



Numerická simulace procesu lisování přesných optických elementů

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T010 – Konstrukce strojů a zařízení
Autor práce: **Bc. Vojtěch Novák**
Vedoucí práce: prof. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.



Numerical Simulation of Press Molding Process for Precise Optics

Master thesis

Study programme: N2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2302T010 – Machine and Equipment Systems
Author: **Bc. Vojtěch Novák**
Supervisor: prof. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.





Zadání diplomové práce

Numerická simulace procesu lisování přesných optických elementů

Jméno a příjmení: **Bc. Vojtěch Novák**
Osobní číslo: S17000273
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukce strojů a zařízení
Zadávající katedra: Katedra energetických zařízení
Akademický rok: **2018/2019**

Zásady pro vypracování:

Proces lisování přesné optiky patří mezi nejmodernější výrobní technologie. Samotný proces je náročný hlavně s ohledem na materiálové vlastnosti výlisku a jejich změnu s měnící se teplotou. Pro návrh technologie je důležité ovládat nástroje pro predikci výsledků procesu lisování. Jednou z možností je provádění numerických simulací. Diplomová práce musí obsahovat následující body:

1. Popis procesu lisování optických elementů.
2. Přehled používaných technologií při lisování.
3. Popis používaných materiálových modelů pro numerické simulace.
4. Numerická simulace procesu lisování.
5. Porovnání výsledků simulace s výsledky experimentů.
6. Zhodnocení výsledků.

Rozsah grafických prací: max. 20 stran
Rozsah pracovní zprávy: 60 stran
Forma zpracování práce: tištěná



Seznam odborné literatury:

- [1] PALANTHANDALAM, Madapusi S. *A computational tool for numerical prediction of precision glass molding process*. Master thesis. University of Florida, 2009.
- [2] ANURAG, Jain. *Experimental study and numerical analysis of compression molding process for manufacturing precision aspherical glass lenses*. Dissertation. The Ohio State University, 2006.
- [3] MÁLEK, Jiří a Jana SHÁNĚLOVÁ. *Structural relaxation of As₂Se₃ glass and viscosity of supercooled liquid*. In *Journal of Non-crystalline Solids*, 2005, Vol. 351, pp. 3458-3467.
- [4] Schott Glass Inc, *Products and applications*. <http://www.schott.de>.
- [5] KUNOSIC, Selma. *Study of the glass press molding proces*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016.

Vedoucí práce: prof. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.
Katedra energetických zařízení
Datum zadání práce: 1. listopadu 2018
Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2020


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci 1. února 2019



Numerická simulace procesu lisování přesných optických elementů

ANOTACE:

Diplomová práce zpracovaná na téma „*Numerická simulace procesu lisování přesných optických elementů*“ se zabývá porovnáním skutečného lisování a numerické simulace vzhledem k rozměrové přesnosti výsledných vylisovaných elementů.

V teoretické části je řešena problematika vlastností skla, materiálových modelů, sférické a asférické optiky a samotného procesu lisování. Pozornost je kladena na viskozitu skla, která se mění se změnou teploty a ovlivňuje tak výsledné rozměry výlisku.

Praktická část obsahuje získání důležitých parametrů pro vytvoření numerické simulace, samotnou simulaci v softwaru GPM Sim. 2.0, lisování elementů na lisu Nanotech 140 GPM, rozměrové měření výlisků a porovnání rozměrů s hodnotami získaných ze simulace.

Klíčová slova: NUMERICKÁ SIMULACE, LISOVÁNÍ SKLENĚNÝCH ELEMENTŮ, LISOVACÍ STROJ NANOTECH 140 GPM, SOFTWARE GPM SIM 2.0, ROZMĚROVÁ PŘESNOST

Numerical Simulation of Press Molding Process for Precise Optics

ANNOTATION:

The diploma thesis "*Numerical simulation of the process of pressing optical elements*" deals with the comparison of the actual pressing and numerical simulation with respect to the dimensional accuracy of the resulting pressed elements.





The theoretical part deals with the properties of glass, material models, spherical and aspherical optics and the pressing process itself. Attention is paid to the viscosity of the glass, which changes with the change in temperature and thus affects the resulting dimensions of the compact.

The practical part contains important parameters for numerical simulation, simulation in software GPM Sim. 2.0, molding elements on the Nanotech 140 GPM, dimensional measurement of moldings and comparison of dimensions with values obtained from the simulation.

Key words: THE NUMERICAL SIMULATION, PRESS GLASS ELEMENTS, PRESS MACHINE NANOTECH 140 GPM, SOFTWARE GPM SIM 2.0, DIMENSIONAL ACCURACY

Zpracovatel:	Technická univerzita v Liberci, Katedra energetických zařízení
Dokončeno:	2019
Počet stran:	78
Počet příloh:	3
Počet obrázků:	39
Počet grafů:	14
Počet tabulek:	11





Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS STAG se shodují.

Datum: 29. 4. 2019

Podpis:





Poděkování

V první řadě děkuji panu prof. Ing. Tomáši Vítovi, Ph.D. za možnost psát pod jeho vedením tuto diplomovou práci. Děkuji za veškerou pomoc, podporu, trpělivost a doporučení lepší varianty u důležitých milníků během psaní této práce.

Děkuji Ing. Martinu Veselému za ochotu být mým konzultantem na půdě centra Toptec v Turnově. Děkuji mu za veškerou pomoc, podporu, důležité a věcné rady, za udávaný směr, jeho čas věnovaný společným konzultacím a za celkové přiblížení pohledu na danou problematiku z vědecké úrovně.

Dále děkuji celému centru Toptec v Turnově za poskytnutí měřících přístrojů, lisovacího stroje, simulačního programu, vzorků a také děkuji pohodovému kolektivu za poskytovanou pomoc, týmového ducha a zázemí.

Dále velmi děkuji mé matce Marii Novákové a mému otci Martinu Novákovi za všechnu psychickou i finanční podporu při studiích, za rodinné zázemí a za možnost se naplno věnovat povinnostem spjatým se studiem na vysoké škole.

Dále děkuji mé partnerce Kristýně Harisové za láskyplnou podporu při studiích, za toleranci, trpělivost a gramatickou pomoc při vypracování diplomové práce.

K závěru děkuji všem, kteří mi během studování na Technické univerzitě v Liberci jakýmkoli způsobem pomohli překonávat problematiku učiva a ve stěžejních situacích mně ukázali cestu, kterou jít dál pro úspěšné zvládnutí studia.

Děkuji Technické univerzitě v Liberci za příležitost být její součástí a studovat na katedře strojní.

Bc. Vojtěch Novák



Obsah

Seznam použitých symbolů a jednotek.....	10
Seznam použitých vzorců a zkratek.....	12
Seznam obrázků.....	12
Seznam grafů	13
Seznam tabulek	14
1 Úvod.....	15
2 Teoretická část	17
2. 1 Materiálové vlastnosti skla	17
2. 1. 1 Mechanické vlastnosti.....	17
2. 1. 2 Chemické složení skla	17
2. 1. 3 Pevnost skla	18
2. 1. 4 Vliv kvality povrchu skla.....	19
2. 1. 5 Materiálové modely	19
2. 1. 6 Viskozita skla.....	25
2. 1. 7 Tvrdost skla.....	27
2. 1. 8 Pružnost skla	28
2. 2 Tepelné vlastnosti skla.....	28
2. 2. 1 Teplotní roztažnost	28
2. 2. 2 Definice délkové a objemové teplotní roztažnosti.....	28
2. 2. 3 Dilatační křivka.....	29
2. 2. 4 Teplotní ráz	31
2. 3 Rozdělení a použití skleněných elementů.....	32
2. 3. 1 Rozdělení čoček podle tvaru.....	32
2. 3. 3 Sférické a asférické čočky	33
2. 4 Výroba skleněných elementů.....	34
2. 4. 1 Výpočet křivky plochy u navrhované čočky	34

Numerická simulace procesu lisování přesných optických elementů

2. 4. 2 Konvenční výroba.....	35
2. 4. 3 Moderní způsoby výroby	36
2. 5 Lisování skla	36
2. 5. 1 Používané technologie při lisování	36
2. 5. 2 Druhy předlisků	37
2. 5. 3 Popis procesu lisování	37
2. 6 Numerická simulace v lisování.....	40
3 Praktická část	41
3.1 Sklo s označením S - FPL53	41
3.1.1 Zjištění měrné tepelné kapacity skla S-FPL53	42
3. 2 Simulace lisování elementů pro sférickou formu R50.....	46
3. 3 Lisování skleněných elementů.....	52
3. 3. 1 Příprava vzorků a formy pro lisování	52
3. 3. 2 Stroj Nanotech 140 GPM.....	54
3. 3. 3 Popis lisování elementů	56
3. 3. 4 Měření elementů a formy.....	59
3. 4 Získání a zpracování výsledků.....	60
3. 4. 1 Zobrazení profilu měřených součástí v softwaru MetroPro	61
3. 5 Simulace lisování elementů s reálným tvarem formy.....	62
4 Vyhodnocení výsledků	66
5 Závěr	70
Seznam použité literatury	72
Seznam příloh	74

Seznam použitých symbolů a jednotek

σ_d	napětí v tlaku [MPa]
E	Youngův modul pružnosti [MPa]
γ	povrchové napětí [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]
a	rozměry trhlinky [m]
ν	kinematická viskozita [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]
η	dynamická viskozita [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
τ_{xy}	tečné smykové napětí [MPa]
v_x	rychlost v ose x [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
y	směr pohybu v ose y
σ_t	napětí v tahu [MPa]
ε	poměrné prodloužení [1]
σ_s	napětí od pružiny [MPa]
σ_d	napětí od pístu [MPa]
D	deformace [1]
$\dot{\gamma}$	celková deformace [1]
$\dot{\gamma}_s$	deformace od pružiny [1]
$\dot{\gamma}_d$	deformace od pístu [1]
G	modul pružnosti ve smyku [MPa]
λ_r	čas uvolnění [s]
l	délka [m]
l_0	počáteční délka [m]
T	teplota [$^{\circ}\text{C}$; K]
T_0	referenční teplota [$^{\circ}\text{C}$; K]
p	tlak [Pa]
V	objem [m^3]
V_0	počáteční objem tělesa [m^3]
α_T	koeficient teplotní délkové roztažnosti [$1\cdot\text{K}^{-1}$]
β	koeficient teplotní objemové roztažnosti [$1\cdot\text{K}^{-1}$]
T_g	transformační teplota [$^{\circ}\text{C}$]
T_d	deformační teplota [$^{\circ}\text{C}$]
c	konstanta zakřivení [m^{-1}]

A₀₁; A₀₂; A₀₃;	asférické konstanty [1]
A₀₄; A₀₅; A_n	
K	kónická konstanta [1]
ρ_v	hustota vody [kg·m ⁻³]
Δt_v	gradient teploty vody [K]
c_v	měrná tepelná kapacita vody [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
Q_v	teplo obsažené ve vodě [J]
ρ₁	hustota vzorku 1 [kg·m ⁻³]
Δt₁	gradient teploty vzorku 1 [K]
c₁	měrná tepelná kapacita vzorku 1 [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
Q₁	teplo obsažené ve vzorku 1 [J]
e	efuzivita [W·s ^{0.5} ·m ⁻² ·K ⁻¹]
λ	tepelná vodivost [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
λ_n	naměřená tepelná vodivost [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
Δλ	odchylka tepelné vodivosti [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
ρ	hustota [kg·m ⁻³]
c	měrná tepelná kapacita [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
u_{A(y)}	zjišťovaná nejistota typu A pro efuzivitu a tepelnou kapacitu [W·s ^{0.5} ·m ⁻² ·K ⁻¹ ; W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
n	počet měření [1]
y_i	zastupuje určité měření [1]
ȳ	aritmetický průměr všech měření [1]
F	síla [N]
t	čas [s]
R_m	mez pevnosti v tahu [MPa]
R_d	mez pevnosti v tlaku [MPa]
R_p	mez pružnosti v tahu [MPa]
A	tažnost [%]
x	souřadnice horizontální osy [m]
y	souřadnice prostorové osy [m]
z	souřadnice vertikální osy [m]
σ₀	skokové napětí [MPa]
γ_∞	deformace definovaná vlastnostmi pružiny [1]
η₃	činitel vnitřního tlumení tlumiče 3 [1]

Seznam použitých vzorců a zkratk

SiO_2	oxid křemičitý
B_2O_3	oxid boritý
P_2O_5	oxid fosforečný
Al_2O_3	oxid hlinitý
SiO_2	oxid křemičitý
MRT	Magnetic rheology technology
PID	Potential induced degradation

Seznam obrázků

- Obr. 1 - Znázornění uvolnění napětím v závislosti na čase
- Obr. 2 - Znázornění tečení v závislosti na čase
- Obr. 3 - Znázornění Maxwellova modelu
- Obr. 4 - Odezva napětí při testu uvolnění viskoelastické látky
- Obr. 5 - Kelvinův model
- Obr. 6 - Odezva deformace viskoelastické látky při testu tečení
- Obr. 7 - Tucketův model
- Obr. 8 - Geometrie stran čoček
- Obr. 9 - Tvarový rozdíl mezi sférickými a asférickými čočkami
- Obr. 10 - Lisování optických elementů
- Obr. 11 - Vzorek 1
- Obr. 12 - TCI-Thermal Conductivity
- Obr. 13 - Vzorek 2
- Obr. 14 - Množství vody při správném měření
- Obr. 15 - Množství vody pod Vzorkem 2
- Obr. 16 - Rozměry geometrie formy a elementu
- Obr. 17 - Zbytkové napětí po lisování elementu
- Obr. 18 - Maximální napětí při lisování elementu
- Obr. 19 - Teplota výlisku na konci chlazení
- Obr. 20 - Forma pro lisování skleněných elementů
- Obr. 21 - Rozměry elementů
- Obr. 22 - Element 1

Obr. 23 - Lisovací stroj

Obr. 24 - Chladič

Obr. 25 - Dusíková nádoba

Obr. 26 - Znázornění a popis částí stroje Nanotech 140 GPM

Obr. 27 - Znázornění a popis částí lisovací a zahřívací komory

Obr. 28 - Závislost polohy, síly a teploty na čase při zahřívací fázi

Obr. 29 - Závislost polohy, síly a teploty na čase po všech fázích lisování

Obr. 30 - Vylisovaný Element 1

Obr. 31 - Boční pohled na Element 1

Obr. 32 - Zařízení MarForm MFU 200

Obr. 33 - Zajištění Elementu 1

Obr. 34 - Profil Elementu 1 ze softwaru MetroPro

Obr. 35 - Reálná geometrie horní části formy zanesená do softwaru GPM Sim 2.0

Obr. 36 - Zbytkové napětí po lisování elementu s reálným tvarem formy

Obr. 37 - Maximální napětí při lisování elementu s reálným tvarem formy

Obr. 38 - Teplota vylisku na konci chlazení s reálným tvarem formy

Obr. 39 - Vývojový diagram lisování skla

Seznam grafů

Graf 1 - Závislost pevnosti v tahu na průměru skelného vlákna

Graf 2 - Vztažené body viskozity

Graf 3 - Znázornění podstatných bodů a oblastí pro tváření skla

Graf 4 - Dilatogram a dilatační křivka

Graf 5 - 6 - Dilatační křivka správně a chybně vychlazeného skla

Graf 7 - Profily ideální formy R50 a vylisku podle simulace

Graf 8 - Odchylka mezi profily ideální formy a vylisků podle simulace

Graf 9 - Data získaná z matice s hodnotami vzdáleností a odchylek

Graf 10 - Tvar reálné formy a vylisku podle simulačního softwaru

Graf 11 - Odchylka reálného tvaru formy a tvaru vylisků podle programu

Graf 12 - Výsledný průměr odchylek profilů vylisovaných elementů

Graf 13 - Znázornění výsledných odchylek od stavu R50

Graf 14 - Zobrazení jednotlivých tvarů profilů

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Vzniklé plochy při určité kónické konstantě

Tabulka 2 - Výsledky měření efuzivity a tepelné vodivosti pro Vzorek 2

Tabulka 3 - Parametry skla S-FPL53 pro vytvoření numerické simulace

Tabulka 4 - Parametry definující průběh ohřívání

Tabulka 5 - Parametry definující průběh lisování

Tabulka 6 - Parametry definující průběh chlazení

Tabulka 7 - Koeficienty asférické křivky

Tabulka 8 - Fyzikální a mechanické vlastnosti nástrojové oceli Toolox 44

Tabulka 9 - Hodnoty zadané do lisovacího programu

Tabulka 10 - Koeficienty reálné asférické křivky

Tabulka 11 - Porovnání charakteristik mezi simulací lisování ideální a reálnou formou

1 Úvod

Lisování optických elementů je v současnosti významným procesem výroby skleněných výlisků s dosažením přesnosti v řádech mikrometrů až stovek nanometrů. Tento relativně nový způsob přináší oproti konvenční výrobě řadu výhod, mezi které patří především celkové zrychlení a zefektivnění výroby. Dovoluje lisovat výrobky s profilem, které by se konvenčním způsobem jen obtížně vyráběly. Pro zjištění optických vlastností a geometrie vylisovaného elementu před samotným lisováním je důležitou úlohou ovládat a umět správně použít numerickou simulaci tohoto procesu. Také lze díky simulaci generovat rozložení teploty uvnitř skleněného elementu, maximální potřebný tlak, indukované napětí, zbytkové napětí a další parametry. Simulace vychází zejména z materiálových vlastností skla, lisovacího nástroje a jejich materiálových modelů.

Cílem této diplomové práce je porovnání výsledků simulace lisování z daného druhu skla o známých vlastnostech a s formou o určitých rozměrech s výsledky reálného lisování na lisu. Podle zadání má být provedeno lisování skleněných elementů na lisovacím stroji. Posléze má být provedeno měření rozměrů konečných výlisků. Dále jako výstup práce má být provedeno porovnání naměřených rozměrů těchto výlisků s rozměry vzorků, které by měly vzniknout podle simulace v daném softwaru. Ze získaných výsledných hodnot má být provedena analýza, kterou se vyhodnotí správnost sestavení numerické simulace, věrohodnost simulačního programu a celého měření vylisovaných vzorků.

Teoretická část této práce je zaměřena na všeobecný popis charakteristiky skla s jeho tepelnými a materiálovými vlastnostmi. Větší část práce je věnována přímo viskozitě skla, kvůli operacím při lisování v jeho přechodové oblasti s popisem matematických modelů popisujících viskoelastické chování skla v průběhu lisovacích procesů. Dále jsou uvedeny možné vyrobitelné tvary optických elementů a tvary čoček. Pro značné výhody používání asférické optiky budou popsány rozdíly mezi sférickými a asférickými čočkami s jejich použitím. Následně je popsána samotná technologie výroby optických elementů konvenční metodou, moderními způsoby a lisováním. Samotné lisování je pak podrobně popsáno v jeho pěti lisovacích fázích s uvedením možných technologií.

Praktická část se zabývá samotnou numerickou simulací v softwaru GMP Sim 2.0, který je dodáván k lisovacímu stroji Nanotech 140 GPM, a provedení skutečného lisování

Numerická simulace procesu lisování přesných optických elementů

skleněných elementů. Dále je změřena geometrie naměřených vzorků, a ta je porovnána s rozměry výlisků udávanými simulačním softwarem.

V závěru je vyhodnocena správnost sestavení simulace, přesnost simulačního programu a stanovení doporučení pro příští simulace.

2 Teoretická část

2.1 Materiálové vlastnosti skla

2.1.1 Mechanické vlastnosti

Znalost mechanických vlastností skla je důležitá ve všech oblastech, ve kterých se používají výrobky ze skla a výhradně tam, kde se sklo používá jako konstrukční materiál. Vlastnosti jsou závislé zejména na kvalitě povrchu, únavě a stárnutí, tvaru a rozměrech součástí, tepelné historii a v neposlední řadě na chemickém složení [5].

2.1.2 Chemické složení skla

Všeobecně se sklo z hlediska chemického složení dělí na dvě odvětví. Do prvního patří skla organická a do většího druhého skla anorganická. Anorganické odvětví představuje skla kovová, prvková, halogenidová, chalkogenidová a oxidová.

Chemické složení skla má na mechanické vlastnosti dominantní vliv. Například pevnost skla s chemickou odolností zvyšují oxidy křemičité SiO_2 , borité B_2O_3 , fosforečné P_2O_5 a další. Tyto kysličníky mimo jiné dokážou tvořit sklo samy o sobě, a jsou tedy sklotvorné. Jiné oxidy totiž mohou vytvořit sklo pouze společně s dalšími kysličníky, jako například oxid hlinitý Al_2O_3 . Dále se stavby skla může zúčastnit ještě další tzv. modifikující kysličník, který ve výsledku ovlivní strukturní síť a konečné materiálové vlastnosti [5] [6].

Skla jsou tedy považována za vícesložkové soustavy, u kterých je hlavní složka sklotvorný oxid, např. křemičitý, a další modifikující složky oxidů. Proto podle jejich počtu rozlišujeme skla na jednosložková, tvořená jedním sklotvorným kysličníkem, a vícesložková, tvořená dvěma nebo více složkami oxidů, ze kterých musí být minimálně aspoň jeden sklotvorný.

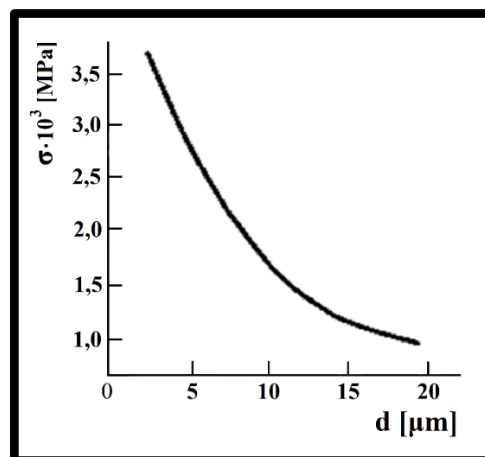
Chemické složení skla má také vliv na součinitel délkové teplotní roztažnosti α_t . Malou teplotní roztažností se vyznačuje křemenné sklo, nejefektivněji ji snižuje vyšší obsah oxidu křemičitého SiO_2 . Naopak zlepšení teplotní roztažnosti způsobuje obsah oxidů alkalických kovů jako například oxid sodný, draselný a další [5].

