models. The research published in the dissertation thesis was supported by the project TRIO No. FV10105, Research on the enhancement of the shape accuracy of wax models for turbocharger blade castings and strain gas turbines in cooperation with the company První brněnská strojírna Velká Bíteš, a.s.

## **Key words**

Investment Casting, Wax Model Pattern, Numerical Simulation, Wax test

## Obsah

1	Úvod.....	7
2	Současný stav problematiky.....	8
3	Cíle disertační práce.....	9
4	Popis řešeného dílu .....	10
5	Experimentální zjištění viskoelastických vlastností voskových směsí..	12
5.1	Zkoumání závislosti změny objemu vosku na teplotě.....	12
5.2	Měření tepelné vodivosti vzorků vosků.....	13
5.3	Určení měrné tepelné kapacity vosků.....	14
5.4	Reologické vlastnosti vosku .....	16
5.5	Měření viskozity vosků .....	18
5.6	Stanovení ohybových vlastností vosků .....	19
6	3D náměry voskových modelů lopatek .....	21
7	Simulace vstřikování.....	23
7.1	Vstupní parametry simulace .....	23
7.2	Vyhodnocení numerické simulace lopatek.....	25
7.2.1	Průběh plnění .....	25
7.2.2	Teplovní vývoj a vstřikovací tlak .....	26
7.2.3	Průběh tuhnutí .....	27
7.2.4	Analýza smrštění a deformace .....	28
7.2.5	Analýza průběhu deformací v řezech lopatkou .....	30
8	Závěr .....	32

## 1 ÚVOD

Současný rychlý rozvoj všech průmyslových odvětví a nástup Průmyslu 4.0 nutí neustále hledat nové metody, jak zpřesnit výrobu, jejíž výsledný produkt – v tomto případě odlitek, by se tak stal ještě více konkurenceschopným. Synonymem pro přesnost se ve slévárenství stala technologie přesného lití, která se však, i díky stále velkému podílu ruční práce, potýká s mnoha úskalími, kterými je třeba se zabývat.

Přesné lití je v současné době motivováno vysokou poptávkou zejména po odlitcích pro letecký a automobilový průmysl a pro výrobu plynových turbín. Právě v oblasti plynových turbín, jejichž lopatky jsou předmětem řešení v disertační práci, je pozorován celosvětový nárůst produkce, čímž je zřejmé, že technologie přesného lití bude i do budoucna stále perspektivnějším odvětvím. [1,2]

Výroba přesných odlitků klade velké nároky na preciznost výroby. Během celého procesu může dojít k ovlivnění výsledné kvality odlitku. Předložená práce se zabývá oblastí, která je pro kvalitu výroby zcela klíčová – výrobou vlastních voskových modelů. Při této operaci, která stojí na začátku celého procesu, existuje množství parametrů, které výslednou kvalitu ovlivňují a jejichž vliv je třeba za pomoci vhodných nástrojů účinně predikovat. Jedním z moderních nástrojů, používaných ve slévárnách, je numerická simulace procesu lití. Díky ní je možné, ještě před samotným zahájením výroby, nalézt všechna kritická místa daného technologického kroku, zkoumat vlivy parametrů výroby, a především nalézt a ověřit nejvhodnější řešení.

Numerická simulace se dnes běžně používá na většinu technologií odlévání. Stejně tak ji lze využít pro metodu přesného lití, avšak doposud pouze na vlastní odlévání. Na trhu jsou softwary na vstřikování plastů, avšak bez potřebných materiálových dat voskové polymerní směsi, který by se dal použít pro simulaci vstřikování voskových modelů. Disertační práce se tak zabývá možností využití stávajících numerických simulačních programů pro výrobu voskových modelů se zohledněním všech parametrů výroby, vlastností vosku a následně vyhodnocením reálné schopnosti předvídat chování voskové směsi a případného vzniku vad voskových modelů.

## 2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Disertační práce se zabývala problematikou provedení numerické simulace vstřikování voskových modelů, jelikož pro ně chybí potřebný materiálový model, a především doposud neexistuje specializovaný simulační software, který by umožnil vosky vstřikovat.

Na základě rešerše současného stavu poznání bylo zjištěno, že zkoumáním v oblasti využití numerické simulace pro výrobu voskových modelů se detailně zabývaly pouze následující výzkumy.

Rozsáhlý výzkum pro danou oblast proběhl v USA v období 1998–2001 a to v národních laboratořích Oak Ridge National Laboratory a Sandia National Laboratories pod vedením Adriana S. Sabau. Do projektu se zapojila i organizace Edison Materials Technology Center a mnoho dalších společností. Cílem bylo, v rámci celé technologie lití na vytavitelný model, vyvinout vhodné nástroje na predikci rozměrových změn. Dílčí výsledky jsou uvedené například v [3]. Výzkum byl podpořen grantem Ministerstva energetiky spojených států amerických (U. S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy).

Druhý zásadní výzkumný projekt řešila University of Birmingham ve Velké Británii v letech 1999–2002 ve spolupráci se slévárnami přesného lití a pod vedením J. Campbella. Projekt FOCAST – The Fundamentals of Investment Casting, se zabýval matematickým modelováním jednotlivých fází lití na vytavitelný model. Výsledky jsou uvedené například v [4]. Výzkum byl podpořen grantem Vědecké rady pro inženýrství a fyziku (Engineering and Physical Sciences Research Council) v hodnotě 643.000 £.

Dalšími dílčími výzkumy byly například Ivici Duretek z Montanuniversität Leoben v Rakousku či Vojtěcha Kosoura z Vysokého učení technického v Brně, (podpořeného grantem Technologické agentury České republiky), který se však zabýval využitím simulace pro predikci proudění vosku ve vstřikovacích formách [5] a nikoliv deformacemi, jimž se věnuje tato disertační práce.

Díky tomu, že velká část výsledků zmíněných výzkumů nebyla zveřejněna, či podléhá utajení, je navázání na tyto výzkumy značně ztíženo. Disertační práce tak mimo jiné umožní praktické využití získaných materiálových dat hojně využívaného vosku REMET Hyfill B478 širokou slévárenskou veřejností pro import do vlastních simulačních softwarů a položí základ pro následný praktický výzkum a uplatnění na úrovni reálných výrobních závodů.



### 3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Práce si klade za cíl, po zjištění materiálových dat voskových směsí, na numerickém simulačním programu provést simulaci vstřikování konkrétního dílu lopatky plynové turbíny, přičemž by výstupy ze simulace byly verifikovány s modely vyrobenými reálným výrobním procesem.

Zásadním úskalím uvedeného cíle jsou tedy dvě fakta: Jednak pro vstřikování vosků v současnosti neexistuje simulační program, který by byl navržený přímo pro tento účel, a za druhé tak není k dispozici materiálová databáze s potřebnými údaji o vstřikovaných voskových směsích. Tento stav je částečně dán i výrobcí vosků, jelikož neposkytují dostatečné množství informací o vlastnostech voskových směsí, aby bylo možné jejich parametry případně implementovat do simulačního softwaru. Na základě porovnání parametrů a dle dosavadních zkušeností byl pro další zkoumání zvolen software Cadmould.

Další dílčí cíle práce jsou:

- Na základě požadavků simulačního softwaru na vstupní data, sestavit a provést soubor zkoušek voskových směsí s ohledem na význam těchto výsledků pro numerickou simulaci.
- Analyzovat, na základě výsledků experimentů, rozdíl v chování panenského a rekonstituovaného vosku Remet Hyfill B478.
- Vyrobit zkušební sérii modelů lopatek plynové turbíny z panenského a z rekonstituovaného vosku Remet Hyfill B478. Následně vyhodnotit jakost vyrobených voskových modelů lopatek pomocí 3D skenovacího měření.
- Zhodnotit užití rekonstituovaného vosku Remet Hyfill B478 při zachování požadované přesnosti.
- Provést numerickou simulaci vstřikování voskového modelu lopatky z obou výše uvedených voskových směsí a verifikovat výsledky simulace s voskovými modely vyrobenými reálným vstřikovacím procesem.
- Kriticky zhodnotit možnost ovlivnění přesnosti voskového modelu lopatky lidským faktorem.

#### 4 POPIS ŘEŠENÉHO DÍLU

Předmětem zkoumání v experimentální části disertační práce je voskový model lopatky plynové turbíny. Důvodem pro výběr tohoto dílu byly značné rozdíly v tloušťkách stěn, které při tuhnutí způsobují výrazné deformace modelu. Vzhledem ke značným výrobním a časovým nákladům na zhotovení formy pro vstříkolis, je model lopatky ideálním příkladem pro praktické a efektivní využití numerické simulace.

Zkoumaná lopatka se vyrábí z panenské plněné voskové směsi společnosti Remet. Obchodní název je Hyfill B478. Druhý vosk, které se pro výrobu modelu používá a je podroben zkoumání, je rekonstituovaný vosk Hyfill B478. Jeho vlastnosti by se měly po rekonstituci přibližovat vlastnostem panenského vosku.

*Tabulka 4.1 Parametry panenského vosku Remet Hyfill B478 a rekonstituovaného vosku Remet Hyfill B478 [6, 7]*

Vlastnost	Panenský vosk Hyfill B478	Rekonstituovaný Hyfill B478
Bod skápnutí [°C]	70	Není uvedeno
Bod tuhnutí [°C]	64,5	65,5
Penetrace 25 °C [0,1 mm]	4	4
Penetrace 43,3 °C [0,1 mm]	35	37
Viskozita 80 °C [mPa.s] <sup>1</sup>	830	Není uvedeno
Viskozita 90 °C [mPa.s]	535	Není uvedeno
Viskozita 100 °C [mPa.s]	360	118,9*
Obsah popela [%]	<0,005	0,011
Obsah plniva [%]	30,4	Není uvedeno
Barva	zelená	Hnědá

\* Viskozita byla měřena při 99° C.

