ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2018

JAN FLEK

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Flek** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **457689**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**

Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Simulace vstřikovaných dílů

Název bakalářské práce anglicky:

Simulation of plastic injection parts

Pokyny pro vypracování:

1. Popis viskoelastického modelu chování polymerních materiálů
2. Možnosti simulace vstřikování
3.Simulace dílu

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Aleš Herman, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **23.04.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **10.08.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **10.08.2018**

Ing. Aleš Herman, Ph.D.	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.	prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) práce	podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

2.5. 2018	Flek
Datum převzetí zadání	Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Simulace vstřikovaných dílů** zpracoval samostatně, za použití uvedené literatury a pramenů.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne . . . . . .

. . . . . .

Jan Flek

Poděkování

Děkuji panu **doc. Ing. Aleši HERMANOVI, Ph.D.** za jeho odborné vedení a užitečné rady při zpracování bakalářské práce.

Anotace

V rámci této bakalářské práce byla formou rešerše zpracována problematika numerické simulace vstřikování polymerních dílů. V úvodu práce je nastíněna základní teorie reologie materiálů, ze které následně vycházejí simulační softwary, které jsou popsány v následujících pasážích této práce. Dále je zde popsán proces reálné práce s voskovým modelem lopatky a jeho porovnání se simulací v softwaru CADMOULD od společnosti Simcon.

Klíčová slova:

Viskoelasticita, reologické modely, simulační softwary, vstřikování vosků

Summary

This bachelor thesis describes simulation of injection of polymeric parts. At the beginning is described the basic theory of rheology of materials from which comes simulation programs which are described in following parts of this thesis. As another point the process of real work with wax polymer model of the blade and its comparison with simulation in CADMOULD software is described.

Key words:

Viscoelasticity, rheological models, simulation programs, injection of wax

Obsah

1. Úvod a cíl práce ... 2
2. Popis viskoelastického modelu chování polymerních materiálů ... 3
   2.1 Úvod ... 3
   2.2 Definice creepu a napěťové relaxace ... 4
      2.2.1 Creep ... 4
      2.2.2 Relaxace ... 5
   2.3 Tvarová paměť ... 6
   2.4 Dynamické vlastnosti ... 7
   2.5 Modelové interpretace ... 7
      2.5.1 Základní mechanické modely ... 7
      2.5.2 Kelvin – Voigtova konfigurace ... 9
      2.5.3 Maxwellova konfigurace ... 10
      2.5.4 Komplikované mechanické modely – diferenciální reologické vlastnosti ... 11
      2.5.5 Nemechanické modely ... 12
3. Možnosti simulace vstřikování ... 14
   3.1 AUTODESK Moldflow ... 15
      3.1.1 Reálné použití programu ... 16
   3.2 CADMOULD ... 17
      3.2.1 Reálné použití programu ... 17
   3.3 MOLDEX 3D ... 19
      3.3.1 Reálné použití programu ... 20
   3.4 Sigmasoft ... 21
      3.4.1 Reálné použití programu ... 22
   3.5 Porovnání softwarů ... 23
4. Simulace dílu ... 24
   4.1 Vlastnosti a složení vosků ... 24
   4.2 Výroba lopatek T400D468 ... 26
      4.2.1 Návrh výroby ... 26
      4.2.2 Simulace vstřikování ... 29
      4.2.3 3D sken reálných lopatek ... 34
   4.3 Vyhodnocení ... 37
5. Seznam obrázků ... 42
6. Seznam grafů ... 43
7. Zdroje ... 44

1. Úvod a cíl práce

Cílem této bakalářské práce je provést simulaci vstřikování polymeru – voskového modelu lopatky průmyslové turbíny a porovnat výsledky simulace s naměřenými daty z reálné výroby této lopatky. Dále zpracovat informace, které se týkají simulačních programů a následně demonstrovat využití softwaru CADMOULD na příkladu vstřikovaného dílu. Tato práce je zaměřena na:

- Popis viskoelastického modelu chování polymerních materiálů
- Možnosti simulace vstřikování
- Simulaci zadaného dílu

2. Popis viskoelastického modelu chování polymerních materiálů

2.1 Úvod

Během 17. století vznikly dva stěžejní a zároveň jednoduché – snadno pochopitelné koncepty či modely popisující mechanické vlastnosti materiálů. Jedním z nich je Newtonův zákon tekutin

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \tag{1}$$

a tím druhým je Hookeův zákon pevných látek.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \tag{2}$$

Kde $\boldsymbol{\varepsilon}$ $[-]$ je deformace, $\frac{\boldsymbol{dv}}{\boldsymbol{dy}}$ $[\boldsymbol{s^{-1}}]$ rychlost smykové deformace, $\boldsymbol{\tau}$ $[\boldsymbol{Pa}]$ smykové napětí, $\boldsymbol{\sigma}$ $[\boldsymbol{Nm^{-2}}]$ tahové napětí, $\boldsymbol{E}$ $[\boldsymbol{Nm^{-2}}]$ Youngův modul pružnosti, $\boldsymbol{\eta}[\boldsymbol{Pas}]$ viskozita. Oba tyto vztahy představují nejjednodušší reologické[1] stavové rovnice materiálů.

Pro nás jsou důležité určité hlavní rysy těchto vztahů, kterými jsou:

- Linearita závislosti ε (σ) pro pevné látky (pouze do meze kluzu) a pro tekutiny je to linearita $\frac{dv}{dy}$ (τ)
- Nepřítomnost efektů závisejících na čase – u pevných látek ε (σ). Deformace přesně odpovídá působícímu napětí. Těleso se začíná deformovat bezprostředně po vyvinutí tlaku.
- Absence pevné deformace u kapalin – při jakékoliv deformaci se napětí lineárně zvyšuje s časem, při stálém namáhání.
- Existence jedné konstanty, která charakterizuje vlastnosti materiálu:
    - viskozita (η) pro kapaliny
    - modul pružnosti (E) pro tuhé látky

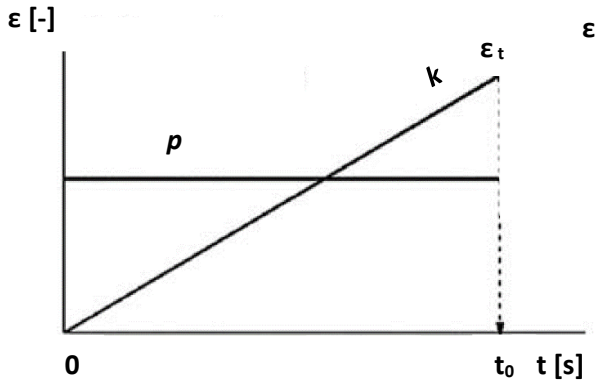
Velké množství nezávislých experimentálních důkazů založených na těchto dvou vztazích, které známe, nelze vysvětlit v rámci klasických teorií dynamiky a elasticity tekutin. Následující kapitoly budou věnovány tomuto tématu. [1], [3]

[1] Reologie – nauka o deformaci látek v závislosti na čase

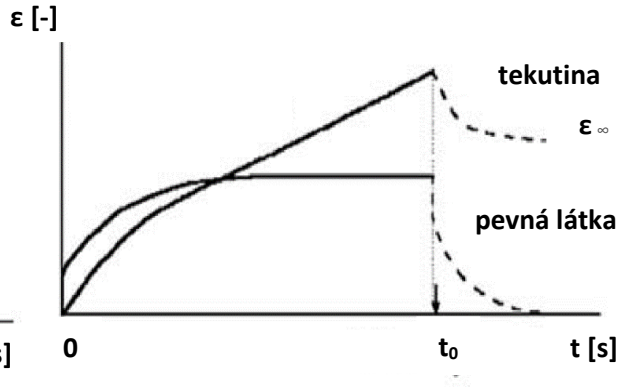
2.2 Definice creepu a napěťové relaxace

2.2.1 Creep

Časové závislosti deformace ε(t) pro dva výše uvedené vztahy (rovnice (1), (2)) jsou znázorněny v grafu 1. Deformace kapaliny (1) se zvyšuje lineárně s časem (znázorněno v grafu přímkou *k*) a deformace pevné látky (2) téměř skokově naroste do svého maxima a následně zůstane konstantní (přímka *p*). Pokud silové působení přerušíme, tzn. v čase t_0 „odebereme“ zatěžovací sílu, deformace kapaliny zůstává na hodnotě dosažené před časem t_0 v bodu ε_t. Deformace pevného tělesa okamžitě zmizí. Tyto zákonitosti vypadají velmi jednoduše a skutečně se podle těchto vztahů mnoho materiálů dokáže chovat. Nicméně existuje nepřeberné množství materiálů, které se tomuto chování vymykají a jejich chování vykazuje určité odlišnosti.



Graf 1. Časová závislost deformace [1]



Graf 2. Šíření deformace a její zpoždění [1]

Hlavní odlišností těchto křivek je fakt, že deformace je zpožděna v čase t_0, kdy dochází k uvolnění silového namáhání. Vše souvisí s počátečním časem, kdy působí konstantní síla až do bodu t_0, pak nastane zpomalení – síla je odstraněna. Rozdíly mezi křivkami jsou znatelné a je zcela evidentní, že tekutiny a pevné látky mají zcela odlišné chování.

Co se týče tekutin, vidíme, že část křivky, tedy závislosti ε(t), je „čára“, která svírá s osou x (osou časovou) určitý úhel, tzn., že tato závislost má směrnici, která je způsobena viskozitou dané kapaliny. Jsme schopni pozorovat zbytkové napětí, a to i poté, co zatížení zmizí. V případě pevných látek jde o diametrálně jiné chování. ε(t) je

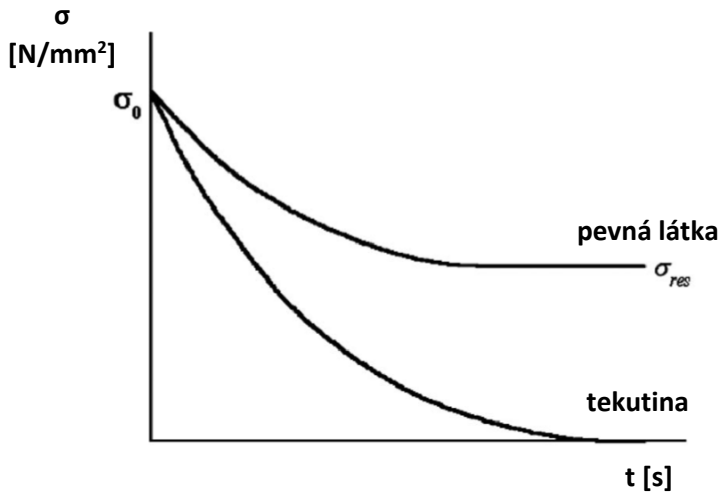
přímka vodorovná, tedy rovnoběžná s osou x, a poté, co zatížení zmizí, nezůstávají ani žádné zbytkové deformace. Pokud jde o reálnou praxi, tak nemůžeme přesně vymezit rozdíly mezi tekutinou a pevnou látkou. Procesy zpomalení a deformace mohou vykazovat jiný charakter, než jsme zvyklí z těchto jednoduchých modelů. Fenomén pomalého vývoje deformací se nazývá tečení (creep) a účinek zpomalení je někdy nazývám elastickým zpětným rázem. [1]

2.2.2 Relaxace

Pokud rychlost deformace nepokračuje, pak v kapalinách nemůže působit žádná síla (1). To znamená, že síla během krátké doby klesne na nulu. Pokud jde o deformaci pevné látky, je zde vidět znatelný rozdíl. Deformace je stálá (ε = konst.) a v souladu s rovnicí (2) zůstává síla konstantní během jakkoliv dlouhého pozorování. Opět jde o velmi jednoduchý princip, který splňuje mnoho skutečných součástí. Avšak existují další materiály, které se chovají rozdílně. Zjišťujeme, že dochází k pomalé ztrátě sil, která vyplývá z uvolnění napětí.

Dvě možnosti relaxace jsou uvedeny v grafu 3. Tlak v tekutinách po uvolnění (dříve nebo později) klesne ze své počáteční hodnoty σ_0 na hodnotu 0, protože kapaliny nemohou ukládat napětí, pokud neproudí. Při uvolnění napětí v pevných látkách z původní hodnoty σ_0 vždy zůstane zbytkové napětí σ_{res}, bez ohledu na to, jak dlouho relaxace trvá. Tento rozdíl v chování materiálů je charakteristický pro definice kapalin a pevných látek. [1]

Model v praxi představuje určité nejistoty, protože velmi pomalé uvolnění nemusí všichni pozorovatelé zaznamenat. Rychlost relaxačního procesu je charakterizovaná relaxační dobou.



Graf 3. Závislost napětí na čase [1]

2.3 Tvarová paměť

Tvarová paměť je obecnější pojem než creep nebo relaxace, protože se spojuje obojí. Proces „ztráty paměti“ má za následek to, že kapalina „zapomene“ na svou předchozí deformaci a jakýkoliv stav je rovnovážný, elastický zpětný ráz se nedostaví a v důsledku toho uvažujeme, že tekutiny „nemají tvarovou paměť“. V případě elastického materiálu nemá doba „odpočinku“ vliv na jeho chování po uvolnění napětí. Takové materiály „nezapomenou“ na předešlé deformace, takže jejich deformace nezmizí. Chování některých reálných materiálů může být přechodné.

Koncept viskoelasticity vychází z výše popsaného chování materiálů. Právě proto je nutné u mnoha reálných materiálů zvážit kombinaci vazkého a elastického chování.

Deformace se skládá z průtoků a elastické části. Toto platí u creepu i u relaxace. Koncept ztráty paměti materiálu předpokládá superpozici pružného chování a vazkého chování. [1]

2.4 Dynamické vlastnosti

Aby bylo možné nalézt reologické vlastnosti materiálu, je vhodné provádět experiment pomocí nejjednodušších podmínek. Je možné například navrhnout jednoduché experimentální schéma, jako je periodická oscilace. Tvar oscilace může být libovolný, ale je výhodné používat harmonické kmitání. Matematická analýza harmonické funkce je velmi dobře vyvinutá. Každá periodická funkce může být také reprezentována součtem harmonických funkcí. Změny probíhající v materiálu se měří jako funkce času. Je důležité používat harmonické kmity ve vysokém kmitočtu. Takový režim deformace je známý jako dynamické mechanické studium materiálů. Stejně jako statické experimenty (např. měření tečení a relaxace) mohou být dynamické experimenty prováděny v režimech deformace řízených namáháním nebo deformací. [1]

2.5 Modelové interpretace

2.5.1 Základní mechanické modely

Důvod pro zavedení modelů je prostý. Tyto modely nám pomohou lépe pochopit teorii viskoelasticity. Pro názornost slouží některé typické mechanické modely.