2. 1. 3 Pevnost skla

V praxi je nejdůležitější pevnost skla v tahu, protože příčinou lomu jsou vždy tahové síly. Vznikají při každém typu namáhání, a to v rázu, tlaku i ohybu. Pevnost v tahu a rázová houževnatost je největší slabinou skel. Skla jsou totiž všeobecně desetkrát až patnáctkrát méně pevnější při tahovém namáhání než při namáhání tlakovém. Vysvětlení tohoto faktu vychází z předpokladu výskytu makrotrhlinek na povrchu skla, které jsou začátkem možného vznikajícího porušení při působení vnější tahové síly. V jejich okolí se totiž zvyšuje koncentrace napětí, a tím i jejich velikost. Ze znalosti lomové mechaniky vychází předpoklad, který představuje tezi, že se sklo při porušení řídí vždy Hookovým zákonem. Napětí je tedy přímo úměrné vyvolané deformaci až do lomu součásti a plastická deformace se vyskytuje pouze v nejbližší oblasti kořenu makrotrhlinky. Při vyšších teplotách se pak náročně odlišuje plastická deformace a vyvolaný viskózní tok součásti. Pevnost skla se tedy nechá ovlivnit velikostí a množstvím trhlinek na povrchu součásti [2] [5].

Velikost a tvar výrobku

Velikost, tvar a členitost výrobku má na jeho pevnost podstatný vliv. Pevnost tvarově složitých a velkých výrobků bývá malá. Oproti tomu pevnost tvarově jednoduchých a malých výrobků bývá vyšší. Tento děj lze ukázat na grafu 1, ve kterém je znázorněna závislost pevnosti v tahu na průměru skelného vlákna. Například tyčinka z určitého druhu skla o průměru 2 mm má pevnost v tahu přibližně 80 MPa, zatímco skelná vlákna průměru 1 mm mají pevnost v tahu již přibližně 170 MPa, u vláken tloušťky 3 μm pevnost roste přibližně až na 3400 MPa. Záleží také na chemickém složení a kvalitě povrchu vzorku, zpravidla ale dané zatížení odpovídá průměrným hodnotám [2] [6].



Graf 1 – Závislost pevnosti v tahu na průměru skelného vlákna [6]

2. 1. 4 Vliv kvality povrchu skla

Kvalita povrchu skla, jak už bylo zmiňováno, je významně ovlivněna tzv. Griffithovými trhlinkami, které se vyskytují na povrchu dané součásti. Množství trhlinek lze eliminovat působením vlhkosti při výrobě, která vytváří chemickou reakci se sklem, a podle množství působí buď žádoucím, nebo nevhodným způsobem na povrch skla. Trhlinky neovlivňuje vlastnost materiálu, vznikají totiž až při výrobě daného skla. Při působení vnější síly se sklo nejdříve deformuje elasticky a ve chvíli dosažení své kritické pevnosti v tahu je porušeno křehkým lomem. Napětí, při kterém dochází k prasknutí, popisuje vztah mezi hloubkou trhlinky a pevností skla [5]:

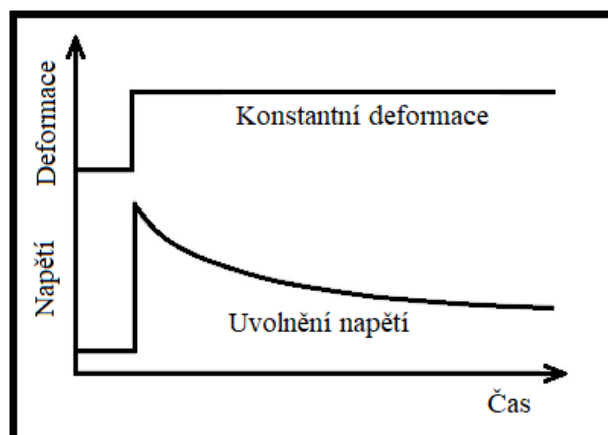
$$\sigma = \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot \gamma}{\pi a}} \quad (2.1)$$

kde E je Youngův modul pružnosti v tahu v Pa; γ povrchové napětí v $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$; a jsou rozměry trhlinky v metrech.

Míru vlivu kvality povrchu je možno ukázat na vzorkách plochého skla, které jsou nejprve poškrábány brusným papírem obsahujícím zrnka karbidu křemíku a posléze jsou namáhány na ohyb [2] [5].

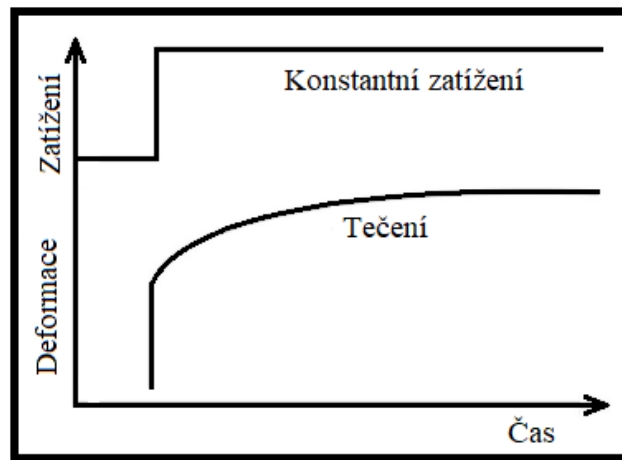
2. 1. 5 Materiálové modely

Viskoelastické vlastnosti vyvolávají nelineární chování materiálu. Toto chování lze definovat jak uvolňováním, tak i tečením materiálu. Uvolnění napětí lze popsat jako časově závislý pokles napětí při konstantním přetvoření nebo jako deformace materiálu ve viskoelastické oblasti. Jde tedy o úpadek napětí během tečení materiálu. Děj je znázorněn na obrázku 1 [10].



Obr. 1 - Znázornění uvolnění napětí v závislosti na čase [10]

Na rozdíl od uvolnění napětí je tečení odkazem na chování deformace při působení konstantního napětí. Tečení je zobrazeno na obrázku 2 [10].



Obr. 2 - Znárodnění tečení v závislosti na čase [10]

Sklo se chová viskoelasticky. Pod vlivem mechanického namáhání vystupuje současně jako pevná hookovská látka i jako viskózní newtonská kapalina, záleží pouze na stavu, ve kterém se sklo právě nachází. Jak už bylo zmíněno, viskoelastické materiály reagují na deformaci vždy se zpožděním. Viskozita skla obecně leží v rozmezí $10^9 - 10^{10}$ Pa·s [11].

Pro získání odezvy viskoelastického skleněného materiálu využíváme dva základní druhy experimentů:

- 1) uvolnění napětí s časem při konstantní teplotě a deformaci:

$$\sigma_i(t) = E(t) \cdot \varepsilon \quad (2.2)$$

kde ε znázorňuje bezrozměrné poměrné prodloužení; σ napětí v tahu v Pa; E představuje modul pružnosti v tahu v Pa.

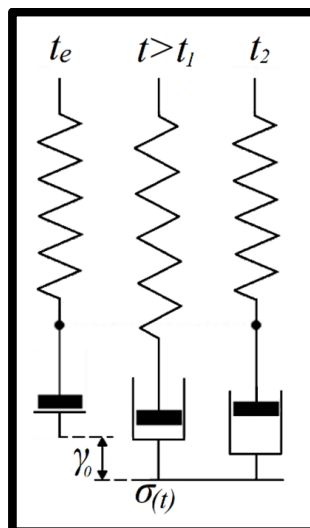
- 2) tečení, kdy se pozoruje změna v čase a deformace skla při konstantní teplotě a napětí:

$$\varepsilon(t) = D(t) \cdot \sigma \quad (2.3)$$

kde ε znázorňuje bezrozměrné poměrné prodloužení; σ napětí v tahu v Pa a D bezrozměrnou deformaci [11].

Maxwellův model

Uvolnění skla lze kvalitativně popsat pomocí Maxwellova mechanického modelu. Tento model je znázorněn na obrázku 3, kde je tvořen pružinou s daným modulem pružnosti E a pístem, ve kterém energii pohlcuje kapalina s dynamickou viskozitou η . Tento materiálový model zobrazuje situaci, při které je tok komplikovaný elasticitou [11].



Obr. 3 - Znázornění Maxwellova modelu [11]

Princip modelu je takový, že před zatížením v čase t_e je pružina a píst (tlumič) bez zatížení. Při skokové zátěži a vzniku deformace je pružina prodloužena až do rovnovážného stavu, ve kterém setrvává, a zároveň se začne pohybovat i píst. Po určitém čase začne píst i pružina vykazovat deformaci, která je úměrná zatížení. Při uvolnění zatížení v čase t_2 se pružina rychle vrací do původního stavu, zatímco píst zůstává zdeformovaný.

Po tomto cyklu zůstává sklo částečně zdeformováno. Velikost navrácení do výchozího a nezdeformovaného stavu je závislá na elastické části, při které je nevratná deformace přímo úměrná viskózní části viskoelastického materiálu [11] [10].

Souhrnné smykové napětí je totožné s napětím v obou částech:

$$\sigma = \sigma_S = \sigma_D \quad (2.4)$$

kde σ je celkové napětí v Pa; σ_S napětí od pružiny v Pa a σ_D napětí od pístu v Pa.

Dále lze celkovou deformací vyjádřit:

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_S + \dot{\gamma}_D \quad (2.5)$$

kde $\dot{\gamma}$ je celková deformace; $\dot{\gamma}_S$ je deformace od pružiny; $\dot{\gamma}_D$ deformace od pístu a všechny deformace jsou bezrozměrné.

Po dosazení do vzorce:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{\sigma_S}{G} + \frac{\sigma_D}{\eta} \quad (2.6)$$

kde η je dynamická viskozita v Pa·s; $d\gamma/dt$ je derivace deformace podle času a G je modul pružnosti ve smyku v MPa. Zavedením viskoelastické veličiny, tzv. času uvolnění λ_r v sekundách:

$$\lambda_r = \frac{\eta}{G} \quad (2.7)$$

lze zavést v případě Maxwellova modelu diferenciální rovnici vyjadřující deformaci:

$$\frac{d\gamma}{dt} G = \frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\lambda_r}. \quad (2.8)$$

Okrajové podmínky pro uvolnění napětí viskoelastického materiálu dále jsou:

v čase t_0 je $\sigma = 0$,

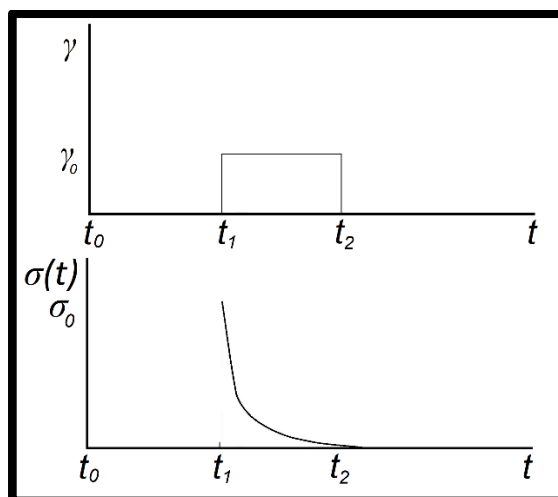
v čase t_1 je $\sigma = \sigma_0$,

v čase t_1 až t_2 je $\sigma = \sigma(t)$.

Zintegrováním vztahu 2.8 a po dosazení okrajových podmínek lze získat rovnici Maxwellova modelu:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{t}{\lambda_r}} \quad (2.9)$$

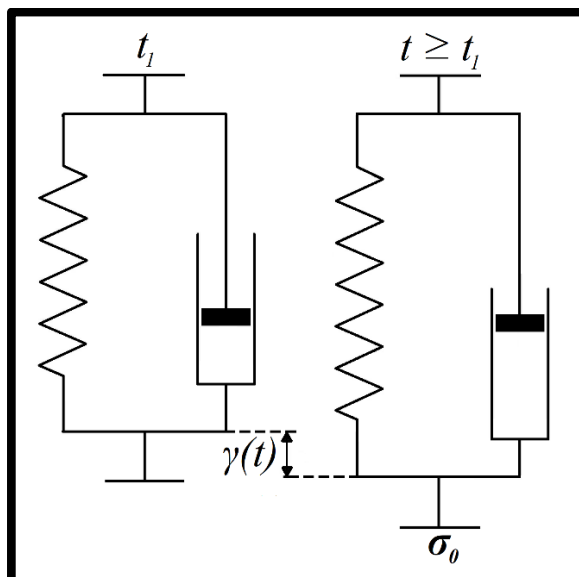
kde $\sigma(t)$ je napětí v čase t_1 až t_2 v Pa; σ_0 je napětí v čase t_1 v Pa; t je čas v sekundách a λ_r je čas uvolnění v sekundách [10] [11].



Obr. 4 - Odezva napětí při testu uvolnění viskoelastické látky [11]

Kelvinův model

Dalším modelem, kterým lze popsat uvolnění skla, je Kelvinův model. Tento model znázorňuje spojení pístu a pružiny paralelně. Schéma zapojení je znázorněno na obrázku 5, kde je patrné, že pružina při deformaci do času t_1 je bržděna pístem. U skel je tato konformační bržděná elasticita významný deformační proces.



Obr. 5 - Kelvinův model [11]

Deformace obou pružin je stejná:

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_S = \dot{\gamma}_D \quad (2.10)$$

Dále lze určit, že napětí v pružině a pístu je rovno výslednému napětí:

$$\sigma = \sigma_S + \sigma_D = G \cdot \gamma + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2.11)$$

Z rovnice 2.11 lze poté získat diferenciální tvar:

$$G \cdot \gamma + \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt} = \sigma \quad (2.12)$$

Na obrázku 5 je patrné, že v čase t_0 je deformace nulová a model se tedy nachází v klidovém stavu. Od času t_1 do času t_2 začne působit skokové napětí σ_0 . Pro zkoušku tečení jsou okrajové podmínky zvoleny tímto způsobem:

$$\text{v čase } t_0 \text{ je } \gamma = 0,$$

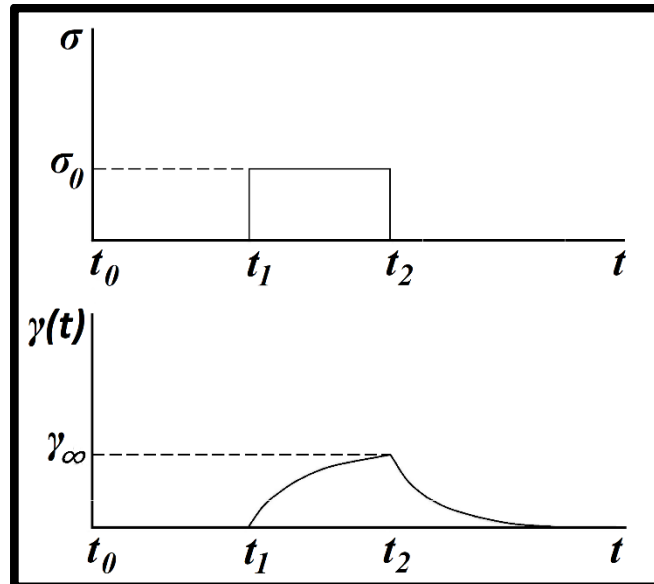
$$\text{v čase } t_2 \text{ je } \gamma = \gamma_\infty,$$

$$\text{v čase } t_1 \text{ až } t_2 \text{ je } \gamma = \gamma(t).$$

Po dosazení okrajových podmínek a zintegrování vztahu 2.12 lze získat výsledná rovnice Kelvinova modelu:

$$\gamma(t) = \gamma_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda_r}} \right) \quad (2.13)$$

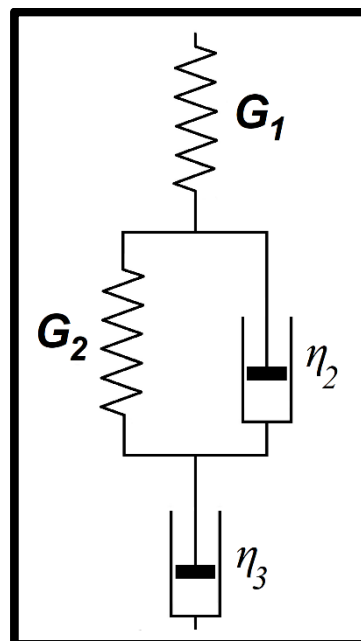
kde λ_r představuje čas uvolnění v sekundách a γ_{∞} znázorňuje bezrozměrnou hodnotu deformace, která je dána pouze vlastnostmi pružiny [10] [11].



Obr. 6 - Odezva deformace viskoelastické látky při testu tečení [11]

Tucketův model

Tento model popisuje deformaci pomocí paralelního zařazení jedné pružiny s tlumičem a zároveň tlumiče s pružinou, který je zapojen sériově. Model je uvedený na obrázku 7.



Obr. 7 - Tucketův model [11]

Dále lze deformační odezvu při experimentu tečení a za předpokladu aditivní deformace vyjádřit pomocí vztahu:

$$\gamma(t) = \sigma_0 \left[\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\lambda_r}}) + \frac{1}{\eta_3} \cdot t \right] \quad (2.14)$$

kde G_1 představuje modul pružnosti ve smyku pružiny 1 v Pa; G_2 modul pružnosti ve smyku pružiny 2 v Pa a η_3 označuje bezrozměrný činitel vnitřního tlumení tlumiče 3 [1] [10] [11].

2. 1. 6 Viskozita skla

Viskozita je především vlastností látek v kapalném stavu. Dělíme ji na dynamickou a kinematickou.

Dynamická viskozita η lze vyjádřit podle Newtonova vztahu. V tomto vztahu je tečné smykové napětí vyjádřeno jako gradient změny rychlosti v_x , který působí ve směru kolmém na směr pohybu y . Tento vztah je vyjádřený jako:

$$\tau_{xy} = \eta \frac{dv_x}{dy} \quad (2.15)$$

Dynamická viskozita je tedy konstanta úměrnosti, kterou je také možno nazývat součinitelem viskozity, a představuje vnitřní odpor tekutiny proti jejímu pohybu. Také ji lze definovat jako schopnost skloviny téci, neboli tzv. mírou plastičnosti. Jednotkou jsou Pa·s a její převrácená hodnota se nazývá tekutost.

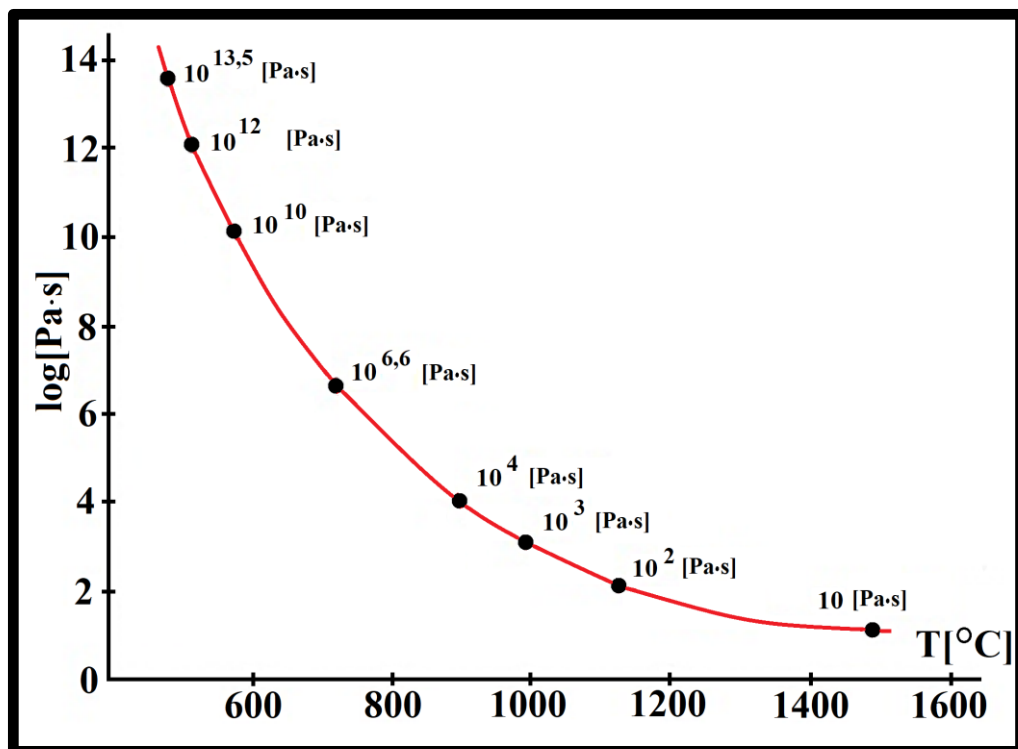
Při znalosti hustoty a dynamické viskozity daného skla lze dále vyjádřit kinematickou viskozitu ν ze vzorce:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.16)$$

Skla se stoupající teplotou postupně přechází ze skelného, tuhého stavu, do stavu plastického až postupně do tekutého, kde se stávají sklovinou. Tento děj probíhá v tzv. transformačním intervalu. Změna stavů se obvykle začne projevovat u běžných křemičitých skel okolo teploty 400 až 550 °C. Závislost teploty na viskozitě lze znázornit tzv. viskózní křivkou [5]. Tuto křivku za běžných podmínek nejvíce ovlivňuje chemické složení skla.