Zajímavé na srovnání parametrů vosků je na první pohled obsah popela. Pro panenské vosky se dle [6] udává jako maximální obsah popela 0,03 %. U rekonstituovaného Hyfill B478 je obsah popela hluboce pod tímto limitem, což dává jednu z nadějí, že by tento rekonstituovaný vosk mohl být použit i pro samotnou výrobu modelů lopatek plynových turbín.

---

<sup>1</sup> Výrobce uvádí viskozitu dle ASTM International v jednotkách cP (centipoise), což je ekvivalent pro jednotku mPa.s.

Z důvodu již zmíněných velkých deformací se při vstřikování dílu používá chladítko – zálitek, který rozdíl rozměrů modelu částečně vyrovná. Zálitek je ze stejného typu vosku jako vlastní lopatka.



Obrázek 4.1 Umístění zálitku ve vstřikovací formě

Aby bylo možné věrně simulovat proces vstřikování dílu a při vyhodnocení zohlednit všechny přídavné vlivy, tak bylo nejprve nutné zanalyzovat proces vstřikování voskových modelů. Během monitorování cyklu se zaznamenávaly časy cyklu (neměnné), vyjmutí lopatek, ponoru do vodní lázně, vyjmutí a odložení do přípravku.

Dále byla sledována teplota vody a teplota okolí. Ze získaných dat lze potvrdit, že lopatky z obou druhů vosků byly lisovány za srovnatelných podmínek.

Pro 3D skenovací měření a následné porovnání s výsledky simulace byly z vyrobených modelů vybrány lopatky dle tabulky 4.2:

Tabulka 4.2 Označení lopatek pro 3D skenovací měření

Č. modelu	Čas vyjmutí	Vosk Remet Hyfill B478	Označení
3	27 s	Zelený panenský	Z1
15	76 s	Zelený panenský	Z2
6	62 s	Hnědý rekonstituovaný	H2
8	25 s	Hnědý rekonstituovaný	H1

Pozn. 1 – Pro modely vyjmuté bez problémů a nejrychleji.

2 – Pro modely vyjmuté v sérii nejpomaleji.

Zvoleny byly z důvodu, že vždy jedna byla vyjmuta z formy za optimální dobu a druhá za dobu nejdelší. Tento rozptyl by měl tak odhalit vliv obsluhy vstřikolisu na výslednou přesnost geometrie modelu při porovnání se simulací.

## 5 EXPERIMENTÁLNÍ ZJIŠTĚNÍ VISKOELASTICKÝCH VLASTNOSTÍ VOSKOVÝCH SMĚSÍ

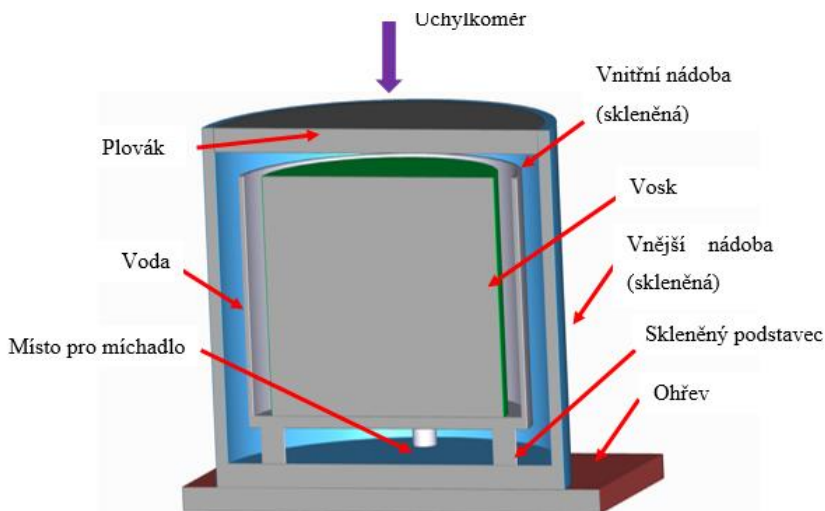
Jak již bylo zmíněno v úvodu disertační práce, tak pro provedení numerické simulace vstřikování voskových modelů je třeba znát celou řadu vlastností voskové směsi. Údaje, které poskytují výrobci voskových směsí, jsou pro účely simulace nedostatečné, a proto se další požadované parametry musí zjišťovat experimentálně.

Vzhledem k velkému množství naměřených dat, tak jsou zde uváděny především průběhy závislostí jednotlivých vlastností vosků. Všechna měření jsou číselně uvedena v disertační práci.

### 5.1 Zkoumání závislosti změny objemu vosku na teplotě

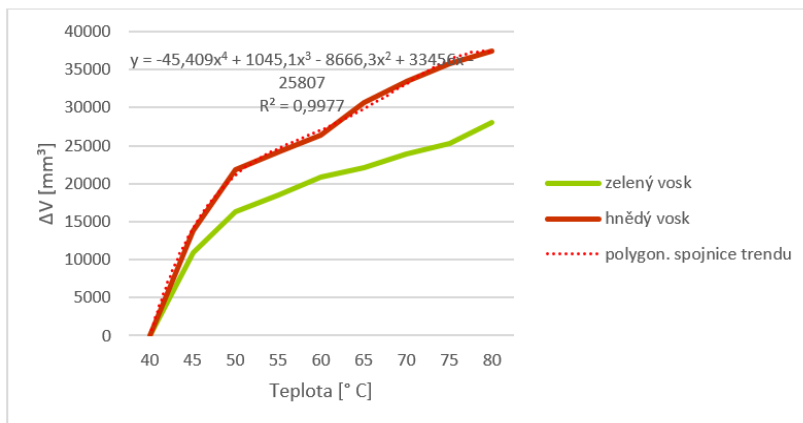
Cílem této zkoušky bylo určit závislost změny objemu vosku na teplotě. V rámci řešení disertační práce bylo navrženo a zhotoveno experimentální měřicí zařízení, které monitoruje změnu výšky vodní hladiny v závislosti na změně objemu vosku. Zjištěné hodnoty pak sloužily dále jako vstupní data pro simulaci vstřikování lopatek.

Bylo nutné stanovit závislost změny objemu vosku v závislosti na teplotě. Měření se uskutečnilo za konstantního tlaku, jelikož hodnoty se rozdílným tlakem výrazně nemění a pouze dochází k posunu křivek závislostí.



Obrázek 5.1 Návrh modelu měřicí soustavy

Principem měřicího systému na obrázku 5.1 je, že na magnetickou míchačku s ohřevem se položí skleněný válec, který bude ohřívat celou soustavu. Dovnitř, na skleněný podstavec, se umístí druhý válec, uvnitř kterého bude přesné množství roztaveného a opět zchladlého vosku (vosk se dodává ve formě čoček, jejichž tvar by výsledky ovlivňoval). Do vnější nádoby se poté nalije voda tak, aby byl celý vnitřní válec ponořen. Na hladinu se pak umístí plovák, jehož pohyb snímá úchylkoměr. [K7]



Obrázek 5.2 Závislost změny objemu vosku na teplotě [K7]

Obrázek 5.2 ukazuje hladší křivku pro změnu objemu v závislosti na teplotě u zeleného vosku. Toto je způsobeno tím, že tento vosk má odlišnou kvalitu oproti hnědému rekonstituovanému vosku, ve kterém se mohou nacházet další příměsi, které ovlivňují výsledek. Z toho mimo jiné vyplývá, že vyšší kvalita zeleného vosku má výrazný vliv na jeho objemovou stabilitu.

## 5.2 Měření tepelné vodivosti vzorků vosků

Cílem řešeného úkolu bylo změřit tepelnou vodivost vzorků zkoumaných vosků v pevném stavu při dvou teplotních úrovních. K měření tepelné vodivosti vzorků vosku byl použit přístroj KEMTHERM QTM-D3. Přístroj nastavuje velikost elektrického proudu, který prochází odporovým drátkem v sondě přístroje. Průchodem elektrického proudu se drátek zahřívá a zajišťuje tak konstantní hustotu tepelného toku do měřeného vzorku. Zpětná odezva je zajištěna měřením teploty pomocí vestavěného termočlánku. Přístroj zaznamenává časový průběh změny teploty vzorku, z něhož vyhodnocuje přímo hodnotu tepelné vodivosti.

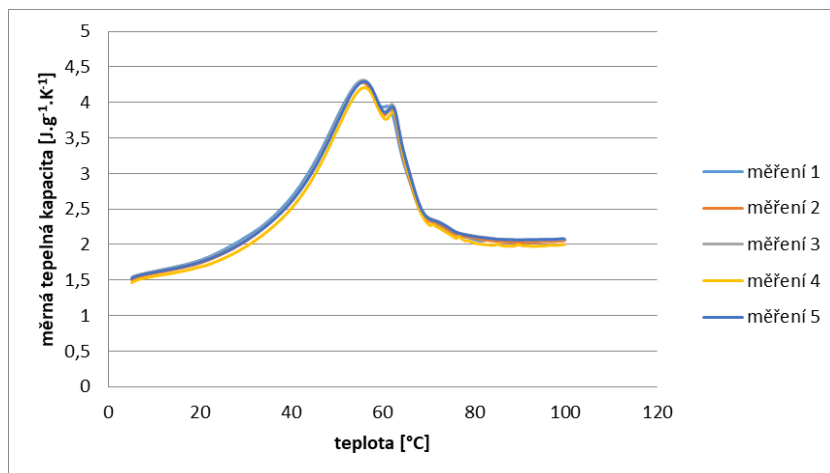
Následující tabulka 5.1 uvádí naměřená data tepelné vodivosti obou vzorků při teplotách 22 °C a 40 °C.

Tabulka 5.1 Naměřená data tepelné vodivosti obou vzorků při teplotách 22 °C a 40 °C.

