

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie

DISERTAČNÍ PRÁCE

Verifikace simulace vstřikování voskových modelů

Autor: Ing. Irena Kubelková

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

Studijní obor: Strojírenská technologie

Praha 2019

Poděkování

Ráda bych poděkovala svému školiteli, doc. Ing. Aleši Hermanovi, Ph.D. za vedení disertační práce a především za cenné připomínky a rady. Velké poděkování patří všem pracovníkům PBS Velká Bíteš – Divize přesného lití za poskytnutí prostoru a materiálů pro vznik této práce. Na závěr bych ráda poděkovala svému manželovi Ing. Martinu Kubelkovi, Ph.D., IWE a svým rodičům za morální podporu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou disertační práci vypracovala samostatně s využitím odborné literatury, podkladů, na základě konzultací a pod vedením mého školitele pana doc. Ing. Aleše Hermana, Ph.D.

V Praze, dne 1. 3. 2019

.....

Ing. Irena Kubelková

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 Remet Hyfill B478, 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 Remet Hyfill B478 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.....	9
2	Voskové směsi a jejich zkoušení.....	12
2.1	Voskové směsi.....	12
2.1.1	Složení voskových směsí	12
2.1.2	Vosky	13
2.1.3	Pryskyřice.....	13
2.1.4	Polymery	14
2.1.5	Plniva.....	14
2.1.6	Vosky na výrobu modelů	14
2.1.7	Vosky na vtokové soustavy.....	15
2.1.8	Speciální vosky	15
2.1.9	Regenerace a rekonstituce vosků	15
2.2	Zkoušky voskových směsí.....	16
2.2.1	Standardizované zkoušky	16
2.2.2	Zkoušky mechanických vlastností	19
2.2.3	Zkoušky fyzikálních vlastností.....	20
2.2.4	Zkoušky technologických vlastností	21
2.2.5	Speciální zkoušky voskových směsí	21
3	Numerické simulace vstřikování voskových směsí	24
3.1	Princip numerické simulace.....	24
3.1.1	Struktura procesu simulace	24
3.1.2	Rozdělení numerických metod.....	25
3.1.3	Fyzikální popis simulací.....	27
3.1.4	Viskoelastický model	27
3.2	Softwary pro numerickou simulaci.....	30
3.3	Simulační program Cadmould® 3D-F	32

3.3.1	Vstupní parametry programu Cadmould 3D-F	33
4	Cíle práce.....	35
5	Popis řešeného dílu.....	37
5.1	Rozměry lopatky.....	37
5.2	Parametry výroby voskových modelů lopatek	39
5.3	Druh použitého vosku.....	45
6	Experimentální zjištění viskoelastických vlastností voskových směsí	47
6.1	Zkoumání závislosti změny objemu vosku na teplotě.....	47
6.1.1	Popis použitého vybavení, vzorků a metodiky při zkoumání závislosti změny objemu vosků na teplotě.....	47
6.1.2	Postup měření zkoumání závislosti změny objemu vosků na teplotě	49
6.1.3	Výsledky zkoumání závislosti změny objemu vosků na teplotě.....	50
6.2	Měření tepelné vodivosti vzorků vosků.....	52
6.2.1	Popis použitého vybavení, vzorků a metodiky při měření tepelné vodivosti.....	52
6.2.2	Postup měření tepelné vodivosti	55
6.2.3	Výsledky měření tepelné vodivosti	55
6.3	Určení měrné tepelné kapacity vosků.....	56
6.3.1	Popis použitého vybavení, vzorků a metodiky při určení měrné tepelné kapacity vosků	56
6.3.2	Postup měření při určení měrné tepelné kapacity vosků.....	56
6.3.3	Výsledky měření pro určení měrné tepelné kapacity vosků	56
6.4	Reologické vlastnosti vosku	59
6.4.1	Popis použitého vybavení, vzorků a metodiky pro stanovení reologických vlastností.....	59
6.4.2	Postup měření při zjišťování reologických vlastností	59
6.4.3	Výsledky měření tepelné vodivosti	59
6.5	Měření viskozity vosků	64
6.5.1	Popis použitého vybavení, vzorků a metodiky při měření viskozity vosků.....	64

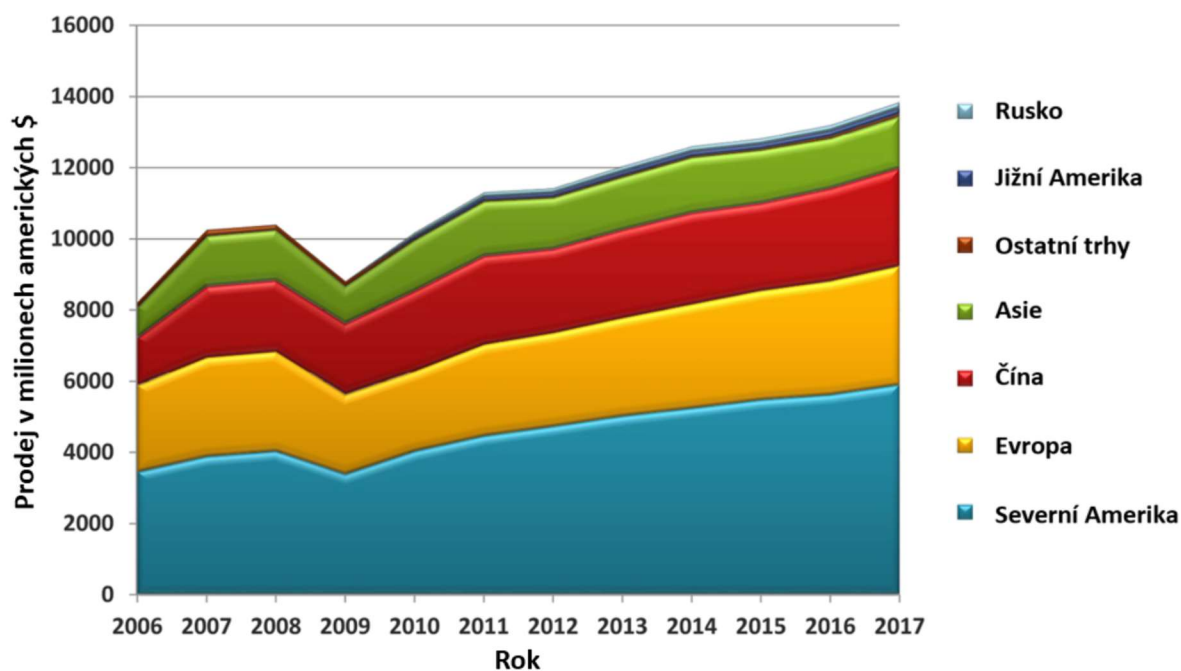
6.5.2	Postup měření viskozity vosků.....	64
6.5.3	Výsledky měření viskozity vosků	64
6.6	Stanovení ohybových vlastností vosků.....	66
6.6.1	Popis použitého vybavení, vzorků a metodiky při stanovení ohybových vlastností vosků	67
6.6.2	Postup měření při stanovení ohybových vlastností vosků	68
6.6.3	Výsledky měření pro stanovení ohybových vlastností vosků	68
7	Provedení 3D náměrů lopatek lisovaných podle parametrů v simulaci	72
7.1	Výběr lopatek pro 3D náměry	72
7.2	Referenční body.....	74
7.2.1	Referenční body u modelů ze zeleného panenského vosku Remet Hyfill B478	74
7.2.2	Referenční body u modelů z hnědého rekonstituovaného vosku Remet Hyfill B478	76
7.3	Barevná mapa odchylek od CAD modelu	77
7.4	Rozměrová analýza ve 3 kontrolních řezech.....	80
7.5	Shrnutí výsledků 3D skenu.....	84
8	Simulace vstřikování voskového modelu lopatky.....	85
8.1	Vstupní parametry simulace	85
8.1.1	Materiálová data	85
8.1.2	Geometrie dílu.....	89
8.1.3	Vstřikovací forma.....	89
8.1.4	Procesní parametry	90
8.2	Vyhodnocení numerické simulace lopatek.....	91
8.2.1	Průběh plnění.....	91
8.2.2	Teplotní vývoj a vstřikovací tlak.....	95
8.2.3	Průběh tuhnutí	98
8.2.4	Analýza smrštění a deformace	100
8.2.5	Analýza průběhu deformací v řezech lopatkou.....	103

9	Diskuze výsledků vzhledem k současnému stavu poznání	105
10	Splnění cílů práce a závěr.....	106
	Seznam příloh.....	109
	Seznam zkratk a symbolů.....	110
	Seznam obrázků	111
	Seznam citované literatury:	116
	Citovaná literatura autora k tématu disertační práce:	120
	Další publikační činnost autora:	122
	Příloha 1: Model experimentální aparatury pro měření pvT dat	124
	Příloha 2: Reogramy panenského a rekonstituovaného vosku.....	125
	Příloha 3: Barevná mapa rozměrových odchylek ve spodní části bandáže pro všechny lopatky	128
	Příloha 4: Detail rozměrových odchylek vnější části bandáže pro všechny lopatky	132
	Příloha 5: Teploty vosků v řezu lopatkou	136
	Příloha 6: Detaily proudění vosk.....	139
	Příloha 7: Detaily řezů lopatkou – zelený vosk.....	142
	Příloha 8: Detaily řezů lopatkou – hnědý vosk	144

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.

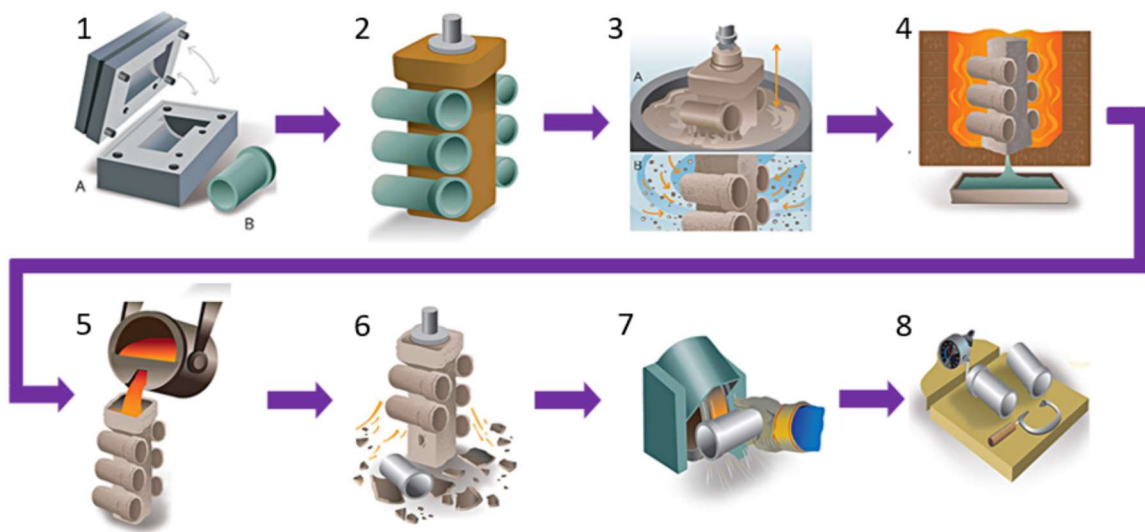
Narůstající význam přesného lití dokládá fakt, že tržby v oblasti přesného lití dosáhly celosvětově v roce 2017 hodnoty 13,8 miliard dolarů. To představuje zvýšení oproti roku 2016 o 5 %. Tento trend udržuje stálý vzestup. Na obrázku 1.1 je patrné, že největší podíl na trhu s přesnými odlitky měla za rok 2017 Severní Amerika (43 %) a Evropa (24%). Nezanedbatelný je nárůst produkce Číny o 20 % oproti roku 2016. [1,2]



Obrázek 1.1 Celosvětový vývoj prodeje odlitků přesného lití [1]

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 celosvětový nárůst produkce oproti roku 2016 o 5 %. [1,2] Na základě údajů zveřejněných v Global Investment Casting Market [4] je pro technologii lití na vytavitelný model v letech 2017–2021 předpovídán celosvětový nárůst o 4,32 %. Je tak zřejmé, že technologie přesného lití bude i do budoucna stále perspektivnějším odvětvím.

Proces přesného lití na vytavitelný model umožňuje ekonomickou výrobu dílů složitých tvarů s vysokou geometrickou přesností. Uvedenou metodou se nejčastěji zhotovují menší, tenkostěnné a komplikované odlitky s tloušťkou stěny již od desetin mm, které mnohdy nelze vyrobit jinou technologií. Rozměry dílů jsou většinou pouze v úzkých tolerancích a s malými přídávky na obrábění. Díky vysoké náročnosti výroby jsou doménou tohoto procesu vysocelegované a speciální slitiny. Metodou přesného lití se jinak běžně odlévají legované oceli, slitiny niklu, hliníku a titanu.



Obrázek 1.2 Schéma postupu přesného lití na vytavitelný model [3]

Postup výroby přesně litých odlitků je znázorněn na obrázku 1.2. Nejprve se na základě výkresu součásti zhotoví forma na výrobu voskového modelu. Forma se plní za vyššího tlaku roztavenou voskovou hmotou na vstříkolise (1). Po vychladnutí se buďto na voskový model připojí vtoková soustava anebo se drobnější jednotlivé voskové modely připevňují na vtokovou soustavu do tzv. stroměčků (2). Spojování s vtokovou soustavou probíhá natavením stykových ploch. Dále následuje výroba vlastní skořepiny. Ta se zhotovuje obalováním keramickým materiálem. Nejprve se hotový stroměček ponoří do tekuté obalové hmoty tzv. břechky a poté do keramického zasypaného materiálu (3). Tento postup se opakuje, dokud se nedosáhne požadované tloušťky skořepiny. Na výslednou kvalitu povrchu mají největší vliv první dva lícní obaly a proto se na ně používá jemný zasypaný materiál. Po zhotovení skořepiny se vosk vytaví v autoklávu (4). Toto vytavení musí probíhat rychle, aby se zamezilo rozměrové dilataci formy. Před odléváním se skořepiny žíhají, aby se případně odstranily zbytky vosku a skořepiny získaly potřebnou pevnost. Odlévá se do skořepiny bezprostředně po vytažení z žíhací pece (5). Speciální vysocelegované materiály se odlévají ve vakuu.

Po vychladnutí formy následuje vibrační oklepávání, aby se odstranila skořepina (6). Dále se zbytky keramiky odstraňují tryskáním. Poté následuje oddělení odlitků od vtokové soustavy (7), kontrola a další případné dokončovací operace (8).

Z výše uvedených faktů vyplývá, že 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. Tato 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 Voskové směsi a jejich zkoušení

Moderní vosky pro technologii přesného lití na vytavitelný model se používají k výrobě složitých odlitků s velmi přesně specifikovanými rozměry. Precizní voskové směsi jsou komplexní směsi několika různých komponent, aby bylo možné splnit náročné požadavky technologie přesného odlévání.

Výrobci voskových směsí neuvádějí dostatečné množství potřebných parametrů voskových směsí, pro následnou experimentální část disertační práce, a proto je třeba vosky detailně odzkoušet a vyhodnotit jejich vlastnosti.

U naprosté většiny používaných vosků není známo přesné složení směsí, ale panuje domněnka, že vosk (v pravém slova smyslu) je zde zastoupen v menšině a jedná se tak spíše o polymerní směs. Nicméně vzhledem k zažitému názvosloví budou v této práci nazývány tyto směsi vosky, i když je podíl vlastního vosku v některých případech i pod 50 %.

V práci jsou nejprve teoreticky rozebrány druhy vosků a jejich použití. Poté následuje teoretický popis zkoušek voskových směsí tak, aby byl sestaven teoretický základ pro vhodné zkoušky vosků, které by poskytovaly dostatečná vstupní data pro provedení numerické simulace.

2.1 Voskové směsi

Vosk je nejstarší termoplastický materiál. Jeho užití pro technologii odlévání metodou lití na vytavitelný vosk je známé již od doby cca. 4.000 let před n.l. [11] Tehdy se používal zejména pro výrobu uměleckých předmětů a jako vosk byl použit pouze včelí vosk. Dnes samozřejmě pro moderní technologii přesného lití samotný vosk má naprosto nevyhovující parametry a musí se používat voskové směsi, které mají potřebné užité vlastnosti. Jak již bylo řečeno, tyto směsi (i když hlavní podíl již není vosk v pravém slova smyslu), se voskem nazývají.

2.1.1 Složení voskových směsí

Moderní slévárenské „vosky“ jsou složeny z několika komponent a nejčastěji obsahují přírodní uhlovodíkové vosky, přírodní esterové vosky, syntetické vosky, přírodní a syntetické pryskyřice, organická i syntetická plnidla a vodu. Složení směsí výrobci přizpůsobují požadavkům konkrétní slévárny změnou složek či jejich vzájemných poměrů [12].

2.1.2 Vosky

se skládají z těchto základních dílčích materiálů:

- Parafínové vosky

Tvoří je uhlovodíkové organické sloučeniny. Jejich struktura se skládá z krátkých řetězců molekul s 20-36 atomy uhlíku. Teplota tání je v rozmezí 32 °C – 66 °C. Typická tvrdost je mezi 12- 25 10th mm (označení dle metody Oliver & Pharr¹) [20]

- Mikrokrystalické vosky

Stejně jako u parafínového vosku je tvořen uhlovodíkovými organickými sloučeninami. Struktura se skládá z rozvětvených řetězců molekul s 31 – 50 atomy uhlíku. Teplota tání je v rozmezí 60 °C – 93 °C. Typická tvrdost je mezi 2 – 75 10th mm. [20]

- Tvrdé vosky

Mohou to být buďto přírodní estery nebo modifikované uhlovodíkové sloučeniny. Jedná se o velmi křehký materiál s nízkou viskozitou, ale s tvrdostí větší než 100 10th mm. Teplota tání je 65 °C – 120 °C. [20]

2.1.3 Pryskyřice

V technologii lití na vytavitelný model se používají tři hlavní typy pryskyřic, přičemž každá má své unikátní vlastnosti. Jednotčím znakem je jejich komplexní struktura [20]:

Tabulka 2.1 Pryskyřice používané pro technologii lití na vytavitelný model

Název skupiny pryskyřic	Molární hmotnost	Bod měknutí	Příklad pryskyřice
	g / mol	°C	
Uhlovodíkové	390 - 1615	18 - 178	Hydrogenované, monomerové, aromatické, alifatické (nearomatické)
Syntetické	350 - 1750	25 – 190	Modifikované, polymerizované, esterové
Přírodní	250 - 1575	80 - 180	Hydrogenesterové, polyesterové, kyselé esterové

¹ Metoda Oliver & Pharr pro zkoušení nanoindentace tenkých vrstev. Metoda používá 1/10 tloušťku vrstvy pro hloubku indentace. [21]

2.1.4 Polymery

Nejužívanějším polymerem je etylen vinyl acetát (EVA). Molekulová hmotnost je 50 -2500 g/mol. Rozmezí bodu měknutí 50 °C – 200 °C. Mají vysokou houževnatost a tvrdost v rozmezí 5 – 50 10th mm. [20]

2.1.5 Plniva

Plniva jsou ve slévárenských voscích používána pro zlepšení vlastností. Plnivo snižuje množství bublin v tenkých částech voskových modelů, zvyšuje tekutost voskové směsi a zlepšuje kvalitu povrchu. Materiály používané jako plniva, jsou chemicky inertní, aby nereagovaly s žádnou složkou voskové směsi. [22] Typickými materiály plniv je polystyren, kyselina tereftalová, bisfenol a voda. [20]

Typické pro vosky používané v technologii přesného lití je, že se působením tepla neroztaví ihned, ale projdou postupně několik fází: pevný stav → plastický stav → poloplastický stav → polotekutý stav → tekutý stav. Jako jiné materiály se vosk během ohřevu rozpíná a během chladnutí smršťuje. V porovnání s kovovými materiály je jeho rozpínání poměrně velké. [16]

Pro výrobu voskových modelů se používá několik druhů voskových směsí, které se liší podle vlastností a účelem použití. Blíže jsou popsány v následujících podkapitolách.

2.1.6 Vosky na výrobu modelů

Do této skupiny patří vosky plněné, neplněné a emulgované. Nejpoužívanější plněné vosky obsahují cca 20-40% nerozpustného práškového plniva v základní matici. Plnivo zajišťuje sníženou propadavost a zvýšenou rozměrovou stabilitu. Jsou vhodné pro tvarově nejsložitější, tenkostěnné modely. [12]

Hlavní výhodou neplněných vosků je jejich snadná regenerace, kterou si může provádět i sama slévárna. Vyznačují se nízkým obsahem popelu. [12] Další výhodnou vlastností je vysoká kvalita povrchu, který bývá hladší, než u plněných vosků.

Nejméně používanou podskupinu modelových vosků představují vosky emulgované. U nich je „plnivem“ vzduch (resp. bubliny vzduchu) nebo voda, což má za následek také sníženou propadavost a vyšší rozměrovou stabilitu. [12] Obsah vody se pohybuje v rozmezí 7 -12 %. Tyto vosky mohou být rekonstituovány a používány pro vtoky i vlastní modely. Nevýhodou, která brání širšímu použití je fakt, že pro emulgované vosky se často musí používat speciální vstříkolis. [16]

2.1.7 Vosky na vtokové soustavy

Tyto směsi mají zvýšenou pevnost, tak aby nedocházelo k deformacím stromečku při manipulaci. Oproti modelovým voskům mají také nižší teplotu tavení, aby se vtoková soustava začala při vytavování tavit jako první a nedošlo k poškození skořepiny. V praxi se často jako vtokové vosky využívají použité modelové voskové směsi regenerované ve slévárně [13]

2.1.8 Speciální vosky

Speciálními vosky jsou například namáčecí vosky, které díky své tekutosti mají dobrou schopnost téct do hůře dostupných míst, kde zaplňují otevřené spoje. Dále se používají vosky na jádra, které slouží k utěšňování keramických jader vkládaných do modelu. Zlepšují kvalitu povrchu a snižují riziko praskání. V neposlední řadě se mezi speciální vosky řadí vodou rozpustné vosky, které se používají pro vytvoření vnitřních tvarů tam, kde bylo obtížné aplikovat jiné prostředky. Používají se na jádra vkládaná do dutiny formy před vstříknutím standardního vosku, poté dojde k jeho rozpuštění a tím k dodatečnému zaplnění dutin.[14] Speciální vosky se používají např. pro vytvoření rychle se tavící vrstvy na vtokové soustavě, na ruční opravy povrchových vad na odstříkaných modelech, popř. k lepení několika dílů voskových modelů [12]

2.1.9 Regenerace a rekonstituce vosků

Regeneraci lze provádět sedimentací, filtrací a odstředěním. Při sedimentaci se vosk roztaví a nečistoty obsažené ve vosku se usadí na dně nádoby. Vosk se odlije a znovu použije. Tento proces recyklace je nejstarším ze způsobů a je také nejvíce časově náročný. Filtrace se provádí ve filtračním lisu. Roztavený vosk se do něj vlije přes textílii, a tím se z něj odfiltrují nečistoty a plnivo. Recyklace odstředěním se používá pro vosky s vyšším obsahem plniva. Roztavený vosk se nalije do centrifugy a nečistoty se z něj kvůli své vyšší hustotě odstředí. Částice s podobnou hustotou, jako jsou kupříkladu stopy popela, se z vosku odstředí v nižší míře než při jiných způsobech regenerace. Regenerované vosky se poté dají využít na výrobu vtokových soustav a pomocných dílů pro sestavu. [17] [18]

Při rekonstituci se vosk čistí i filtruje a následně jsou do něj přidána plniva, čímž se částečně obnoví jeho původní vlastnosti. Takto upravené vosky se dají použít i pro výrobu voskových modelů [17] [18]

Závěrem kapitoly je, že slévárenská výroba klade na voskové směsi rozmanité nároky a aby směsi mohly těmto nárokům vyhovět, měly by splňovat následující kritéria:

- Směs by měla mít především minimální smrštění při chladnutí a minimální roztažnost při ohřevu.
 - Během tuhnutí ve formě by měla získat dostatečnou pevnost a tvrdost z hlediska dalšího technologického zpracování - přitom by neměla být příliš křehká.
 - Směs by měla co nejpřesněji reprodukovat stěny formy a neměla by se na ně lepit.
 - Povrch výsledného modelu by měl být čistý a hladký.
 - Vosková směs by neměla chemicky reagovat s materiálem keramické břečky.
 - Modelová hmota by měla odolávat oxidaci.
 - Hotový model by měl mít vysokou smáčivost ve styku s keramickou břečkou.
 - Směs by měla obsahovat minimum popelu.
 - Doba tuhnutí směsi v matečné formě by měla být co nejkratší.
 - Směsi by měly být maximálně recyklovatelné a ve všech stavech zdravotně nezávadné.
- [13]

2.2 Zkoušky voskových směsí

Následující zkoušky jsou široce používány pro standardní testování voskových směsí v laboratořích, slévárnách apod. Pro získání znalostí o chování voskových směsí doporučuje Investment Casting Institute provádět následující zkoušky, které lze rozdělit do skupin [7]:

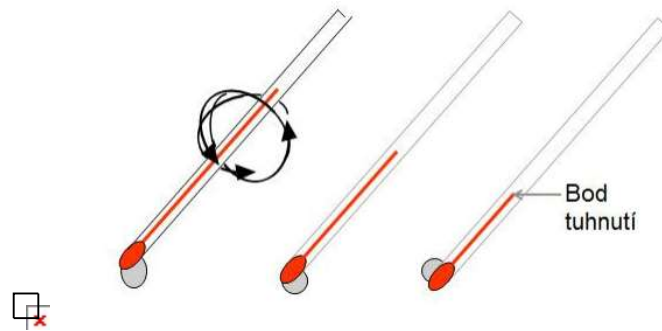
- a.) Standardizované zkoušky
- b.) Zkoušky mechanických vlastností
- c.) Zkoušky fyzikálních vlastností
- d.) Zkoušky technologických vlastností
- e.) Speciální zkoušky

2.2.1 Standardizované zkoušky

Jedná se o zkoušky základních charakteristik voskových směsí, které převážně dává výrobce těchto směsí k dispozici.

- Bod tuhnutí

Bod tuhnutí je teplota, při které přestane proudit účinkem gravitace. Konec předeřátého teploměru se ponoří do roztaveného vosku. Teploměr se pak umístí do předeřáté zkumavky a jeho poloha se zajistí (např. korkem). Při pozorování poklesu na teploměru se zkumavka s teploměrem otáčí kolem vodorovné osy. Když se vosková kapka začne pohybovat s koncem teploměru, tak se okamžitě zaznamená teplota.



Obrázek 2.1: Princip zkoušky bodu tuhnutí [5]

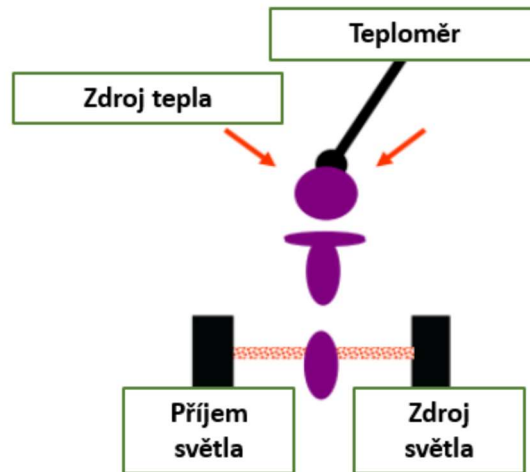
Pro technologii přesného lití na vytavitelný model poskytuje tato zkouška dobrou indikaci o teplotě vstřikování. Obecně se teplota vstřikování volí o několik stupňů nad bodem tuhnutí a o několik stupňů nižší než je plastický stav. [5] Znalost této teploty, při které vosková směs přestává téct, je zásadní pro optimalizaci vstřikovacích parametrů.

- Bod skápnutí vosku

Teplota skápnutí při tání vosku je teplota, při které se vosk roztaví, neboli je to teplota změny skupenství vosku z pevného na kapalné.

Tyto teploty jsou důležité při operaci vytavování vosku. Je žádoucí, aby měl vosk, který je použit na vtoky, bod měknutí přibližně o 10 stupňů nižší ve srovnání s modelovým voskem. Díky tomu se vosk z vtoku nejprve roztaví a napomáhá zmírnění napětí na keramickém plášti. [5] [6]

Zkouška probíhá tak, že světelný paprsek je přerušován kapkou roztaveného vosku a zaznamenává se teplota, při které k tomu dojde.

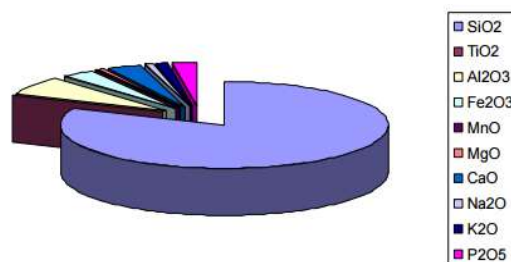


Obrázek 2.2. Schéma zkoušky skápnutí vosku [19]

- Obsah popela

Kontrola obsahu popela vosku je kritická. Obsah popela je procento nehořlavých sloučenin, které zůstávají po spálení naměřeného množství vosku ve vzduchu. Panenské voskové materiály mají velmi nízký obsah popela – typický obsah je kolem 0,03%. Rekonstituovaný vosk, který neprošel kontrolou, může mít vysokou úroveň popela - typický je obsah popela nad 0,10%. Tato úroveň obsahu popela může způsobit vady odlitku. Nejen proto se rekonstituované vosky příliš nehodí pro výrobu vlastních modelů, ale je vhodné je používat pouze na technologické části vtokových soustav.[13]

Materiál z filtrování vosků může vykazovat vysoké koncentrace oxidu křemičitého, oxidu hlinitého a oxidu zirkoničitého. Správná filtrace může odstranit všechny tyto nečistoty. K určení obsahu popela se používá gravimetrická analýza.



Obrázek 2.3. Příklad analýzy materiálů z filtračního systému [7]

Z praxe je známo, že některé slévárny skořepiny po vytavení vyplachují a až poté žíhají, některé pouze žíhají bez výplachu. Zvláště u těchto případů je sledování obsahu popela důležité.

- **Obsah plniva**

Tato zkouška je určující pro certifikaci vosku. Výrobce vosků dle doporučení Investment Casting Institute mají uvádět na materiálovém listu obsah plniva.

Obsah plniva kladně ovlivňuje vlastnosti voskových směsí jako je rozměrová stálost, mechanické vlastnosti, viskozita, objemová roztažnost a obsah popela. [7]

Zkouška se provádí tak, že se zkoumaný vosk roztaví a nechá se protéct přes filtr, na kterém se zachytí plniva. Poté se stanovuje jejich obsah.

2.2.2 *Zkoušky mechanických vlastností*

Voskové modely vyžadují ideální poměr mezi křehkostí a pružností, neboť při jejich vyjímání z matečné formy a následné manipulaci pro potřeby skladování, vytvoření stromečku a jeho obalování, podléhají tyto modely různým způsobům mechanického namáhání. [7] Z tohoto důvodu je pro jakostní odlitek důležité určovat mechanické vlastnosti voskových směsí.

- **Zkouška ohybem**

Zkouška se provádí, jako u jiných materiálů, metodou třibodového ohybu vzorků. Pomocí této zkoušky lze hodnotit maximální zatížení před porušením vzorku, průhyb, ohybové napětí v závislosti na deformaci, Youngův modul pružnosti v ohybu, ohybovou tuhost, mez pevnosti, deformační napětí, aj. [7] Jde o nejčastěji prováděnou zkoušku mechanických vlastností u voskových směsí.

- **Penetrace**

Penetrační zkouška poskytuje vodítko pro tvrdost vosku. Na vzorek vosku se aplikuje kalibrovaná hmotnost a měří se hloubka průniku.

Měkčí vosk bude mít tendenci se lehce ohýbat nebo deformovat, zatímco tvrdší vosk bude silnější a bude se méně deformovat. Tvrdší vosky jsou více rozměrově konzistentní než měkčí vosky.

- **Zkouška tahem**

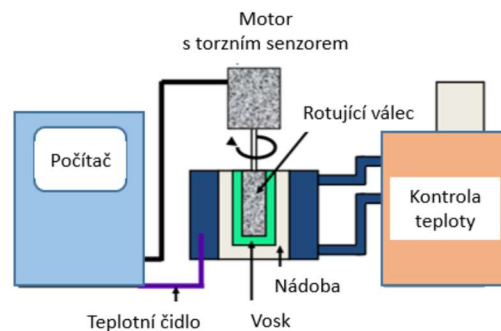
Postup zkoušky tahem u voskových směsí se neliší od standardní zkoušky tahem pro ostatní materiály. Touto zkouškou se u vosku zjišťuje: tažnost, kontrakce, mez pevnosti a mez kluzu. S ohledem na kluzký a hladký povrch testovacích těles z voskových směsí se více používá 3 bodový ohyb. Blíže je tato problematika řešena v kapitole 6.6.

2.2.3 Zkoušky fyzikálních vlastností

- Viskozita

Viskozita je měřítkem změny tekutosti vosku s teplotou. Změna tekutosti se měří při konstantní smykové rychlosti. Je důležité znát viskozitu vosku, protože poskytuje dobrý údaj o průtokové charakteristice, což je nezbytné při vstřikování vosku a jeho následném vytavování. Viskozita newtonských kapalin je jakožto látkový parametr závislá na teplotě a tlaku. Z tohoto důvodu je měření viskozity jednodušší a dají se využít všechny způsoby měření viskozity, kterými jsou: Kapilární, kuličkový, rotační a vibrační viskozimetr. [7]

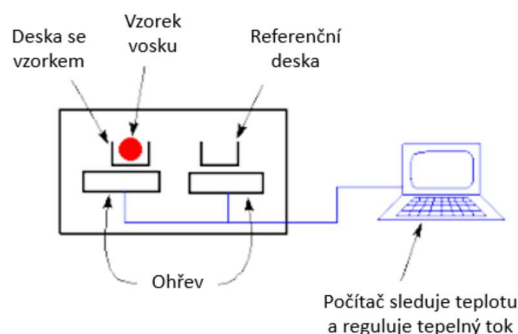
Pro stanovení viskozity vosku se používají metody: U-trubice (kinematická technika), Brookfield, vibrační koule a Rheimeter napětí/ deformace (dynamická technika).



Obrázek 2.4. Měření viskozity [19]

- Diferenciální skenovací kalorimetrie

Diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC) je komparativní technika, při níž je měřena termická analýza. Princip je znázorněn na obrázku 2.5. Dvě desky jsou přesně ohřívány, přičemž na jedné je umístěn vzorek a na druhé je ovládací prvek. Zkoumá se absorpce energie vzorkem. Výsledky ukazují transformace materiálu při různých fázích. DSC je kvalitativní technika a velmi efektivní při detekci změn materiálu, které mohou ovlivnit konečný produkt. [9]



Obrázek 2.5 Diferenciální skenovací kalorimetrie [6]

2.2.4 Zkoušky technologických vlastností

- Zabíhavosti

Viskozita představuje vlastnost tekutosti vosku v rozmezí teplot. Nicméně existuje rozdíl mezi viskozitou a vstříkovanou tekutostí vosku. Test zabíhavosti byl navržen tak, aby poskytoval relevantní data, která mohou být použita ke zlepšení kontroly procesu.

Analýza zabíhavosti zahrnuje použití spirálovité formy s odstupňovaným kanálem. Zkušební vzorky se vstříkují za kontrolovaných klíčových parametrů jako je teplota vosku a formy, průtoku a tlaku, času vstříkování. [6]

Spirální test měří tekutost vosku. Měření zabíhavosti se provádí za stejných parametrů jako při reálném vstříkování, takže poskytuje představu o tom, jak se při teplotě a tlaku vstříkáním vosk během vstříkování chová. Za pevně stanovených podmínek se provede několik vstříků, aby se získal průměr pro srovnání se specifikací. Tato zkouška napodobuje podmínky vstříkování voskové směsi do formy ve slévárně.



Obrázek 2.6. Forma pro zkoušku tekutosti vosku [7]

- Zkouška volného lineárního smrštění

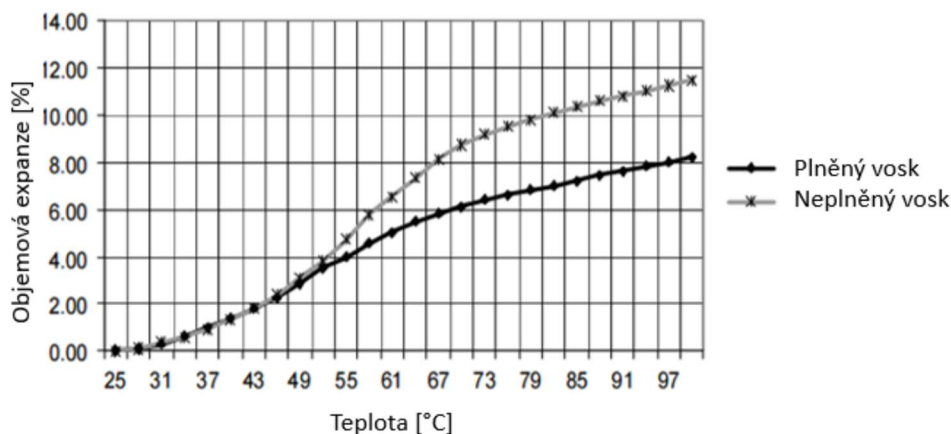
Je prováděna ve speciální formě při stanovených podmínkách vstříkovacího procesu, mezi něž patří teplota voskové směsi a formy, vstříkovací tlak a doba vstříkování. Odstříknuté vzorky jsou 24 hodin ponechány na teplotě 21° C, aby se dokončila polymerizace. Následně se vypočte volné procentuální smrštění voskové směsi, změřením délek vyhotovených vzorků a porovnáním oproti rozměru formy.[7]

2.2.5 Speciální zkoušky voskových směsí

Tyto zkušební metody byly speciálně vyvinuté proto, aby simulovaly použití vosku ve slévárnách.

- Objemová expanze

Kvantitativní metoda pro stanovení charakteristik objemové expanze vosku v daném teplotním rozmezí. Tato zkouška poskytuje cenné informace pro predikci vad voskových modelů, praskání skořepin při vytavování vosku a tím zaručuje kvalitu výsledných odlitků.



Obrázek 2.7. Příklad vyhodnocení objemové expanze [19]

Na příkladu uvedeného na obrázku 2.7 je znázorněno porovnání objemové expanze u plněného a neplněného vosku.

- Reologie vosku

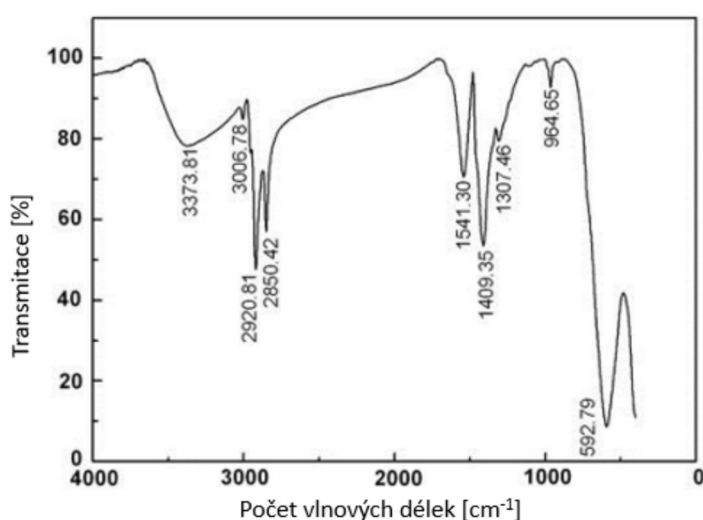
Ukazuje průtokové vlastnosti vosku ve všech krocích při přechodu z kapalné na pevnou fázi.

Rheometrie je analytická technika, která nám umožňuje stanovit tekutou a kapalnou fázi materiálu, viskoelastickou pevnost a absorpci energie v teplotním rozmezí. Na rozdíl od viskozimetru vzorek kapalného vosku kmitá, zatímco je kontrolovaně chlazen. Odolnost vůči kmitům se přemění na data. Rheometrie přiřadí materiálu jedinečné hodnoty vlastností, ale vyžaduje vysoký stupeň dovedností. [8] Tato technika také umožňuje nahlédnout do mechanického výkonu pomocí testování tečení v teplotním rozmezí.

- Ramanova spektrometrie

Jedná se o porovnání paprsků objektu, který je vystaven radiaci. Rozdělovač rozděluje paprsky na vstup: jedna část prochází analyzovaným materiálem, druhá jej obchází a je určena pro porovnání. Nová technologie umožňuje přesné porovnávání signálů a zobrazování účinků refrakce materiálu.

Vzhledem k tomu, že vosk je z uhlovodíků a tato elementární analýza není možná, výsledky se zobrazují jako kmitočtová vlnová délka. Infračervená analýza je kvalitativní nástroj, nikoliv kvantitativní, ale software má k dispozici knihovnu materiálů a poskytuje tak procentuální přizpůsobení. Všechno méně než 95% je tak nepřijatelné. [8]



Obrázek 2.8. Příklad výsledku Ramanovy spektrometrie [19]

- Analýza na přítomnost kovových částí

Zkoušení vosku na přítomnost stopového množství kovových prvků se zjišťuje pomocí indukčně vázané plazmové spektrometrie. Analýza dává možnost použití recyklovaného vosku v takových aplikacích, kde by to bylo dříve nemyslitelné. Další výhodou této zkoušky je to, že může také identifikovat znečišťující látky ve voskové směsi.

3 Numerické simulace vstřikování voskových směsí

Numerická simulace je vysoce účinný nástroj, jak optimalizovat procesy a děje během výrobního procesu ve slévárně. V současné době je na trhu již několik simulačních softwarů pro simulace různých slévárenských metod výroby odlitků. Hlavním úkolem těchto simulací je plnění a tuhnutí kovů. Tyto simulace jsou, jsou i přes vysoké náklady, dnes častým nástrojem pro predikci vad odlitků ve slévárnách. Pro technologii lití na vytavitelný model však mají hlavní nedostatek, a to je skutečnost, že doposud neexistuje program nebo jeho modul, který by obsahoval materiálová data vosků a byl schopen spolehlivě simulovat vstřikování voskových modelů.

3.1 Princip numerické simulace

Simulací je rozuměno chování fyzikálního nebo abstraktního systému, který zjednodušuje prováděnou studii. Úkolem simulačních softwarů je matematické modelování a optimalizace zadaných procesů a dějů s využitím vysoce výkonných počítačů. V případě slévárenských simulačních programů se jedná zejména o procesy: plnění formy, tuhnutí a chladnutí odlitků (ve formě i po vyjmutí z formy), vznik struktury a utváření vlastností odlitku, vznik vnitřních pnutí a deformací, popř. sledování struktury. [24]

3.1.1 Struktura procesu simulace

Programy pro numerickou simulaci mají velmi podobnou konstrukci, která se liší zejména grafickým zpracováním uživatelského prostředí. Numerická simulace je prováděna v několika krocích:

1. Preprocessing
 - a.) *Geometrie součástí*: Pro simulaci je třeba vytvořit geometrická data dílu, který je předmětem simulace. Tato data lze buď vytvořit samostatně v externím CAD systému a poté importovat do simulačního programu ve vhodném podporovaném formátu (např.: *.stl, .iges, .dxf. apod.), nebo tato data vytvořit přímo v simulačním softwaru (pokud takovou možnost nabízí). Následně se v simulačním softwaru vygeneruje vhodná simulační síť, která se musí zkontrolovat a případně opravit.
 - b.) *Přiřazení materiálu*: Každé komponentě (jako je např. forma, jádro, odlitek aj.) importované do simulačního softwaru je třeba definovat její vlastnosti.
 - c.) *Počáteční a okrajové podmínky*: Definice těchto podmínek je zcela klíčová pro provedení správné simulace. Zadávají se zde např. tlaky, teploty, rychlosti, podmínky přestupu a odvodu tepla, lící teplota, teplota formy atd.

2. Processing

Jedná se o vlastní výpočtový proces.

3. Postprocessing

V tomto kroku se již zobrazují, prohlíží vypočtené datové soubory a provádí jejich vyhodnocení. Dle možností simulačního softwaru se mohou vytvářet např. zobrazení proudění, tlaků, staženin, deformace, animace pochodů plnění formy, tuhnutí odlitku resp. modelu apod.

3.1.2 Rozdělení numerických metod

Numerické metody umožňují získat řešení úloh v konečném počtu diskretních míst (uzlů) zvolené diferenční sítě nebo sítě konečných prvků, a to v celé oblasti či v její povrchové části. [25]

Numerické metody se rozdělují:

- metody konečných diferencí (Finite Difference Method - FDM)
- metody konečných objemů (Finite Volume Method - FVM)
- metody konečných prvků (Finite Element Method - FEM)
- metody okrajových (hraničních) prvků (Boundary Element Method – BEM)

V simulačních programech slévárenských procesů se nejčastěji vyskytují výpočtové moduly používající metodu konečných diferencí a metodu konečných prvků. [25] Z tohoto důvodu v rámci této disertační práce budou detailně popsány pouze tyto zmíněné numerické metody.

FDM – Metoda konečných diferencí

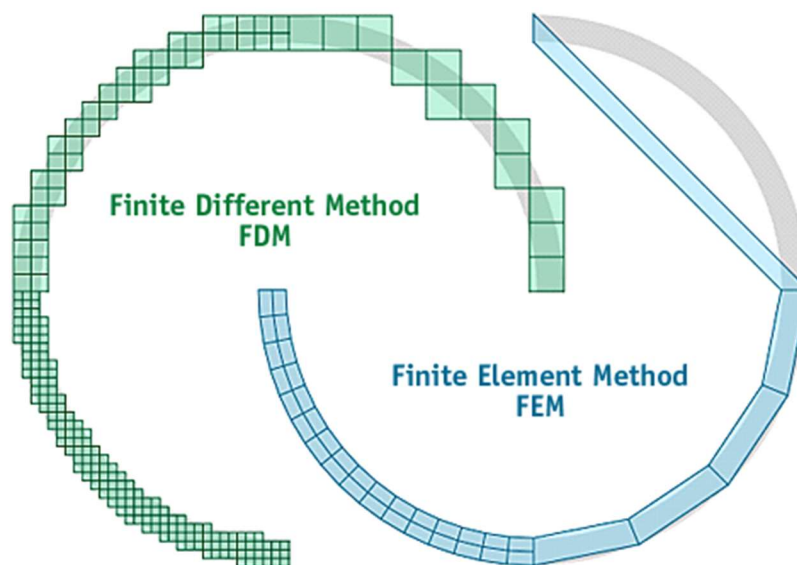
Metoda konečných diferencí, kterou někdy také nazýváme metodou sítí, se stává jednou z nejužívanějších přibližných metod numerického řešení parciálních rovnic. Je jednoduchá, universální a dá se užít k velmi rozmanitým typům hraničních úloh včetně nelineárních. Velká část nejdůležitějších technických problémů vedoucích k parciálním diferenciálním rovnicím se proto řeší touto metodou. Podstata metody konečných diferencí, spočívá v aproximaci základní diferenciální rovnice s příslušnými okrajovými podmínkami odpovídající rovnici diferenční, jež má tvar soustavy algebraických rovnic. To znamená, že se parciální derivace v diferenciálních rovnicích popisujících chování modelu nahrazují diferencemi, tj. lineárními kombinacemi funkčních hodnot hledané funkce v okolních bodech. [25]

Tvar výpočtové sítě závisí na geometrii počítaného objektu. V některých místech, kde je třeba počítat přesněji, lze výpočtovou síť zhustit. Toto však sebou nese vyšší pracnost výpočtu. Sítě mohou být čtvercové, obdélníkové, víceúhelníkové atd.

FEM – Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků spočívá v tom, že se těleso rozdělí na menší elementy tzv. konečné prvky. Konečným prvkem, který je základem této metody, rozumíme zvolený element (objemu, plochy, délky) definovaný uzly v rozích, popř. i na hranách. Takto se převede indiskrétní těleso na těleso diskrétní, složené z prvků, které jsou navzájem spojeny v uzlech - v konečném počtu bodů. Řešení diferenciální rovnice se na elementárních oblastech aproximuje jednoduchými funkcemi – lineárními či kvadratickými polynomy. Výchozí parciální diferenciální rovnice se převádí na soustavy lineárních algebraických rovnic pro hledané hodnoty potenciálu v uzlových bodech. [25]

Rozdíl v síťování pomocí metody konečných prvků a metody konečných diferencí je zřejmý z obrázku 3.1.



Obrázek 3.1 Numerické metody FDM a FEM [27]

Numerická simulace a modelování hraje důležitou roli při současné optimalizaci a plánování slévárenských procesů. Účelem modelování - simulace je dosažení předpovědi s co možná největší přesností a tím ušetření času a finančních prostředků při řízení, ovládní, vývoji a výrobě. Snaha o dosažení výrazného nárůstu produktivity, zvyšování jakosti a urychlení inovačního procesu vede k využití výsledků získaných z numerické simulace do dalších procesů. [25]

3.1.3 Fyzikální popis simulací

Jelikož numerické simulace jsou ve slévárenské výrobě dnes již běžným nástrojem, tak se disertační práce omezí na stanovení rozdílu oproti simulaci běžných slévárenských technologií – zohlednění viskoelastického modelu pro deformační chování polymerů.

Bližší se problematikou definují proudění kapaliny pomocí zákona zachování hmoty (rovnice kontinuity) a hybnosti (Navier-Stokesův zákon), přenos tepla při tuhnutí a chladnutí odlitků (Fourierova diferenciální rovnice), úroveň zbytkových či vnitřních pnutí, zákony mechaniky tuhého tělesa při plastické a elastické deformaci atd., zabývá literatura [15].

3.1.4 Viskoelastický model

Pro provedení numerické simulace je třeba si uvědomit, že zkoumané voskové směsi se jako polymerní materiály chovají viskoelasticky. Pro potřeby modelů je pak viskózní komponenta modelována jako tlumič a elastická jako pružina.

Viskoelastická látka se pod vlivem mechanického namáhání chová současně jako pružná splňující Hookův zákon:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (1)$$

kde ε je poměrné délkové prodloužení, σ je mechanické napětí, E je modul pružnosti v tahu (Youngův modul).

a jako viskózní kapalina, vycházející z Newtonova zákona viskozity:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \quad (2)$$

kde τ je tečné napětí v tekutině, u je rychlost toku, x je souřadnice ve směru kolmém na směr proudění a η je dynamická viskozita.

Viskoelastické látky reagují na deformaci vždy se zpožděním. Časová prodleva je dána vzájemným uspořádáním a architekturou řetězců v daném polymerním systému. Na základě teorie lineární viskoelasticity lze popsat chování polymerů pomocí časových a teplotních závislostí napětí a deformace. [26]

Viskoelastická odezva polymerního materiálu je dána:

Relaxaci napětí v materiálu s časem při konstantní deformaci a teplotě:

$$\sigma(t) = E(t) \cdot \varepsilon \quad (3)$$

kde t je teplota.

Creep materiálu, změna deformace materiálu v čase při konstantním napětí a teplotě:

$$\varepsilon(t) = D(t) \cdot \sigma \quad (4)$$

Existuje několik viskoelastických materiálových modelů, které popisují chování viskózních materiálu, dále budou stručně popsány ty nejčastěji používané:

- *Maxwellův model*

Tento model se používá pro popis těles, které mají působením vnější síly trvalý tok, tedy pro popis viskoelastických kapalin. [28]



Obrázek 3.2 Maxwellův model [30]

Kde G představuje modul pružnosti ve smyku.

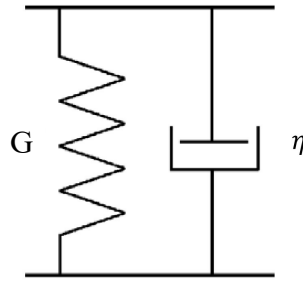
Napětí σ_t v materiálu dosaženém v čase t je pak dáno vztahem:

$$\sigma_t = \sigma_i \exp\left(-\frac{E \cdot t}{\eta}\right) \quad (5)$$

Používá se pro modelování relaxace materiálu, přičemž $\sigma = f(t)$, $\varepsilon = \text{konst.}$

- *Voigtův model*

Je nejčastěji používaný model mechanického chování pevných viskoelastických těles. Je tvořen „paralelní“ kombinací Hookova a Newtonova tělese. Nebere v úvahu vliv setrvačných sil. Obě základní tělesa se deformují stejným způsobem. [28]



Obrázek 3.3 Voigtův model

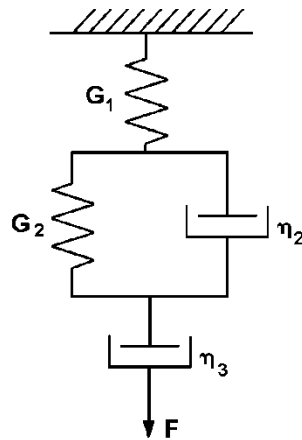
Deformace ε materiálu je pak dána vztahem:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \left[1 - \exp\left(-\frac{E \cdot t}{\eta}\right) \right] \quad (6)$$

Tento model se používá pro modelování creepu materiálu, přičemž $\sigma = \text{konst.}$, $\varepsilon = f(t)$.

- *Tuckettův model*

Model kvalitativně předpovídá viskoelastické chování lineárního amorfního polymeru.



Obrázek 3.4 Tuckettův model [29]

Deformace ε je pak dána vztahem:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2 \cdot t}{\eta_2}\right) \right] + \frac{\sigma}{\eta_3} \cdot t \quad (7)$$

Složením těchto modelů pak lze odvodit rovnici pro deformaci, která kombinuje jak Hookův model pro ideálně pružný materiál, Kelvinův, Maxwellův a Tuckettův model pro viskoelastický materiál, tak i Newtonův model pro ideálně viskózní materiál v podobě:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2 \cdot t}{\eta_2}\right) \right] + \frac{\sigma}{\eta_3} \quad (8)$$

Uvedený vztah shrnuje ideálně elastickou okamžitou deformaci valenčních úhlů, vazeb a mezimolekulárních vzdáleností se zpožděnou elastickou deformací polymerních klubek a nevratnými přesuny klubek.

3.2 Softwary pro numerickou simulaci

Dnes se nachází na evropském trhu celá řada slévárenských komplexních simulačních programů, které dávají uživateli možnosti řešení různých úloh a stále se inovují a doplňují. Simulační programy se dnes orientují zejména na řešení těchto hlavních skupin problémů:

- plnění forem;
- tuhnutí a chladnutí odlitků (ve formě i po vyjmutí z formy);
- vznik struktury a utváření vlastností odlitku;
- vznik vnitřních pnutí a deformací, popř. sledování struktury. [32]

Kvalita simulačních programů, jejich vypovídající hodnota a míra shody výsledků simulace s realitou, je dána zejména těmito okolnostmi:

- kvalitou matematického popisu dílčích dějů - tj. rozpracováním Fourierovy diferenciální rovnice vedení tepla, včetně správné volby počátečních a okrajových podmínek;
- zahrnutím odchylky chování a stavu odlévaného materiálu od ideálního předpokladu jednofázového stavu taveniny (např. neneutonská kapalina, teplotní závislost postupného uvolňování latentního tepla při tuhnutí taveniny atd.);
- tepelně-fyzikálním definováním vlastností forem i odlévaného materiálu v závislosti na teplotě v celé potřebné šíři teplotního intervalu. [32]

Poměrně velkým problémem při simulačních výpočtech je stanovení hodnot potřebných tepelně-fyzikálních veličin v závislosti na teplotě. Toto je nejčastější příčinou rozdílů mezi výsledky získanými simulačním výpočtem a experimentálním měřením při srovnatelných podmínkách. [25]

Jak již bylo zmíněno, tak v současnosti je na trhu celá řada simulačních softwarů, které lze použít pro simulaci slévárenských procesů. Jejich vhodnost pro konkrétní aplikaci lze posoudit na základě tabulky 3.1.