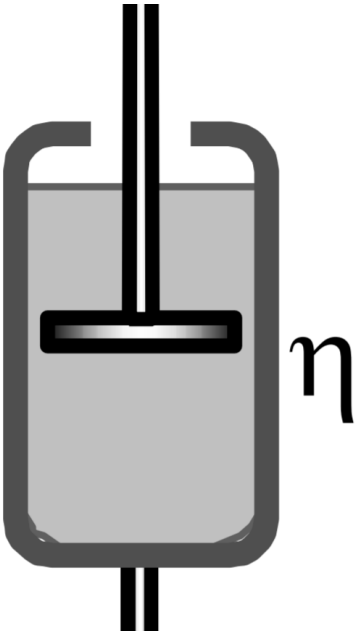
Nejjednodušší model viskózního chování materiálu je hydraulický tlumič - píst, který se pohybuje uvnitř válce naplněného kapalinou. Charakteristikou tohoto modelu je rychlost pohybu pístu $\boldsymbol{v}$ $[\boldsymbol{ms^{-1}}]$.

$$v = \frac{dx}{dt} \tag{3}$$

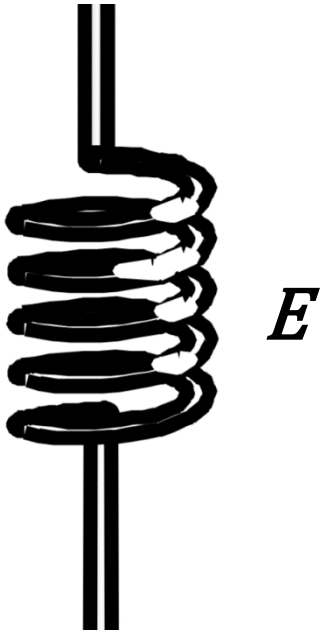
Rychlost pístu je úměrná rychlosti pohybu aplikované síly $\boldsymbol{F}[\boldsymbol{N}]$,

$$F = \eta' \cdot v \tag{4}$$

kde $\boldsymbol{x}[\boldsymbol{m}]$ je posunutí, $\boldsymbol{t}[\boldsymbol{s}]$ je čas a $\boldsymbol{\eta}'[\boldsymbol{Pasm}]$ je modifikovaná viskozita. Tato rovnice je formálně analogická k základní rovnicí pro Newtonskou tekutinu (1). Rychlost deformace je ve vztahu (4) rychlost $\boldsymbol{v}$ $[\boldsymbol{ms^{-1}}]$, smykové napětí $\boldsymbol{\tau}$ $[\boldsymbol{Pa}]$ je zastoupeno silou $\boldsymbol{F}[\boldsymbol{N}]$ a viskozita je reprezentována veličinou $\boldsymbol{\eta}'$ $[\boldsymbol{Pasm}]$. [1]



Obr. 1. Píst - tlumič [3]



Obr. 2. Pružina [3]

Nejjednodušším mechanickým modelem pružného tělesa je pružina. Posunutí $\boldsymbol{x}$ $[\boldsymbol{m}]$ takového tělesa je úměrné napětí $\boldsymbol{\sigma}$ $[\boldsymbol{Nm^{-2}}]$ vyvolaného silou $\boldsymbol{F}[\boldsymbol{N}]$ aplikovanou na pružinu:

$$x = \frac{F}{E \cdot A} \cdot l \qquad (5)$$

Jedná se o vyjádření posunutí $\boldsymbol{x}$ $[\boldsymbol{m}]$ z Hookeova zákona (2), kde $\boldsymbol{F}$ $[\boldsymbol{N}]$ je aplikovaná síla, $\boldsymbol{A}$ $[\boldsymbol{m^2}]$ je průřez tělesa, $\boldsymbol{E}$ $[\boldsymbol{Nm^{-2}}]$ modul pružnosti a $\boldsymbol{l}$ $[\boldsymbol{m}]$ délkový rozměr tělesa.

Tyto jednoduché modely můžeme ovšem uspořádat tak, že oba komponenty spojíme paralelně, takovéto konfiguraci říkáme Kelvin – Voigtovo schéma. Nebo spojením do série vytvoříme tzv. Maxwellovo schéma. [1], [3]

2.5.2 Kelvin – Voigtova konfigurace

Nechť konstantní síla, $\boldsymbol{F = F_0 = konst.}$, je náhle aplikovaná na konec spojeného „dvoukomponentu“ modelu znázorněného na Obr. 3. Můžeme snadno předpokládat, že obě součásti této konfigurace odolávají pohybu. Pružina se natáhne a zároveň se píst pomalu vysune z válce. Tento proces pokračuje, dokud není pružina napnutá na délku odpovídající aplikované síly. Pohyb pístu se zastaví v tomto stavu, protože síla je vyrovnána pružinou a zároveň pístu chybí dostatečná síla pro další pohyb. Matematická reprezentace výše uvedených předpokladů je následující.

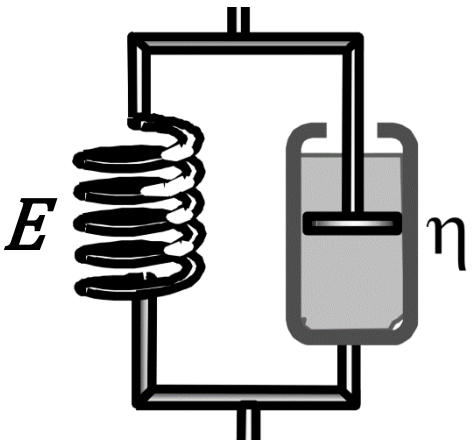
Celková síla $\boldsymbol{F}\ [\boldsymbol{N}]$ „dvoukomponentního“ modelu je součet sil působících na oba prvky modelu,

$$F_{pružina} + F_{píst} = F \tag{6}$$

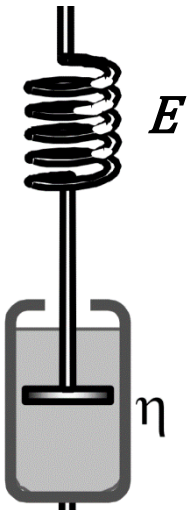
kde $\boldsymbol{F_{pružina}}\ [\boldsymbol{N}]$ je síla působící na pružinovou větev a $\boldsymbol{F_{píst}}\ [\boldsymbol{N}]$ je síla působící na píst. Nyní pomocí rovnic (4) a (5) může být poslední součet zapsán jako:

$$\eta' \dot{X} + \frac{EAX}{l} = F_0 \tag{7}$$

Kombinace jednotlivých komponentů, které jsou znázorněny na obrázku, se chová jako tzv. Kelvin – Voigtův materiál. Tento materiál je pevný, protože působení konstantní síly vede k omezenému posunutí, jako u kteréhokoliv jiného pevného tělesa. Dá se říci, že nemá relaxační dobu, resp. jeho relaxační doba je rovna nekonečno. [1], [2]



Obr. 3. Kelvin – Voigtovo schéma [3]



Obr. 4. Maxwellovo schéma [3]

2.5.3 Maxwellova konfigurace

Je dán konstantní posun, $\boldsymbol{x = x_0 = konst.}$, který je náhle vytvořený na konci spojeného „dvoukomponentu“. Můžeme očekávat, že tento posun okamžitě natáhne pružinu. Poté prodloužená pružina vytáhne píst z válce a tento proces bude nějakou dobu pokračovat, protože pohyb ve viskózní kapalině není příliš rychlý. Tento proces pokračuje, dokud se pružina nedostane do rovnovážného stavu (obnoví se původní počáteční délka). Matematická reprezentace výše uvedených predikcí je následující. Celkový posun $\boldsymbol{x}$ $[\boldsymbol{m}]$. „dvoukomponentního“ modelu je součet posunutí obou složek,

$$x_{pružina} + x_{píst} = x \tag{8}$$

kde $\boldsymbol{x_{pružina}}$ $[\boldsymbol{m}]$ je posunutí pružiny a $\boldsymbol{x_{píst}}$ $[\boldsymbol{m}]$ je posunutí pístu. Stejná rovnost platí pro derivace posuvů a jejich součet:

$$\dot{x_{pružina}} + \dot{x_{píst}} = \dot{x} \tag{9}$$

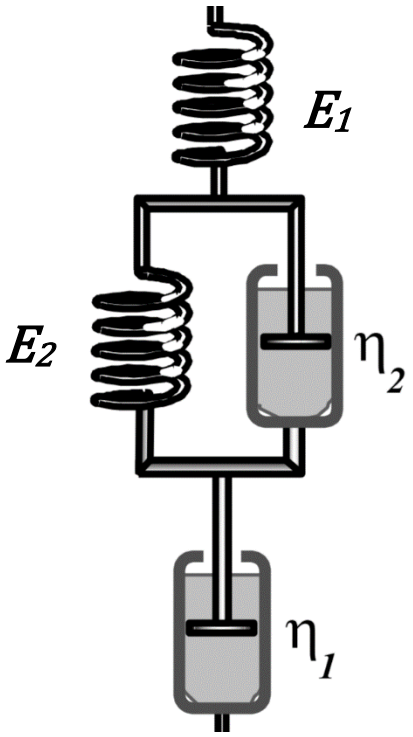
Nyní pomocí rovnic (4) a (5) může být poslední součet zapsán jako:

$$\frac{\dot{F}}{E \cdot A} l + \frac{F}{\eta'} = 0 \tag{10}$$

Maxwellovský materiál je kapalný, protože aplikace konstantní síly vede k neomezenému pohybu pístu, tj. model průtoku. Doba zpoždění Maxwellova modelu se rovná nula.

Použití mechanických modelů ilustruje chování materiálu v různých režimech deformací. Například dynamické funkce obou modelů jsou vypočteny změnou parametrů modelu, jako jsou reologické vlastnosti, viskozita $\boldsymbol{\eta'}$ $[\boldsymbol{Pasm}]$ a modul $\boldsymbol{E}$ $[\boldsymbol{Nm^{-2}}]$, složek modelů Kelvin-Voigt a Maxwell. Porovnání výše uvedených modelů ukazuje, že modely Kelvin - Voigt a Maxwell předpovídají různé chování materiálu, pokud jde o zpomalovací a relaxační časy. Materiál „Maxwell“ je tekutý a „Kelvin - Voight“ materiál je pevný. Pomocí mechanických modelů je snadné popsat pevný materiál jako kapalný a naopak. [1], [2]

2.5.4 Komplikované mechanické modely – diferenciální reologické vlastnosti



Obr. 5. Kombinace schématu Kelvin - Voigt a Maxwell [3]

Modely Maxwell a Kelvin-Voigt mohou být spojeny paralelně či v sériích. V mnoha aplikacích jsou tyto modely také spojeny v jejich kombinacích. Kombinace modelu Maxwell a modelu Kelvin-Voigt sdruženého v řadě (známý jako Burgersův model). Burgersovo schéma je uvedeno na Obr. 5. Tato kombinace představuje populární kvantitativní model chování polymerních materiálů. Hlavní zvláštností tohoto modelu je možná kombinace relaxačních a zpožďovacích jevů v jednom materiálu. Předpokládejme, že při nízkých teplotách je „Maxwellova viskozita“ $\boldsymbol{\eta'_1}[\boldsymbol{Pasm}]$ velmi vysoká (materiál je „zmrzlý“) a je možné zanedbat deformace tohoto prvku. Pak takový model představuje chování pevného tělesa kvůli pružinám, resp. $\boldsymbol{E_1}[\boldsymbol{Nm^{-2}}]$. S rostoucími teplotami viskozita $\boldsymbol{\eta'_1}\,[\boldsymbol{Pasm}]$ klesá a v materiálu může docházet k relaxaci. Pak je to typické relaxační zpomalené chování viskoelastického materiálu. Při ještě vyšších teplotách se viskozita obou složek $\boldsymbol{\eta'_1}[\boldsymbol{Pasm}]$ a $\boldsymbol{\eta'_2}\,[\boldsymbol{Pasm}]$ stává velmi nízkou a model představuje chování primárně viskózní kapaliny, jako je polymerní

tavenina. Matematický popis tohoto modelu je reprezentován součtem deformací 3 komponentů,

$$\varepsilon_{1,píst} + \varepsilon_2 + \varepsilon_{1,pružina} = \varepsilon \tag{11}$$

kde $\boldsymbol{\varepsilon}\,[-]$ je celková deformace, která je součtem deformace Maxwellovské pružiny $\boldsymbol{\varepsilon_{1,pružina}}\,[-]$, Maxwelovského pístu $\boldsymbol{\varepsilon_{1,píst}}\,[-]$ a Kelvin – Voightova modelu $\boldsymbol{\varepsilon_2}\,[-]$. [1], [2]

2.5.5 Nemechanické modely

Jakákoli kombinace fyzikálních prvků vedoucích ke stejným matematickým předpokladům lze považovat za analogický model viskoelastického reologického chování materiálu. Mezi nejzajímavější a nejužitečnější jsou v dnešní době elektrické analogové systémy, protože umožňují snadné zabudování do laboratoří a jejich chování lze podrobně sledovat pomocí jednoduchých experimentálních technik. Pro ilustraci takovéhoto modelu si můžeme představit elektrický obvod se dvěma prvky: rezistor s odporem $\boldsymbol{R}\,[\Omega]$ a kondenzátor s kapacitou $\boldsymbol{C}\,[\boldsymbol{F}]$. Elektrický náboj $\boldsymbol{Q}\,[\boldsymbol{C}]$ je analogií mechanické deformace. Proud

$$I = \frac{dQ}{dt} \tag{12}$$

je analogií deformační rychlosti a napětí $\boldsymbol{U}\,[\boldsymbol{V}]$ je obdoba mechanického namáhání. Oba prvky mohou být spojeny sériově a paralelně, jak je znázorněno na Obr. 6. Počáteční vztahy pro nejjednodušší prvky jsou – pro rezistor:

$$I = \frac{U}{R} \tag{13}$$

a pro kondenzátor:

$$Q = C \cdot U \tag{14}$$

Pro kondenzátor a rezistor zapojený sériově platí, že výsledné napětí $\boldsymbol{U_0}$ $[\boldsymbol{V}]$ je součtem napětí v jednotlivých komponentech

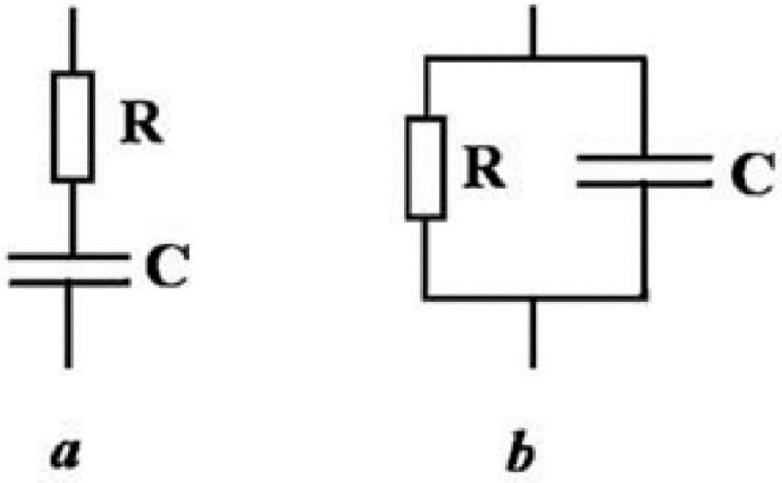
$$R\dot{Q} + \frac{1}{C}Q = U_0 \tag{15}$$

Tento zápis je přímá analogie Kelvin – Voightova modelu, viz rovnice (7).