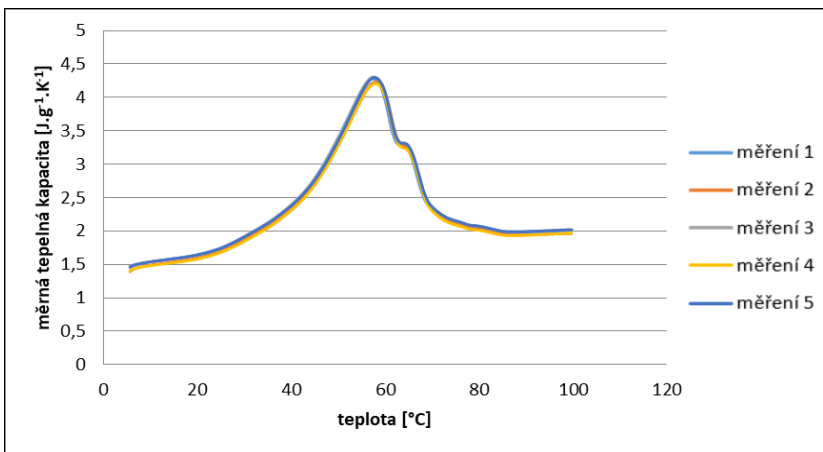
	Vosk Hyfill B-478 zelený	Vosk REMET B-478 hnědý
	Tepelná vodivost $\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	Tepelná vodivost $\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
Měření při $t = 22\text{ °C}$		
Aritmetický průměr	0,1858	0,1935
Směrodatná odchylka	0,0037	0,0033
Měření při $t = 40\text{ °C}$		
Aritmetický průměr	0,1889	0,1951
Směrodatná odchylka	0,0069	0,0062

### 5.3 Určení měrné tepelné kapacity vosků

Předmětem tohoto experimentu bylo stanovit měrnou tepelnou kapacitu vzorků vosku v závislosti na teplotě. Měrná tepelná kapacita byla měřena prostřednictvím měření celkového tepelného toku a stanovena entalpie.

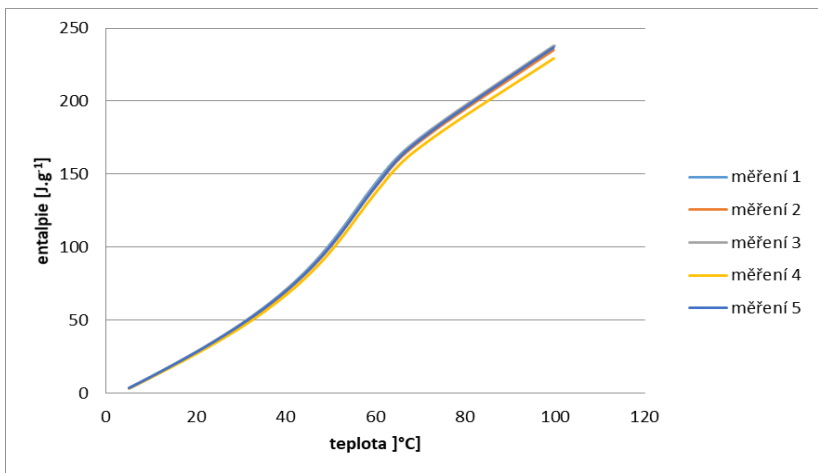


Obrázek 5.3 Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě vosku - hnědý vosk [K7]

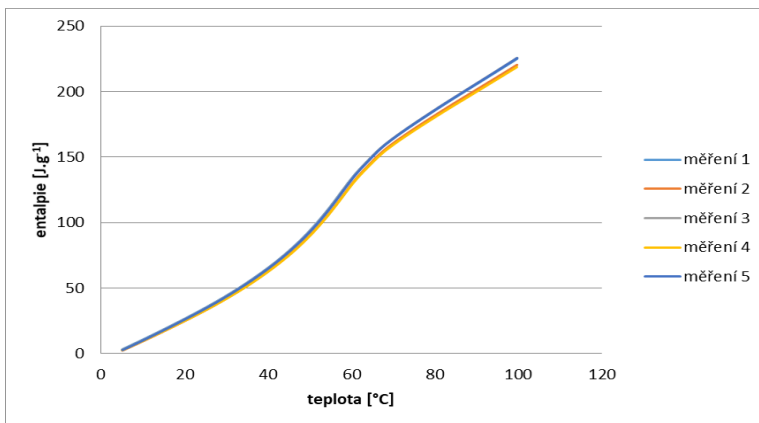


Obrázek 5.4 Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě vosku - zelený vosk [K7]

Na obrázku 5.3 a 5.4 jsou uvedeny průběhy měrné tepelné kapacity v závislosti na teplotě v rozsahu cca 5 °C až 100 °C. Je zde vidět lokální maximum měrné tepelné kapacity charakterizující fázovou změnu přechodu z pevné do kapalné fáze – tání vosku. Zde je patrný nárůst měrné tepelné kapacity, která dosahuje v oblasti nejvyššího bodu průběhu hodnot cca 4,3 J.g<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> při teplotě cca 55,7 °C u hnědého vosku a cca 58 °C u zeleného vosku. Na obrázku 5.5 a 5.6 jsou pak uvedeny průběhy entalpie.



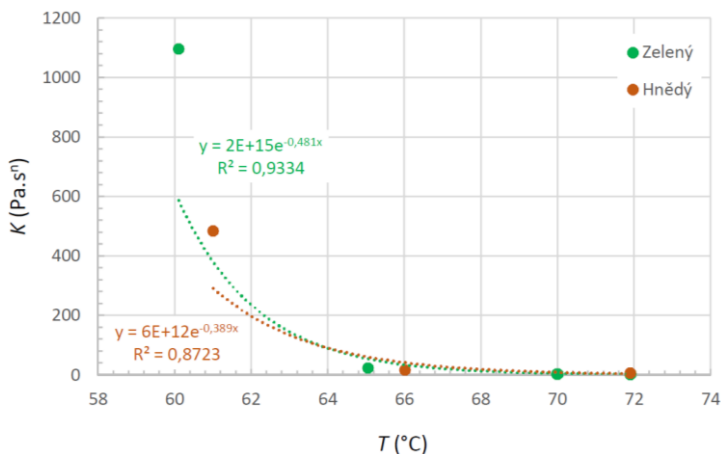
Obrázek 5.5 Závislost entalpie na teplotě vosku - hnědý vosk



Obrázek 5.6 Závislost entalpie na teplotě vosku – zelený vosk

#### 5.4 Reologické vlastnosti vosku

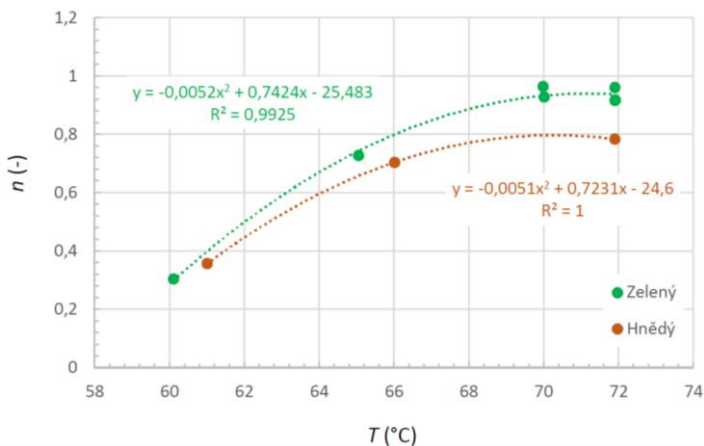
Cílem měření bylo zjistit reologické vlastnosti vzorků vosků – koeficient konzistence a index toku. Měření bylo provedeno na reometru Rheotec RC 20. Grafické znázornění závislosti koeficientu konzistence na teplotě pro oba vzorky je uvedeno na obrázku 5.7 Obvykle je možné tuto závislost popsat exponenciálním vztahem. Jak je však z grafu zřejmé, u obou vzorků exponenciální závislost naměřeným datům příliš neodpovídá. Důvodem může být změna struktury vzorku, ke které dochází při teplotách kolem 60 °C.



Obrázek 5.7 Závislost koeficientu konzistence obou vzorků na teplotě [K7]

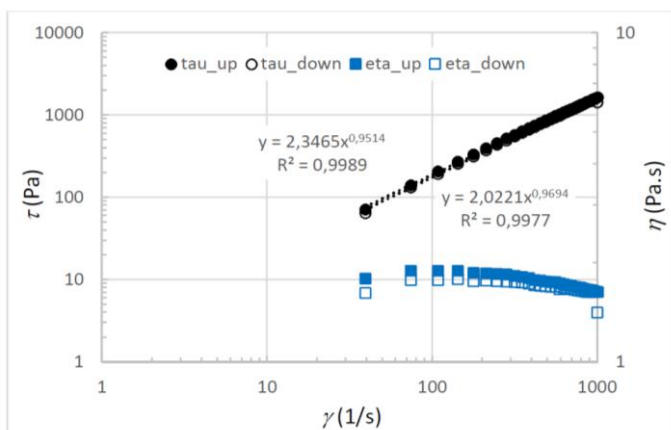


Na obrázku 5.8 je uvedena teplotní závislost indexu toku obou měřených vzorků. Jak je zřejmé, hodnota se výrazně mění, zejména při teplotách do 65 °C. Při teplotách mezi 55 °C a 65 °C evidentně dochází ke změně ve struktuře materiálu (prudký nárůst indexu toku u obou vzorků).