Tabulka 3.1 Souhrnná porovnávací tabulka vybraných simulačních softwarů [31]

	Cadmould	AD Moldflow Insight	M 3D	Sigmasoft
VÝPOČTOVÉ METODY				
Metoda výpočtu	FEM	FDM	FEM	FEM
MOŽNOSTI ŘEŠIČE				
Paralelně běžící řešiče (max)	?	3	8	?
CAD modely	✓	✓	+	?
Sestavy	✓	✓	+	?
Díly	✓	✓	+	?
FUNKCE SIMULACÍ				
Plnění	✓	✓	✓	✓
Dotlak	✓	✓	✗	?
Orientace vláken	✓	✓	✗	✓
Predikce vad modelu	✓	✓	✓	✓
Analýza odvodušnění	?	✓	✓	?
Analýza krystalizace	?	✓	✗	✓
Vhodnost umístění vtoku	✓	✓	✓	?
Studené a horké vtoky	✓	✓	✓	?
Vytváření vtoků	✓	✓	✓	?
Chlazení	✓	✓	✓	✓
Konformní chlazení	✓	✓	✓	?
Indukční temperace	✓	✓	✓	?
Deformace dílu	✓	✓	✓	✓
Zástriky	✓	✓	✗	?
Deformace formy	✓	✓	✗	✓
Deformace vstřikovaných drátů	?	✓	✗	?
Temperační elementy	✓	✓	✓	✓
Vytvrzování stěn	✗	✗	✗	✓
POSTUP VSTŘIKOVÁNÍ				
Vstřikování termoplastů	✓	✓	✓	?
Vstřikování s asistencí plynu	?	✗	+	?
Vstřikování s dolisováním	?	✗	+	?
Vstřikování pěnových materiálů	✓	✗	✓	?
Reaktivní vstřikování kompozitů	?	✓	✗	?
Vstřikování kapalných kaučuků	?	✓	✗	?
Zastřikování procesorů	?	✓	✗	?

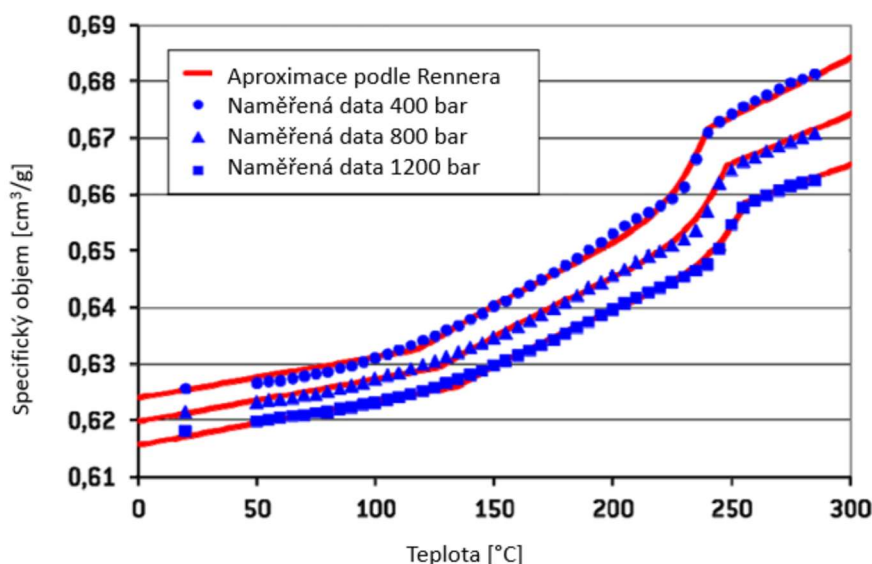
Legenda k tabulce 3.1	✓	Funkce je primární součástí softwaru
	✗	Software neumožňuje tuto funkci
	+	Funkce není primární součástí softwaru (lze dokoupit)
	?	Daný údaj nebyl možný dohledat z dostupných zdrojů

Žádný dostupný simulační software však nemá takovou materiálovou databázi, aby mohl být určen pro simulaci vstřikování voskové směsi. Pro provedení simulace v disertační práci byl vybrán simulační software Cadmould, jelikož byl vyvinut pro vstřikování plastických hmot, které se nejvíce svými vlastnostmi podobají voskovým směsím, a obsahuje nejvíce využitelných modulů pro danou aplikaci.

3.3 Simulační program Cadmould® 3D-F

Cadmould® 3D-F je CAE² modulární softwarová sestava, která analyzuje proces vstřikování plastů. Pro analýzu je potřebný 3D CAD model dílu ve formátu *.stl, *.step nebo *.iges. Cadmould® 3D-F připraví zcela automaticky a rychle výpočtový model, založený na vlastní precizní objemové metodě. [33]

Pro řešení aplikace vstřikování voskových směsí, program obsahuje výhodnou precizaci výpočtů zavedením nového výpočtového vztahu Renner pro popis chování vstřikované směsi v závislosti na tlaku, teplotě a objemu. [34]. Přechod od tekuté do tuhé fáze by měl být kontinuální a bez kolísání hodnot. Aproximací Schmidt Tait však toto nelze zaručit. Zpřesnění tvaru křivky p v T diagramu se tak užívá aproximace podle Rennera a to pro oblasti tuhé fáze, tranzitního přechodu a tekuté fáze. Aproximace p v T dat podle Rennera je zřejmá z obrázku 3.5.



Obrázek 3.5 Aproximace p v T dat dle Rennerova vztahu [46]

Uvedené řešení umožní velmi dobré rozlišení měnících se materiálových veličin (teplot, smykových rychlostí atd.) po tloušťce stěn (i těch nejslabších), což je nutným předpokladem pro přesný výpočet komplexních proudových stavů v různých místech dílu. Výpočty u všech modulů Cadmould®3D-F jsou teplotně závislé, respektující stlačitelnost tavenin a zohledňující strukturně-viskózní chování tavenin plastů. [33]

² CAE = Computer Aided Engineering je metoda využití počítačového softwaru k usnadnění inženýrské analýzy.

Výpočtová přesnost softwaru Cadmould® 3D-F je velmi vysoká, přitom výpočty probíhají rychle, což je základním předpokladem pro možnost provádění variantních výpočtů, tedy skutečnou optimalizaci. [33]

Software Cadmould® 3D-F se vyznačuje jednoduchým a uživatelsky přívětivým pracovním prostředím. Orientace v programu je usnadněna přehledným menu, názornými ikonami a především faktem, že při zadávání vstupních dat pro simulaci je možné postupovat „krok po kroku“ a zamezit tak opomenutí některých důležitých parametrů.

I přes všechny výše uvedené kladné vlastnosti však platí, že nejvýznamnější vliv na přesnost výsledků mají vstupní data, v tomto případě především vstupní materiálová data.

3.3.1 Vstupní parametry programu Cadmould 3D-F

Pro vytvoření numerické simulace v softwaru Cadmould 3D-F je možné data rozdělit do několika skupin, dle požadovaných výstupů. Níže jsou uvedené pouze ty parametry, které jsou relevantní pro zkoumanou voskovou směs. Definici další vstupních parametrů v programu Cadmould vyžaduje například simulace anizotropních materiálů.

1. Obecné identifikační informace

- Typ materiálu (např. polypropylen s 30% skelných vláken)
- Název materiálu, vzorku (např. testovací vzorek č. 20)
- Dodavatel

2. Simulace plnění

- Viskozita
- Tepelné vlastnosti materiálu
 - Tepelná vodivost [W/(mK)]
 - Specifická tepelná kapacita [J/(kgK)]
 - Hustota [g/cm³]
 - Teplota No-flow³ [°C]
- Procesní parametry
(Tyto zadané parametry slouží k odhadu procesních parametrů a nemají žádný vliv na reologické výsledky)
 - Minimální teplota tavení [°C]
 - Maximální teplota tavení [°C]

³ Teplota No-flow je teplota, kdy materiál nemůže dále proudit.

- Doporučení teplota tavení [°C]
- Minimální teplota stěny formy [°C]
- Maximální teplota stěny formy [°C]
- Doporučená teplota stěny formy [°C]
- Teplota vyjmutí modelu [°C]
- Maximální rychlost pohybu čela proudu taveniny [°C]

3. *Fáze dotlaku*

- pvT data

4. *Smrštění a deformace*

- Youngův modul
- Modul pružnosti ve smyku
- Poissonovo číslo
- Koeficient lineární teplotní roztažnosti

Bližší jsou vstupní parametry rozebrány v experimentální části v kapitolách 6 a 8.

4 Cíle práce

Klíčovým momentem, pro zhotovení skutečně kvalitního odlitku metodou přesného lití na vytavitelný model, je výroba voskového modelu, který stojí na začátku celého výrobního procesu a je tak určující pro exaktnost všech navazujících technologických kroků výroby. Kvalita a rozměrová přesnost voskových modelů závisí na vhodně navržené vstřikovací formě, správně nastavených podmínkách vstřikování a výběru modelové voskové směsi. Z toho je zřejmé, že pro komplexní výrobní proces je třeba nástroj, který by technologům pomohl analyzovat všechny vstupní faktory a tím predikovat správnost navržené technologie, ještě před vynaložením velkých časových a finančních nákladů na výrobu forem pro vstřikování nového dílu.

Nástrojem, který umí vyhodnotit a odhalit vady odlitků, ještě před zavedení jejich výroby ve slévárně, jsou dnes již stále častěji používané numerická simulace. Na trhu lze nalézt softwary pro simulaci většiny slévárenských technologií, a to včetně přesného lití, kde se však simuluje pouze vlastní odlévání tekutého kovu, ale nikoliv klíčový krok technologie lití na vytavitelný model - výroba voskového modelu. Software přímo určený pro vstřikování voskových modelů neexistuje. Například v simulačním programu ProCast lze sice nalézt zjednodušený viskoelastický model, avšak zásadní materiálová data pro vosky chybí. Numerická simulace by přitom byla ideálním nástrojem pro predikci vad a optimalizaci celé technologie vstřikování voskového modelu.

Cílem této disertační práce je po nalezení vhodného numerického simulačního programu, na kterém by, po zjištění materiálových dat voskových směsí, bylo možné provedení simulací 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. Podle 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.

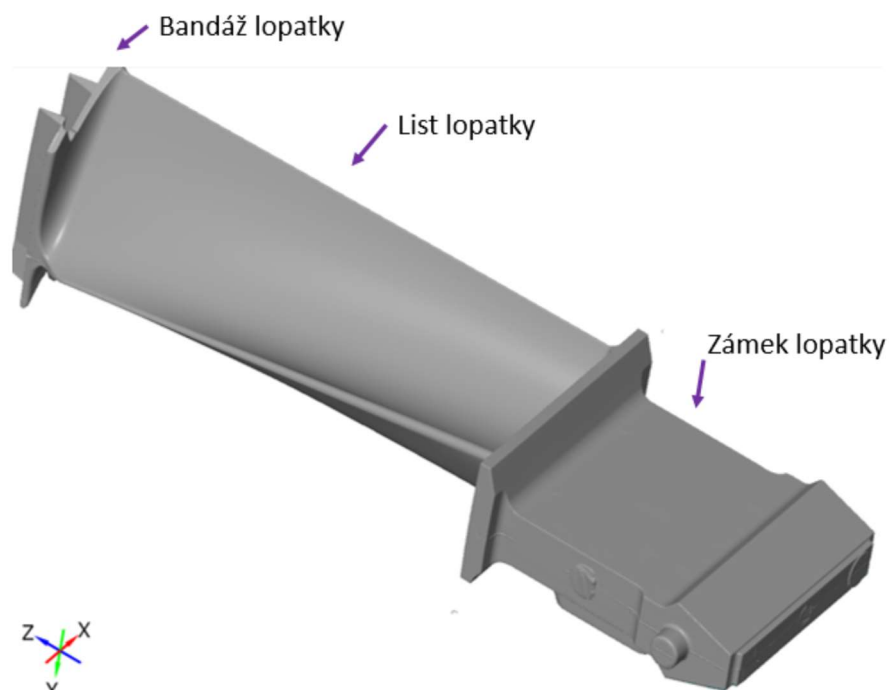
5 Popis řešeného dílu

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 vstřikolis, 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. Vzhledem k tomu, že v provozu, kde byl výzkum prováděn, se jiný vosk než Hyfill B478 nepoužívá, tak je i dostatečná jistota, že vosková směs určená pro rekonstituci, nebude kontaminována jiným voskem a tím nebudou zkreslené výsledky pro opakovatelné využití uvedených postupů v budoucnosti. Poměrově vosk určený k rekonstituci obsahuje zhruba 70 % panenského a 30 % již rekonstituovaného vosku.

5.1 Rozměry lopatky

Na obrázku 5.1 je zobrazen model lopatky s označením hlavních částí.



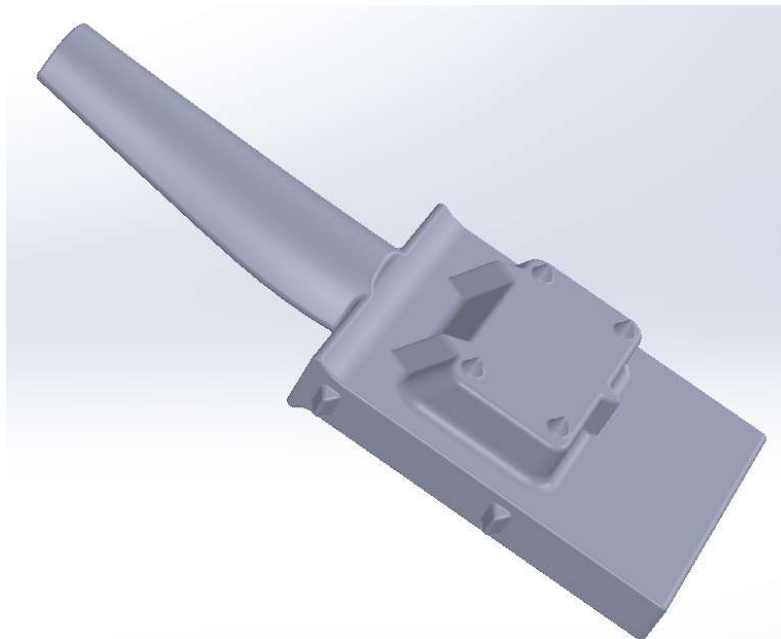
Obrázek 5.1 Model lopatky

V tabulce 5.1 jsou uvedeny hlavní rozměrové charakteristiky dílu. Požadavky na přesnost rozměrů jsou: $\pm 0,25$ mm pro délkové tolerance a $\pm 0,5^\circ$ pro úhlové tolerance.

Tabulka 5.1 Základní parametry modelu lopatky

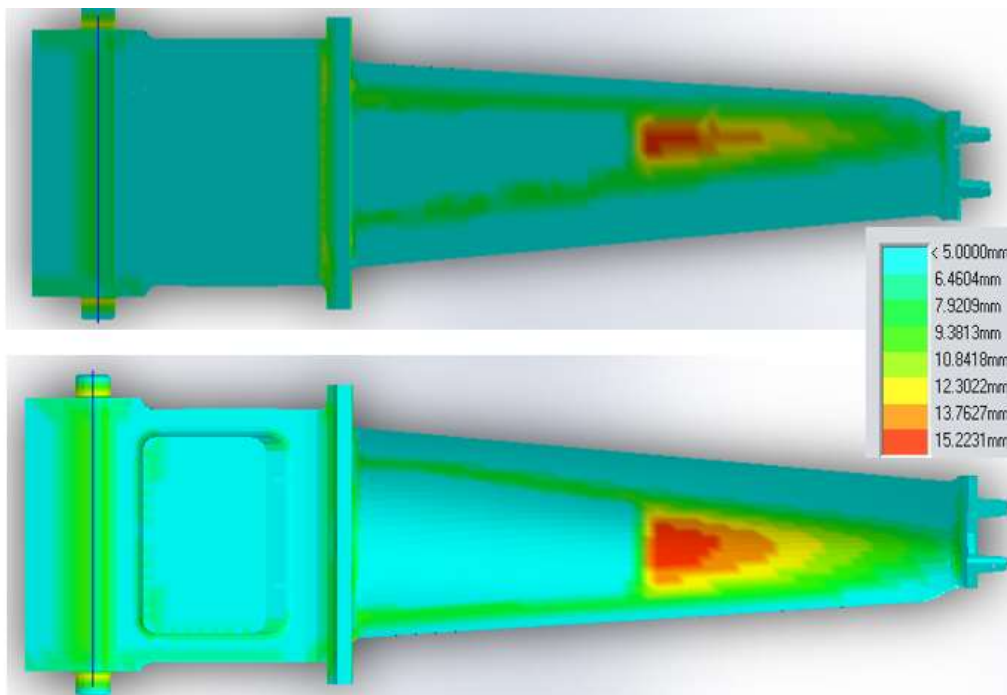
Parametr	Hodnota
Délka	400 mm
Šířka	133 mm
Hmotnost dílu	3,834 kg
Povrch	163 350 mm ²
Objem	468 215 mm ³
Hmotnost voskového modelu	0,465 kg

Problematické u této součásti, z pohledu technologie odlévání, jsou především velké rozdíly v tloušťkách stěn. Z tohoto důvodu je u voskového modelu používáno chladítko – zálitek, který rozdíly rozměrů modelu částečně vyrovnává.



Obrázek 5.2 Model zálitku - chladítka

Rozdíly v tloušťkách stěn jsou patrné na obrázku 5.3. Jako kritická se zde zobrazuje oblast za zálitkem (červená barva), protože u uvedeného modelu je odečten právě tento zálitek a tak se tato oblast stává nejmohutnější.



Obrázek 5.3 Orientační analýza tloušťek stěn lopatky v programu SolidWorks [K5][K6]

Mohutná zámková část, která obsahuje většinu materiálu dílu, přechází do tenkého listu lopatky a dále nastává další skoková změna objemu v oblasti bandáže. Změny těchto tloušťek způsobují během tuhnutí značné deformace, kterým je nutné předcházet technologickými opatřeními či je alespoň kompenzovat.

5.2 Parametry výroby voskových modelů lopatek

Aby bylo možné věrně simulovat proces vstřikování dílu a při vyhodnocení zohlednit všechny přídatné vlivy, tak bylo nejprve nutné zanalyzovat proces vstřikování voskových modelů. Proces výroby voskového modelu byl navržen na 4 minuty na základě předchozího výzkumu [K3, K5] a byly použity dva druhy vosků: zelený panenský vosk Remet Hyfill B478 a hnědý rekonstituovaný vosk Remet Hyfill B478.

Cyklus začíná postříkem emulzí silikonového oleje dutiny vstřikovací formy a založením zálitku (viz obrázek 5.4).



Obrázek 5.4 Založený zálitek do dutiny formy

Po provedení vstřiku lopatky a nutné výdrže, je lopatka vyjmuta z formy, odstraněn vtok a případné drobné zatekliny do dělicí roviny, uložena do přípravku a vložena do chladicí lázně (viz obrázek 5.5). [K13]



Obrázek 5.5 Chladicí lázeň s uzavřeným a otevřeným přípravkem

Po uplynutí navržené doby chlazení je lopatka vyjmuta z přípravku a uložena do závěsu, kde je připravena pro další technologickou operaci lepení. Během chlazení lopatky ve vodní lázni probíhá lisování dalšího kusu. [K6]

Pro dosažení co nejvyšší přesnosti finálních odlitků byly v tabulce 5.2 navrženy následující operační časy.

Tabulka 5.2 Návrh výrobního cyklu [K3, K2]

Parametr	Hodnota
Teplota vosku	60 °C
Doba vstřikování lopatky:	60 s
Doba výdrže dotlaku:	180 s
Velikost dotlaku:	3,4 MPa
Čištění trysky:	15 s
Odhadovaná doba vyjmutí z formy (od okamžiku rozevírání horní části formy do úplného vyjmutí modelu)	30 – 40 s
Odhadovaná doba na oříznutí vtoku, vizuální kontrola a vložení do přípravku	60 – 70 s
Doba zchlazení	600 s
Doba vyjmutím přípravku z vody, vyjmutí lopatky a odložení lopatky	30 - 40 s

Kvůli následnému vyhodnocování byl časový průběh experimentální výroby zaznamenáván a výsledky jsou uvedeny v tabulce 5.3. Jedná se především o důležité časy vyjímání lopatek ze vstřikovací formy, protože během operace vyjímání modelu není vosk ještě zcela ztuhlý a obsluha může zdlouhavou manipulací ovlivnit geometrickou přesnost lopatek.

Dále se zaznamenávaly časy od vyjmutí lopatky po ponoření přípravku do chlazené vodní lázně. Ta byla chlazená na teplotu mezi 10 až 13 °C ledem. Během experimentu se do lázně dle potřeby, přidávaly další kusy ledu. Výdrž ve vodní lázni byla definována na místě dle potřeby výrobního cyklu a s ohledem na plynulý průběh lisování jednotlivých lopatek a zajištění maximální produktivity a tím i snížení výrobních nákladů. Doba výdrže lopatky ve vodní lázni byla tedy stanovena na 10 minut.

Posledním zaznamenávaným časem pak byla doba od vyjmutí přípravku z vodní lázně po usazení lopatky do závěsu. Tento čas by však neměl být podstatný vzhledem k zajišťování rozměrové stability.

Tabulka 5.3 Monitorování procesu vstřikování voskových modelů z panenského vosku Remet Hyfill B478 [K3]

č.	čas vyjmutí [s]	čas do ponoru [s]	výdrž ve vodní lázni [s]	čas vyjmutí z přípravku a odložení [s]	teplota vody při ponoru [°C]	teplota vody při vyjmutí [°C]	okolní teplota [°C]	pozn.
1	60	89	600	36	13,3	12,7	24	-
2	59	62	600	18	11,8	11,7	23,6	-
3	27	70	600	57	12,5	9,6	23,6	3D sken
4	42	69	600	40	10,3	9,7	23,7	Led
5	43	67	600	38	11,8	11,9	23,8	-
6	50	65	600	40	9,9	11,6	23,4	-
7	30	77	600	36	11,2	10,1	23,6	-
8	58	76	600	29	10,8	9,5	23,6	led
9	24	69	600	31	10,3	10,9	23,6	-
10	61	77	3000	32	11,1	11,7	23,7	-
11	75	80	2400	28	11	11,7	23,7	-
12	37	70	600	38	10,5	11,5	23,7	led
13	37	60	600	30	10,4	11,4	23,8	-
14	51	82	600	28	10,1	11,4	24	-
15	76	73	600	29	9,4	10,4	23,8	3D sken
16	41	87	600	35	11,5	11,3	23,9	-
17	36	69	600	35	10,7	11,7	23,7	-
18	78	88	600	32	11,2	11,9	23,8	-
Ø	49	74	600	34	11,0	11,2	23,7	-

Pro porovnání chování obou voskových směsí byly lopatky nalisovány i z rekonstituovaného vosku Remet Hyfill B478. Menší počet nalisovaných modelů je dán zkušenostmi z experimentálního lisování a reálné výroby lopatek zeleného vosku, kdy množství nalisovaných modelů nemělo zásadní vliv na rozptyl výsledků.

Tabulka 5.4 Monitorování procesu vstřikování voskových modelů z rekonstituovaného vosku Remet Hyfill B478

č.	čas vyjmutí [s]	čas do ponoru [s]	výdrž ve vodní lázni [s]	čas vyjmutí z přípravku a odložení [s]	teplota vody při ponoru [°C]	teplota vody při vyjmutí [°C]	okolní teplota [°C]	pozn.
1	46	82	600	39	11,3	11,5	24,5	-
2	38	72	600	37	11,2	11,4	24,8	-
3	49	80	600	34	11,5	11,3	24,7	-
4	60	88	600	46	11,3	11,3	24,7	-
5	35	82	600	41	11,1	10,9	24,9	-
6	62	95	600	31	11,5	11,8	24,3	3D sken
7	43	76	600	37	12,3	12,3	24,7	-
8	25	89	600	30	12,3	12,1	24,5	SD sken
9	43	67	600	40	12,0	11,8	24,6	-
10	48	74	600	33	11,4	11,6	24,8	-
11	59	78	600	39	11,6	11,7	24,9	-
Ø	46	80	600	37	11,6	11,6	24,7	-

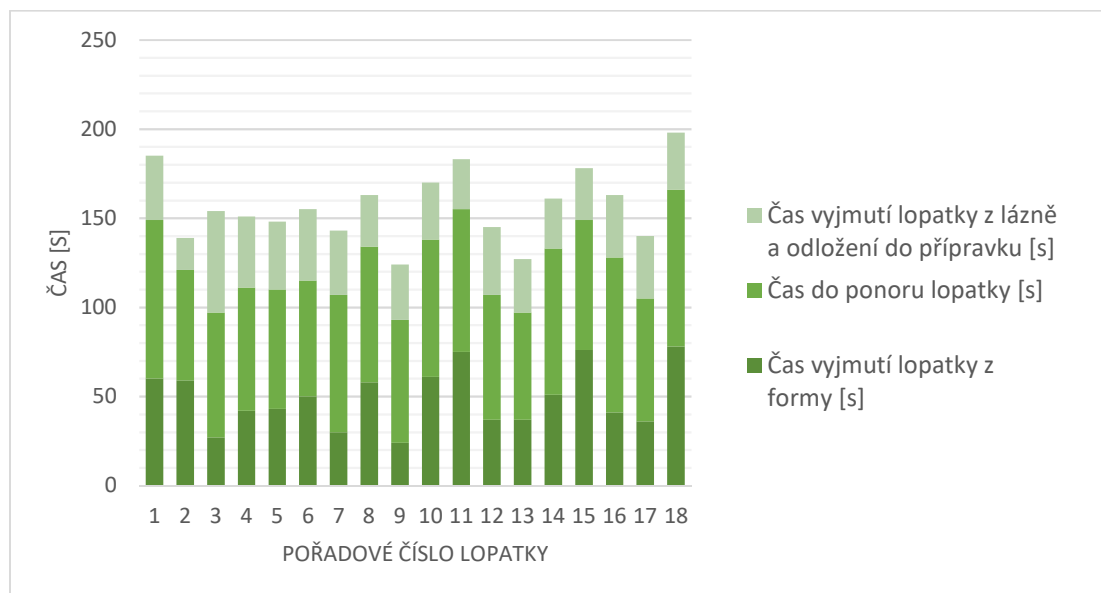
V tabulce 5.4 je patrná stabilnější teplota vodní lázně, nicméně při porovnání průměrných hodnot jsou teploty lázní pro oba vosky srovnatelné. Důvodem pro menší kolísání hodnot teploty lázně u rekonstituovaného vosku je vylepšený způsob chlazení na základě zkušeností z lisování panenského zeleného vosku.

Poznámky:

- *Čas vyjmutí z formy:* stroj začíná zvedat horní desku zajištění formy, obsluha stroje stlačeným vzduchem ofoukne dělicí rovinu, otevírá formu, vyjímá lopatku – okamžik vyjmutí je koncový čas této fáze
- *Čas do ponoření:* Odstranění (odříznutí) vtoku, odstranění velkých ořepů v dělicí rovině, vizuální kontrola lopatky, vložení do přípravku, vložení do vody.
- *Čas výdrže ve vodní lázni:* byla stanovena jako lisovací cyklus, v této fázi obsluha zkontroluje formu, promaže pomocí silikonového oleje, ofoukne stlačeným vzduchem, složí formu (cca. 20 – 25 s) a spustí vstřikování dalšího dílu.
- U vstřikování lopatek z panenského vosku byla u modelů číslo 10 a 11, z důvodu povinné přestávky, delší výdrž ve vodní lázni. Ta ovšem nemohla nijak deformovat výsledky, protože dle měření termokamerou [K12] jsou modely po 600 s ve vodní lázni již dostatečně vychladlé, takže prodloužení výdrže nemá na lopatky vliv.

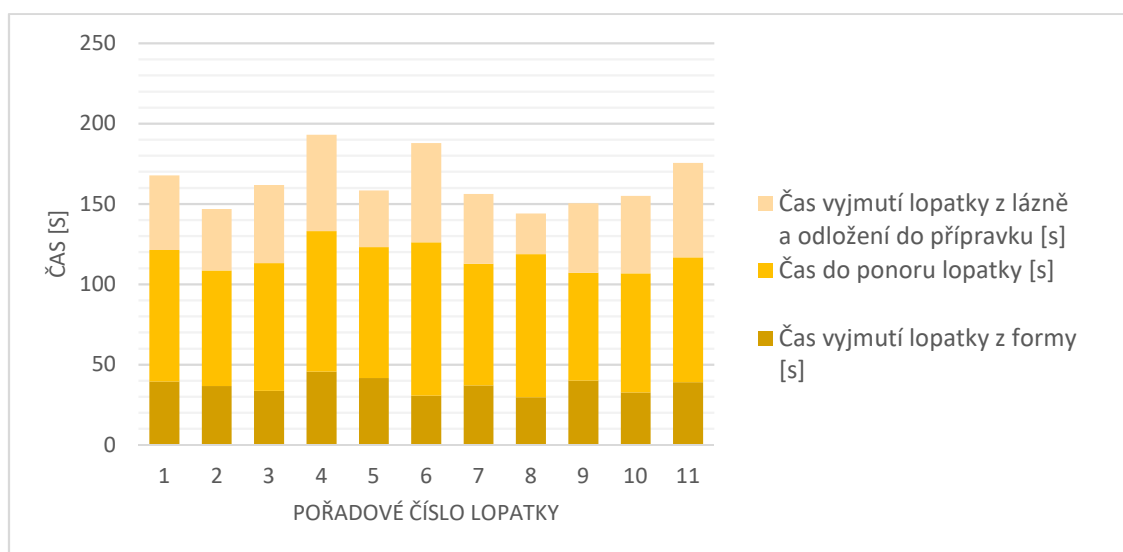
Zároveň byla snímána kontrolní teplota lázně, a to jak při vložení přípravku s lopatkou do vody, tak při jeho vyjmutí. Byla sledována i teplota okolí lisovacího pracoviště.

Přehled časů, které lze ovlivnit obsluhou vstřikolisu je pro zelený vosk znázorněn na obrázku 5.6 a pro rekonstituovaný na obrázku 5.7.



Obrázek 5.6 Srovnání proměnných časů pro jednotlivé lopatky lisovaných z panenského zeleného vosku Remet Hyfill B478 [K3]

Časy zaznamenávané od vytažení přípravku z chladicí vodní lázně po zavěšení lopatky, či umístění do přípravku nehraje, z hlediska výsledných deformací obou druhů vosků, roli. Daleko podstatnější je přístup, jakým se s voskovými modely manipuluje.



Obrázek 5.7 Srovnání proměnných časů pro jednotlivé lopatky lisovaných z rekonstituovaného hnědého vosku Remet Hyfill B478

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

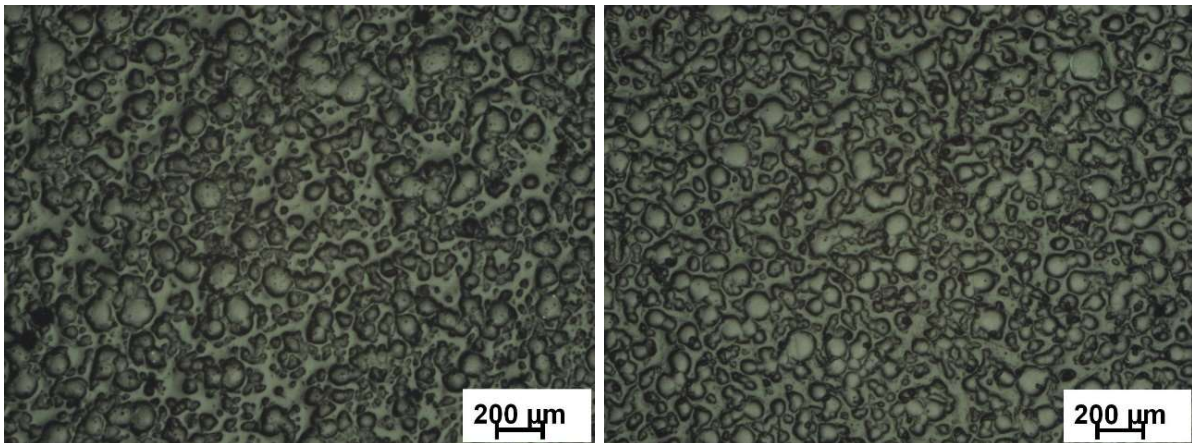
- ze zeleného panenského vosku Remet Hyfill B478 lopatky s číslem 3 a 15
- u rekonstituovaného hnědého vosku lopatky s číslem 6 a 8.

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.

5.3 Druh použitého vosku

Pro výrobu lopatky byl použit panenský vosk ⁴REMET Hyfill B478 (označovaný jako zelený vosk) a rekonstituovaný vosk REMET Hyfill B478 (označovaný jako hnědý vosk). Tento typ vosku je určen pro širokou škálu aplikací a obsahuje 30% a více obsahu inertního polymerního plniva. Vosk REMET Hyfill je charakterizován vynikající rozměrovou reprodukovatelností a díly by tak měly mít vysokou rozměrovou stabilitu a redukované smrštění. [36] [37]

Vosk Hyfill má, díky relativně nízké viskozitě při nízké teplotě tavení, dobrou tekutost. Je vhodný pro střední a velké tenkostěnné odlitky, zejména ze slitin hliníku a titanu. Používá se pro speciální aplikace, jako jsou díly pro letectví, automobilový průmysl, a právě pro výrobu plynových turbín. [37]



Obrázek 5.8 Struktura zeleného (vlevo) a hnědého (vpravo) vosku [39]

Jak je patrné z obrázku 5.8, struktura obou vosků je velmi podobná. Vosky používané v průmyslových odlitcích jsou komplexní směs různých aditiv, jako jsou pryskyřice, plnidla, mikrokrystalické vosky, parafínové vosky a další přísady. [K10]

⁴ Vosky jsou dále pro zkrácení označovány jako zelený (panenský) a hnědý (rekonstituovaný) vosk

Na obrázcích je patrný polystyren jako plnivo ve voskové matrici. Plnivo se používá zejména kvůli rozměrové stabilitě. Na první pohled lze říci, že zelený vosk má o něco větší rozdíly ve velikosti plniva, polystyren v hnědém vosku má velikost podobnou. [39]

Vosk panenský Remet Hyfill B478 a rekonstituovaný Remet Hyfill B478 mají dle [41] a [42] následující parametry uvedené v tabulce 5.5.

Tabulka 5.5 Parametry vosků Remet Hyfill B478 a rekonstituovaný Remet Hyfill B478 uváděná výrobcem [41] [42]

Vlastnost	Panenský vosk Hyfill B478	Rekonstituovaný vosk 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]⁵	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 [41] 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.

Dalším podstatným rozdílem mezi oběma vosky jsou jejich pořizovací náklady. Pořizovací cena zeleného panenského vosku Remet Hyfill B478 je zhruba 429 Kč/ kg, přičemž cena rekonstituovaného hnědého vosku je třetinová. Rekonstitucí by měl hnědý vosk získat přibližně stejné vlastnosti jako vosk nový panenský.

⁵ Výrobce uvádí viskozitu dle ASTM International v jednotkách cP (centipoise), což je ekvivalent pro jednotku mPa.s.

6 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.

6.1 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 dál jako vstupní data pro simulaci vstřikování lopatek.

6.1.1 Popis použitého vybavení, vzorků a metodiky při zkoumání závislosti změny objemu vosků na teplotě

Pro experiment byly použité stejné vosky jako u dalších zkoušek, a to vosk zelený panenský Remet Hyfill B478 a vosk hnědý rekonstituovaný Remet Hyfill B478. Oba vosky byly dodány ve formě čoček o průměru 5 mm.

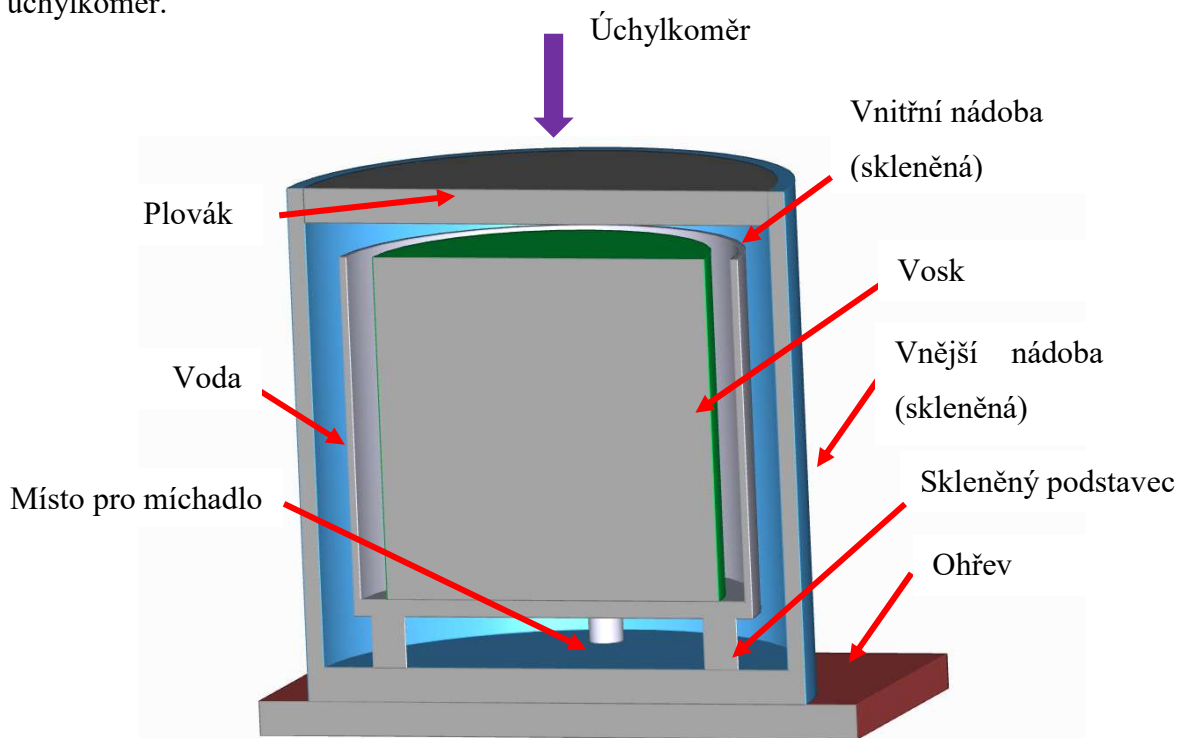
V experimentu byly použity následující přístroje a vybavení:

- Míchačka magnetická Wisd WiseStir MSH-D, s ohřevem
- Teploměr digitální THERM 2420-11
- Úchylkoměr TQC
- Miska z korozivzdorné oceli o objemu 300 ml
- Odměrná skleněná kádinka s výlevkou
- Skleněný válec
- Skleněný podstavec
- Stojan pro úchylkoměr
- Plovák

Zařízení pro stanovení závislosti změny objemu na teplotě bylo vyrobeno experimentálně na základě CAD modelu, který je schematicky zobrazen na obrázku 6.1, rozměrový náčrtek je v příloze 1.

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.

Principem měřicího systému 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.



Obrázek 6.1 Návrh modelu měřicí soustavy pro stanovení závislosti změny objemu na teplotě

Experiment bylo třeba provést opakovaně, aby se před samotným měřením zjistil rozptyl výsledků, a především odstranila kritická místa z procesu. Jedním z těchto kritických míst bylo použití válce pro tavení vosku z varného skla. Jak navážení, tak vlastní tavení vosku probíhalo dle očekávání. Na konci chladnutí vosku však došlo k rozměrové dilataci vosku a tím k prasknutí válce, který z tohoto důvodu nemohl být použit pro vlastní experiment. Proto je v experimentu na obrázku 6.2, oproti návrhu, použita kovová miska.



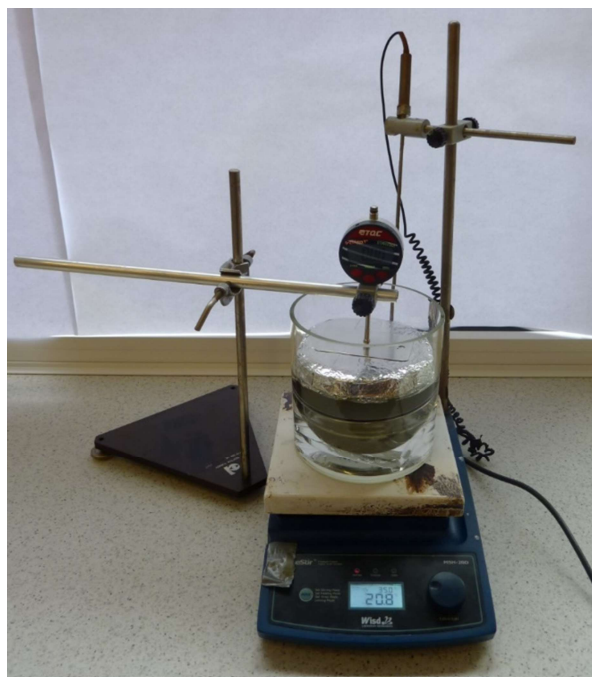
Obrázek 6.2 Použité měřicí přístroje a zařízení [K7]

6.1.2 Postup měření zkoumání závislosti změny objemu vosků na teplotě

Prvním krokem zkoušky je roztavení jednotlivých voskových čoček a nalití roztavené voskové směsi do připravené kovové nádoby. Experiment byl navržen tak, aby se roztavilo tolik vosku, aby bylo dosaženo objemu 300 ml. Poté se nádoba s voskem ponechala v místnosti při 23 °C po dobu 24 hodin, aby se zabránilo ovlivnění výsledku měření.

Přístroj a vzorky musí být 24 hodin v místnosti, kde se měření provede, aby se ustálily a kompenzovaly teploty. Další postup spočíval v umístění misky s vychladlým voskem do skleněného vnějšího válce na skleněný podstavec. Podstavec byl koncipován tak, aby se zachovala rovinnost nádoby během zkoušky. Do vnějšího válce se následně nalije 600 ml vody, plovák se položí na vodní hladinu a vynuluje úchytkoměr. [K14]

Jako poslední krok přípravných prací je zapnutí ohřevu. Poté už následuje vlastní měření a zaznamenávání závislosti teploty na objemu.



Obrázek 6.3. Experimentální sestava na začátku měření

Experiment byl zahájen na teplotě 40 °C s výdrží 2 hodiny, aby se prohřál celý systém. Ukončení experimentu bylo při 80 °C. Během ohřevu však došlo k odpařování vody, proto úbytek vody byl zohledněn při vyhodnocení výsledků. [K14]

6.1.3 Výsledky zkoumání závislosti změny objemu vosků na teplotě

V níže uvedených tabulkách jsou jednotlivé naměřené odchylky změny objemu systému. Z důvodu stability výsledků je výdrž na teplotě konstantní pro všechny měření (viz tabulka 6.2 a 6.1) ukazují absolutní úchylku měření v závislosti na teplotě. Počáteční výdrž na teplotě je delší kvůli prohřátí celého objemu vosku z počáteční teploty.

Tabulka 6.1 Úchylka změn objemu v závislosti na teplotě – zelený vosk [K14]

Teplota [°C]	Úchylka [mm]			Ø úchylka [mm]	Výdrž na teplotě [min]
	Měření 1	Měření 2	Měření 3		
40	0	0	0	0,00	120
45	1,08	0,92	0,89	0,96	60
50	1,56	1,42	1,36	1,45	60
55	1,8	1,63	1,48	1,64	60
60	1,92	1,75	1,86	1,84	60
65	1,98	1,88	1,99	1,95	60
70	2,15	2,03	2,15	2,11	60
75	2,24	2,27	2,19	2,23	60
80	2,42	2,47	2,56	2,48	60

Tabulka 6.2 Úchylka změn objemu v závislosti na teplotě – hnědý vosk [K14]

Teplota [°C]	Absolutní úchylka [mm]			Ø úchylka [mm]	Výdrž na teplotě [min]
	Měření 1	Měření 2	Měření 3		
40	0	0	0	0	120
45	1,13	1,22	1,31	1,22	60
50	1,88	1,95	1,98	1,94	60
55	2,05	2,16	2,2	2,14	60
60	2,25	2,38	2,36	2,33	60
65	2,68	2,75	2,72	2,72	60
70	2,96	2,89	3,01	2,95	60
75	3,11	3,18	3,2	3,16	60
80	3,36	3,31	3,28	3,32	60

Získané hodnoty měření ukazují na větší teplotní roztažnost rekonstituovaného vosku v porovnání s voskem panenským.

Změna objemu ΔV vosku v závislosti na teplotě se počítala nepřímo z měření absolutní úchylky (změny objemu) celého systému.

$$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h \quad (9)$$

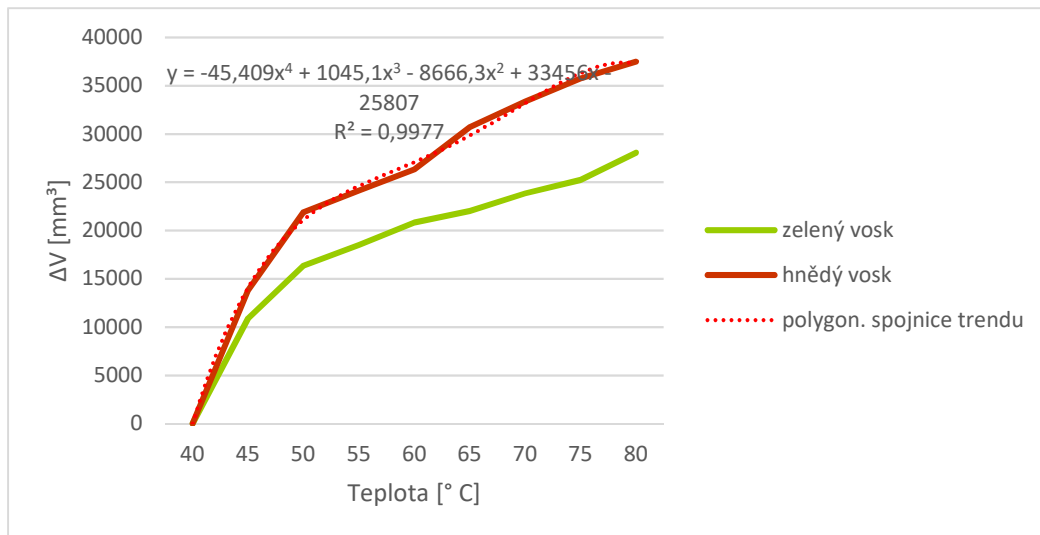
Kde d je průměr nádoby, h je výška nádoby.

Teplotní objemová roztažnost vody

$$\Delta V = V_1 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta t) \quad (10)$$

kde $\beta_{\text{voda}} = 1,8 \cdot 10^{-4} \cdot \text{K}^{-1}$,

Do výpočtů byl zahrnut úbytek vody odparem, avšak díky tomu, že se jednalo o uzavřený systém, tak byl odpar velmi malý a bylo tak možné jej zanedbat.



Obrázek 6.4 Závislost změny objemu vosku na teplotě [K7]

Obrázek 6.4 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.

Získané hodnoty byly pak dále použity jako vstupní data do simulací. Z toho mimo jiné vyplývá, že vyšší kvalita zeleného vosku má výrazný vliv na jeho objemovou stabilitu.

6.2 Měření tepelné vodivosti vzorků vosků

Cílem řešeného úkolu bylo změřit tepelnou vodivost vzorků zkoumaných vosků v pevném stavu při dvou teplotních úrovních. K měření byla použita standardní metoda založená na metodě žhaveného drátku. Měření probíhalo na přístroji, který je určen přímo k měření tepelné vodivosti tuhých materiálů při teplotách do 50 °C.

6.2.1 Popis použitého vybavení, vzorků a metodiky při měření tepelné vodivosti

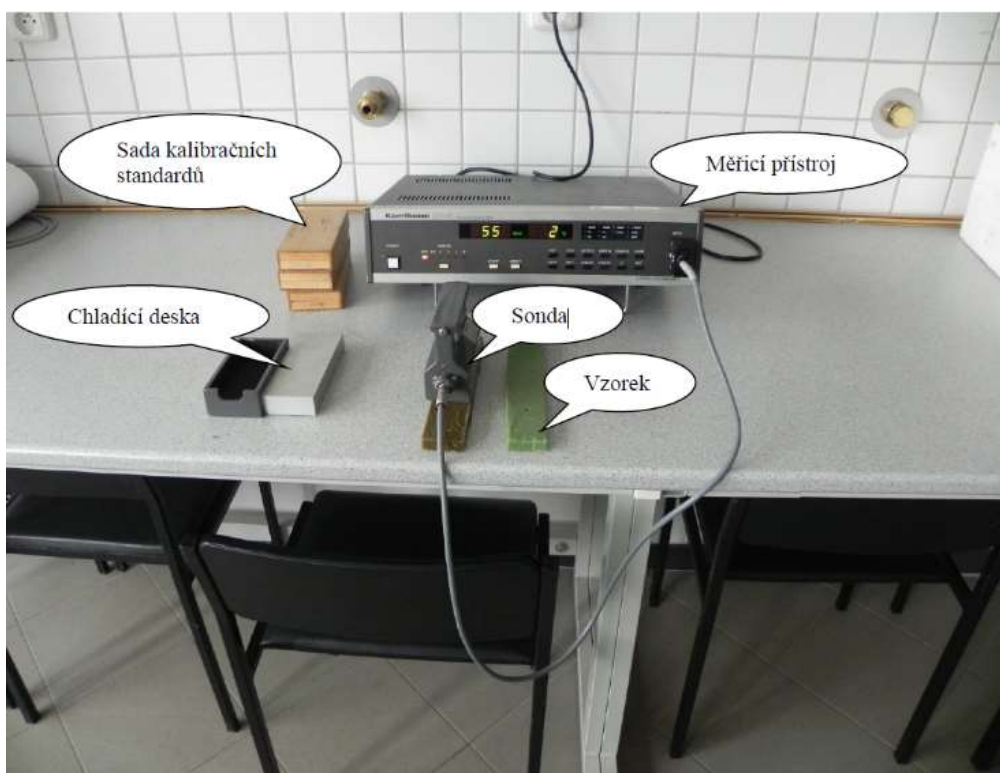
K měření tepelné vodivosti vzorků vosku byl použit přístroj KEMTHERM QTM-D3. Přístroj nastavuje velikost elektrického proudu, který prochází odporovým drátkem v sondě přístroje. Průchodem elektrického proudu se drátek zahřívá a zajišťuje tak konstantní hustotu tepelného toku do měřeného vzorku. Zpětná odezva je zajištěna měřením teploty pomocí vestavěného termočlánku. Přístroj zaznamenává časový průběh změny teploty vzorku, z něhož vyhodnocuje přímo hodnotu tepelné vodivosti.

Přístroj i vzorky musí být alespoň 24 hodin v místnosti, kde bude měření probíhat, aby došlo k vyrovnání teplot. Před zahájením vlastních experimentů je také nutné přístroj kalibrovat pomocí trojice referenčních vzorků se známou hodnotou tepelné vodivosti.

Na základě měření referenční tepelné vodivosti byly vyhodnoceny kalibrační konstanty, které byly uloženy do přístroje.

Výrobce přístroje předepisuje minimální rozměry měřených vzorků, aby byla přesnost měření co nejvyšší. Tyto požadavky byly splněny tím, že rozměry obou vzorků byly: 225x45x13 mm, přičemž se jednalo o odlitky vzorků vosků.

Na obrázku 6.5 je znázorněná sestava měřicí aparatury pro stanovení tepelné vodivosti vzorků vosků.



Obrázek 6.5 Sestava měřicí aparatury pro stanovení tepelné vodivosti vzorků vosků

Pro měření prvního teplotního bodu byly vzorky umístěny v místnosti s přibližně stálou teplotou prostředí poblíž přístroje po dobu min. 24 hodin, aby se vyrovnaly teploty vzorků i přístroje. Měření nadále probíhalo při pokojové teplotě 22 °C. Od každého vzorku bylo provedeno 12 opakovaných měření.

Pro měření druhého teplotního bodu byly oba vzorky umístěny do termostatické komory BINDER (viz obrázek 6.6 a 6.7), kde byly po dobu pěti hodin temperovány na teplotu 40 °C.



Obrázek 6.6 Temperace vzorků v termostatické komoře



Obrázek 6.7 Zařízení pro měření temperovaných vzorků

Vzhledem k tomu, že měření nebylo možné realizovat uvnitř komory, docházelo během manipulačních časů, (vychlazení sondy na chladicí desce po každém měření), k postupnému ochlazování vzorků. Z tohoto důvodu bylo možné dosáhnout pouze pěti opakovaných měření. Před měřením druhého vzorku byl tento vzorek opětovně několik hodin temperován.

6.2.2 Postup měření tepelné vodivosti

Po zapnutí přístroje je nutné vyčkat alespoň 30 minut k dosažení provozních teplot přístroje. Následně se sonda umístí na měřený vzorek a vyčká se 2 až 5 minut k ustálení teplot, (přístroj po ustálení teplot informuje obsluhu zvukovým signálem). Provede se první měření, kdy se nastaví vhodná proudová hustota pro žhavení odporového drátku tak, aby měřená teplotní diference ležela v intervalu $10\text{ °C} < T < 30\text{ °C}$. Po 60 s měření přístroj ukáže vyhodnocenou hodnotu tepelné vodivosti. Sonda se umístí na chladičí hliníkový blok a vyčká se dvě minuty k ustálení teplot. Následně je možné provést další měření. Výsledky provedených experimentů a závěr.

6.2.3 Výsledky měření tepelné vodivosti

Následující tabulky 6.3 a 6.4 ukazují naměřená data tepelné vodivosti obou vzorků tuhého vosku:

Tabulka 6.3 Naměřená tepelná vodivost zeleného a hnědého vosku, $T=22\text{ °C}$

Měření při $t = 22\text{ °C}$	Vosk Hyfill B-478 zelený	Vosk REMET B-478 hnědý
	Tepelná vodivost $\lambda\text{ [W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$	Tepelná vodivost $\lambda\text{ [W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$
1	0,1834	0,1869
2	0,1832	0,1907
3	0,1826	0,1914
4	0,1855	0,1905
5	0,1868	0,1943
6	0,1901	0,1997
7	0,1797	0,1940
8	0,1940	0,1942
9	0,1858	0,1934
10	0,1852	0,1962
11	0,1883	0,1934
12	0,1852	0,1968
Aritmetický průměr	0,1858	0,1935
Směrodatná odchylka	0,0037	0,0033

Tabulka 6.4 Naměřená tepelná vodivost zeleného a hnědého vosku, $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Měření při $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	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 $\lambda [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
1	0,1913	0,1858
2	0,1841	0,1938
3	0,1979	0,2028
4	0,1911	0,1977
5	0,1801	0,1956
Aritmetický průměr	0,1889	0,1951
Směrodatná odchylka	0,0069	0,0062

6.3 Určení měrné tepelné kapacity vosků

Předmětem tohoto experimentu bylo stanovit měrnou tepelnou kapacitu vzorků vosku v závislosti na teplotě.

6.3.1 Popis použitého vybavení, vzorků a metodiky při určení měrné tepelné kapacity vosků

Měrná tepelná kapacita byla měřena prostřednictvím měření celkového tepelného toku a stanovena entalpie. K tomuto měření byl použit diferenciální skenovací kalorimetr DSC Diamond. Vzorky vosků byly nejprve nakrájeny nožem na malé kousky a to tak, aby se vešly do kapsle.