Pro kondenzátor a rezistor zapojený paralelně platí, že výsledný proud $\boldsymbol{I}$ $[\boldsymbol{A}]$ je součet proudů v dílčích složkách modelu:

$$\frac{U}{R} + CU = I \tag{16}$$

Takto definovaný model je nemechanickou obměnou Maxwellova modelu. [1]



Obr. 6. Nemechanické modely [1]

3. Možnosti simulace vstřikování

Na výrobu vstřikovaných polymerních součástí má vliv mnoho proměnných, které jsou ve vzájemné interakci, a to má za následek, že jsme nuceni využít numerické programy popisující proces vstřikování daného materiálu. Takovým způsobem se tento podstatný nástroj stává používaným při ověřování návrhu vstřikovací formy a optimalizace procesu vstřikování. V oblasti vývoje výrobků z polymerů způsobily simulační programy snížení celkových výrobních nákladů, úsporu času související s návrhem a zpracováním výrobku. Výsledky simulace nejsou používány pouze pro produkt, konstrukční práce týkající se geometrie a geometrie vstřikovací formy, ale také jako důležitý nástroj pro optimalizaci zpracování. V důsledku toho použijeme simulaci. Software může výrazně podporovat návrháře, zejména v případech, kde se práce spojuje s realizací konstrukce nástroje pro zpracování vyztužených materiálů z polymerů a pro zpracování inovativních konstrukčních termoplastických materiálů. Výsledná vhodnost softwaru závisí na algoritmu matematického modelu vytvořeným programem, který popisuje základní procesy ohřevu nad teplotu skelného přechodu (T_g), plnění a zároveň i vlastnosti polymerního materiálu. Další přiblížení skutečných podmínek vstřikování je zavedení do výpočtů správného modelu reologických polymerů, který bude zohledňovat změny viskozity v závislosti na ostatních vstupních hodnotách. Měl by tedy zohlednit polohu a velikosti chladicích nebo temperačních kanálů, ale i materiály použité pro výrobu jednotlivých forem. [4]

Celý proces simulace je u všech softwarů tohoto typu podobný a lze ho rozdělit na tyto části výpočtů:

- **Preprocesing**: popis řešené úlohy a její zadání. Tato část výrazně ovlivňuje přesnost výpočtu z hlediska lidského faktoru. V tomto bodě simulace jde především o přesnost CAD modelu, vytvoření a editaci sítí konečných prvků a v neposlední řadě zadání okrajových a počátečních podmínek (materiálových charakteristik polymeru a formy, vtokového systému a chlazení) vstřikovacího procesu.

- **Procesing**: představuje samotný výpočet, který probíhá nezávisle na operátorovi. Zde se projeví přesnost výpočtového modelu, jeho shoda s realitou a také kvalita algoritmu výpočtu, která se projeví hlavně na čase, za který dosáhneme výsledku.

- **Postprocesing**: představuje zobrazení a interpretaci výsledků a umožňuje vyvodit závěry. [5]

Nejvíce frekventované softwary pro praktické využití v ČR jsou: Cadmould, MoldFlow, Moldex a Sigmasoft. Pro tyto programy bylo provedeno porovnání.

3.1 AUTODESK Moldflow

Obr. 7. Logo AD Moldflow [6]

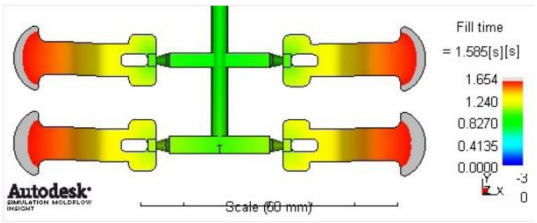
Tento simulační software, který pracuje na základě metody konečných prvků, slouží pro simulace vstřikování plastů. Pomáhá vyhodnotit a optimalizovat technologický design polymerních dílů a vstřikovacích forem. Společnost Autodesk nabízí 2 varianty softwaru Moldflow, které mají využití podle náročnosti jednotlivých aplikací. Jsou to varianty Autodesk Moldflow Adviser, Autodesk Moldflow Insight (seřazeno od nejzákladnější po nejlepší úroveň produktu).

Program dokáže provádět simulace toku taveniny – tedy dokáže měnit technologický design a omezit vady dílů. Dokáže určit potenciální vadu, například studené spoje, vytváření vzduchových bublin. Při procesu lití termoplastů predikuje tok taveniny a pomáhá rovnoměrně plnit formu. Lze identifikovat vtoková ústí a jejich uspořádání. Umožňuje zvýšit účinnost chladicího systému a modelovat chladicí komponenty. Simuluje smrštění a deformace, orientaci vláken, zapouzdřování mikročipů atd.

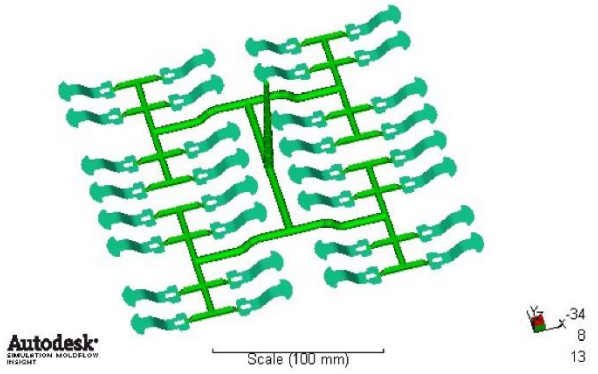
3D simulace jde aplikovat na modely vytvořené v CAD programech, jako například Autodesk Inventor, CATIA, SolidWorks. Je tedy možné importovat CAD modely a dále vybrat a porovnat materiály. Simulační program Autodesk Moldflow nachází uplatnění v oblasti výroby, přičemž konstruktérům formy umožňuje analyzovat vliv nerovnoměrné teploty formy na proces chladnutí i na výsledné vlastnosti vstřikovaného dílce. Dokáže určit optimální načasování otvírání vtokových ventilů pro horký rozváděcí systém. [7]

3.1.1 Reálné použití programu

Indická společnost Rheomold, která se zabývá analýzou vstřikovaných dílů z polymerů – plastu, využila program Autodesk Moldflow pro jednoho z předních dodavatelů pro automobilový průmysl k analýze nově vyvíjených plastových ovládacích prvků – páček. Aplikace programu spočívala v provedení optimalizace rychlosti přivádění taveniny do třicetidvounásobné formy. Vzhledem k velikosti formy a náročnosti dopravy taveniny do jednotlivých dutin docházelo k nerovnoměrnému rozložení tekutého materiálu, což mělo za následek, že polovina výrobků z 32 dílné formy byla nepoužitelná. Software Autodesk Moldflow zajistil zvětšení potřebných kanálů pro vedení materiálu o 15 % (z původního průměru 3,33 mm na 4,17 mm) po analýze používaného materiálu a původní vstřikovací soustavy. [8]



Obr. 8. Nerovnoměrné plnění formy [8]



Obr. 9. Optimalizace vtokové soustavy [8]

Další příklady optimalizačních studií je možno zhlédnout na stránkách Autodesk Moldflow v sekci videí. [9]

3.2 CADMOULD

Obr. 10. Logo Cadmould [10]

Software CADMOULD je produktem společnosti Simcon. Cadmould 3D-F a 3D je CAE[2] modulární softwarová sestava, která analyzuje proces vstřikování polymerních materiálů. Pro analýzu je potřebný 3D CAD model vstřikovaného dílu ve formátu STL, STEP nebo IGES. Základem je příprava zcela automatického a rychlého výpočtového prostředí, založeného na vlastní precizní objemové metodě. Uvedené řešení umožní velmi dobré rozlišení měnících se materiálových veličin (teplot, smykových rychlostí atd.) po tloušťce stěn, což je nutným předpokladem pro přesný výpočet komplexních proudových stavů v různých místech konstrukce. Výpočty u všech modulů Cadmould jsou teplotně závislé, respektující stlačitelnost tavenin a zohledňující strukturně-viskózní chování tavenin polymerů. Program též klade důraz na výpočtovou přesnost a rychlost zpracování, což v praxi zaručuje variabilitu výpočtů a jejich skutečnou optimalizaci. Program nabízí mnoho nadstavbových verzí, které nám umožní pracovat s pěnovými a gumovými materiály, dokáže řešit tzv. kaskádové vstřikování, vstřikování do pootevřené formy, simulace dílů z reaktoplastů, analýzu smrštění a deformací, měření geometrických odchylek, analyzuje teploty na povrchu tvarových dutin, určuje počet a polohy vtoků, atd. [11]

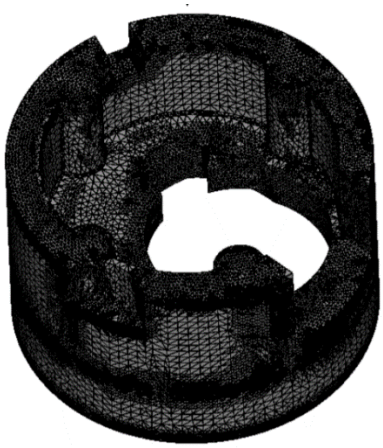
3.2.1 Reálné použití programu

Funkčnost softwaru Cadmould 3D – F je možné popsat na simulaci vstřikování pryže. Konkrétně se jedná o jednoduchou simulaci vstřikování při výrobě izolátoru, která slouží firmě Cadmould pro popis uživatelského prostředí a funkčnosti softwaru.

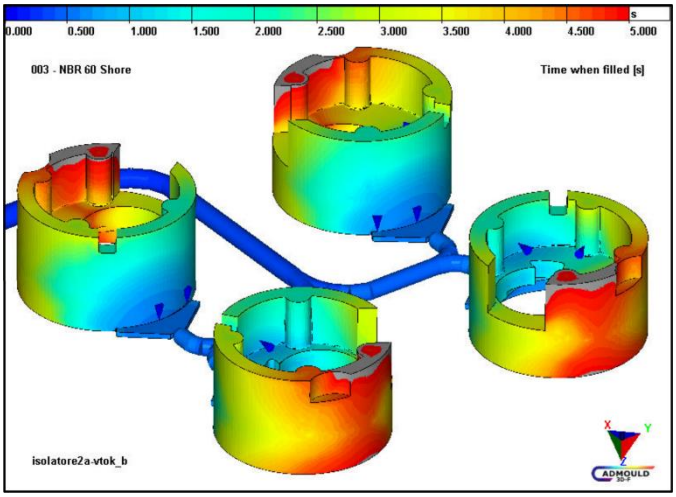
Základem této simulace je vytvoření modelu izolátoru a jeho následné převedení do formátu STL, tedy dokumentu pro automatickou tvorbu konečných prvků. Automaticky se vypracuje výpočet sítě a na místech vtoků na odpovídajících plochách program vytvoří hustší výpočetní síť, která zaručuje vetší efektivitu výpočtu. Následně

[2] CAE je metoda využití počítačového softwaru k provedení inženýrské analýzy

program navrhne možnosti vtokové soustavy a uživatel vybere přesný materiál budoucího izolátoru. Je nutné zadat odhadované údaje pro první výpočet. Tyto údaje jsou uvedeny v následujících výpočtech. Je však možné zadávat změny vybraných technologických dat a provádět automatickou optimalizaci technologie v případech, kdy je obtížné předvídat. Tato data jsou např.: doba plnění, teplota vstřikovaného materiálu, teplota formy, okolní teplota, doba tvrzení a chladnutí atd. Cadmould nabízí náhled na výsledky ve formě tabulek či 3D řezech a animacích. Simulační analýza Cadmould představuje kvalitní výpočetní nástroj, který může zvýšit kvalitu vstřikovaných pryžových dílů, snížit náklady spojené s opravou forem a urychlit přípravu nové výroby, zejména nových konstrukcí nástrojů. Ze zkušeností s analýzou situace je zřejmé, že je lepší analyzovat, než zkusit a opravit. [12]



Obr. 11. Tvorba sítí [12]



Obr. 12. Čas plnění [12]

Další příklady využití ve formě videí lze vyhledat na Youtube, pod klíčový heslem Cadmould simulation of plastic injection. [13]

3.3 MOLDEX 3D

Obr. 13. Logo Moldex [14]

Jako u předchozích dvou konkurentů se i v tomto případě jedná o plně 3D CAE simulační software pro vstřikování polymerů. Je určen pro simulování procesu vstřikování a pro optimalizaci designu výrobku, poradí si ovšem i se zhodnocením vyrobitelnosti a dokáže maximalizovat trh. To říká v krátkosti firma CoreTech Ltd. o svém produktu. K simulačnímu softwaru se nabízejí produktové balíčky:

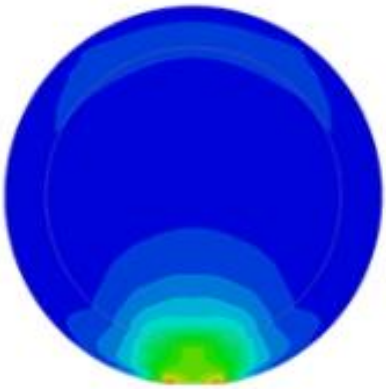
- **eDesign Basic** (rychlá simulace plnění s automatickým síťováním)
- **eDesign** (kompletní simulace vstřikovacího procesu s automatickým síťováním)
- **Professional** (nástroj pro efektivní podporu při vývoji dílů s 3D komplexní geometrií i plochých velkorozměrových dílů, kromě síťování eDesign obsahuje i technologii automatického síťování Designer BLM 2.0)
- **Advanced** (rozšíření produktového balíčku Professional o možnosti přípravy pokročilých hybridních sítí s plnou kontrolou uživatele vhodných pro simulace speciálních procesů, jako např. Injection-Compression Molding, zástřik mikročipů nebo simulaci optických dílů)
- **Solution Add-on** (rozšiřující moduly pro simulaci speciálních výrobních technologií) [15]

Simulace pomocí 3D technologie založené na plnoobjemové síti umožňuje zahrnout do výpočtů i reálné 3D efekty, které mají při vstřikování důležitou roli a ovlivňují kvalitu predikovaných výsledků. Jsou to např. fontánový tok, rohový efekt, prostorová orientace plniva, vznik asymetrie teplotního pole ve vtokové soustavě, prostorové teplotní pole ve formě apod. Díky podchycení těchto 3D efektů umožňuje simulace spolehlivě predikovat plnění dutin formy, přehřívání materiálu při toku

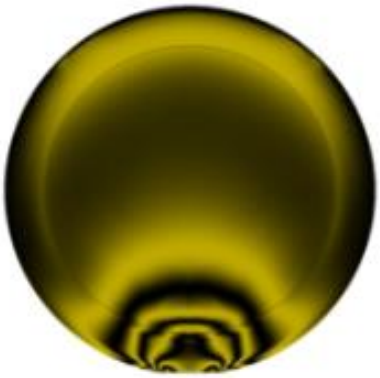
vtokovou soustavou a dutinou formy, optimalizovat pozice a dimenze vtoků, predikovat nedostřiky, vznik studených spojů a místa s uzavíráním vzduchu, vyhodnotit design chlazení, minimalizovat cyklus, správně určit výsledné deformace apod. [16]

3.3.1 Reálné použití programu

Program MOLDEX 3D byl použit pro analýzu fotoelasticimetrií zjištěného zbytkového napětí při vstřikování plastových čoček pro optické využití a dalším důvodem byla snaha o zefektivnění výroby v sériové výrobě optických zařízení. Cílem simulace bylo stanovit, jaká je hlavní příčina zbytkových napětí. Provedená analýza pak říká, že jejich příčinou je tavení a rychlost vstřikovacího procesu. Program tedy provedl návrh optimalizace toku materiálu tak, aby bylo možné nežádoucí napětí co nejvíce eliminovat. [17]



Obr. 14. Rozložení zbytkových napětí při plnění [17]



Obr. 15. Zbytková napětí - fotoelasticimetrie [17]

Příklady užití tohoto softwaru jsou dohledatelné na Youtube, pod heslem Moldex 3D simulation. [18]

3.4 Sigmasoft

Obr. 16. Logo Sigmasoft [19]

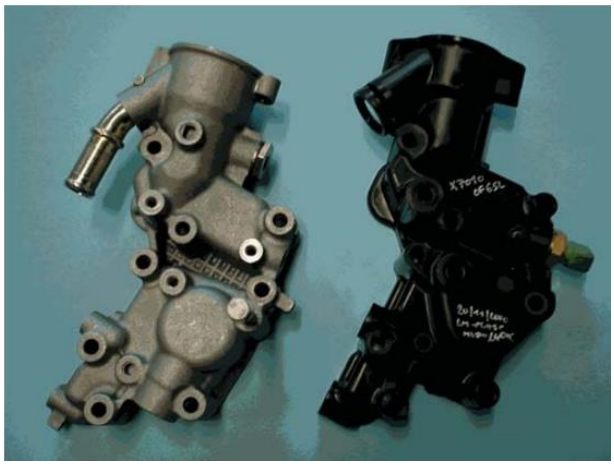
Německý software Sigmasoft od společnosti SIGMA Engineering je programem, který podporuje řešení komplexních otázek v oblasti vstřikování od prvního návrhu až po výrobu. Vývojáři a projektanti mohou rozlišovat možné výrobní problémy nebo kritické chování dlouho před skutečně vyrobenou součástí. To zkracuje vývojové časy a minimalizuje rizika. Výrobci nástrojů mohou při prvním pokusu optimálně navrhnout formy, dopravování materiálu, různé varianty ejektorů. Jde tedy opět jako u konkurence o spojení produktivity, materiálové efektivity a spolehlivosti.