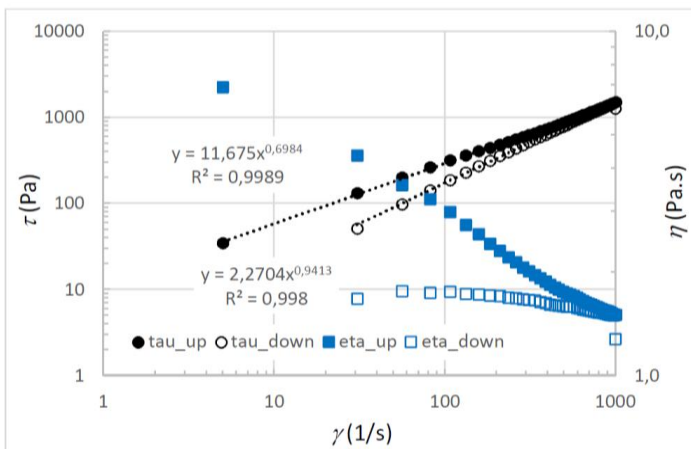


Obrázek 5.8 Závislost indexu toku obou vzorků na teplotě [K7]

Reogramy v podobě závislosti smykového napětí i zdánlivé viskozity na rychlosti smykové deformace získané pro jednotlivé teploty při měření vzorku zeleného vosku jsou podrobně uvedeny v příloze 2 disertační práce. Na obrázku 5.9 a 5.10 jsou jako příklad uvedeny reogramy pro hnědý a zelený vosk při 71,9 °C.



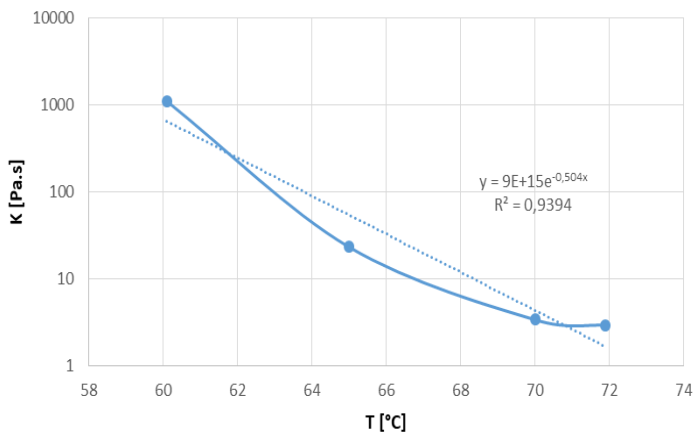
Obrázek 5.9 Reogram zeleného vosku při teplotě 71,9 °C.



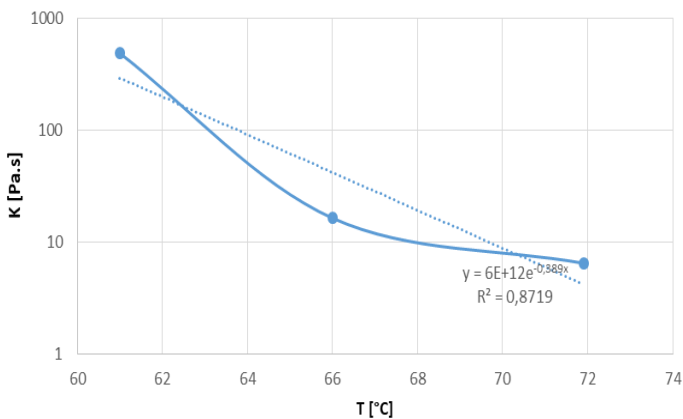
Obrázek 5.10 Reogram hnědého vosku při teplotě 71,9 °C.

### 5.5 Měření viskozity vosků

Cílem měření bylo porovnání viskozity dvou druhů vosků. Pokud se jedná o neneutonskou kapalinu, (viskozita není látkový parametr), tak je třeba měřit celou křivku toku. Viskozita byla měřena na kapilárním viskozimetru, jehož způsob měření vychází z Hagen-Poiseuilleova zákona pro laminární proudění tekutiny v trubici s kruhovým průřezem. Závislost naměřené viskozity obou vzorků na teplotě je znázorněna na obrázku 5.11 a 5.12.



Obrázek 5.11 Průběh viskozity u zeleného vosku



Obrázek 5.12 Průběh viskozity u hnědého vosku

Z naměřených výsledků je zřejmá výrazně nižší viskozita u rekonstituovaného vosku. Největší rozdíl je na začátku měření při nižších teplotách. Na konci měření se výsledky viskozity pro oba vzorky vyrovnaly.

## 5.6 Stanovení ohybových vlastností vosků

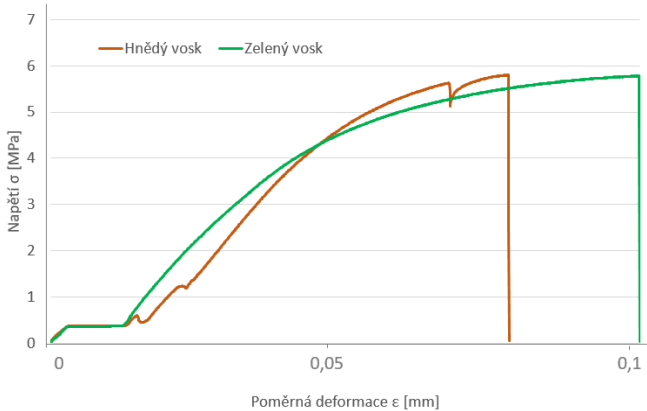
Cílem řešeného úkolu bylo zjištění ohybových vlastností vosků Remet: panenský Hyfill B478 a rekonstituovaný Hyfill B478. Nejčastěji prováděnou zkoušku mechanických vlastností u tohoto typu materiálu je zkouška ohybem. Pro měření mechanických vlastností byly zhotoveny dva druhy zkušebních těles pro oba vzorky vosků. Jednotlivé druhy vosků byly zhotovené ve formě válců (vstříkované) a kvádrů (odlévané). Pro zjednodušení jsou dále značeny jako: HV – hnědý vosk válec, HK – hnědý vosk kvádr, ZV – zelený vosk válec, ZK – zelený vosk kvádr.

V tabulce 5.2 jsou uvedeny pro srovnání pouze průměry výsledků pro oblast  $\epsilon = 0,05 - 0,25$  %. Kompletní výsledky jsou k nahlédnutí v disertační práci.

Tabulka 5.2 Výsledky modulů pružnosti voskových těles pro oba druhy vosků

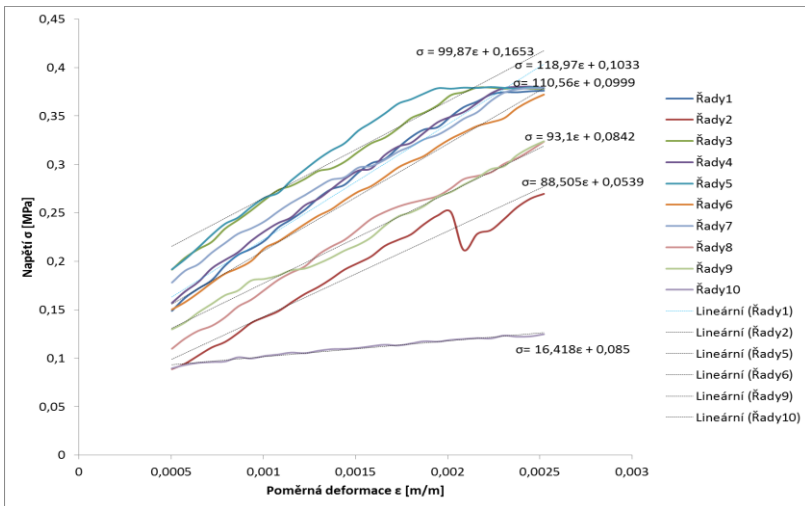
	HK	HV	ZK	ZV
eps %	0,05-0,25	0,05-0,25	0,05-0,25	0,05-0,25
Průměry [MPa]	98,0	79,3	106,8	92,7

Na základě vyhodnocení dle normy ČSN EN ISO 178 [8] bylo zjištěno, že se zkušební tělesa z panenského i z rekonstituovaného vosku zlomí před mezi kluzu.



Obrázek 5.13 Křivky napětí v ohybu  $\sigma$  vůči deformace ohybem  $\epsilon$  a průhybem  $s$  u obou druhů vosků

Jako příklad podrobného průběhu zkoušky je uveden na obrázku 5.14. Modul pružnosti  $E$  u těchto vzorků nabývá hodnot  $E = 88,5$  až  $119,0$  MPa. Průměrná hodnota je pak  $E = 101,1 \pm 2,6$  MPa.



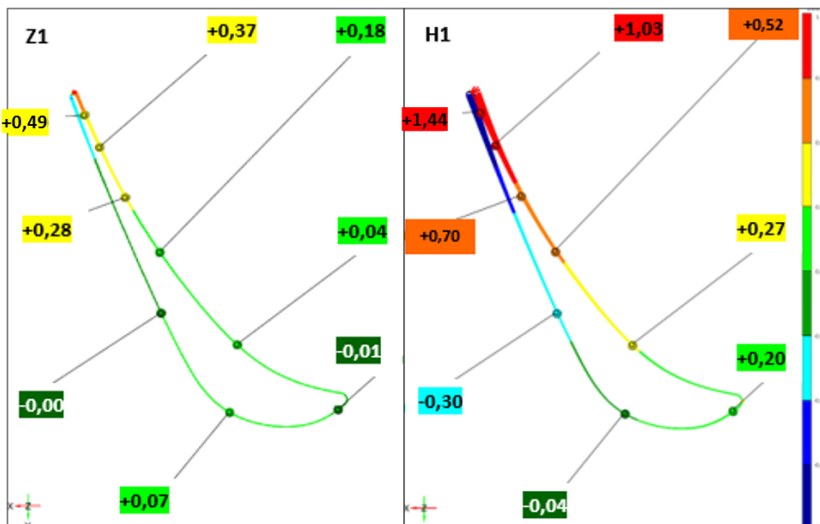
Obrázek 5.14 Závislost napětí na poměrné deformaci – vzorek ZV

V hodnotách byla zanedbána jedna extrémní křivka nabývající hodnoty  $E = 16,42$  MPa. Průběh křivky je nepravidelný, ale později nabývá tvar jako u jiných vzorků. To může být způsobeno, vzhledem k měkkosti vzorků, jejich deformací např. manipulací, ještě před samotným měřením.