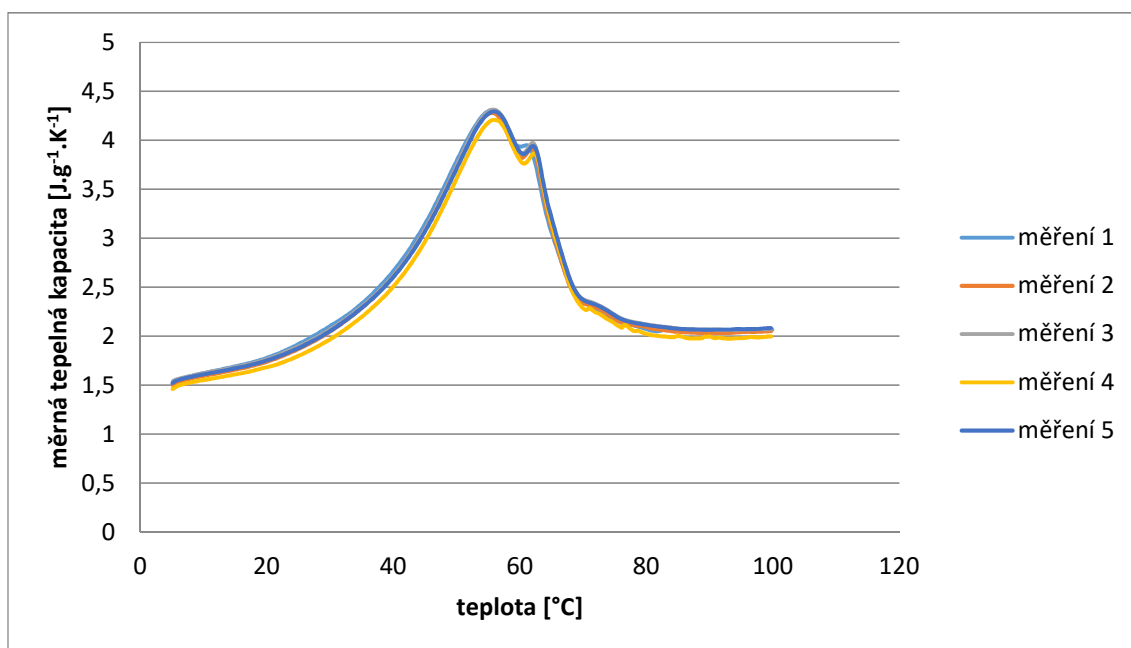
6.3.2 Postup měření při určení měrné tepelné kapacity vosků

Vzorek byl poté vložen do měřicí hliníkové kapsle (jmenovitý objem $40\text{ }\mu\text{l}$) a uzavřen (navážka vzorků byla cca $10 - 20\text{ mg}$). Před vlastním měřením byl vzorek v přístroji zahřát na $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ s výdrží cca 20 s , aby došlo k roztavení vzorku v kapsli a bylo tak dosaženo dobrého kontaktu vzorku se stěnou kapsle. Následovalo měření v rozsahu teplot od $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ s výdrží 1 minuty na počáteční a koncové teplotě s rychlostí ohřevu $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{minutu}$. Tento postup byl opakován pro každý druh vosku celkem 5krát pokaždé s novým vzorkem.

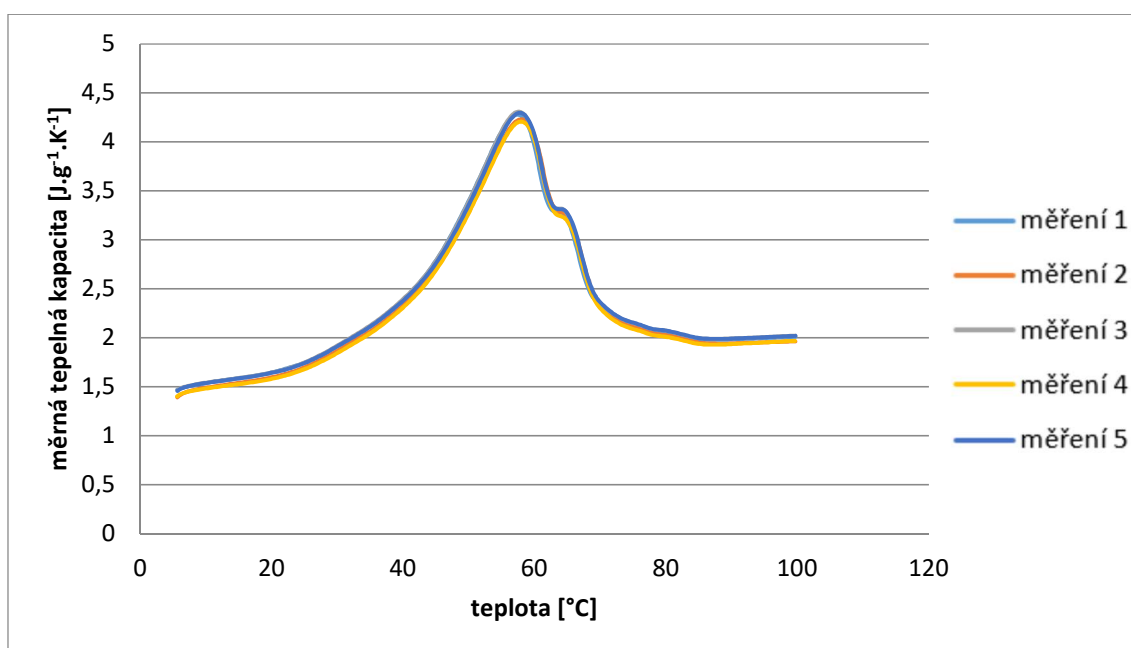
6.3.3 Výsledky měření pro určení měrné tepelné kapacity vosků

Byla stanovena měrná tepelná kapacita a entalpie dvou druhů vosků v závislosti na teplotě v rozsahu $5\text{ až }100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

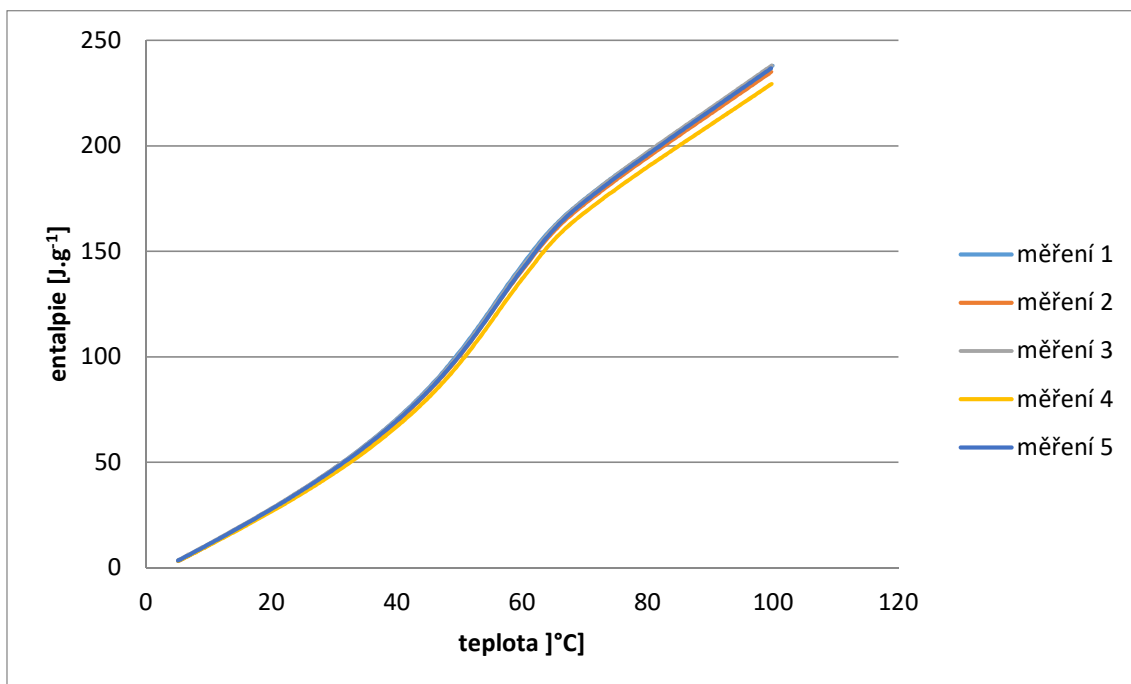
Na obrázku 6.8 a 6.9 jsou uvedeny průběh měrné tepelné kapacity v závislosti na teplotě v rozsahu cca 5 °C až 100 °C. Je zde vidět lokální maximum měrné tepelné kapacity charakterizující fázovou změnu přechodu z pevné do kapalné fáze – tání vosku. Zde je patrný nárůst měrné tepelné kapacity, která dosahuje v oblasti nejvyššího bodu průběhu hodnot cca 4,3 J.g⁻¹.K⁻¹ při teplotě cca 55,7 °C u hnědého vosku a cca 58 °C u zeleného vosku. Na obrázku 6.10 a 6.11 jsou pak uvedeny průběhy entalpie.



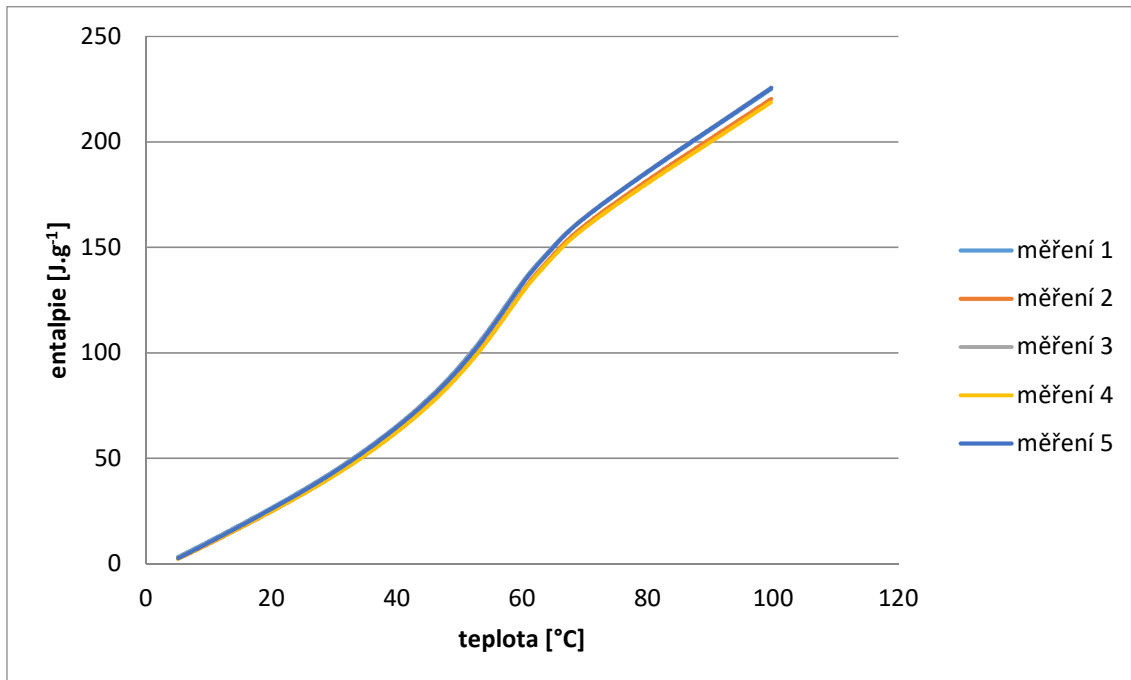
Obrázek 6.8 Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě vosku - hnědý vosk [K7]



Obrázek 6.9 Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě vosku - zelený vosk [K7]



Obrázek 6.10 Závislost entalpie na teplotě vosku - hnědý vosk



Obrázek 6.11 Závislost entalpie na teplotě vosku – zelený vosk

6.4 Reologické vlastnosti vosku

Cílem měření bylo zjistit reologické vlastnosti vzorků vosků – koeficient konzistence a index toku.

6.4.1 Popis použitého vybavení, vzorků a metodiky pro stanovení reologických vlastností

Měření bylo provedeno na reometru Rheotec RC 20 pomocí systému paralelních desek P25 a ME-CP/PP se spodní deskou vyhřívanou pomocí externího termostatu Julabo F 25 EH (horní deska vyhřívání neumožňuje). Vzdálenost ploch byla u všech měření v rozmezí 0,5 až 0,8 mm.

U všech měření byl vzorek nejprve roztaven na spodní desce při teplotě 70 až 72 °C. Poté byla spodní deska vyzvednuta k horní desce a po vzájemném ustavení desek byla přenastavena teplota spodní desky na požadovanou teplotu měření. Po ustálení teploty bylo provedeno měření. Proměřovaný rozsah teplot byl u obou vzorků 55 °C až 72 °C.

6.4.2 Postup měření při zjišťování reologických vlastností

Vlastní měření probíhalo vždy ve dvou po sobě následujících krocích, při nichž byla nejdříve zvyšována smyková rychlost z minimální na maximální nastavenou hodnotu (up) a následně snižována zpět (down). Rozsah smykových rychlostí byl volen od 5 s⁻¹ (minimální nastavitelná) do 1000 s⁻¹ (1200 s⁻¹). V každém kroku bylo provedeno 30 (40) měření s lineárním krokem, přičemž jeden bod byl měřen po dobu 15 s (20 s).

6.4.3 Výsledky měření tepelné vodivosti

Měření bylo provedeno nejdříve pro zelený vosk při teplotě 70 °C. Při tomto prvním experimentu bylo zjištěno, že vosk vykazuje reologické chování, které lze popsat modelem Ostwald-de Waele

$$\tau = K\gamma^n \quad (11)$$

kde K je koeficient konzistence toku, γ je rychlost smykové deformace, n je index toku

Hodnota indexu toku byla blízká 1, což vedlo k volbě lineárního kroku při změně rychlosti smykové deformace u jednotlivých měřených hodnot smykové rychlosti. Měření při 70 °C (72 °C) bylo několikrát zopakováno. Následně bylo provedeno měření pro nižší teploty a posléze byl proměřen vzorek hnědého vosku.

Vyhodnocené parametry reologického modelu (koeficient konzistence a index toku), získané z měření zeleného vosku jsou uvedeny v následující tabulce 6.5, data pro hnědý vosk jsou uvedeny v tabulce 6.6.

Tabulka 6.5 Koeficient konzistence a index toku zeleného vosku v závislosti na teplotě vzorku

T [°C]	55,1	60,1	65,0	70,0	70,0	71,9	71,9	71,9
K [Pa.sⁿ]	4,29	1096,78	23,16	3,05	3,73	2,58	2,18	4,00
n [-]	0,529	0,303	0,728	0,964	0,929	0,916	0,960	0,919

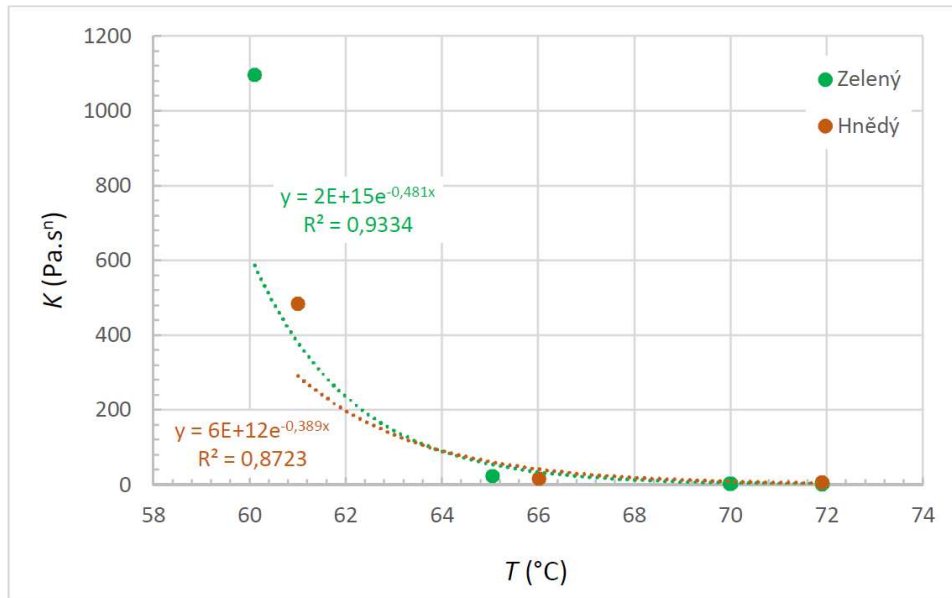
Tabulka 6.6 Koeficient konzistence a index toku hnědého vosku v závislosti na teplotě vzorku.

T [°C]	57,1	61,0	66,0	71,9
K [Pa.sⁿ]	92,68	485,13	16,32	6,46
n [-]	0,440	0,357	0,704	0,783

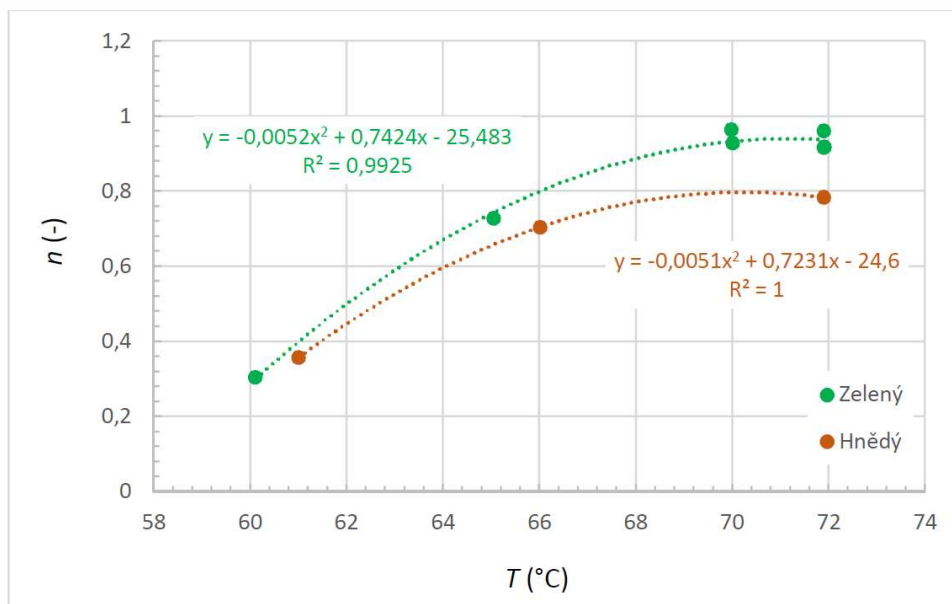
Kurzívou označené hodnoty v předchozích tabulkách poukazují na data, která nepopisují správně tokové vlastnosti vosků. Při nejnižších teplotách totiž došlo k zatuhnutí vosku na horní desce a tloušťka nataveného vosku byla tedy nižší než nastavená mezera. To se projevilo i při měření prvního kroku, kdy se „utrhla“ vrstva vosku zatuhlého na horní desce a pak docházelo k jejímu smýkání po spodní desce nebo po vrstvě roztaveného vosku na spodní desce (viz záznamy z měření na obrázku 6.16 a 6.17).

Z tohoto důvodu je třeba brát jako reálná data pouze hodnoty od 60 °C výše. Nižší teploty je možné proměřit pouze na reometru s vyhřívanou spodní i horní deskou, kterou však pracoviště nebylo vybaveno. Pro vstupní data simulací jsou tyto hodnoty však dostačující.

Grafické znázornění závislosti koeficientu konzistence na teplotě pro oba vzorky je uvedeno na obrázku 6.12. 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 6.12 Závislost koeficientu konzistence obou vzorků na teplotě [K7]

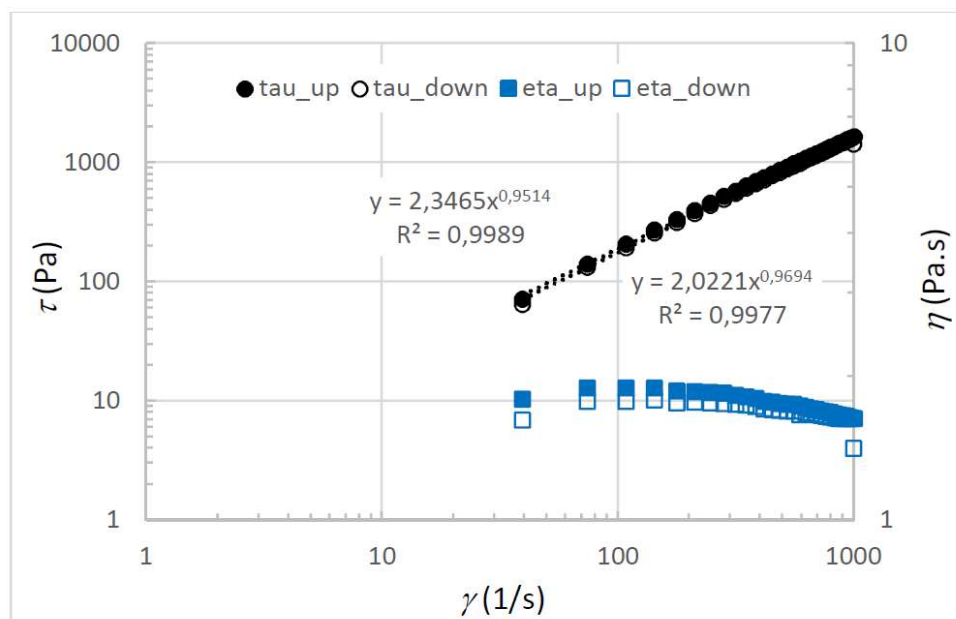


Obrázek 6.13 Závislost indexu toku obou vzorků na teplotě [K7]

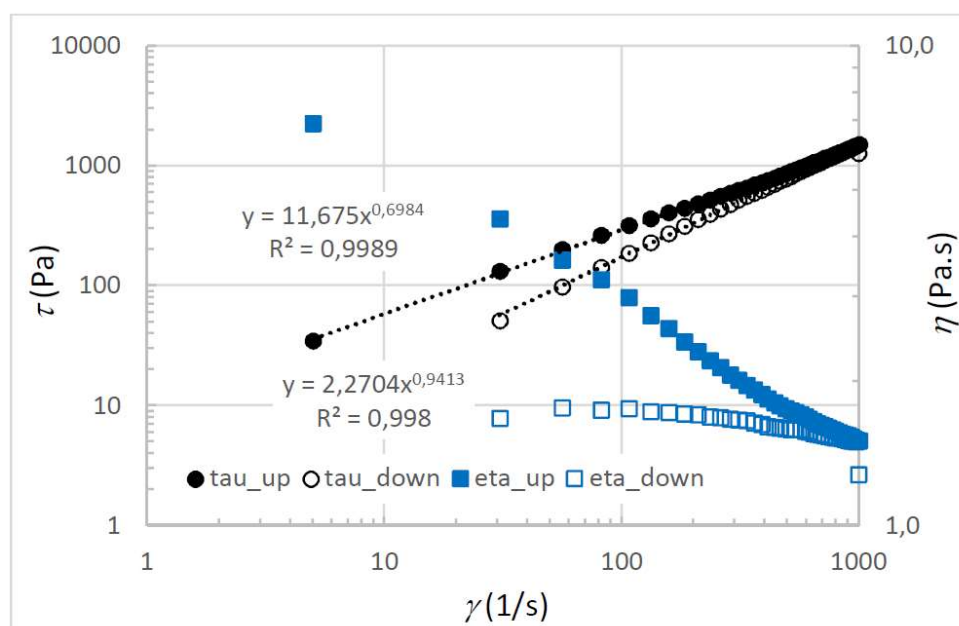
Na obrázku 6.13 je uvedena teplotní závislost indexu toku obou měřených vzorků. Jak je zřejmé, hodnota se výrazně mění, zejména při teplotách do 65 °C. Při teplotách mezi 55 °C a 65 °C evidentně dochází ke změně ve struktuře materiálu (prudký nárůst indexu toku u obou vzorků).

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.

Na obrázku 6.14 a 6.15 jsou jako příklad uvedeny reogramy pro hnědý a zelený vosk při 71,9 °C.

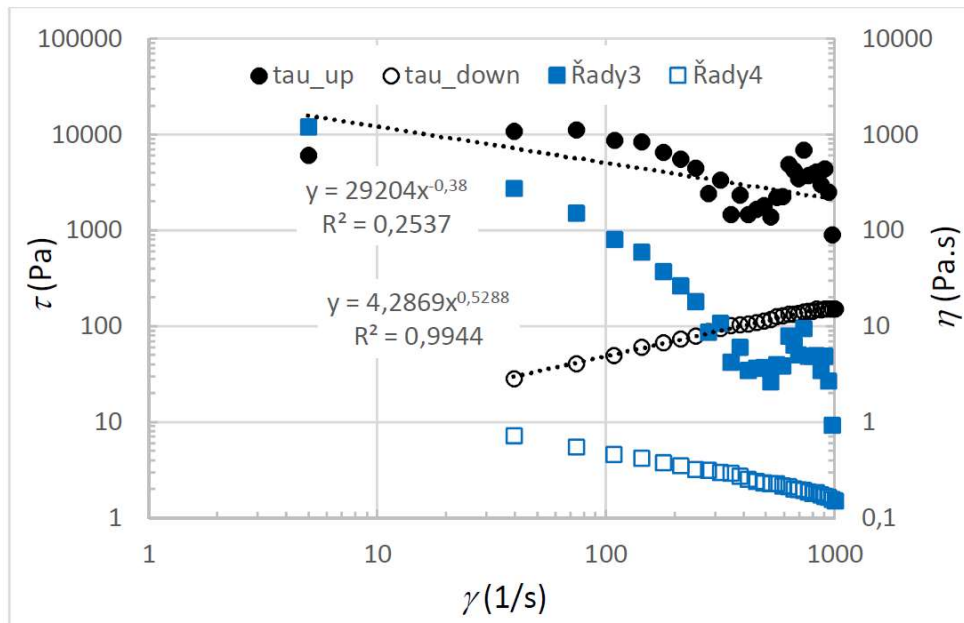


Obrázek 6.14 Reogram zeleného vosku při teplotě 71,9 °C.

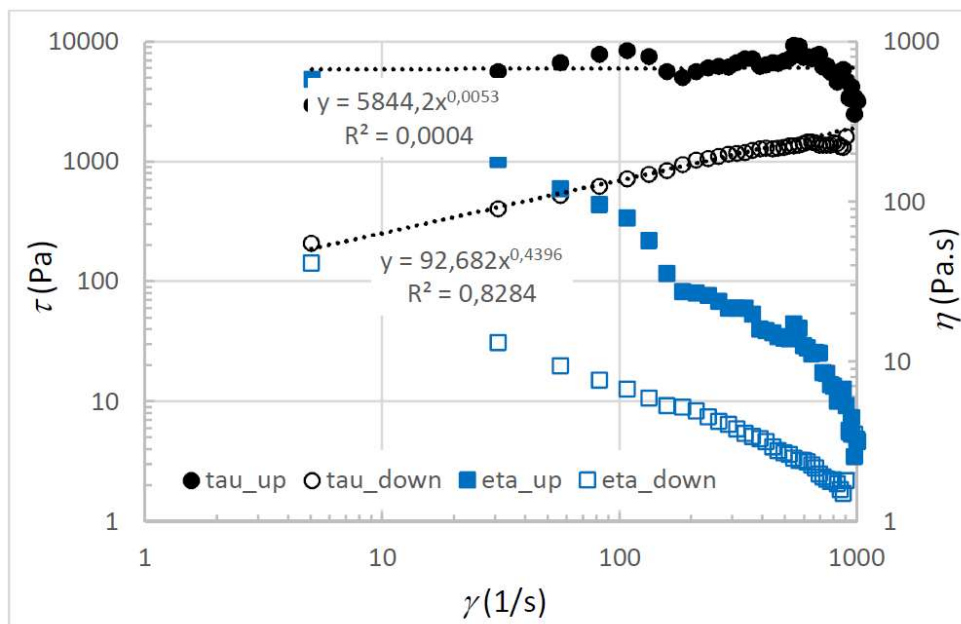


Obrázek 6.15 Reogram hnědého vosku při teplotě 71,9 °C.

U všech záznamů v příloze 2 je patrná odlišnost mezi oběma kroky měření. V prvním kroku (viz obrázek 6.16 a 6.17), kdy docházelo k postupnému zvyšování smykové rychlosti, vykazují záznamy vyšší napětí (zdánlivou viskozitu), než při druhém kroku, kdy byla rychlost postupně snižována.



Obrázek 6.16 Reogram zeleného vosku při teplotě 55,1 °C.



Obrázek 6.17 Reogram hnědého vosku při teplotě 57,1 °C.

Odlišnost je výraznější zejména v oblasti nízkých hodnot smykové rychlosti. Důvodů těchto odlišností může být několik. Jedním z nich je nízká hodnota měřeného krouticího momentu při malých rychlostech a tedy menší přesnost měření. Dalším důvodem mohl být fakt, že byla vyhřívána pouze spodní deska a na horní desce byla tedy teplota nižší, což mohlo vést k zatuhnutí povrchové vrstvy vzorků u horní desky, což je evidentní pro nejnižší teploty u obou vzorků (obrázek 6.16 a 6.17). Data v předchozích tabulkách byla vyhodnocena jako průměr z obou kroků měření.

6.5 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.

6.5.1 Popis použitého vybavení, vzorků a metodiky při měření viskozity vosků

Byly měřeny vždy dva vzorky od jednotlivých vosků s následujícím označením: Remet Hyfill B478 a rekonstituovaný Remet Hyfill B478

Viskozita byla měřena na kapilárním viskozimetru, jehož způsob měření vychází z Hagen-Poiseuilleova zákona pro laminární proudění tekutiny v trubici s kruhovým průřezem.

6.5.2 Postup měření viskozity vosků

Měření bylo prováděno tlakovým spádem, přičemž se měřil objemový průtok pomocí stopek a odměrné nádoby.

Pro oba vosky byl pro měření viskozity použit kapilární přetlakový viskozimetr v rozmezí teplot 60 – 72° C.

6.5.3 Výsledky měření viskozity vosků

Tabulka 6.7 Zelený vosk

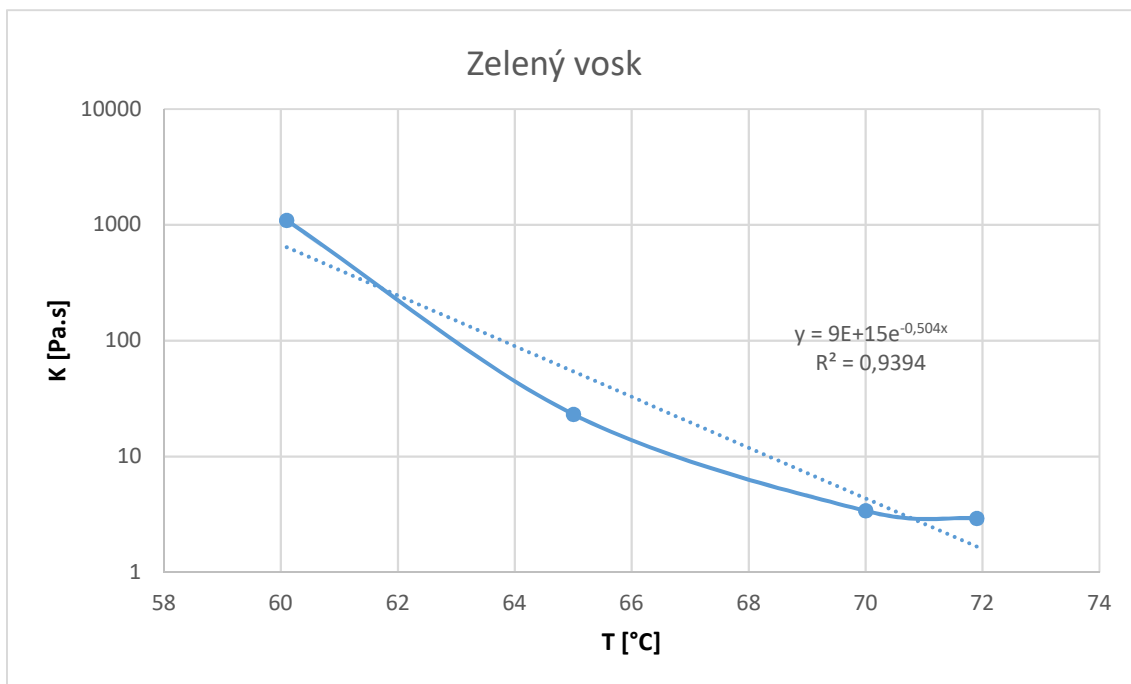
T [°C]	K [Pa.s]	n [-]
60,1	1096,8	0,303
65	23,16	0,728
70	3,39	0,9465
71,9	2,92	0,9317

Tabulka 6.8 Hnědý vosk

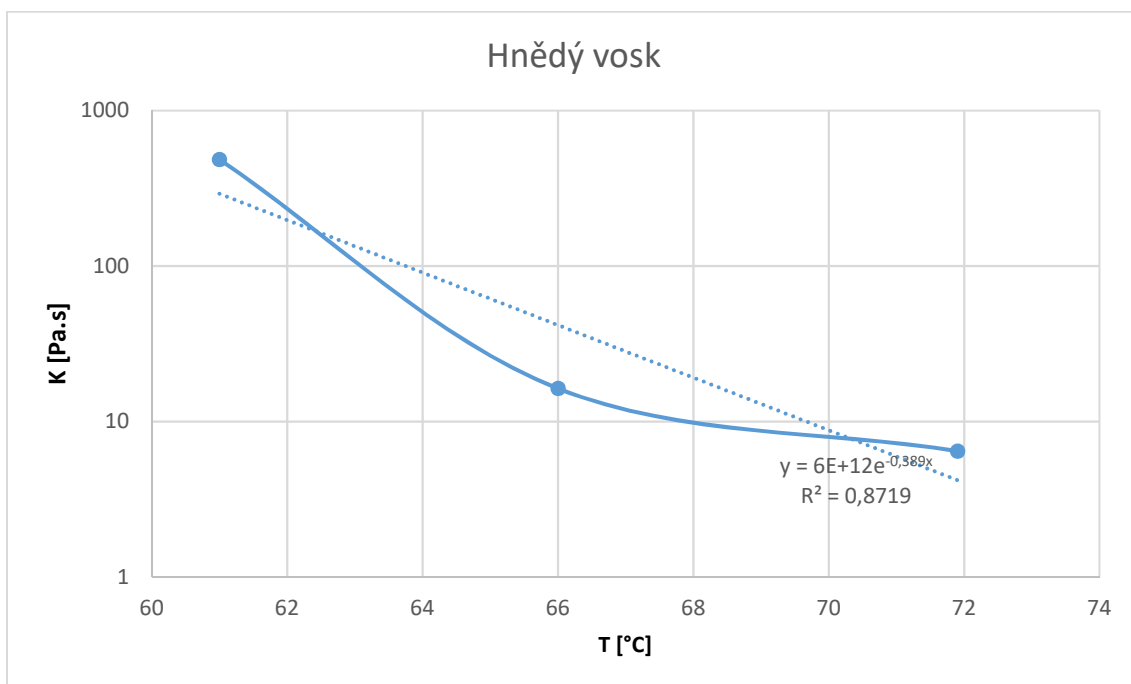
T [°C]	K [Pa.s]	n [-]
61	485,13	0,357
66	16,32	0,704
71,9	6,46	0,783
71,9	2,92	0,9317

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.

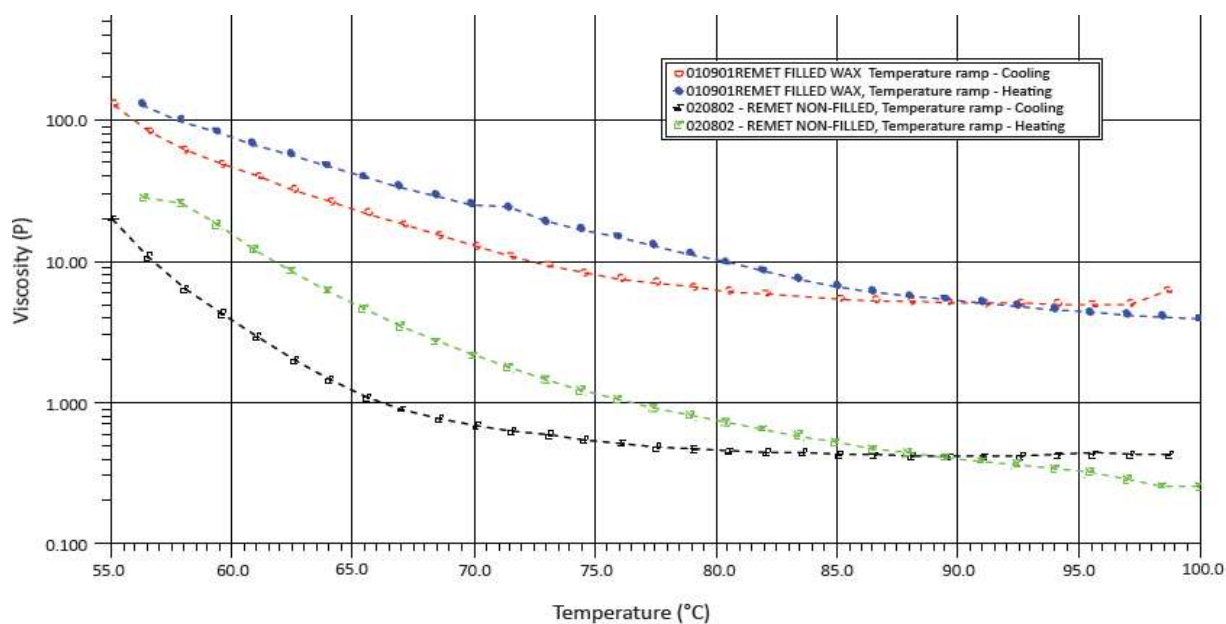
Závislost naměřené viskozity obou vzorků na teplotě je znázorněna na obrázku 6.18 a 6.19.



Obrázek 6.18 Průběh viskozity u zeleného vosku



Obrázek 6.19 Průběh viskozity u hnědého vosku



Obrázek 6.20 Průběh křivek viskozity v závislosti na teplotě u hnědého a zeleného vosku [40]

Z obrázku 6.20 je patrný rozdíl v průběhu křivek chladnutí a ohřevu u panenského Hyfill B478 a rekonstituovaného Hyfill B478. Větší rozptýlení křivek u rekonstituovaného vosku může značit jeho zhoršenou kvalitu než u vosku panenského.

6.6 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 aplikaci této zkoušky na vzorcích vosku lze říci, že pro křehčí vosky je více vhodná než zkouška tahem, které je u nich obtížně proveditelná.

6.6.1 Popis použitého vybavení, vzorků a metodiky při stanovení ohybových vlastností vosků

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

ZV – zelený vosk válec

HK – hnědý vosk kvádr

ZK – zelený vosk kvádr

K ohybové zkoušce byly použité následující přístroje a zařízení:

- Přístroj pro vstřikování vosku Miniwax
- Navržená silikonová forma pro voskové vzorky (viz obrázek 6.21)
- 2x spona
- plastové sklo
- separační prostředek
- Elektromechanický zkušební přístroj Abtest 6050 (viz obrázek 6.22)



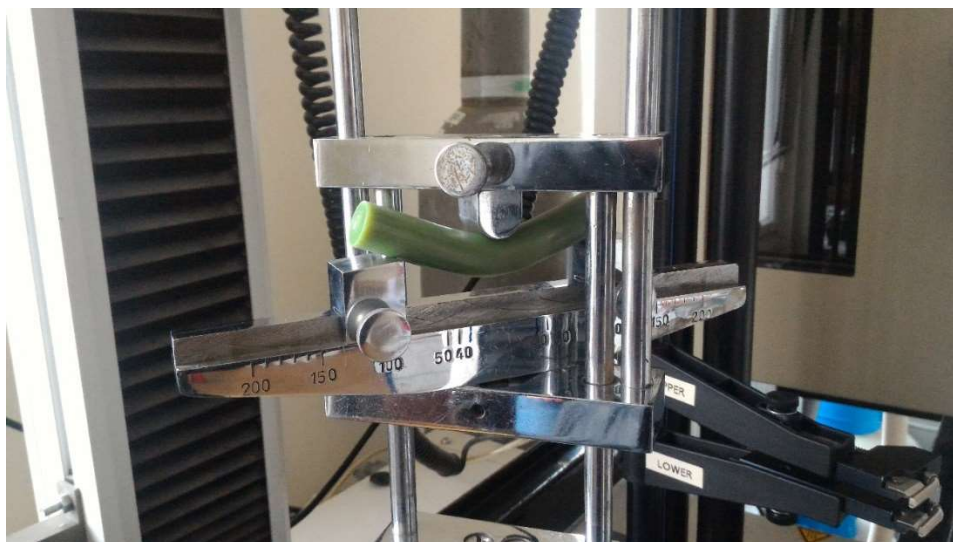
Obrázek 6.21 Forma pro vstřikování vosku

Nejprve byly zhotoveny zkušební vzorky odlévání do zhotovené silikonové formy. Vnitřek formy byl opatřen separačním postřikem, aby bylo možné po odlití a vychladnutí vzorky snadno vyjmout. Jako druhá polovina formy sloužilo plastové sklo, které zároveň plnilo funkci kontrolní, (stavu naplnění formy voskem). Vstřikované válcové vzorky byly zhotoveny na vstřikolise do kovové formy.

6.6.2 Postup měření při stanovení ohybových vlastností vosků

Během zkoušky ohybem je zkušební těleso namáháno jak tlakem, tak tahem. V horní vrstvě zkušebního tělesa je tahové napětí, přičemž směrem k neutrální ose se jeho hodnota zmenšuje k nule. Poté od nulového napětí se mění směrem k dolní polovině tělesa na napětí tlakové.

Jak je vidět z uspořádání na obrázku 6.22, tak se jedná o tříbodový ohyb vzorku.



Obrázek 6.22 Průběh zkoušky ohybem

6.6.3 Výsledky měření pro stanovení ohybových vlastností vosků

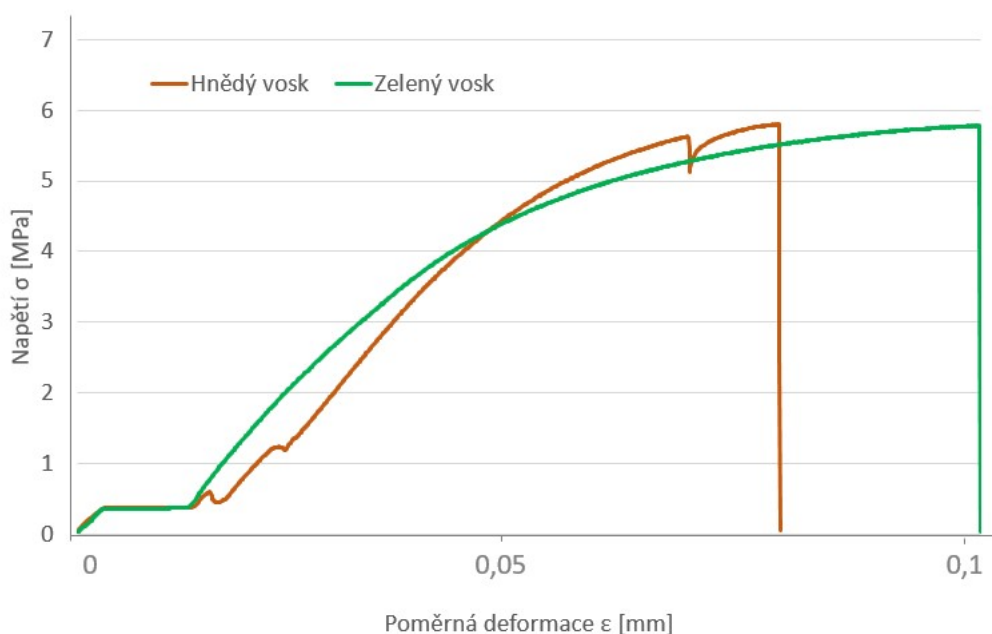
Na základě provedených zkoušek, byly zjištěny výsledky uvedené v tabulce 6.9 :

Tabulka 6.9 Výsledky modulů pružnosti voskových těles pro oba druhy vosků

	HK	HK	HK	HV	HV	HV	ZK	ZK	ZK	ZV	ZV	ZV
eps %	0,05-0,25	1–2	2 - 3	0,05-0,25	1 až 2	2 až 3	0,05-0,25	1 až 2	2 až 3	0,05-0,25	1 až 2	2 až 3
	103,6	54,9	116,7	90	56,8	100,43	116,3	128	124,2	112,2	76,8	104,0
	93,2	82,6	152,8	20,6	2,7	97,5	83,9	141,9	118,7	90,2	54,8	107,7
	95,9	111,2	179,2	98,6	91,3	106,8	111,1	125,4	129,6	92,2	88,7	111,6
	91,4	100,7	142,6	106,1	88,9	115,8	109	147,5	129,7	110,5	80,9	106,4
	109,6	141,9	157,9	68,4	52,8	109,6	113,7	119,1	129,5	93,1	50,8	98,3
	126,8	144,8	163,1	108,9	90,1	112,1	111,1	123,8	116,6	110,4	78	98,6
	110,9	136,6	141,6	14	45,9	107	101,2	127,7	125	98,6	79,2	115,5
	102,5	94,3	96,5	100,3	50,2	77,2	96,9	134,4	119,6	105,6	72,1	106
	70,8	48,7	94,4	110,2	94,9	119,4	110,8	127,5	129,3	96,6	68,4	98
	75,6	102,3	136,7	75,7	49,8	69,5	113,7	128,6	122,4	17,4	0,1	79,3
Průměry [MPa]	98,0	101,8	138,2	79,3	62,3	101,5	106,8	130,4	124,5	92,7	65,0	102,5
Sm.Odch.	15,8	31,9	26,6	33,6	27,6	15,5	9,5	8,1	4,8	26,3	24,3	9,5
Rozptyl	249,5	1020,2	705,5	1131,9	762,8	239,3	89,7	66,2	22,6	690,5	590,3	90,0
Sm.Odch.průměru	5,0	10,1	8,4	10,6	8,7	4,9	3,0	2,6	1,5	8,3	7,7	3,0
Var.koef.	16,1%	31,4%	19,2%	42,4%	44,3%	15,2%	8,9%	6,2%	3,8%	28,4%	37,4%	9,2%
R=max.-min.	56	96,1	84,8	96,2	92,2	49,9	32,4	28,4	13,1	94,8	88,6	36,2
Medián	99,2	101,5	142,1	94,3	54,8	106,9	110,95	127,85	124,6	97,6	74,436	105,01
Intervaly spolehlivosti												
a=0,05	11,3	22,8	19,0	24,1	19,8	11,1	6,8	5,8	3,4	18,8	17,4	6,8
a=0,01	16,2	32,8	27,3	34,6	28,4	15,9	9,7	8,4	4,9	27,0	25,0	9,7

U červeně vyznačených vzorků v tabulce 6.9 je počátek křivky 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. V oblasti $\varepsilon = 0,05 - 0,25 \%$ je modul pružnosti většinou konstantní a je počítán jako směrnice sečny. V oblasti $\varepsilon = 1 - 2 \%$ se zpravidla vodorovná závislost napětí – deformace náhle obrací vzhůru, modul představuje spojnice trendu. Nakonec v oblasti $\varepsilon = 2 - 3 \%$ mívá závislost napětí – deformace nejstrmější stoupání a modul zde představuje spojnice trendu.

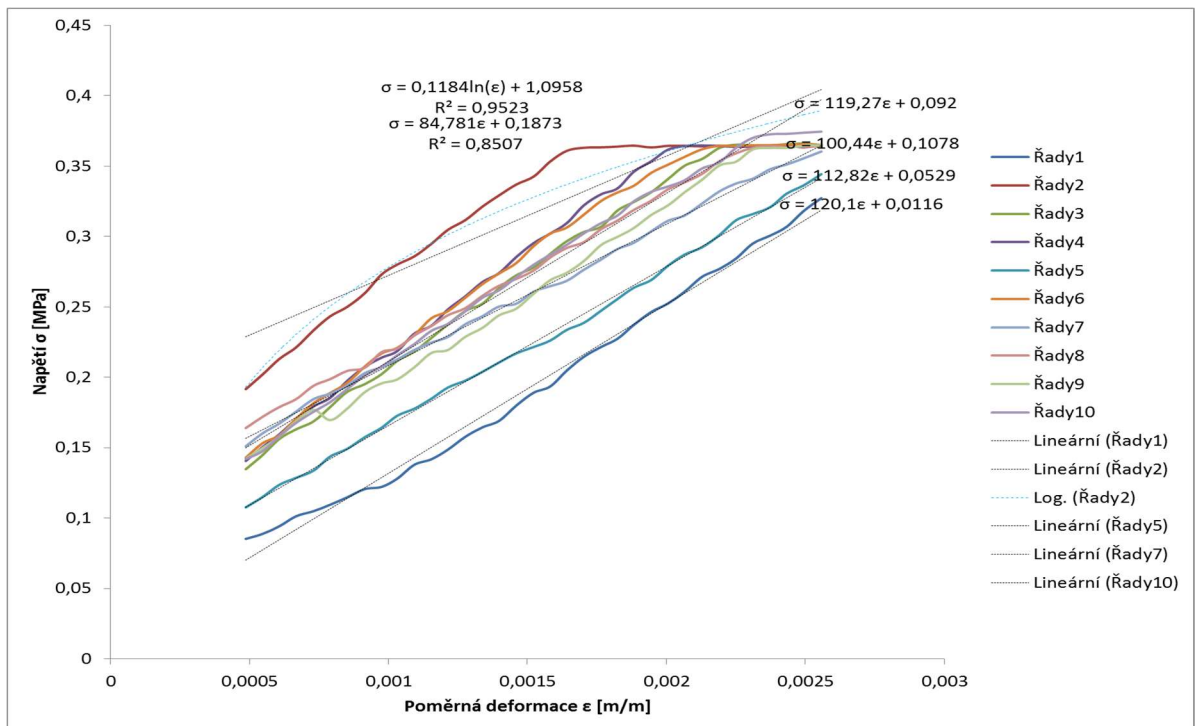
Na základě normy ČSN EN ISO 178 [44] je z obrázku 6.23 patrné, že se zkušební tělesa z panenského i z rekonstituovaného vosku zlomí před mezí kluzu.



Obrázek 6.23 Křivky napětí v ohybu σ vůči deformace ohybem ε a průhybem s u obou druhů vosků

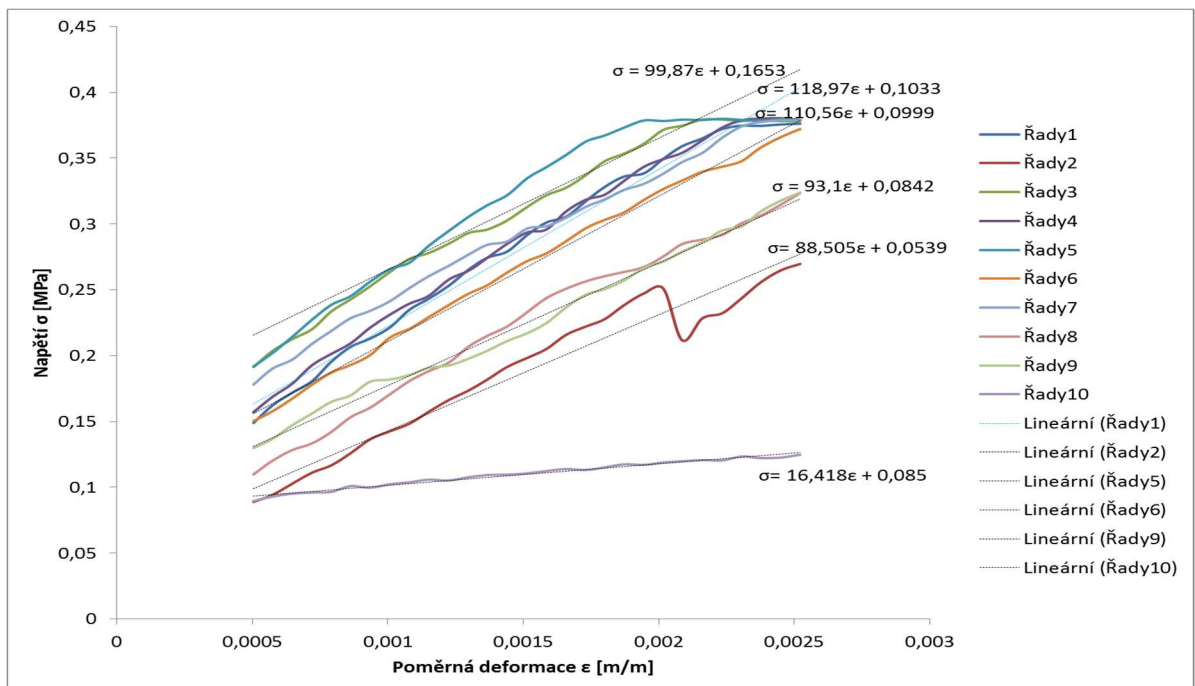
Podrobný průběh zkoušek (modul pružnosti je počítán pro počáteční oblast) u jednotlivých vzorků je uveden na obrázku 6.24, 6.25, 6.26 a 6.27.

Z obrázku 6.24 je možné odečíst průběh závislosti poměrného prodloužení na napětí pro vzorek ZK. Modul pružnosti E u těchto vzorků nabývá hodnot $E = 84,8$ až $120,1$ MPa. Průměrná hodnota je pak $E = 106,8 \pm 3,0$ MPa.



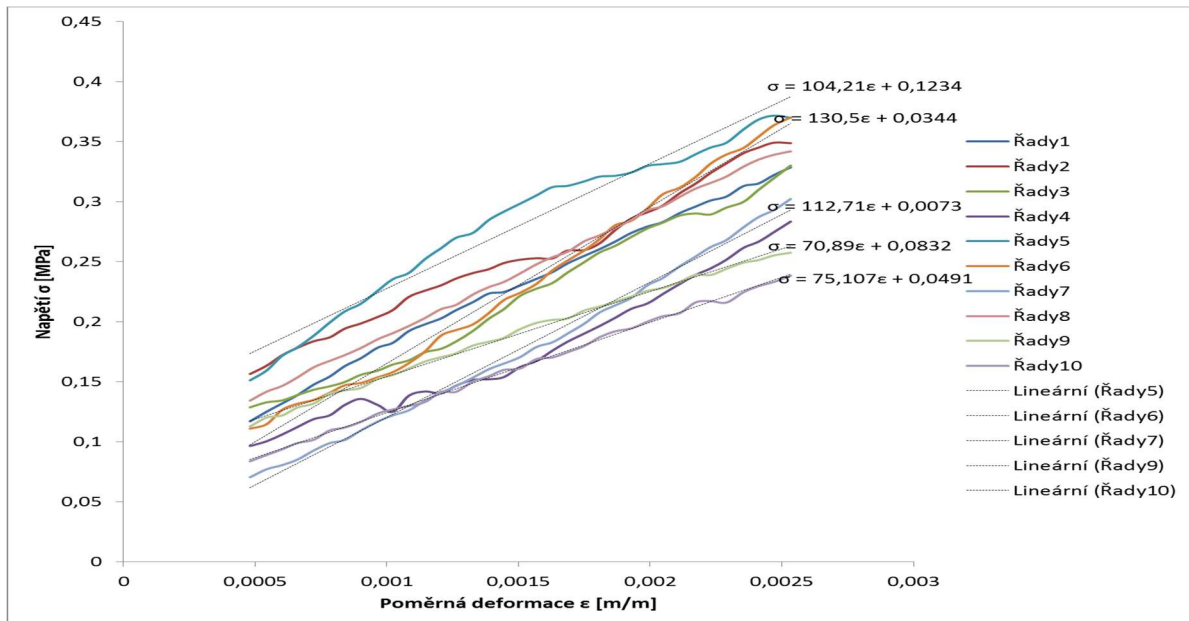
Obrázek 6.24 Závislost napětí na poměrné deformaci – vzorek ZK

Obrázek 6.25 znázorňuje průběh závislosti poměrného prodloužení na napětí pro ZV. 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. V těchto hodnotách byla zanedbána jedna extrémní křivka nabývající hodnoty $E = 16,42$ MPa.