Tento program byl vyvinut od začátku s plným 3D přístupem, integrovaným a výkonným řešením pro měření teploty a průtoku. Pracuje na základě algoritmu založeného na metodě konečných objemů. To umožňuje integrovat všechny tvarované části a samotnou formu do simulace, což přináší stále nesrovnatelný stupeň přesnosti reálného vstřikovacího procesu. [20]

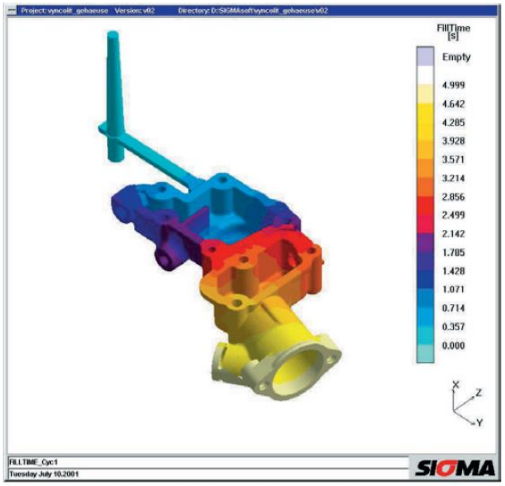
V nabídce je opět množství variant programu. Mezi hlavní představitele této značky patří např.: SIGMASOFT Thermoplast, SIGMASOFT Elastomers, SIGMASOFT Thermoset.

3.4.1 Reálné použití programu

Pro automobilový koncern PSA Peugeot Citroën byla provedena simulace konstrukce pro čerpadla do automobilů Peugeot 106, 206 a Citroen Saxo, Berlingo. Bylo třeba vyměnit původní hliníkové tělo čerpadla za plastové z důvodu nižší hmotnosti. Samotný proces simulace proběhl na podobném principu jako u jiných softwarů podobného typu. Jednalo se o simulaci plnění formy, chlazení, optimalizaci rychlosti a času plnění a optimalizaci vtokové soustavy, pro správné zaplnění formy kvůli složitosti tvarů modelového výrobku. [21]



Obr. 17. Náhrada hliníkové součásti za plastovou [21]



Obr. 18. Proces plnění - čas plnění [21]

Příklady plnění formy a procesu optimalizace výrobku v audiovizuální podobě jsou ke zhlédnutí na Youtube, při vyhledání klíčového hesla Sigmasoft simulation. [22]

3.5 Porovnání softwarů

Tabulka 1: souhrnná porovnávací tabulka zmíněných softwarů [23; 24; 25; 26; 27]

	AD **Moldflow Insight**	**M 3D**	**Cadmould**	**Sigmasoft**
	PREMIUM	*PRO*	*WARP EXPERT*	
VÝPOČTOVÉ METODY				
Metoda konečných	prvků	objemů	objemů	objemů
MOŽNOSTI ŘEŠIČE				
Paralelně běžící řešiče (max)	3	8	?	?
CAD INTEROPERABILITA				
CAD modely	✓	+	✓	?
Sestavy	✓	+	✓	?
Díly	✓	+	✓	?
FUNKCE SIMULACÍ				
Plnění	✓	✓	✓	✓
Dotlak	✓	✗	✓	?
Orientace vláken	✓	✗	✓	✓
Predikce vad modelu	✓	✓	✓	✓
Analýza odvzdušnění	✓	✓	?	?
Analýza krystalizace	✓	✗	?	✓
Vhodnost umístění vtoku	✓	✓	✓	?
Studené a horké vtoky	✓	✓	✓	?
Vytváření vtoků	✓	✓	✓	?
Chlazení	✓	✓	✓	✓
Konformní chlazení	✓	✓	✓	?
Indukční temperace	✓	✓	✓	?
Deformace dílu	✓	✓	✓	✓
Zástřiky	✓	✗	✓	?
Deformace formy	✓	✗	✓	✓
Deformace vstřikovaných drátů	✓	✗	?	?
Rapid Temperature Cycling	✓	✓	?	?
Temperační elementy	✓	✓	✓	✓
Vytvrzování stěn	✗	✗	✗	✓
POSTUP VSTŘIKOVÁNÍ				
Vstřikování termoplastů	✓	✓	✓	?
Vstřikování s asistencí plynu	✗	+	?	?
Vstřikování s dolisováním	✗	+	?	?
Vstřikování pěnových materiálů	✗	✓	✓	?
Co – injection molding	✗	+	?	?
Bi – injection molding	✗	+	?	?
Reaktivní vstřikování konpozitů	✓	✗	?	?
Vstřikování kapalných kaučuků	✓	✗	?	?
Zastřikování procesorů	✓	✗	?	?

Legenda k tabulce 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

4. Simulace dílu

Simulace i samotné vstřikování polymerů – plastů je v dnešní době samozřejmostí. Proto je tato práce orientována na popis vstřikování polymerů – vosků, které kvůli své složité struktuře jsou stále méně probádanou oblastí i co se týče simulace jejich vstřikování.

4.1 Vlastnosti a složení vosků

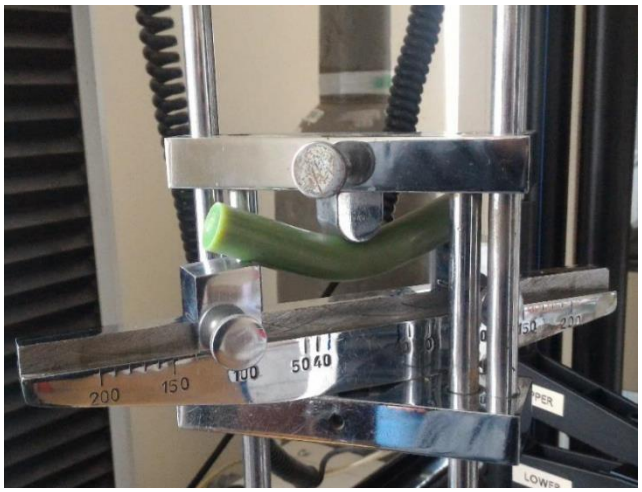
Voskový materiál je široký pojem, protože zahrnuje velké množství přírodních i syntetických organických sloučenin. Tyto sloučeniny jsou charakterizovány alkylovými řetězci, které obsahují primární i sekundární alkoholy, amidy, ketony či estery. Chemicky je možné zadefinovat jen část vosků (syntetické, minerální, atd.). Zbylé nedefinované typy jsou složité chemické směsi.

- **Přírodní vosky:** včelí vosk, karnaubský vosk, parafín
- **Syntetické vosky:** polyglykoly, polyetylény, parafíny

Základní součást voskových směsí bývá parafín. V důsledku jeho ztuhnutí vzniká pevná hmota. Pro zvýšení tvrdosti směsi se do směsí přidává například karnaubský vosk. V případě snížení tvrdosti bývá využit vosk včelí, který má za následek i lepivost směsi.

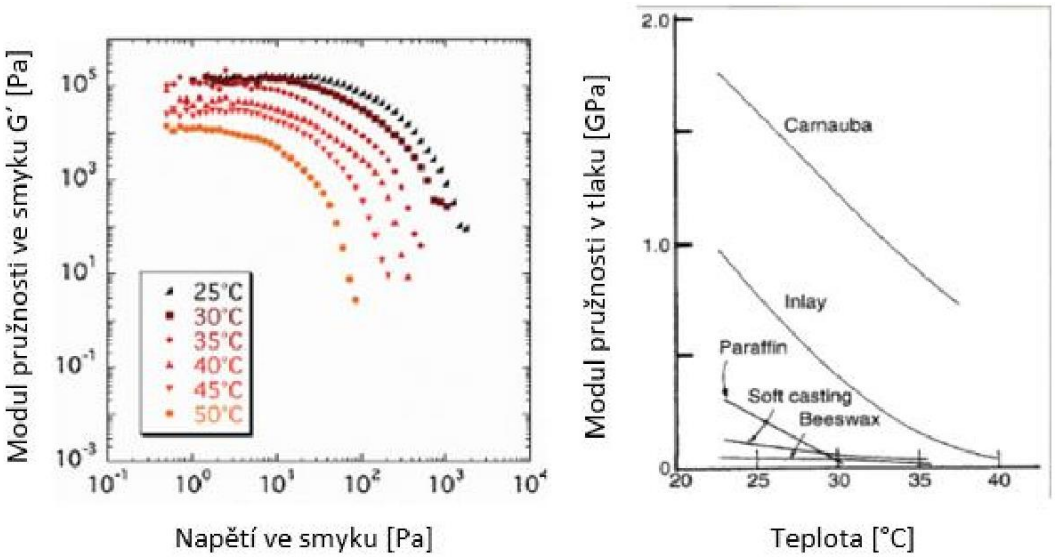
Vztahy mezi vlastnostmi a složením vosků jsou i dnes stále málo popsané z důvodu velké rozmanitosti chování různých druhů vosků. Obvykle mají tvrdou konzistenci, výjimkou však není ani konzistence mazlavá či kapalná. Při teplotě okolo 20 °C je většina vosků pevná a plastická, v rozmezí teplot od 40 do 120 °C dochází k tavení. Pokud dojde k roztavení a následnému smíchání více druhů vosků, dojde k dobrému vzájemnému smíšení a po následném ochlazení vznikne homogenní materiál. S rostoucí teplotou tání roste i tvrdost. Vosky mají tvarovou paměť, tzn. mají tendenci vracet se k původnímu tvaru. S ohledem na viskoelastické chování proto dochází k pomalé nežádoucí deformaci modelů, dokonce i bez vnějšího zatížení nebo zvýšení teploty.

Charakteristické vlastnosti vosků stanovujeme pomocí deformačních, teplotních či oscilačních zkoušek. [28]



Obr. 19. Stanovení modulu pružnosti pro voskový model [28]

Obr. 20. Vzorky pro provedení zkoušky ohybem [28]



Graf 4. Závislost modulu pružnosti na napětí a teplotě [28]

4.2 Výroba lopatek T400D468

Pro optimalizaci výroby lopatek T400D468 byl vytvořen vhodný výrobní postup, který by měl zaručit stálost výroby a správný průběh technologie vstřikování. K tomuto účelu byl využit vosk jako materiál modelových zkušebních těles. [29]

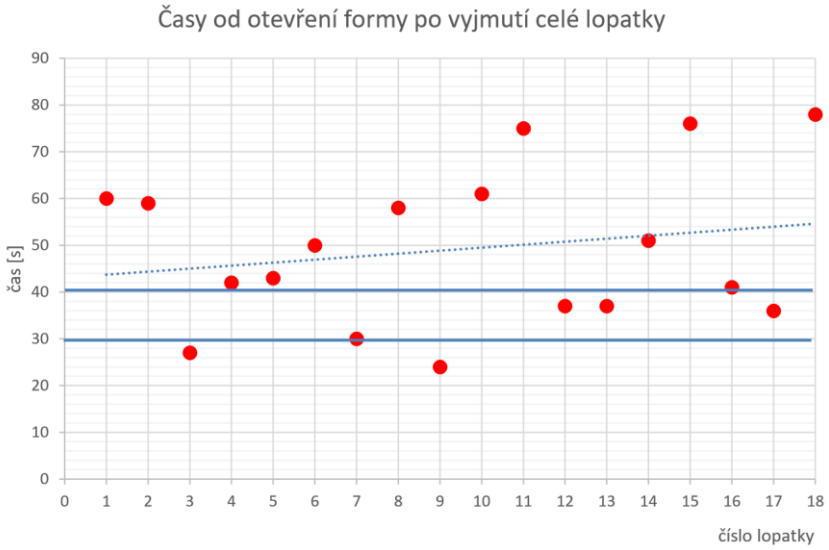
4.2.1 Návrh výroby

Na základě času vstřikování byl stanoven pracovní cyklus na výrobu lopatky, který trvá 4 minuty. Tento cyklus spočívá v opakování těchto úkonů: vyjmutí z formy, odstranění vtoku, vložení do reformeru, vložení do vody, spuštění dalšího vstřikování, těsně před dokončením dalšího cyklu vyjmutí reformeru, vyjmutí lopatky, uložení do závěsu a nachystání vstřikovací formy pro další lopatku. Po určení postupu byl připraven program pro vstřikování a nastaven stroj. [29]

Tabulka 2. Návrh pracovního cyklu [29]

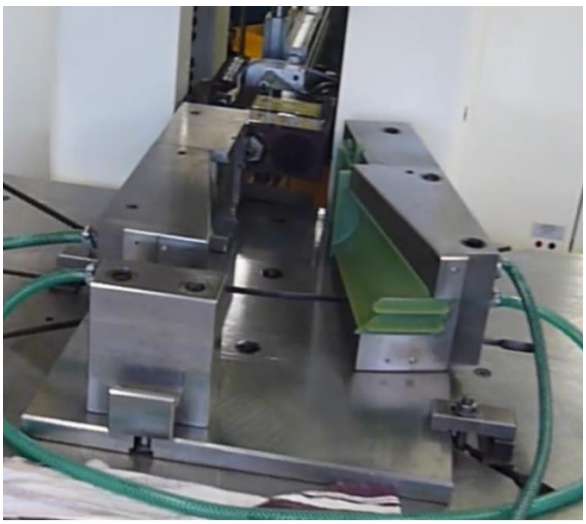
Doba vstřikování lopatky:	90 s
Doba výdrže dotlaku:	210 s
Velikost dotlaku:	3,4 MPa
Čištění trysky:	15 s
Odhadovaná doba vyjmutí z formy:	30 – 40 s
Odhadovaná doba na oříznutí vtoku, vizuální kontrolu a vložení do reformeru:	60 – 70 s
Doba chlazení:	600 s
Doba vyjmutí reformeru z vody, vyjmutí lopatky a odložení lopatky:	30 – 40 s

Následně byl proveden záznam časů jednotlivých operací v průběhu vstřikování. Jsou to časy důležité pro daný cyklus: vyjmutí lopatky z formy, ponoření do reformeru do chladné vodní lázně (10 – 13 °C), výdrž ve vodní lázni, vyjmutí z reformeru a méně důležitý čas – usazení lopatky do závěsu.