## 6 3D NÁMĚRY VOSKOVÝCH MODELŮ LOPATEK

Naměřené hodnoty u voskových modelů lopatek představují rozptyl, ve kterém se rozměry lopatek při současném výrobním cyklu pohybují. Pro verifikaci simulace se následně použily voskové modely, které by měly mít teoreticky nejpřesnější rozměry tzn. ty, které byly vyjímány po nejkratší dobu – pro zelený panenský vosk Remet Hyfill B478 lopatka Z1 a pro hnědý rekonstituovaný vosk Remet Hyfill B478 lopatka H1.

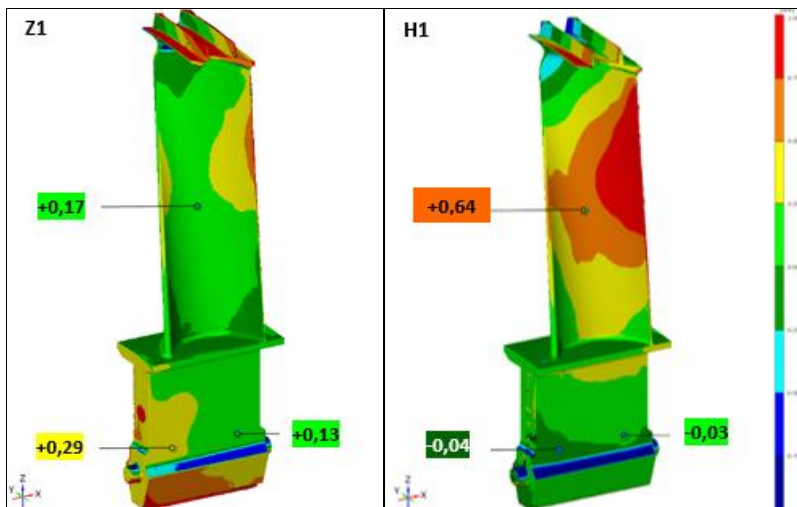
Velký rozdíl mezi naměřenými úchytkami jednotlivých vosků byl v oblasti bandáže a místa řezu 1 ( $z = 900$  mm), viz obrázek 6.1, listu lopatky, která je nejbližší této bandáži. Zatímco bandáž, z pohledu rozměrových úchytek, vykazovala u rekonstituovaného vosku menší úchytky od stanoveného CAD modelu, v řezu 1 tomu bylo přesně obráceně a lopatka z rekonstituovaného vosku byla na hranici rozměrových tolerancí.



Obrázek 6.1 Řez  $z = +900$  mm, panenský vosk Z1 a rekonstituovaný vosk H1

Pro funkčnost výsledného odlitku je však podstatná přesnost listu, který je vyráběn „na hotovo“. Oblast bandáže počítá s úchytkami, které lze vyrovnat obráběním.

Na obrázku 6.2 jsou zřetelně vidět rozsáhlejší deformace v oblasti listu u rekonstituovaného vosku. Ty jsou dány nejen deformací během vyjímání, ale především horší rozměrovou stabilitou rekonstituovaného vosku.



*Obrázek 6.2 Deformace listu modelu lopatky z panenského vosku a rekonstituovaného vosku [K4,K8]*

Dalším poznatkem bylo praskání lopatek z rekonstituovaného hnědého vosku v oblasti bandáže. Model praskal po vychladnutí ve vodní lázni v přípravku, což jasně dokazovalo větší deformace během chladnutí, než jaké jsou u zeleného panenského vosku.

Na základě provedeného měření lze jednoznačně prokázat vliv způsobu manipulace během vyjímání voskových modelů lopatek na jejich rozměrovou přesnost. U obou druhů vosků se tento vliv projevuje stejnou měrou.

## 7 SIMULACE VSTŘIKOVÁNÍ

Na základě provedených zkoušek voskových směsí a výsledků experimentální výroby lopatek byly definované vstupní parametry pro provedení simulace voskového modelu lopatky. Procesní parametry simulace byly definovány na základě reálného vstřikovacího procesu voskových lopatek.

### 7.1 Vstupní parametry simulace

Hlavními parametry, bez kterých nelze simulaci provést, jsou:

- Materiálová data pro vstřikovaný materiál

Materiálová data lze získat z materiálové databáze, kterou simulační software obsahuje, pokud je k dispozici. Druhou cestou je měření materiálových charakteristik požadovaného materiálu, jako v případě vosků zkoumaných v disertační práci.

Zjištěné vstupní parametry materiálů jsou i pro samotného výrobce softwaru nesmírně cenné, jelikož se následně uloží do materiálové databáze pro využití u dalších aplikací.

V simulaci byly použité následující zjištěné parametry vosků uvedené v tabulce 7.1:

*Tabulka 7.1 Zadané materiálové parametry vosků na základě provedených analýz*

Parametr	Zelený vosk Remet Hyfill B478	Hnědý vosk Remet Hyfill B478
Hustota – solid [ $\text{kg/m}^3$ ]	960,6	960,6
Hustota – tavenina [ $\text{kg/m}^3$ ]	885,0	885,0
Tepelná vodivost [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	0,189	0,195
Specifická tepelná kapacita [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	2532	2503
Tepelná difuzivita [ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ]	0,0843441	0,0880299
Objemová tepelná kapacita [ $\text{J}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	2,815479	2,215155
Koeficient teplotní roztažnosti [ $10^{-6}\text{K}^{-1}$ ]	389,3641	476,2831
Youngův modul [MPa]	104,3	96,8
Poissonovo číslo [1]	0,35	0,35

- Geometrie dílu

Základním vstupní parametrem simulace byl model lopatky, který byl pro danou aplikaci komplikovanější, jelikož se jedná o dva modely – zálitek a vlastní lopatka, které se skládají dohromady v jeden celek. Podstatné pro správný import modelu je, aby obě geometrie byly sjednocené do jednoho osového systému, jelikož kontaktní plochy obou modelů musí ležet „na sobě“. Dvojice zálitek – lopatka byl vždy simulován, dle skutečnosti, celý buďto z panenského, nebo z rekonstituovaného hnědého vosku

- Materiál formy včetně vtoku, temperačních kanálů atd.

Forma pro vstřikování byla dle skutečnosti definována z hliníkové slitiny včetně temperačních kanálů. Teplota temperační vody na vstupu byla 25 °C a její minimální průtoková rychlost 10 l/min. Vstřikovací forma je totožná pro oba vstřikované materiály.

- Technologické parametry

Je vhodné, pokud jsou k dispozici pro první simulaci alespoň základní procesní parametry. Pokud se jedná o novou výrobu, tak software je schopen si tyto parametry sám vypočítat a navrhnout.

*Tabulka 7.2 Parametry simulace vstřikování lopatek dle reálného cyklu*

Parametr	Hodnota
Teplota vosku [°C]	70
Doba dotlaku [s]	210
Velikost dotlaků [MPa]	34
Nastavená doba plnění [s]	80
Vypočítaná doba plnění [s]	83,7
Doba vstřikovacího cyklu[s]	335
Maximální teplota taveniny [°C]	75
Optimální teplota taveniny [°C]	68
Minimální teplota taveniny [°C]	60
Maximální teplota formy [°C]	50
Optimální teplota formy [°C]	35
Minimální teplota formy [°C]	18
No-flow teplota [°C]	55
Teplota vyjmutí modelu [°C]	40

Pro tento konkrétní výpočet numerické simulace se vycházelo z parametrů na základě reálného procesu vstřikování lopatek. Parametry uvedené v tabulce 7.2 jsou shodné pro oba typy vosků.

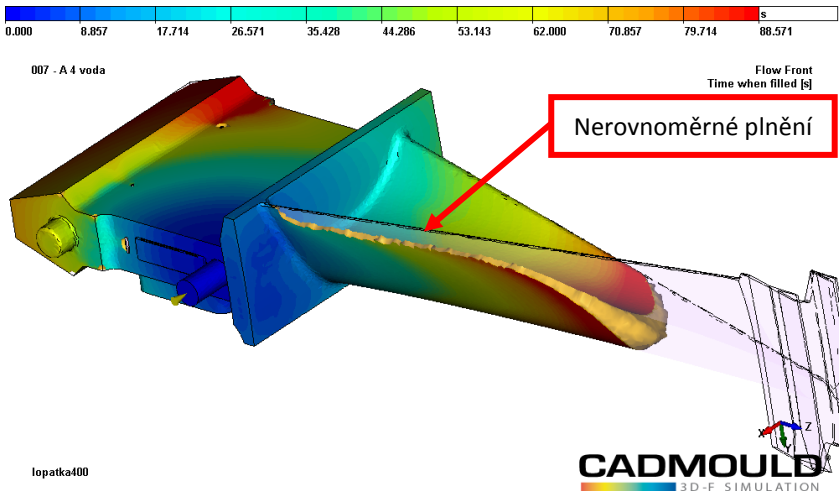


## 7.2 Vyhodnocení numerické simulace lopatek

### 7.2.1 Průběh plnění

Na základě analýzy průběhu plnění byly při plnění hnědého vosku větší problémy s plněním než u vosku zeleného. Tvarová dutina se hnědým voskem hůře zaplnila, ačkoliv pro vstřikování byly zadány shodné technologické podmínky. Byly analyzovány různě dlouhé doby plnění. Dle provedené analýzy, z hlediska úplného naplnění tvarové dutiny a mírně nižších deformací, nejlépe vyhovuje rozsah doby plnění od 55 s do 80 s, což bylo potvrzeno reálným lisovacím procesem.