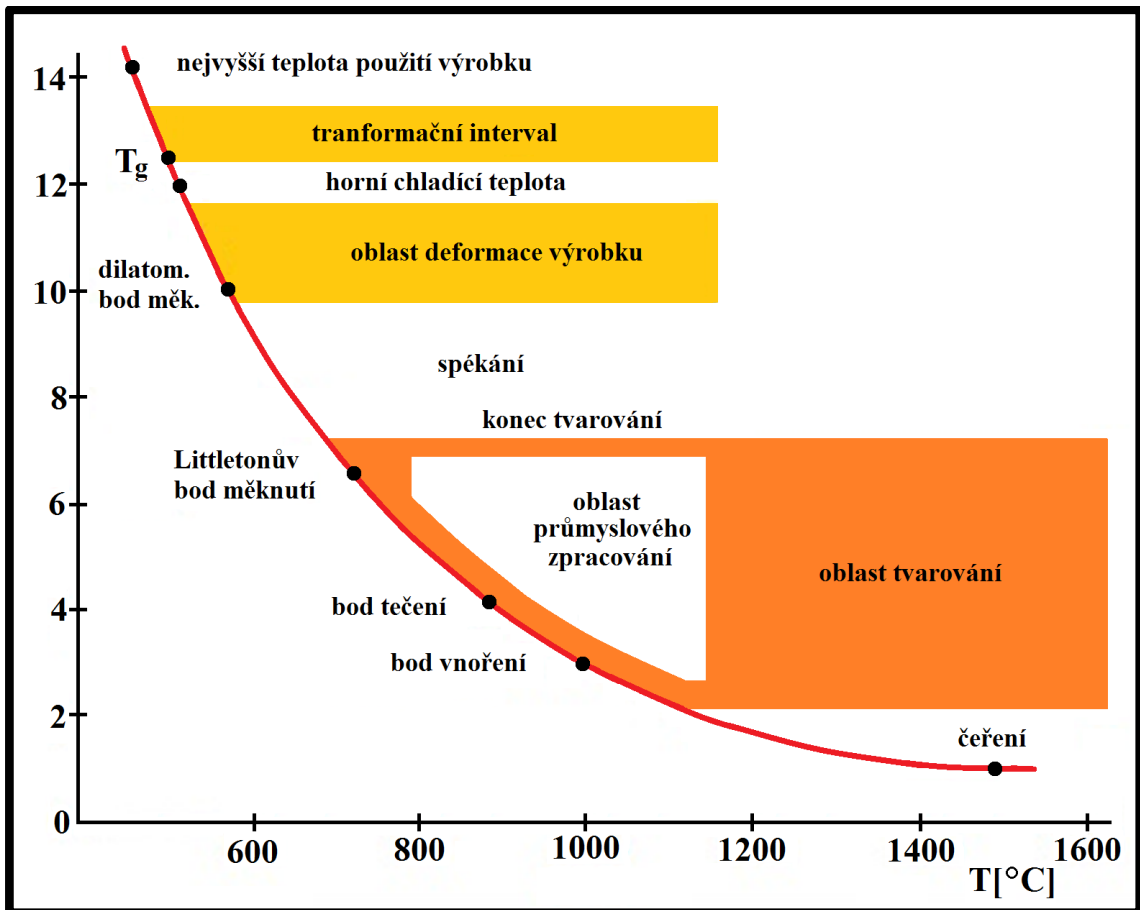
V grafu 2 jsou pro názornost definovány tzv. vztažené body viskozity, které jsou závislé na druhu dané skloviny a pro ni příslušnou teplotu. Jedná se o těchto 8 významných bodů, které jsou vyneseny v grafu 2 [5]:

- bod tavení $10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,
- bod zpracování $10^3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,
- bod tečení $10^4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,
- Littletonův bod měknutí $10^{6,6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$,
- deformační teplota t_d $10^{10} \text{ Pa}\cdot\text{s}$,
- horní chladicí teplota $10^{12} \text{ Pa}\cdot\text{s}$,
- transformační teplota T_g $10^{12,3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$,
- dolní chladicí teplota $10^{13,5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$.



Graf 2 – Vztažené body viskozity [5]

Významné body při tavení, tvarování, deformaci a chlazení skel jsou dále zobrazeny v grafu 3 [5].



Graf 3 – Znárodnění podstatných bodů a oblastí pro tváření skla [5]

2. 1. 7 Tvrдость skla

Tvrдость představuje odpor materiálu, který je klade proti vniknutí jiného tělesa s větší tvrđostí. Tímto způsobem se dříve vyhodnocovala velikost tvrđosti podle mineralogické Mohsovy stupnice tvrđosti, kde se tvrđost skla nacházela mezi V. - apatit a VII. - křemen stupněm tvrđosti. V dnešní době se využívá zejména metoda vtisku a metoda brusné tvrđosti [3].

U metody vtisku se nejčastěji používá metoda podle Vickers. Tento způsob je založen na vtačení diamantové čtvercové pyramidy do vyleštěného vzorku.

U metody brusné tvrđosti se její hodnota zjišťuje pomocí množství odbroušeného skla z povrchu vzorku. Pro broušení se používá volné nebo vázané brusivo a podmínky procesu jsou konstantní s přesnou definicí, např. přítlácným tlakem, otáčkami brousícího kotouče, zrnitostí brusiva apod. Nejčastěji se používá smírek, odrůda korundu, diamantový prášek a v některých případech i křemičitý písek.

2. 1. 8 Pružnost skla

Pro charakteristiku velikosti pružnosti skla se využívá Youngův modul. Ten je obsažen v základním jednorozměrném Hookově zákoně pro elastické materiály. Hookův zákon je dále popsán pomocí poměrné deformace ε a napětí σ .

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.17)$$

Pro ideální newtonovskou kapalinu je napětí vyjádřeno jako součin dynamické viskozity a gradientem poměrného prodloužení nebo zúžení k derivaci času.

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.18)$$

Youngův modul je důležitý pro výpočet chladících postupů. U tvrzených skel je o 8 až 12 % nižší než u kvalitně chlazených skel [3].

2. 2 Tepelné vlastnosti skla

2. 2. 1 Teplotní roztažnost

V tuhé látce vibrují jednotlivé atomy a molekuly strukturní mřížky kolem svých rovnovážných poloh. Přívodem tepelné energie se zvětšuje vibrace částic i vzdálenost mezi nimi, a v důsledku toho se zvětšuje i celkový objem tělesa. Obecně lze říci, že čím pevněji jsou částice v látce vázány, tím méně se mění s teplotou vzdálenosti mezi jejich rovnovážnými polohami. Proto se stoupajícím bodem tání klesá teplotní roztažnost. Křemenné sklo s velmi pevnými vazbami má například nejen vyšší teplotu měknutí, ale i nižší teplotní roztažnost než běžná sodnovápenatokřemičitá skla [3].

Prvořadý význam z tepelných vlastností má teplotní roztažnost. Závisí na ní ve velké míře odolnost vůči teplotním rázům [3].

2. 2. 2 Definice délkové a objemové teplotní roztažnosti

Při dodávání tepla do tělesa za konstantního tlaku dochází k nepatrné změně rozměrů tělesa a tím k jeho délkové a současně objemové teplotní roztažnosti. Při teplotních změnách tedy součinitel délkové roztažnosti udává nekonečně malou změnu délky tělesa dl vztaženou na jeho počáteční délku l_0 , která nastane při nekonečně malé změně teploty dT za konstantního tlaku p . Tento děj lze vyjádřit pomocí koeficientu délkové roztažnosti α_T z níže uvedeného vzorce:

$$\alpha_T = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{dl}{dT} \quad (2.19)$$

kde α_T je součinitel délkové teplotní roztažnosti v K^{-1} ; l_0 je počáteční délka měřeného vzorku při referenční teplotě T_0 v m; dl je nekonečně malá změna délky tělesa v m a dT je nekonečně malá změna teploty v K.

Z těchto poznatků lze dále vyjádřit objemový teplotní součinitel β . Při teplotních změnách tělesa dochází k nekonečně malé změně objemu dV , vztažené na počáteční objem tělesa V_0 , která nastane při nekonečně malé změně teploty dT . Tento celý děj opět probíhá za konstantního tlaku a lze vypočítat ze vzorce:

$$\beta = \frac{1}{V_0} \cdot \frac{dV}{dT} \quad (2.20)$$

kde β je součinitel objemové teplotní roztažnosti v K^{-1} , V_0 je počáteční objem měřeného vzorku při referenční teplotě T_0 v m, dV je nekonečně malá změna objemu tělesa v $kg \cdot m^{-3}$ a dT je nekonečně malá změna teploty v K [3] [5].

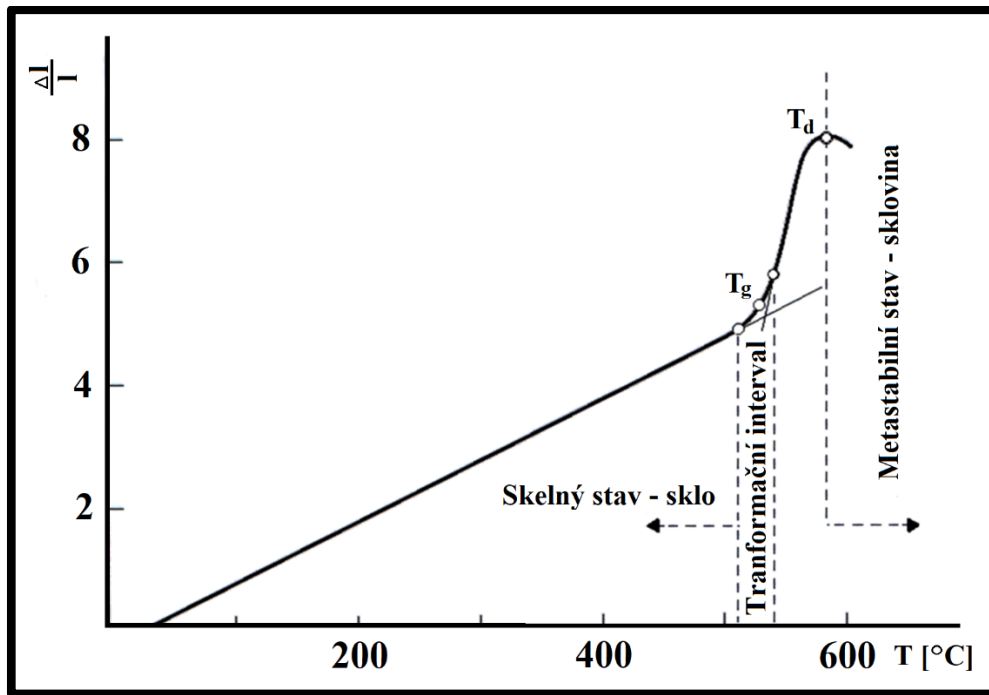
Pro pevné látky s izotropní mřížkou a pro skla lze objemový teplotní součinitel zjednodušeně vyjádřit pomocí délkového teplotního součinitele ze vztahu:

$$\beta = 3 \cdot \alpha_T. \quad (2.21)$$

Dále se obvykle rozlišuje pravý a střední koeficient, kdy první se vztahuje k určité teplotě a druhý k širšímu rozmezí teplot [3] [5].

2. 2. 3 Dilatační křivka

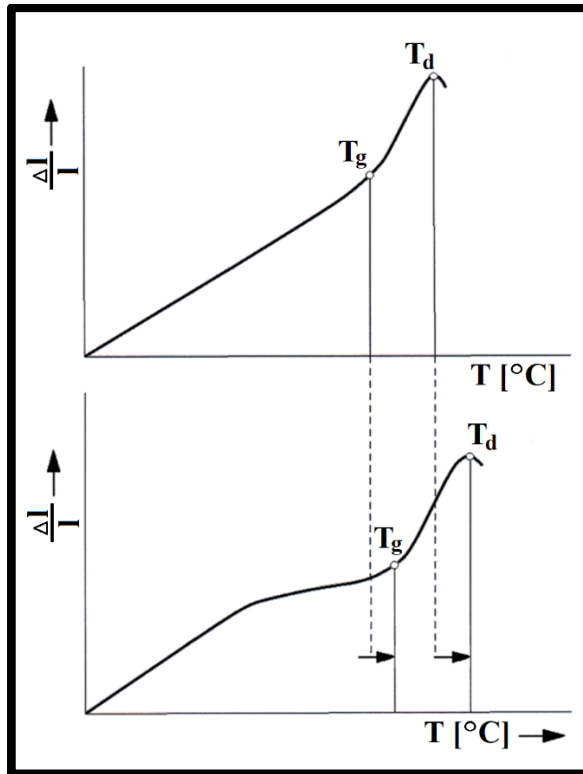
K měření teplotní roztažnosti skla se používá dilatometrů s přímou indikací prodloužení. Z těchto měření získáme dilatační křivku, která se zanáší do grafů, tzv. dilatogramů. Příímá část křivky vycházející z počátku grafu slouží k výpočtu koeficientu roztažnosti. Pokud je provedeno měření v širším teplotním intervalu do vyšších teplot, lze získat celý průběh dilatační křivky, která je ukázána v grafu 4. Dále pak lze vyhodnotit údaje jako transformační teplotu T_g a teploty deformace. V grafu 4 je vyznačen způsob geometrického stanovení bodu T_g a současně stanovení dilatometrického bodu měknutí T_d [3].



Graf 4 – Dilatogram a dilatační křivka [5]

Transformační teplota T_g leží přibližně uprostřed transformačního intervalu, odpovídá jí viskozita přibližně $10^{12,3}$ Pa·s a je určena jako průsečík dilatační křivky s osami úhlu sevřeného jejími tečnami. Dilatometrická, neboli deformační teplota T_d , odpovídá přibližně viskozitě $10^{11,2}$ Pa·s a je definována ohybem křivky teplotní roztažnosti. U většiny skel leží přibližně 30 K nad transformační teplotou. Je to teplota, při níž se vzorek začíná deformovat vlastní vahou [3] [5].

Pro dobře vychlazené sklo, tedy bez vnitřního napětí, je průběh křivky lineární až do transformační teploty T_g . Dále křivka strměji vzrůstá až do teploty dilatometrického bodu měknutí T_d . Poté už dochází k deformování měřeného vzorku od tlaku přítlačného zařízení. U skel, která byla špatně vychlazená, dochází k narušení lineárně stoupající křivky mezi počátkem a bodem T_g . Křivka tak dříve, přibližně o 100 K, začíná klesat. Tím se transformační a deformační bod přesouvá v grafu do vyšších teplot a nižšího poměrného prodloužení. Je to dáno tím, že při uvolnění napětí v oblasti chladicích teplot vzrůstá hustota skla. Proto se zmenšují rozměry vzorku. Tento efekt může z části nebo úplně kompenzovat teplotní roztažnost. Děj je znázorněn na grafech 5 – 6 [3] [5].



Graf 5 - 6 - Dilatační křivka správně a chybně vychlazeného skla [5]

2. 2. 4 Teplotní ráz

Odolností skla vůči teplotnímu rázu je myšlena schopnost odolávat náhlým výkyvům teploty bez porušení materiálu v značném rozsahu, např. odolnost k prudkému nárazovému ohřátí, místnímu chlazení s vysokým rozdílem teplot apod. Skla všeobecně patří k materiálům, které nemají příliš velkou odolnost vůči teplotním rázům [3].

Vzhledem k tomu, že sklo má poměrně malou tepelnou vodivost, vzniká při zahřívání nebo chlazení skleněného vzorku značný teplotní gradient napříč jeho průřezem. Změna teploty vzápětí vyvolává ve skle i adekvátní změnu objemu, která je daná teplotní roztažností skla v příslušném rozsahu teplot. Ve skle tedy vznikne mechanické namáhání mezi teplými a studenými místy. Teplejší vrstvy vyvolávají tlakové napětí a rozpínají se více, než chladnější vrstvy, které namáhají strukturu skla tahovým napětím. Velikost napětí v každém místě odpovídá gradientu teploty. Teplejší pásmo přechází plynule ve studenější přes tzv. neutrální pásmo, kde je napětí nulové [3].

Při zahřívání nebo ochlazování konstantní rychlostí se ve skle ustálí pravidelné rozložení vnitřního napětí. Odolnost k teplotnímu rázu ovlivňuje řada fyzikálních vlastností, do kterých nejvíce zasahuje chemické složení skla. Nejmenší vnitřní napětí vzniká tedy ve sklech s malou teplotní roztažností. Taková skla dobře přijímají větší teplotní změny [3].

2. 3 Rozdělení a použití skleněných elementů

2. 3. 1 Rozdělení čoček podle tvaru

Skleněné čočky mohou mít pro své konkrétní žádané vlastnosti určitý tvar, který ve velké míře ovlivňuje vady a vzniklé možné chyby optických elementů. Mezi základní tvary elementů patří:

- Rotačně symetrický
- Freeform – čočky s individuální plochou
- Cylindrický – čočky s cylindrickým tvarem
- Mikročočkové pole – mikročočky, které jsou aplikované na každý jednotlivý pixel
- Fresnellovy čočky – odlehčené od opticky nepotřebných částí čočky [4]

Dále podle tvarů ploch lze elementy rozdělit na:

Asférické – jsou vyráběny pro jejich vyhovující vlastnosti v oblasti přesné optiky. Čočky se vyznačují nepravidelným tvarem zakřivení na jejich okrajích. Rozdíl mezi sférickými a asférickými čočkami bude detailněji popsán v následující kapitole.

Sférické – čočky se vyrábí za účelem korekce nízkých refrakčních vad. Jsou to vady, ke kterým dochází v důsledku špatné lomivosti dopadajících paprsků. Tyto čočky se vyznačují stejným tvarem zakřivení ve všech místech své plochy. Pro dosažení stejných optických vlastností, které poskytuje jedna asférická čočka, je zapotřebí několik sférických čoček. Proto jsou v současnosti zastupovány elementy s asférickou geometrií [9].

Podle kombinace odlišné geometrie jednotlivých stran daného optického elementu je možné čočky rozdělit do následujících skupin:

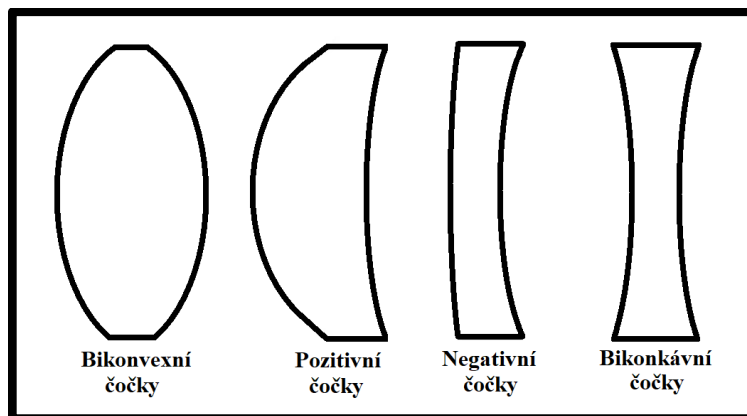
Bikonvexní - tyto čočky jsou tvořeny dvěma konvexními stranami o stejném poloměru zakřivení.

Pozitivní - u těchto elementů má konvexní strana menší poloměr zakřivení než strana konkávní, a je tedy vydutější.

Negativní - zde má naopak konkávní strana menší poloměr než strana konvexní.

Bikonvexní - tento typ čoček má obě své strany konvexní.

Geometrie stran všech typů čoček je znázorněna na obrázku 8 [7].



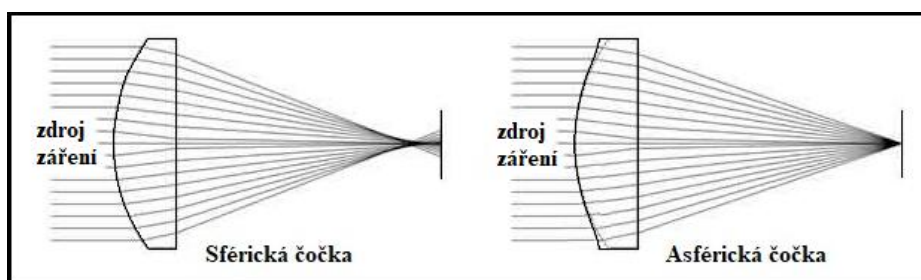
Obr. 8 - Geometrie stran čoček [7]

2. 3. 3 Sférické a asférické čočky

Čočky lze rozdělit při jejich ideálním poloměru zakřivení na sférické, a při jiném než ideálním tvaru na asférické, viz obrázek 9.

Výhody asférické čočky

Klasické sférické čočky jsou relativně snadno navrhnutelné a vyrobitelné. Mají však své hlavní nevýhody, které se týkají optických vlastností, jako například sférická aberace, koma, astigmatismus ad. Kvůli těmto vlastnostem pak nemohou zaostřit obraz na jediný bod, což vede ke zmiňovanému jevu sférické aberace. Čočky tak světlo lámou nežádoucím způsobem, při kterém jsou paprsky na okraji elementu lámány více než poblíž optické osy. Tento problém se řeší postavením několika čoček do jedné řady, čímž se kompenzuje chyba, která ve výsledku konverguje do jediného bodu. Tento způsob má ale za následek větší složitosti, kterými například jsou zmiňované vyrovnání soustavy elementů do jedné osy, potřeba více samostatných čoček a celkově objemnější optický systém. Proto je použití elementů s asférickou geometrií výhodnější a eliminují se tím požadavky, které jsou výše popsány. V dnešní době výhoda používání asférických elementů je tedy výrazná. Rozdíl v jejich optických vlastnostech je znázorněn na obrázku 9 [2].



Obr. 9 - Tvarový rozdíl mezi sférickými a asférickými čočkami [9]

Použití asférické optiky

Soustava čoček vede ke sblížení paprsků světla. Povrchový profil čočky je zásadní charakteristikou, která řídí vlastnosti dané čočky. Vyrobené čočky se používají v lupách, dalekohledech, mikroskopech ad. Pro pokročilé aplikace např. v lékařských a vojenských zařízeních, vědeckých testovacích zařízeních, u projektorů, digitálních fotoaparátů apod., musí být povrch, geometrie a konečná úprava naprosto přesná. Tento druh čoček je v průmyslu známý pod termínem přesné čočky, u kterých se jejich přesnost pohybuje v řádu mikrometrů [2].

2. 4 Výroba skleněných elementů

Skleněné elementy lze vyrábět více způsoby. Mezi nejpoužívanější a nejstarší patří konvenční způsob výroby, při kterém se skleněná čočka nejdříve obrábí frézováním, broušením a posléze leštěním.

Mezi mimořádné a finančně drahé metody patří například technologie MRF nebo metoda iontového paprsku.

Nekonvenční a relativně novou technologií je výroba skleněných elementů lisováním. Její problematika bude blíže řešena v této diplomové práci.