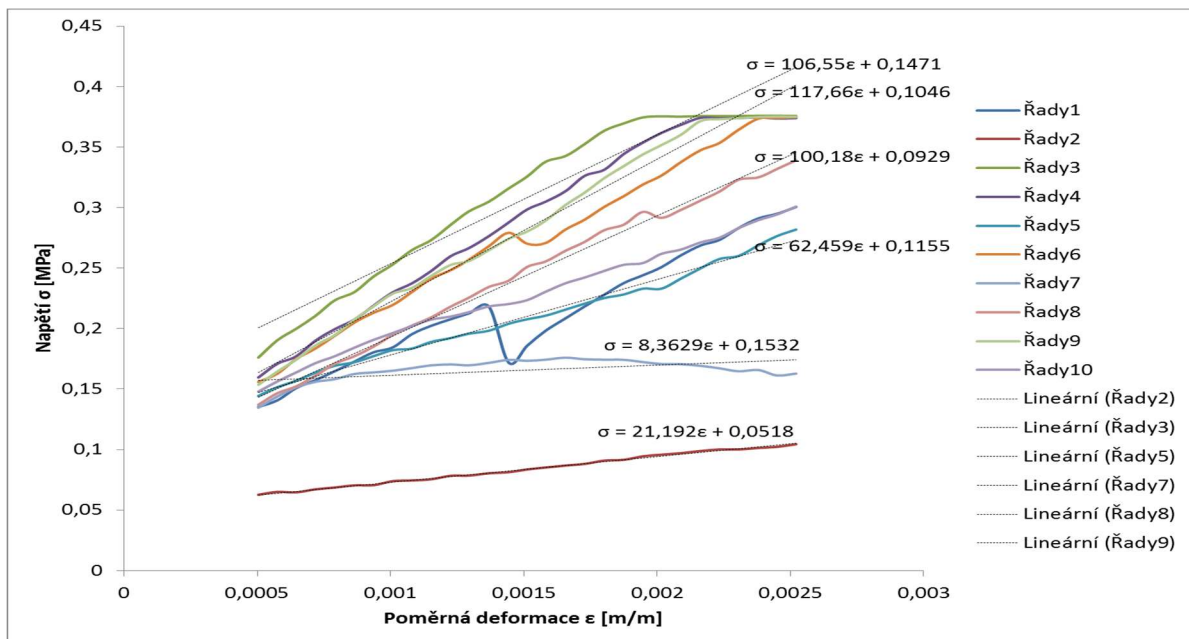
Obrázek 6.25 Závislost napětí na poměrné deformaci – vzorek ZV

Obrázek 6.26 znázorňuje průběh závislosti poměrného prodloužení na napětí pro HK. Modul pružnosti E u těchto vzorků nabývá hodnot $E = 70,9$ až $130,5$ MPa. Průměrná hodnota je pak $E = 98,0 \pm 5,0$ MPa.



Obrázek 6.26 Závislost napětí na poměrné deformaci – vzorek HK

Obrázek 6.27 znázorňuje průběh závislosti poměrného prodloužení na napětí pro HV. Modul pružnosti E u těchto vzorků nabývá hodnot $E = 62,5$ až $117,7$ MPa. Průměrná hodnota je pak $E = 94,8 \pm 4,6$ MPa. V těchto hodnotách byly zanedbány dvě extrémní křivky. První nabývala hodnot $E = 8,36$ MPa a druhá $E = 21,19$ MPa.



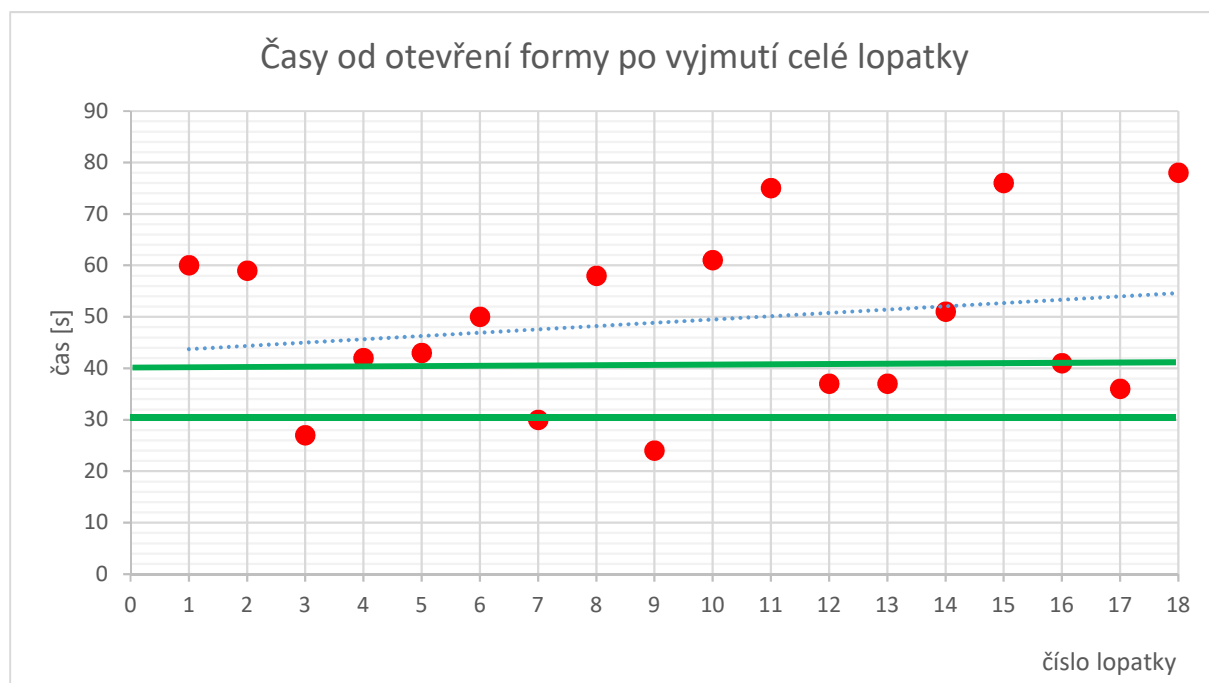
Obrázek 6.27 Závislost napětí na poměrné deformaci – vzorek HV

7 Provedení 3D nálezů lopatek lisovaných podle parametrů v simulaci

Na základě provedené simulace byly lopatky nalisované v reálném výrobním procesu. Aby bylo možné ověřit správnost navrženého procesu, bylo zapotřebí provést 3D scan vyrobených lopatek. Ke 3D skenování byl použit 3D skener ATOS Compact Scan 2M a vyhodnocovací software ATOS Professional V7.5 SR2. Na 3D nálezby lopatek bylo třeba zvolit nejvhodnější kusy, které by co nejvěrohodněji odráželi celý proces výroby voskového modelu. Z tohoto důvodu byla provedena analýza výrobních časů.

7.1 Výběr lopatek pro 3D nálezby

Jak bylo blíže popsáno v kapitole 5, byly pro další výzkum zaznamenávány výrobní časy a to od rozjetí polovin formy až po vyjmutí z přípravku pro chladnutí. Díky tomuto záznamu bylo zjištěno, že časy vyjmutí lopatky z formy jsou velmi proměnné. Hlavní příčinou je nevhodná konstrukce formy, která by měla být opatřena vyhazovači. Ty by pak zajistili snadné vyjmutí voskového modelu, který v době vyjímání je z důvodu vysoké teploty ještě rozměrově nestálý. [K4] Tato část výroby má výrazný vliv na výslednou kvalitu konečného odlitku a jelikož kvalita modelů je zde výrazně ovlivněna lidským faktorem, je nutné úpravu formy řešit. Na obrázku 7.1 je na ukázkou zobrazen rozptyl časů vyjmutí jednotlivých lopatek z panenského vosku, přičemž ideální čas vyjímání je od 30 do 40 sekund. (Toto časové pásmo je zvýrazněno zelenými přímkami). Kusy získané při náběhu výroby zde nejsou zaznamenány.



Obrázek 7.1 Zaznamenané časy vyjímání modelů lopatek z panenského zeleného vosku ze vstřikovací formy [K7][K3]

Z výše uvedených důvodů byly pro 3D náměry vybrány lopatky 3 a 15. Lopatka s číslem 3 byla vyjmuta za 27 sekund, přičemž i veškerá následná manipulace probíhala přesně dle navrženého technologického postupu. Z tohoto důvodu byl předpoklad, že by tato lopatka měla být nejpresnější. Lopatka 15 byla zvolena z toho důvodu, že její vyjímání probíhalo nejdéle dobu a to 76 sekund. To bylo způsobeno uvíznutím lopatky ve formě. Během jejího vyjímání docházelo ke zjevným deformacím voskového modelu, které pak mají za následek rozdíly vůči nominálnímu tvaru. Analogicky se postupovalo při výběru lopatek z hnědého rekonstituovaného vosku. Pro měření byly vybrány lopatky 6 a 8. Voskový model č. 6 byl vyjímán nejdéle a to 62 s, model č. 8 byl vyjímán nejkratší dobu 25 s. Pro přehlednost se lopatky dále označují dle tabulky 7.1

Tabulka 7.1 Označení lopatek pro 3D skenovací měření

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

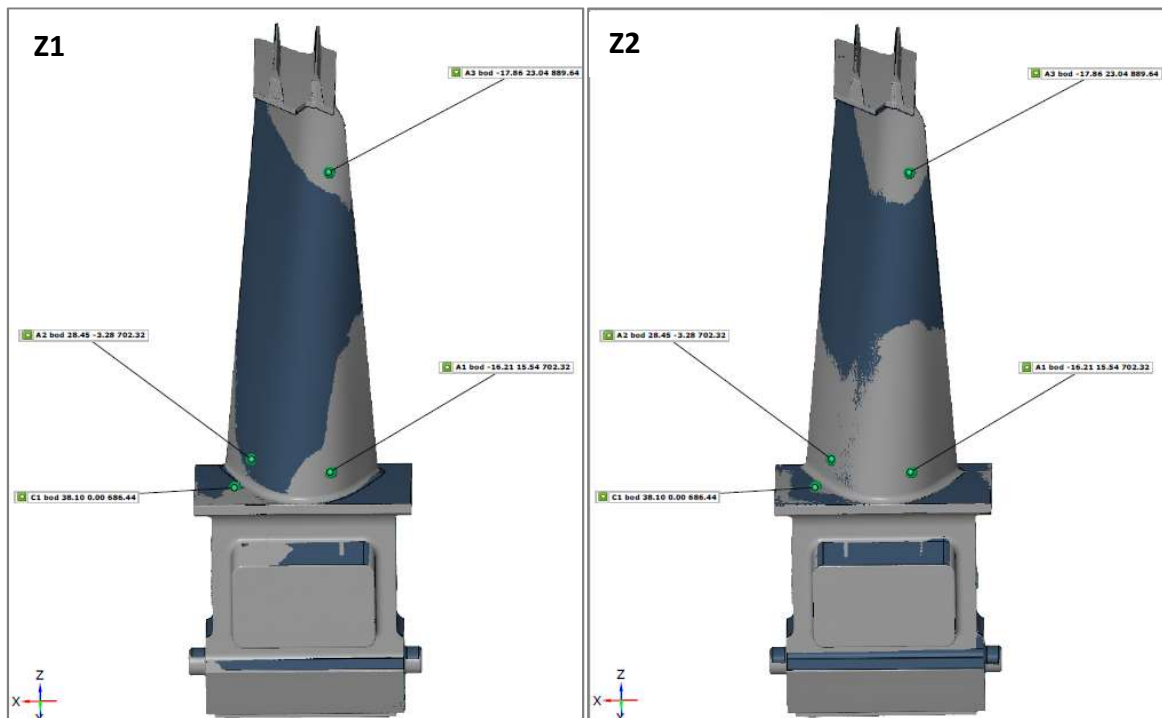
Pozn. 1 – Pro modely vyjmuté bez problémů a nejrychleji.

2 – Pro modely vyjmuté v sérii nejpomaleji.

7.2 Referenční body

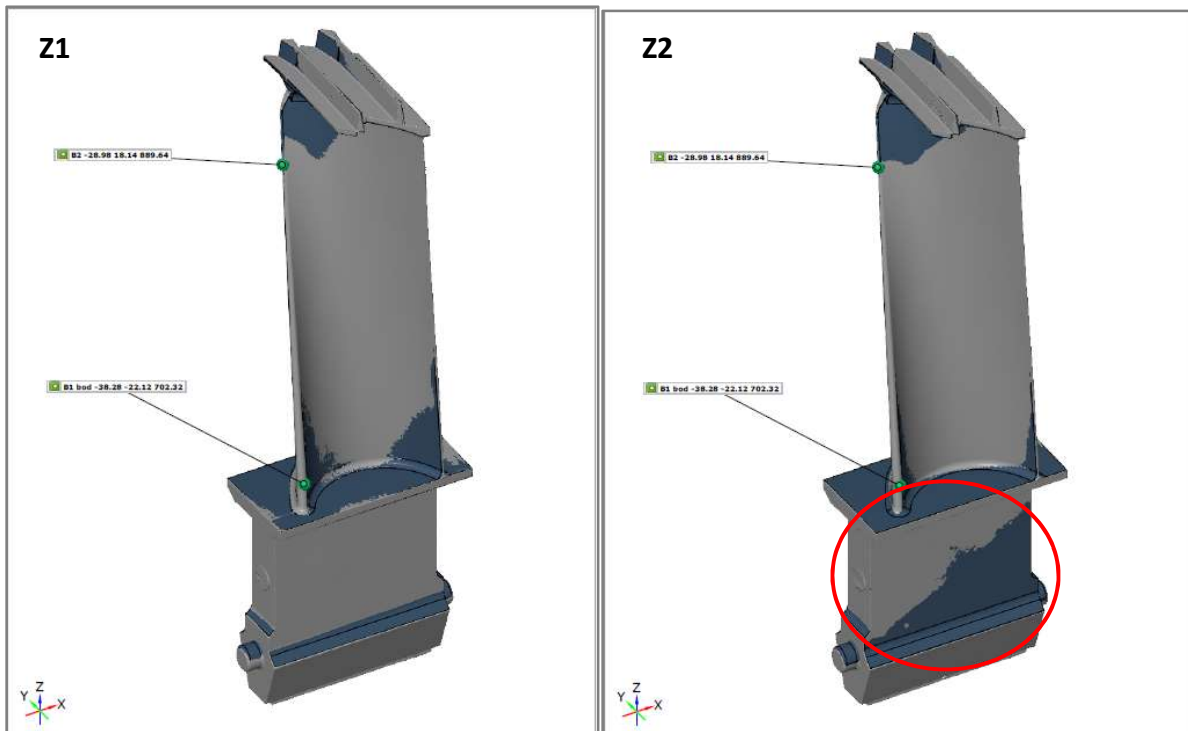
Na obrázku 7.2, 7.3, 7.4 a 7.5 je rozdíl mezi rozměrovými výsledky 3D scanu a rozměry CAD modelu znázorněn barevně. Součástí výsledků scanu je i vyčíslení odchylky voskového modelu od požadovaného tvaru definovaného CAD modelem.

7.2.1 Referenční body u modelů ze zeleného panenského vosku Remet Hyfill B478



Obrázek 7.2 Porovnání 3D náměru lopatky ze zeleného vosku s CAD modelem, vnější strana listu (šedá barva = náměr, modrá barva = CAD model) [K9]

Na obrázku 7.2 je zřetelný rozdíl mezi jednotlivými lopatkami ve střední části listu. Lopatka Z1, která byla vyjmuta bez problémů, vykazuje ve většině plochy listu shodu s CAD modelem. U lopatky Z2 se potvrdil předpoklad, že díky náročnému vyjímání budou odchylky výraznější. [K9]

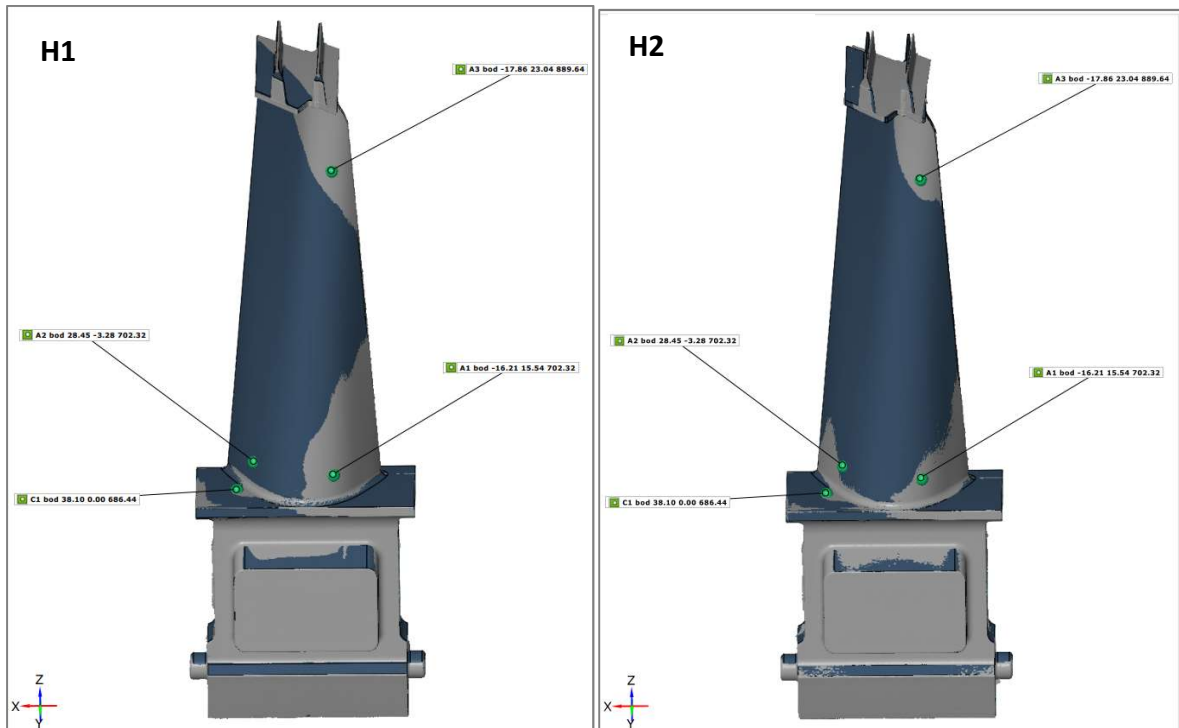


Obrázek 7.3 Porovnání 3D náměru lopatky ze zeleného vosku s CAD modelem, vnitřní strana listu (šedá barva = náměr, modrá barva = CAD model)

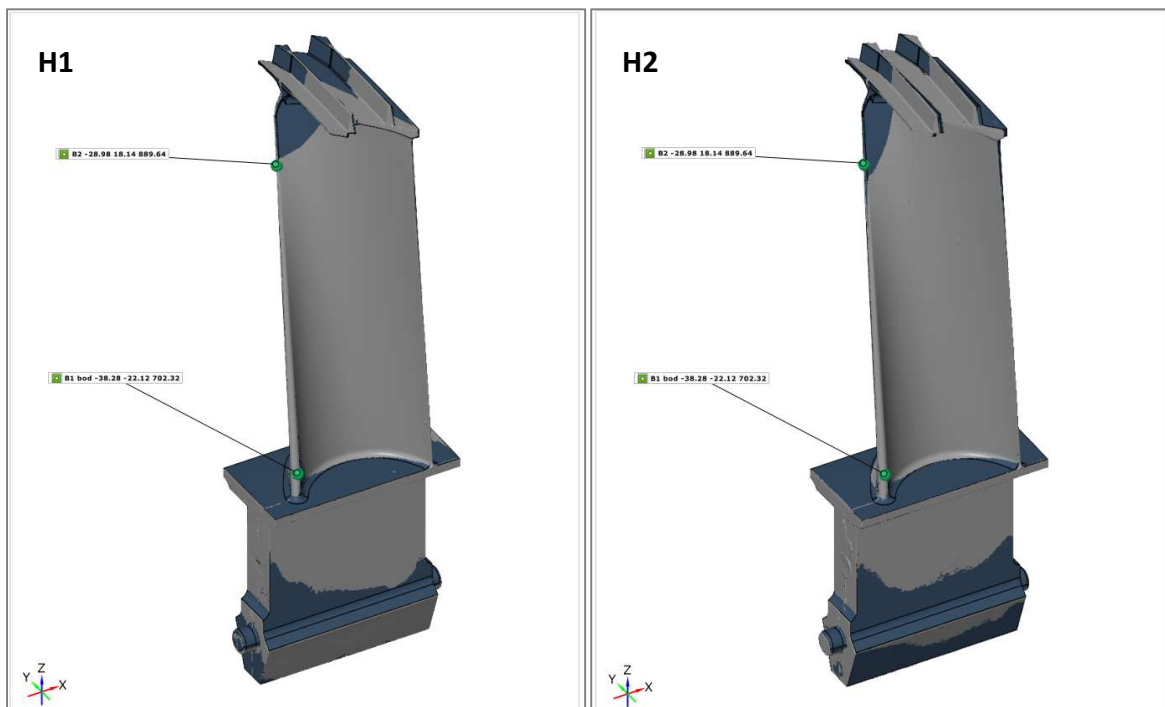
Odchyly vnitřní strany lopatek od ideálního CAD modelu znázorněné na obrázku 7.3 byly větší, než tomu bylo u vnější strany, nicméně stále jsou hodnoty v rámci tolerancí. Rozdíl mezi jednotlivými lopatkami zeleného vosku nebyl tak značný. [K9]

Důkazem o obtížném vyjímání modelu č. 15 je na obrázku 7.3 červeně označená oblast, kde je patrný diagonální průběh referenčních bodů CAD modelu a 3D náměru.

7.2.2 Referenční body u modelů z hnědého rekonstituovaného vosku Remet Hyfill B478



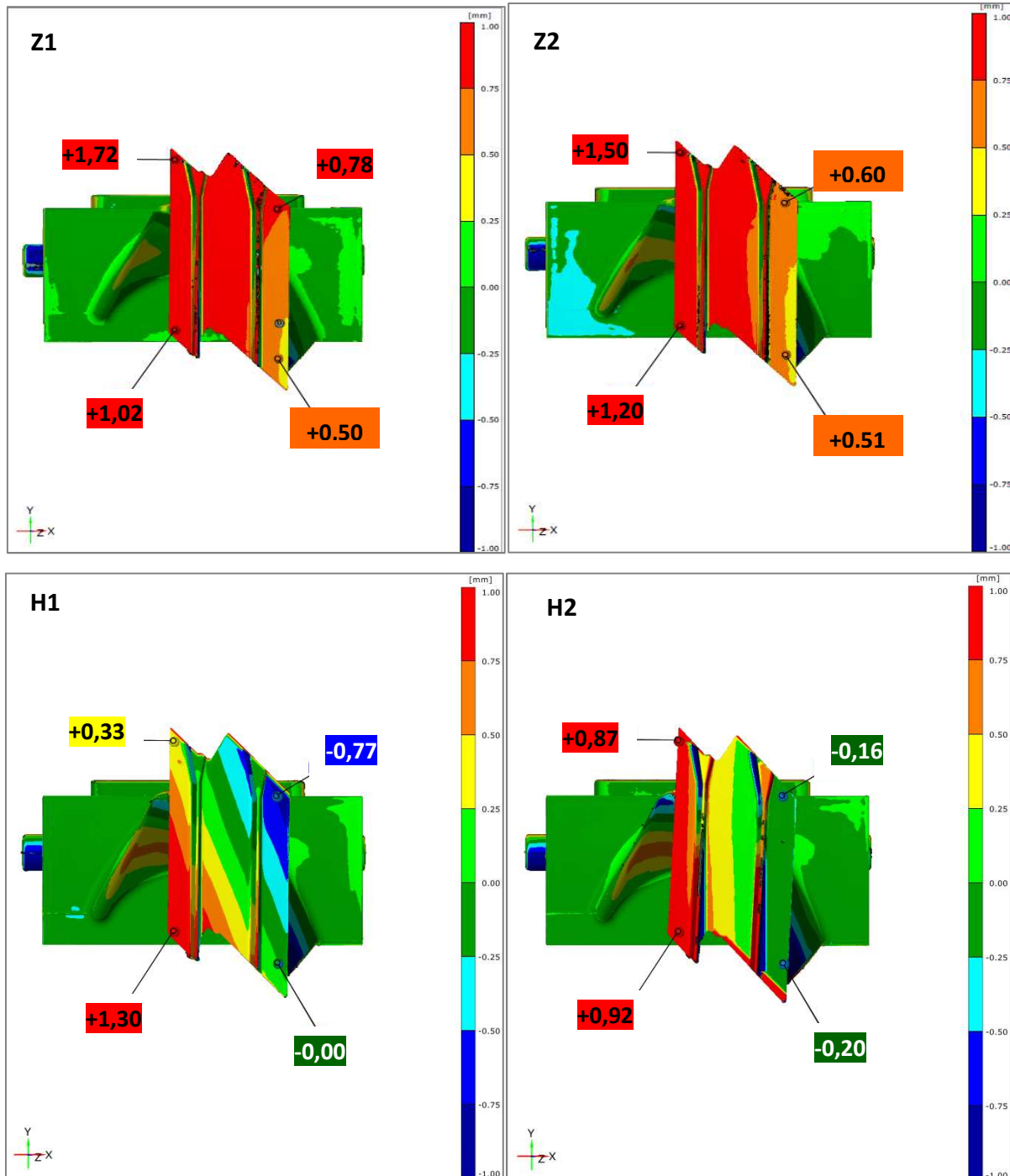
Obrázek 7.4 Porovnání 3D náměru lopatky z hnědého vosku s CAD modelem, vnější strana listu (šedá barva = náměr, modrá barva = CAD model)



Obrázek 7.5 Porovnání 3D náměru lopatky z hnědého vosku s CAD modelem, vnější strana listu (šedá barva = náměr, modrá barva = CAD model)

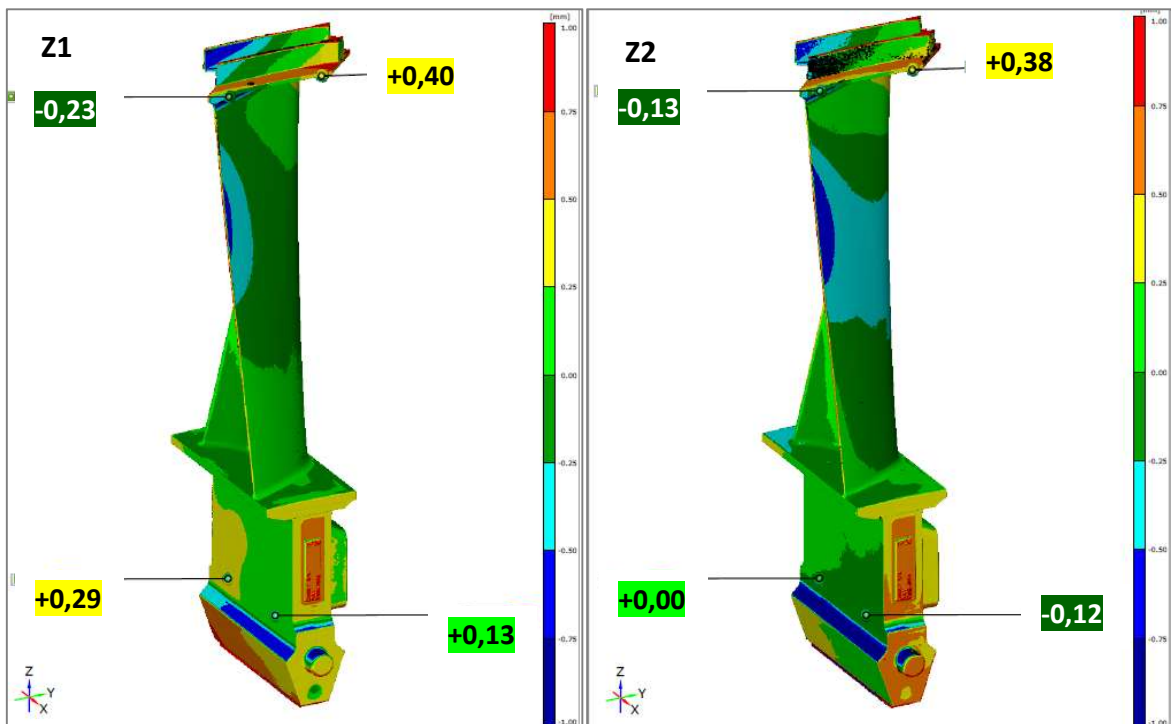
7.3 Barevná mapa odchylek od CAD modelu

Na následujících snímcích je srovnání barevných map lopatek. Potvrzuje se zde rozdíl v rozměrových úchytkách lopatek v oblasti zámku a bandáže.



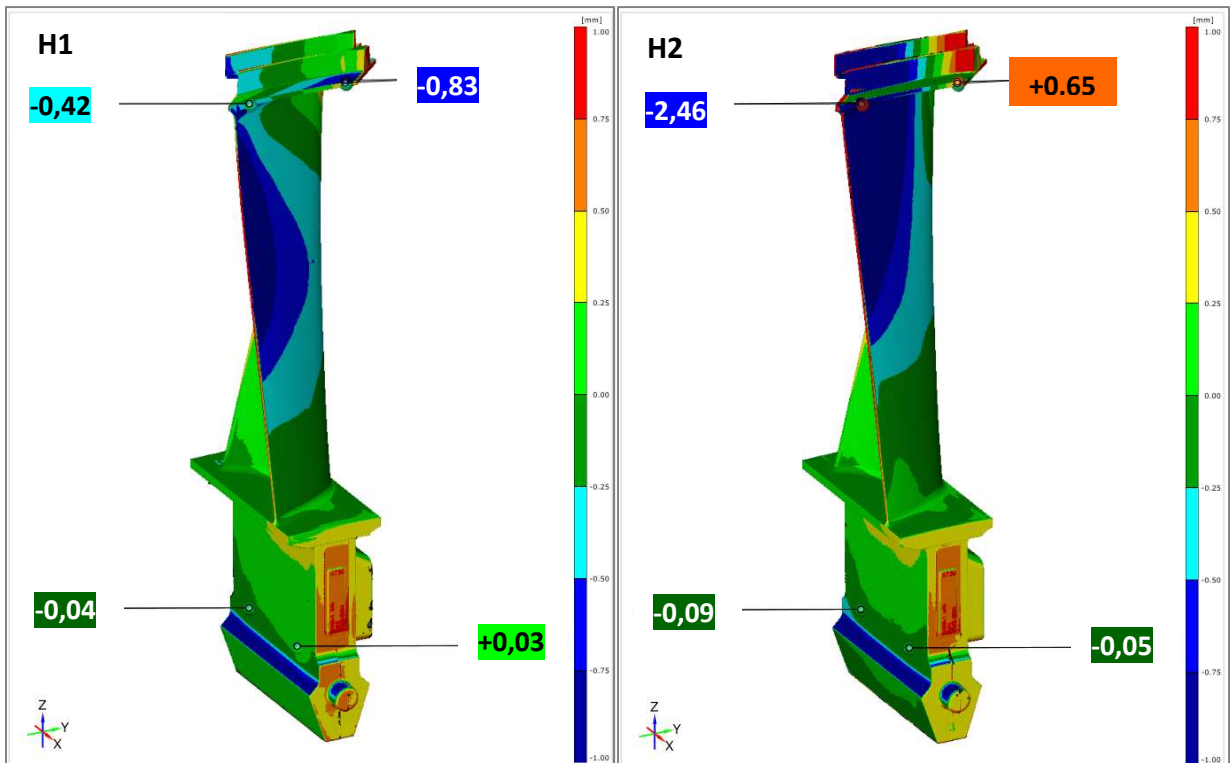
Obrázek 7.6 Srovnání rozměrových odchylek u všech lopatek v oblasti bandáže a vrchní části zámku

Na základě rozměrové analýzy oblasti bandáže na obrázku 7.6 je v bodě 4 největší naměřená odchylka +1,30 mm u lopatky H1. Ta rovněž vykazuje i nejvyšší naměřenou hodnotu záporné odchylky v této oblasti v bodě 5 s hodnotou -0,77 mm. Překvapivě u lopatek z rekonstituovaného vosku byly v oblasti bandáže (bod 5 a 3 u lopatky H2 a bod 3 u lopatky H1), byly výsledky skoro shodné s CAD modelem a vykazovaly minimální úchytky (v rozmezí od -0,00 do -0,20 mm). Rozměrová odchylka bandáže u zeleného vosku jsou v nejhorším místě, bod 2, o +0,85 mm větší než ve stejném bodě u vosku hnědého. Oblast bandáže u modelů ze zeleného vosku vykazuje větší úchytky než u vosku hnědého.



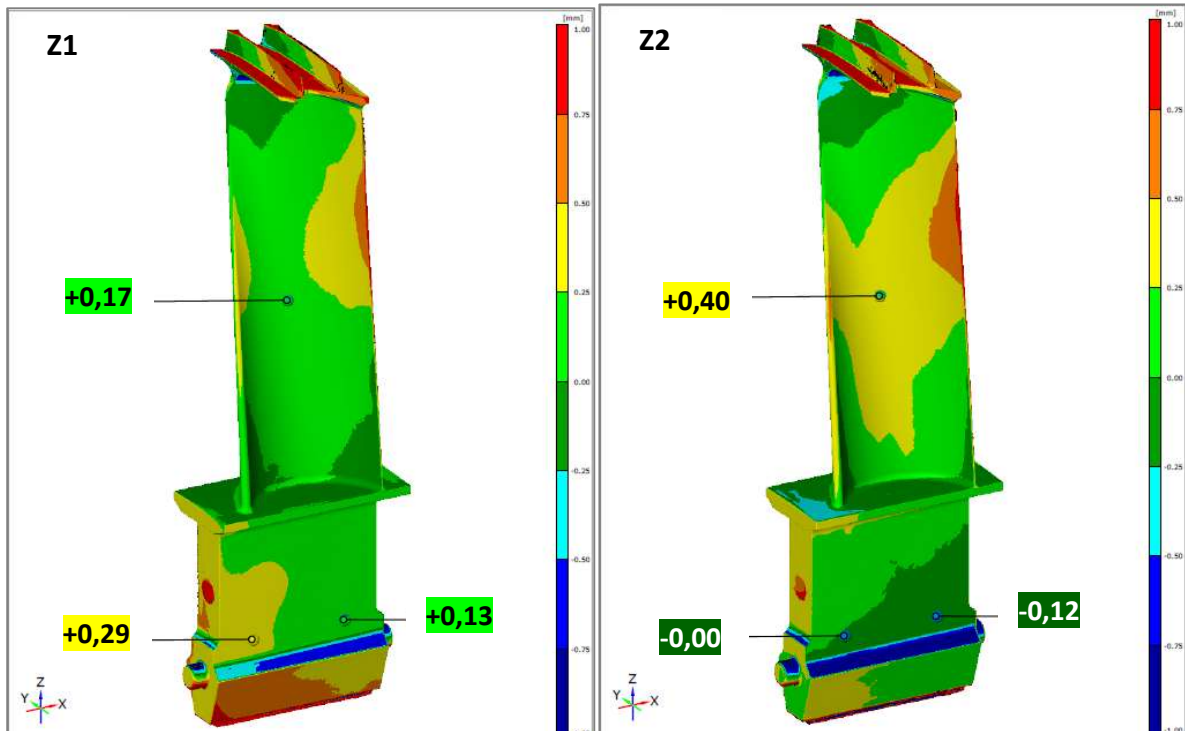
Obrázek 7.7 Barevná mapa odchylek z vnější strany modelů ze zeleného vosku

Záporné rozměrové odchylky voskového modelu v oblasti vnější části listu jsou na obrázku 7.7 a 7.8, která je pro výsledný odlitek stěžejní, vykazují lopatky z obou druhů vosků. Pole se zápornou odchylkou je u rekonstituovaného vosku rozsáhlejší.

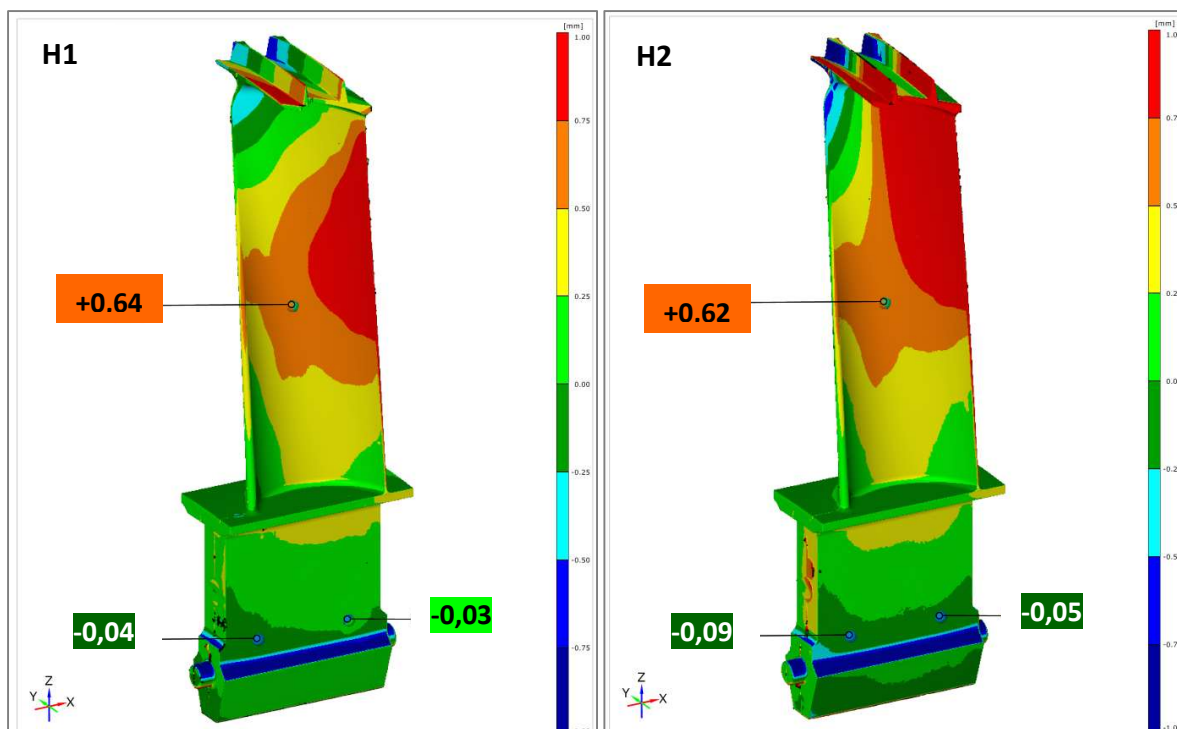


Obrázek 7.8 Barevná mapa odchylek z vnější strany modelů z hnědého vosku

Vnitřní strana modelu listu lopatky vykazuje podobný rozsah odchylek v opačném směru (viz obrázek 7.9 a 7.10). Oblasti s největšími odchylkami jsou opět rozsáhlejší u rekonstituovaného vosku.



Obrázek 7.9 Barevná mapa vyhodnocených rozměrových úchylek z vnitřní strany lopatky ze zeleného vosku

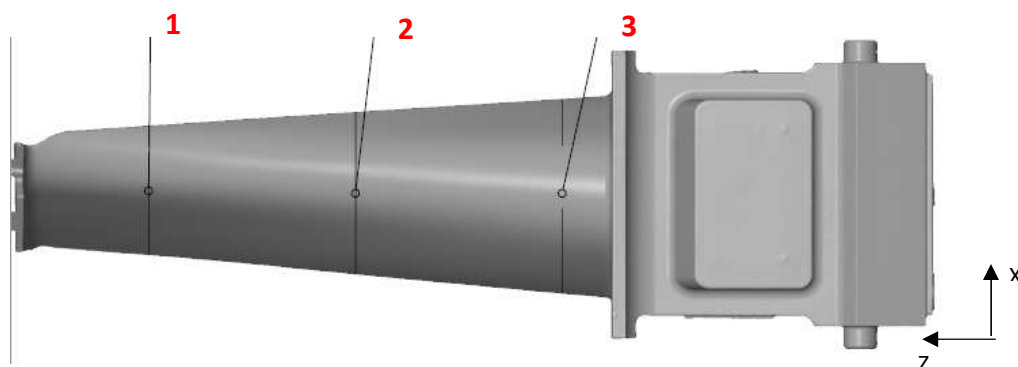


Obrázek 7.10 Barevná mapa vyhodnocených rozměrových úchylek z vnitřní strany lopatky z hnědého vosku

7.4 Rozměrová analýza ve 3 kontrolních řezech

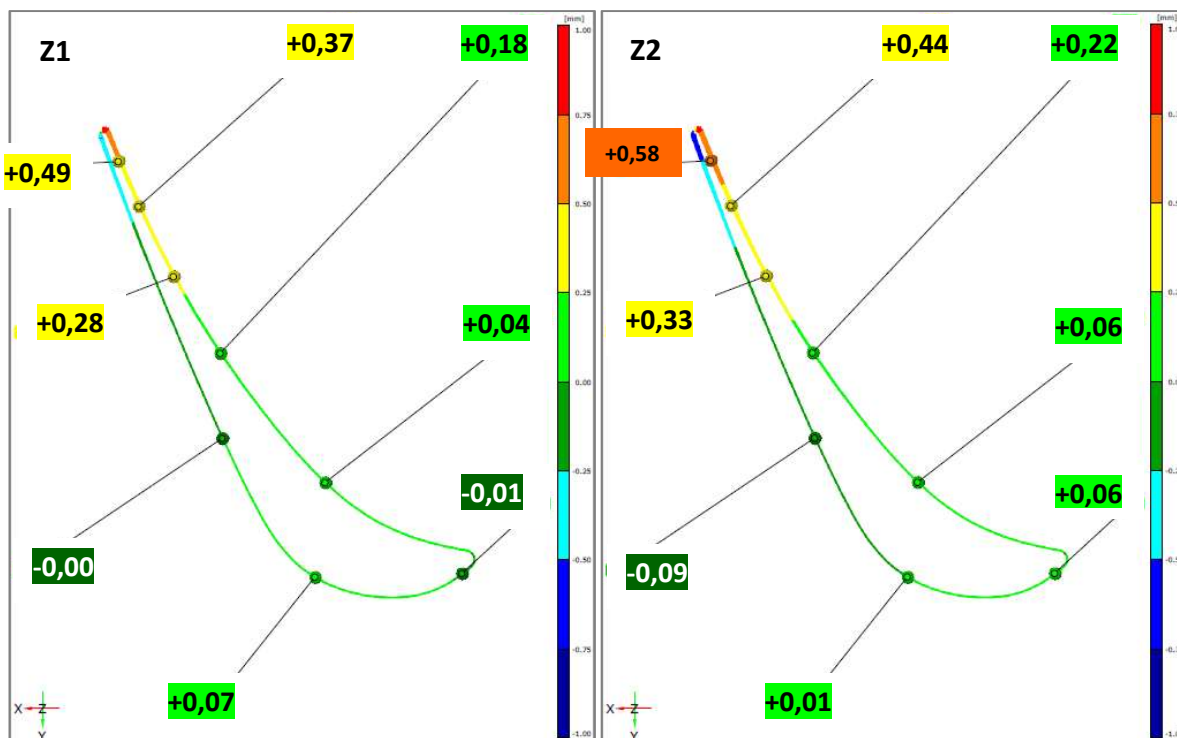
Na obrázku 7.11 byla provedena rozměrová analýza ve 3 řezech ve směru osy Z:

1. $Z = +900$ mm,
2. $Z = +810$ mm,
3. $Z = +720$ mm.

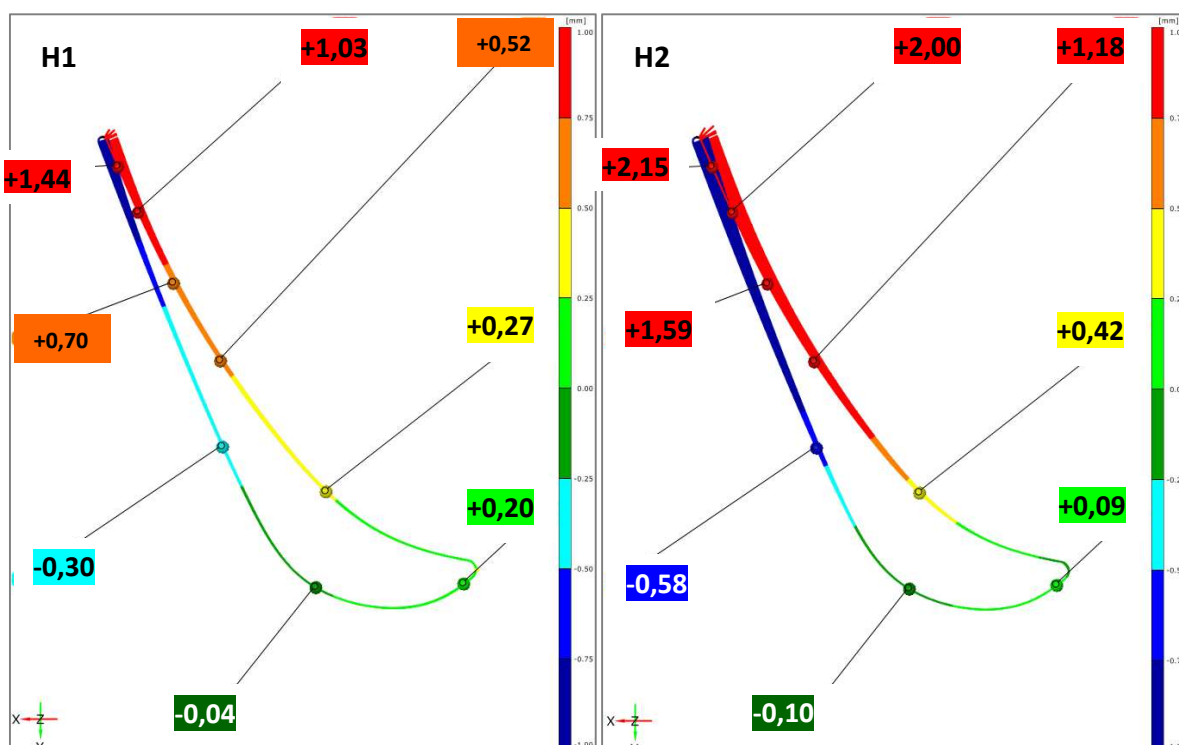


Obrázek 7.11 Umístění řezů na vyhodnocované lopatce

Tato analýza slouží k lepší představě o deformačním chování voskových modelů lopatek s měnícím se průřezem.

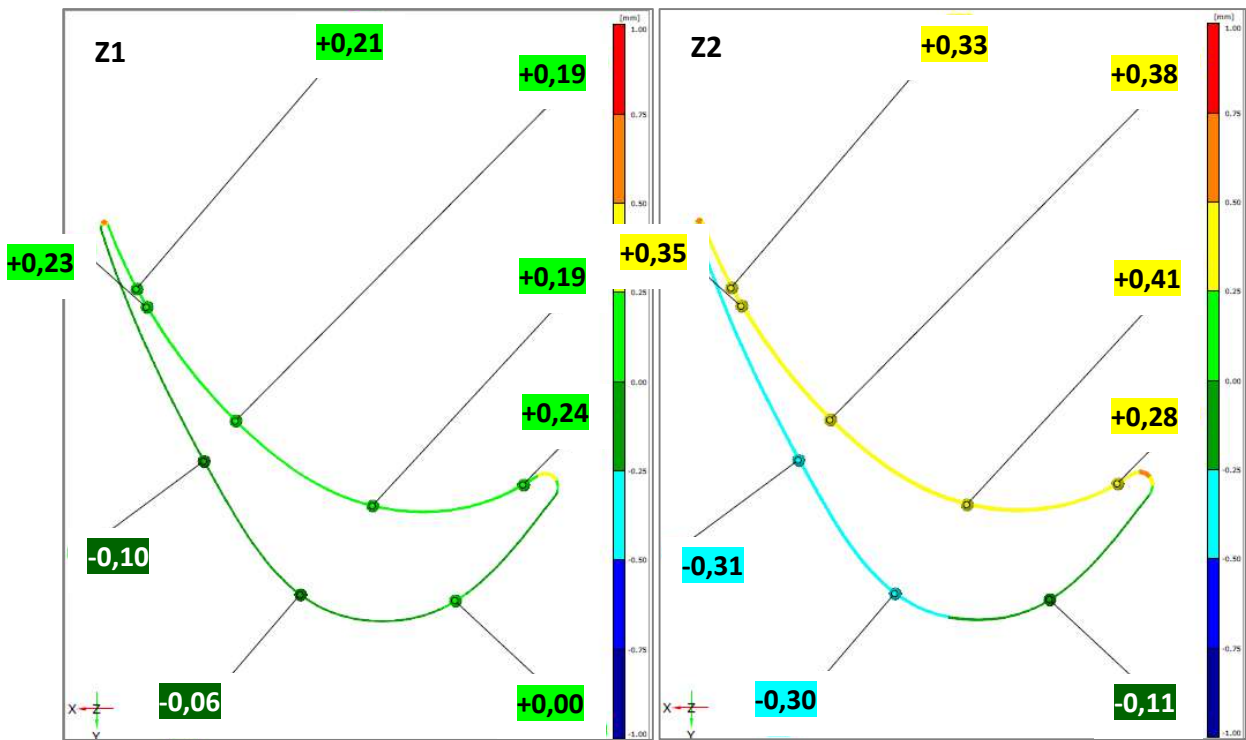


Obrázek 7.12 Řez 1: $z = +900$ mm, panenský zelený vosk

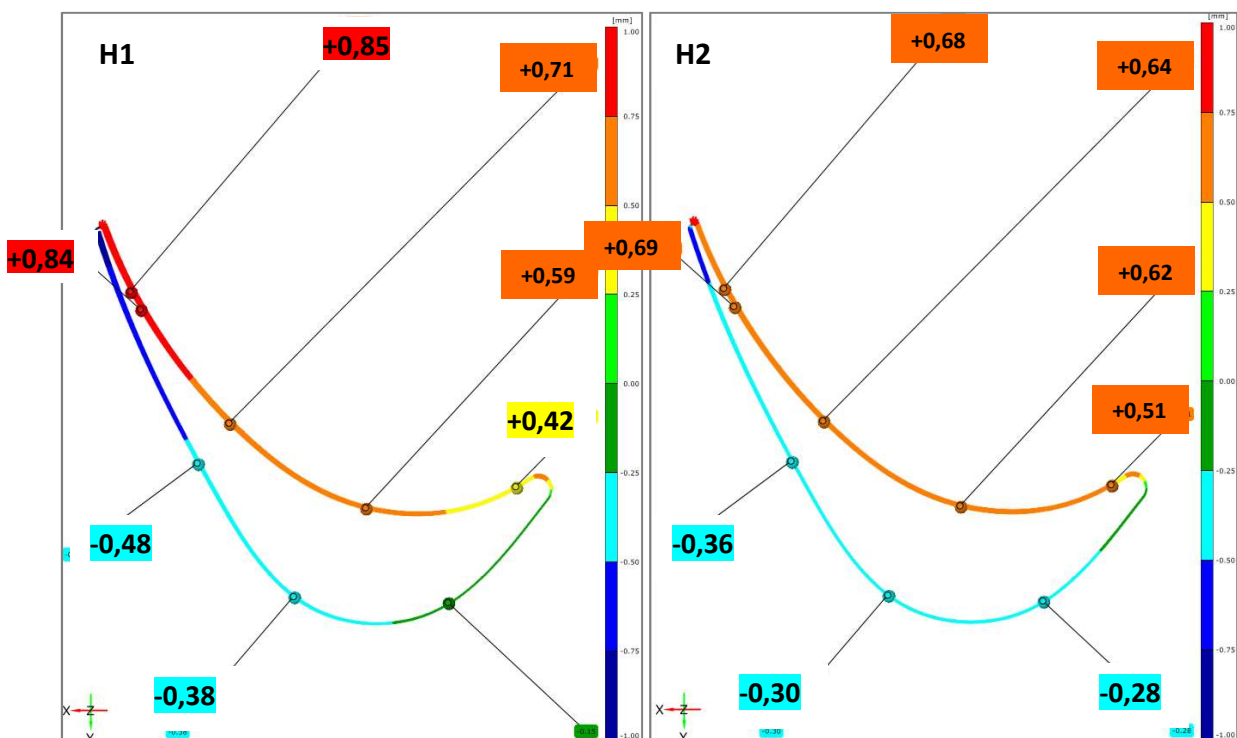


Obrázek 7.13 Řez 1: $z = +900$ mm, rekonstituovaný hnědý vosk

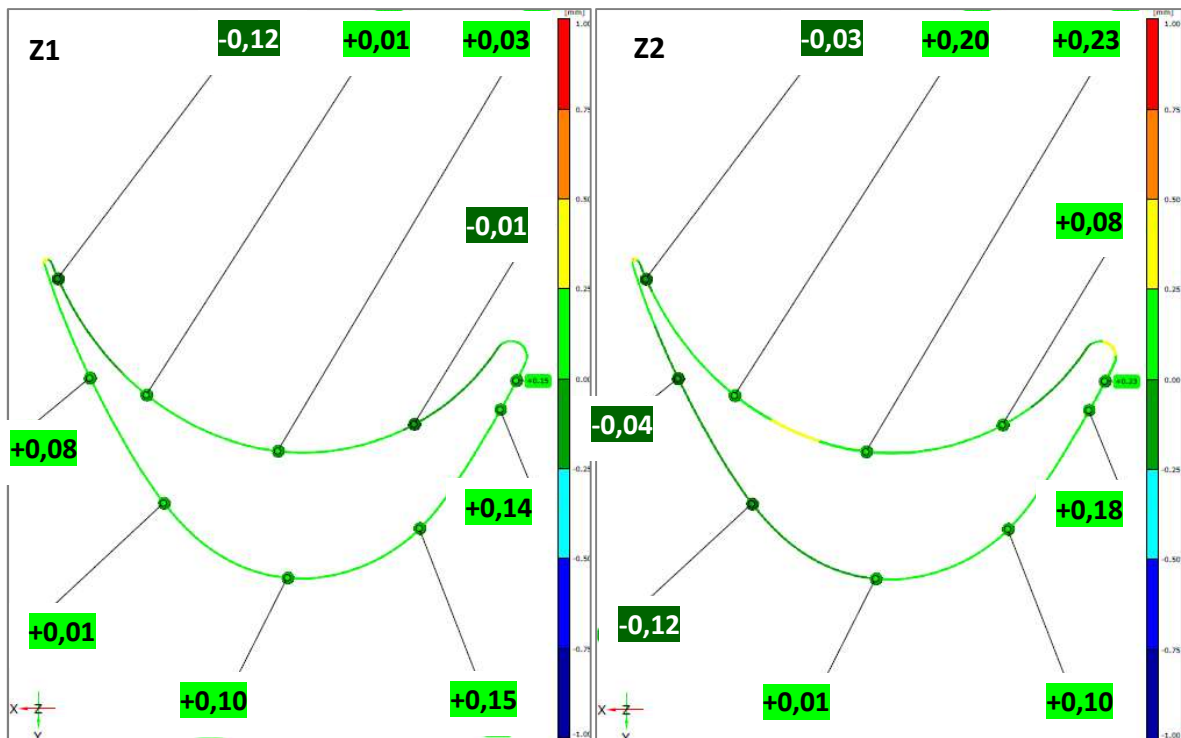
Z obrázku 7.12 a 7.13 je patrné, že se jedná o řez v kritickém místě voskových modelů lopatek. Na vnitřní straně se maximální úchyłka u rekonstituovaného vosku pohybuje od +0,85 mm u modelu H1, po +2,35 mm u modelu H2, která je velmi vysoká a poukazuje na problematické místo na hraně listu.