Simulace průběhu plnění odhalila problémy s nerovnoměrným plněním a místy s nebezpečným uzavíráním vzduchu. Toto se projevilo u obou vosků, přičemž u hnědého vosku jsou tyto negativní jevy podstatně markantnější.

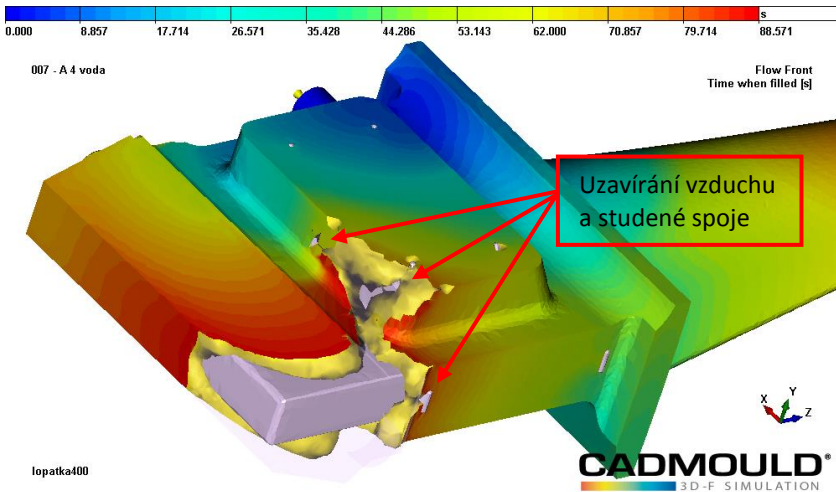


Obrázek 7.1 Nerovnoměrné plnění zeleného vosku

Nerovnoměrné plnění na obrázku 7.1 v místě na boku listu se projevilo u obou vosků. Zelený vosk toto chování vykazoval, avšak i tak dokázal dutinu formy zcela zaplnit. U hnědého vosku se tento problém projevil i u 3D náměrů. V případě hnědého vosku byl průběh plnění, zejména v nejtěsnějších částech lopatky, ještě více nerovnoměrný. Na obrázku 7.1 je vidět zřetelné rozkolísané čelo proudu vosku.

Analýza plnění odhalila riziková místa pro vznik studených spojů a uzavírání vzduchu. Jedná se především o místo v zámku lopatky. Toto je třeba v reálném lisovacím procesu řešit jednou z mnoha úprav vstřikovací formy

lopatky. Další snímky z průběhu plnění a vzniku studených spojů jsou v příloze 6 disertační práce.



Obrázek 7.2 Místa vzniku studených spojů při vstřikování zeleného vosku [K7]

Na základě provedené analýzy lze určit optimální dobu plnění pro oba vosky od 47 s po 87 s. V reálném vstřikovacím procesu je doba plnění 60 s, čímž je potvrzena správnost výsledku simulace.

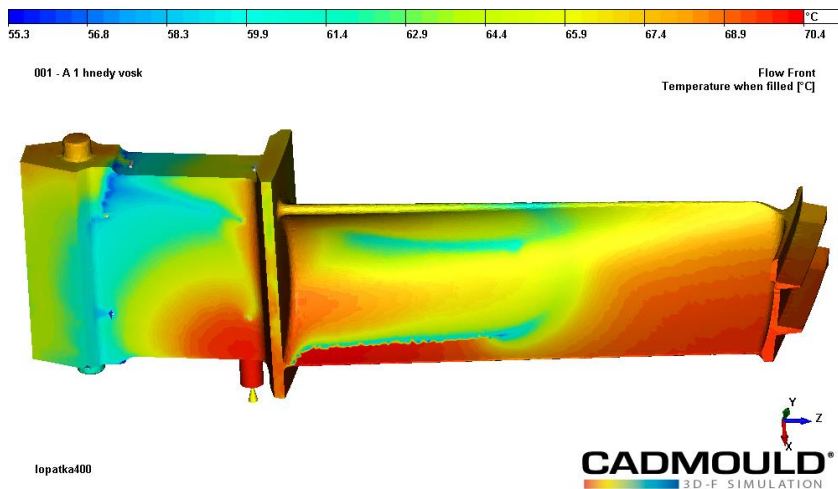
### 7.2.2 Teplotní vývoj a vstřikovací tlak

Analýza numerické simulace dále odhalila rozdíly mezi teplotním vývojem hnědého a zeleného vosku od začátku fáze dotlaku. Průběh teplotního vývoje během plnění je srovnatelný, co je dáno i krátkým časovým intervalem. Pokles teploty ve vstřikovaném díle je rychlejší u zeleného vosku, ačkoliv je No-flow<sup>2</sup> (NF) teplota u zeleného vosku vyšší. Tato vlastnost rychlejšího poklesu teploty je důležitá z hlediska následných deformací ještě zcela nevychladlé lopatky během manipulace. Zelený vosk tak vykazuje příznivější vývoj než vosk hnědý. Průběhy teplotního vývoje jsou k nahlédnutí v disertační práci.

---

<sup>2</sup> Teplota, při které vosk již nemůže proudit. Měří se kapilární rheometrem a je to teplota, při které vosk přestane vytékat.

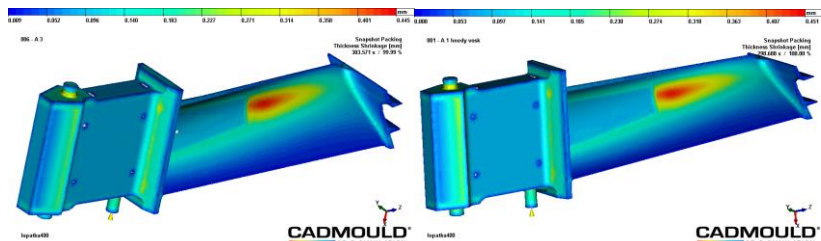
Při analýze teploty na čele proudícího vosku bylo zjištěno, že tato teplota je proměnlivá v závislosti na různé rychlosti proudění taveniny výrazně rozdílnými tloušťkami stěn. Průběh teplot vosku v řezu lopatkou v dobách cyklu 55 s, 120 s, a 240 s jsou uvedené v příloze 3 disertační práce.



Obrázek 7.3 Teplota na čele proudícího hnědého vosku

### 7.2.3 Průběh tuhnutí

Na základě analýzy průběhu tuhnutí vosku, v procentu zatuhlých vrstev od konce plnění, bylo zjištěno kritické místo nad koncem zálitku na listu lopatky. Toto místo pak bylo vyhodnoceno jako kritické místo pro vznik propadů i na základě prvotní analýzy tlouštěk stěn v programu Solidworks. Tato predikce se potvrdila při vlastní analýze propadů lopatky u simulace obou vosků.

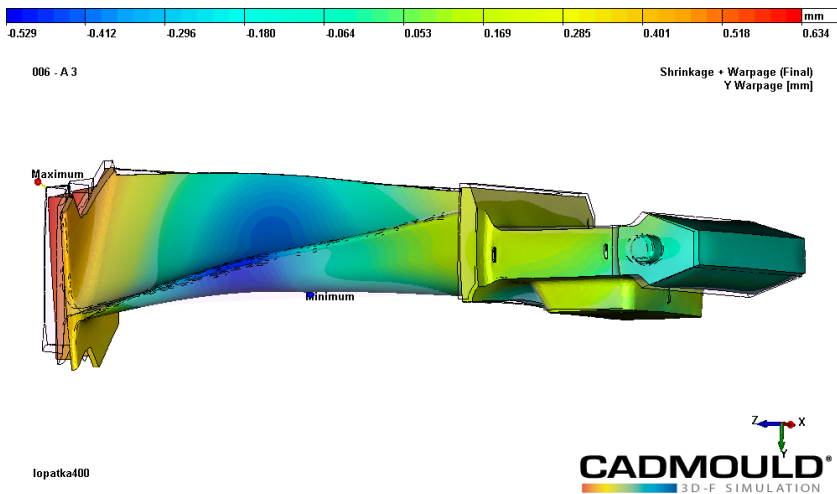


Obrázek 7.4 Propady u zeleného (vlevo) a hnědého vosku (vpravo)[K5]

Maximální propady se u obou vosku nacházely shodně z vnější části listu lopatky. Největší hodnotu propadu vykazovala lopatka z hnědého vosku a to 0,451 mm. Zelená lopatka měla maximální propad 0,445 mm.

#### 7.2.4 Analýza smrštění a deformace

Získané deformační stavy byly převedeny na ekvivalentní jednoosý deformační stav a analyzovány jednotlivé redukované deformace. Redukovanou deformací je myšlen stav, kdy od vypočítaného smrštění a deformace je „odečten“ rozměrový vliv průměrného smrštění. Jinými slovy se jedná o deformace vůči konstrukci upravené o vypočítané průměrné smrštění. Všechny deformační výsledky se vztahují k fixaci konstrukcí v jejich těžištích. Zobrazení deformačních pohybů je provedeno jako 9násobek skutečně vypočítaných výsledků.

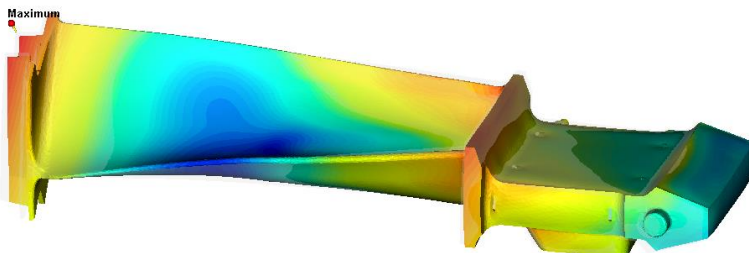


Obrázek 7.5 Redukovaná deformace Y – zelený vosk



002 - A 2 hnědý vosk

Shrinkage + Warpage (Final)  
Y Warpage [mm]

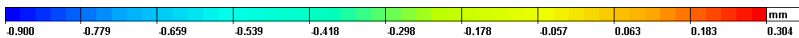


lopatka400



Obrázek 7.6 Redukovaná deformace Y – hnědý vosk

Deformace voskové lopatky souvisí s velmi proměnlivou tloušťkou stěn konstrukce lopatky a s jejím zálitkem.