2. 4. 1 Výpočet křivky plochy u navrhované čočky

Pro návrh rotačně symetrického povrchu tělesa při vytváření modelu a při výrobě potřebných nástrojů pro lisovací proces je přínosné znát a použít následující rovnici, která slouží pro výpočet křivky definující geometrii dané plochy:

$$f(y) = \frac{c \cdot x^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K) \cdot c^2 \cdot x^2}} + A_{01}x + A_{02}x^2 + A_{03}x^3 + A_{04}x^4 + A_{05}x^5 + \dots + A_n x^n \quad (2.22)$$

kde A_{01} , A_{02} , A_{03} , A_{04} , A_{05} , A_n jsou bezrozměrné asférické konstanty; K je bezrozměrná kónická konstanta, která je excentricitou kónického povrchu ($K = -e^2$); x představuje souřadnice bodů v horizontální ose v metrech, y představují souřadnice bodů ve vertikální ose v metrech a c je konstanta zakřivení v m^{-1} .

Při návrhu se uvažuje osa Z jako osa rotace. Pro nulové asférické deformační konstanty dále platí, že je povrch kónická rotační plocha. Posléze je možné řídit se podle hodnot z tabulky 1 [7].

Hyperboloid	$K < -1$
Paraboloid	$K = -1$
Elipsoid otáčející se kolem hlavní osy	$-1 < K < 0$
Sférická plocha	$K = 0$
Elipsoid otáčející se kolem vedlejší osy	$K > 0$

Tabulka 1 – Vzniklé plochy při určité kónické konstantě [7]

2. 4. 2 Konvenční výroba

U konvenčních metod výroby skleněných elementů se výrobek obrábí v několika krocích, při kterých je frézován, broušen a leštěn na požadovaný finální tvar. Jedná se o nejčastější způsob výroby čoček.

Nejdříve se povrch skla frézuje pomocí frézy s vysoce odolnými a tvrdými břitovými destičkami. Při tomto procesu je povrch čočky chlazen a čištěn olejovou emulzí. Takto se ofrézují obě strany vyráběné čočky na požadovanou geometrii s výrobní tolerancí. Pro následující proces je jedna strana čočky tmelena a připevněna tak k rámu brusky.

V dalším kroku se povrchy hrubě tvarují broušením pomocí volného či vázaného brusiva, kterým například bývá karbid křemíku nebo korund.

Klasickým nástrojem pro konvexní plochu je tzv. brusná miska a pro konkávní plochu tzv. brusný hřib. Nástroje mohou být zhotoveny například z litin, z nerezových ocelí, ze slitin mosazí, a musí u nich být definován přesný poloměr křivosti. Brusná plocha obsahuje drážky, které pomáhají udržet brusnou suspenzi. Nástroj může mít 200 – 1000 otáček za minutu, záleží však na typu stroje. Upnutá čočka se při výbrusu sférické plochy může ještě lehce natáčet, aby se tím zlepšila dosažená přesnost. Broušení je ovlivněno tlakem, otáčkami nástroje, koncentrací brusiva v suspenzi a materiálem nástroje. Tvar nástroje je důležitý hlavně pro sférické čočky. U asférických čoček se nebrousí celá plocha čočky, ale postupuje se po částech požadované geometrie [4].

Dále se drsnost a přesnost tvaru čočky zlepší na požadovanou úroveň přesnosti pomocí leštění. Pro asférické čočky je však zapotřebí náročnějšího procesu leštění kvůli složitosti a požadované vyšší přesnosti profilu.

Pro získání velmi přesné a složité geometrie hraje u leštění velkou roli strojová chyba, kterou lze složitě eliminovat a je potřeba s ní počítat. Dále tento proces vyžaduje průběžné vyhodnocování a korekci povrchu. Jedná se stále o časově velmi náročný iterační proces, i přes pokroky v moderních CNC bruskách a leštičkách. Typické jsou běžné doby broušení a leštění po dobu 2 až 3 hodin na jeden povrch [1]. Záleží ale

na velikosti a požadovaném tvaru čočky. V sériové výrobě se takto standardně obrábí jeden povrch minuty, popřípadě hodiny. V některých případech se ale leští dokonce až dny, a pro dosažení vysoké přesnosti až týdny [2] [4].

2. 4. 3 Moderní způsoby výroby

Jednou z moderních a důmyslných technologií, která se používá při výrobě asférických čoček u leštícího procesu, je technologie MRT. Tento způsob výroby využívá magnetoreologické úpravy tvaru nástroje, při kterých nosná tekutina obsahuje suspenzi magnetických částic. Viskozitu a mez kluzu kapaliny lze pak výrazně měnit s intenzitou působení magnetického pole a tím přesně řídit velikost síly, která je tekutinou na obrobek přenášena. Proto může být tato technologie použita k velmi jemnému a přesnému leštění skleněných ploch.

Další technologií je metoda konečného zpracování iontovým paprskem, kde jsou jednotlivé atomy v iontovém svazku používány k odstranění nerovností na skleněném výrobku [2].

2. 5 Lisování skla

Kvůli daným limitům a vysokým nákladům na přesný tvar asférických čoček byla vyvinuta technologie lisování skleněných elementů, která oproti konvenční metodě snížila potřebný čas výroby a zefektivnila ji. Dále dovoluje vlastní výrobu všech potřebných nástrojů, forem, předlisků, a také umožňuje výrobky centrovat, povlakovat, přesně tvarovat ad. Díky tomu se zvyšuje flexibilita výroby a snižují náklady oproti jiným metodám. Jsou k dispozici přesné a kvalitní čočky v závislosti na konkrétních konstrukčních požadavcích [2] [7].

2. 5. 1 Používané technologie při lisování

Lisování pro komerční a vědecké způsoby lze rozdělit do skupin podle způsobu technologie výroby:

1) - Jednoúčelové lisování sloužící pro vědecké a výzkumné potřeby, kde není možné a ani žádoucí vyrábět velké série výlisků. Touto technologií se bude zabývat tato diplomová práce.

2) - Sériová výroba, při které se lisují čočky pouze o určitých specifických vlastnostech daného skla. K lisování jsou používány malé vzduchové lisy bez složitých

chladících příslušenství. Tímto způsobem se i přes všechny jednoduchosti výroby dosahuje požadované kvality lisovaných elementů.

3) - Hromadná výroba umožňuje lisovat velké množství čoček při nízkých nákladech na výrobu. Výlisky mají dostatečnou přesnost pro jejich následné použití. Touto technologií se vyrábí například čočky do malých fotoaparátů a kamer [9].

2. 5. 2 Druhy předlisků

Lisování čoček vyžaduje pro svou výrobu předlisek nebo odlitý polotovar, ze kterého je následně vylisována čočka. Pro dosažení požadovaných parametrů výrobku musí mít předlisek minimálně stejné nebo v mnohých případech i lepší strukturální a rozměrové vlastnosti než finální výrobek. Volný prostor mezi formou a předliskem musí být přesně dodržen. Při velkém prostoru vznikne nedotvarovaná čočka a při malém prostoru se také nedosáhne požadovaných rozměrů a vlastností chtěného výrobku.

V závislosti na výsledné geometrii čočky se používá několik tvarů předlisku. Mezi nejpoužívanější tvary patří sférické - kuličky, téměř sférické, konvexní a bikonvexní polotovary. S výjimkou kuličkových předlisků musí být ostatní tvary vyrobeny pomocí běžného broušení a leštění. Kulové předlisky mohou být mleté, leštěné nebo vyráběné přímo z roztaveného skla. Od ceny předlisku se převážně odvíjí výsledná cena čočky [2].

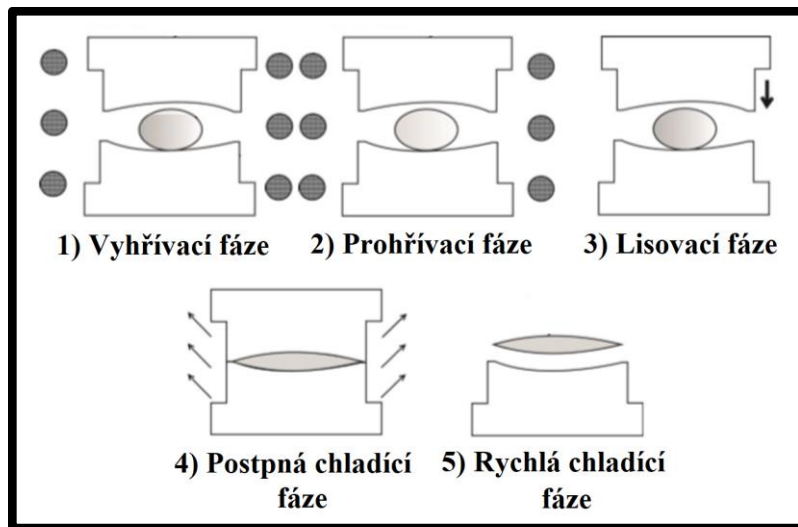
2. 5. 3 Popis procesu lisování

Metoda prošla dlouholetým výzkumem a vývojem až do dnešní podoby, u které se postup výroby provádí v podstatě v pěti fázích. Ty se nechají definovat jako:

- 1. Vyhřívací fáze
- 2. Prohřívací fáze
- 3. Lisovací fáze
- 4. Postupná chladící fáze
- 5. Rychlá chladící fáze.

Klasická lisovací fáze se tedy skládá z výše uvedených pěti kroků, u kterých se nejprve zahřívá skleněný výrobek a forma. Poté se sklo prohřívá k dosažení rovnoměrné teploty. Dále dochází k samostatnému lisování skla, při kterém se dosáhne požadovaného tvaru čočky. Dalším krokem je postupné ochlazování výrobku pro zajištění rovnoměrného odvodu tepla a stejného vnitřního pnutí. V posledním kroku dochází

k rychlému ochlazení na teplotu místnosti. Jednotlivé fáze jsou znázorněny na obrázku 10 [2].



Obr. 10 - Lisování optických elementů [8]

Vyhřívací fáze

Ohřev předvalku je prvním krokem při lisování. Před zahájením samostatného ohřevu je lisovací prostor v řádu několika sekund vyčištěn dusíkem, aby ve formě nezůstal žádný kyslík obsažený ve vzduchu. V případě přítomnosti kyslíku ve formě by totiž při lisovacím procesu mohlo dojít k jeho vznícení, a také by docházelo k významné oxidaci všech náchylných materiálů forem a lisovaných elementů. Ohřívání formy je kontrolováno dvěma teplotními čidly umístěnými v horní a dolní části stroje, a třetí čidlo je umístěno ve výsuvné komoře. Forma je vyhřívána infračervenými lampami, které jsou řízeny zpětnou vazbou PID regulátoru za pomoci termočlánků. Infračervené lampy jsou kvůli chlazení umístěny v komoře, ze které je zajištěn odvod tepla do chladiče. Stroj bývá ve většině případů chlazený vodou. Při procesu ohřívání se sklo nestlačuje. Pod tlakem by mohlo dojít k jeho porušení. Obvykle je proto vhodná teplota pro stlačování mírně nad teplotou skelného přechodu, kde už je sklo dostatečně měkké. Typická oblast je 5 - 10 % nad teplotou T_g . Sklo se tedy při zahřátí nemění přímo z tuhé látky na kapalinu, ale po zahřátí na danou teplotu se chová jako viskoelastický materiál, viz kap. 2.1.6. Viskozita skla obecně leží v rozmezí $10^9 - 10^{10}$ Pa·s. V této oblasti je sklo dostatečně měkké na to, aby bylo snadno vytvarováno do požadovaného tvaru. Lisovací stroje dosahují teploty až kolem 800 °C, ale záleží především na typu lisovacího stroje. V důsledků tepelné dilatace je potřeba počítat se změnou rozměrů výrobku i formy [2].

Fáze prohřátí

Prohřátí je nezbytná fáze, při které teplota skla a formy dosáhne rovnoměrného rozložení teploty. U velkých forem a skleněných elementů může být doba prohřátí řádově několik minut. Během tohoto cyklu udržuje výdrž na požadované teplotě řídicí jednotka lisovacího stroje [2].

Lisovací fáze

Po vyhřátí formy a předvalku začíná samostatné lisování, při kterém udržuje řídicí jednotka stroje stále stejnou teplotu formy. Při této fázi je volitelná buď poloha lisu, které je potřebné dosáhnout, nebo maximální stlačovací síla. Při pracování s polohou se musí počítat s tepelným rozpínáním formy a výrobku. Mohlo by totiž dojít k nežádoucí nadměrné síle na formu a výrobek. Pro velkou tuhost a přesnost formy by pak, byť jen u malé nepřesnosti polohy, mohlo dojít ke vzniku velkých reakčních sil, které by výrobek nenávratně poškodily. Z tohoto důvodu se v praxi využívá především kontrola maximální velikosti síly. Lis pak při velkém teplotním roztažení vzorku změní automaticky její velikost a eliminuje tím poškození. Lisovací forma je kolem svého obvodu uzavřena ocelovými, posuvnými a tlakově těsnícími pláty, které umožňují lisovat ve vakuu nebo v požadovaném inertním plynu. Zabraňuje se tím oxidačního poškození při zvýšených teplotách, a také usazování prachu a nečistot na povrchu forem. Plně uzavřená tvarovací komora s vakuem pomůže minimalizovat konvektivní a radiační tepelné ztráty. Lisovací cyklus je poháněn elektromechanickým pohonem, kde je síla kontrolována silovými snímači. Maximální velikost aplikovatelného tlaku záleží na typu a konstrukci lisu. V mnohých případech se tlaky pohybují až přibližně kolem 13 kN. Poloha se zjišťuje pomocí kodéru na servomotoru, kterým je poháněn elektromechanický pohon [2].

Postupná chladicí fáze

Čtvrtým krokem je postupná chladicí fáze, při které se teplota skla postupně snižuje na požadovanou teplotu. Obvykle je zapotřebí dodatečné teplo, které zajistí dostatečně pomalé ochlazování formy. Aby se takto dodržel specifikovaný teplotní profil, vstříkuje se na formu teplý dusík. Během této fáze je výrobek opět stlačován. Dosáhne se tím konečného tvaru, vyrovnání povrchu a zabrání se tak i rychlému smrštění.

Tato fáze je v lisování nejkritičtější, protože během chlazení se vnější povrch skla ochlazuje rychleji než vnitřní struktura. Během teplotního rozmezí, ve kterém se fáze mění, se totiž vlastnosti vnějšího povrchu blíží elastickému stavu, zatímco vnitřní jádro

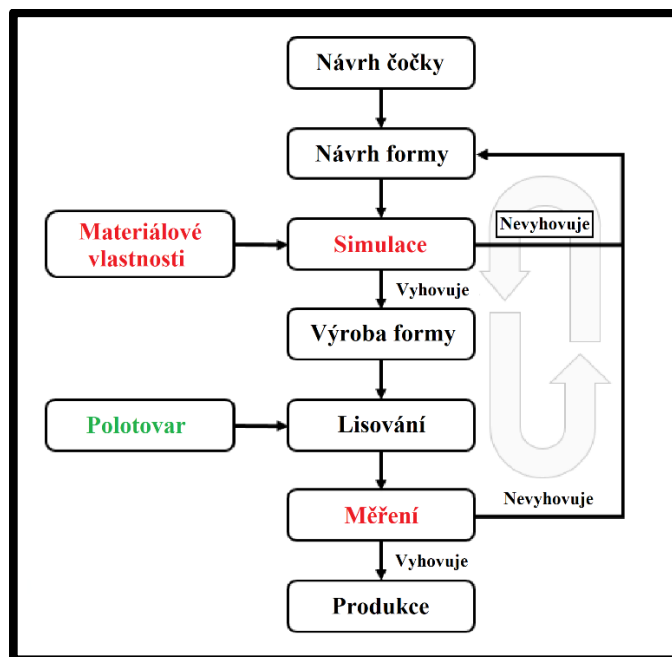
zůstává stále viskózní. Změna fáze a její nerovnoměrné rozložení teploty mají za následek nežádoucí zbytkové napětí, které poškozují optické vlastnosti výrobku. Aby se minimalizovalo nerovnoměrné rozložení teploty, musí být chlazení pečlivě řízeno podle daných kritérií. Dosáhne se tím pomalého uvolnění napětí a rovnováhy optických vlastností vylisku [2].

Rychlá chladící fáze

Při poslední fázi lisování dochází k rychlému ochlazení čočky a formy na teplotu okolí. Chlazení se provádí za použití vysokého proudu plynného dusíku. Lze takto ale učinit od teplot, při kterých je sklo považováno za zmrazené v pevném stavu a rychlé ochlazení už nemá vliv na jeho vlastnosti. Po dokončení tohoto cyklu je hotový vylisek vyndán a do formy je vložen nový skleněný předvalek.

2. 6 Numerická simulace v lisování

Pro zjištění například optických vlastností, geometrie, rozložení teploty, maximálního potřebného tlaku, indukovaného napětí, zbytkového napětí a dalších parametrů vylisovaného elementu před samotným lisováním, nám slouží numerická simulace. Vychází zejména z materiálových vlastností skla, lisovacího nástroje a jejich materiálových modelů. Pro simulaci jsou komerčně dostupné softwary, např. Marc Mentat, ANSYS, PAM-STAMP ad., nebo softwary dodávané přímo k lisovacím strojům. Vývojový diagram s podstatnou simulací je uveden na obrázku 39.



Obr. 39 – Vývojový diagram lisování skla

3 Praktická část

V praktické části byla provedena numerická simulace lisovaného elementu ze skla S-FPL53 a dále bylo provedeno samotné lisování pěti elementů z totožného skla. Bylo vykonáno měření a posléze porovnání přesnosti numerické simulace se skutečnými tvary elementů. Převážná většina měření a numerické simulace byla uskutečněna ve spolupráci s Výzkumným centrem speciální optiky a optoelektronických systémů Toptec v Turnově, který patří pod Ústav fyziky plazmatu Akademie věd České republiky.

Numerická simulace byla provedena v softwaru s názvem GPM Sim 2.0. Tento software byl vytvořen pro simulaci lisování u lisovacího stroje Nanotech 140 GPM. Pro skutečné lisování a simulaci byl vybrán druh skla Ohara-S-FPL53 s materiálem formy označeným Ssab Toolox 44. Data pro tyto materiály software GPM Sim 2.0 původně neobsahoval. Z tohoto důvodu byly vyextrahovány parametry jednotlivých typů skel obsažených ve zmiňovaném programu. Dále byla provedena analýza těchto dat, kde byly porovnány vstupní data pro skla, u kterých již byly jejich parametry v programu obsaženy. Zpětnou kontrolou pak bylo zjištěno, která data jsou stejná a která je potřeba doplnit. Tyto hodnoty byly nalezeny a vypsány z katalogového lisu pro sklo S-FPL53 a zároveň pro nástrojový materiál Toolox 44. Všechny potřebné hodnoty byly dohledatelné, až na měrnou tepelnou kapacitu lisovaného skla. Z toho důvodu bylo rozhodnuto neznámou hodnotu zjistit experimentálně.

3.1 Sklo s označením S - FPL53

Jedná se o typ skla používaný především pro výrobu optických čoček do dalekohledů, fotoaparátů a dalších zařízení. Proto bylo vhodné tento typ použít v diplomové práci, která se zabývá lisováním elementů a simulací tohoto procesu. V označení S-FPL53 písmeno *S* představuje druh materiálu, tedy sklo. *FP* označují fluorofosfát, který je ve skle obsažen, a písmeno *L* představuje nízký lom světla [18]. Všechny důležité parametry skla, které byly potřeba pro simulaci lisování, jsou zaneseny v tabulce 3 kapitoly 3.2 i s již vypočtenou tepelnou vodivostí.

3.1.1 Zjištění měrné tepelné kapacity skla S-FPL53

Pro numerickou simulaci skla S-FPL53 bylo zapotřebí změřit hodnotu měrné tepelné kapacity c . Pro změření kapacity byl nejprve zapůjčen v centru Toptec v Turnově Vzorek 1, který je zobrazen na obrázku 11.



Obr. 11 - Vzorek 1



Obr. 12 - TCi-Thermal Conductivity

Kapacitu bylo možno zjistit pouze nepřímou metodou. Tuto vlastnost materiálu ani přímou metodou nelze zjistit, tedy způsobem, ze kterého by se hodnota získala přímo bez nutného výpočtu. Nepřímé měření mohlo být provedeno buď pomocí kalorimetru, nebo za pomoci jiného vhodného přístroje.

Při použití kalorimetru by byl nejprve Vzorek 1 zahřát na určitou teplotu, například na 60 °C. Potom by byl vložen do kalorimetru s daným množstvím vody o určité teplotě. Kalorimetr, jakožto tepelně izolovaná nádoba od tepla v okolí, dovoluje Vzorku 1 přenést svoji teplotu vodě bez tepelných ztrát. Teplota vody by se tím za určitý čas zvýšila na maximální a hodnota by byla změřena. Dále při znalosti hustoty vody ρ_V , měrné tepelné kapacity c_V a navýšení teploty po vložení nahřátého Vzorku 1 Δt_V by mohla být sestavena první kalorimetrická rovnice:

$$Q_v = c_v \cdot \rho_v \cdot \Delta t_v. \quad (3.1)$$

Při znalosti hustoty Vzorku 1 ρ_1 , ochlazení nahřátého Vzorku 1 po vložení do vody o nižší teplotě Δt_1 a neznámé kapacity daného vzorku c_1 by mohla být sestavena druhá kalorimetrická rovnice:

$$Q_1 = c_1 \cdot \rho_1 \cdot \Delta t_1. \quad (3.2)$$

Z těchto dvou rovnic o jedné neznámé by zjišťovaná kapacita c_1 mohla být vyjádřena a vypočítána.

Pro časovou náročnost a momentální nezpůsobilost měření nepřímou metodou pomocí kalorimetru, zároveň i pro možnost zanesení chyby při měření teplot vody a Vzorku 1, bylo rozhodnuto dát přednost měření za pomoci jiného přístroje. Proto byl zvolen stroj TCi-Thermal Conductivity Analyzer od výrobce C-Therm Technologies Ltd, který dokáže změřit tepelnou vodivost a efuzivitu materiálů. Ze změřené efuzivity je dále zjišťovaná měrná tepelná kapacita materiálu snadno vypočitatelná podle vzorce:

$$e = (\lambda \cdot \rho \cdot c)^{1/2} \quad (3.3)$$

kde e je efuzivita $\text{W} \cdot \text{s}^{0.5} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; λ tepelná vodivost $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, ρ je hustota $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a c zjišťovaná měrná tepelná kapacita vzorku $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [13].