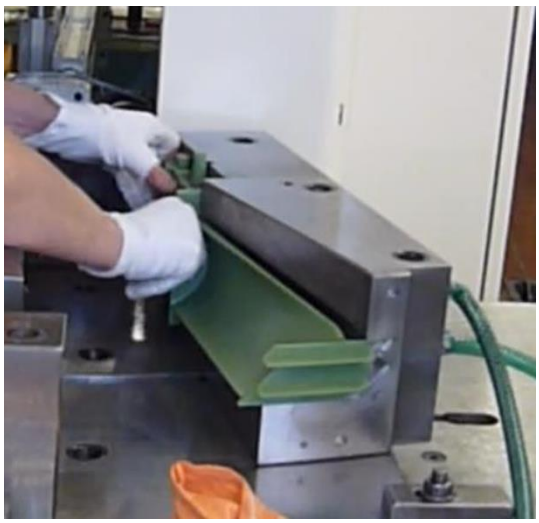


Graf 5. Časy vyjímání lopatek [29]

Problematickým úsekem z hlediska času je vyjmutí lopatky z formy. Na grafu je patrné, že časy vyjímání lopatek jsou značně proměnlivé, a to z důvodu nevhodné formy, která neumožňuje plynulé a časově stálé vyjmutí vstříknutého voskového modelu. Pro zajištění lepšího vyjímání by měla být forma opatřena vyhazovači. Vyjmutí modelu je velmi kritická operace, jelikož má velký vliv na konečné rozměry modelu.



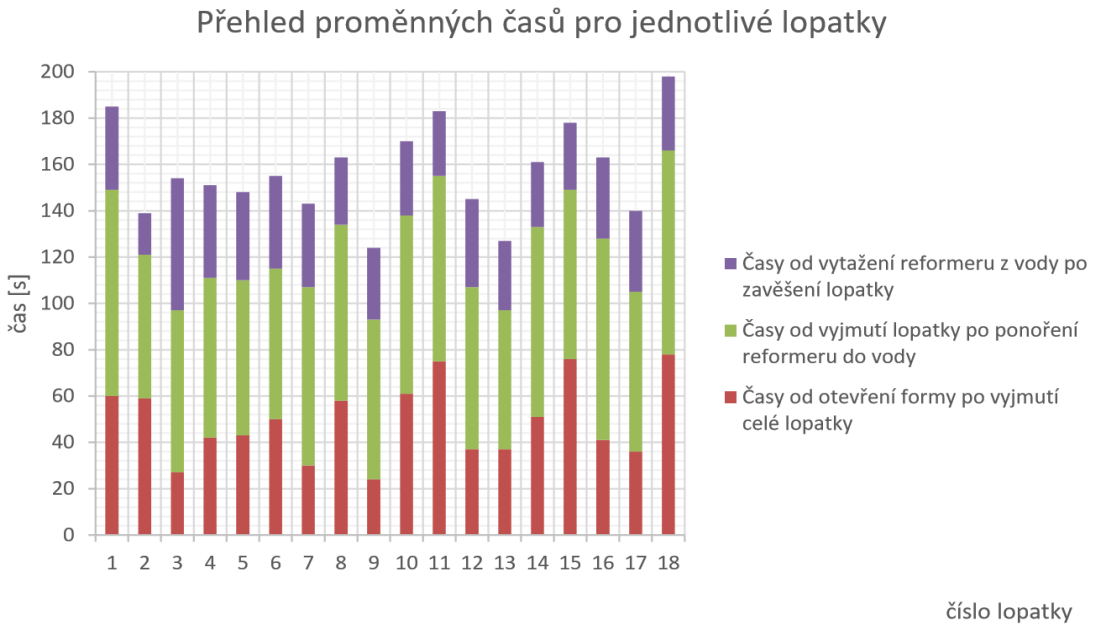
Obr. 21. Forma s voskovým modelem [29]



Obr. 22. Problematické vyjímání z formy [29]

Během vyjímání dochází k deformacím voskového modelu, které vedou k rozdílným rozměrům vůči nominálnímu tvaru. Lopatka se posléze umisťuje do reformeru, který zčásti deformace vyrovná, ale pouze na předem definovaných

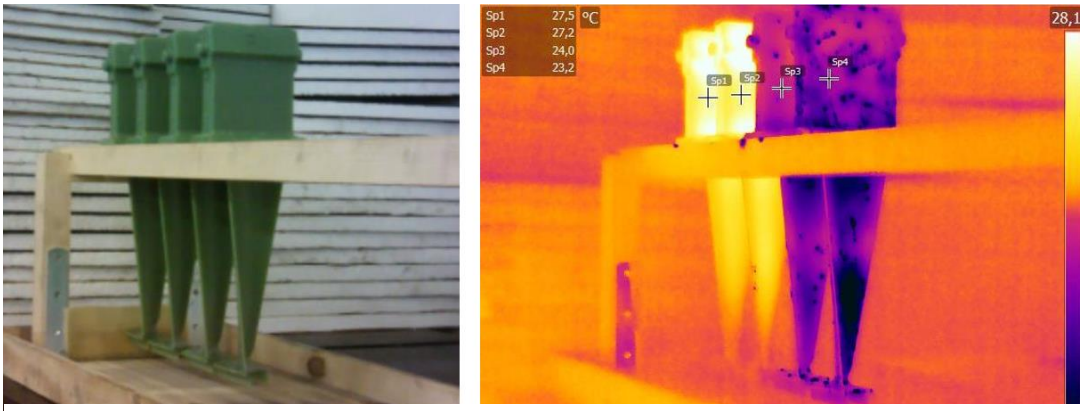
místech, nikoliv po celém povrchu. Je třeba zdůraznit, že obsluha může vyjímání modelů z formy ovlivnit jen minimálně. Podstatné je, jakým způsobem zůstane lopatka ve formě zaklíněna.



Graf 6. Srovnání časů [29]

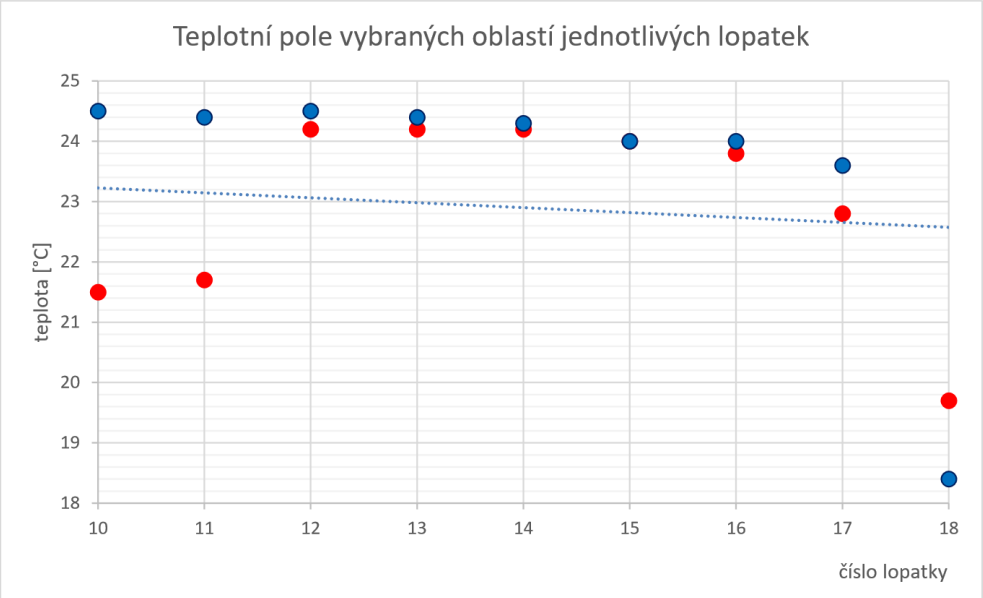
Na grafu 6 je vidět, jak již bylo zmíněno, že nejproblematičtější operací je vyjmutí lopatky z formy. Naopak co se týče časů ponoření reformeru do vody a následné vyjmutí reformeru, můžeme pozorovat stabilnější časové úseky.

Následně proběhlo měření teploty a vyhodnocení termogramů experimentu. Lopatky byly umisťovány do závěsu či do přípravku naležato. V budoucnu bude typ uložení při chladnutí hrát významnou roli, poněvadž uložení má vliv na konečné deformace. Vznik deformací závisí na tom, zda jsou lopatky ihned ponořeny a chlazeny, či jsou uloženy a nechány samovolně chladnout. [29]



Obr. 23. Termogram lopatek v závěsu [29]

U všech lopatek byly sledovány teploty v zámkové části a pak samotný list lopatky a následně byly tyto hodnoty pro přehlednost převedeny do formy grafické.



Graf 7. Teplotní pole oblastí jednotlivých lopatek [29]

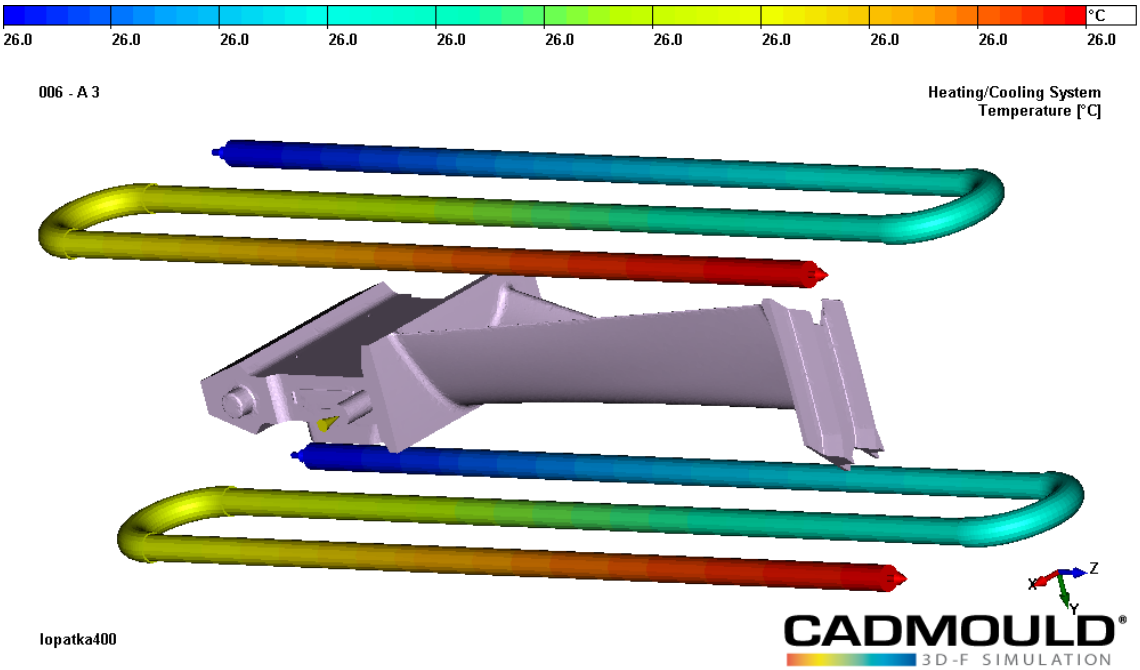
Poznámka: Zámková část je znázorněna červenými body, část listu lopatky modrými.

Je zřejmé, že lopatky 10 a 11 vykazují menší teploty zámkové části. Je to způsobeno tím, že tyto lopatky byly důkladně zachlazeny, proto hmotnější část lopatky nestačila za daný čas 3000 sekund vyrovnat teplotu s okolní teplotou. [29]

4.2.2 Simulace vstřikování

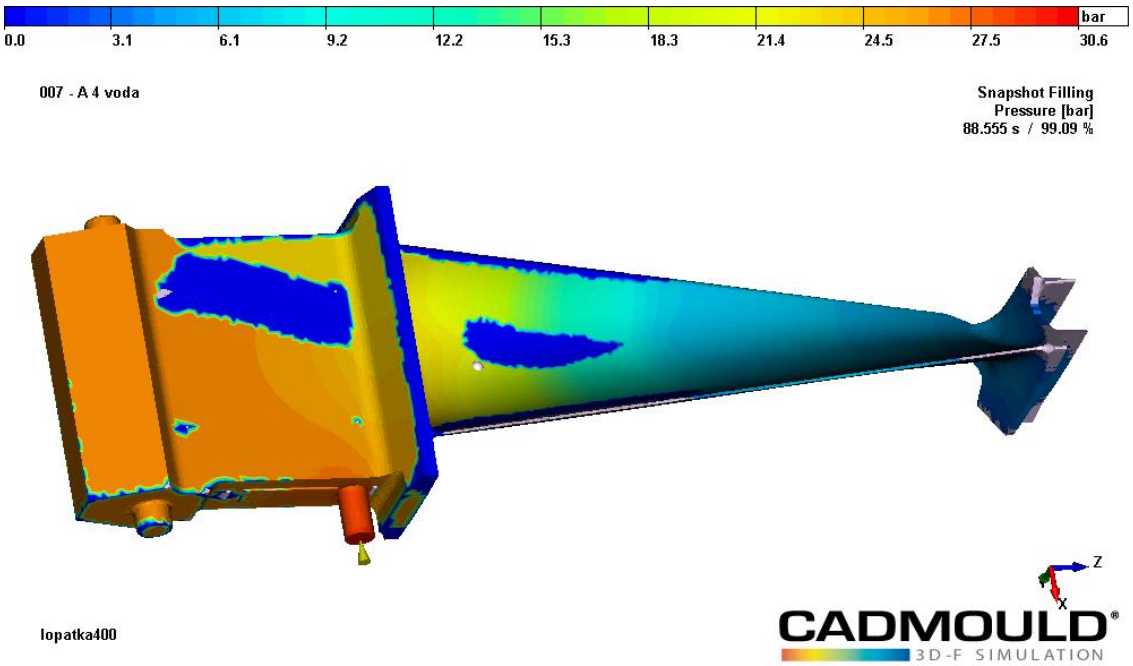
Pro proces simulace vstřikování lopatky byly stanoveny tyto počáteční podmínky.