006 - A 3

Shrinkage + Warpage (Final)  
Z Warpage [mm]

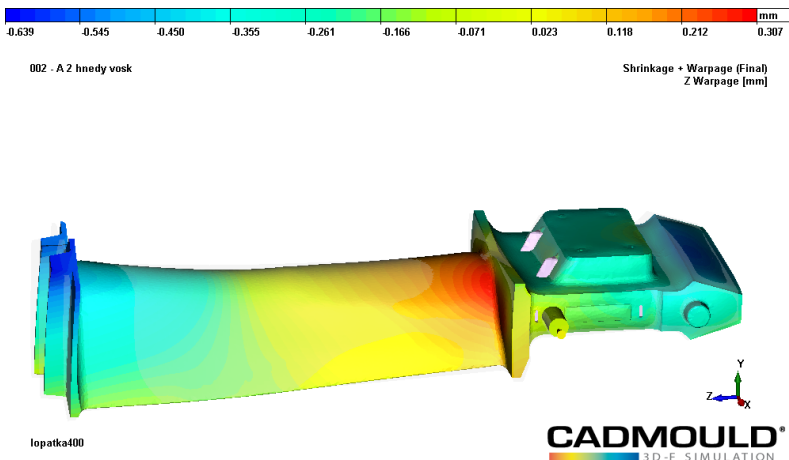


lopatka400



Obrázek 7.7 Redukovaná deformace Z – zelený vosk

Vypočítané průměrné smrštění pro hnědý vosk bylo 0,77 %, pro zelený vosk 0,9%, nicméně tento výsledek se neprojevil deformačním chováním lopatky.

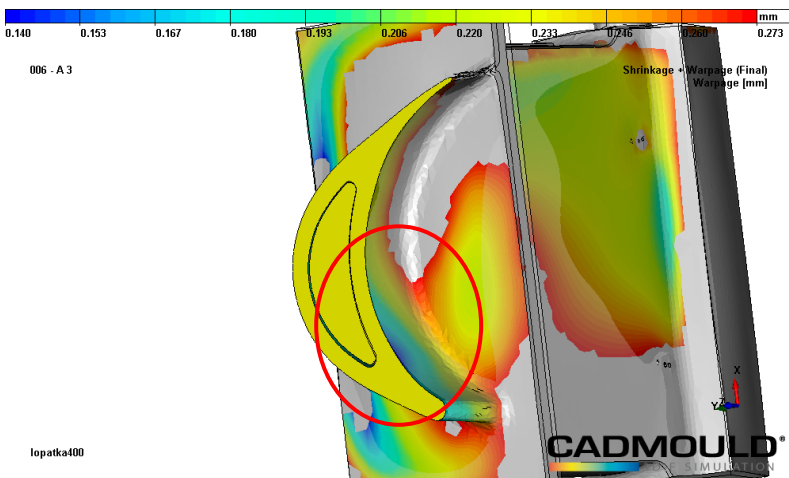


Obrázek 7.8 Redukovaná deformace Z – hnědý vosk

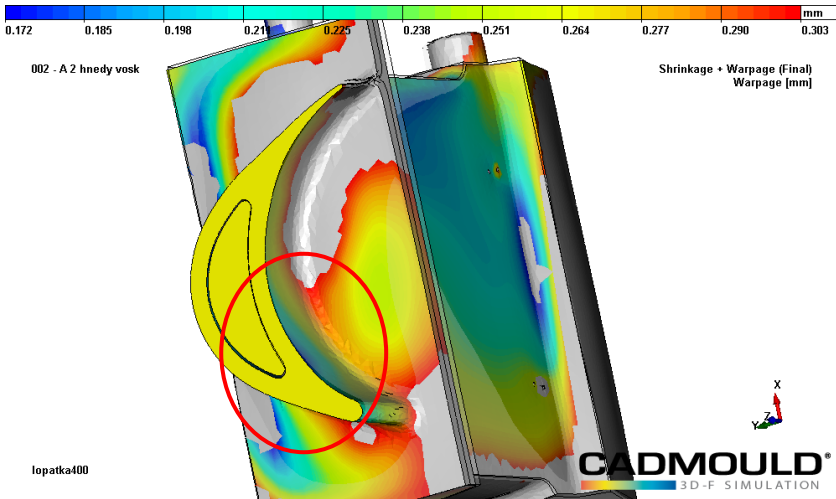
Výsledné deformace se vztahují k okamžiku, kdy se teploty vosku vyrovnaly s teplotou okolí a software již nemá co dále počítat.

### 7.2.5 Analýza průběhu deformací v řezech lopatkou

Uvedené výsledky jsou limitovány zobrazovací schopností programu Cadmould pro daný účel a také faktem, že lopatky jsou, kvůli chybějícím vyhazovačům, během vyjímání deformovány.



Obrázek 7.9 Řez 3: z = +720 mm, zelený vosk (simulace)



Obrázek 7.10 Řez 3:  $z = +720$  mm, hnědý vosk (simulace)

Dle předpokladu, je velikost maximální úchytky u řezu tj. 0,172 mm u hnědého vosku, větší než vypočtená úchytky u zeleného vosku a to 0,14 mm.

Simulací bylo ověřeno, že při porovnání průběhu simulovaných deformací a naměřených deformací je největší hodnota úchytky na vnitřní straně listu lopatky. Její hodnota je však ovlivněna obtížným vyjímáním modelu z formy. Bude-li do budoucna forma opatřena vyhazovači, lze předpokládat, že se hodnoty budou více blížit skutečnosti.

Na základě vyhodnocení simulace lze tvrdit, že průběhy deformací odpovídají skutečně naměřeným hodnotám. Jejich hodnoty je však třeba 2-3 násobit.

## 8 ZÁVĚR

V disertační práci byl pro simulování vstřikování voskového modelu lopatky plynové turbíny použit simulační software Cadmould 3D-F a provedena numerická simulace vstřikování voskového modelu. Simulační program Cadmould 3D-F, byl zvolen z toho důvodu, že i když je původně určen pro vstřikování plastů, tak vosková směs, zkoumaná v této práci, má příbuzné vlastnosti. Po naimportování materiálových dat byla proveden numerická simulace a verifikována s výsledky ze 3D skenovacího měření lopatky z reálného výrobního procesu. *Tím byl hlavní cíl práce splněn.*

Splnění dílčích cílů práce:

- Na základě požadavků simulačního softwaru na vstupní data, sestavit a provést soubor zkoušek voskových směsí s ohledem na význam těchto výsledků pro numerickou simulaci.

Pro numerickou simulaci v simulačním softwaru Cadmould 3D-F lze vstupní parametry rozdělit do skupin, dle svých výstupů:

1. Materiálová data pro vstřikovaný materiál
2. Geometrie dílu
3. Materiál formy, vtok, temperačních kanálů atd.
4. Technologické procesní parametry

Nutné materiálové parametry pro panenský vosk Remet Hyfill B478 a rekonstituovaný vosk Remet Hyfill B478 pro provedení simulace jsou tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita, reologické vlastnosti, viskozita, mechanické vlastnosti vosků (zejména Youngův modul pružnosti) a závislost změny objemu na teplotě vosku, pro kterou byla navržena experimentální aparatura. Vzhledem k velkému množství zjištěných dat, jsou konkrétní hodnoty blíže k nahlédnutí v kapitole 6 disertační práce. *Tímto byl dílčí cíl splněn.*

- Analyzovat, na základě výsledků experimentů, rozdíl v chování panenského a rekonstituovaného vosku Remet Hyfill B478.

Rozdíl mezi voskem panenským a rekonstituovaným jednoznačně dokazují hodnoty provedených měření, které se vzájemně lišily. Rekonstituovaný vosk vykazoval ve všech měřeních odlišné parametry než vosk panenský.



Skutečný rozdíl v chování pak vyplývá zejména z 3D náměrů a výsledků numerické simulace. [K3][K8] *Dílčí cíl byl splněn.*

- Vyrobit zkušební sérii modelů lopatek plynové turbíny z panenského a z rekonstituovaného Remet Hyfill B478. Následně vyhodnotit jakost vyrobených voskových modelů lopatek pomocí 3D skenovacího měření.

Z panenského vosku Remet Hyfill B478 byla vyrobena zkušební série 18 kusů lopatek. Z vosku rekonstituovaného bylo vyrobeno 11 kusů lopatek plynové turbíny. Obě série byly vyráběny za stejných procesních parametrů. [K4]

Podle provedených 3D náměrů a simulací je voskový model lopatky, již z podstaty své proměnlivé geometrie, velmi náchylný na vznik deformací oblasti listu. Rekonstituovaný vosk není garantován výrobcem, a tak panuje obava z jeho kolísavé kvality, která je ještě podpořena rozptylem naměřených hodnot u 3D skenovacího měření. Rekonstituovaný vosk vykazuje větší deformace, které byly i potvrzeny numerickou simulací. Dle předpokladů se u lopatek z obou druhů vosků projevily, v závislosti na délce vyjímání ze vstřikovací formy, deformace ve střední části listu a v oblasti bandáže. Lopatky, které byly vyjmuty jako Z1 a H1 vyhovují rozměrovým tolerancím a lze je použít pro další výrobu. *Dílčí cíl byl splněn.*

- Zhodnotit užití rekonstituovaného vosku Remet Hyfill B478 při zachování požadované přesnosti.