Zařízení bylo k dispozici v laboratořích Katedry energetických zařízení Technické univerzity v Liberci. Využívá techniku Modified Transient Plane Source (MTPS), tedy tzv. modifikovaný zdroj tepelné roviny. Při měření se zkoumaný vzorek položí svou rovnou podstavou na jednostranný snímač odrazivosti tepla, který využívá momentální konstantní zdroj tepla s impulsem 1 - 3 za sekundu. Použitý proud ve snímači způsobí zvýšení teploty mezi snímačem a vzorkem, což ve výsledku vyvolá změnu poklesu napětí na snímači. Dále je velikost napětí vedena do řídicí jednotky a data jsou zobrazena na osobním počítači. Zařízení je patrné z obrázku 12 [12].

Před samotným měřením Vzorku 1 byla nejprve na celý snímač odrazivosti tepla nanесena destilovaná voda. Poté se na snímač položil plastový etalon pro kalibraci, přičemž došlo k vytlačení vody i na ocelový držák a provedlo se ověření správnosti měření, které bylo vyhovující. Poté byl etanol odložen a snímač osušen. Znovu se na snímač nanесla destilovaná voda a začalo samostatné měření položením Vzorku 1 svou rovinnou podstavou na snímač, přičemž se také voda rozprostřela až na ocelový držák snímače. Bylo spuštěno měření s desetinásobným opakováním. Posléze byla z aritmetického průměru zjištěna efuzivita $e = 1548,8 \text{ W} \cdot \text{s}^{0.5} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ a tepelná vodivost $\lambda_n = 1,239 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

V materiálovém listu od výrobce skla je ale hodnota tepelné vodivosti skla S - FPL53 udávaná jako $\lambda = 0,857 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, při čemž vzniklá odchylka s naměřeným λ_n vyšla $\Delta\lambda = 0,382 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, což je přibližně 30,8 %. Kvůli velké odchylce bylo měření pro Vzorek 1 vyhodnoceno jako chybné. Předpokládaným důvodem bylo možné zkreslení měření díky hrubému povrchu rovné podstavky Vzorku 1.

Z toho důvodu byl v centru Toptec zapůjčen Vzorek 2 z totožného skla, který měl svou rovinnou podstavu leštěnou. Bylo předpokládáno, že měření nebude zkresleno a naměřená hodnota tepelné vodivosti λ_n bude totožná s hodnotou vodivosti udávanou výrobcem skla λ . Vzorek 2 je patrný z obrázku 13.



Obr. 13 - Vzorek 2

Měření Vzorku 2 bylo provedeno totožně jako u Vzorku 1, ale po několika opětovných měřeních se nedospělo ke správným výsledkům, při kterých by byla naměřená λ_n přibližně stejná s λ udávanou výrobcem a měření by tak mohlo být vyhodnoceno jako správné.

Po analýze postupu a dodatečných měřeních se přišlo na příčinu zkreslování výsledků. Vzniklo díky přílišnému množství destilované vody při měření pod Vzorkem 1 a Vzorkem 2. Voda tak přilínala k ocelovému plášti snímače a zkreslovala měření. Proto se při novém měření na snímač nanoslo pouze nezbytně nutné minimální množství destilované vody, které je znázorněno na obr. 14. Na obrázku 15 je vidět skrz Vzorek 2, že voda zůstává pouze na zeleném čidle snímače bez kontaktu s ocelovým držákem. Měření tak bylo provedeno znovu celkem s dvaceti opakováním. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.



Obr. 14 - Množství vody při správném měření Obr. 15 - Množství vody pod Vzorkem 2

Pořadí	e [$\text{W}\cdot\text{s}^{0,5}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]	λ_n [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
1.	1209,6	0,84
2.	1216,2	0,847
3.	1228,2	0,86
4.	1209,8	0,84
5.	1215,6	0,846
6.	1209,1	0,839
7.	1210,6	0,841
8.	1210,7	0,841
9.	1197,8	0,827
10.	1192,8	0,821
11.	1211,7	0,842
12.	1225,9	0,858
13.	1236,8	0,87
14.	1208,7	0,839
15.	1178,3	0,805
16.	1156,2	0,781
17.	1145,7	0,771
18.	1194	0,822
19.	1144,4	0,768
20.	1296,8	0,938
Ar. Pr.	1204,95	0,8348

Tabulka 2 – Výsledky měření efuzivity a tepelné vodivosti pro Vzorek 2

Z tabulky 2 byla vyhodnocena hodnota tepelné vodivosti $\lambda_n = 0,8348 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Tato hodnota je přibližně totožná jako hodnota dána výrobcem $\lambda = 0,857 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ s odchylkou pouze $\Delta\lambda = 0,0222 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, což je přibližně 2,6 %.

Dále byla vypočítána nejistota naměřené efuzivity a tepelné vodivosti. Nejistota definuje parametr závislý na výsledku měření a zároveň definuje rozsah hodnot, které lze racionálně přidat k naměřené veličině. Při statickém zpracování naměřených údajů metodou typu A se vycházelo ze vzorce:

$$u_A(y) = \sqrt{\frac{1}{n\cdot(n-1)} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.4)$$

kde $u_A(y)$ je zjišťovaná nejistota typu A v jednotkách měřené veličiny; n je počet měření; y_i zastupuje určité měření a \bar{y} je aritmetický průměr všech měření [15].

Po dosazení hodnot z tabulky 2 do vzorce 3.4 vyšla zjišťovaná nejistota u_A pro efuzivitu přibližně $7,5 \text{ W}\cdot\text{s}^{0,5}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ a pro tepelnou kapacitu $0,00832 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Numerická simulace procesu lisování přesných optických elementů

Proto byla naměřená efuzivita uvažována s velikostí $1204 \text{ W}\cdot\text{s}^{0.5}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ a tepelná kapacita s hodnotou $0,835 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Takto velká odchylka byla již vyhodnocena jako dostačující a naměřená data jako věrohodná. Pravděpodobně by vycházela naměřená λ_n při totožném minimálním množství vody u měření Vzorku 1 totožně s udávanou λ od výrobce. Problém tedy nebyl v příliš hrubém povrchu Vzorku 1, nýbrž ve velkém množství kapaliny na snímači.

Dále pro správný výpočet bylo zapotřebí znát poslední hodnotu, kterou byla hustota simulovaného skla. V materiálových datech od výrobce byla uvedena s velikostí $\rho = 3620 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Z rovnice 3.3 bylo poté vyjádřeno a vypočítáno:

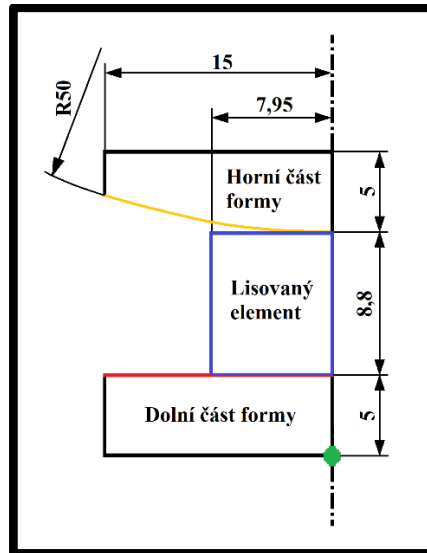
$$c = \frac{e^2}{\rho \cdot \lambda} = \frac{1204^2}{3620 \cdot 0.857} = 467 \pm 6 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}.$$

Díky takto zjištěné efuzivitě a posléze vypočtenému c bylo možno dále pokračovat v numerické simulaci lisování.

3. 2 Simulace lisování elementů pro sférickou formu R50

Numerická simulace byla provedena v softwaru s názvem GPM Sim 2.0. Tento program byl vytvořen pro podporu lisovacího stroje Nanotech 140 GPM od americké firmy Moore Tools. Stroj se nachází ve výzkumném centru Toptec v Turnově.

Simulace byla nejdříve provedena pro sférický povrch horní části formy. Na začátku byla vytvořena geometrie lisovaného elementu a lisovací formy. Uvažovaný poloměr 50 mm a rozměry lisovaného elementu byly předurčeny reálnou formou a elementy, které mohly být poskytnuty centrem Toptec v Turnově. Tvar spodní části formy byl uvažován jako rovinná plocha, která výrazně neovlivňuje finální tvar elementu při lisování. Rozměry s geometrií jsou patrné z obrázku 16.



Obr. 16 - Rozměry geometrie formy a elementu

Po vytvoření geometrie následoval další krok, při kterém byly do programu zaneseny okrajové podmínky. Bylo zapotřebí specifikovat pevný uzel, kterým byl zvolen bod pravé dolní části formy znázorněný zeleně na obrázku 16. Dále byly specifikovány axiální body lisování, kterými byly zvoleny všechny body na ose symetrie formy a lisovaného elementu. Pro styk horní části formy s elementem byla zvolena žlutá křivka, pro styk dolní části formy s elementem červená přímka a jako kontakt elementu s okolní formou byl zvolen modře zvýrazněný obrys elementu. Pro dokončení zadávání okrajových podmínek byla označena plocha horní části formy, dolní části formy a skleněného elementu. Barevné označení je uvedeno na obrázku 16.

V dalším kroku následovala definice materiálu formy, kterým byl zvolen materiál s označení Toolox 44. Jedná se o nástrojovou ocel, u které bylo zapotřebí zadat její Yongův modul s velikostí $2,1 \cdot 10^5$ MPa, Poisonovu konstantu s hodnotou 0,3 a koeficient teplotní roztažnosti o velikosti $13,5 \cdot 10^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Dále byly zadány parametry pro sklo S-FPL53, které byly zjištěny ve zmiňované analýze vstupních dat z katalogových listů a od ostatních typů skel. Parametry jsou zaneseny v tabulce 3.

V dalším kroku byla vygenerována síť buněk ve skleněném elementu a lisovacím nástroji. Element pro přesnější výsledek obsahoval 2240 buněk a v obou částech nástroje jich bylo dohromady celkem 1200. Po takto zesíťovaném modelu nastal poslední krok, ve kterém byly definovány parametry procesu. Program GPM Sim 2.0 požadoval zadat informace o ohřívání, lisování a ochlazování. Data, která byla zadána, jsou zanesena v tabulce 4, 5 a 6.

Parametry zadaného skla S-FPL53	Hodnota	Jednotky
Yongův modul	69000	[MPa]
Poissonova konstanta	0,303	[1]
Teplotní součinitel roztažnosti (-30 až 70)	$1,45 \cdot 10^{-5}$	$[1 \cdot K^{-1}]$
Teplotní součinitel roztažnosti (20 až 300)	$1,69 \cdot 10^{-5}$	$[1 \cdot K^{-1}]$
Měrná tepelná kapacita	467	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
Tepelná vodivost	0,857	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
Hustota	3620	$[kg \cdot m^{-3}]$
Teplota skelného přechodu T_g	426	$[^{\circ}C]$
Referenční teplota pro Maxwellovy parametry	500	$[^{\circ}C]$
Poissonův koeficient (blízko nestlačitelného stavu)	0,49	[1]
Počáteční modul pružnosti	100000	[MPa]
Referenční teplota pro strukturální dobu uvolnění	500	$[^{\circ}C]$
Teplotní součinitel roztažnosti	$8,8 \cdot 10^{-6}$	$[1 \cdot K^{-1}]$
Parametr strukturálního uvolnění	0,4	[1]
Konstantní koeficient aktivace energie plynu	55000	$[^{\circ}C]$
Žihací koeficient	-0,00087	[1]
Původní index lomu	1,7555	[1]
Původní rychlost chlazení	2	$[K \cdot hod^{-1}]$

Tabulka 3 – Parametry skla S-FPL53 pro vytvoření numerické simulace [14]

Parametry zahřívání	Hodnota	Jednotky
Teplota okolí	25	$[^{\circ}C]$
Konečná teplota zahřívání	600	$[^{\circ}C]$

Tabulka 4 – Parametry definující průběh ohřívání

Parametry lisování	Hodnota	Jednotky
Čas lisování	200	[s]
Výška stlačení	2	[mm]
Velikost přírůstku času na jeden krok	1	[s]
Maximální počet iterací	30	[1]
Tolerance pro konvergenci	50	[N]
Maximální počet automatických časových úseků	20	[1]
Tolerance pro automatické časování	10^{-8}	[N]
Parametr normálního odchytky (analýza kontaktu)	$5 \cdot 10^{-7}$	[N]
Velikost tangenciální odchytky	500	[N]
Koeficient tření	0,05	[1]

Tabulka 5 – Parametry definující průběh lisování

Parametry chlazení	Hodnota	Jednotky
Teplota na začátku chlazení	445	[°C]
Teplota na konci postupného chlazení	300	[°C]
Rychlost postupného chlazení	0,36	[K·s ⁻¹]
Časový krok pro postupné chlazení	1	[s]
Teplota na konci rychlého chlazení	25	[°C]
Rychlost rychlého chlazení	0,5	[K·s ⁻¹]
Časový krok pro rychlé chlazení	1	[s]
Výsledky chlazení v intervalech zatížení	2	[1]

Tabulka 6 – Parametry definující průběh chlazení

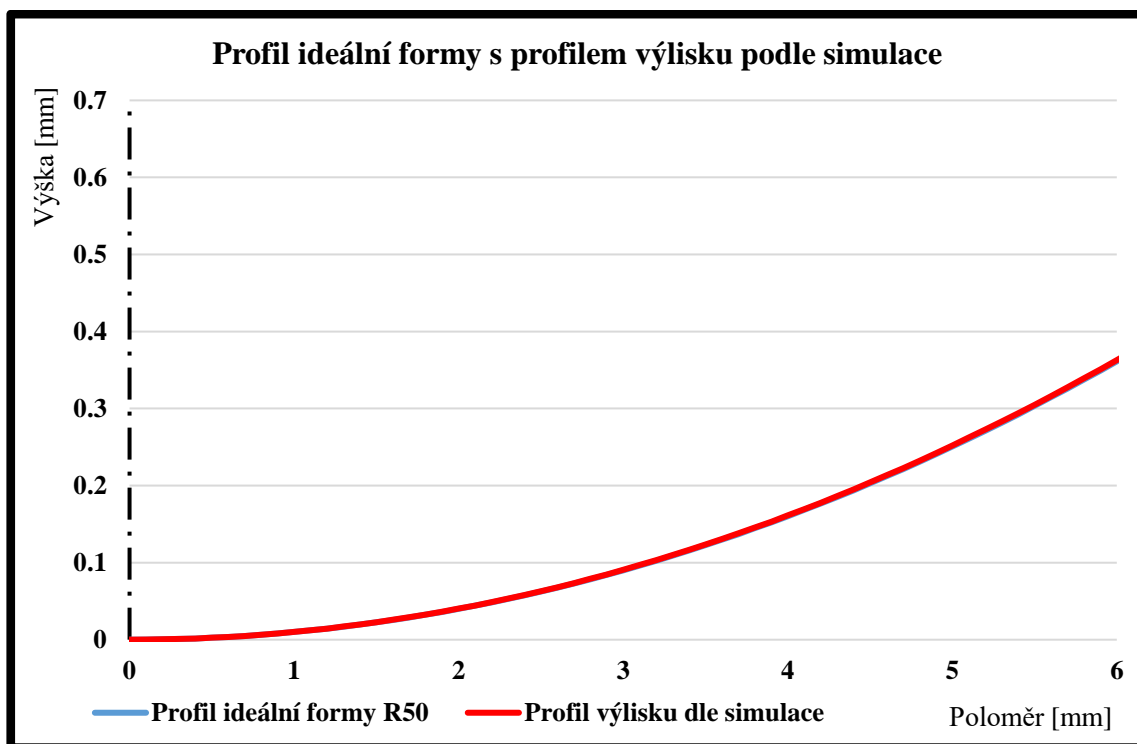
Po provedení všech těchto kroků byla spuštěna samotná simulace. Výstupem simulace v programu GPM Sim 2.0 byly získány koeficienty asférické křivky, které popisují požadovaný a výsledný tvar výlisku. Koeficienty jsou zaneseny v tabulce 7. Výsledný tvar by měl tedy podle programu vzniknout při zadaných parametrech pro lisované sklo S-FPL 53 ve formě z materiálu s označením Toolox 44.

	Požadovaný tvar [mm]	Reálný tvar [mm]
R [mm]	50	49,8932
K	0	-0,7102
A02; A04; A06	0; 0; 0	0; 0; 0

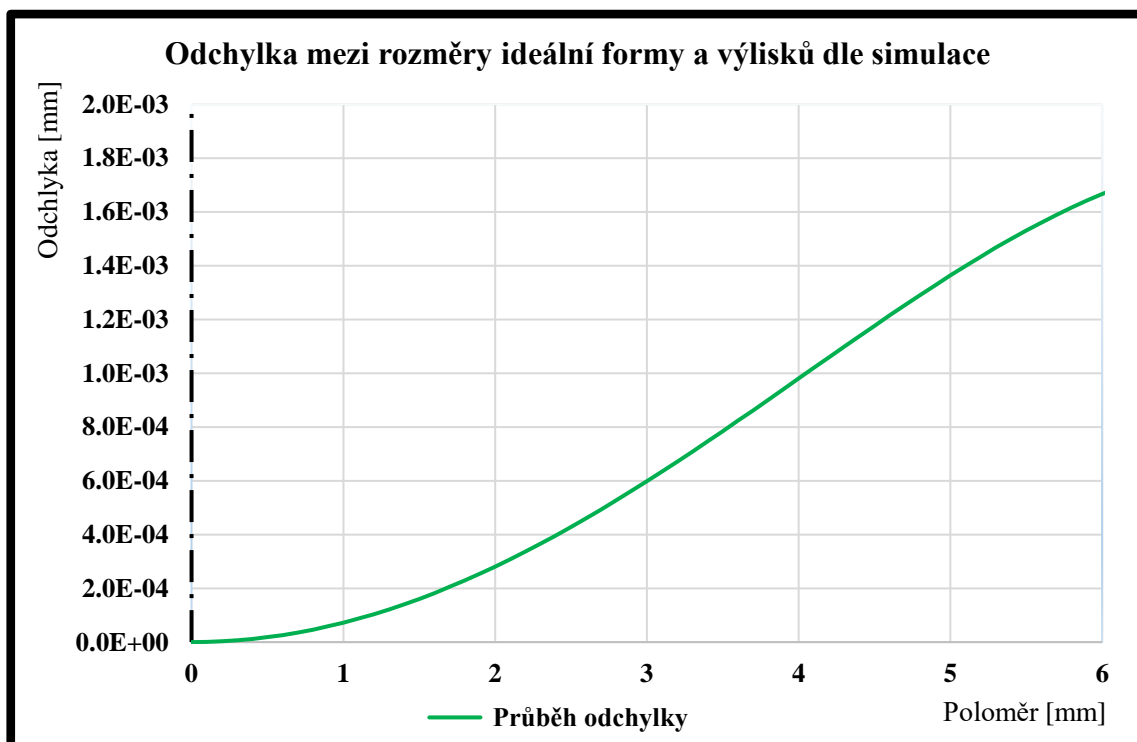
Tabulka 7 – Koeficienty asférické křivky

Koeficienty byly dosazeny do asférické rovnice (2.22) a dále byl vytvořen graf 7, na kterém je patrný rozdíl mezi modrou křivkou představující ideální profil formy R50 a červenou křivkou představující profil výlisků dle simulačního programu. Na grafu 8 je pak zřejmá samostatná odchylka mezi těmito stavy.

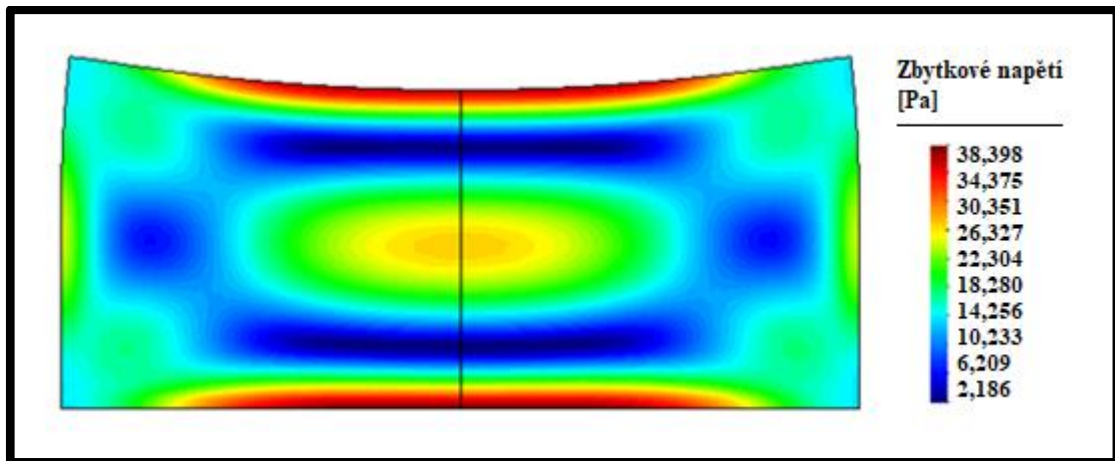
Zároveň byl programem vypočítán korigovaný tvar formy tak, aby po aplikaci korekce byl dosažen požadovaný tvar výlisku, tedy přesný poloměr 50 mm. Výstupem bylo dále zobrazení zbytkového napětí ve výlisku, které má výrazný vliv na výsledný indexu lomu vylisované čočky. Zbytkové napětí je znázorněno na obrázku 17. Poté bylo zjištěno maximální napětí v elementu při vylisování s velikostí přibližně 15,126 KPa patrné z obrázku 18 a konečná teplota ve výlisku po rychlém chlazení lisovacího procesu, která je zobrazena na obrázku 19.