- **Materiál plastového dílu:** Zelený vosk - No-Flow teplota = 55°C
- **Materiál zálitku**: Zelený vosk No-Flow teplota = 55°
- **Temperační kanály a teplota na povrchu tvarové dutiny:** Teplota temperační vody: 26 °C

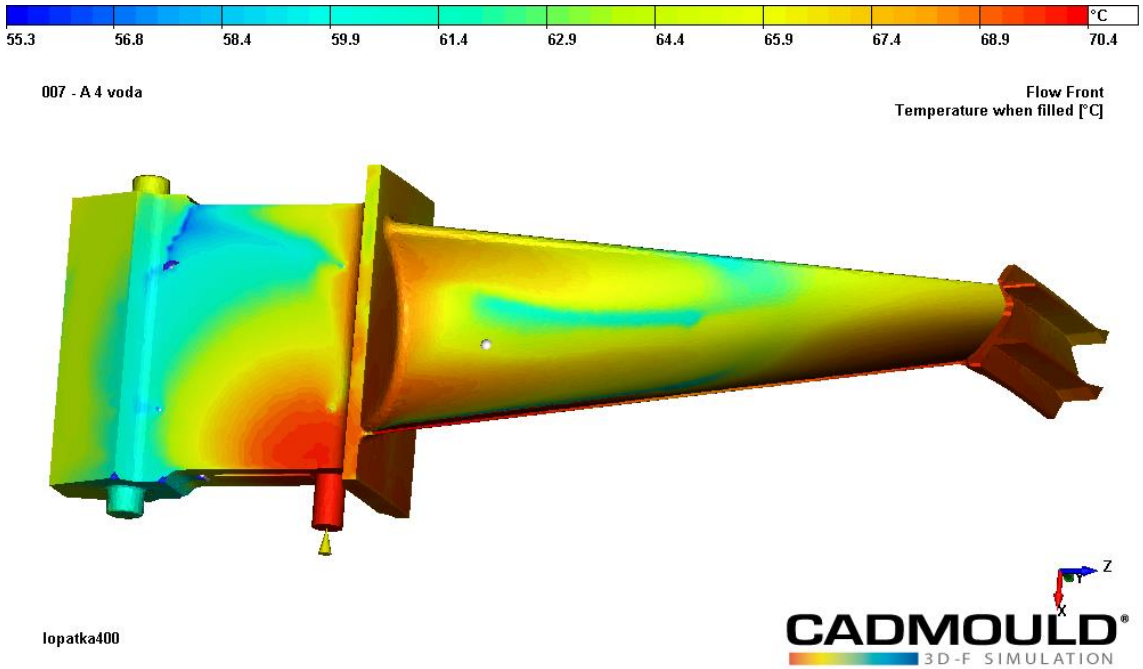


Obr. 24. Temperační systém

- **Technologie:** Vstřikovací čas 88.5 s, teplota taveniny 68°C -70°C, doba dotlaku 210 s, velikosti dotlaku 34 barů, nastavená doba dotlaku a chlazení 215 s, nastavená doba cyklu 335 s. Vstřikovací tlak při 99 % naplnění: 31 barů.

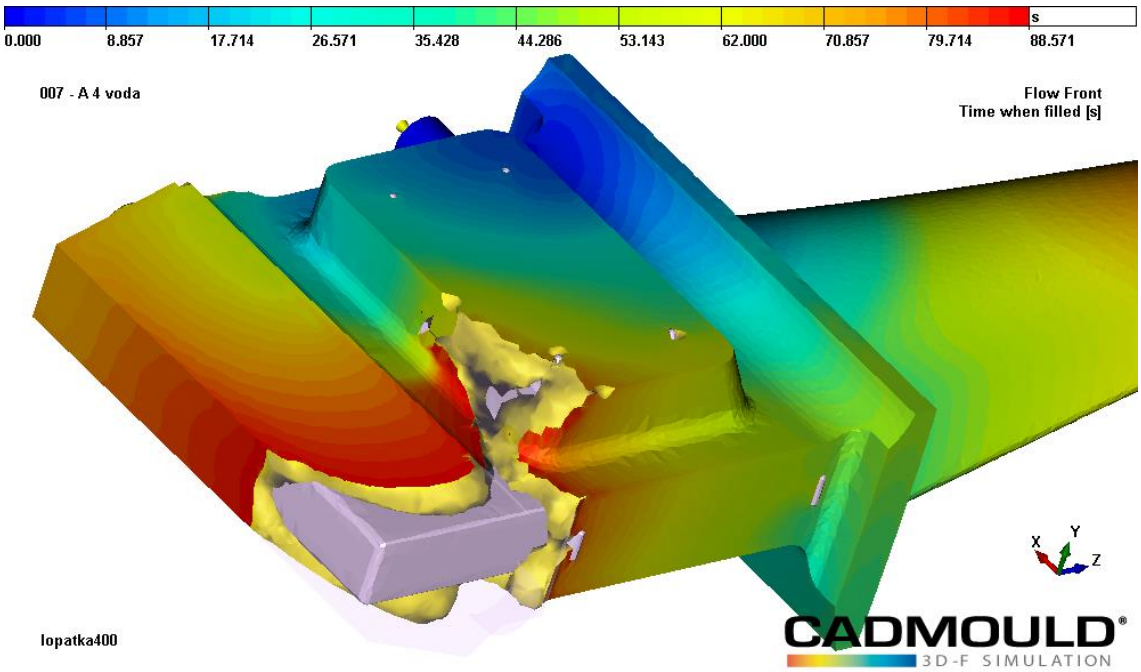


Obr. 25. Vstřikovací tlak při 99% naplnění



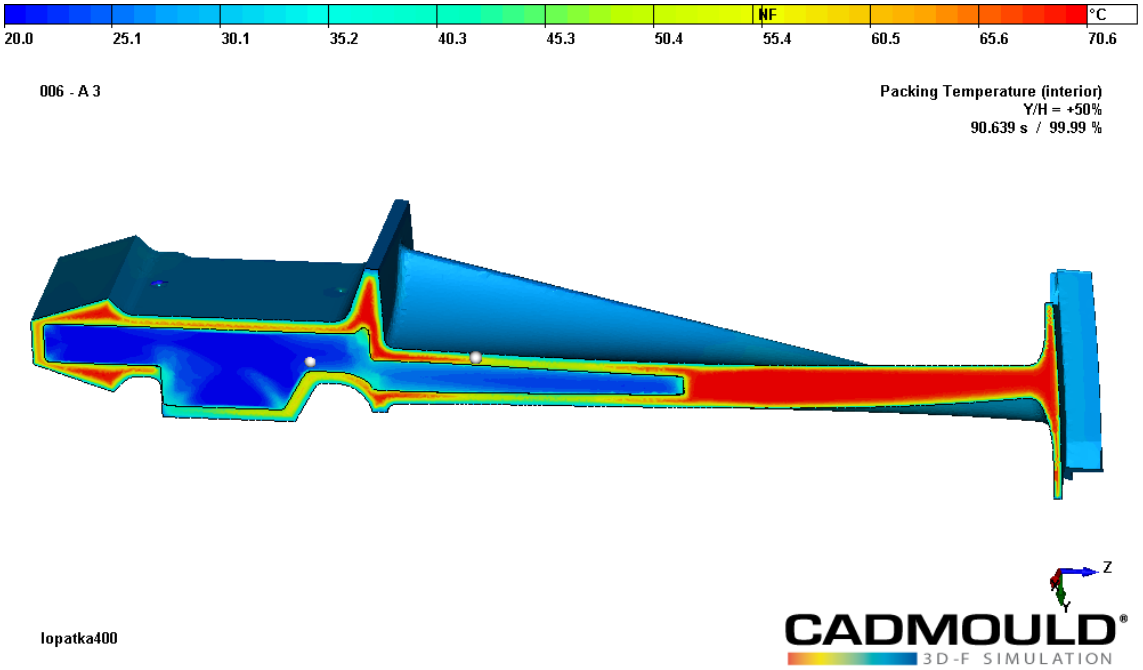
Obr. 26. Teplota na čele proudící taveniny

Při postupném plnění můžeme pozorovat oblasti, ve kterých by při reálném plnění mohlo docházet k uzavírání vzduchových bublin. V našem případě se nejedná o zásadní problém, protože se jedná pouze o modelovou ukázku lopatky.



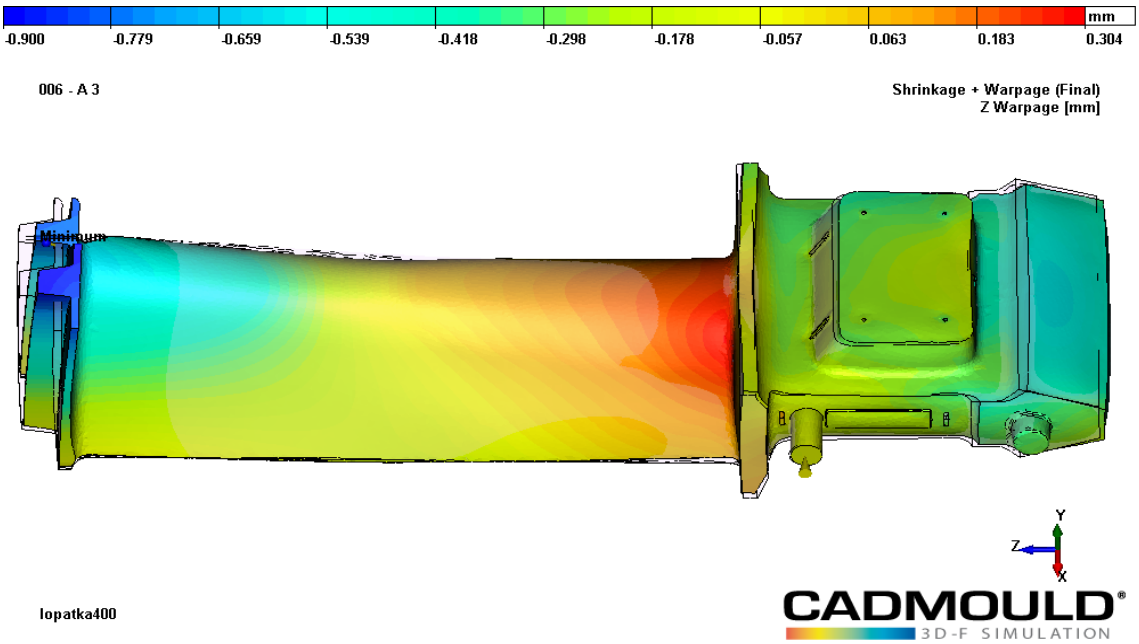
Obr. 27. Průběh plnění

Teplotní rozložení při zvoleném 90 vteřinovém cyklu ukazuje, že zálitek se pohybuje v teplotách okolo 20°C, zbylá část vstříknutého materiálu má teplotu cca 70°C. Výjimku tvoří postupně chladnoucí povrch, který vykazuje teploty přibližně 30°C. Při zvolení delšího vstřikovacího cyklu nebudou teploty takto razantně rozdílné, naopak čím delší čas cyklu, tím budou vyrovnanější. Po čase 5000 s se teplota vyrovná a celá lopatka vykazuje teplotu 21°C.

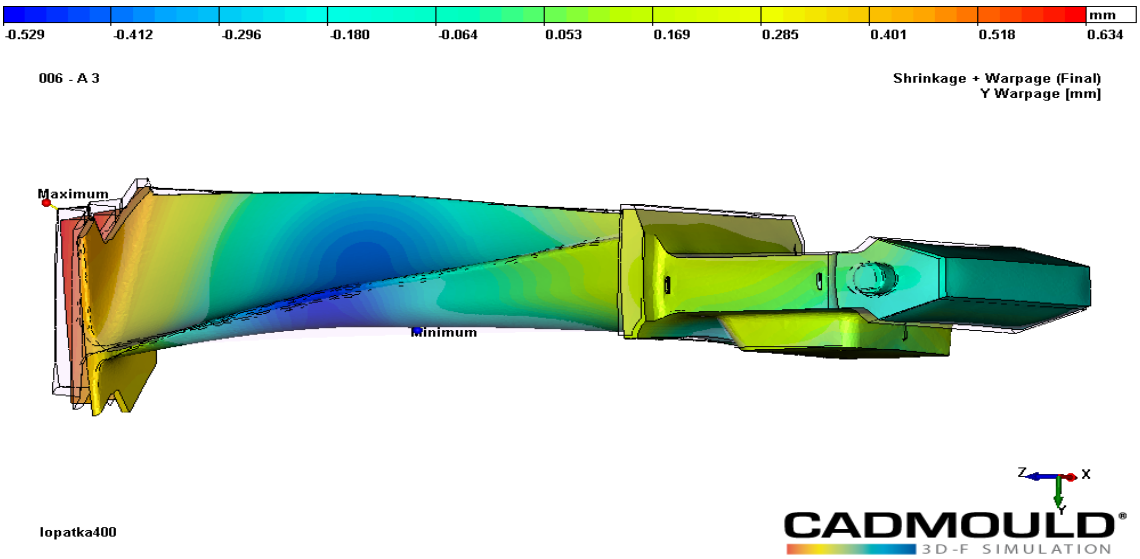


Obr. 28. Teplota vosku v 90,6 s cyklu

Deformace lopatek:



Obr. 29. Redukovaná deformace ve směru Z



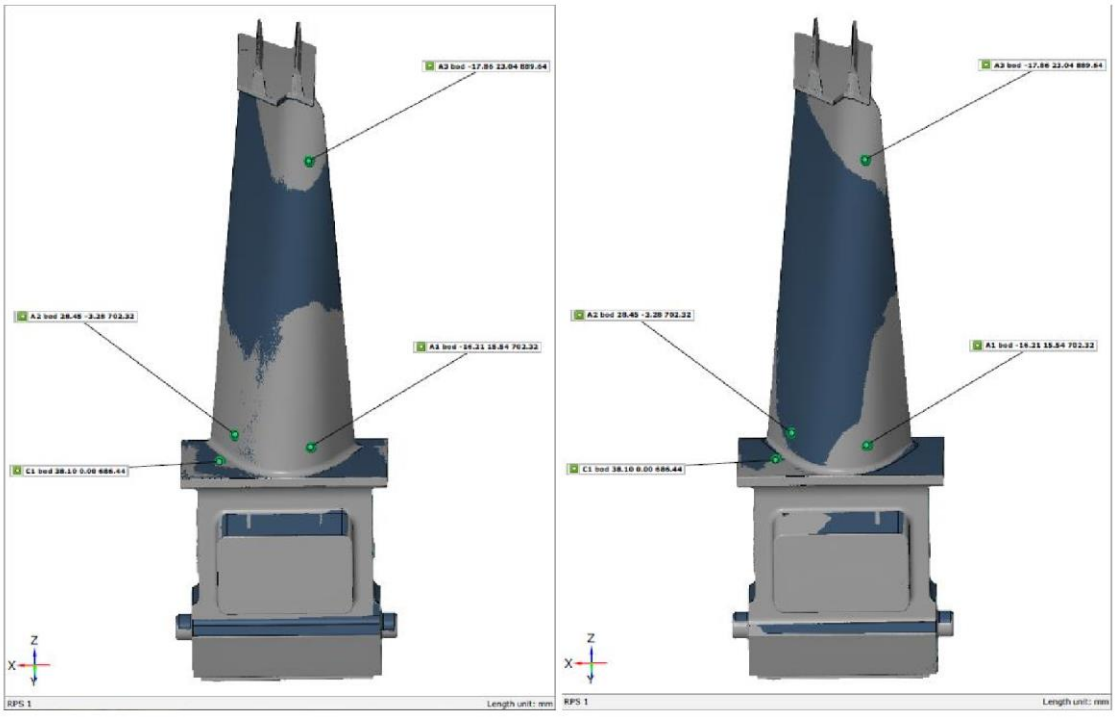
Obr. 30. Redukovaná deformace ve směru Y

Programem vypočítané průměrné smrštění činí 0.9 %. Obrázky zobrazují redukovanou deformaci lopatky ve směru Y a Z (Redukovaná deformace = od vypočítaného smrštění a deformace je „odečten“ rozměrový vliv průměrného smrštění. Jinými slovy: Jedná se o zobrazení deformace vůči konstrukci upravené o vypočítané průměrné smrštění.