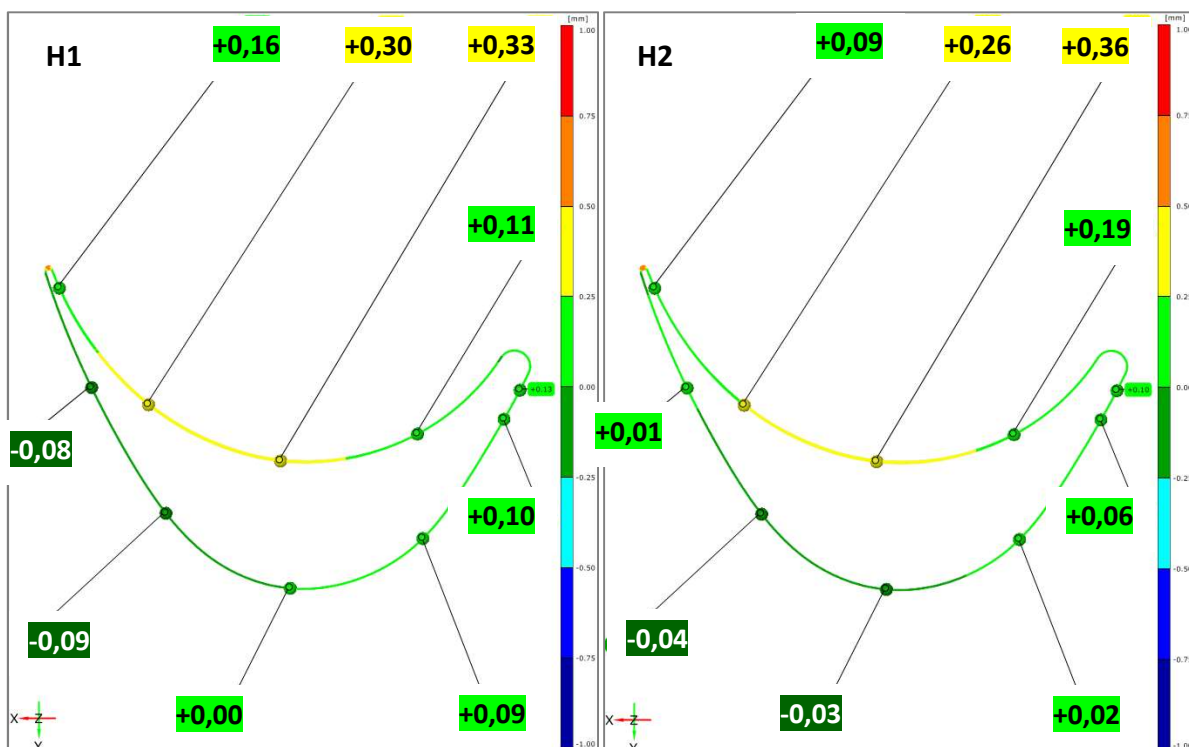
Obrázek 7.14 Řez 2: $z = +810$ mm, panenský zelený vosk



Obrázek 7.15 Řez 2: $z = +810$ mm, rekonstituovaný hnědý vosk



Obrázek 7.16 Řez 3: $z = +720$ mm, panenský zelený vosk



Obrázek 7.17 Řez 3: $z = +720$ mm, rekonstituovaný hnědý vosk

Na základě provedené analýzy v řezech lopatky, lze jednoznačně konstatovat, že lopatka Z1 potvrdila předpoklad a mnohem více se blíží požadovaným rozměrům. Celkem bylo vyhodnoceno 30 RPS bodů a pouze v 1 případě měla lopatka Z1 větší odchylku než lopatka Z2.

Ve všech ostatních 29 bodech je odchylka u lopatky Z2 větší. Celkově byla minimální naměřená odchylka +0,00 mm u lopatky 3 a maximální +0,58 u lopatky Z2.

Analýza řezů lopatky z rekonstituovaného vosku vykazovala největší odchylky v řezu 1, kde rozdíl mezi naměřenými RPS body byl až +0,91 mm. Nejmenší naměřená odchylka bodu pro H1 byla +0,00 mm a H2 +0,01 mm.

Detailní barevná mapa rozměrových odchylek je v příloze 3.

7.5 Shrnutí výsledků 3D skenu

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 úchyly jednotlivých vosků byl v oblasti bandáže a místa řezu 1 ($z = 900$ mm) listu lopatky, která je nejbližší této bandáži. Zatímco bandáž, z pohledu rozměrových úchylek, vykazovala u rekonstituovaného vosku menší úchyly od stanoveného CAD modelu, v řezu 1 tomu bylo přesně obráceně a lopatka z rekonstituovaného vosku byla na hranici rozměrových tolerancí. Pro funkčnost výsledného odlitku je však podstatná přesnost listu, který je vyráběn „na hotovo“. Oblast bandáže počítá s úchyly, které lze vyrovnat obráběním.

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.

8 Simulace vstřikování voskového modelu lopatky

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.

8.1 Vstupní parametry simulace

Hlavními parametry, bez kterých nelze simulaci provést, jsou:

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

8.1.1 Materiálová data

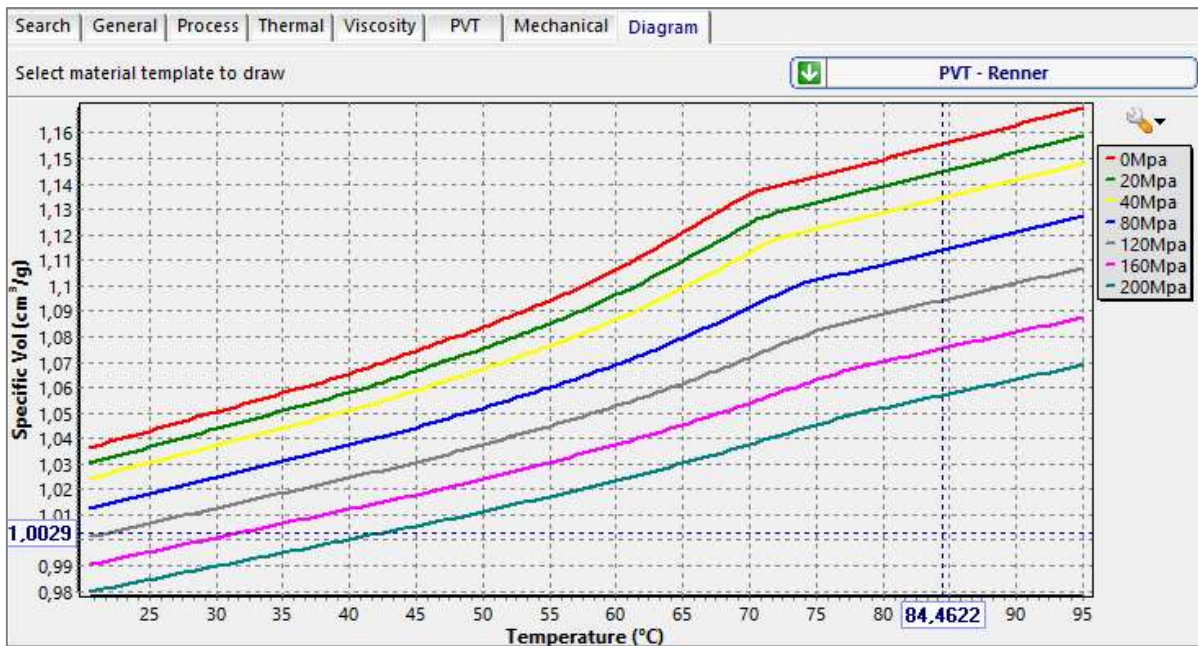
Materiálová data lze získat z materiálové databáze, kterou simulační software obsahuje, pokud je k dispozici. Druhou cestou je měření materiálových charakteristik požadovaného materiálu, jako v případě vosků zkoumaných v disertační práci. Zjištěné vstupní parametry materiálů jsou i pro samotného výrobce 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 8.1:

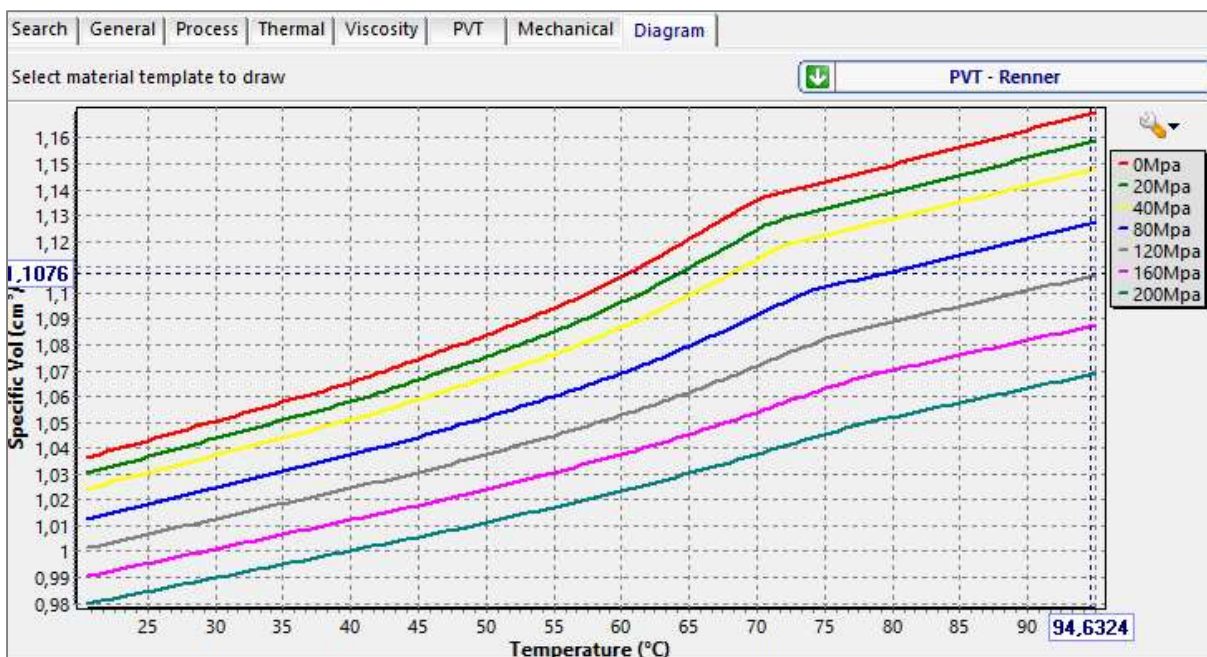
Tabulka 8.1 Zadané materiálové parametry vosků na základě provedených analýz

Parametr	Zelený vosk Remet Hyfill B478	Hnědý vosk Remet Hyfill B478
Hustota – solid [kg/m^3]	960,6	960,6
Hustota – tavenina [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 [$10^{-6}\cdot\text{K}^{-1}$]	389,3641	476,2831
Youngův modul [MPa]	104,3	96,8
Poissonovo číslo [1]	0,35	0,35

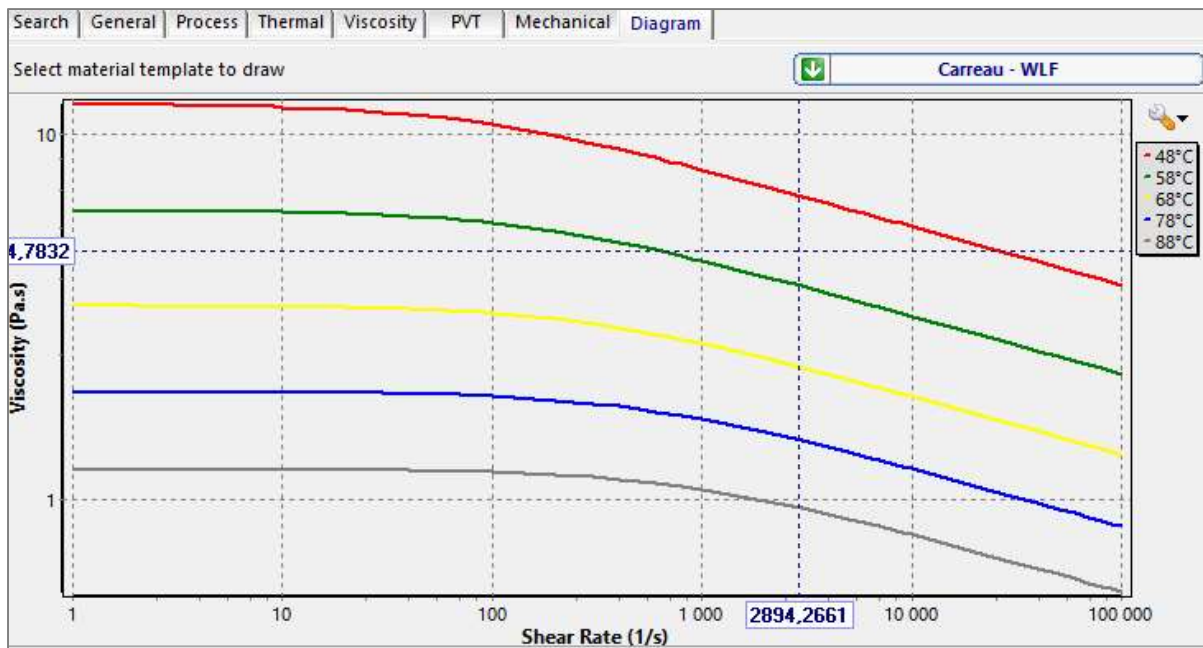
Pro účely simulace byla experimentálně zjištěná pvT data upravena dle Rennerova vztahu (viz. kapitola 3.3) pro jednotlivé vosky na obrázku 8.1 a 8.2. Rennerův vztah se používá zejména pro dvousložkové materiály.



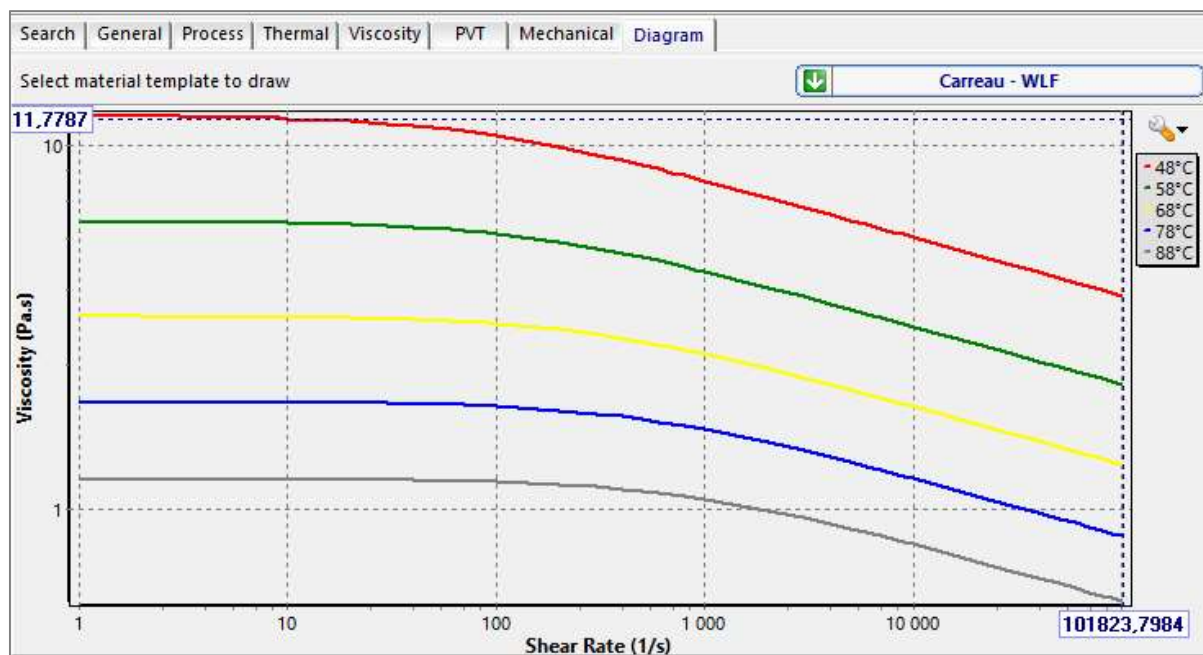
Obrázek 8.1 Vstupní pvT data dle Rennera pro zelený vosk



Obrázek 8.2 Vstupní pvT data dle Rennera pro hnědý vosk

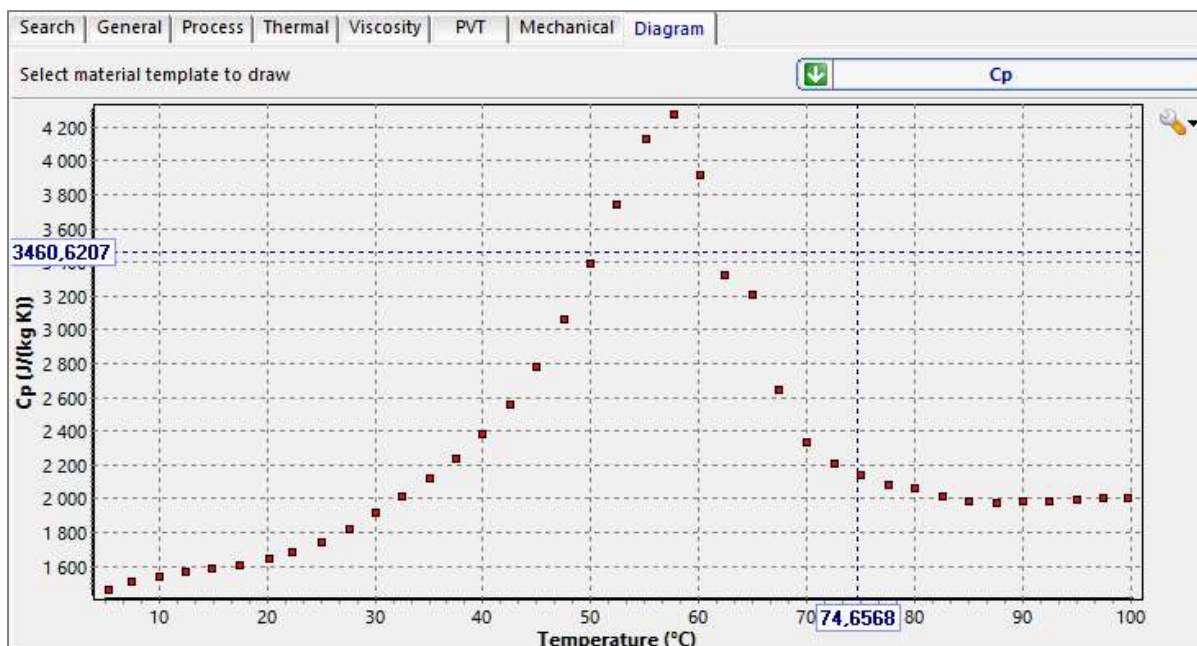


Obrázek 8.3 Závislost viskozity na smykovém namáhání u zeleného vosku

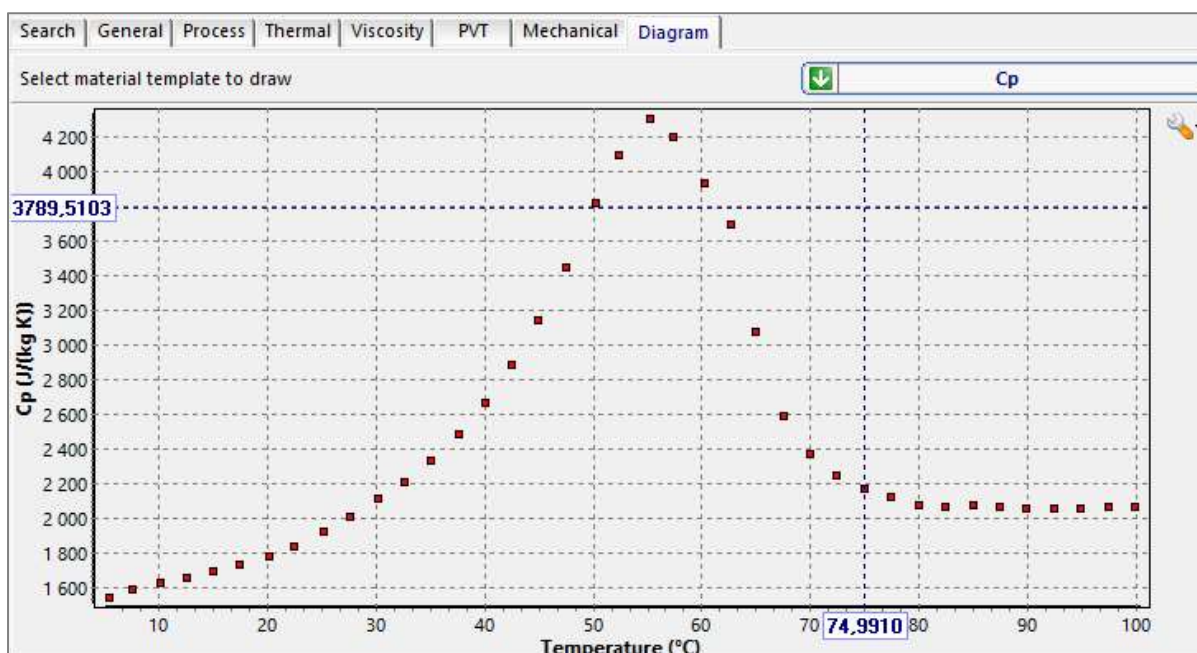


Obrázek 8.4 Závislost viskozity na smykovém namáhání u hnědého vosku

Průběh křivek závislosti specifické tepelné kapacity na obrázku 8.5 a 8.6, stejně jako průběh u křivek na obrázku 8.1 a 8.2, poukazuje na směs se semi-krytalickou strukturou vosku. Zlom na křivkách na obrázku 8.1a 8.2 je oblastí vytváření krytalické fáze. Směs amorfnní a semi-krytalické fáze závisí na teplotě formy. Kdy je vyšší teplota, tak je více krytalické fáze, která má vliv na deformace.



Obrázek 8.5 Závislost specifické tepelné kapacity na teplotě u zeleného vosku



Obrázek 8.6 Závislost specifické tepelné kapacity na teplotě u hnědého vosku

Je třeba mít na paměti, že se reálný vstupní vstříkovaný materiál může, vlivem vývoje a snahy o vylepšení ze strany výrobce vosku, měnit, tudíž je vhodné experimentálně získaná materiálová data po čase opět přeměřit a ověřit tak jejich platnost.

8.1.2 Geometrie dílu

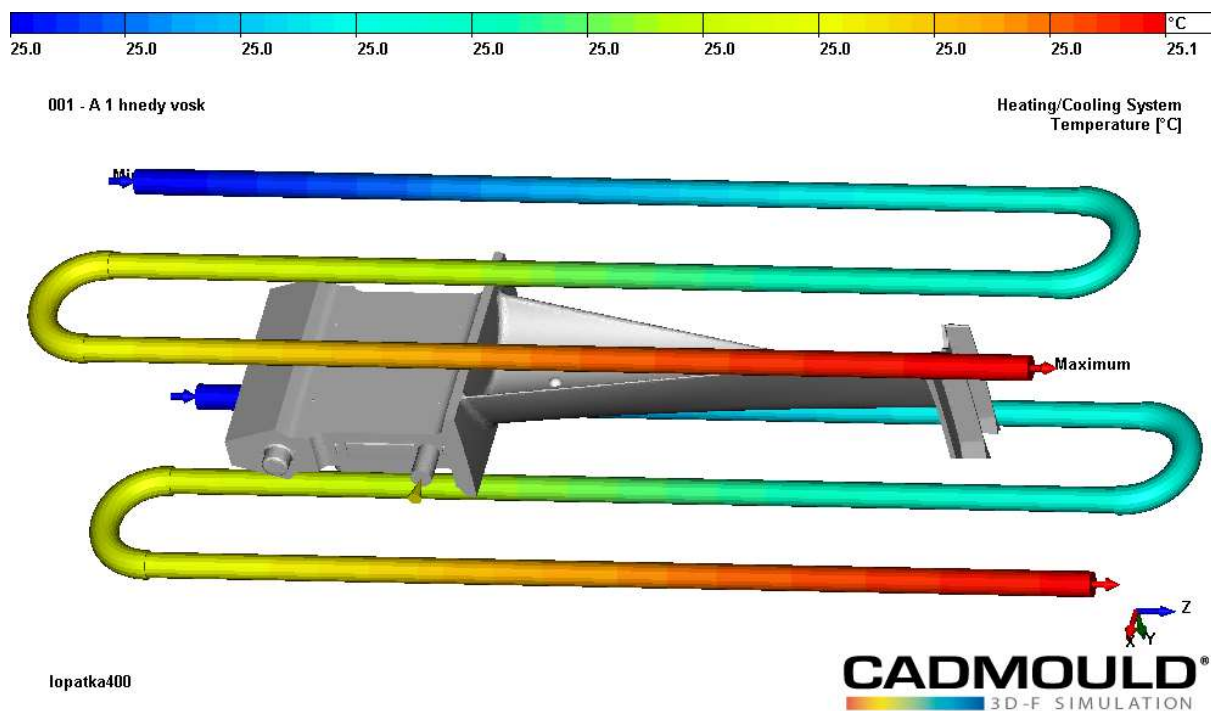
Základním vstupní parametrem simulace byl model lopatky, který byl pro danou aplikaci komplikovanější, jelikož se jedná o dva modely – zálitek a vlastní lopatka, které se skládají dohromady v jeden celek. Podstatné pro správný import modelu je, aby obě geometrie byly sjednocené do jednoho osového systému,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

Dvojice zálitek – lopatka byl vždy simulován celý buďto z panenského zeleného vosku Remet Hyfill B478, nebo z rekonstituovaného hnědého vosku Remet Hyfill B478.

Bližší údaje ke geometrii simulovaného dílu byly uvedeny v kapitole 5.

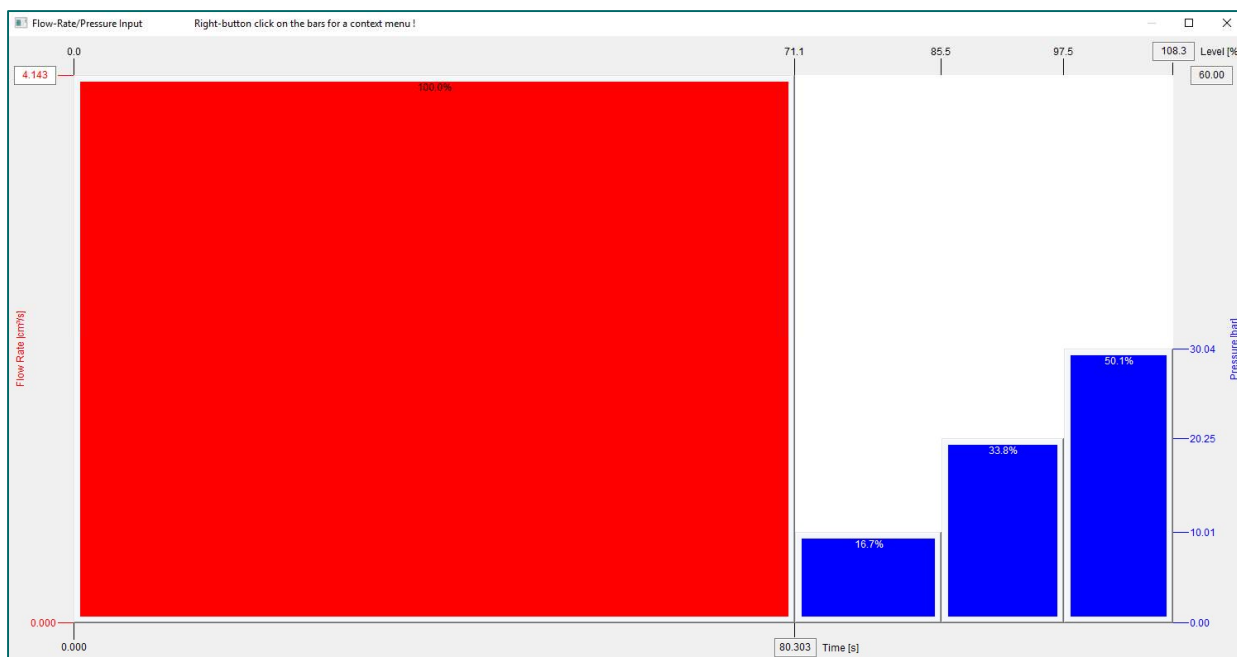
8.1.3 Vstřikovací forma

Forma pro vstřikování byla definována z hliníkové slitiny. Na obrázku 8.7 jsou zobrazené temperační kanály. Teplota temperační vody na vstupu byla 25 °C a její minimální průtoková rychlost 10 l/min. Vstřikovací forma je totožná pro oba vstřikované materiály.



Obrázek 8.7 Temperační systém formy [K7]

Simulační program umožňuje rovněž nastavit a sledovat průtok a různé tlaky pro jednotlivé fáze vstřikování. Na Obrázek 8.8 je ukázka rozložení tlaků během vstřikování a dotlaku.



Obrázek 8.8 Příklad nastavení průběhu vstřikování

8.1.4 Procesní 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 8.2 Procesní 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

Tabulka 8.3 Ostatní parametry simulace

Parametr	Hodnota
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 8.2 a 8.3 jsou shodné pro oba typy vosků.

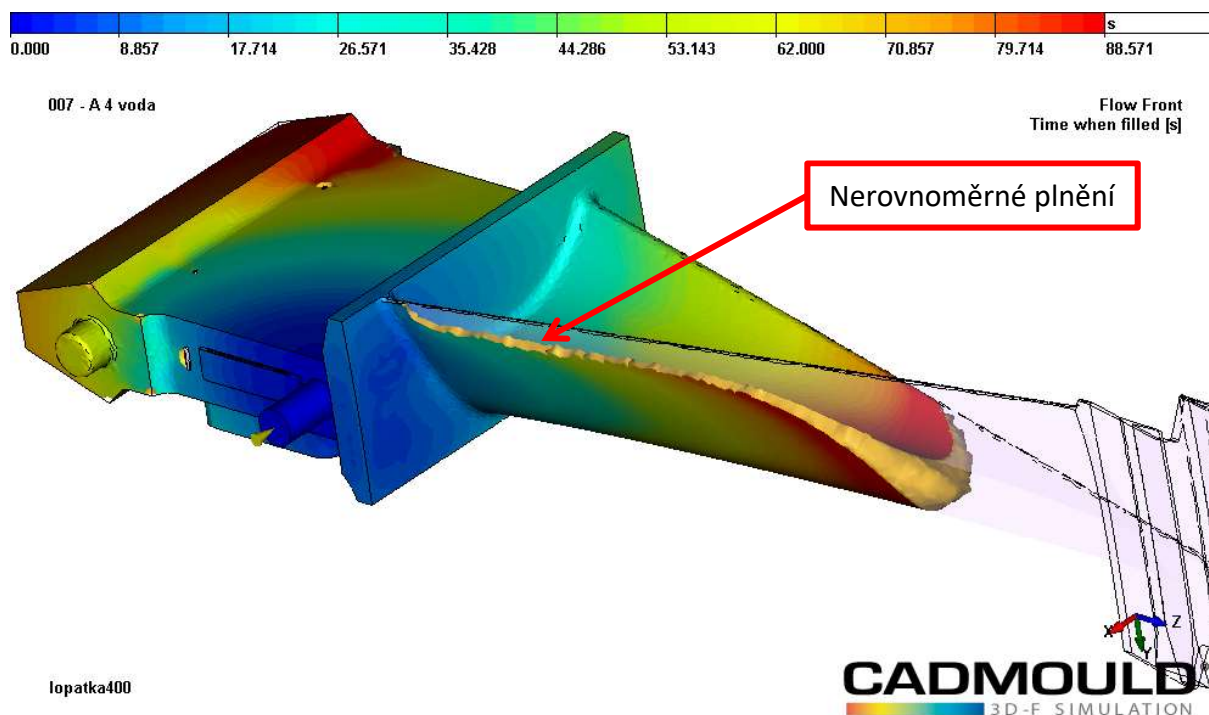
8.2 Vyhodnocení numerické simulace lopatek

8.2.1 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 zadané 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.

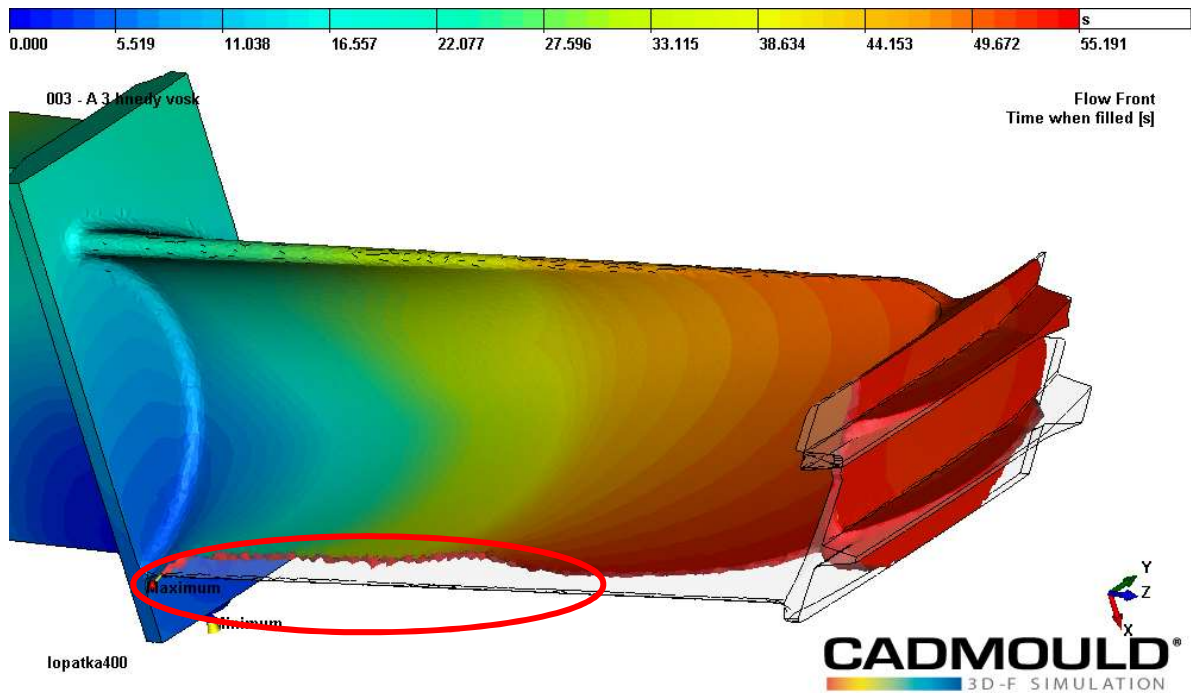
Simulace průběhu plnění odhalila problémy s nerovnoměrným plněním a místy s nebezpečným uzavíráním vzduchu. Toto se projevilo u obou vosků, přičemž u hnědého vosku jsou tyto negativní jevy podstatně markantnější.

Nerovnoměrné plnění 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.



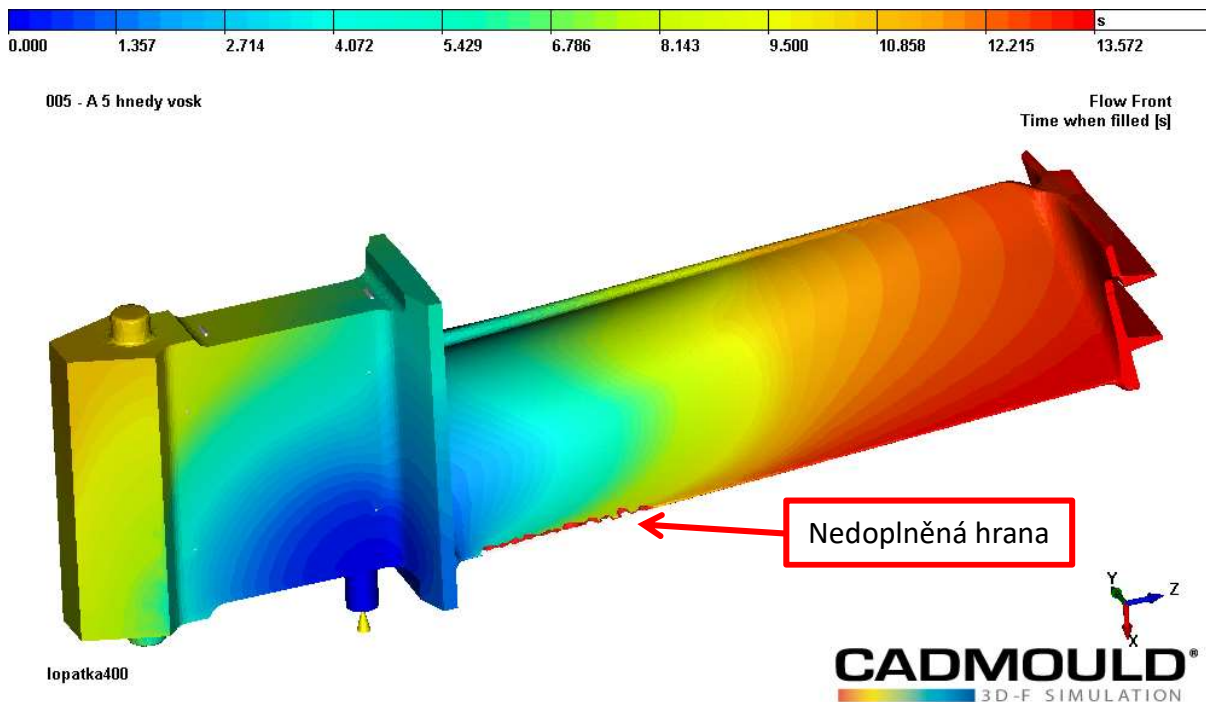
Obrázek 8.9 Nerovnoměrné plnění zeleného vosku

V případě hnědého vosku byl průběh plnění, zejména v nejtěsnějších částech lopatky, ještě více nerovnoměrný. Na obrázku 8.10 je zřetelné rozkolísané čelo proudu vosku.



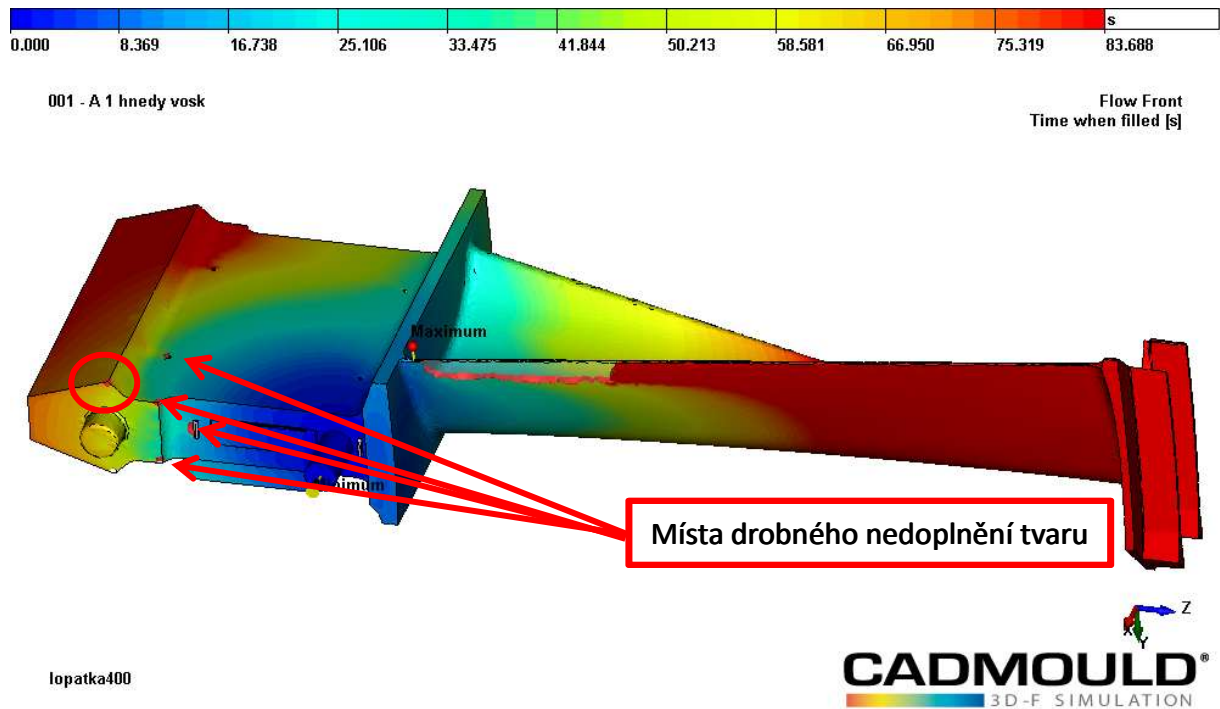
Obrázek 8.10 Nerovnoměrné plnění hnědého vosku

Dokonce v případě jedné ze simulačních variant došlo k nedoplnění hrany lopatky, které je vidět na obrázku 8.11.



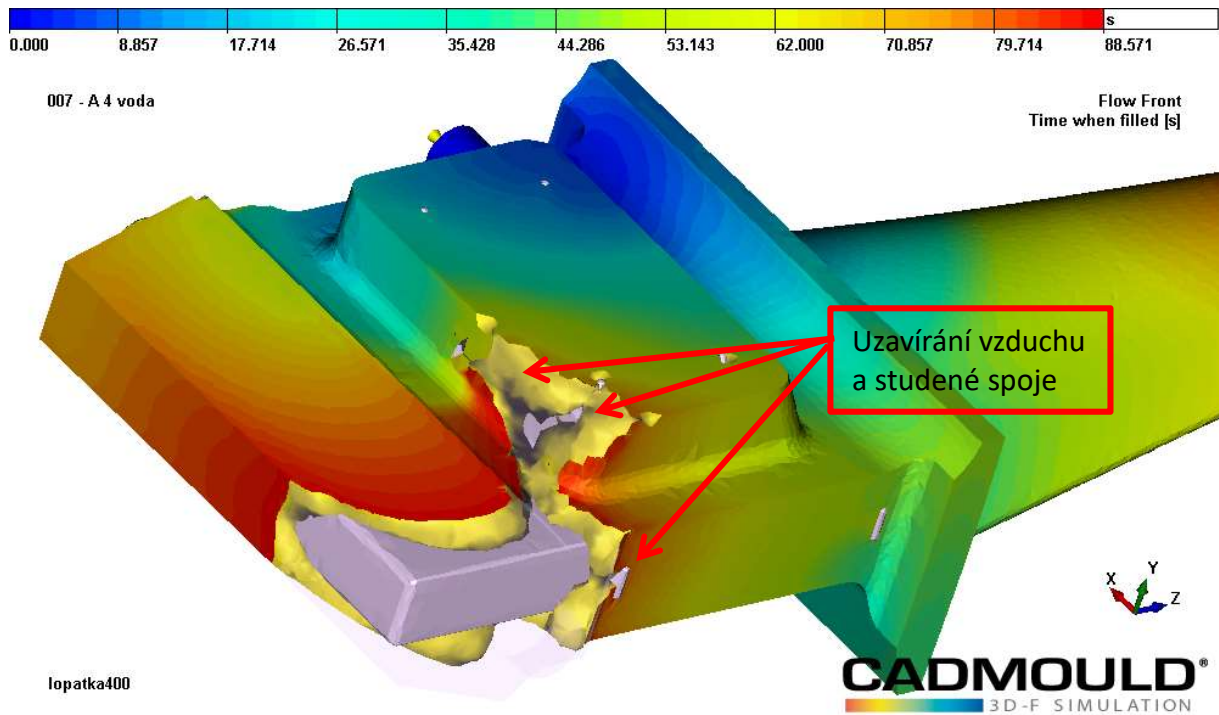
Obrázek 8.11 Nedoplněná hrana lopatky při plnění hnědého vosku

Další vadou, kterou vykazovala lopatka plněná hnědým voskem, byla místa drobného nedoplnění tvaru v oblasti zámku (viz obrázek 8.12). Toto nedoplnění simulace zeleného vosku neprokázala.

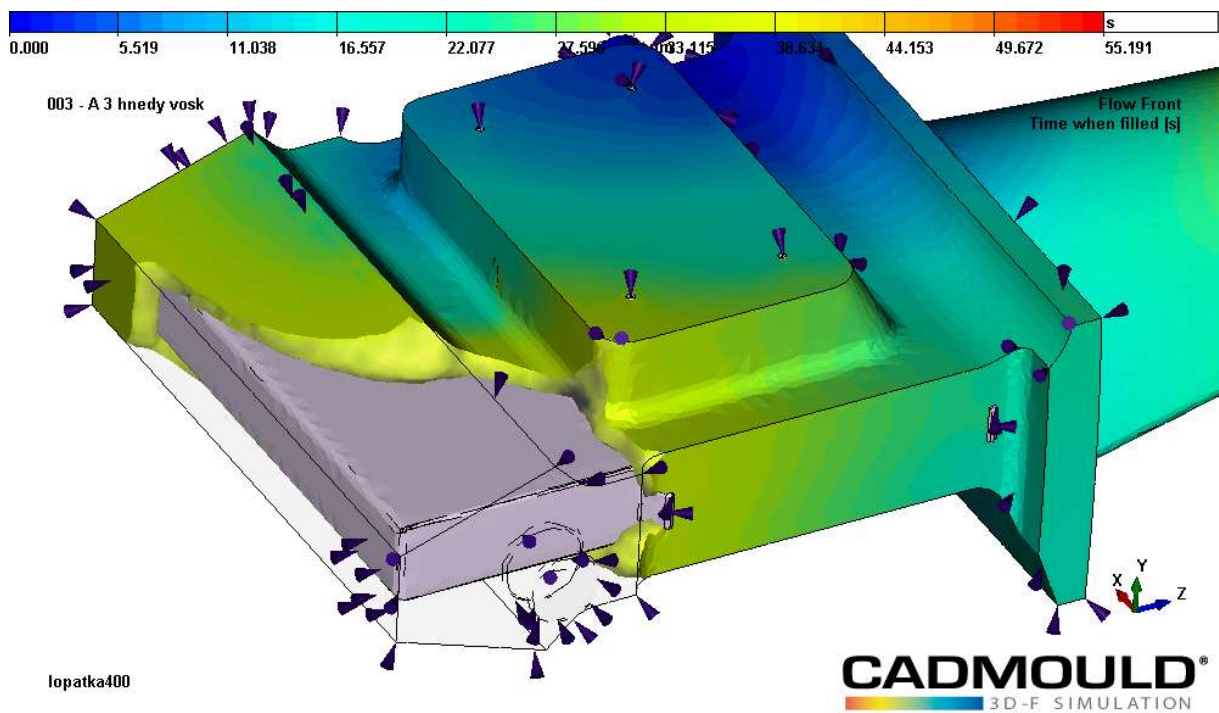


Obrázek 8.12 Nedoplnění tvaru – hnědý vosk

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.



Obrázek 8.13 Místa vzniku studených spojů při vstřikování zeleného vosku [K7]



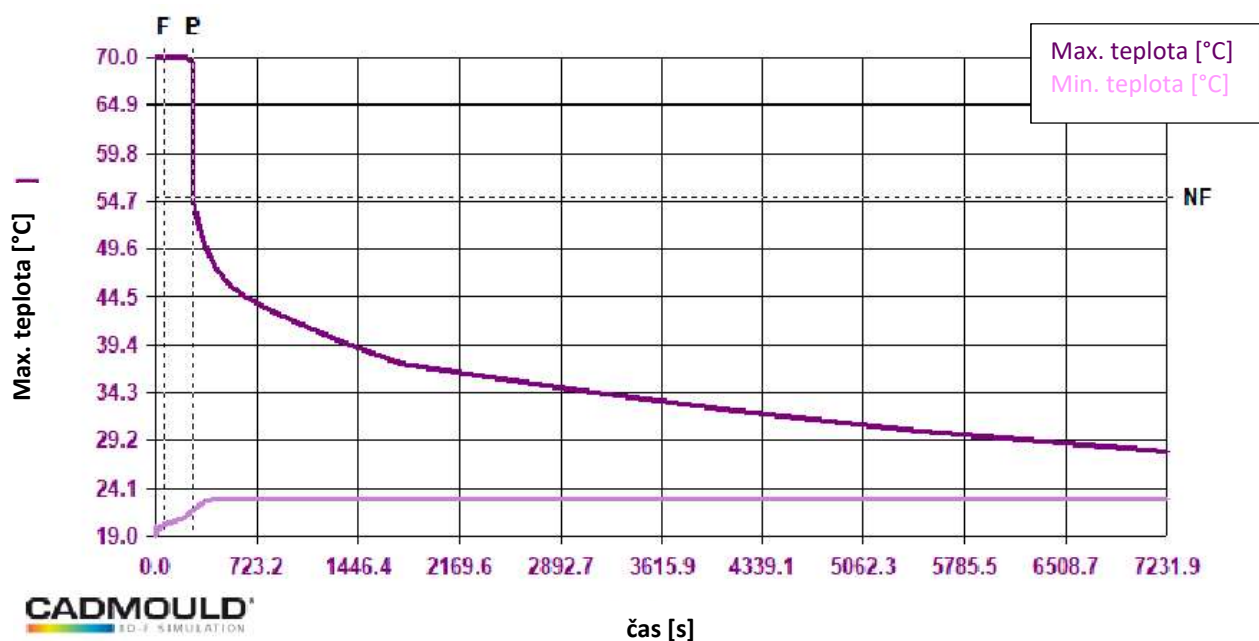
Obrázek 8.14 Místa vzniku studených spojů při vstřikování hnědého vosku

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.

8.2.2 Teplotní vývoj a vstřikovací tlak

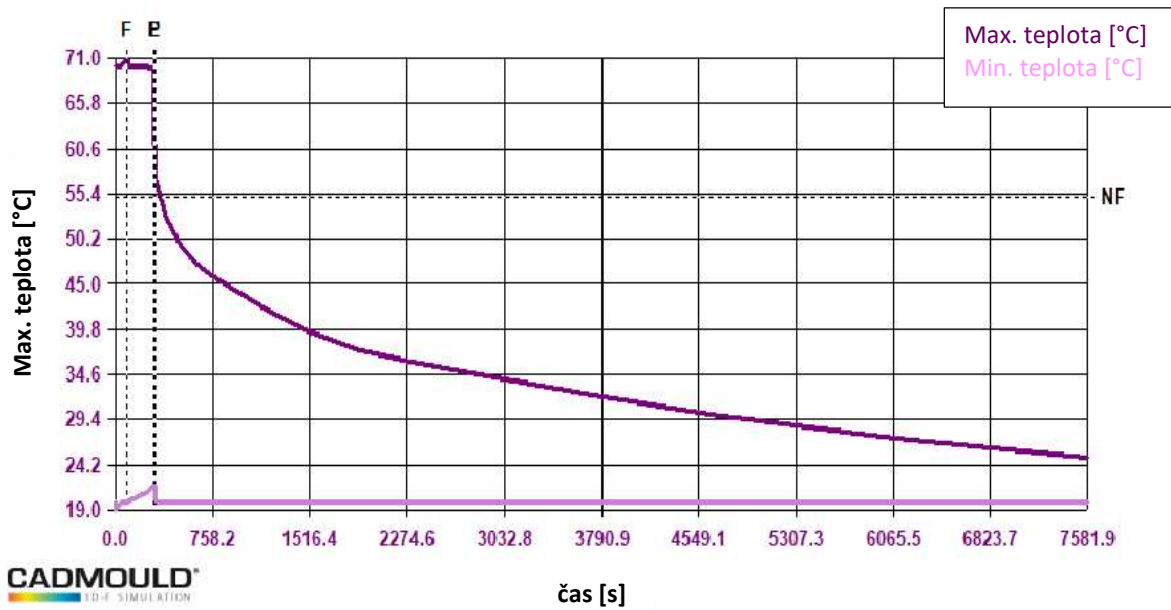
Analýza numerické simulace dále odhalila rozdíly mezi teplotním vývojem hnědého a zeleného vosku od začátku fáze dotlaku. Průběh teplotního vývoje během plnění je srovnatelný, co je dáno i krátkým časovým intervalem. Na obrázku 8.15a 8.16 je fáze plnění značena F – Filling a fáze dotlaku P - Packing .

Pokles teploty ve vstřikovaném díle je rychlejší u zeleného vosku, ačkoliv je No-flow⁶ (NF) teplota u zeleného vosku vyšší (viz obrázek 8.15 a obrázek 8.16). Tato vlastnost rychlejšího poklesu teploty je důležitá z hlediska následných deformací ještě zcela nevychlazené lopatky během manipulace. Zelený vosk tak vykazuje příznivější vývoj, než vosk hnědý.



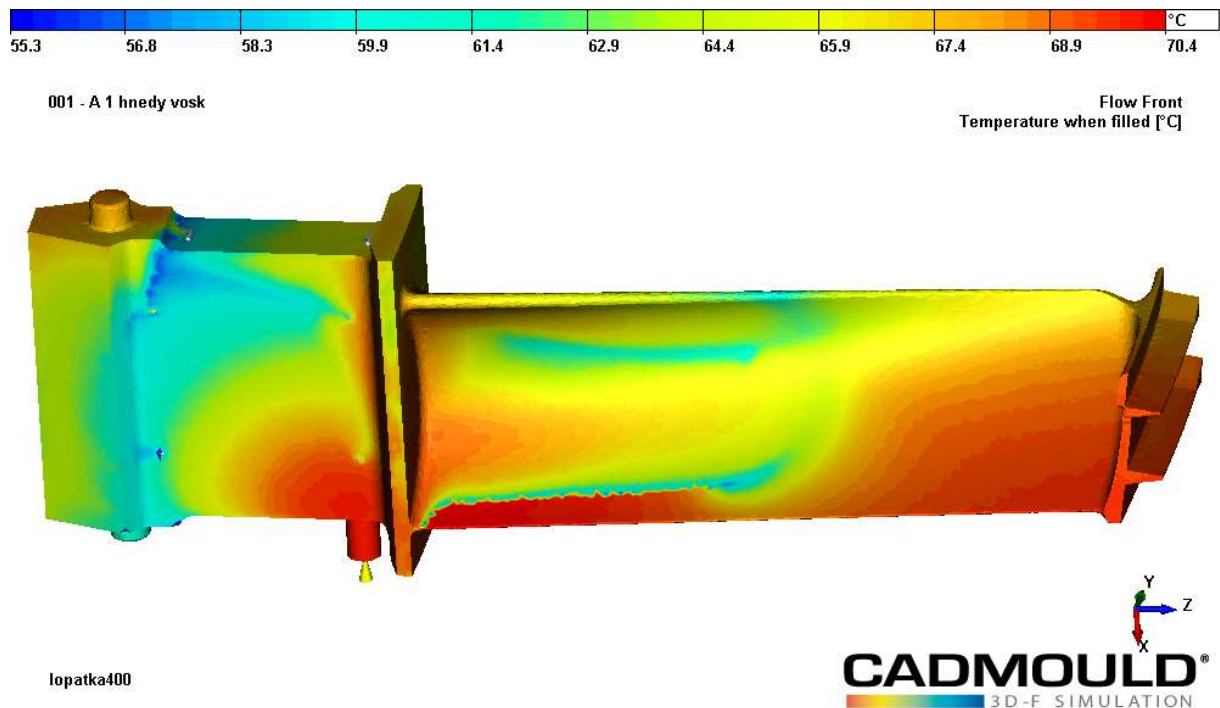
Obrázek 8.15 Vývoj nejvyšší teploty hnědého vosku ve vstřikovaném díle v čase, vzduch 23 °C

⁶ Teplota, při které vosk již nemůže proudit. Měří se kapilární rheometrem a je to teplota, při které vosk přestane vytékat.