Vzhledem k tomu, že technologický postup výroby zkoumané lopatky plynové turbíny zahrnuje mnoho kroků, kterými výrobní cena stoupá, tak pro spolehlivost výroby taktó náročného voskového modelu, který stojí na začátku celého výrobního cyklu, je jistější volit cestu garantované úrovně kvality vosku, jako je tomu u vosku panenského. Rekonstituovaný vosk lze obecně s jistotou používat pro geometricky a technologicky méně náročné modely. Vhodné uplatnění je pro výrobu vtoků a technologických částí. *Dílčí cíl byl splněn.*

- Provést numerickou simulaci vstřikování voskového modelu lopatky a verifikovat výsledky simulace s voskovými modely vyrobenými reálným vstřikovacím procesem.

Numerická simulace potvrdila přítomnost dvou kritických míst na modelech lopatek – oblast střední části listu a oblast bandáže. Dále upozornila na problematické doplnění hrany tvaru listu u hnědého vosku. V zámkové

části u obou lopatek docházelo k uzavírání vzduchu a nacházejí se zde místa s rizikem vzniku studených spojů. [K2] *Dílčí cíl byl splněn.*

Výsledky simulace predikovaly kritická místa v oblasti střední části listu a bandáže, která 3D skenovací měření potvrdilo. Vyčíslené odchylky byly řádově srovnatelné s výsledky simulace. Pro voskový model je kritický především průběh deformací a deformační místa, která byla u skenovacího měření a simulace totožná. *Tímto byl dílčí cíl splněn.*

- Kriticky zhodnotit možnost ovlivnění přesnosti voskového modelu lopatky lidským faktorem.

Rozměrovou přesnost lopatky, zejména pak v oblasti natočení listu, lze významně ovlivnit operátorem výroby při vyjímání lopatky ze vstřikovací formy. Způsobené deformace obsluhou vstřikolisu prokázalo 3D skenovací měření, při kterém modely lopatek, které byly obtížně vyjímány, vykazovaly větší rozměrové úchylny. [K13] Lopatka H2 dokonce v několika krajních bodech hrany listu vykazovala hodnoty mimo rozměrovou toleranci. Důvodem pro vznik deformací při vyjímání je fakt, že voskový model je v této fázi ještě teplý, vosk není zcela zasíťovaný, a tudíž je náchylný na deformace. Problém s vyjímáním by pomohlo osazení vstřikovací formy vyhazovači, což by znamenalo značný zásah do konstrukce formy. *Tímto byl dílčí cíl splněn.*

Na základě provedených experimentů a po vyhodnocení jak voskových modelů lopatek, tak výsledků numerické simulace, lze tvrdit, že na numerickém simulačním softwaru Cadmould 3D- F, je možné, po zjištění materiálových dat vstřikované voskové směsi, simulovat vstřikování konkrétního voskového modelu lopatky plynové turbíny. Tématika zkoumaná v této práci je velmi komplexní. Existuje několik způsobů, jak by bylo možné dále na práci navázat. Jednou z možností je simulovat v ověřeném programu Cadmould 3D-F další typy voskových modelů a porovnat je s reálně naměřenými hodnotami deformací. Další možností návaznosti na disertační práce je ověření výstupů z dalších simulačních softwarů, které je podmíněno rozšířením souboru zkoušek vosků v závislosti na požadavcích konkrétního programu. Úskalí tohoto směru představuje dostupnost experimentů a především vlastnictví či alespoň dosažitelnost jednotlivých simulačních programů. Dále se nabízí možnost ověření postupů na jiných voskových směsích, což však znamená opakování všech provedených experimentů a vzhledem k faktu, že v participující slévárně se používá pouze jeden typ vosku, tak je tato možnost v současnosti velmi omezená.

Publikace související s tématem disertace

- [K1] **KUBELKOVÁ, I.**, HERMAN, A., Test Methods for Investment Casting Filled Wax, *Book of Proceeding from Conference Technological Forum 2017*. Technological forum 2017. Špindlerův Mlýn, 2017, s. 204-210. ISBN 978-80-87583-22-7.
- [K2] **KUBELKOVÁ, I.**, HERMAN, A., VRÁTNÝ, O., Evaluation of Critical Places on Wax Patterns of Blades. 1126-1135. 28 TH *Daaam International Symposium On Intelligent Manufacturing And Automation*. Zadar, 08.11.2017 - 10.11.2017. Vienna: DAAAM International. 2017, s. 1126-1135. ISSN 1726-9679. ISBN 978-3-902734-11-2. DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.157
- [K3] HERMAN, A., VRÁTNÝ, O., **KUBELKOVÁ, I.**, BEDNÁŘ, B., ŠTOURAC, F., V., Výroba série lopatek T400D468, *Výzkumná zpráva, U12133/2017/026*, Vydáno ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 12/2017, 43 str.
- [K4] HERMAN, A., VRÁTNÝ, O., **KUBELKOVÁ, I.**, BEDNÁŘ, B., ŠTOURAC, F., V., Shrnující zpráva za rok 2017 FV10105, *Výzkumná zpráva, U12133/2017/030*, Vydáno ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 12/2017, 7 str.
- [K5] VRÁTNÝ, O., HERMAN, A., **KUBELKOVÁ, I.**, The Application Of Thermographic Diagnostic In Investment Casting Process, *Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium*, pp.1118-1125, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-11-2, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.156.
- [K6] **KUBELKOVÁ, I.**, HERMAN, A., VRÁTNÝ, O., Monitoring of manufacture stability of large turbine blades using infrared thermography (IRT) in investment casting technology. 2018. *Archives of Foundry Engineering*. ISSN 1897-3310. DOI 10.24425/123624.
- [K7] **KUBELKOVÁ, I.**, HERMAN, A., Determination of the simulation parameters of the waxes used in investment casting. 2018. *Proceedings of the 29th DAAAM International Symposium*, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, Vienna, Austria ISBN 978-3-902734-11-2, ISSN 1726-9679. (in print – indexed in SCOPUS)

- [K8] **KUBELKOVÁ, I., HERMAN, A.,** Evaluation of wax blade injection simulation. *Book of Proceeding from Conference Technological Forum 2018*. Technological forum 2018. Dubovice, 2018, 239 s. ISBN 978-80-87583-26-5.
- [K9] **KUBELKOVÁ, I., HERMAN, A.,** Examination of the dependence of changing volume of waxes on the temperature, *Book of Proceeding from Conference Technological Forum 2018*, Technological forum 2018. Dubovice 2018, 239 s. ISBN 978-80-87583-26-5.
- [K10] **KUBELKOVÁ, I., HERMAN, A., KUBELKA, M.,** Verify the characteristic of Investment Casting Filled Wax. In: *International Conference on Innovative Technologies 2017*. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2017. ISSN 0184-9069.
- [K11] HERMAN, A., VRÁTNÝ, O., **KUBELKOVÁ, I.,** BEDNÁŘ, B., Influence of manufacture process parameters for dimensional stability small blades casting. 2018, *Manufacturing Technology*, ISSN 1213-2489. (in print – indexed in SCOPUS)
- [K12] HERMAN, A., VRÁTNÝ, O., **KUBELKOVÁ, I.,** BEDNÁŘ, B., ŠTOURAC, F., V., Viskoelastické vlastnosti voskových směsí. Velká Bíteš, *Výzkumná zpráva, U12133/2017/024*, 2017.
- [K13] HERMAN, A., VRÁTNÝ, O., **KUBELKOVÁ, I.,** Vyhodnocení kritických míst na voskových modelech lopatek. Velká Bíteš: *Výzkumná zpráva U12133/2016/006*, 2016.
- [K14] **KUBELKOVÁ, I., HERMAN, A.,** Examination of the dependence of changing volume of waxes on the temperature. 2018. *Acta Polytechnika*, ISSN 1210-2709. (in print – indexed in WoS)
- [K15] HERMAN, A., VRÁTNÝ, O., **KUBELKOVÁ, I.,** BEDNÁŘ, B., ŠTOURAC, F., V., Ověření technologie výroby lopatky T400D468, lopatky MS 3002-2 a segmentu 2. řada. *Výzkumná zpráva* Praha: ČVUT FS, Ústav strojírenské technologie, 2018. Zpráva č. U12133/2018/054.
- [K16] HERMAN, A., VRÁTNÝ, O., **KUBELKOVÁ, I.,** BEDNÁŘ, B., ŠTOURAC, F., V., Analýza výroby voskových modelů a návrhy změn dle plánu pro rok 2018. *Výzkumná zpráva*, Praha: ČVUT FS, Ústav strojírenské technologie, 2018. Zpráva č. U12133/2018/028.

## Seznam použité literatury v tezích

- [1] WILLIAMS, R., *World Investment Casting Market Review*. April 2018. EICF International Conference Porto.
- [2] SATA, D. A., (2014). *Scope of Investment Castings Supported by Survey of Foundries in Rajkot Cluster*. Indian Foundry Journal. 60.
- [3] SABAU, A. S. a S VISWANATHAN. Material properties for predicting wax pattern dimensions in investment casting. *Materials Science and Engineering: A*. 2003, Volume 362, Issues 1–2, s. 125-134. ISSN 0921-5093, Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00569-0](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00569-0).
- [4] Gebelin, J. C., Jolly, M., Gandin, Ch. A., Bellet, M., Allison, J., *Modelling of wax pattern injection process of investment casting. Proceedings of the Eleventh International Conference on Modelling of Casting Welding and Advanced Solidification Processes XI (MCEASPIXI)*, 28/03/06, 2006
- [5] KOSOUR, V., *Využití numerické simulace k optimalizaci výroby voskových modelů*. Brno, 2012. *Disertační práce*. VUT v Brně.
- [6] Test Certificate: Hyfill B478. Rochester, Great Britain: Remet UK, 2018.
- [7] Test Certificate: reclaim Hyfill B478. Rochester, Great Britain: Remet UK, 2017.
- [8] ČSN EN ISO 178: *Plasty - Stanovení ohybových vlastností*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 24 s.