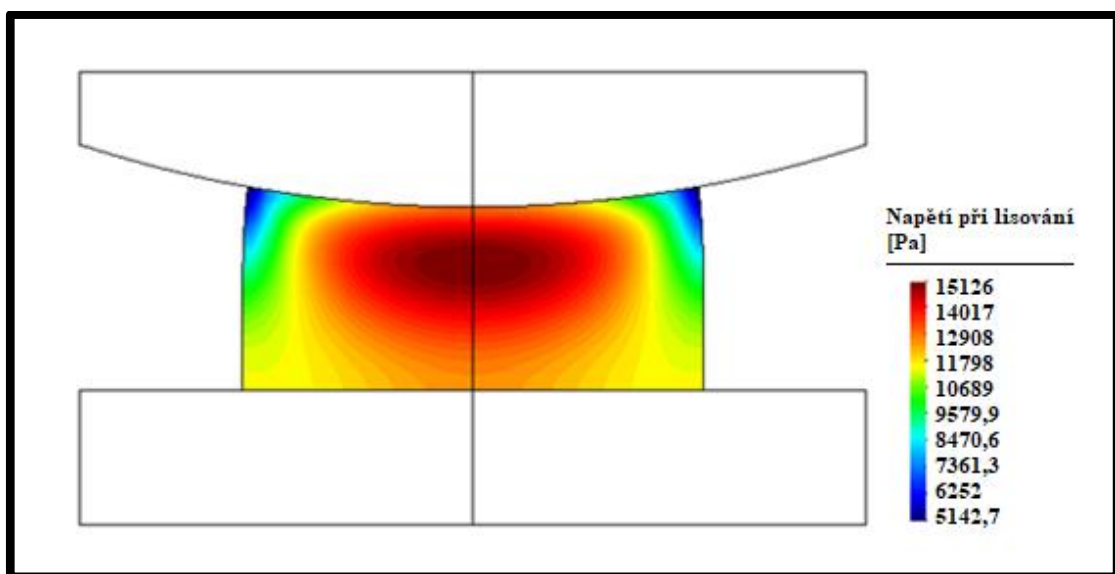
Graf 7 – Profily ideální formy R50 a výlisku podle simulace



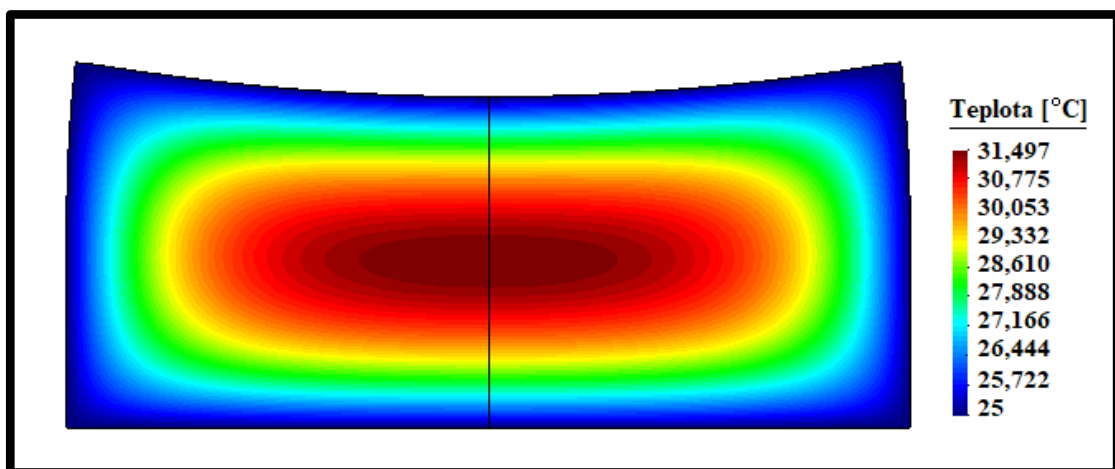
Graf 8 – Odchylka mezi profily ideální formy a výlisků podle simulace



Obr. 17 - Zbytkové napětí po lisování elementu



Obr. 18 - Maximální napětí při lisování elementu



Obr. 19 - Teplota vylisku na konci chlazení

V tomto kroku jsem se naučil pracovat s programem a byly vyzkoušeny vlastnosti programu s jeho funkcemi. Dalším krokem bylo změření přesného tvaru reálné horní části formy nástroje, a tak i zjištění její odchylky od ideálního stavu R50 mm. Dále byla simulace znovu vytvořena s hodnotami, u kterých byla již tato odchylka zohledněna. Při simulaci současně probíhalo ještě samotné reálné lisování skleněných elementů, aby se díky vytiženosti měřicího zařízení MarForm mohly rozměry nástroje a výlisků měřit společně.

3.3 Lisování skleněných elementů

Aby byla zjištěna správnost simulace, provedlo se reálné lisování se stejným sklem, stejnou formou a totožnými parametry při ohřívání, lisování a chlazení. Lisování bylo provedeno pro pět výlisků uvedených v následující podkapitole.

3.3.1 Příprava vzorků a formy pro lisování

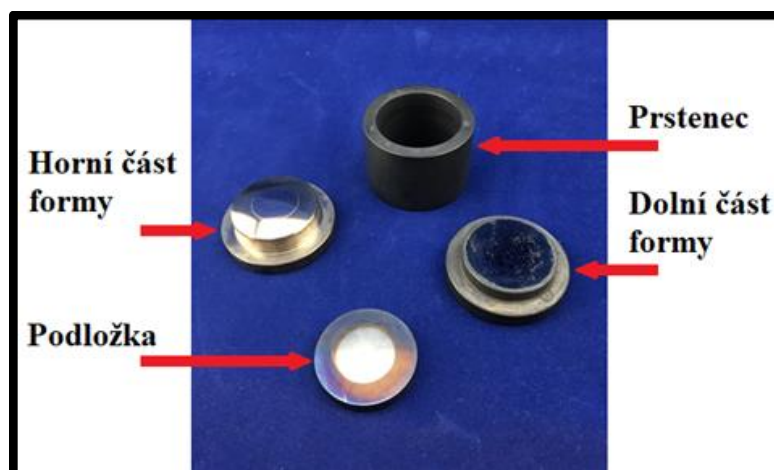
Před samotným lisování byla nejdříve připravena forma a skleněné elementy. Forma byla vyrobena z materiálu, který měl pro naše lisovací teploty dostatečně velkou pevnostní rezervu. Při ohřevu skla nad teplotu jeho skelného přechodu musí být totiž materiál formy dostatečně rozměrově stálý. Při vysoké teplotní roztažnosti by došlo ke změně tvaru formy, což by mělo za následek vznik nekvalitního povrchu a nežádoucího tvaru výlisku. Proto byl zvolen materiál s označením *Toolox 44*, ze kterého byla forma v centru Toptec v Turnově vyrobena. Jedná se o nástrojovou ocel s dobrou rozměrovou stálostí, protože se při výrobě dosahuje vysoké teploty temperování, což má za následek velmi nízké zbytkové pnutí. Oproti ostatním nástrojovým ocelím je dobře obrobitelná. Lze jí leptat a leštit s velmi dobrými výsledky. Proto se využívá především pro výrobu forem na lisování plastů, skla, pro výrobu dílů s vyšším opotřebením, pro výrobu částí strojů ad. [17]. Základní mechanické a fyzikální vlastnosti jsou zaneseny v tabulce 8.

Teplota [°C]	20	200
Mez pevnosti R_m [MPa]	1450	1380
Mez pružnosti R_p [MPa]	1300	1200
Pevnost v tlaku R_d [MPa]	1250	1120
Tažnost A [%]	13	10
Rázová houževnatost [J]	30	60
Tvrдость [HBW]	450	-
Tvrдость [HRC]	44 - 45	-

Tabulka 8 – Fyzikální a mechanické vlastnosti nástrojové oceli *Toolox 44* [17]

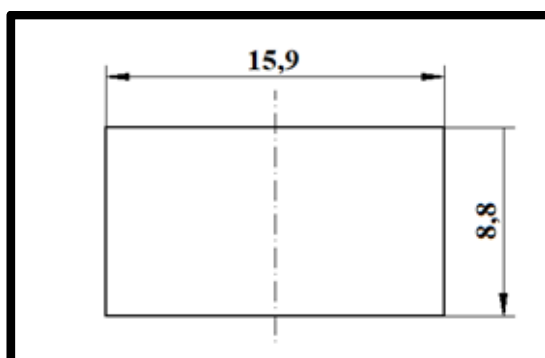
Numerická simulace procesu lisování přesných optických elementů

Forma byla tvořena celkem čtyřmi částmi, horní a dolní částí formy, prstencem a podložkou. Horní část formy a podložka byla vyrobena jako tvarový negativ lisovaného elementu, při kterém měla horní část poloměr zaoblění 50 mm a podložka byla s rovinným tvarem. Prstenec sloužil k vystředění horní části formy, podložky a dolní části formy. Dále také určoval finální výšku výlisku. Forma je s popisem uvedena na obrázku 20.



Obr. 20 - Forma pro lisování skleněných elementů

Pro lisování bylo v centru Topotec použito 5 skleněných elementů. Vzorky byly vykružené z desky s konstantní výškou. Dále byly broušené a leštěné na stejný rozměr 8,8 mm. Měly tedy totožnou velikost a byly vyrobeny ze stejného skla s označením S-FPL53. Rozměry vzorku jsou uvedené na obrázku 21 a Element 1 je vyfocen na obrázku 22.



Obr. 21 - Rozměry elementů



Obr. 22 - Element 1

3. 3. 2 Stroj Nanotech 140 GPM

Lisování proběhlo na stroji Nanotech 140 GPM, který se nachází v laboratořích centra Toptec v Turnově a je uvedený na obrázku 23. Pro chlazení kontaktních ploch je stroj opatřen chladičem znázorněným na obrázku 24. Dále je stroj pro zajištění inertní atmosféry a chlazení procesu lisování uvnitř komory vybaven chlazením pomocí plynného dusíku, který je získáván odpařováním z kapalného stavu z tlakové nádoby. Nádoba je zobrazena na obrázku 25.



Obr. 23 - Lisovací stroj

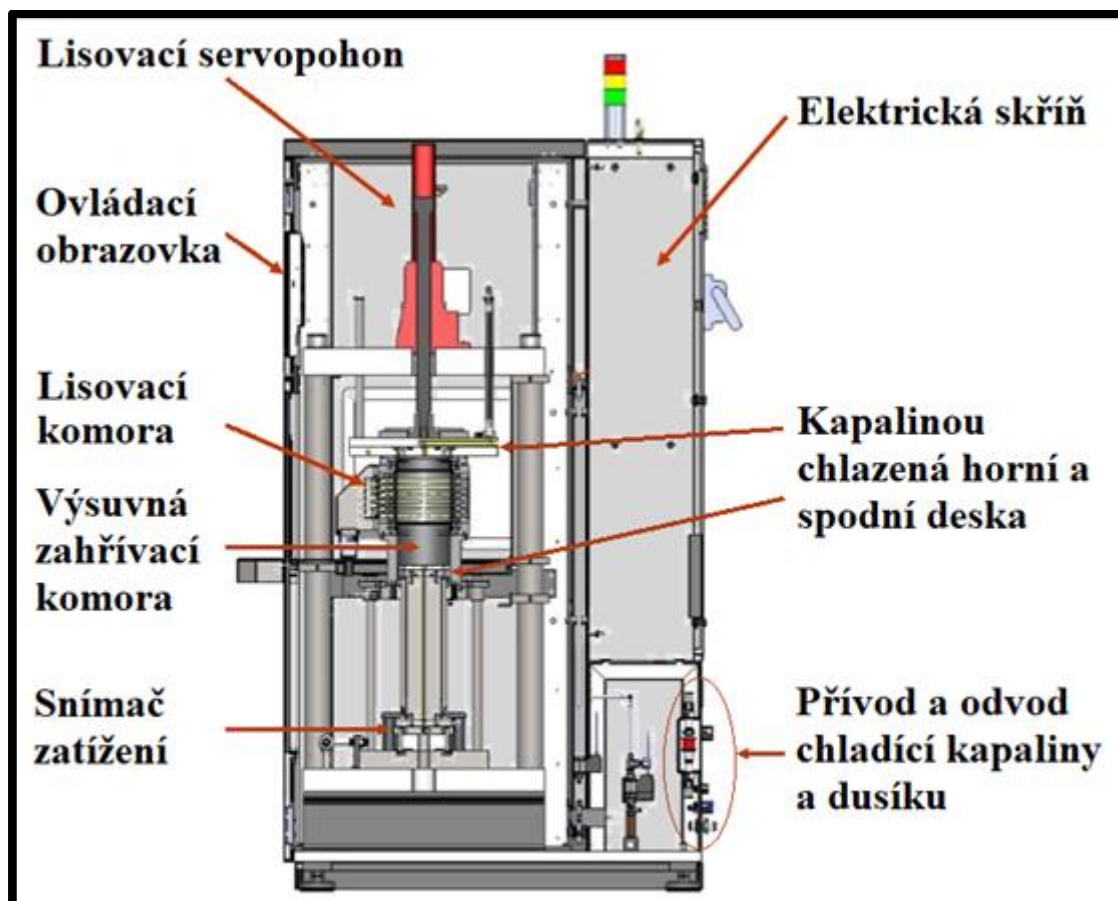


Obr. 24 - Chladič

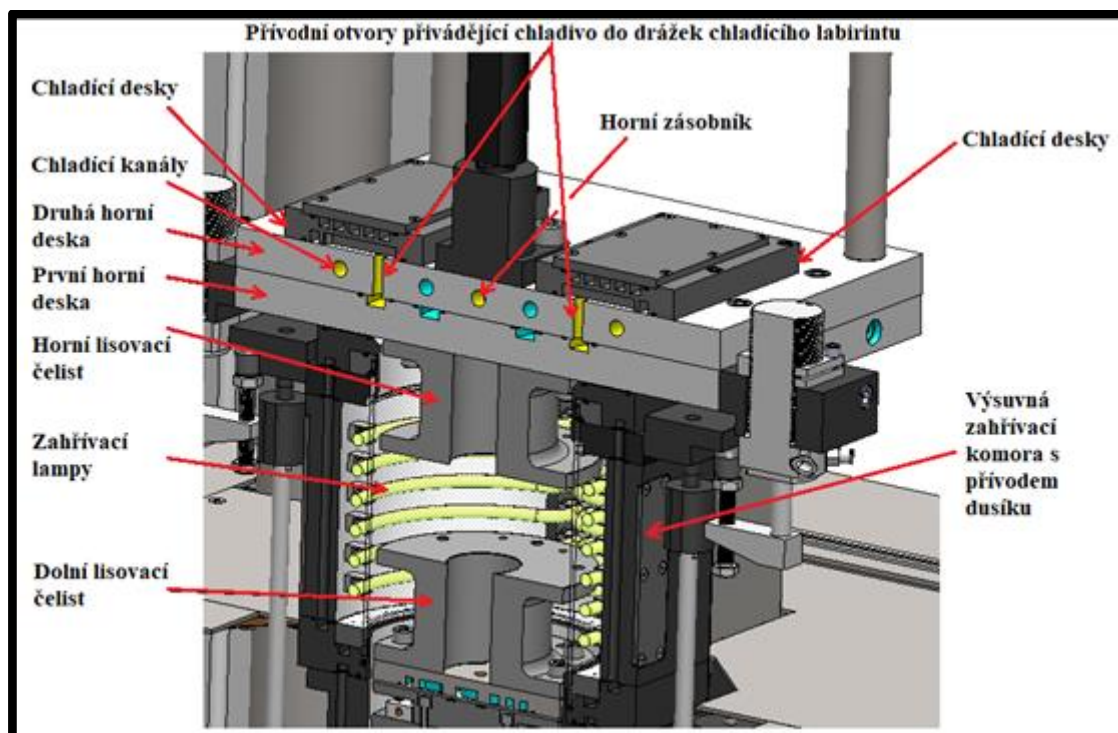


Obr. 25 - Dusíková nádoba

Na stroji lze podle výrobce lisovat výlisky s formou o průměru až 140 mm maximální lisovací silou 25 kN. Velikost lisovací síly je měřena pomocí snímače zatížení, který je umístěn v dolní části stroje. Zařízení umožňuje zvolit dva režimy lisování. Buď podle velikosti vyvinuté síly na lisovaný element, nebo podle polohy horní lisovací čelisti stroje. Poloha čelisti je však během zahřívacího cyklu tepelně namáhána. Proto musí být zpětně kompenzována v závislosti na velikosti tlaku mezi čelistmi vyvíjeného na lisovací formu. Při ohřívání formy je možné dosáhnout zahřívací teploty až 800 °C. Mezi lisovací čelisti lze vložit buď pevná, nebo volná forma. Stroj pracuje se čtyřmi fázemi, kterými jsou zahřívací, lisovací, chladičí a rychlá chladičí fáze. Na obrázku 26 je schéma zařízení s jeho popisem. Detailní zobrazení lisovací a zahřívací komory je pak na obrázku 27 [16].



Obr. 26 - Znáznornění a popis části stroje Nanotech 140 GPM [16]



Obr. 27 - Znáznornění a popis částí lisovací a zahřívací komory [16]

Předzahřívací fáze	Hodnota	Jednotky
Pozice horní čelisti	-2,062	[mm]
Síla	30	[N]
Teplota	25	[°C]
Zahřívací fáze	Hodnota	Jednotky
Pozice horní čelisti	-2,062	[mm]
Síla	30	[N]
Teplota	445	[°C]
Lisovací fáze	Hodnota	Jednotky
Pozice horní čelisti	-2,062	[mm]
Síla	1000	[N]
Teplota	415	[°C]
Chladicí fáze	Hodnota	Jednotky
Pozice horní čelisti	-2,062	[mm]
Síla	300	[N]
Teplota	300	[°C]
Rychlá chladicí fáze	Hodnota	Jednotky
Pozice horní čelisti	0	[mm]
Síla	0	[N]
Teplota	25	[°C]

Tabulka 9 – Hodnoty zadané do lisovacího programu

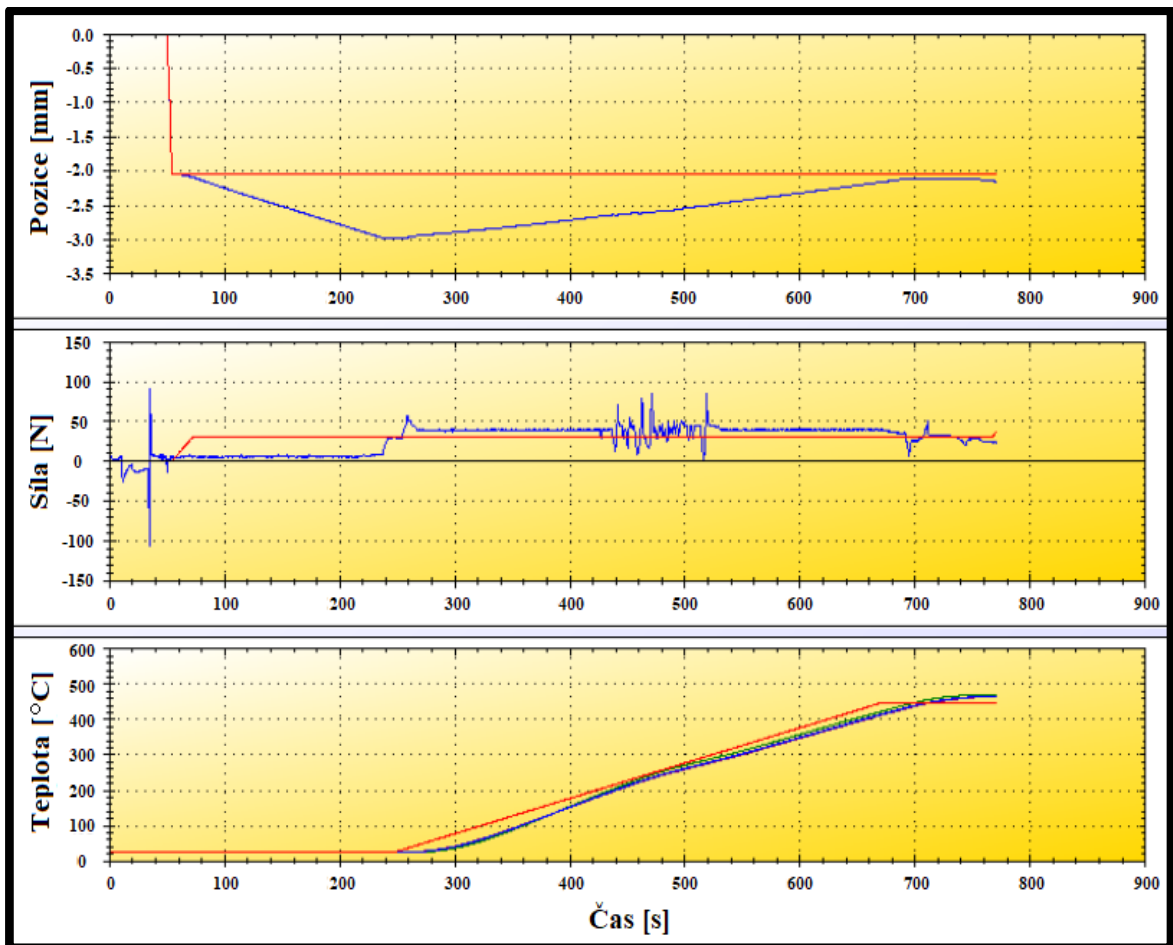
3. 3. 3 Popis lisování elementů

Lisování elementů probíhalo následujícím postupem. Po zapnutí lisovacího stroje byla otevřena tlaková nádoba s kapalným dusíkem pro možnost chlazení stroje. Dále bylo potřeba na displeji stroje příkazem chlazení zapnout. Byla otevřena lisovací forma, do které byl položen Element 1 na svojí podstavu. Poté byly otevřeny ochranné dveře a mezi lisovací čelisti byla vložena forma. Ochranné dveře byly zavřeny. Na displeji byl zvolen program, jehož parametry jsou zaznamenány v tabulce 9.

Při potvrzení zvoleného lisovacího programu se přesunula vrchní čelist do základní pozice, která byla programem brána jako nulová. Dále byla vysunuta zahřívací komora. Před zahřívací fází mělo být na formu vyvinuto minimální předpětí s velikostí 30 N a s polohou horní čelisti -2,062 mm. Při této poloze bylo předpětí přibližně 3 N, a proto čelist sjížděla do takové polohy, při které by bylo zvolené předpětí dosaženo. Pohyb byl zastaven až na poloze -3 mm s velikostí síly 37,9 N.