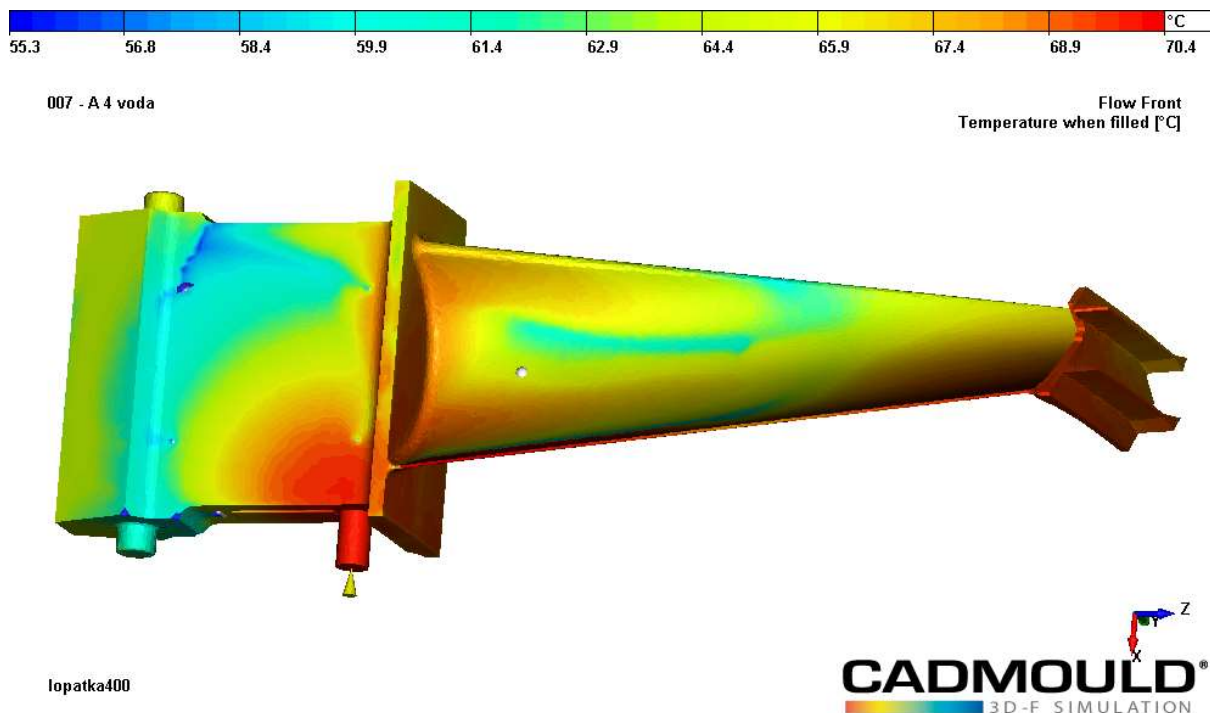


Obrázek 8.16 Vývoj nejvyšší teploty zeleného vosku ve vstříkovaném díle v čase, vzduch 23 °C

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.



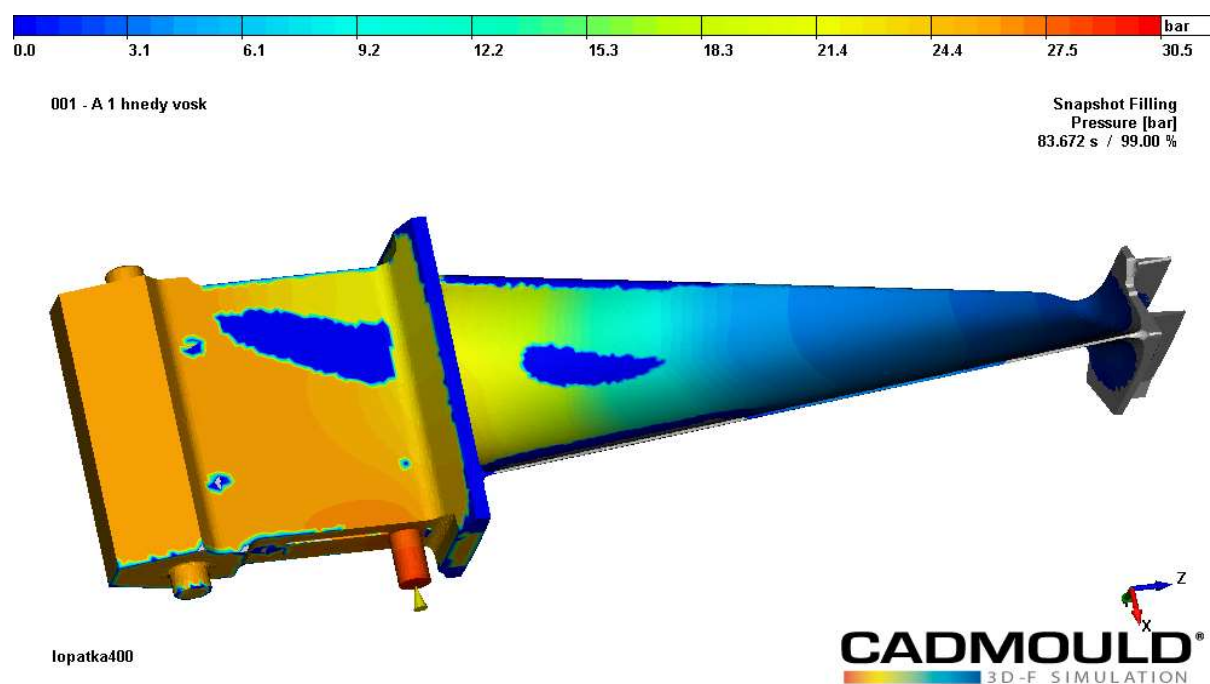
Obrázek 8.17 Teplota na čele proudícího hnědého vosku



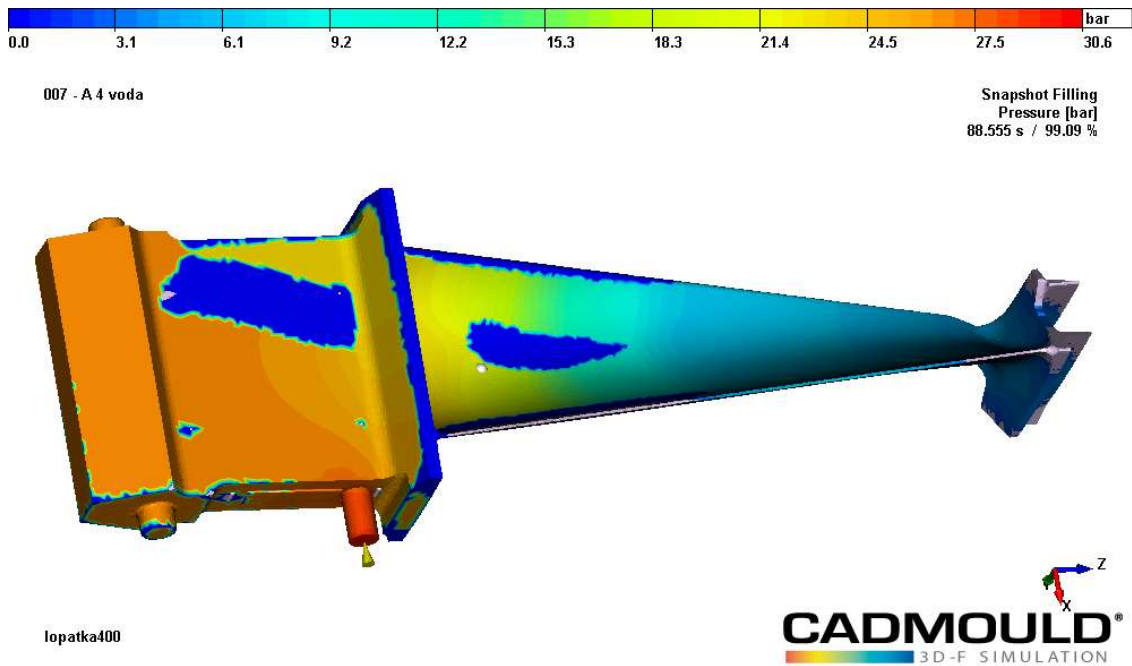
Obrázek 8.18 Teplota na čele proudícího zeleného vosku

Průběh teplot vosku v řezu lopatkou v dobách cyklu 55 s, 120 s, a 240 s jsou uvedené v příloze 5.

Dále byla zjišťována změna vstřikovacího tlaku při 99% procentech naplnění. Tato analýza pak potvrdila kritická místa pro vznik vad popsaných v kapitole 8.2.1.



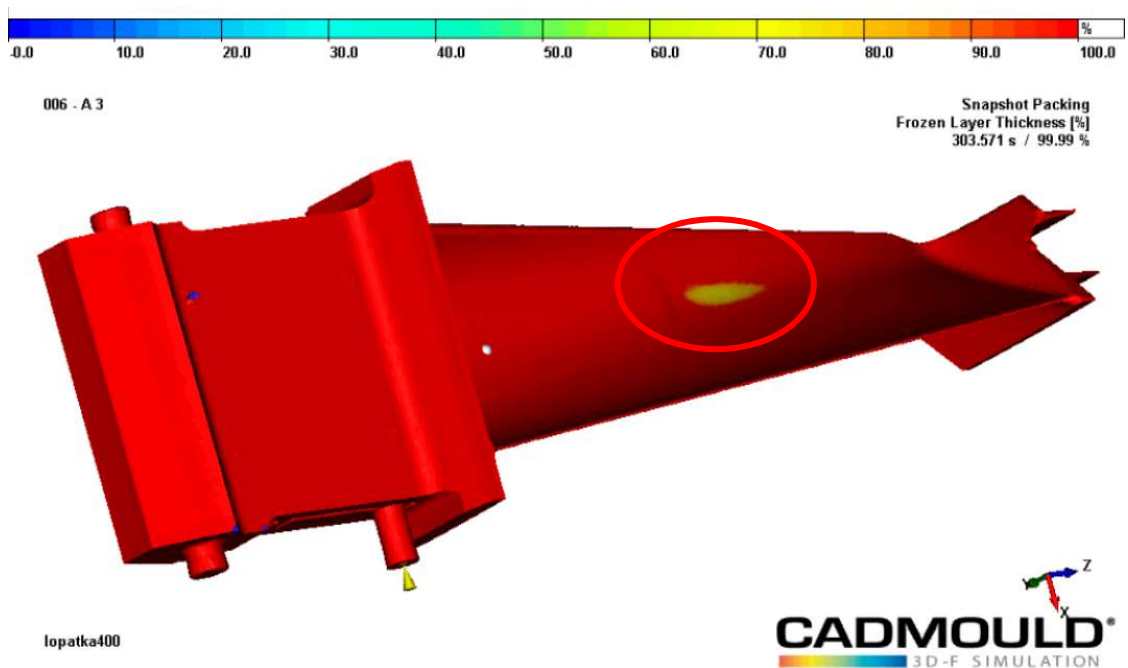
Obrázek 8.19 Vstřikovací tlak při 99 % naplnění – hnědý vosk



Obrázek 8.20 Vstřikovací tlak při 99 % naplnění – zelený vosk

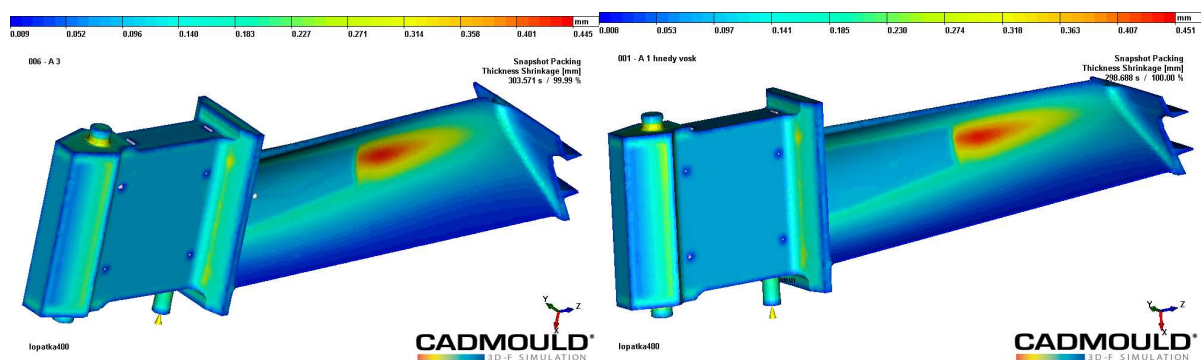
8.2.3 Průběh tuhnutí

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 tloušťek stěn v programu Solidworks. Tato predikce se potvrdila při vlastní analýze propadů lopatky u simulace obou vosků.



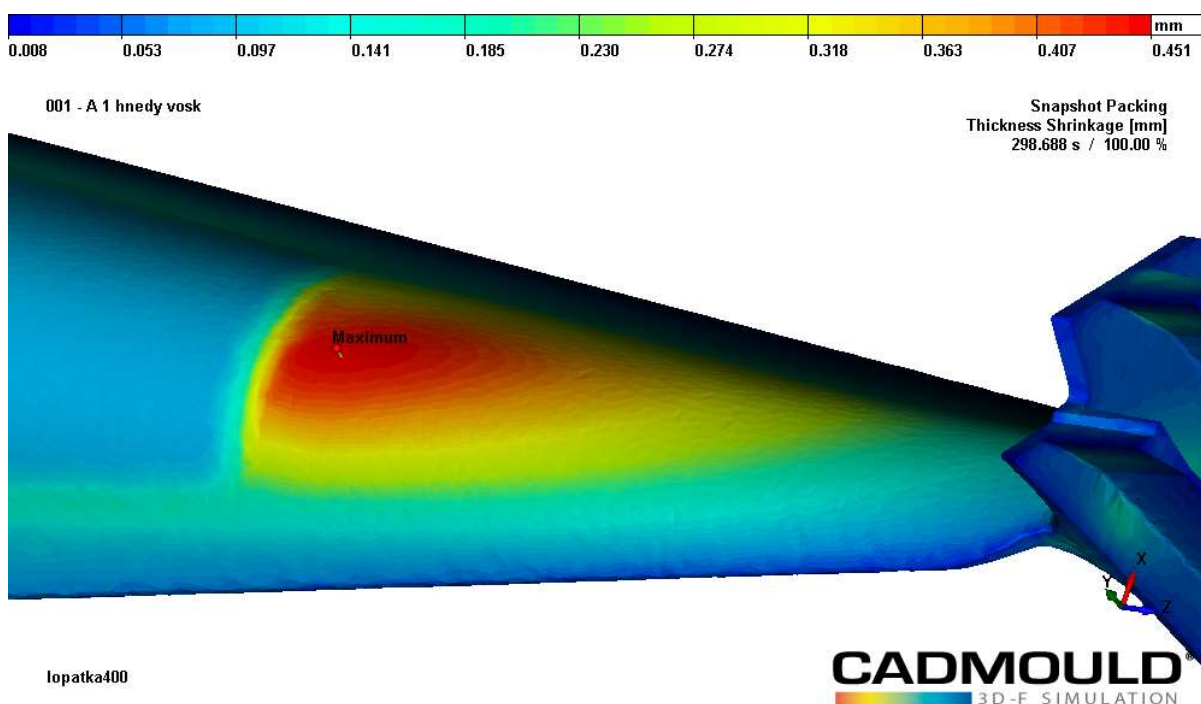
Obrázek 8.21 Tuhnutí vosku v % zatuhlých vrstev od konce doby plnění – zelený vosk

Jak bylo výše uvedeno, u obou vosků byly na základě predikce vypočítány viditelné propady.



Obrázek 8.22 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.

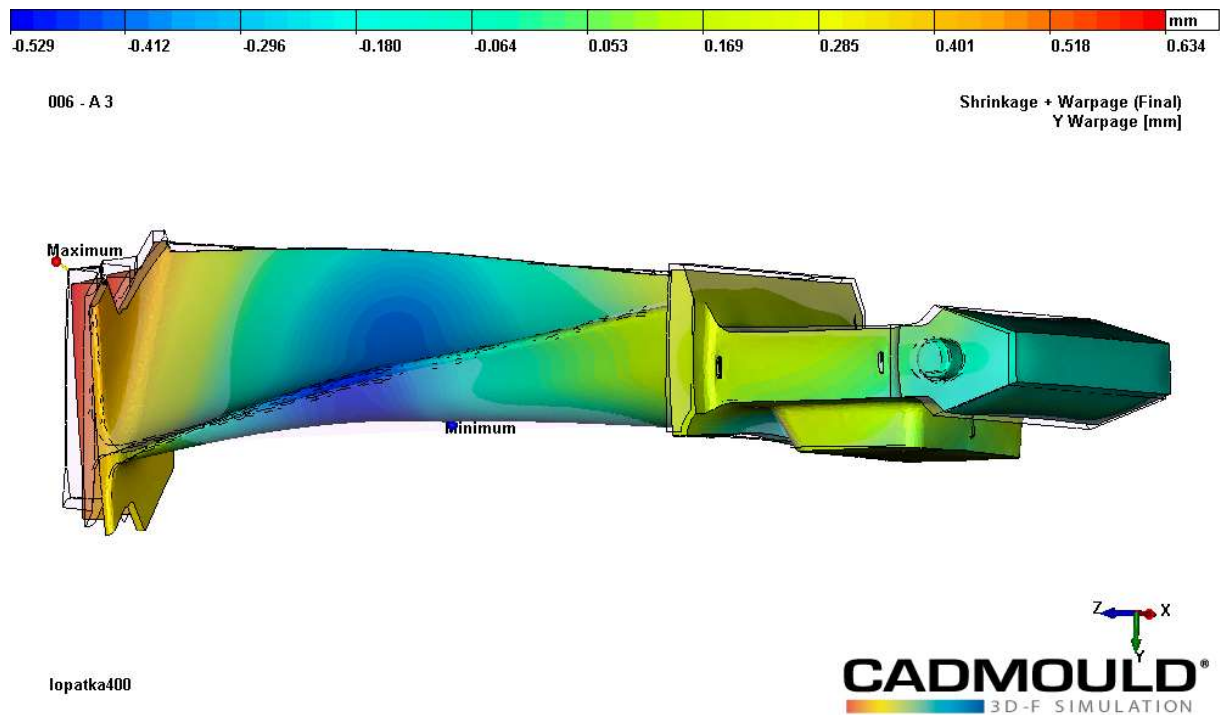


Obrázek 8.23 Detail místa maximálního propadu (hnědý vosk)

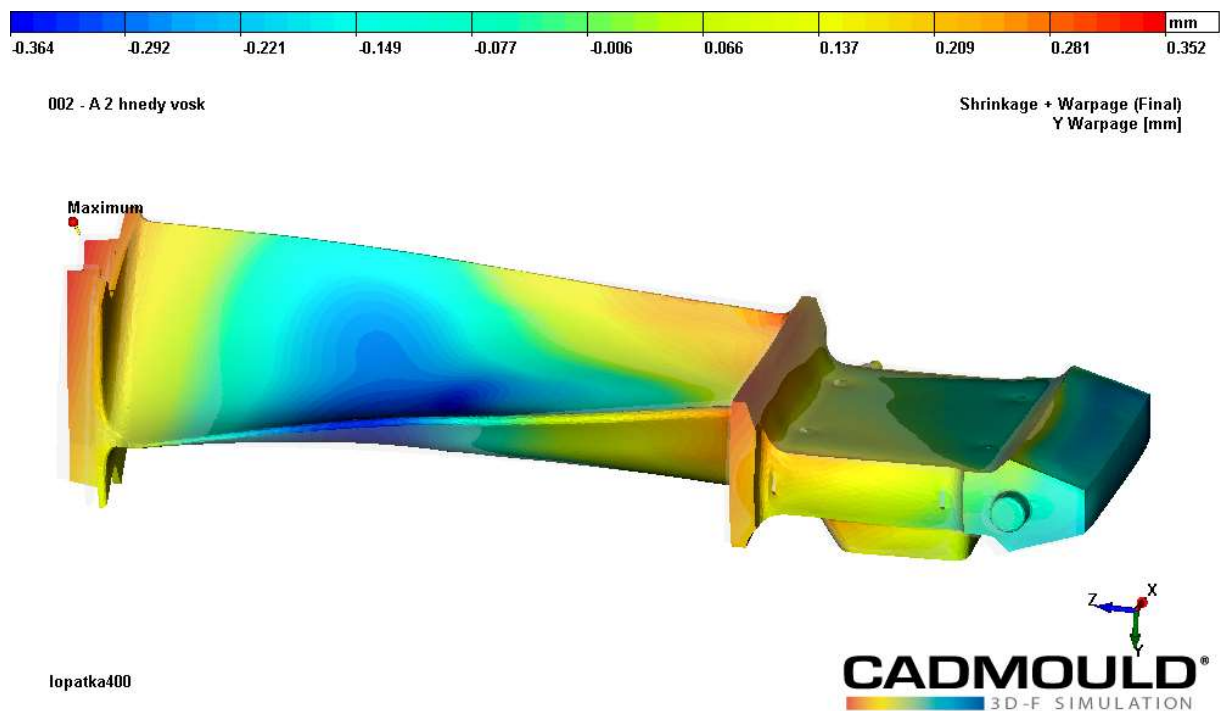
8.2.4 Analýza smrštění a deformace

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

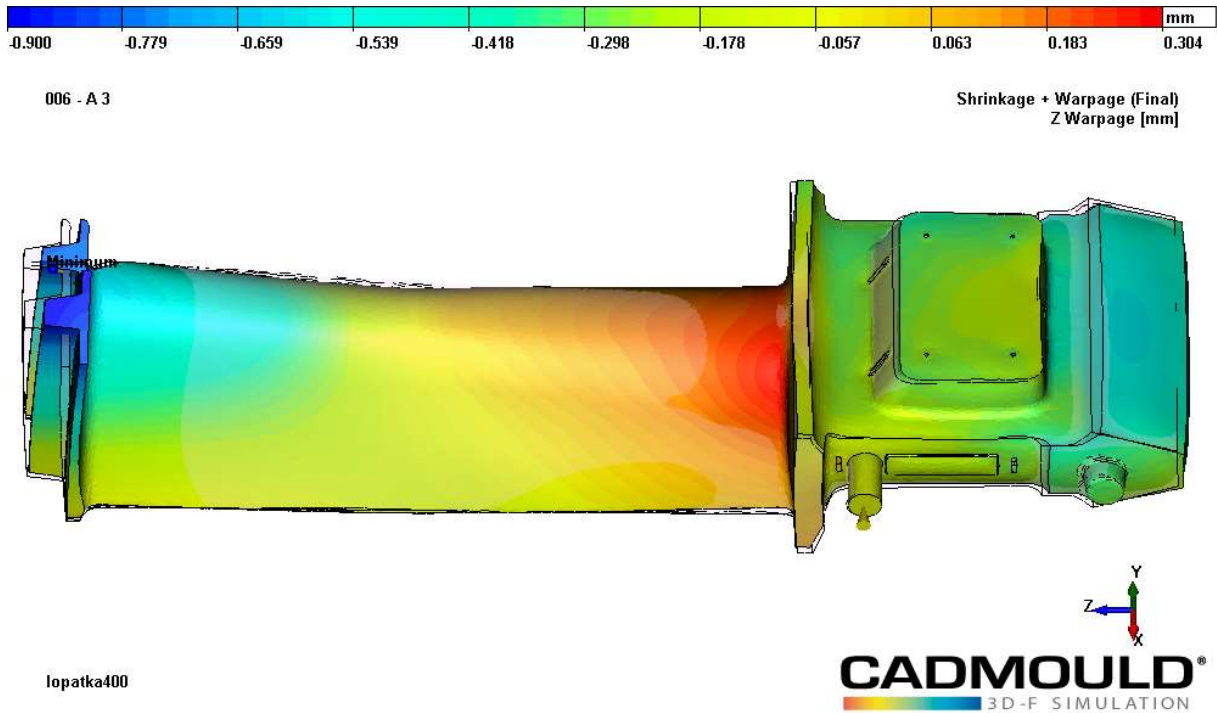


Obrázek 8.24 Redukovaná deformace Y – zelený vosk

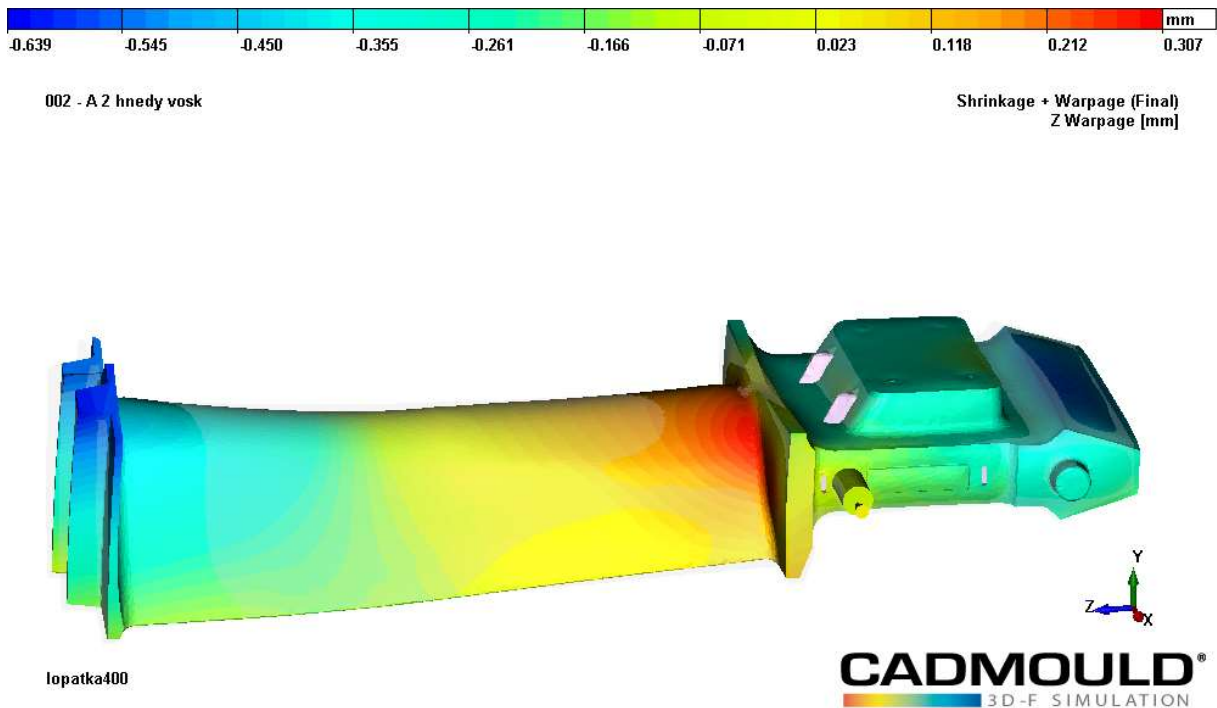


Obrázek 8.25 Redukovaná deformace Y – hnědý vosk

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



Obrázek 8.26 Redukovaná deformace Z – zelený vosk

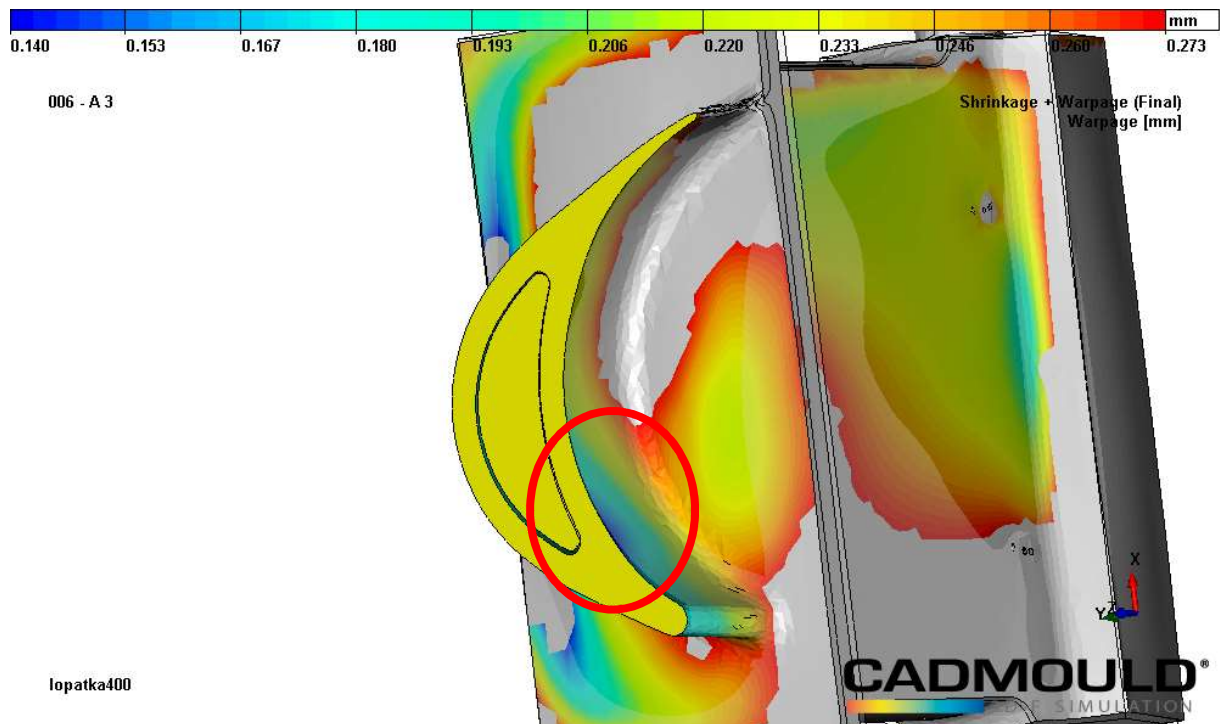


Obrázek 8.27 Redukovaná deformace Z – hnědý vosk

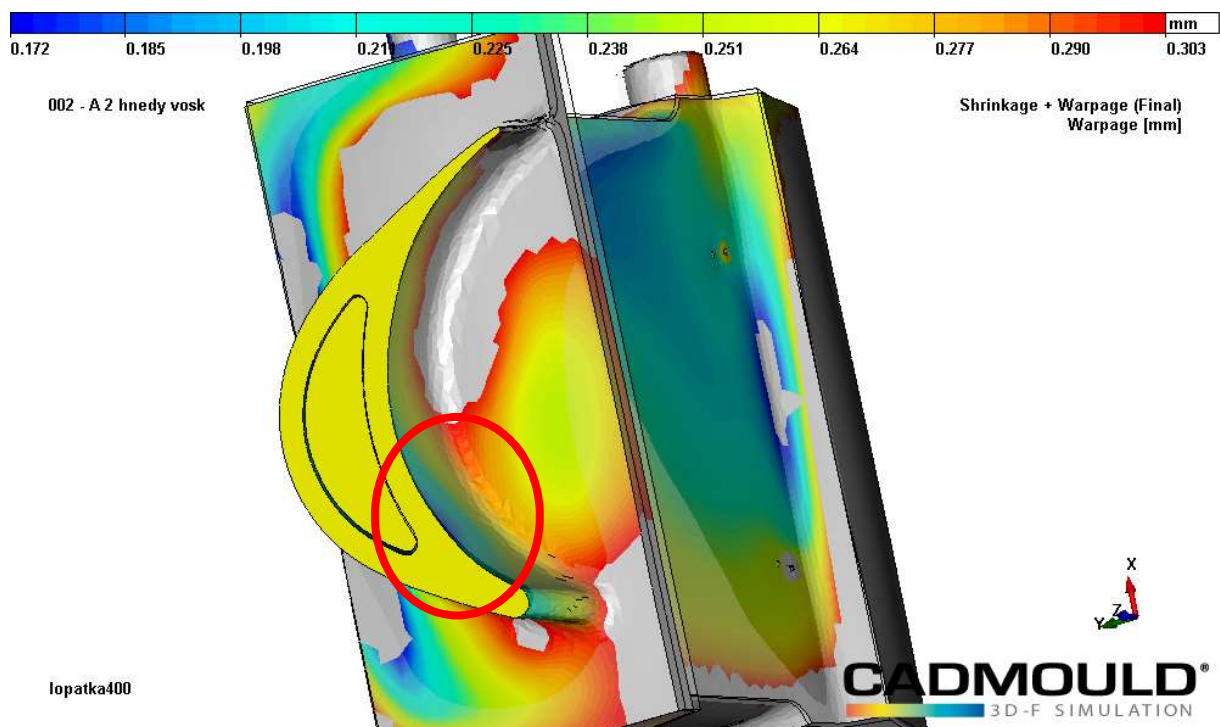
Vypočítané průměrné smrštění pro hnědý vosk bylo 0,77%, pro zelený vosk 0,9%, nicméně tento výsledek se neprojevil deformačním chováním lopatky.

8.2.5 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 8.28 Řez 3: $z = +720$ mm, zelený vosk (simulace)



Obrázek 8.29 Řez 3: $z = +720$ mm, hnědý vosk (simulace)

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

Simulací bylo ověřeno, že při porovnání průběhu simulovaných deformací na obrázku 8.28 a 8.29 a naměřených deformací je největší hodnota úchylky 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.

9 Diskuze výsledků vzhledem k současnému stavu poznání

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 [47]. 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 [49]. 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 [48] 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.

10 Splnění cílů práce a 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. *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 vlastností, 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]

Dle 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 projeví, 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 takto 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 úchytky. [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 zasítovaný, a tudíž je náchylný na deformace. Problém s vyjímáním by pomohlo osazení vstřikovací formy vyhadzovači, 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.

Seznam příloh

Příloha 1: Model experimentální aparatury pro měření pvT dat

Příloha 2: Reogramy panenského a rekonstituovaného vosku

Příloha 3: Barevná mapa rozměrových odchylek ve spodní části bandáže pro všechny lopatky

Příloha 4: Detail rozměrových odchylek vnější části bandáže pro všechny lopatky

Příloha 5: Teploty vosků v řezu lopatkou

Příloha 6: Detaily proudění vosk

Seznam zkratek a symbolů

Mm	molární hmotnost
EVA	etylen vinyl acetát
DSC	diferenciální skenovací kalorimetrie
CAD	computer aided design (počítačem podporované projektování)
stl	nativní formát souboru stereolitografického programu
iges	formát souboru, který umožňuje digitální výměnu informací mezi CAD systémy
dxg	CAD formát
ε	poměrné délkové prodloužení
σ	mechanické napětí
E	Youngův modul
τ	tečné napětí v tekutině
u	rychlost toku
x	souřadnice ve směru kolmém na směr proudění
η	dynamická viskozita
t	teplota
G	modul pružnosti ve smyku
pVT	závislost změny objemu na teplotě a tlaku
CAE	Computer Aided Engineering (počítačem podporovaný inženýrská analýza)
d	průměr nádoby
h	výška nádoby
ΔV	změna objemu
λ	tepelná vodivost
K	koeficient konzistence toku
γ	rychlost smykové deformace
n	index toku
RPS	referenční měřicí body
cp	specifická tepelná kapacita
NF	No – flow (teplota, při které vosk již nemůže proudit)

Seznam obrázků

Obrázek 1.1 Celosvětový vývoj prodeje odlitků přesného lití [1]	9
Obrázek 1.2 Schéma postupu přesného lití na vytavitelný model [3].....	10
Obrázek 2.1: Princip zkoušky bodu tuhnutí [5]	17
Obrázek 2.2. Schéma zkoušky skápnutí vosku [19].....	18
Obrázek 2.3. Příklad analýzy materiálů z filtračního systému [7]	18
Obrázek 2.4. Měření viskozity [19]	20
Obrázek 2.5 Diferenciální skenovací kalorimetrie [6]	20
Obrázek 2.6. Forma pro zkoušku tekutosti vosku [7]	21
Obrázek 2.7. Příklad vyhodnocení objemové expanze [19].....	22
Obrázek 2.8. Příklad výsledku Ramanovy spektrometrie [19]	23
Obrázek 3.1 Numerické metody FDM a FEM [27]	26
Obrázek 3.2 Maxwellův model [30]	28
Obrázek 3.3 Voigtův model	29
Obrázek 3.4 Tuckettův model [29]	29
Obrázek 3.5 Aproximace pvT dat dle Rennerova vztahu [46].....	32
Obrázek 5.1 Model lopatky	37
Obrázek 5.2 Model zálitku - chladítka	38
Obrázek 5.3 Orientační analýza tlouštěk stěn lopatky v programu SolidWorks [K5][K6]	39
Obrázek 5.4 Založený zálitek do dutiny formy.....	40
Obrázek 5.5 Chladicí lázeň s uzavřeným a otevřeným přípravkem.....	40
Obrázek 5.6 Srovnání proměnných časů pro jednotlivé lopatky lisovaných z panenského zeleného vosku Remet Hyfill B478 [K3]	44
Obrázek 5.7 Srovnání proměnných časů pro jednotlivé lopatky lisovaných z rekonstituovaného hnědého vosku Remet Hyfill B478	44
Obrázek 5.8 Struktura zeleného (vlevo) a hnědého (vpravo) vosku [39]	45
Obrázek 6.1 Návrh modelu měřicí soustavy pro stanovení závislosti změny objemu na teplotě	48
Obrázek 6.2 Použité měřicí přístroje a zařízení [K7].....	49
Obrázek 6.3. Experimentální sestava na začátku měření	50
Obrázek 6.4 Závislost změny objemu vosku na teplotě [K7]	52
Obrázek 6.5 Sestava měřicí aparatury pro stanovení tepelné vodivosti vzorků vosků	53
Obrázek 6.6 Temperace vzorků v termostatické komoře.....	54

Obrázek 6.7 Zařízení pro měření temperovaných vzorků.....	54
Obrázek 6.8 Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě vosku - hnědý vosk [K7].....	57
Obrázek 6.9 Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě vosku - zelený vosk [K7].....	57
Obrázek 6.10 Závislost entalpie na teplotě vosku - hnědý vosk	58
Obrázek 6.11 Závislost entalpie na teplotě vosku – zelený vosk.....	58
Obrázek 6.12 Závislost koeficientu konzistence obou vzorků na teplotě [K7].....	61
Obrázek 6.13 Závislost indexu toku obou vzorků na teplotě [K7]	61
Obrázek 6.14 Reogram zeleného vosku při teplotě 71,9 °C.	62
Obrázek 6.15 Reogram hnědého vosku při teplotě 71,9 °C.	62
Obrázek 6.16 Reogram zeleného vosku při teplotě 55,1 °C.	63
Obrázek 6.17 Reogram hnědého vosku při teplotě 57,1 °C.	63
Obrázek 6.18 Průběh viskozity u zeleného vosku.....	65
Obrázek 6.19 Průběh viskozity u hnědého vosku	65
Obrázek 6.20 Průběh křivek viskozity v závislosti na teplotě u hnědého a zeleného vosku [40]	66
Obrázek 6.21 Forma pro vstřikování vosku	67
Obrázek 6.22 Průběh zkoušky ohybem.....	68
Obrázek 6.23 Křivky napětí v ohybu σ vůči deformace ohybem ε a průhybem s u obou druhů vosků	69
Obrázek 6.24 Závislost napětí na poměrné deformaci – vzorek ZK.....	70
Obrázek 6.25 Závislost napětí na poměrné deformaci – vzorek ZV	71
Obrázek 6.26 Závislost napětí na poměrné deformaci – vzorek HK	71
Obrázek 6.27 Závislost napětí na poměrné deformaci – vzorek HV	72
Obrázek 7.1 Zaznamenané časy vyjímání modelů lopatek z panenského zeleného vosku ze vstřikovací formy [K7][K3]	73
Obrázek 7.2 Porovnání 3D náměru lopatky ze zeleného vosku s CAD modelem, vnější strana listu (šedá barva = náměr, modrá barva = CAD model) [K9].....	74
Obrázek 7.3 Porovnání 3D náměru lopatky ze zeleného vosku s CAD modelem, vnitřní strana listu (šedá barva = náměr, modrá barva = CAD model)	75
Obrázek 7.4 Porovnání 3D náměru lopatky z hnědého vosku s CAD modelem, vnější strana listu (šedá barva = náměr, modrá barva = CAD model)	76
Obrázek 7.5 Porovnání 3D náměru lopatky z hnědého vosku s CAD modelem, vnější strana listu (šedá barva = náměr, modrá barva = CAD model)	76

Obrázek 7.6 Srovnání rozměrových odchylek u všech lopatek v oblasti bandáže a vrchní části zámku	77
Obrázek 7.7 Barevná mapa odchylek z vnější strany modelů ze zeleného vosku	78
Obrázek 7.8 Barevná mapa odchylek z vnější strany modelů z hnědého vosku.....	79
Obrázek 7.9 Barevná mapa vyhodnocených rozměrových úchylek z vnitřní strany lopatky ze zeleného vosku.....	79
Obrázek 7.10 Barevná mapa vyhodnocených rozměrových úchylek z vnitřní strany lopatky z hnědého vosku	80
Obrázek 7.11 Umístění řezů na vyhodnocované lopatce	80
Obrázek 7.12 Řez 1: $z = +900$ mm, panenský zelený vosk	81
Obrázek 7.13 Řez 1: $z = +900$ mm, rekonstituovaný hnědý vosk	81
Obrázek 7.14 Řez 2: $z = +810$ mm, panenský zelený vosk	82
Obrázek 7.15 Řez 2: $z = +810$ mm, rekonstituovaný hnědý vosk	82
Obrázek 7.16 Řez 3: $z = +720$ mm, panenský zelený vosk	83
Obrázek 7.17 Řez 3: $z = +720$ mm, rekonstituovaný hnědý vosk	83
Obrázek 8.1 Vstupní pvT data dle Rennera pro zelený vosk	86
Obrázek 8.2 Vstupní pvT data dle Rennera pro hnědý vosk.....	86
Obrázek 8.3 Závislost viskozity na smykovém namáhání u zeleného vosku	87
Obrázek 8.4 Závislost viskozity na smykovém namáhání u hnědého vosku	87
Obrázek 8.5 Závislost specifické tepelné kapacity na teplotě u zeleného vosku.....	88
Obrázek 8.6 Závislost specifické tepelné kapacity na teplotě u hnědého vosku.....	88
Obrázek 8.7 Temperační systém formy [K7].....	89
Obrázek 8.8 Příklad nastavení průběhu vstřikování.....	90
Obrázek 8.9 Nerovnoměrné plnění zeleného vosku.....	92
Obrázek 8.10 Nerovnoměrné plnění hnědého vosku	92
Obrázek 8.11 Nedoplněná hrana lopatky při plnění hnědého vosku.....	93
Obrázek 8.12 Nedoplnění tvaru – hnědý vosk	93
Obrázek 8.13 Místa vzniku studených spojů při vstřikování zeleného vosku [K7].....	94
Obrázek 8.14 Místa vzniku studených spojů při vstřikování hnědého vosku.....	95
Obrázek 8.15 Vývoj nejvyšší teploty hnědého vosku ve vstřikovaném díle v čase, vzduch 23 °C.....	96
Obrázek 8.16 Vývoj nejvyšší teploty zeleného vosku ve vstřikovaném díle v čase, vzduch 23 °C.....	96
Obrázek 8.17 Teplota na čele proudícího hnědého vosku	97

Obrázek 8.18 Teplota na čele proudícího zeleného vosku.....	97
Obrázek 8.19 Vstříkovací tlak při 99 % naplnění – hnědý vosk.....	98
Obrázek 8.20 Vstříkovací tlak při 99 % naplnění – zelený vosk	98
Obrázek 8.21 Tuhnutí vosku v % zatuhlých vrstev od konce doby plnění – zelený vosk	99
Obrázek 8.22 Propady u zeleného (vlevo) a hnědého vosku (vpravo)[K5]	99
Obrázek 8.23 Detail místa maximálního propadu (hnědý vosk).....	100
Obrázek 8.24 Redukovaná deformace Y – zelený vosk.....	101
Obrázek 8.25 Redukovaná deformace Y – hnědý vosk	101
Obrázek 8.26 Redukovaná deformace Z – zelený vosk	102
Obrázek 8.27 Redukovaná deformace Z – hnědý vosk.....	102
Obrázek 8.28 Řez 3: z = +720 mm, zelený vosk (simulace).....	103
Obrázek 8.29 Řez 3: z = +720 mm, hnědý vosk (simulace)	103

Seznam obrázků v příloze

Obrázek 1 Reogram zeleného vosku při teplotě 60,1 °C.	125
Obrázek 2 Reogram zeleného vosku při teplotě 65,0 °C.	125
Obrázek 3 Reogram 1 zeleného vosku při teplotě 70,0 °C.	125
Obrázek 4 Reogram 2 zeleného vosku při teplotě 70,0 °C.	126
Obrázek 5 Reogram 1 zeleného vosku při teplotě 71,9 °C.	126
Obrázek 6 Reogram 2 zeleného vosku při teplotě 71,9 °C.	126
Obrázek 7 Reogram hnědého vosku při teplotě 61,0 °C.....	127
Obrázek 8 Reogram hnědého vosku při teplotě 66,0 °C.....	127
Obrázek 9 Barevná mapa rozměrových odchylek ve spodní části bandáže u modelu Z1	128
Obrázek 10 Barevná mapa rozměrových odchylek ve spodní části bandáže u modelu Z2 ...	129
Obrázek 11 Barevná mapa rozměrových odchylek ve spodní části bandáže u modelu H1 ...	130
Obrázek 12 Barevná mapa rozměrových odchylek ve spodní části bandáže u modelu H2...	131
Obrázek 13 Detail rozměrových odchylek vnější části bandáže u modelu Z1	132
Obrázek 14 Detail rozměrových odchylek vnější části bandáže u modelu Z2	133
Obrázek 15 Detail rozměrových odchylek vnější části bandáže u modelu H1	134
Obrázek 16 Detail rozměrových odchylek vnější části bandáže u modelu H2.....	135
Obrázek 17: Teplota hnědého vosku v řezu lopatkou v 55 s doby cyklu.....	136
Obrázek 18: Teplota zeleného vosku v řezu lopatkou v 90 s doby cyklu	136
Obrázek 19: Teplota hnědého vosku v řezu lopatkou v 120s doby cyklu.....	137
Obrázek 20: Teplota zeleného vosku v řezu lopatkou v 121s doby cyklu	137

Obrázek 21: Teplota zeleného vosku v řezu lopatkou v 216s doby cyklu.....	138
Obrázek 22: Teplota hnědého vosku v řezu lopatkou v 240s doby cyklu.....	138
Obrázek 23: Teplota zeleného vosku v řezu lopatkou v 303,5s doby cyklu.....	139
Obrázek 24 Detail proudění na vstupu do formy.....	139
Obrázek 25 Detail proudění na zámku.....	140
Obrázek 26 Detail proudění v části listu – hnědý vosk.....	140
Obrázek 27 Detail proudění v zámkové části – hnědý vosk.....	141
Obrázek 28 Detail proudění – hnědý vosk.....	141
Obrázek 29 Řez 3: z = +720 mm, zelený vosk.....	142
Obrázek 30 Řez 3: z = +810 mm, zelený vosk – strana A.....	142
Obrázek 31 Řez 3: z = +810 mm, zelený vosk – strana B.....	143
Obrázek 32 Řez 3: z = +900 mm, zelený vosk – strana A.....	143
Obrázek 33 Řez 3: z = +720 mm, hnědý vosk – strana A.....	144
Obrázek 34 Řez 3: z = +720 mm, hnědý vosk – strana B.....	144
Obrázek 35 Řez 3: z = +810 mm, hnědý vosk – strana A.....	145
Obrázek 36 Řez 3: z = +810 mm, hnědý vosk – strana B.....	145
Obrázek 37 Řez 3: z = +900 mm, hnědý vosk – strana A.....	146
Obrázek 38 Řez 3: z = +900 mm, hnědý vosk – strana B.....	146

Seznam citované literatury:

- [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] GIFT, B., *Investment casting process*. In: Pennsylvania Precision Cast Parts [online]. Lebanon, 2017 [cit. 2018-06-07]. Dostupné z: <http://ppcpinc.com/wp-content/uploads/2014/07/PPCP-Investment-Casting-Process.pdf>
- [4] *Global Investment Casting Market 2018-2022* [online]. Londýn: TechNavio, 2018, 11.04.2018, , 137 [cit. 2018-07-24]. Dostupné z: <https://www.researchandmarkets.com/reports/4438623/global-investment-casting-market-2018-2022>
- [5] HANCOCK, P., Technical report : Wax Evaluation. Cambridge, UK : [s.n.], 2011. 24 *Quality control manual (summary)*. [s.l.] : BLAYSON OLEFINES LTD, 2011. 28 s.
- [6] HANCOCK, P., BOND D., WILLIAMS, M., Innovative Test Methods for Wax. In: *ICI 62nd Annual Technical Conference & Expo*. Schaumburg: Cambidge, 2015, s. 28.
- [7] HERMAN, A., ČESAL, M., a PÍŠA, V., Měření vlastností voskových směsí jako vstupních dat do databáze simulačního software. *Strojírenská technologie*. 2014, XIX(1), s. 8-12. ISSN 1211-4162.
- [8] HANCOCK, P., Wax Testing.. Now and the Future. In: *EICF 27th International Conference & Exposition* [online]. Krakow, Poland, 2010, s. 17 [cit. 2017-06-19].
- [9] BOND, D. NISHIKAWA, K., Investigation of Wax Expansion. Blayson Technical Lectures. 2002, s. 1- 44. Volume 834-836, 2013, Pages 1575-1579, 2013 3rd *International Conference on Materials and Products Manufacturing Technology*, ICMPMT 2013; Guangzhou; China; 25 September 2013 through 26 September 2013; Code 100757
- [10] BOND, D., Advanced Wax Testing and Subsequent Wax Developments. September 2013. *JFS Investment Casting Seminar, Tokyo, Japan*. [cit. 2017-08-13] dostupné z: http://www.investmentcastingwax.com/library_lectures.php?id=1
- [11] OLEFINES, B., Investment Casting Wax: The Lost Wax Proces [online]. 2008 [cit. 2018-06-2]. Dostupné z: <http://www.investmentcastingwax.com/downloads/process2010.pdf>

- [12] TALANDA, I., HORÁČEK, M., JEDNOVNICKÝ, J. Moderní voskové směsi a výběr jejich nejvhodnějších kombinací pro slévárnu Fimes, a.s. Slévárenství, 2010, roč. 2010, č. 9- 10, s. 322- 323. ISSN: 0037- 6825.
- [13] BOND, D., HANCOCK, P., Advanced Wax Testing and Subsequent Wax Developments. In: 13th World Conference on Investment Casting [online]. Kyoto, 2012 [cit. 2012-9-15]. Dostupné z: <http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl22.pdf>
- [14] HERMAN, A., *Lití na vytavitelný model: Přesné lití na vytavitelný model* [online]. Praha: ČVUT v Praze, 2012, , 30 [cit. 2017-08-12]. Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/32/presne-liti-na-vytavitelny-model.pdf>
- [15] HERMAN, A., Tvarová přesnost složitých odlitků pro energetiku. Praha, 2018. *Habilitační práce*. ČVUT v Praze.
- [16] HIRTS, R., Understanding Investment Casting Wax [online]. 2008 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z WWW:<<http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl9.pdf>
- [17] KOBĚRSKÝ F., Optimalizace výroby voskových modelů- voskové směsi a jejich zkoušení, Brno, 2010. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Milan HORÁČEK. [2015-03-23] Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29871
- [18] BRATHOVÁ, M., Analýza chladnutí voskového modelu Praha, 2013. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Petr ZIKMUND.
- [19] HANCOCK, P., Wax Testing, [online] 2011 [cit. 2017-06-03] Dostupné z www.investmentcastingwax.com/library_lectures.php?id=2
- [20] BOND, D., NISHIKAWA, K., Investment Casting Wax Technology. *Blayson Technical Lectures*. 2002,
- [21] WENYI Y., CHUNG L. P., SIMON G. P., Conditions of applying Oliver–Pharr method to the nanoindentation of particles in composites, *Composites Science and Technology*, Volume 72, Issue 10, 2012, Pages 1147-1152, ISSN 0266-3538
- [22] KOLESÁR, R., Optimalizace technologií vosků a skořepin ve firmě Fimes, Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [23] HOSSAIN M. E., KETATA, C., ISLAM, M. R., Experimental study of physical and mechanical properties of natural and synthetic waxes using uniaxial compressive strength test. Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization, Sharjah, UAE, 2009

- [24] ŠOLC, P., Využití simulace pro predikci vad a hodnocení odlitků z Al slitin, 2008. *Diplomová práce*. VUT v Brně
- [25] BEŇO, J., ŠPIRUTOVÁ, N., Počítačová podpora lití a tuhnutí odlitků [online]. In: . Ostrava: *Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava*. Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, 2013
- [26] WARD, I., M., *The Mechanical Properties of Solid polymers*. Wiley 2005
- [27] Finite Element Method (FEM) and Finite Different Method (FDM): Comparison of two methods for the simulation of casting processes. In: *SIMTEC: Software* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: http://www.simtec-inc.com/fem_vs_fdm.htm
- [28] ĎOUBAL, S., KLEMER, P., ĎOUBAL, J., *Viskoelasticita - teorie, měření, aplikace*. Praha: Karolinum, 2011.
- [29] MLLIKOVÁ, E. Konstrukční plasty [online]. In: . 2007, s. 33 [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2644657/>
- [30] IQBAL, S.. Charakterization of Viscoelastic Properties of a Material used for an Additive Manufacturing Method. *Ann Arbor, Michigan*: ProQuest, 2013, 68 s.
- [31] FLEK, J., Simulace vstříkovaných dílů, 2018. *Bakalářská práce*. ČVUT v Praze
- [32] NOVÁ, I., KOSEK, P., ŠMRHA, J., Slévárenské simulační programy. Praha: *MM Průmyslové spektrum*, 2015, (11), 80 s. ISSN 1212-2572.
- [33] Cadmould@3D-F [online]. 2018 *Plasty Gabriel s.r.o* [cit. 19.08.2018]. Dostupné z: <http://cadmould.cz/software/cadmould-3d-f/>
- [34] GABRIEL, Jiří. Software pro analýzu vstříkování plastů. *Plastic Portal* [online]. Nitra: ICOSA, 2011, 26.10.2011 [cit. 2018-07-02]. Dostupné z: <https://www.plasticportal.cz/cs/software-pro-analyzu-vstrikovani-plastu/c/747/>
- [35] DURETEK, Ivica. Material data for injection moulding simulation [online]. In: . Leoben, Austria: *Kunststofftechnik Leoben*, 2014, 24.04.2014, s. 55 [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: http://www.polyregion.org/files/attachments/13135/487092_20140424_PolyRegion_Duretek.pdf
- [36] Casting Wax: Pattern, Runner and System Wax. REMET [online]. [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://www.remet.com/range/pattern-runner-wax/>
- [37] HYFILL: Filled Investment Casting Pattern Wax REMET [online]. [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <https://www.remet.com/us/products/hyfill/>
- [38] Wax Room: Hyfill REMET [online]. [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <https://remet.com/wp-content/themes/remet/library/brochure/BrochureLayout.pdf>

- [39] HERMAN, A., VRÁTNÝ, O., BEDNÁŘ, B., Measuring of wax properties for simulation injection of wax patterns and their deformation prediction. In: *16th International Foundrymen Conference: Global Foundry Industry - Perspectives for the Future*. Zagreb: University of Zagreb, 2017, s. 8. ISBN 978-953-7082-26-0.
- [40] Remet: Wax characterisation [online]. [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://www.remet.com/uk/technicalpaper/wax-characterisation/>
- [41] Test Certificate: Hyfill B478. Rochester, Great Britain: Remet UK, 2018.
- [42] Test Certificate: reclaim Hyfill B478. Rochester, Great Britain: Remet UK, 2017.
- [43] BOND, D., HANCOCK, P., Advanced Wax Testing and Subsequent Wax Developments. In: *13th World Conference on Investment Casting* [online]. Kyoto, 2012 [cit. 2012-9-15]. Dostupné z: <http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl22.pdf>
- [44] ČSN EN ISO 178: *Plasty - Stanovení ohybových vlastností*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 24 s.
- [45] *Simcon Kunststofftechnische Software GmbH*. Cadmould: User Manual. Herzogenrath, 2005, 198 s.
- [46] FILZ, P., SEIBEL, A., *Cadmould 3D-F Version 5.0 verbessert die Simulationstechnik*. [cit. 2012-9-15]. Dostupné z: https://www.simcon-worldwide.com/media/Pressemitteilungen/Simcon_Pressemitteilung_Update%20Version%205_28042011.pdf
- [47] 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).
- [48] KOSOUR, V., Využití numerické simulace k optimalizaci výroby voskových modelů. Brno, 2012. *Disertační práce*. VUT v Brně.
- [49] 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

Citovaná literatura autora k tématu disertační práce:

- [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.