4.2.3 3D sken reálných lopatek

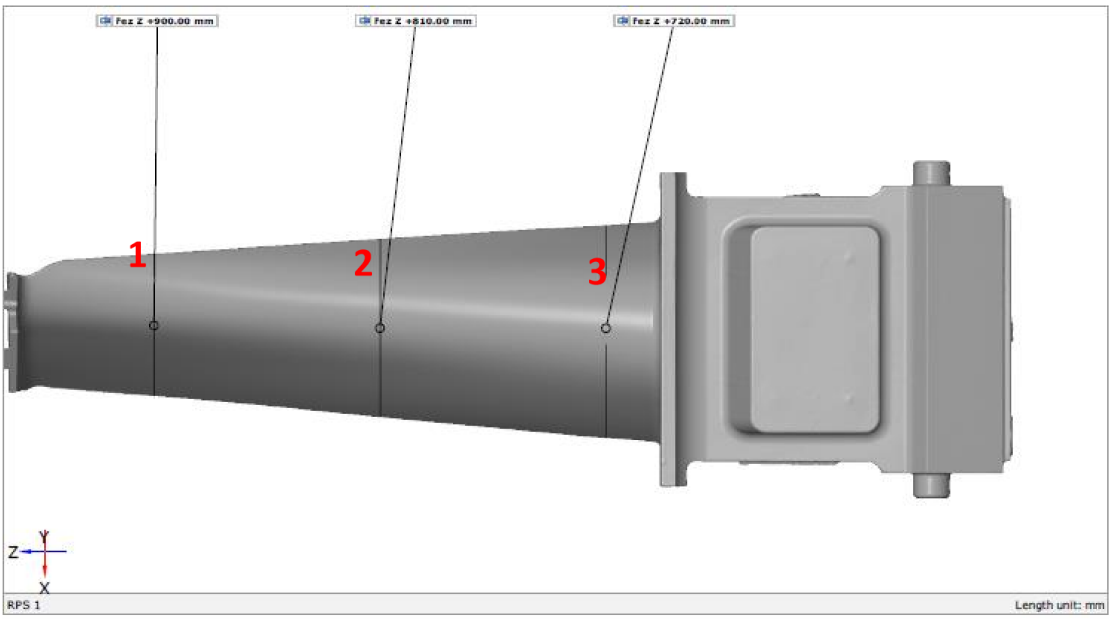
Pro skenování byly vybrány 2 lopatky, každá s jiným průběhem vyjímání z formy. Tedy lopatka, která šla bez potíží vyjmout a lopatka, která se zprvu neodlepila od pravé části formy. Z tohoto výběru předpokládáme, že hlavním důvodem rozměrové stability je právě proces vyjmutí lopatky z formy, a to z důvodu toho, že jsou voskové lopatky měkké a mohou se snadno deformovat.

Na Obr. 31 je patrný rozměrový rozdíl mezi 3D skenem lopatek a CAD modelem. Rozdíl je pro přehlednost vyjádřen tmavě modrou barvou. [29]



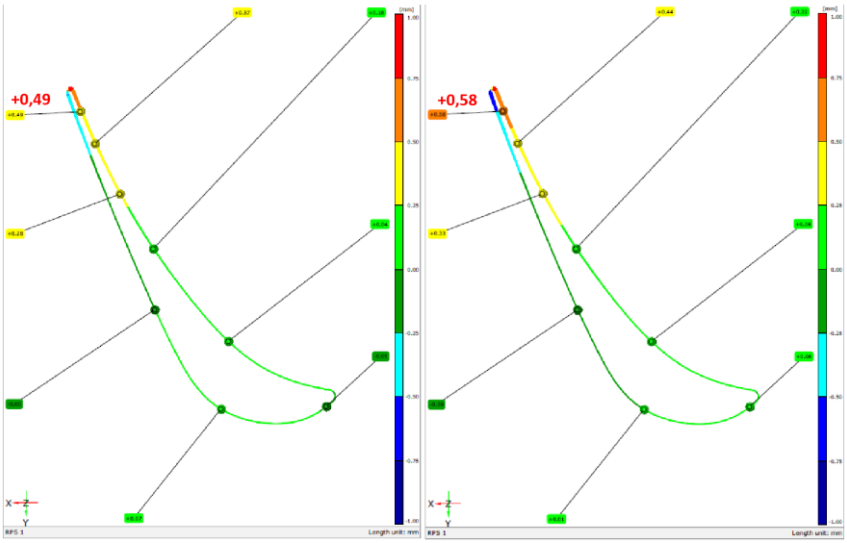
Obr. 31. 3D sken lopatek [29]

Na rozměrové analýze obou lopatek blíže demonstruji rozměrové odchylky.

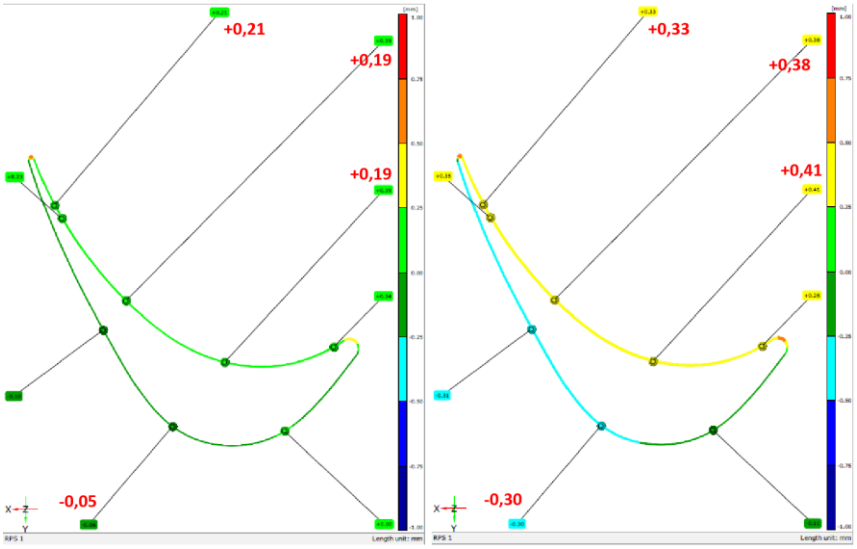


Obr. 32. Umístění řezů pro vyhodnocení [29]

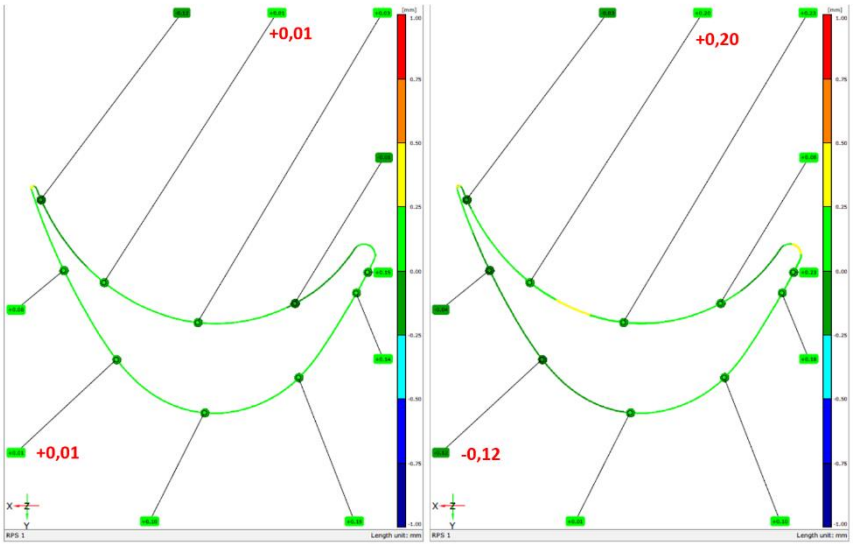
Srovnání lopatek nám říká, že lopatka 3 se daleko lépe blíží nominálnímu tvaru. Minimální odchylka byla +0,00 mm, maximální pak +0,58 v případě druhé lopatky. Zámková oblast lopatky je v obou případech podobná požadovanému tvaru. [29]



Obr. 33. Řez 1 [29]



Obr. 34. Řez 2 [29]



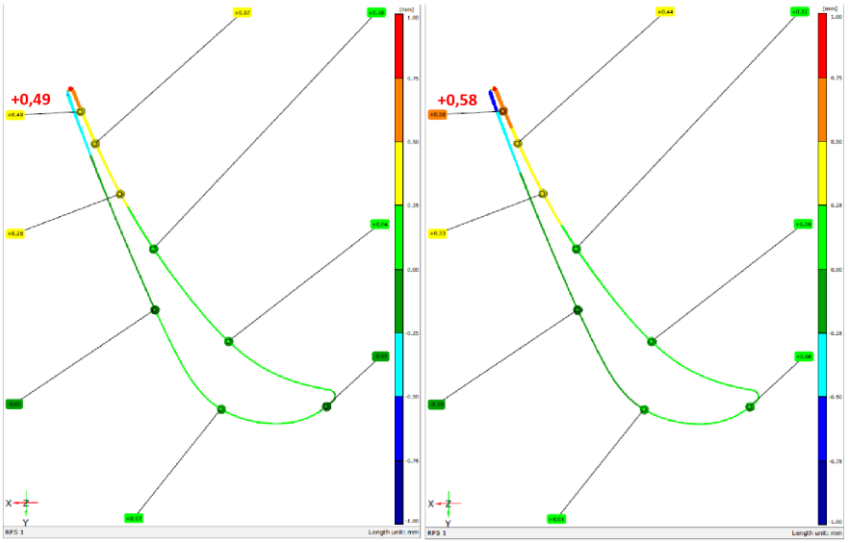
Obr. 35. Řez 3 [29]

4.3 Vyhodnocení

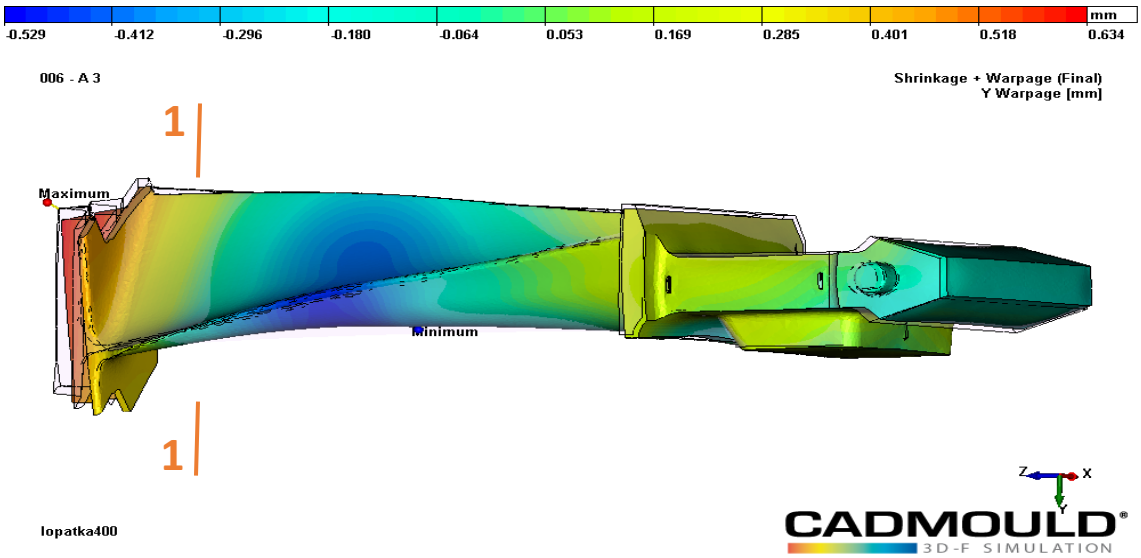
Využití simulačního softwaru je velkou výhodou při tvorbě technologické analýzy či tvorbě výrobního postupu, protože dokáže ve velké míře nahradit reálný pokus výroby modelu. Hodnoty naměřené 3D skenem součásti a hodnoty vyhodnocené simulací v programu Cadmould se téměř neliší, respektive poskytují srovnatelné závěry. V porovnání rozměrové přesnosti vycházím z Obr. 37, 39, 41, na nichž vidíme redukovanou deformaci ve směru Y určenou softwarem, a dále je srovnávám s Obr. 36, 38, 40, tedy s jednotlivými řezy reálnou součástí. Pro funkční části součásti je třeba, aby se odchylky od ideálního rozměru pohybovaly v hodnotách ± 0,25 mm.

Za funkční části lopatky považujeme její zámkovou část a koncovou část, jelikož je třeba, aby lopatka mohla být bez problému usazena do přípravku – turbíny. Tudíž nejpřísnější rozměrová kritéria klademe na tyto dvě části.

Při porovnání Obr. 36 a 37 vidíme, že koncová část lopatky víceméně vyhovuje toleranci, tzn. hodnoty se pohybují v rozmezí ± 0,25 mm, až na část břitu, kde vidíme, že je hodnota deformace vyšší, než požadovaných 0,25 mm .

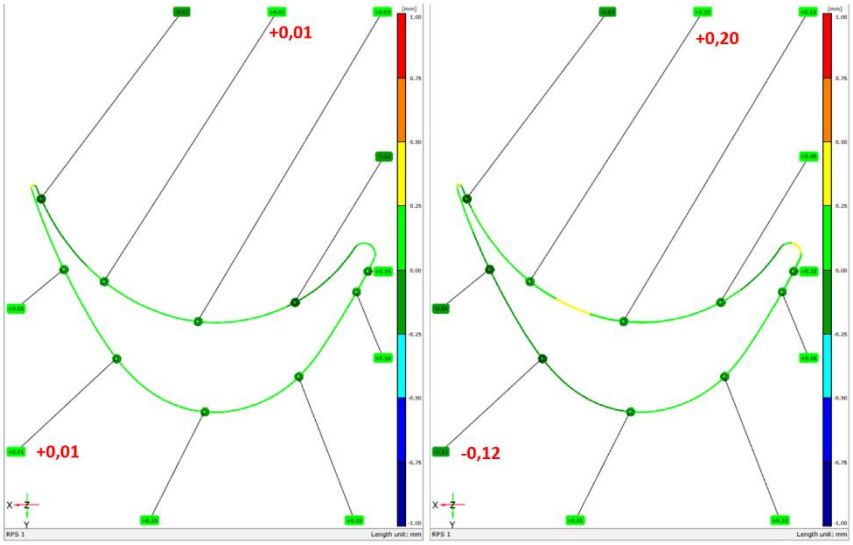


Obr. 36. Řez 1 [29]

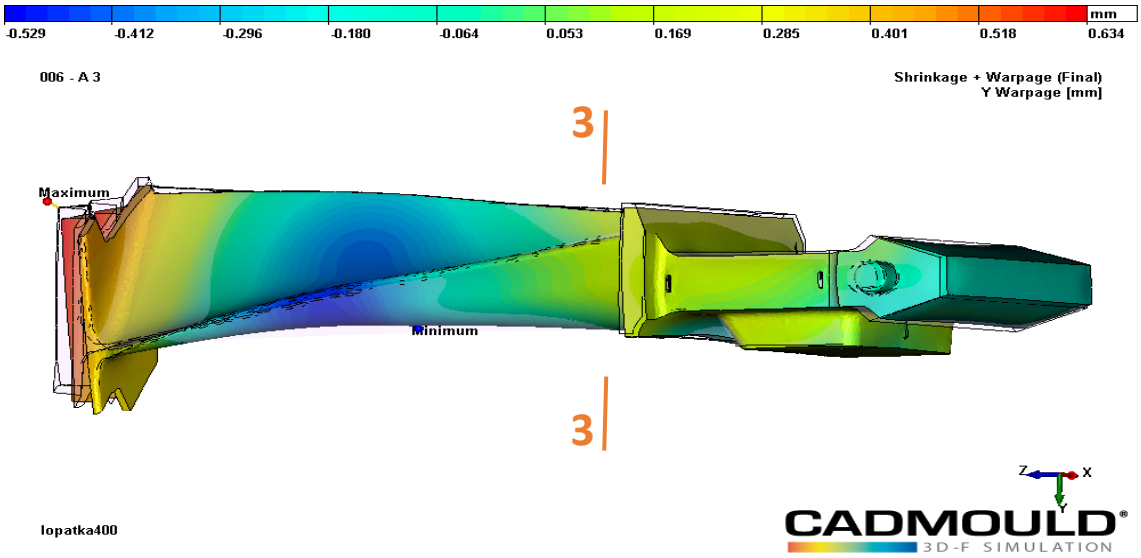


Obr. 37. Redukovaná deformace ve směru Y – vyznačení řezu 1

Pokud bychom se zaměřili na porovnání Obr. 38 a 39, tedy zámkové části lopatky, vidíme, že odchylky nepřekračují zvolenou toleranci, resp. u simulované součásti se odchylka pohybuje okolo hodnoty +0,17 mm, u reálné součásti vidíme hodnotu +0,2 mm.