Po takto nastaveném předpětí začala zahřívací fáze, kdy byla forma zahřívána elektrickými topnými lampami, které jsou součástí výsuvné komory. Se zvyšováním teploty se vzhledem k teplotní roztažnosti materiálu začaly čelisti, forma, skleněný element a ostatní části stroje rozpínat. Zařízení bylo ale nastaveno na konstantní sílu mezi

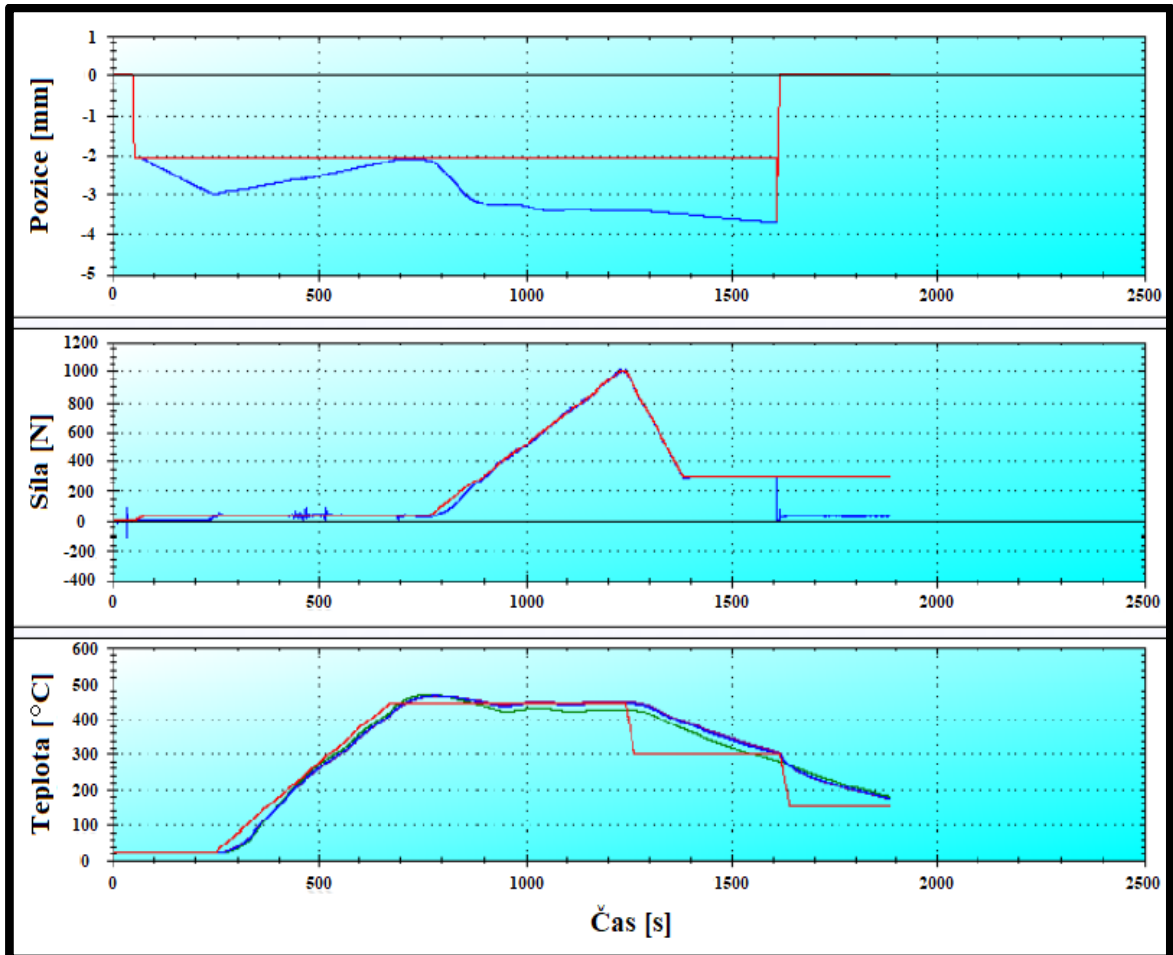
čelistmi. Aby toho mohlo být dosaženo, začaly se čelisti od sebe oddalovat. Kdyby zůstala jejich vzdálenost stejná, zvyšovalo by se předpětí, což by nebylo žádoucí. Tento děj začal na 250. sekundě lisovacího programu a skončil na 750. sekundě s dosaženou reálnou teplotou přibližně 460 °C. Volená maximální teplota ohřevu měla být 445 °C, ale díky teplotnímu zpoždění zahřívání byla nejdříve přibližně o 15 °C vyšší a teprve až na 1000. sekundě se dostala na požadovanou hodnotu. Předpětí ve formě kleslo zhruba na 29 N a pozice se zvýšila téměř na příkázanou polohu s hodnotou -2,162 mm. Konec zahřívací fáze v diagramech je znázorněný na obrázku 28, kde červená přímka znázorňuje požadované a modrá přímka naměřené hodnoty.



Obr. 28 - Závislost polohy, síly a teploty na čase při zahřívací fázi

Dále nastala lisovací fáze, při které byla udržována konstantní teplota a začala se zvyšovat síla v závislosti se snižováním polohy horní čelisti. Přibližně za 550 sekund stroj postupně dosáhl síly 996 N. Od požadované hodnoty 1000 N je tedy rozdíl jen minimální. Bylo tomu dosaženo při poloze -3,44 mm. V této fázi již element získal téměř výsledný tvar.

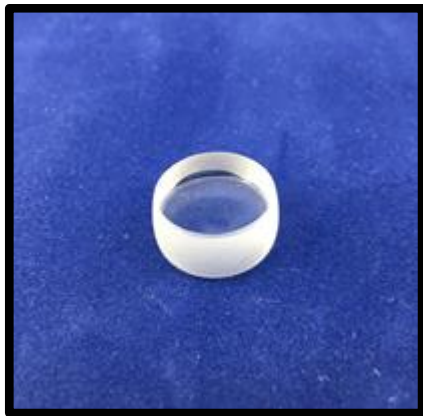
Následovala fáze chlazení, při které bylo teplo vedením odváděno z dolních a horních chladících desek pomocí plynného dusíku. Rychlost chlazení byla však v programu nastavena na hodnoty vyšší, než lze reálně dosáhnout. Proto bylo skutečné chlazení výrazně pomalejší a teplota uvnitř lisovací formy byla téměř bez regulace. Na obrázku 29 je patrné, jak se požadovaná teplota se zpožděním lišila od reálné.



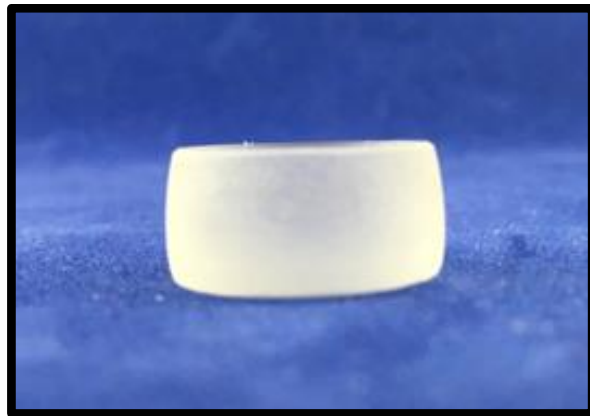
Obr. 29 - Závislost polohy, síly a teploty na čase po všech fázích lisování

Vyvinutá síla F se začala rychle snižovat vzhledem k chladnutí a tepelnému smršťování všech zahřátých komponent. Ustálila se na velikosti 300 N. V čase $t = 1600$ s byla horní lisovací čelist vysunuta do základní nulové pozice a začalo rychlé chlazení. Zahřívací komora se sesunula do spodní části a stroj byl chlazen už jen pomocí chladiče. Chladič odváděl teplo pouze z okolních částí stroje, ze kterého pak bylo za pomoci ventilátorů přeneseno do okolí. Po dosažení přibližně 60 °C se forma v ochranných rukavicích vyjmula z lisu a byla dochlazena na laboratorní teplotě 25 °C. Po vychlazení byl vylisovaný Element 1 vyjmut z formy. Vzorek je patrný na obrázku 30 a 31. Tímto způsobem bylo lisování provedeno pro zbylé 4 elementy. Jejich fotky jsou zaneseny

v Příloze 1. Dále následovalo změření reálných rozměrů horní části formy a vylisovaných vzorků na měřicím přístroji MarForm MFU 200.



Obr. 30 - Vylisovaný Element 1



Obr. 31 - Boční pohled na Element 1

3. 3. 4 Měření elementů a formy

Zjištění tvaru vylisovaných pěti elementů a vrchní části formy bylo provedeno na stroji MarForm MFU 200 Aspheric 3D ve spolupráci s pověřenou osobou. Zařízení se nachází v centru Toptec v Turnově a je uvedené na obrázku 32. Stroj byl vyvinut pro rychlé měření optických součástí pro 2D a 3D rozměry. Měření lze provést buď dotykovou metodou pomocí kontaktního profilometru, nebo bezdotykovou za pomoci optického senzoru.

Při měření 3D se nejdříve měří dva lineární charaktery roviny nad vrcholem měřené součásti, které jsou přesazené o 90° . Poté se profil nasnímá ve více koncentrických kruhových rovinách otáčením sondy kolem osy z. Pomocí těchto bodů se dále vytvoří topografie sledující povrchové útvary. Veškeré měření je prováděno v kompaktní kabině, která je odstíněna od vnějšího znečištění a vibrací [19].

Nejprve byl Element 1 položen na měřicí stůl a byl zajištěn aretační tmelkou viz obr. 33. Poté byl na obrazovce stroje zvolen měřicí program, u kterého byla nastavena předběžná geometrie, rozměry, parametry měření, vyhodnocení dat, export výsledků ad. Dále bylo bezdotykové měření spuštěno. Nejdříve bylo manuálně posunuto profilometrem s označení PS15 na vzdálenost přibližně 1 mm od měřeného vzorku. Následovalo změření profilu s nalezením jeho lokálního extrému, tedy nejnižšího bodu. Potom byl měřicí stůl s Elementem 1 vycentrován do polohy, při které nalezeným nejnižším bodem procházela osa rotace. Docílilo se tak soustřednosti kružnic z předchozích měření. Po takto nastaveném vzorku začalo samotné měření, ze kterého byly získány požadované rozměry Elementu 1. Naměřený vzorek byl vyndán ze stroje

Numerická simulace procesu lisování přesných optických elementů

a následně byly vloženy a stejným způsobem měřeny zbylé 4 elementy s horní částí formy. Výstupem měření byly získány hodnoty popisující velké množství bodů definující zjišťované tvary povrchů. Tyto hodnoty bylo nutné dále upravit a získat z nich požadované rozměry s odchylkami.



Obr. 32 - Zařízení MarForm MFU 200

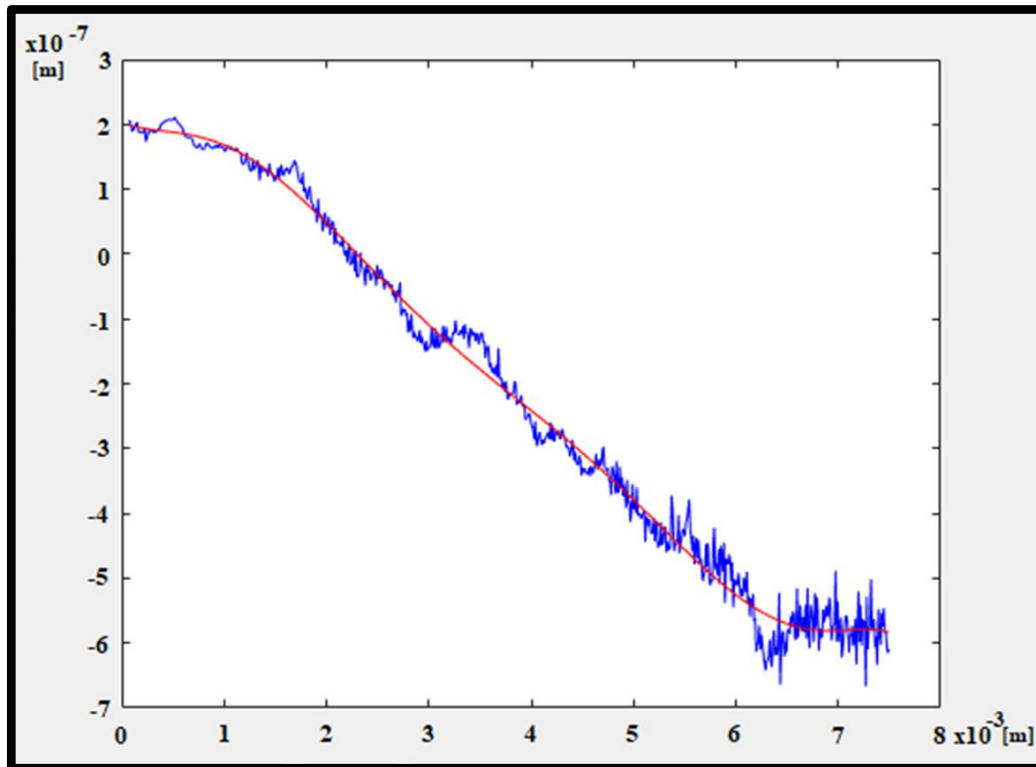


Obr. 33 - Zajištění Elementu 1

3. 4 Získání a zpracování výsledků

Získané hodnoty z měřicího stroje MarForm byly dále zpracovány nástrojem Matlab, ve kterém byl pro jejich úpravu vytvořen program znázorněný v Příloze 2. Nejprve byla data do programu načtena jako vektory po sobě jdoucích čísel a rozdělena do třech os x , y a z . U každého prvního čísla byla uvažována souřadnice x , u každého druhého souřadnice y a u třetího souřadnice z . Dále byl pomocí funkce určen poloměr a jeho střed. Souřadnice x a y byly přesunuty tak, aby střed předpokládaného asférického povrchu ležel na ose z . Tato vzdálenost byla pak spolu s nominálním poloměrem využita pro výpočet zjišťované výšky, tedy vzdálenosti ve směru z , pro každý jednotlivý bod. Odečtením těchto parametrů od vstupních hodnot v ose z byla získána odchylka od nominálního tvaru. Poté byly do sestavené matice vloženy vzdálenosti a odchylky od zmiňované osy. Hodnoty pak byly seřazeny podle jejich vzdálenosti. Výstupem byla získána data, která už mohla být zanesena do grafu 9. Dále byl použit pro odstranění šumu klouzavý mediánový filtr o délce 30 vzorků. Poté byly hodnoty naředy tak, aby hustota

vzorků zůstala stejná pro všechny různé vzdálenosti od osy z. Tím se zaručilo, že všechny části křivky ovlivňovaly prokládací proces stejnou měrou. Závěrem byly pomocí funkce polyfit nalezeny koeficienty polynomu, kterými byla proložena naměřená data.



Graf 9 – Data získaná z matice s hodnotami vzdáleností a odchylek

Tento postup byl proveden pro získání hodnot definujících profil horní části formy a všech pěti vylisovaných elementů.

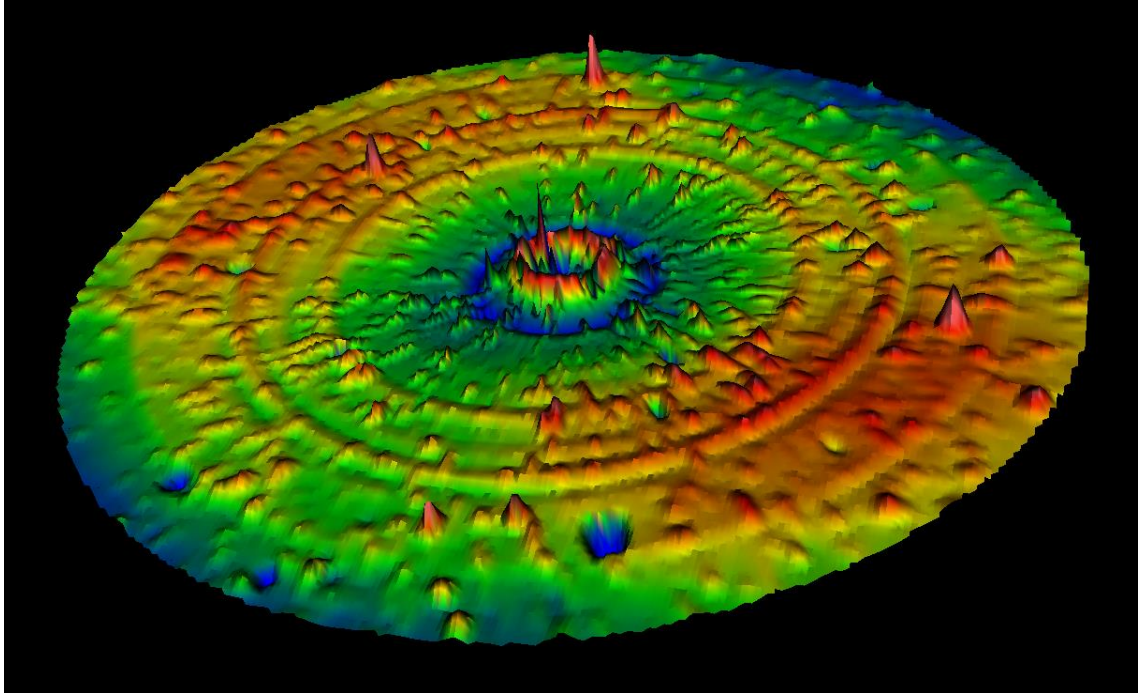
Z koeficientů polynomu pak dále byla vytvořena křivka, která znázorňovala odchylky. Pro získání skutečného tvaru všech šesti naměřených součástí byl k daným odchylkám přičten skutečný poloměr R50. Z této konečné křivky byla pro horní část formy získána asférická rovnice (2.22) s koeficienty, podle kterých byla vytvořena reálná geometrie formy a sestrojena druhá simulace. Křivky z měření pěti vylisovaných elementů byly zprůměrovány a následně z nich byla vytvořena výsledná křivka.

3. 4. 1 Zobrazení profilu měřených součástí v softwaru MetroPro

Software MetroPro je program od firmy Zygo sloužící k analýze dat z měřících zařízení.

Výhodou tohoto softwaru je, že získané hodnoty z měřícího zařízení MarForm nemusely být nijak upraveny a mohly být vloženy přímo do zmiňovaného programu. Výsledkem byla vizualizace odchylek všech pěti vylisovaných elementů a horní části

formy. Pro názornost je výstup softwaru ukázán na obrázku 34, kde je zobrazen Element 1. V příloze 3 je pak zaneseno všech 5 elementů se stupnicí odchylek z jednotlivých měření i s naměřenou formou. Vyhodnocení jejich parametrů je řešeno v kapitole 4.



Obr. 34 - Profil Elementu 1 ze softwaru MetroPro

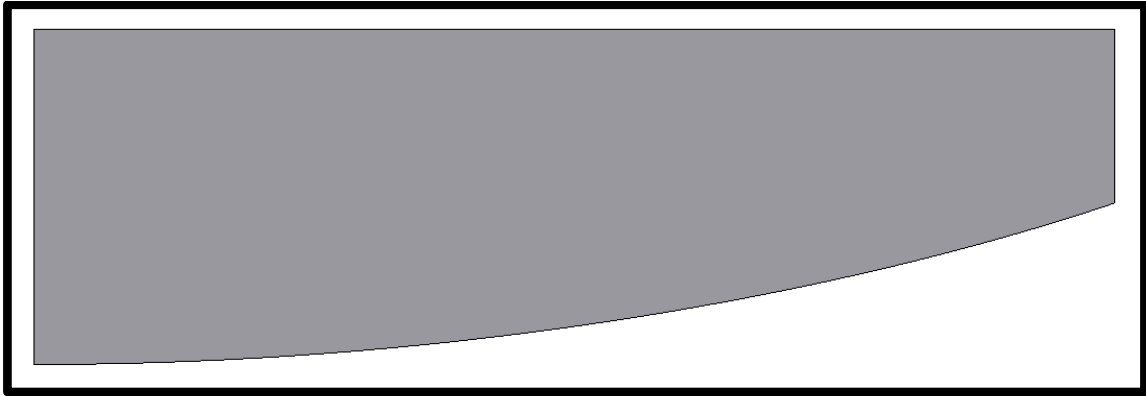
3. 5 Simulace lisování elementů s reálným tvarem formy

Pro zpracování naměřených dat byla provedena simulace s reálným tvarem formy. Jako vstup pro vytvoření asférického tvaru horní části formy v simulačním programu GPM Sim 2.0 byla použita zpracovaná výstupní data z naměřených hodnot.

Z těchto dat byla získána rovnice, ve které byly uvažovány jen sudé asférické koeficienty, pro dostačující přesnost jen do šestého řádu:

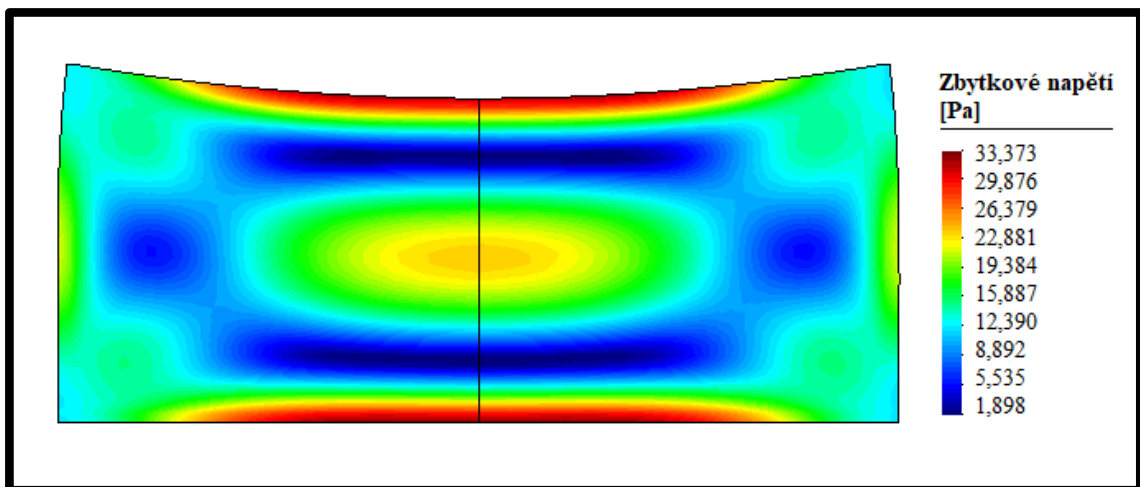
$$f(y) = \frac{0,02 \cdot x^2}{1 + \sqrt{1 - 0,02^2 \cdot x^2}} + 4,32000722 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 + -1,11898583 \cdot 10^{-4} \cdot x^4 + 1,3139478 \cdot 10^{-8} \cdot x^6 \quad (4.1)$$

Vzniklá geometrie po dosazení hodnot z rovnice 4.1 je znázorněna na obrázku 35.