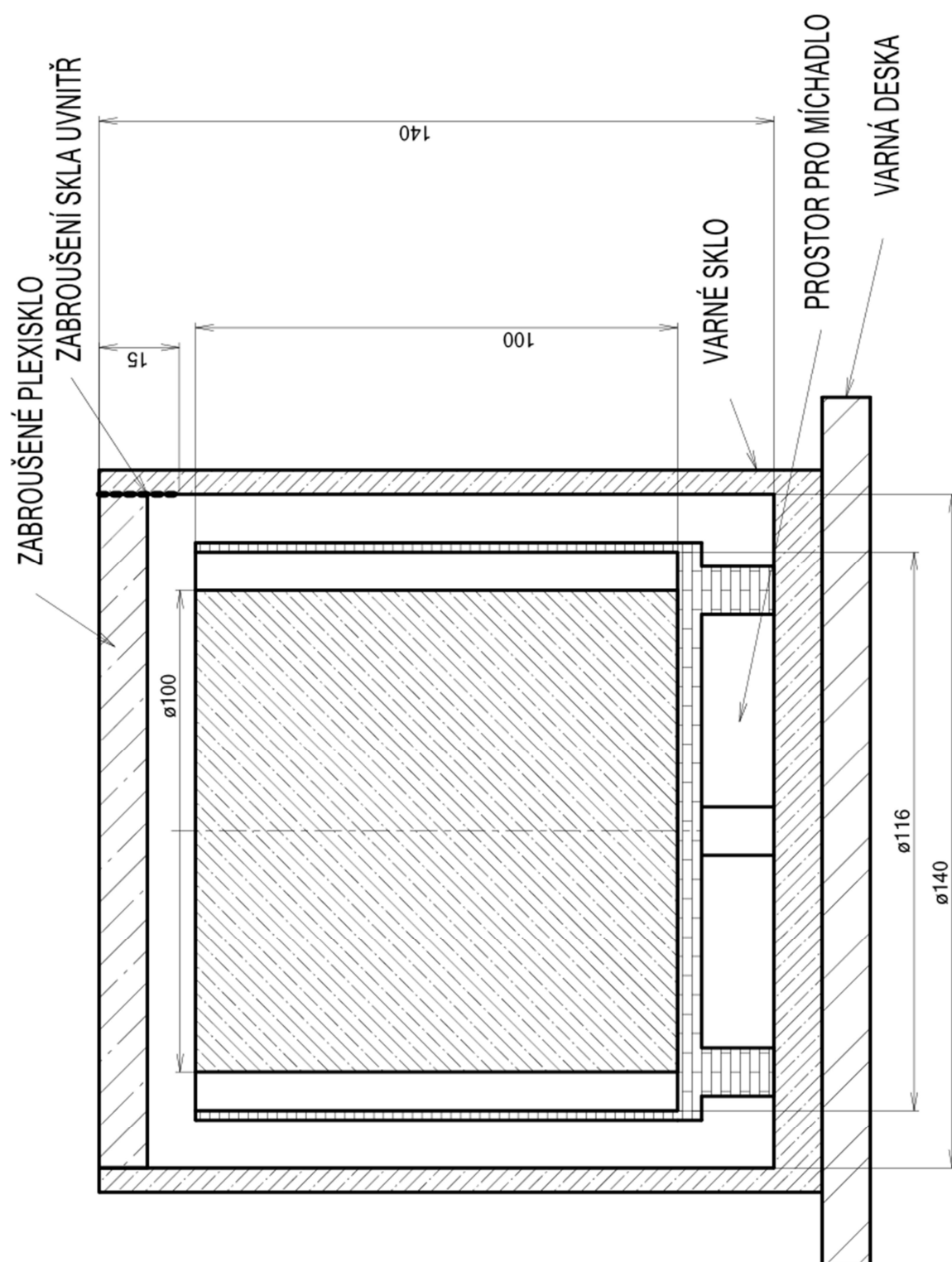
- [K9] **KUBELKOVÁ, I.**, HERMAN, A., Examination of the dependence of changing volume of waxes on the temperature, *Book of Proceeding from Conference Technological Forum 2018*, Technological forum 2018. Dubovice 2018, 239 s. ISBN 978-80-87583-26-5.
- [K10] **KUBELKOVÁ, I.**, HERMAN, A., KUBELKA, M., 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.

Další publikační činnost autora:

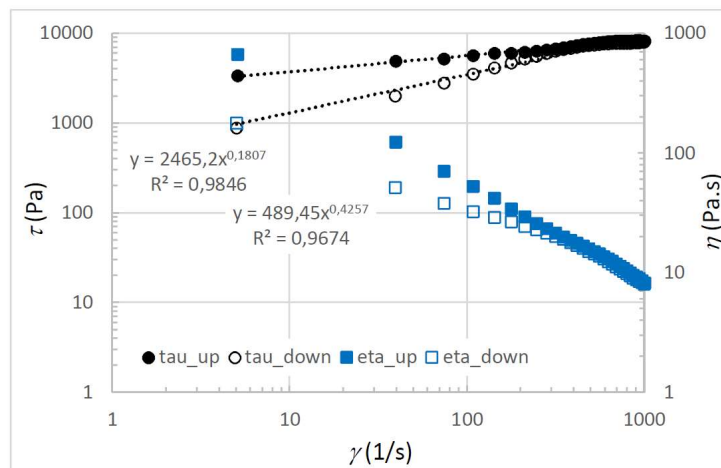
- [1] HERMAN, A., VRÁTNÝ, O., **KUBELKOVÁ, I.**, BEDNÁŘ, B., ŠTOURAC, F., V., Výroba série lopatek LP2 Rotor Blade. Velká Bíteš: *Výzkumná zpráva U12133/2017/025*, 2017.
- [2] HERMAN, A., **KUBELKOVÁ, I.**, a VRÁTNÝ, O., Využití termografické diagnostiky k zajištění stability výroby voskových modelů lopatek. *Technická diagnostika*. 2018, XXVIIIs. 10-11. ISSN 1210-311X.
- [3] HERMAN, A., VRÁTNÝ, O., **KUBELKOVÁ, I.**, BEDNÁŘ, B., ŠTOURAC, F., V., Vyhodnocení chladnutí skořepin, *Výzkumná zpráva, U12133/2017/015*, Vydáno ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 10/2017, 27 str.
- [4] HERMAN, A., **KUBELKOVÁ, I.**, a VRÁTNÝ, O. Využití termografické diagnostiky k zajištění stability výroby voskových modelů lopatek. In: *Sborník 37. mezinárodní konference DIAGO 2018*. DIAGO 2018. Sněžné - Milovy, 30.01.2018 - 31.01.2018. Zlín - Malenovice: Asociace technických diagnostiků ČR. 2018, ISSN 1210-311X.
- [5] HERMAN, A., VRÁTNÝ, O., **KUBELKOVÁ, I.**, BEDNÁŘ, B., ŠTOURAC, F., Vyhodnocení vlivu sekundárního metalurgického zpracování Al slitin na jejich výslednou metalurgickou čistotu. *Výzkumná zpráva U12133/2016/008*, Velvary: Metal Trade Comax a.s.. 2016.
- [6] HERMAN, A., ŠTOURAC, F., **KUBELKOVÁ, I.**, KUBELKA, M., DOLEŽAL, J., Reduction of energy loss in Al alloys transport. In: KUDLÁČEK, J., ed. *Technological forum 2016*. Technological forum 2016. Červenohorské sedlo, 28.06.2016 - 30.06.2016. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček. 2016, s. 218-222. ISBN 978-80-87583-17-3.
- [7] MRÁZEK, D., KUBELKA, M., **KUBELKOVÁ, I.**, PILVOUSEK, T. The Verification Determining the Size of the Deformations Using ARGUS. In: *Technological Forum 2015*. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2015, pp. 90-96. ISBN 978-80-87583-13-5.
- [8] KUBELKA, M., TATÍČEK, F., CVEŠPER, D., PAČÁK, T., **HAŠKOVÁ, I.** The Methodology Determining the Size of the Shear Stress on the Specific Samples. In: *Proceedings of International Conference on Innovative Technologies INTECH 2014*. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2014, pp. 369- 372. ISSN 1849-0662.

- [9] DOLEŽAL, J. a **HAŠKOVÁ, I.** Analysis of Inclusions Using X-Ray Probe by Electron Microscope. In: FICKOVÁ, Z., et al., eds. *Technological Forum 2014*. 5th International Technical Conference Technological Forum 2014. Kouty, 17.06.2014 - 19.06.2014. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček. 2014, s. 27-31. ISBN 978-80-87583-10-4.
- [10] HERMAN, A., **HAŠKOVÁ, I.**, a KRAMÁR, T. *Analýza příčiny vzniku prasklin u odlitku SW-1233*. Brníčko u Uničova: UNEX a.s.. 2013, 12133_2013_8.
- [11] HERMAN, A. a **HAŠKOVÁ, I.** The Sand Logistic Innovation in UNEX Foundry. In: PRES, P., et al., eds. *Technological Forum 2013*. Technologické fórum 2013. Kouty, 25.06.2013 - 27.06.2013. Jaroměř: Kudláček Jan, Ing.. 2013, s. 30-35. ISBN 978-80-87583-06-7
- [12] **HAŠKOVÁ, I.**, Studium vlastností nátěrů slévárenských jader a jejich využití ve slévárenských provozech. In: KOLAŘÍKOVÁ, M., et al., eds. *Technologické Forum 2012*. Technologické fórum 2012. Kouty, 26.06.2012 - 28.06.2012. Prague: Czech Technical University. 2012, s. 11-17. ISBN 978-80-01-05076-7.
- [13] **HAŠKOVÁ, I.**, Studie der Eigenschaften der Kernschichten und deren Ausnutzung in Gießerei Betrieb. In: *Sborník STČ 2012*. Konference Studentské tvůrčí činnosti STČ 2012. Praha, 28.03.2012. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. 2012, ISBN 978-80-01-04796-5. Dostupné z: <http://stc.fs.cvut.cz/pdf12/2563.pdf>
- [14] **HAŠKOVÁ, I.**, KYSELKA, Š., Cold-Box jádra a jejich nátěry v technologii nízkotlakého lití ve slévárně Beneš a Lát a.s.. In: *48. Slévárenské dny - sborník*. 48. Slévárenské dny. Brno, 11.10.2011 - 12.10.2011. Brno: Česká slévárenská společnost. 2011, s. 1-7. ISBN 978-80-02-02337-1.

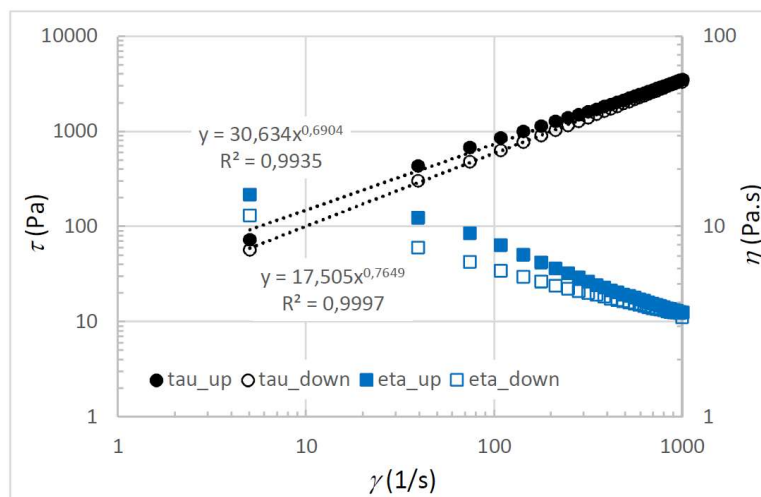
Příloha 1: Model experimentální aparatury pro měření pvT dat



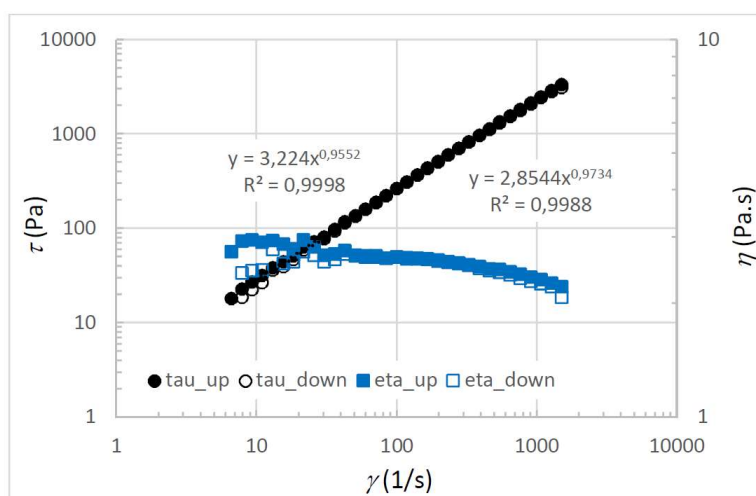
Příloha 2: Reogramy panenského a rekonstituovaného vosku



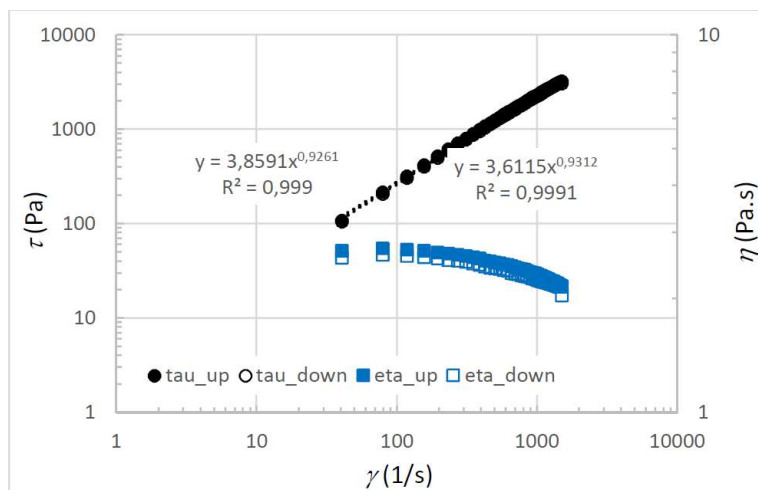
Obrázek 1 Reogram zeleného vosku při teplotě 60,1 °C.



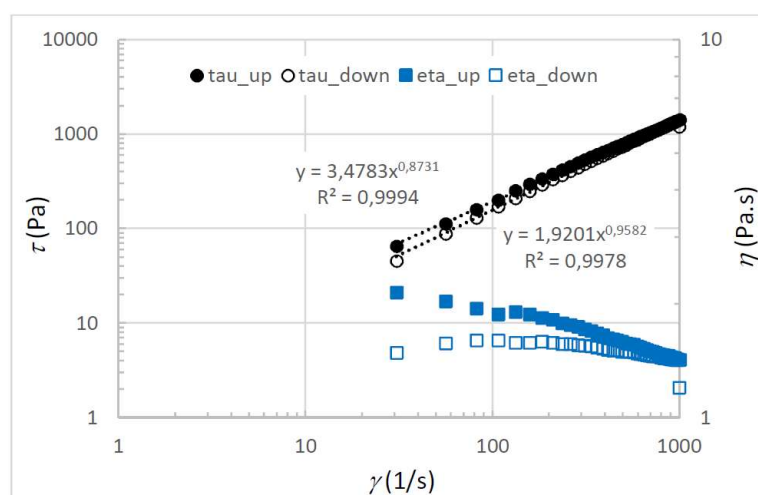
Obrázek 2 Reogram zeleného vosku při teplotě 65,0 °C.



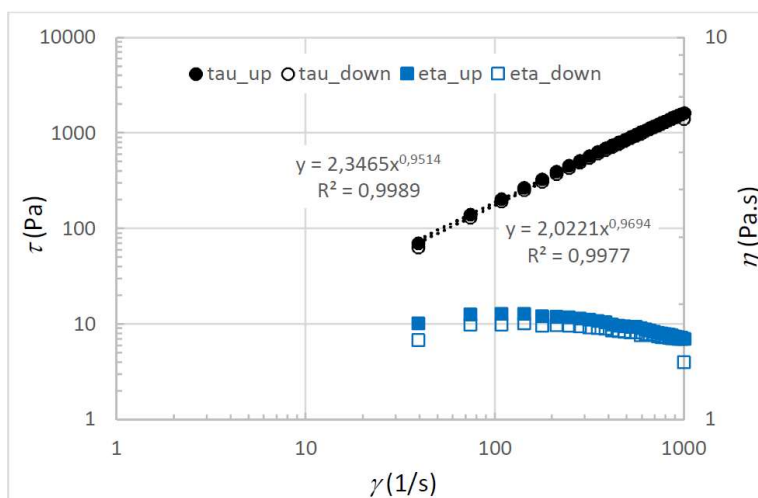
Obrázek 3 Reogram 1 zeleného vosku při teplotě 70,0 °C.



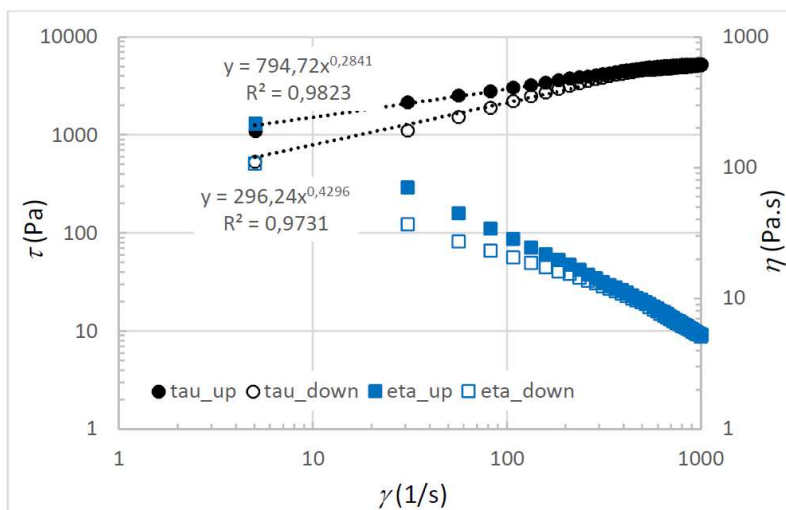
Obrázek 4 Reogram 2 zeleného vosku při teplotě 70,0 °C.



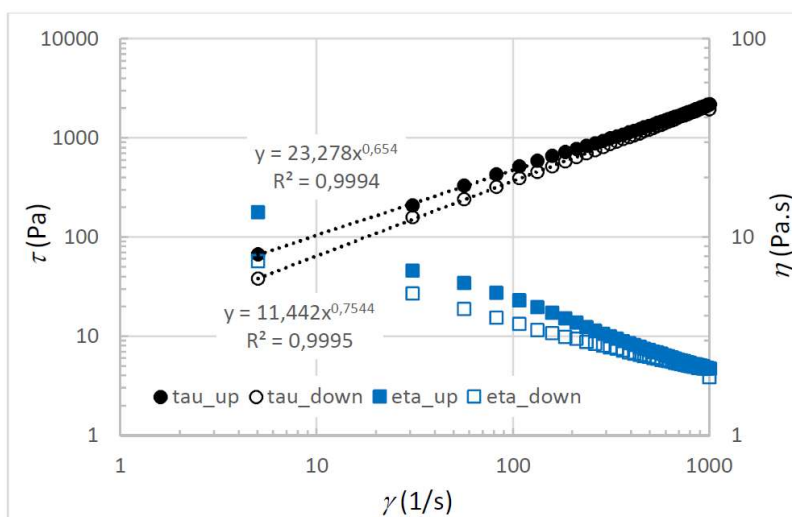
Obrázek 5 Reogram 1 zeleného vosku při teplotě 71,9 °C.



Obrázek 6 Reogram 2 zeleného vosku při teplotě 71,9 °C.

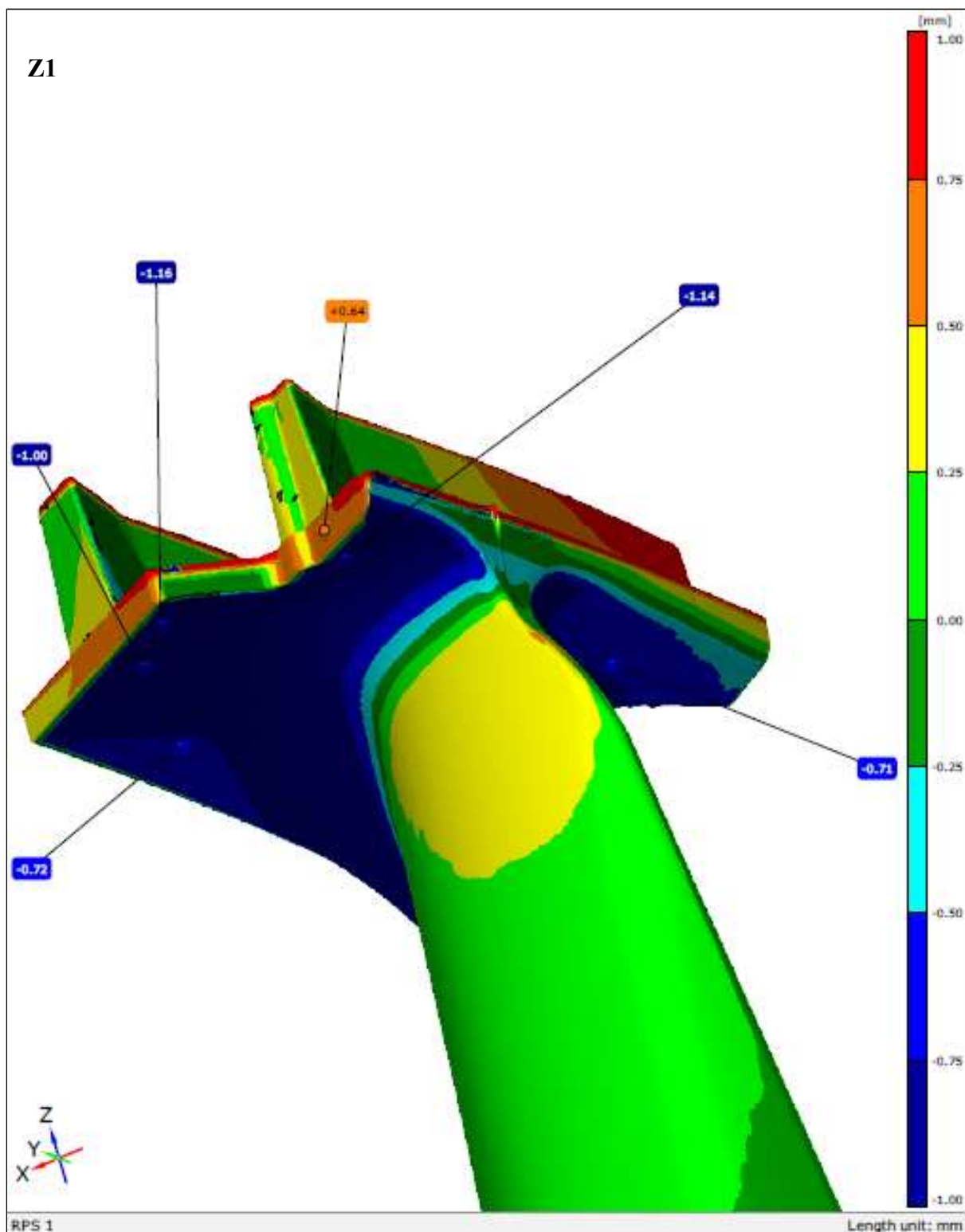


Obrázek 7 Reogram hnědého vosku při teplotě 61,0 °C.

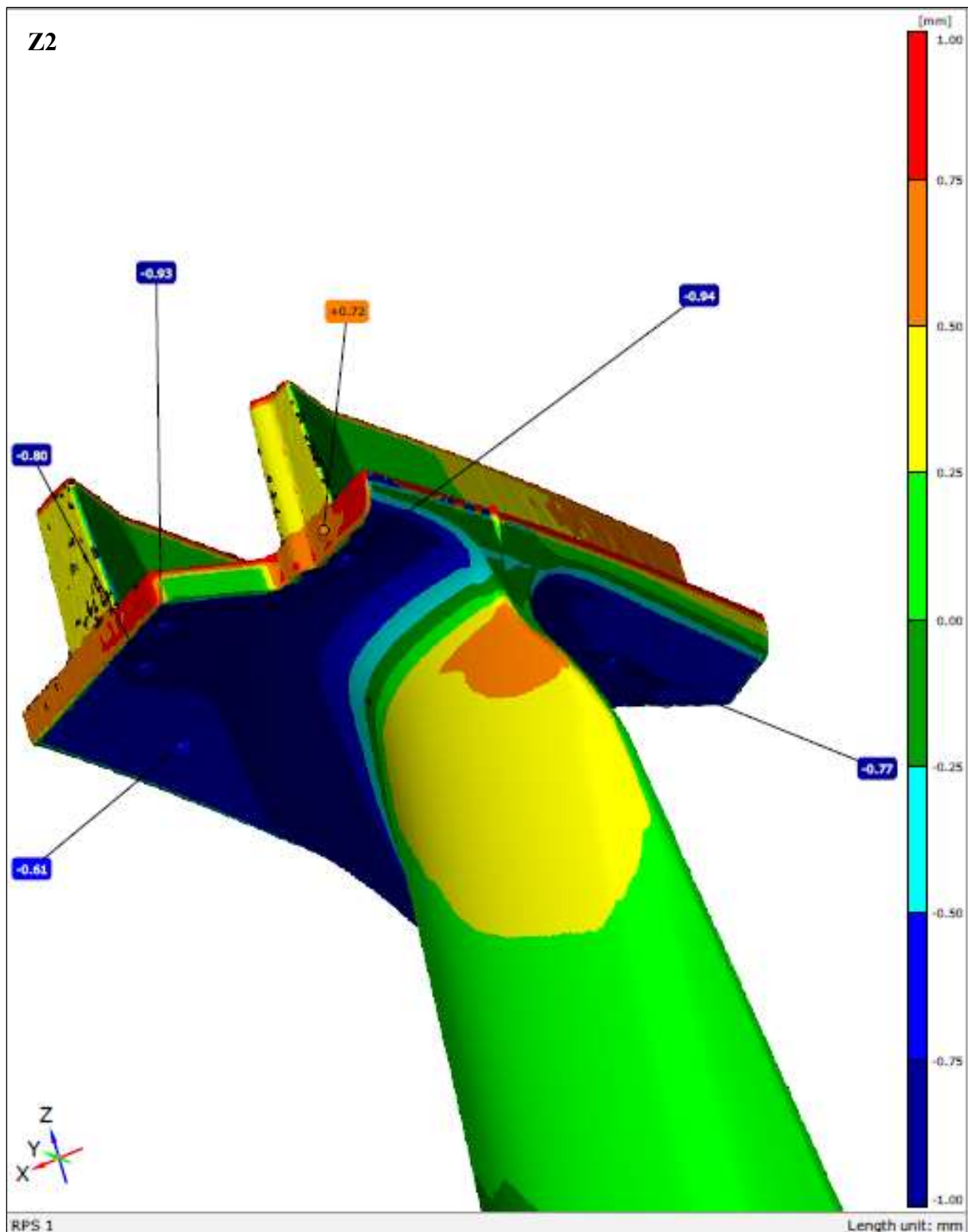


Obrázek 8 Reogram hnědého vosku při teplotě 66,0 °C.

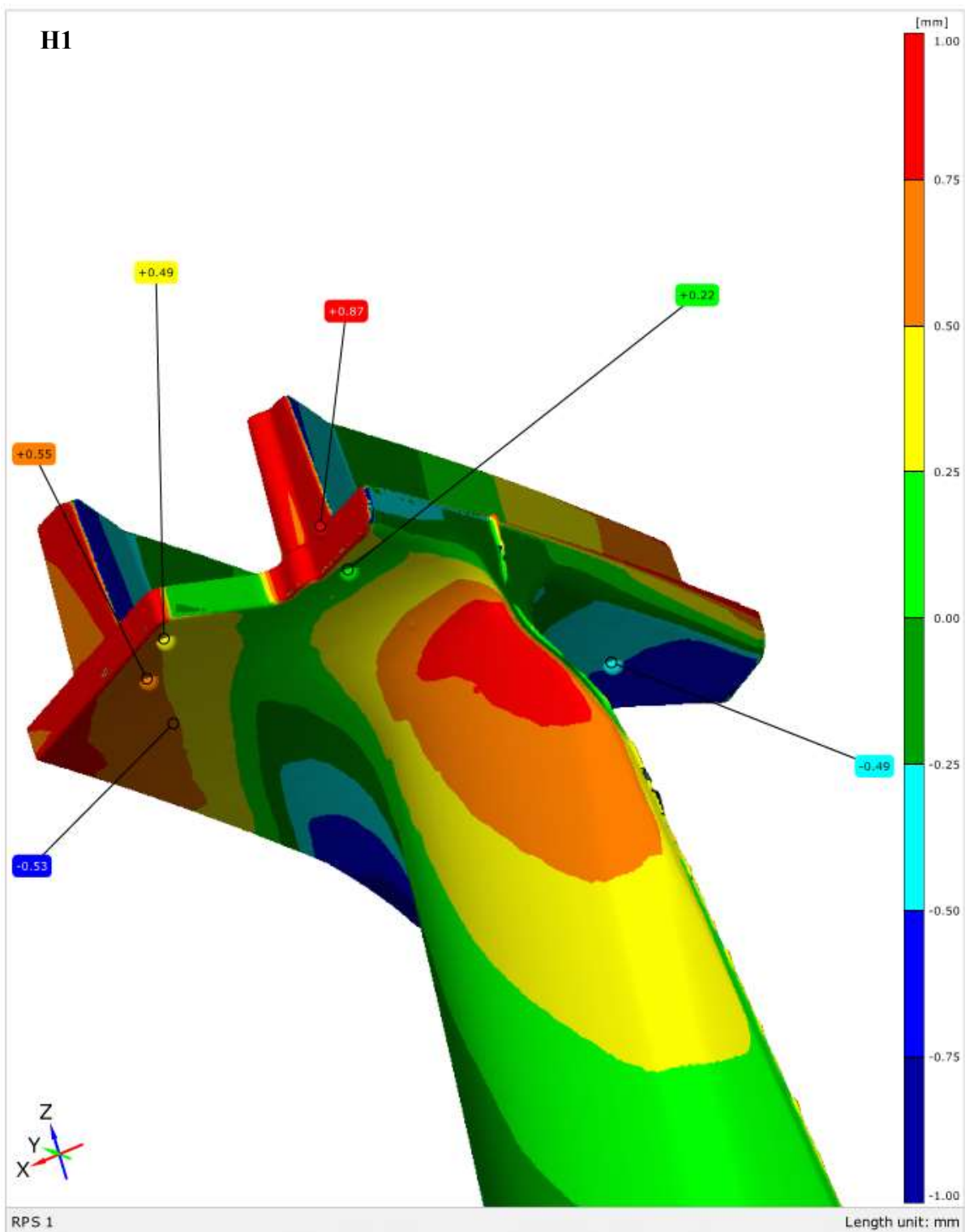
Příloha 3: Barevná mapa rozměrových odchylek ve spodní části bandáže pro všechny lopatky



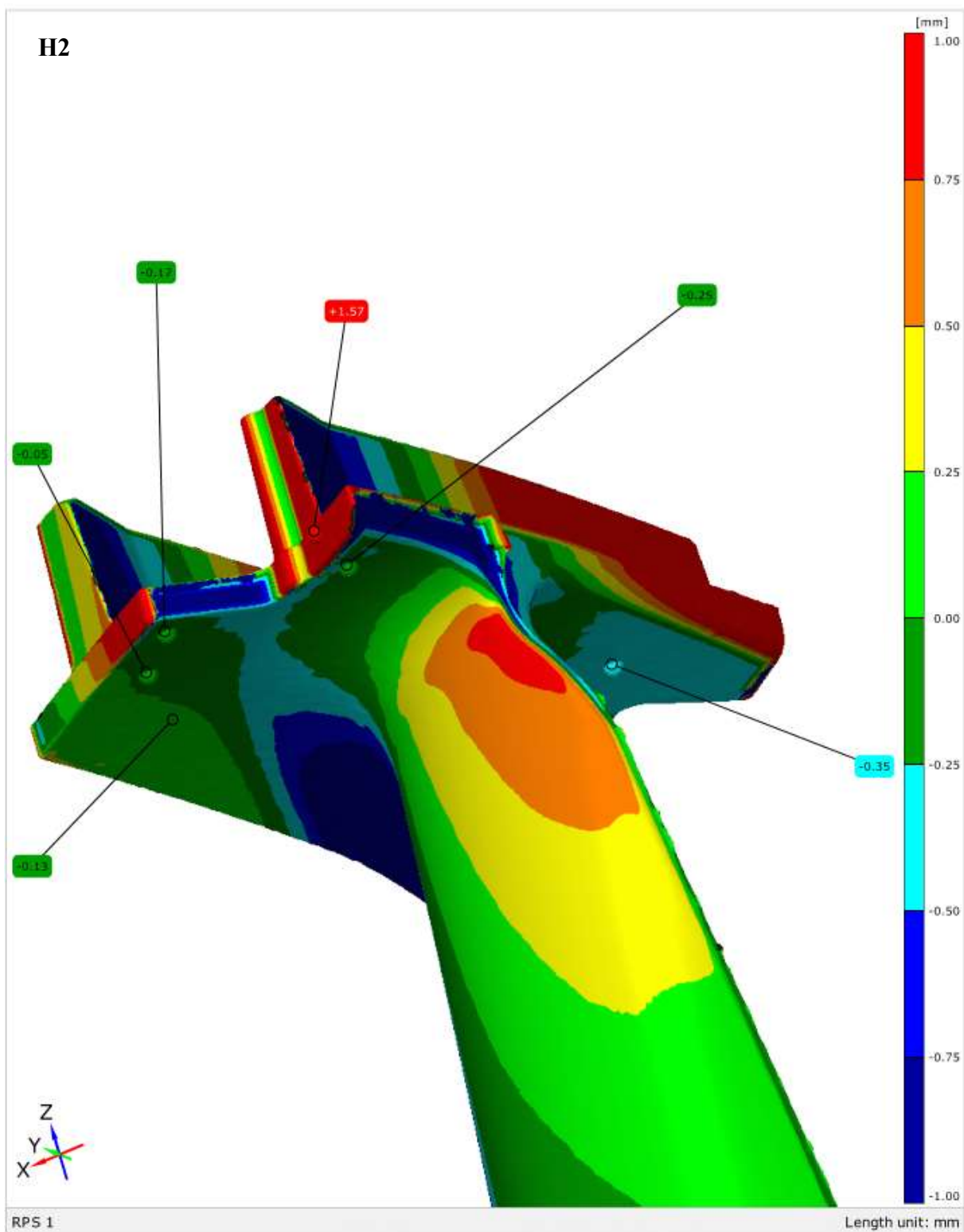
Obrázek 9 Barevná mapa rozměrových odchylek ve spodní části bandáže u modelu Z1



Obrázek 10 Barevná mapa rozměrových odchylek ve spodní části bandáže u modelu Z2

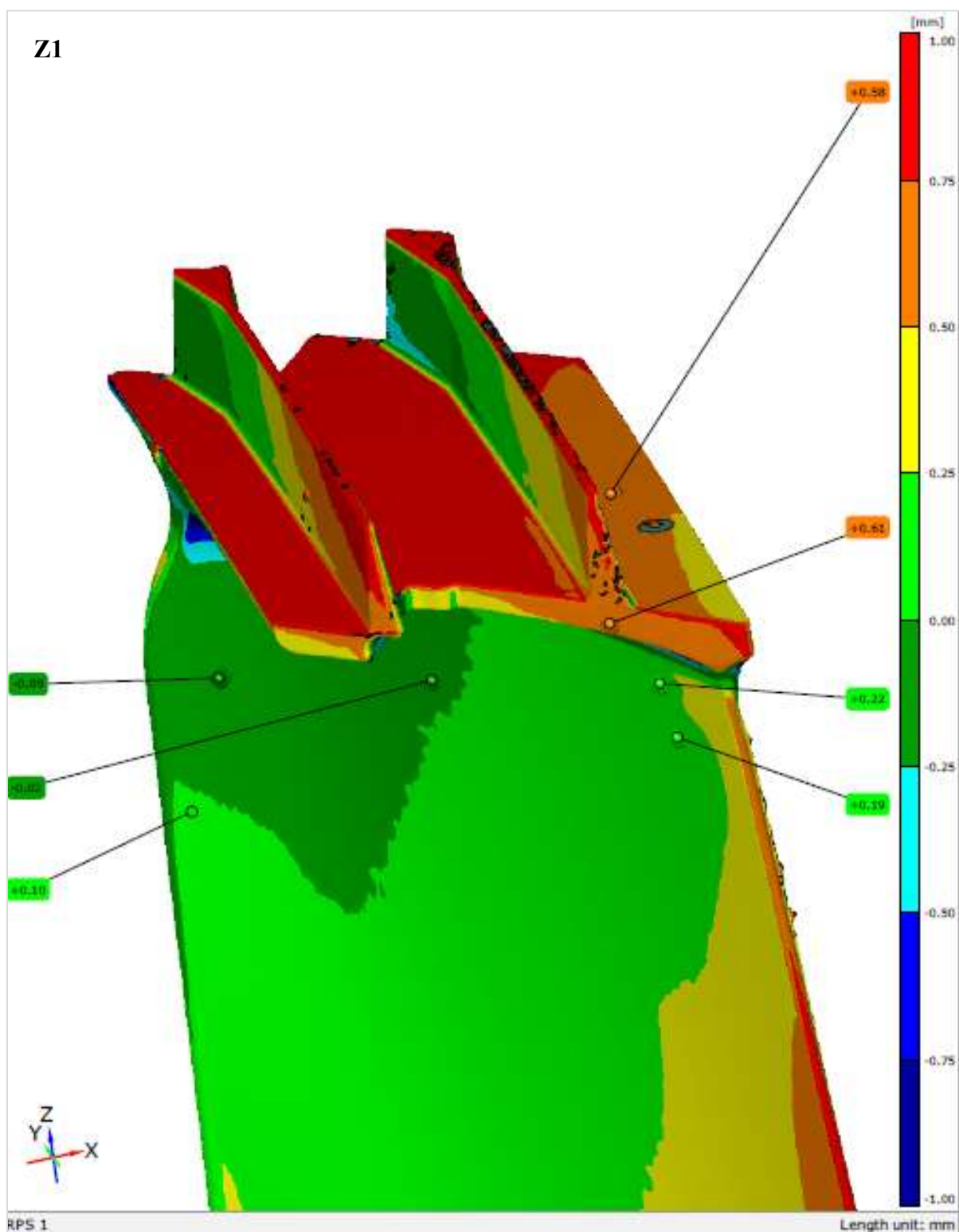


Obrázek 11 Barevná mapa rozměrových odchylek ve spodní části bandáže u modelu H1

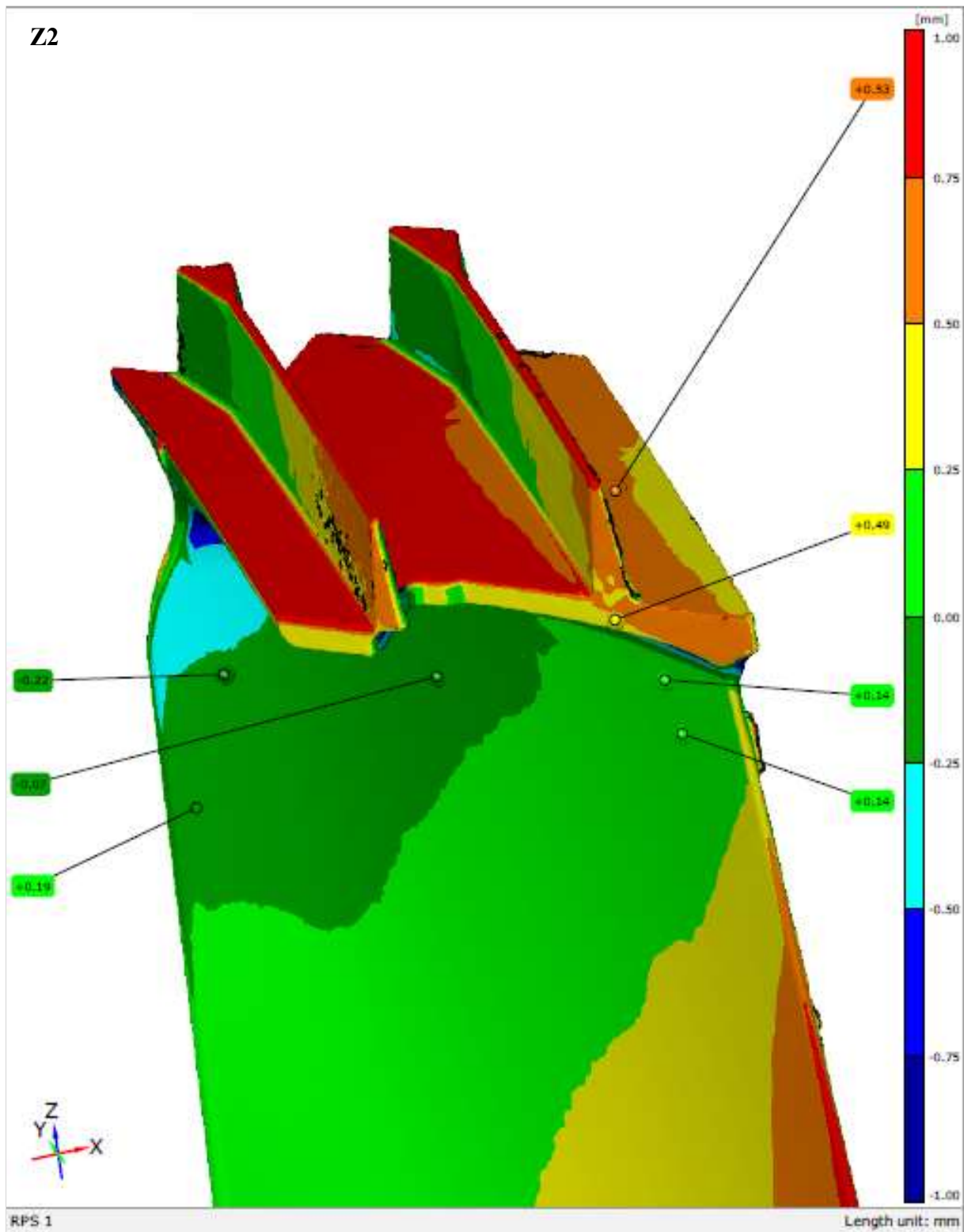


Obrázek 12 Barevná mapa rozměrových odchylek ve spodní části bandáže u modelu H2

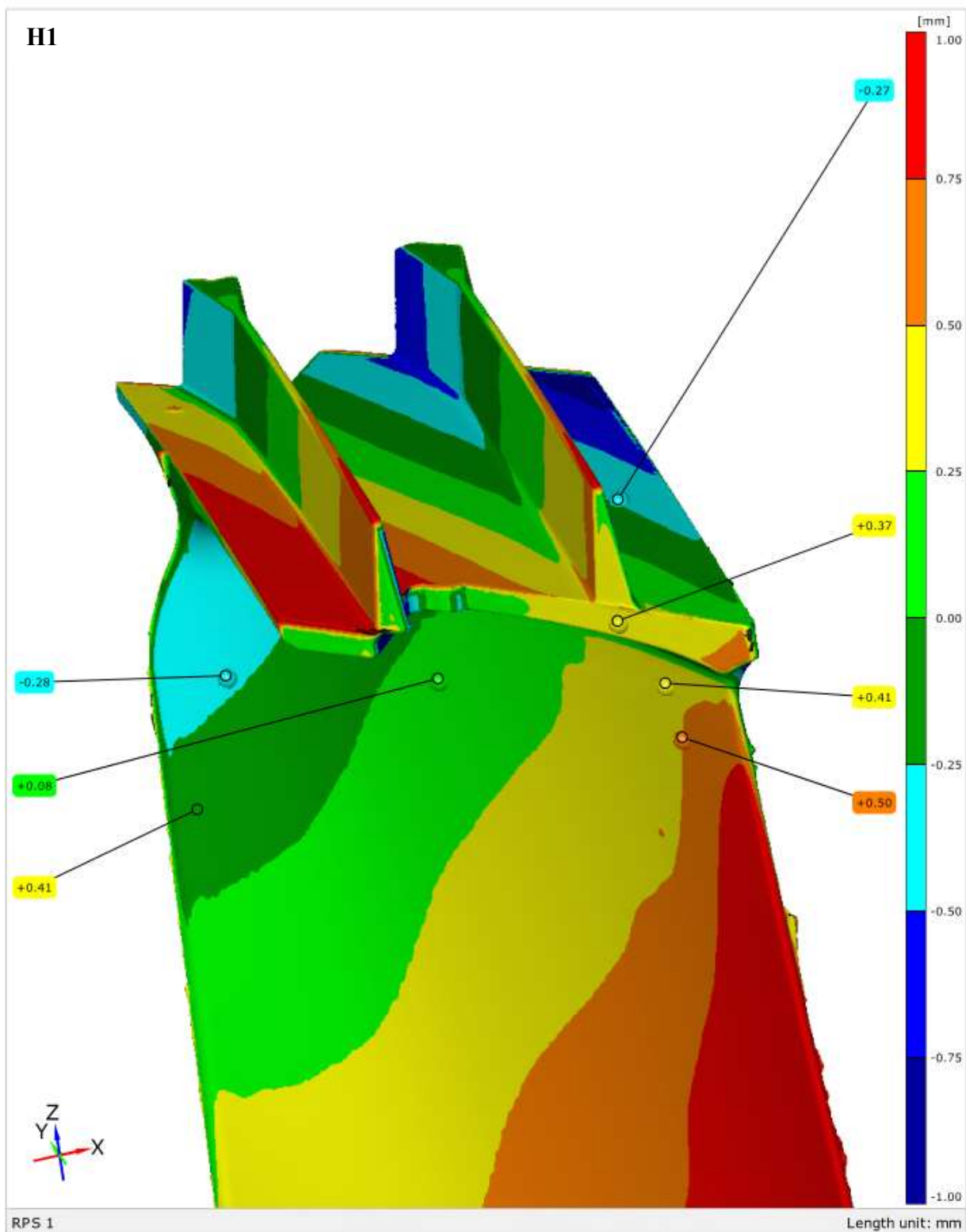
Příloha 4: Detail rozměrových odchylek vnější části bandáže pro všechny lopatky



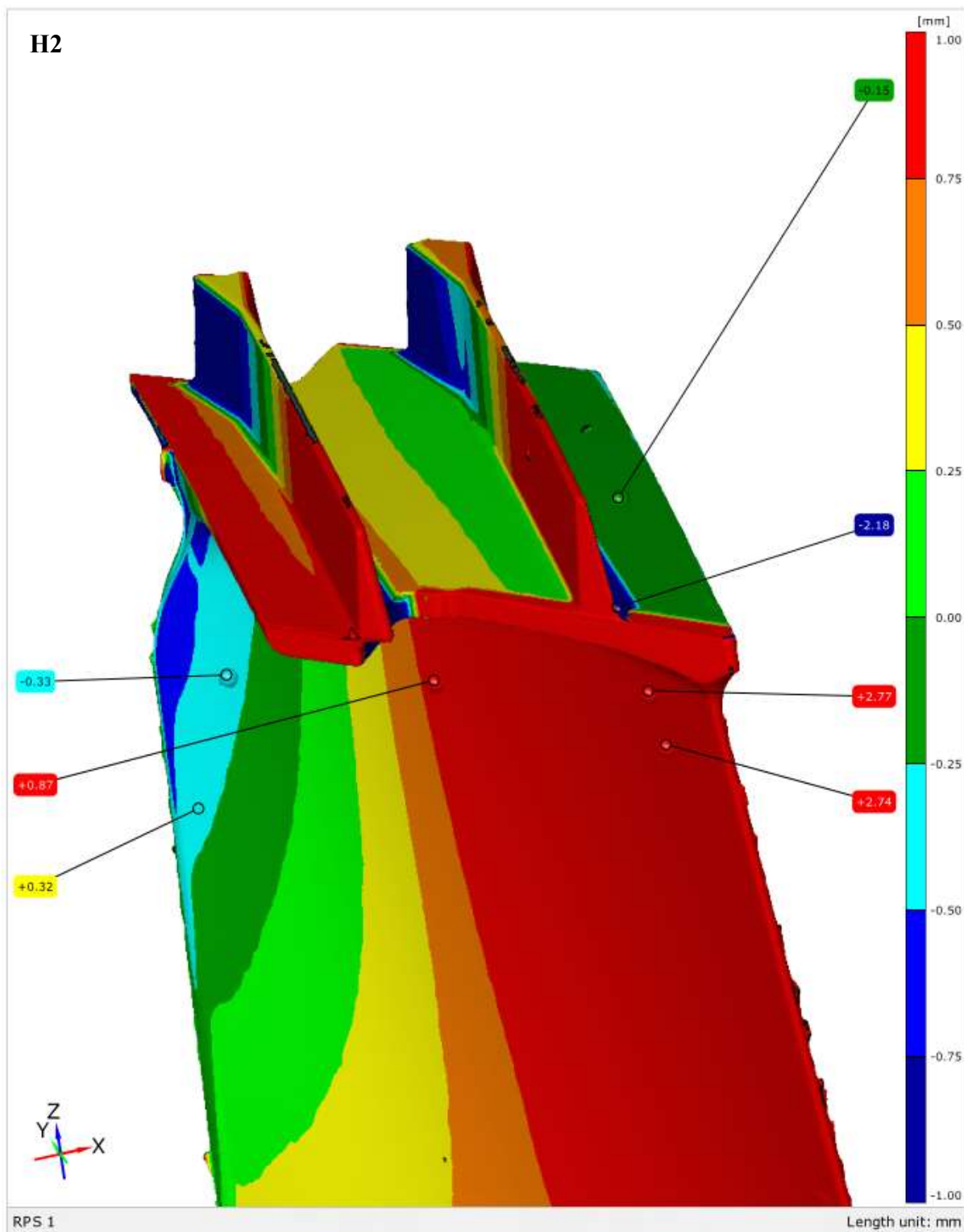
Obrázek 13 Detail rozměrových odchylek vnější části bandáže u modelu Z1



Obrázek 14 Detail rozměrových odchylek vnější části bandáže u modelu Z2

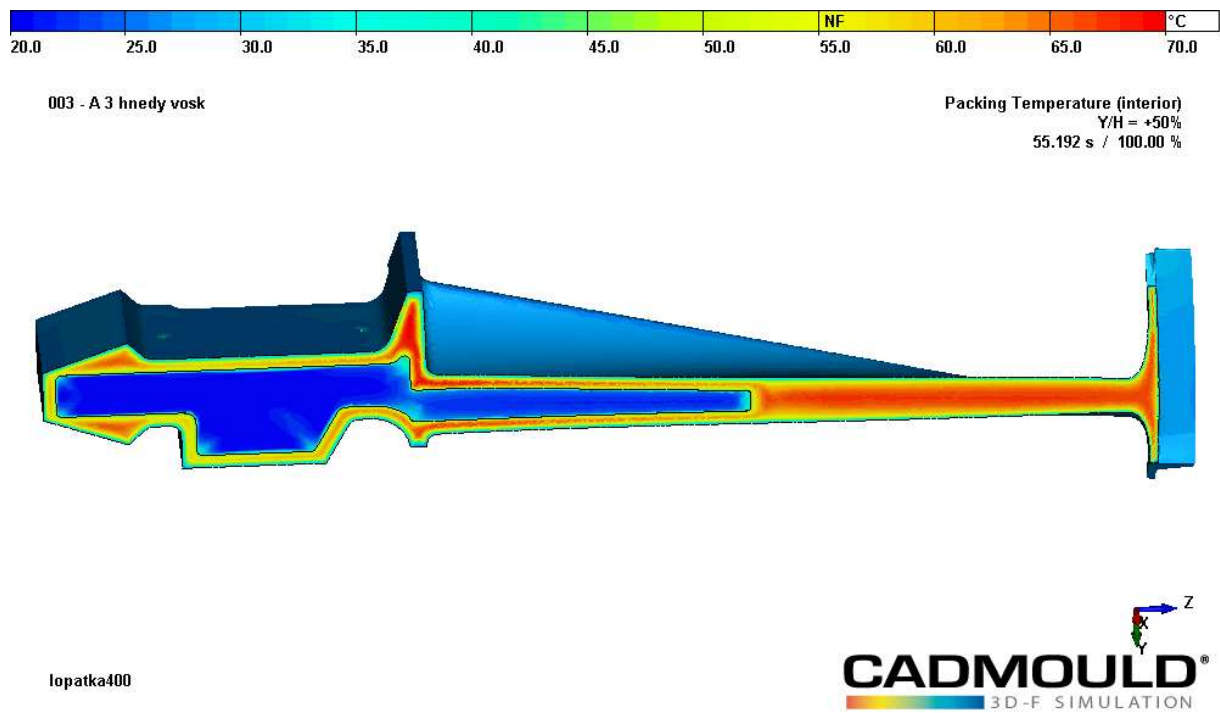


Obrázek 15 Detail rozměrových odchylek vnější části bandáže u modelu H1

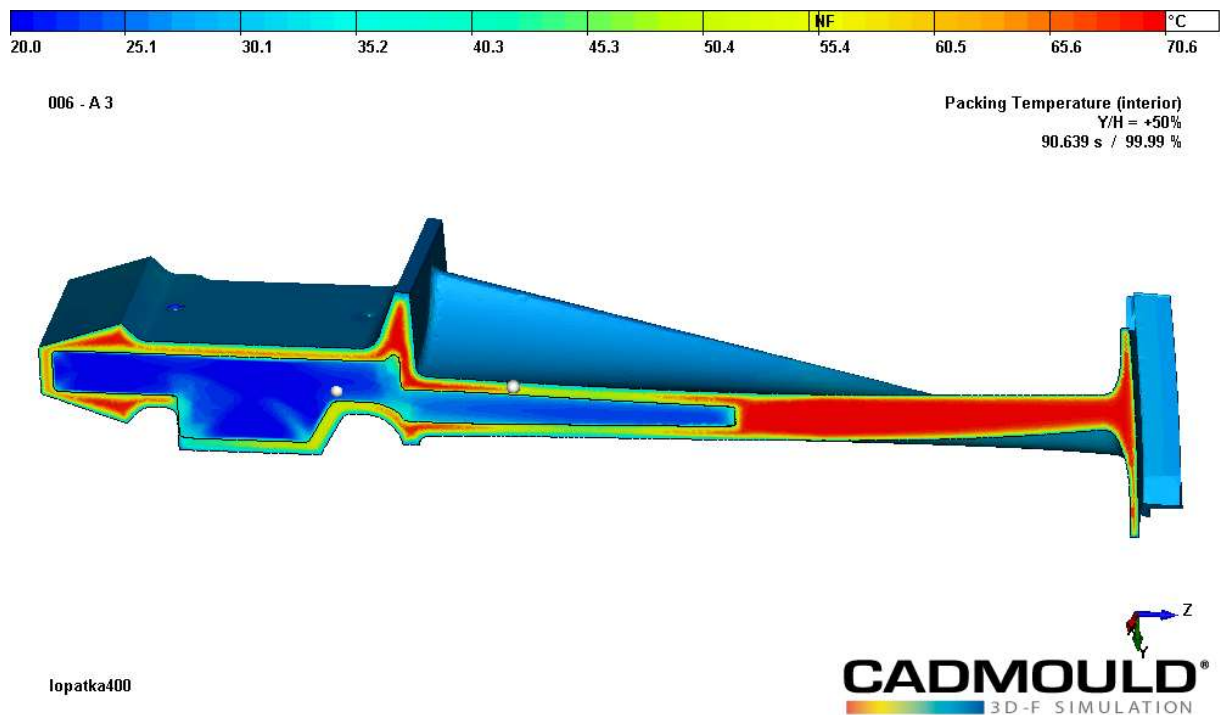


Obrázek 16 Detail rozměrových odchylek vnější části bandáže u modelu H2

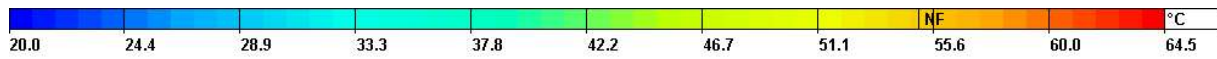
Příloha 5: Teploty vosků v řezu lopatkou