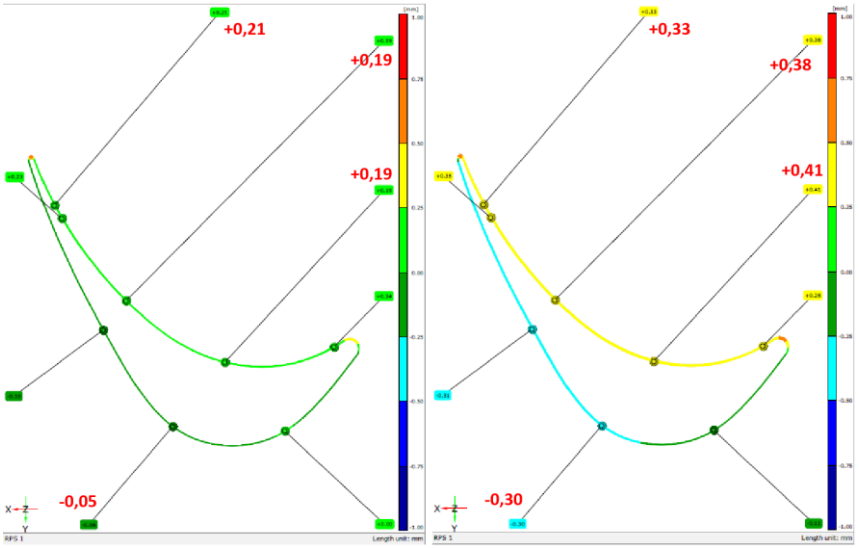


Obr. 38. Řez 3 [29]

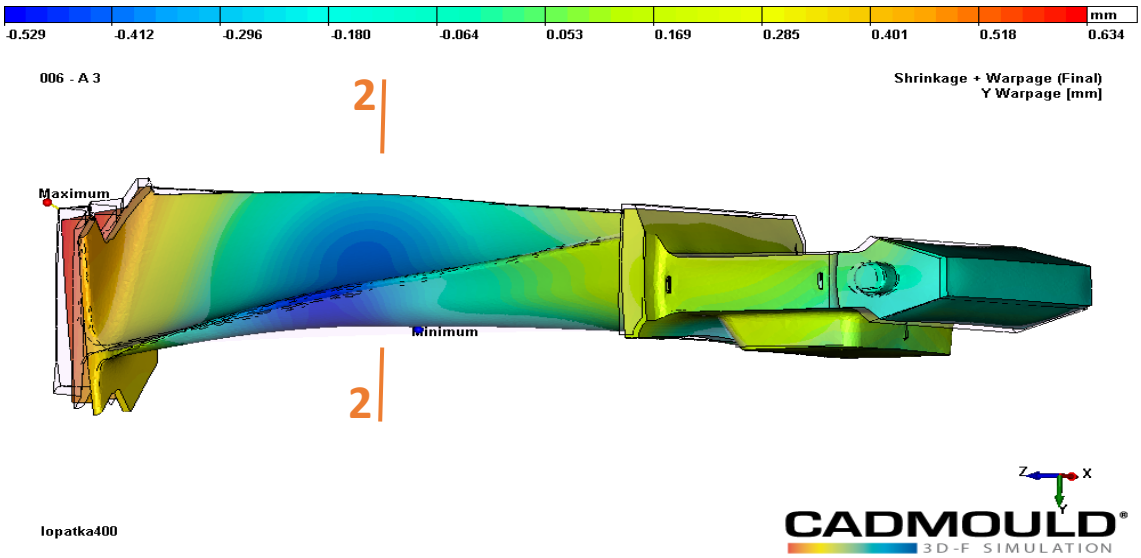


Obr. 39. Redukovaná deformace ve směru Y – vyznačení řezu 3

Odchylky překračující toleranci se vyskytují zhruba uprostřed lopatky, tedy při pohledu na Obr. 40 a 41 vidíme hodnoty ±0,4 mm. Pro použitelnost tyto hodnoty nehrají zásadní roli.



Obr. 40. Řez 2 [29]



Obr. 41. Redukovaná deformace ve směru Y – vyznačení řezu 2

Dalším aspektem přesnosti výroby lopatky je tolerance natočení lopatky 0,5°, což ovšem z této simulace nelze vyčíst. Tato kontrola by byla předmětem další softwarové studie.

Na závěr tedy mohu konstatovat, že výsledky simulace a výsledky 3D skenu reálné součásti se téměř neliší. Rozdíly mezi hodnotami ze simulace a z 3D skenu jsou zapříčiněny softwarovým prostředím, které si samo vyhodnocuje počátek souřadnic a od něj určuje odchylky. To ovšem nemá vliv na výsledek, který je v obou případech stejný.

Je tedy výhodné využívat simulační softwary, protože dokáží s velkou přesností nasimulovat reálný proces výroby a umožňují tak velkou flexibilitu při konstrukci forem i při samotném procesu vstřikování.

5. Seznam obrázků

Obr. 1. Píst - tlumič [3] 8
Obr. 2. Pružina [3] 8
Obr. 3. Kelvin – Voigtovo schéma [3] 9
Obr. 4. Maxwellovo schéma [3] 9
Obr. 5. Kombinace schématu Kelvin - Voigt a Maxwell [3] 11
Obr. 6. Nemechanické modely [1] 13
Obr. 7. Logo AD Moldflow [6] 15
Obr. 8. Nerovnoměrné plnění formy [8] 16
Obr. 9. Optimalizace vtokové soustavy [8] 16
Obr. 10. Logo Cadmould [10] 17
Obr. 11. Tvorba sítí [12] 18
Obr. 12. Čas plnění [12] 18
Obr. 13. Logo Moldex [14] 19
Obr. 14. Rozložení zbytkových napětí při plnění [17] 20
Obr. 15. Zbytková napětí - fotoelasticimetrie [17] 20
Obr. 16. Logo Sigmasoft [19] 21
Obr. 17. Náhrada hliníkové součásti za plastovou [21] 22
Obr. 18. Proces plnění - čas plnění [21] 22
Obr. 19. Stanovení modulu pružnosti pro voskový model [28] 25
Obr. 20. Vzorky pro provedení zkoušky ohybem [28] 25
Obr. 21. Forma s voskovým modelem [29] 27
Obr. 22. Problematické vyjímání z formy [29] 27
Obr. 23. Termogram lopatek v závěsu [29] 28
Obr. 24. Temperační systém 30
Obr. 25. Vstřikovací tlak při 99% naplnění 30
Obr. 26. Teplota na čele proudící taveniny 31
Obr. 27. Průběh plnění 31
Obr. 28. Teplota vosku v 90,6 s cyklu 32
Obr. 29. Redukovaná deformace ve směru Z 33
Obr. 30. Redukovaná deformace ve směru Y 33
Obr. 31. 3D sken lopatek [29] 34
Obr. 32. Umístění řezů pro vyhodnocení [29] 35
Obr. 33. Řez 1 [29] 35
Obr. 34. Řez 2 [29] 36
Obr. 35. Řez 3 [29] 36
Obr. 36. Řez 1 [29] 38
Obr. 37. Redukovaná deformace ve směru Y – vyznačení řezu 1 38
Obr. 38. Řez 3 [29] 39
Obr. 39. Redukovaná deformace ve směru Y – vyznačení řezu 3 39
Obr. 40. Řez 2 [29] 40
Obr. 41. Redukovaná deformace ve směru Y – vyznačení řezu 2 40

6. Seznam grafů

Graf 1. Časová závislost deformace [1] 4
Graf 2. Šíření deformace a její zpoždění [1] 4
Graf 3. Závislost napětí na čase [1] 6
Graf 4. Závislost modulu pružnosti na napětí a teplotě [28] 25
Graf 5. Časy vyjímání lopatek [29] 27
Graf 6. Srovnání časů [29] 28
Graf 7. Teplotní pole oblastí jednotlivých lopatek [29] 29

7. Zdroje

[1] MALKIN, Aleksander Yakovlevich a Avraam I. ISAYEV. *Rheology: concepts, methods, and applications*. 3rd edition. Toronto: ChemTec Publishing, 2017. ISBN 978-1-927885-21-5

[2] BLAND, D. R. *The theory of linear viscoelasticity*. Mineola, New York: Dover Publications, 2016. ISBN 978-0-486-46269-1.

[3] HOWARD A. BARNES. *A handbook of elementary rheology*. Aberystwyth: Univ. of Wales, Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2000. ISBN 0953803201.

[4] SYKUTERA, Dariusz a Marek BIELIŃSKI. *THE USE OF INJECTION MOULDING PROCESS SIMULATION SOFTWARE CADMOULD FOR INJECTION MOULD DESIGNING* [online]. 2018 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/267862232

[5] TRÉGER, Matej. *Možnosti odstránenia chýb na termoplastovom výlisku*. Bratislava, 2010. Bakalářská práce. Slovenská technická univerzita v Bratislave.

[6] [online]. In:. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: https://autodesk.majentasolutions.com/majenta-academy/autodesk-software-courses/

[7] Autodesk Moldflow. *Autodesk* [online]. 4. 2. 2014 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: https://www.autodesk.com/products/moldflow/features

[8] KRISHNAMOORTHY. *Accurate, Optimized Design: Runner Balancing Module in Autodesk Simulation Moldflow helps locate and resolve multi cavity mold issue.* [online]. In: . s. 2 [cit. 2018-04-29].

[9] *Plastic Injection Molding Features* [online]. Autodesk Moldflow [cit. 2018-05-29]. Dostupné z: https://www.autodesk.com/products/moldflow/features

[10] *Cadmould* [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: http://www.simcon-worldwide.com/fileadmin/user_upload/SimconNews-Bilder/2016-03/

[11] *Cadmould® 3D-F a Cadmould® 3D* [online]. Moravské Knínice: Plasty Gabriel, 2018 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: http://cadmould.cz/software/cadmould-3d-f/

[12] EDS. VLADIMIR VASEK ...[ET AL.]. *Recent researches in automatic control: 13th international conference on automatic control, modelling & simulation : Lanzarote, Canary Islands, Spain, May 27-29, 2011*. Lanzarote: WSEAS, 2011. ISBN 9781618040046.

[13] *Cadmould plastic injection - Youtube* [online]. Youtube [cit. 2018-05-29]. Dostupné z: https://www.youtube.com/results?search_query=cadmoul+plastic+injecti o+n

[14] *Moldex3D Software Solution Partner - Kruse Analysis* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: https://kruseanalysis.com/moldex3d-sales/

[15] *Moldex 3D* [online]. Simulplast, 2009 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: http://www.simulplast.cz/moldex3d.php
[16] *Technický portál: Moldex3D/eDesign – nejefektivnější nástroj 3D simulací vstřikování plastů* [online]. 2006 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/moldex3d-edesign-nejefektivnejsi-nastroj-3d-simulaci-vstrikovani-plastu_17988.html
[17] CHANG, Yuan-Jung. *SIMULATIONS AND VERIFICATIONS OF TRUE 3D OPTICAL PARTS BY INJECTION MOLDING PROCESS* [online]. 2008, , 6 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: http://www.moldex3d.com/jp/assets/2011/09/SMGG5H7.pdf
[18] *Moldex 3D simulation* [online]. Youtube [cit. 2018-05-29]. Dostupné z: https://www.youtube.com/results?search_query=moldex+3d+simulation
[19] *Sigmasoft logo* [online]. In: . [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: https://www.k-online.com/cgi-bin/md_k/custom/pub/show.cgi/Web-ExhDatasheet/exh_datasheet?lang=2&oid=44885&exh_id=294
[20] *Sigmasoft* [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: http://www.sigmasoft.de/sigmasoft-virtual-molding/virtual-molding/virtual-molding-principle/
[21] KALLIEN, Lhotar. *Optimization of the Injection Moulding Process for Thermoplasts With 3D Simulation* [online]. In: . s. 9 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: http://www.sigmasoft.de/ftp/web/_data/Optimization_of_the_Injection_Moulding_Process_for_Thermoplastics.pdf
[22] *Sigmasoft simulation* [online]. Youtube [cit. 2018-05-29]. Dostupné z: https://www.youtube.com/results?search_query=sigmasoft+simulation
[23] *Autodesk simulation Moldflow: Plastics made perfect* [online]. Autodesk, 2015 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: http://www.imaginit.com/portals/4/documents/simulation-moldflow-2015-detail-brochure.pdf
[24] *Cadmould 3D-F simulation* [online]. Moravské Knínice: Plasty Gabriel [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: http://cadmould.cz/wp-content/uploads/2013/02/SIMCON-13-009_Produktblatt_Tschechisch_RZ.Warp-Expert_Bc.20150107.pdf
[25] *Cadmould 3D-F simulation* [online]. Moravské Knínice: Plasty Gabriel [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: http://cadmould.cz/wp-content/uploads/2017/05/Produktblatt_Cadmould_Foam.20151006_orez_OPT.pdf
[26] *Cadmould 3D-F simulation* [online]. Moravské Knínice: Plasty Gabriel [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: http://cadmould.cz/wp-content/uploads/2017/05/Produktblatt_3D-T-Box.20170220_orez_OPT.pdf
[27] *Molding Inovation* [online]. Moldex 3D, 2017 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: https://moldex3d.app.box.com/s/44y1a4dsg8uv66fcj36yt7t8gnmqt3an

[28] HERMAN, Aleš, Irena KUBELKKOVÁ, Bohumír BEDNÁŘ a František TATÍČEK. *Viskoelastické vlastnosti voskových směsí*. Výzkumná zpráva U12133/2017/024. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, 2017. 83 s.
[29] HERMAN, Aleš, Irena KOLAŘÍKOVÁ a Bohumír BEDNÁŘ. *Výroba série lopatek T400D468*. Výzkumná Zpráva U12133/2017/026. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, 2017. 43 s.