Obrázek 17: Teplota hnědého vosku v řezu lopatkou v 55 s doby cyklu

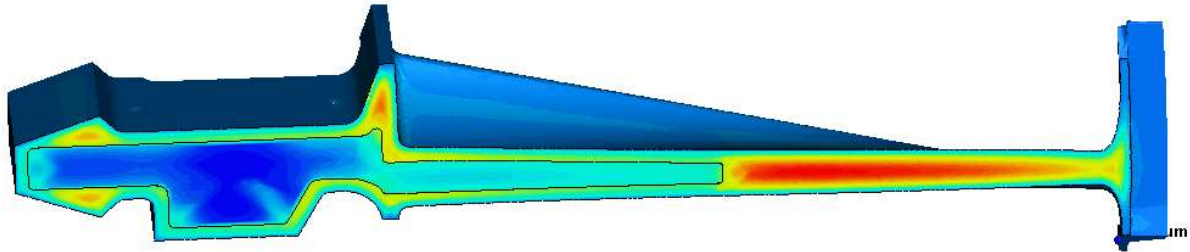


Obrázek 18: Teplota zeleného vosku v řezu lopatkou v 90 s doby cyklu



003 - A 3 hnědy vosk

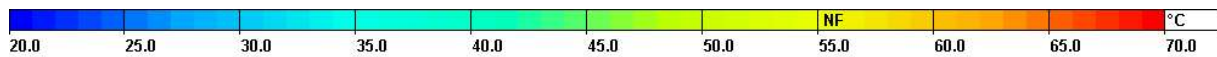
Packing Temperature (interior)
Y/H = +50%
120.121 s / 100.00 %



lopatka400

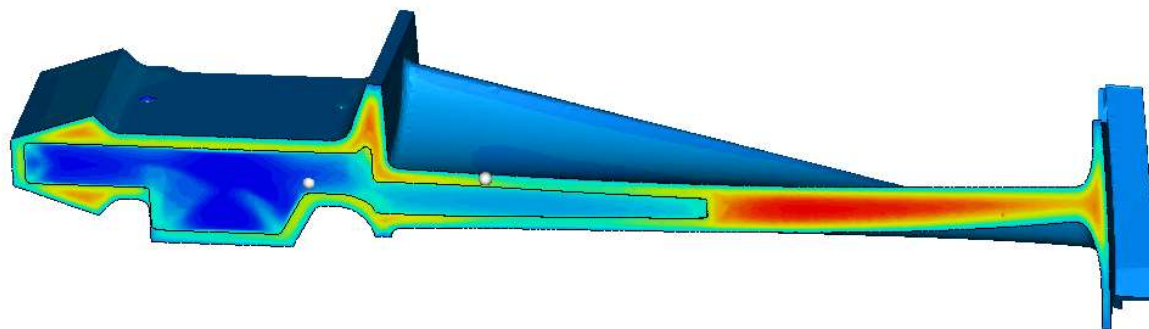


Obrázek 19: Teplota hnědého vosku v řezu lopatkou v 120s doby cyklu



006 - A 3

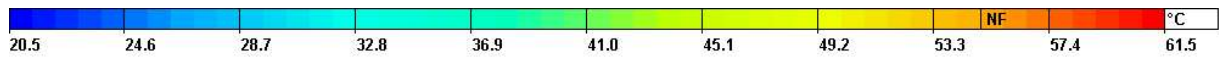
Packing Temperature (interior)
Y/H = +50%
121.188 s / 99.99 %



lopatka400

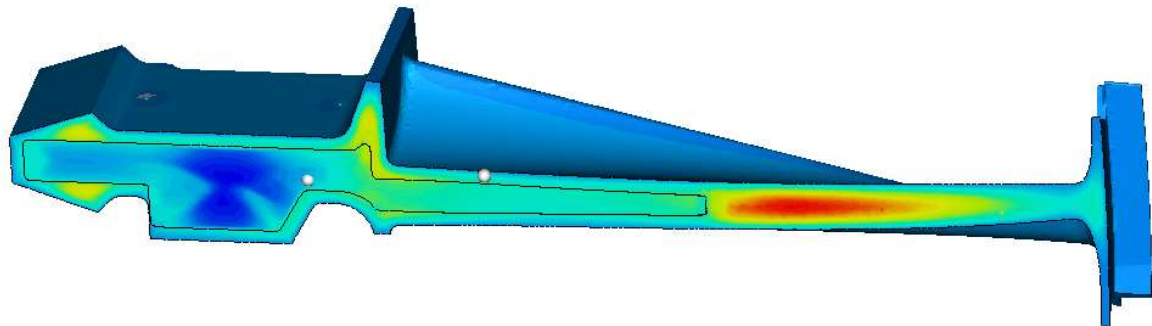


Obrázek 20: Teplota zeleného vosku v řezu lopatkou v 121s doby cyklu



006 - A 3

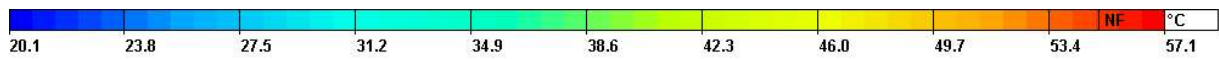
Packing Temperature (interior)
Y/H = +50%
215.849 s / 99.99 %



lopatka400

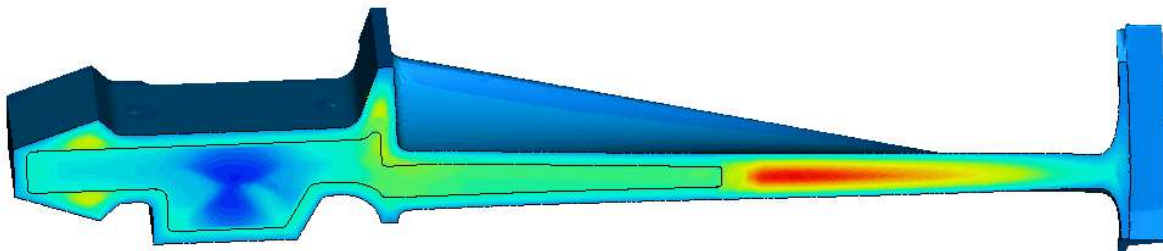


Obrázek 21: Teplota zeleného vosku v řezu lopatkou v 216s doby cyklu



003 - A 3 hnědý vosk

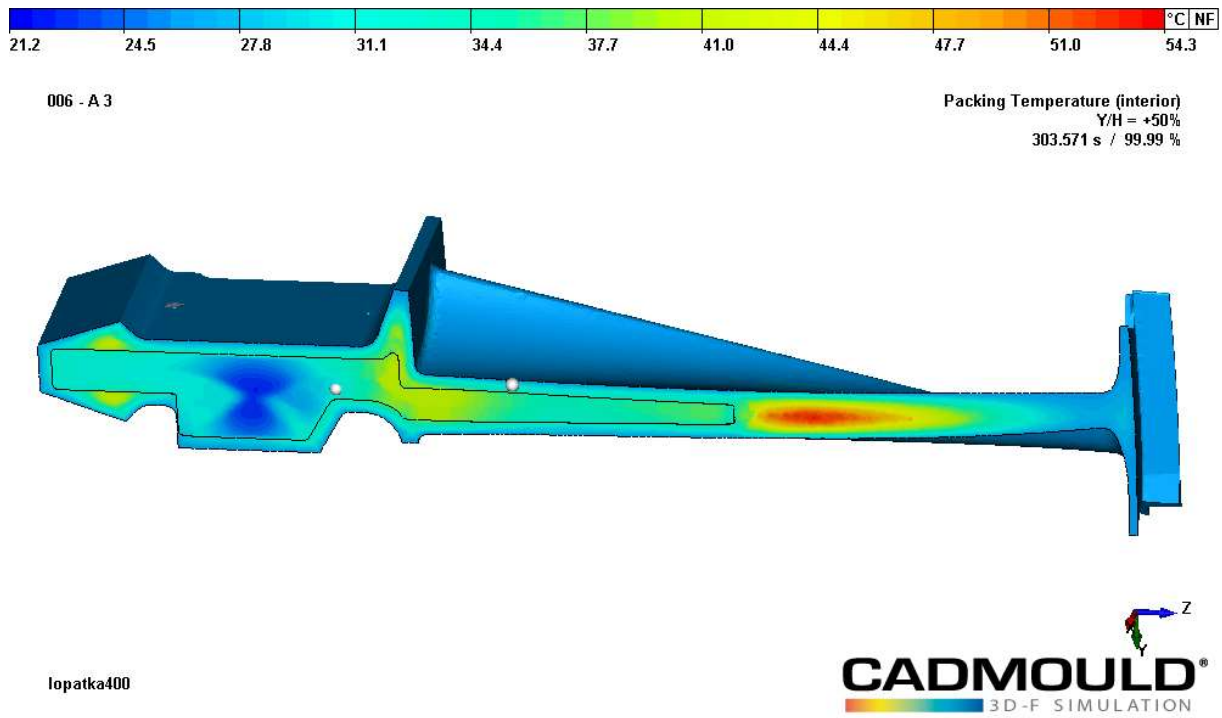
Packing Temperature (interior)
Y/H = +50%
240.091 s / 100.00 %



lopatka400

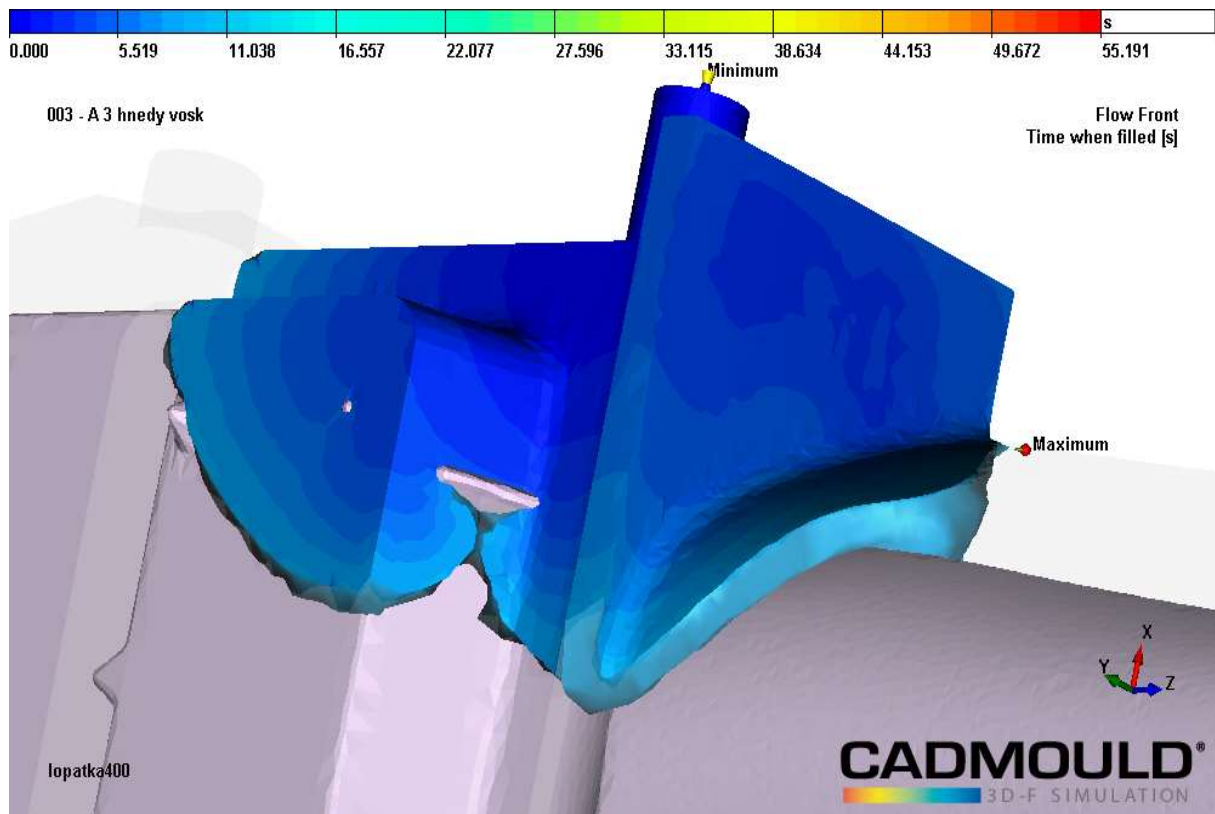


Obrázek 22: Teplota hnědého vosku v řezu lopatkou v 240s doby cyklu

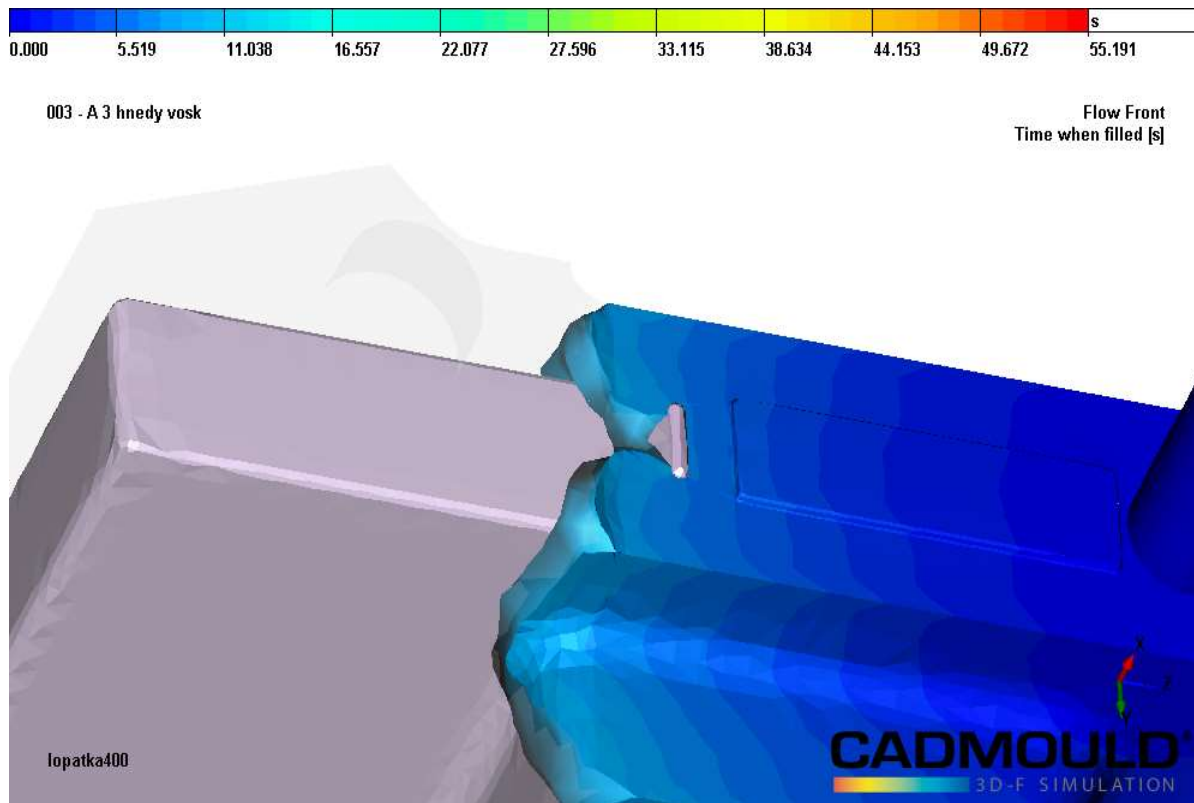


Obrázek 23: Teplota zeleného vosku v řezu lopatkou v 303,5s doby cyklu

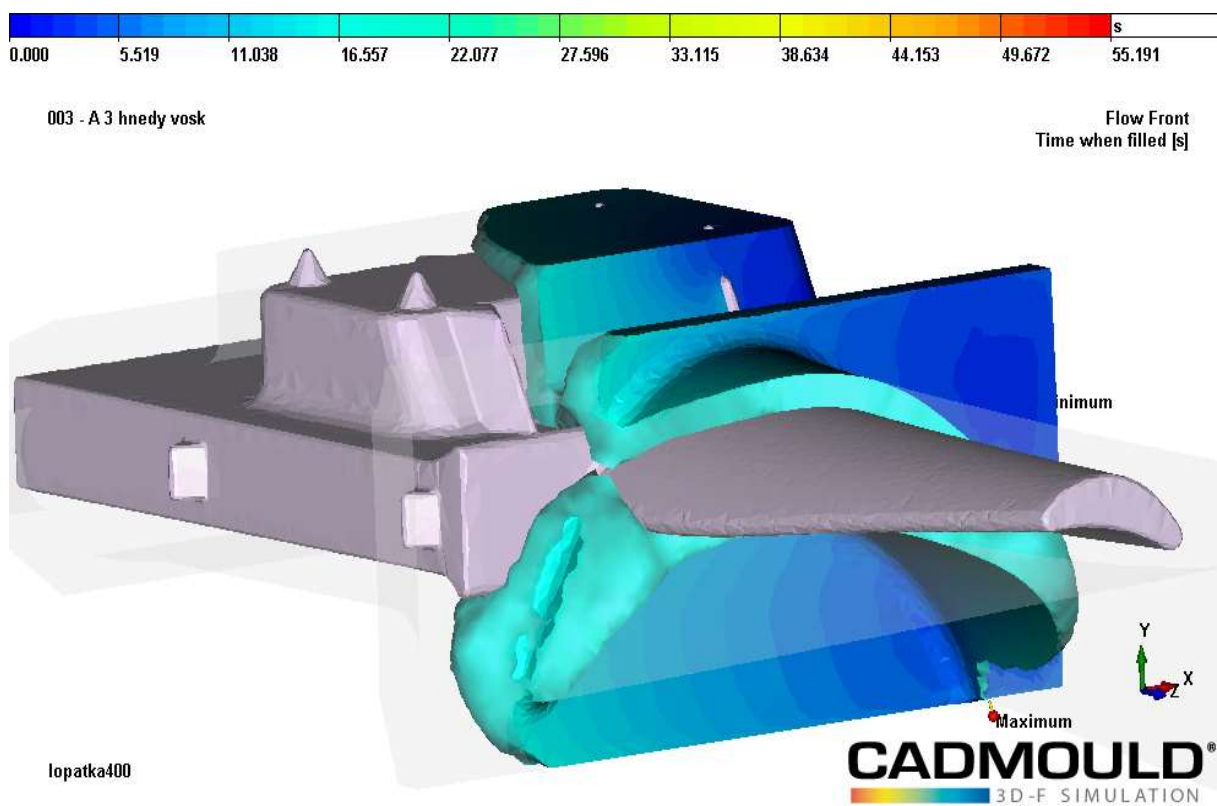
Příloha 6: Detaily proudění vosku



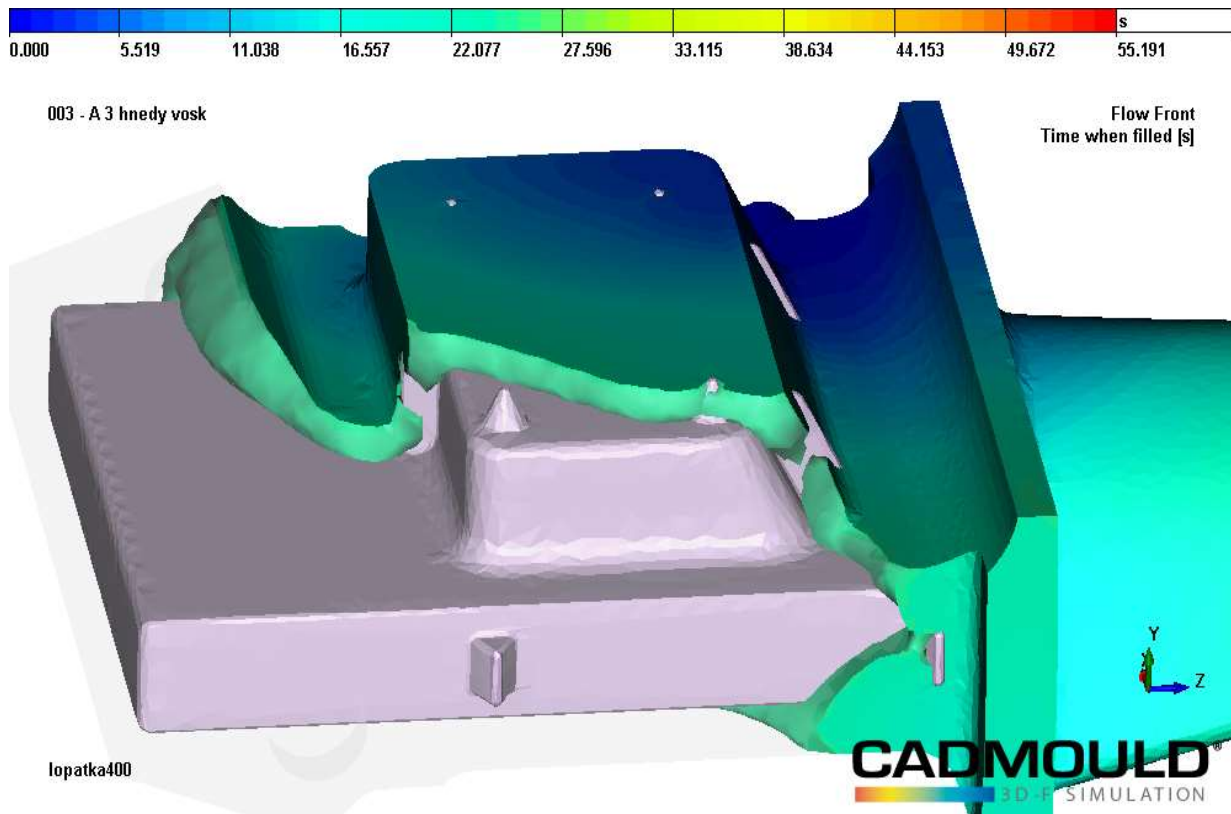
Obrázek 24 Detail proudění na vstupu do formy



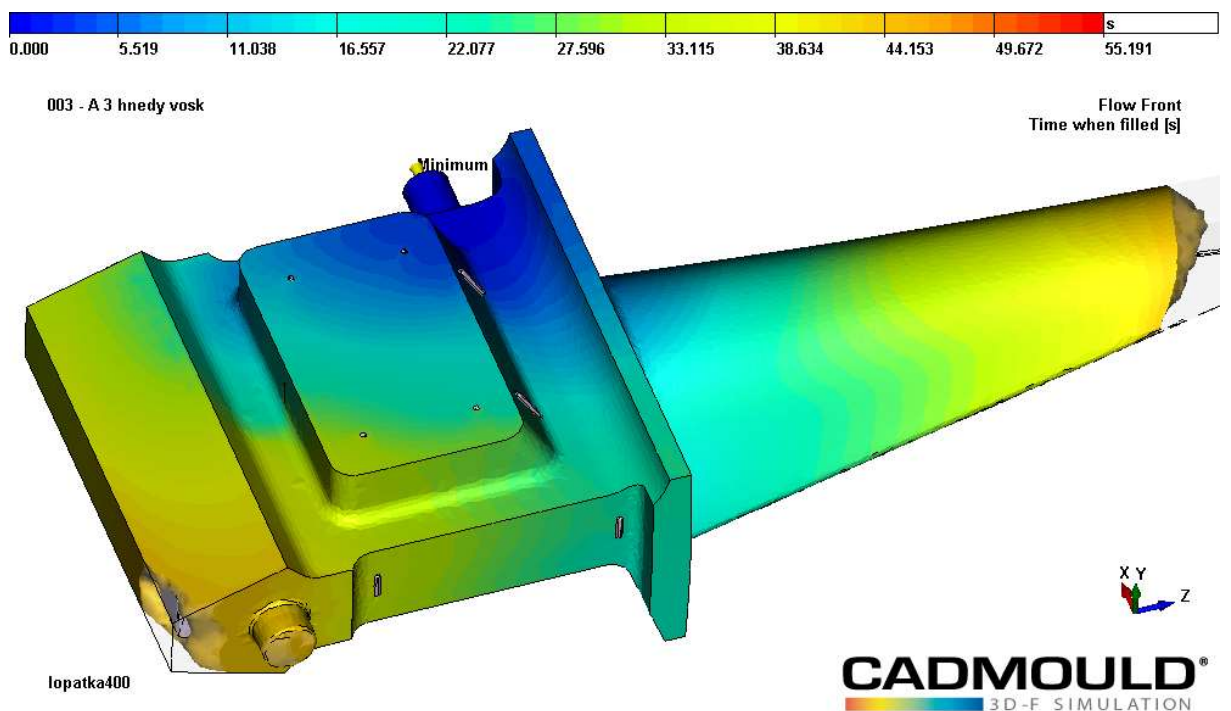
Obrázek 25 Detail proudění na zámku



Obrázek 26 Detail proudění v části listu – hnědý vosk

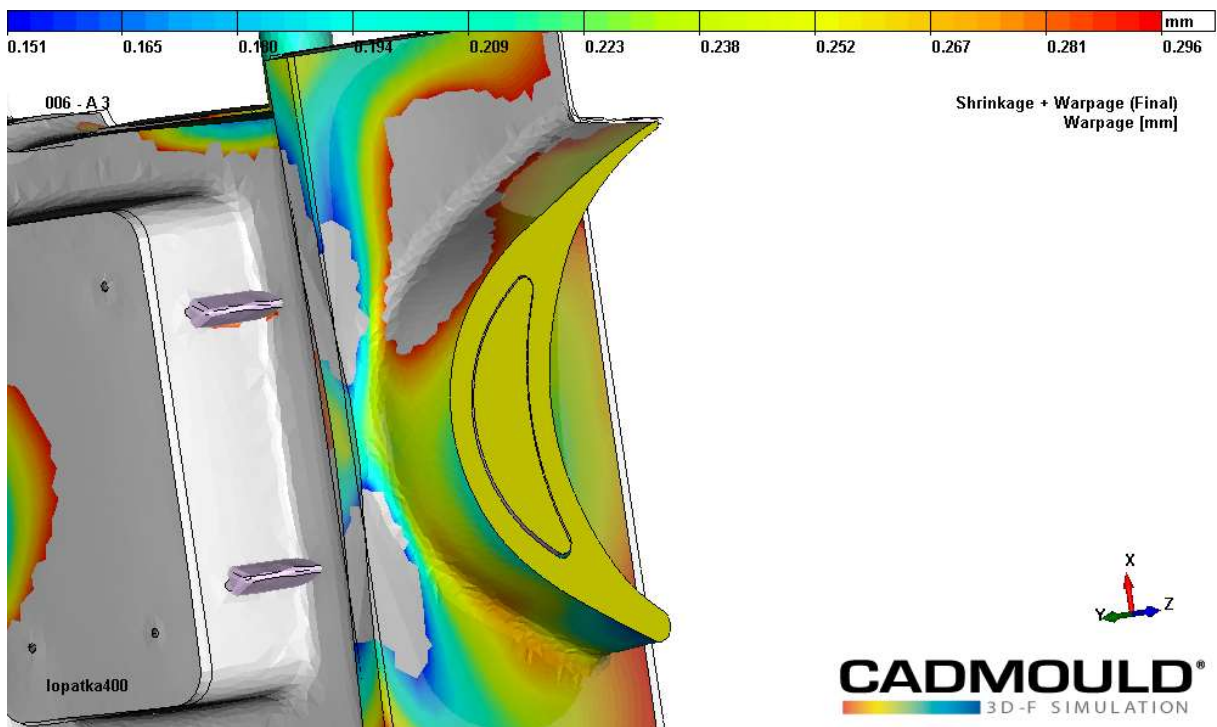


Obrázek 27 Detail proudění v zámkové části – hnědý vosk

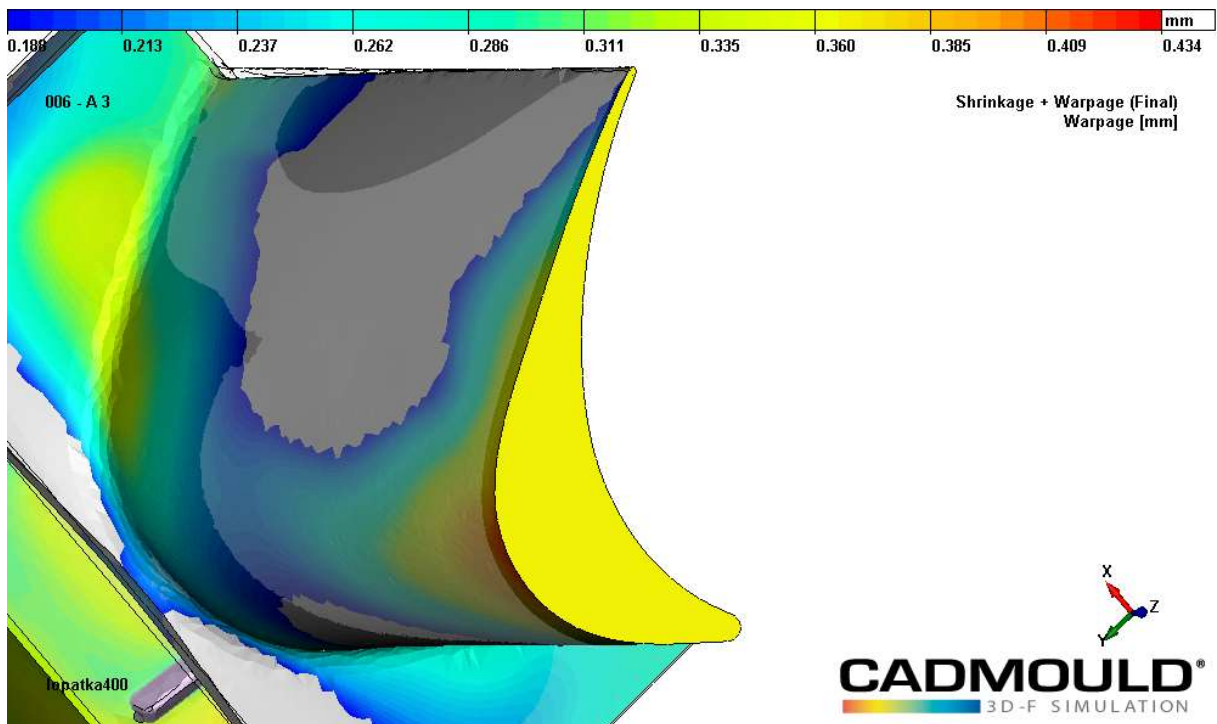


Obrázek 28 Detail proudění – hnědý vosk

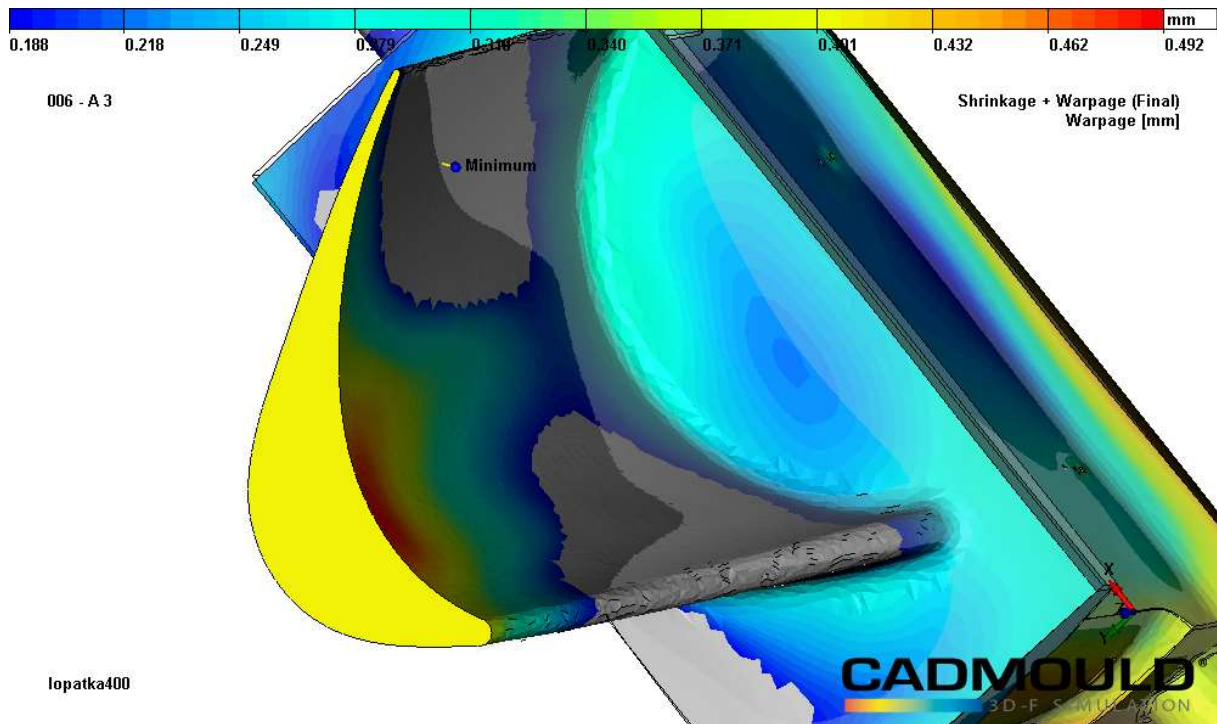
Příloha 7: Detaily řezů lopatkou – zelený vosk



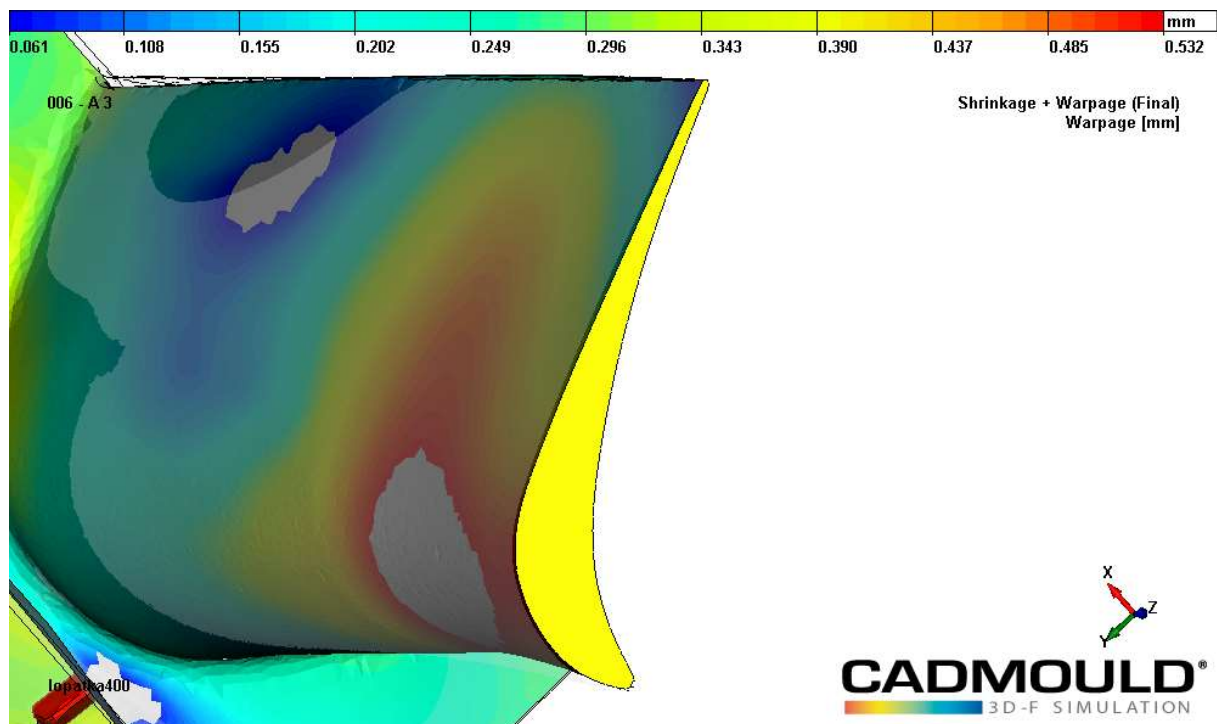
Obrázek 29 Řez 3: $z = +720$ mm, zelený vosk



Obrázek 30 Řez 3: $z = +810$ mm, zelený vosk – strana A

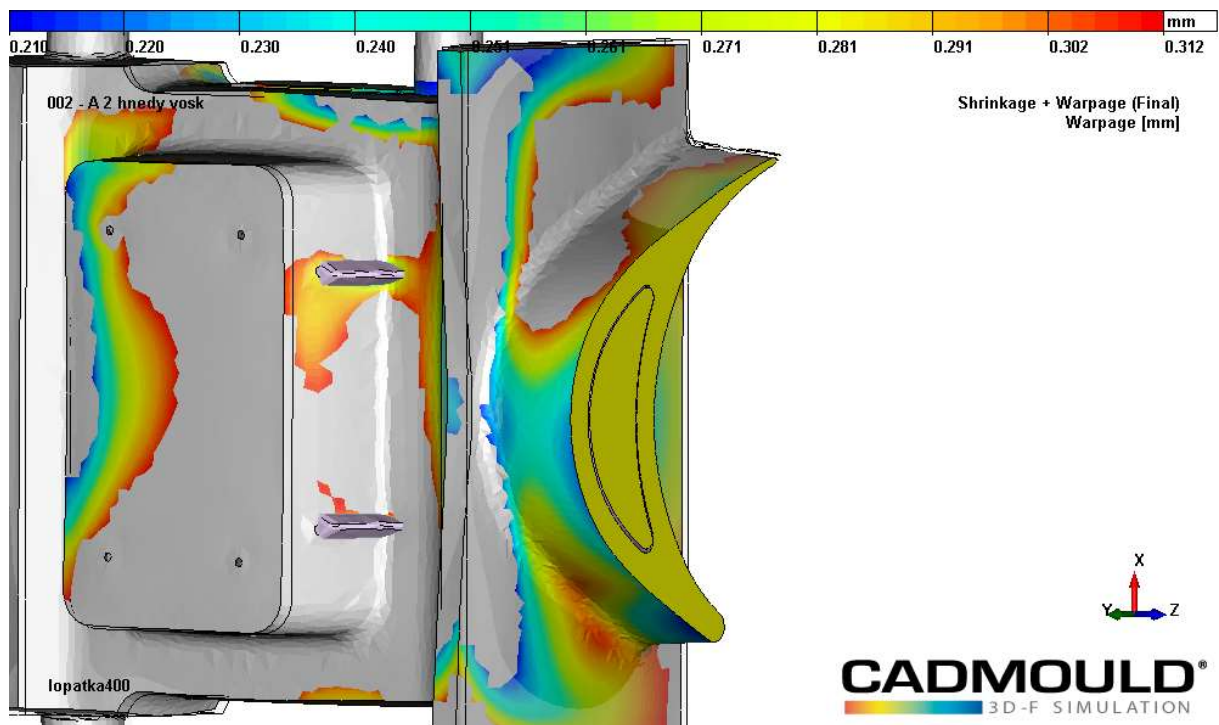


Obrázek 31 Řez 3: $z = +810$ mm, zelený vosk – strana B

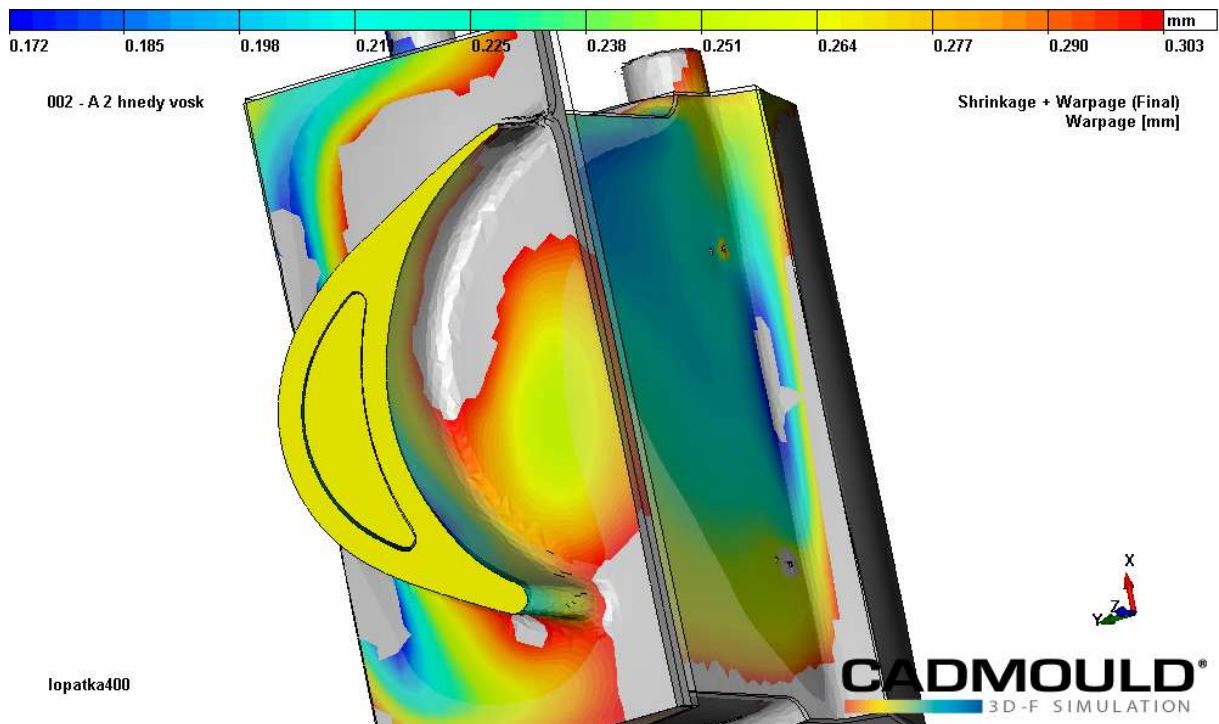


Obrázek 32 Řez 3: $z = +900$ mm, zelený vosk – strana A

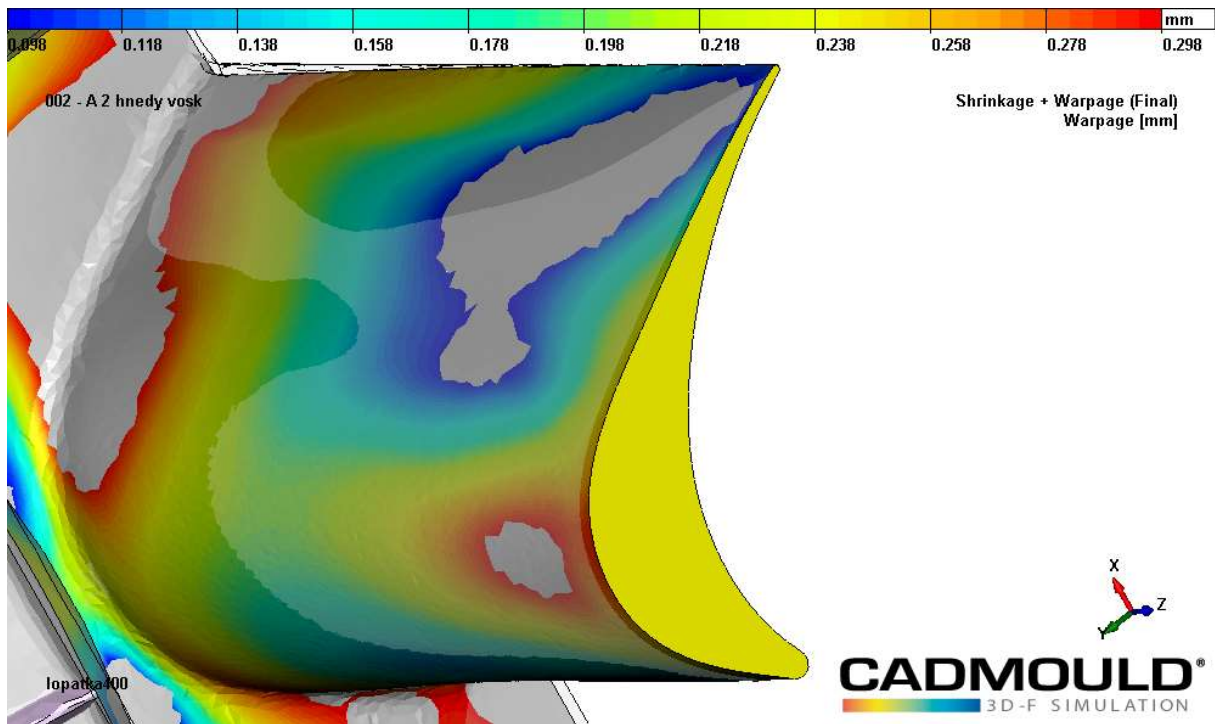
Příloha 8: Detaily řezů lopatkou – hnědý vosk



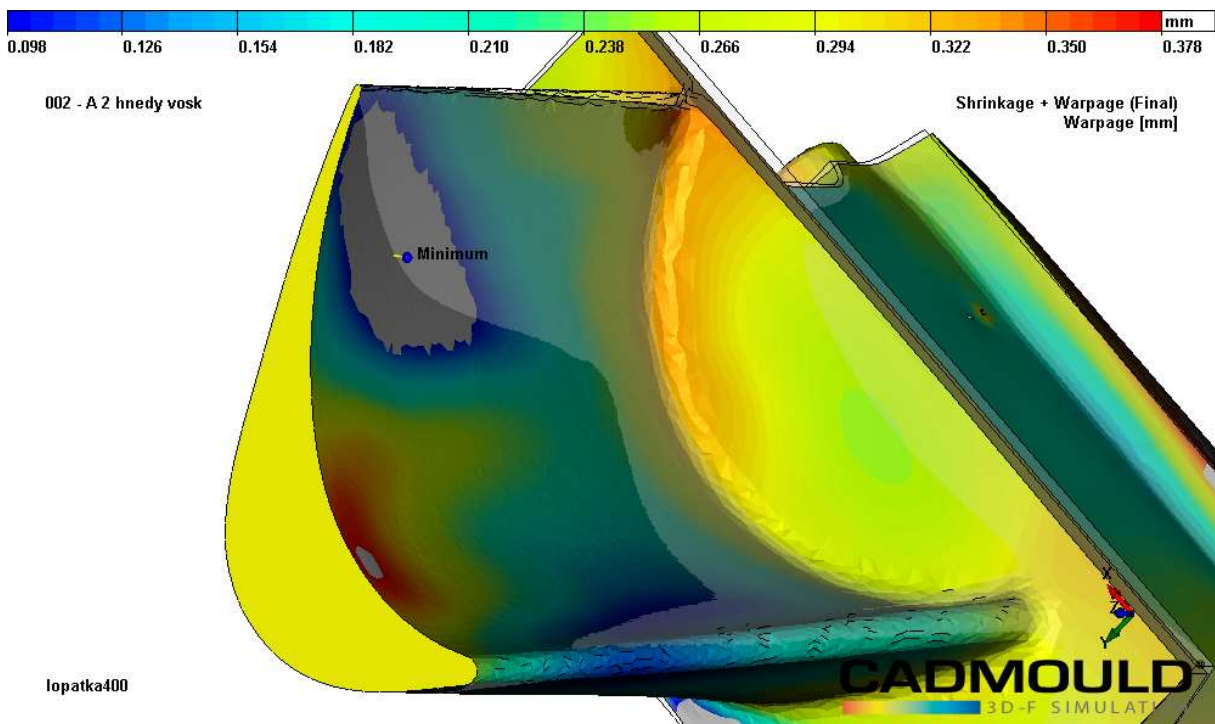
Obrázek 33 Řez 3: $z = +720$ mm, hnědý vosk – strana A



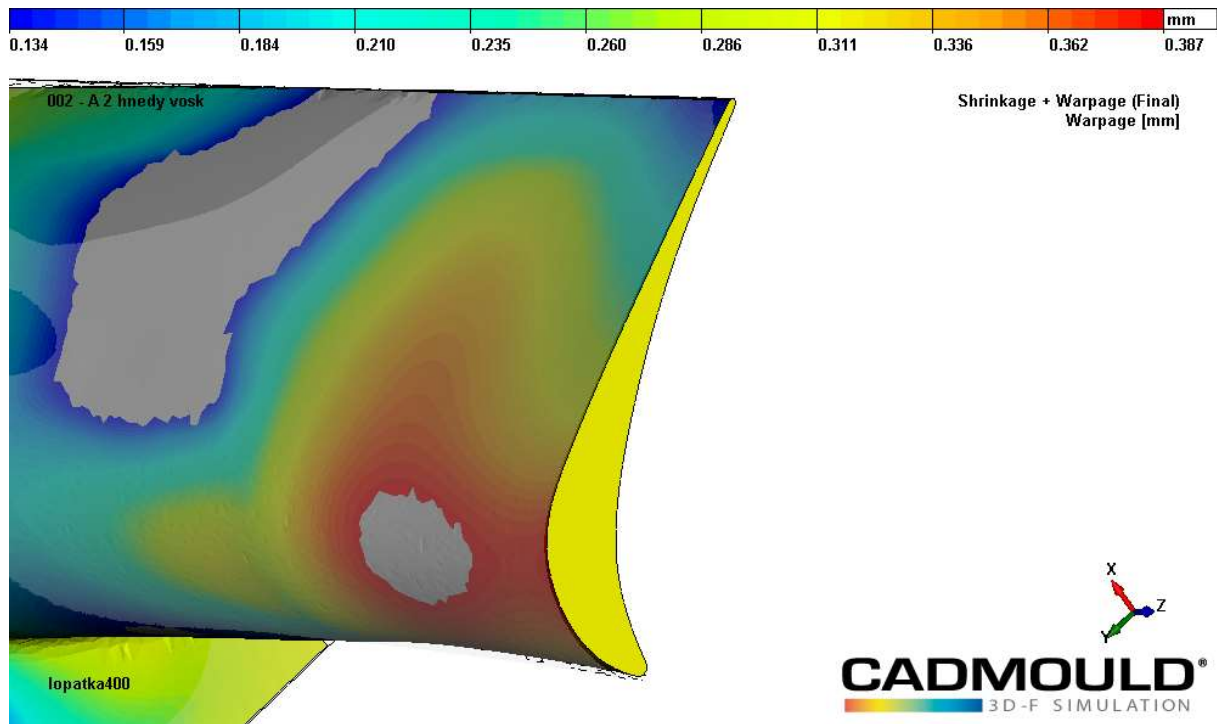
Obrázek 34 Řez 3: $z = +720$ mm, hnědý vosk – strana B



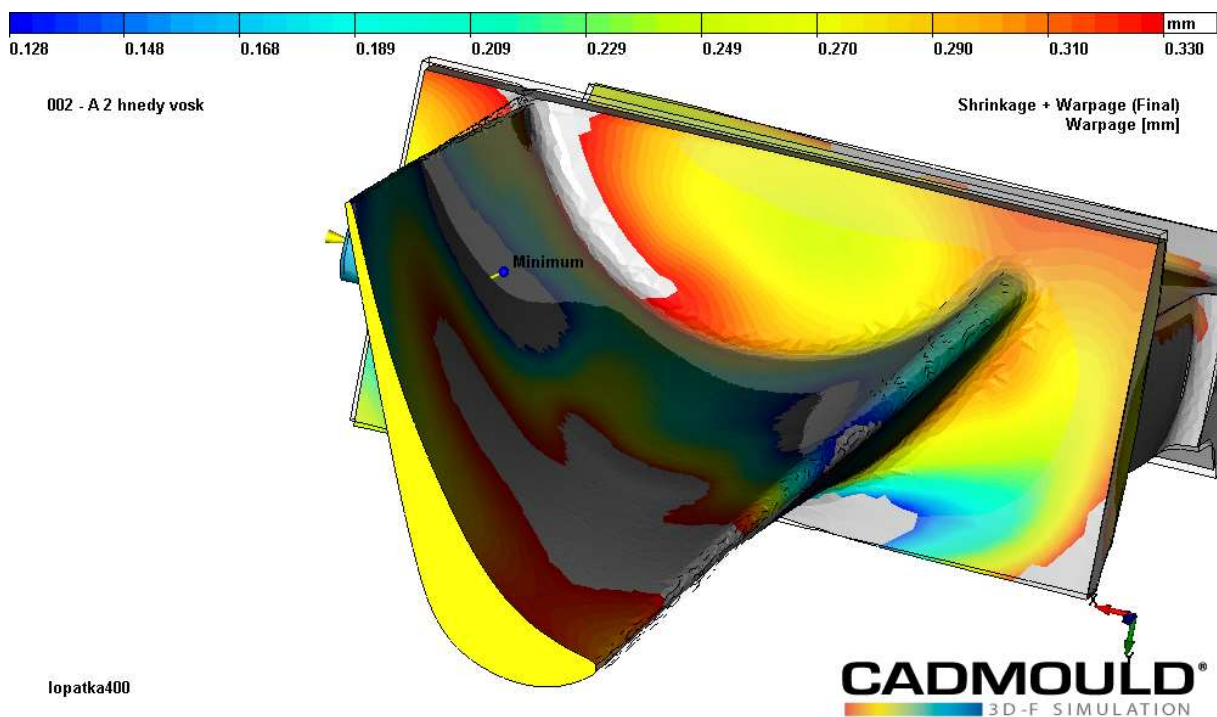
Obrázek 35 Řez 3: $z = +810$ mm, hnědý vosk – strana A



Obrázek 36 Řez 3: $z = +810$ mm, hnědý vosk – strana B



Obrázek 37 Řez 3: $z = +900$ mm, hnědý vosk – strana A



Obrázek 38 Řez 3: $z = +900$ mm, hnědý vosk – strana B