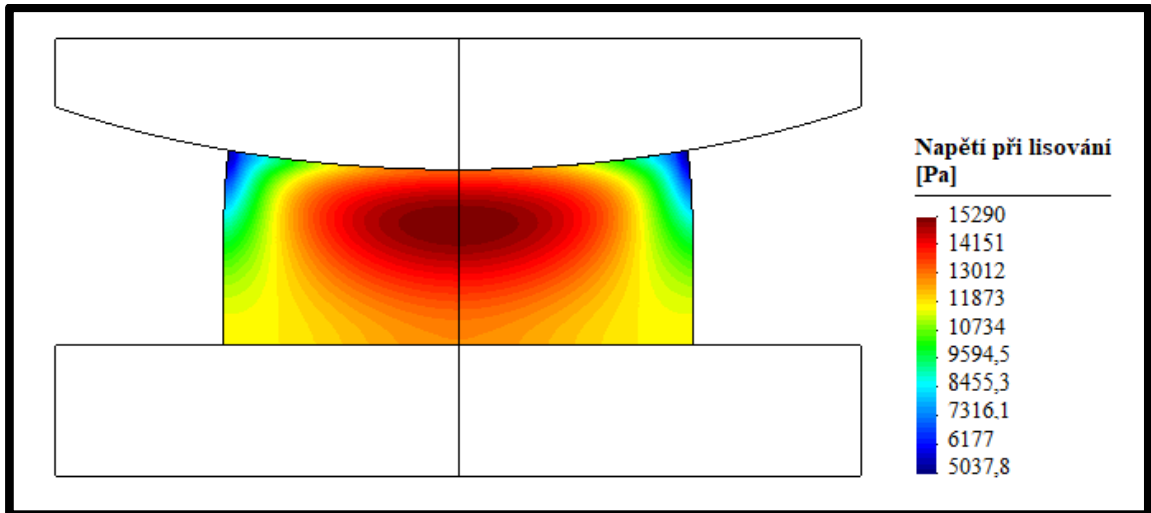


Obr. 35 - Reálná geometrie horní části formy zanesená do softwaru GPM Sim 2.0

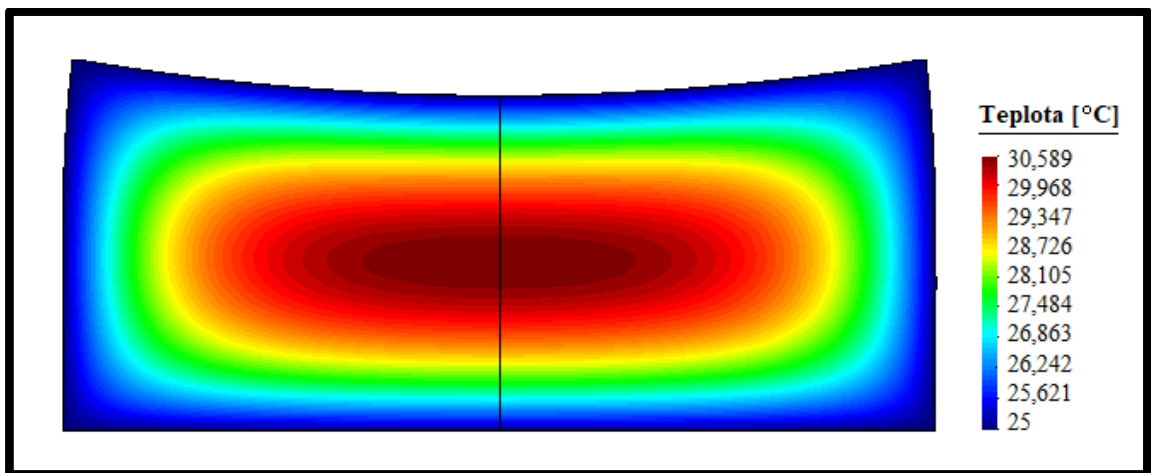
Dále byla sestrojena a spuštěna simulace s totožným postupem a parametry jako v předchozím případě uvedeným v kapitole 3.2. Výstupem bylo vygenerováno zbytkového napětí ve výlisku, které má přímý vliv na výsledný index lomu vylisované čočky a je znázorněno na obrázku 36. Poté bylo vygenerováno maximální napětí, které při lisování vznikne, s velikostí přibližně 15,29 KPa a je uvedeno na obrázku 37. Konečná teplota ve výlisku po rychlém chlazení lisovacího procesu je pak zobrazena na obrázku 38.



Obr. 36 - Zbytkové napětí po lisování elementu s reálným tvarem formy



Obr. 37 - Maximální napětí při lisování elementu s reálným tvarem formy

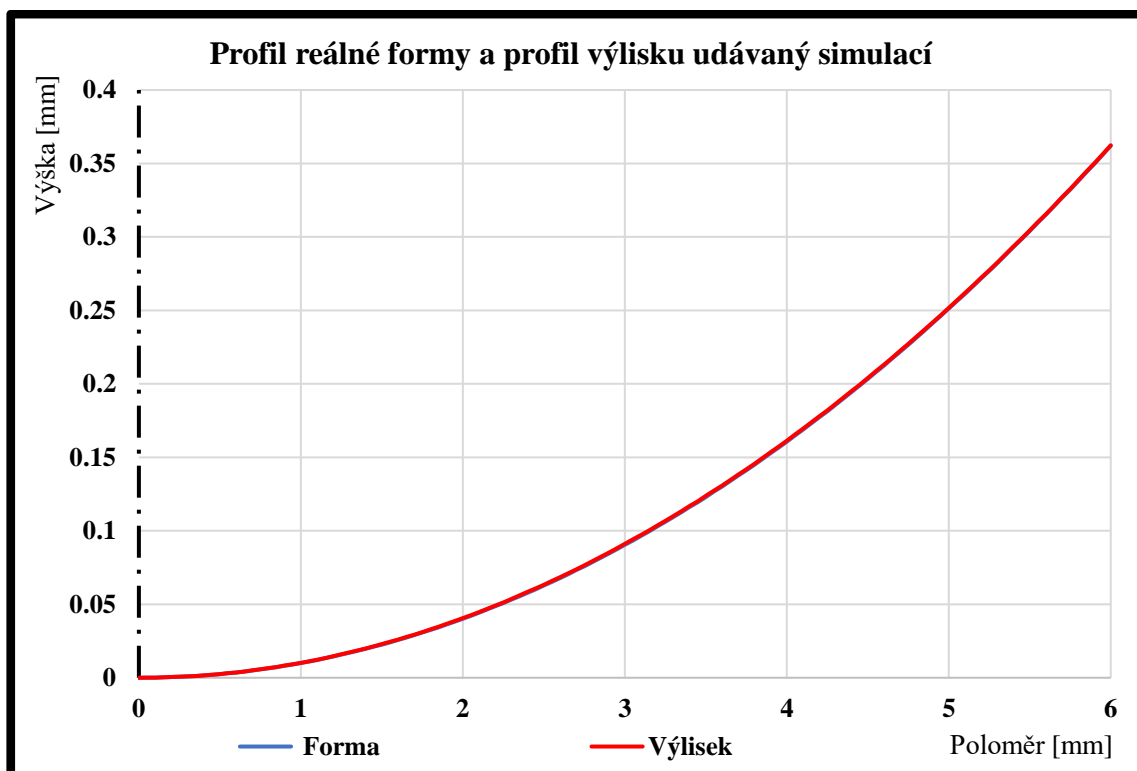


Obr. 38 - Teplota vylisku na konci chlazení s reálným tvarem formy

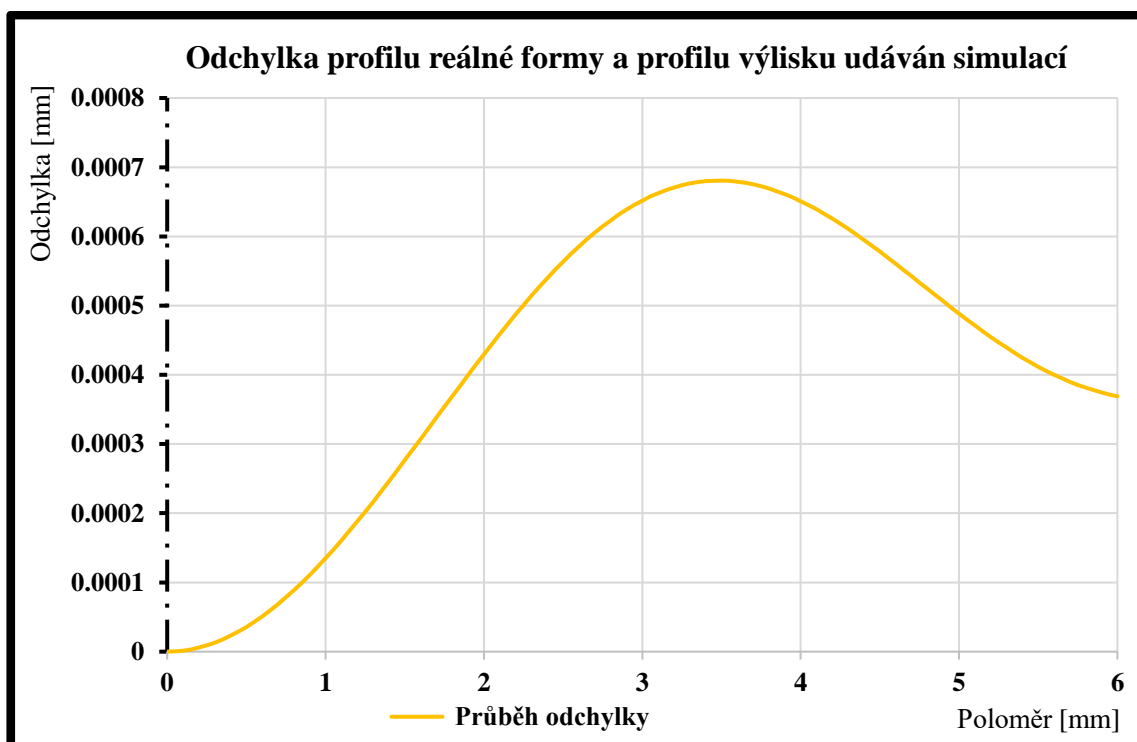
Hlavním výstupem simulace byly získány koeficienty, které popisují konečný tvar vylisků a jsou uvedeny v tabulce 10. Opětovným dosazením těchto koeficientů do asférické rovnice byly získány hodnoty v ose x a ose y , ze kterých byl vytvořen graf 10. Na grafu je vidět, že rozdíl mezi modrou křivkou představující profil formy a červenou křivkou představující profil vylisku podle simulačního programu GPM Sim 2.0 při lisování formou s reálně změřeným profilem je nepatrný. Graf 11 pak uvádí samostatnou odchylku mezi profily.

	Naměřený parametr	Parametr udávaný simulací
R [mm]	50	66,6999
K	0	-101,8387
A₀₂	$4,32 \cdot 10^{-5}$	$2,6924 \cdot 10^{-3}$
A₀₄	$-1,119 \cdot 10^{-6}$	$3,1544 \cdot 10^{-5}$
A₀₆	$1,314 \cdot 10^{-8}$	$-1,1411 \cdot 10^{-7}$

Tabulka 10 – Koeficienty reálné asférické křivky



Graf 10 – Tvar reálné formy a výlisku podle simulačního softwaru

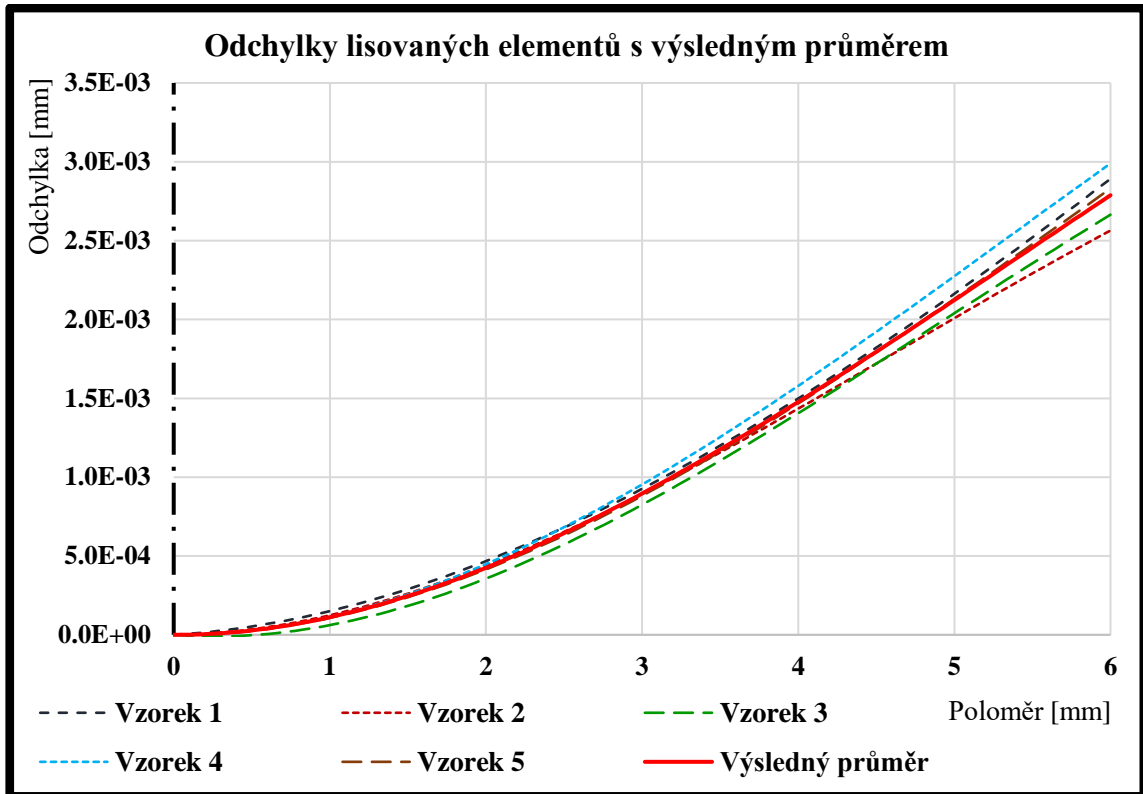


Graf 11 – Odchylka reálného tvaru formy a tvaru výlisků podle programu

S takto zpracovanými výsledky ze simulace bylo dále možné porovnání mezi reálným lisováním skleněných elementů a simulací v softwaru GPM Sim 2.0 s totožnými parametry a rozměry.

4 Vyhodnocení výsledků

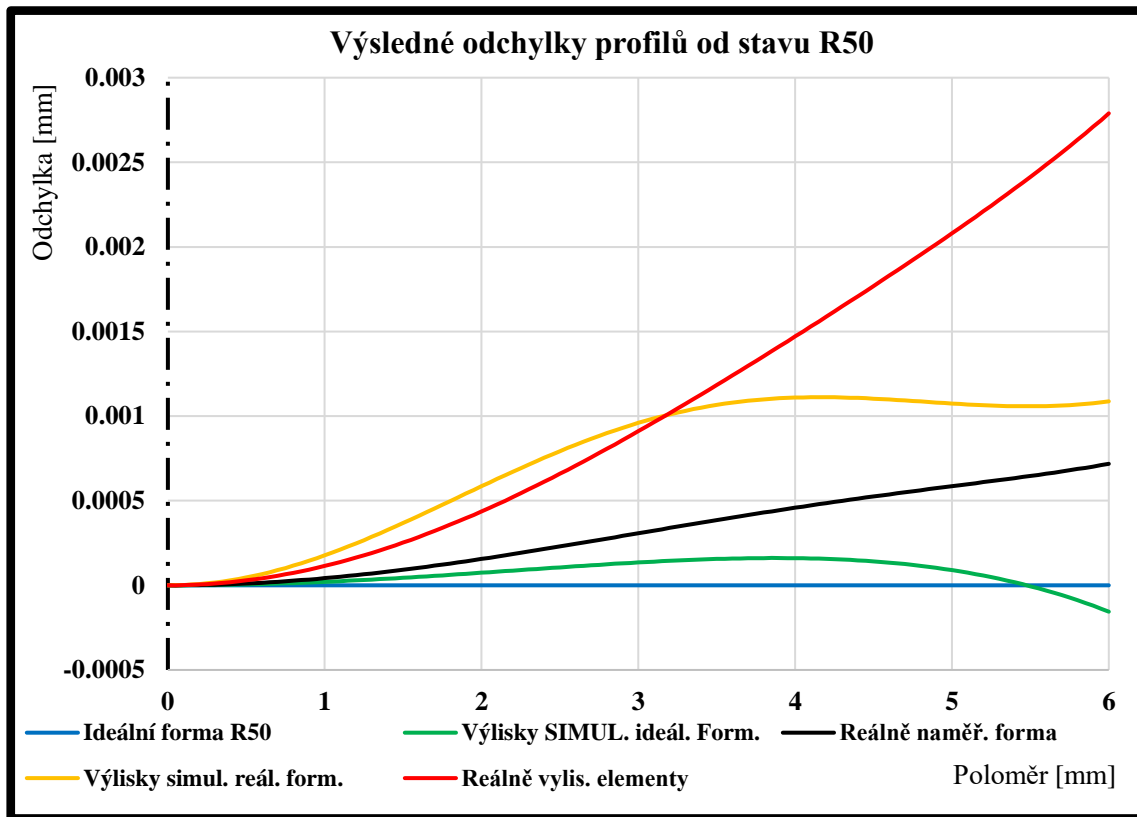
Z naměřených odchylek všech pěti vylisovaných elementů byl vytvořen výsledný graf 12, ve kterém je zanesena závislost vzdálenosti poloměru na odchylkách z jednotlivých měření. Z těchto hodnot byl vytvořen výsledný průběh zastupující průměr všech pěti průběhů, který je dále uvažován v porovnávání a vyhodnocování výsledků jako za reálně ověřený a směrodatný.



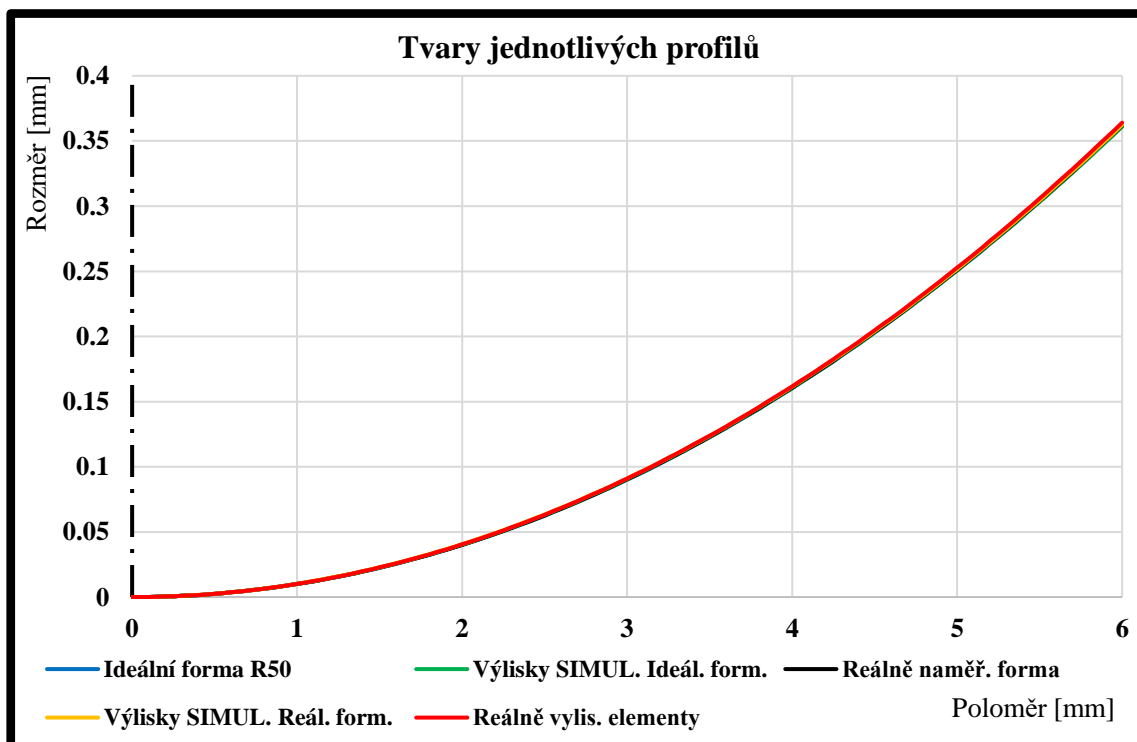
Graf 12 – Výsledný průměr odchylek profilů vylisovaných elementů

Znázornění všech důležitých dosažených výsledků je obsaženo v grafu 13, který znázorňuje odchylky jednotlivých tvarů od ideálního poloměru R50. V tomto grafu jsou v podobě černé křivky zaneseny odchylky reálně změřené horní části formy a modrou křivkou jsou znázorněny odchylky od ideální formy s rádiem 50 mm. Červená křivka uvádí zprůměrované odchylky reálně vylisovaných pěti elementů na lisovacím stroji Nanotech. Žlutá křivka představuje průběh odchylek tvaru vylisovaného elementu, který by měl vzniknout podle softwaru GPM Sim 2.0 při lisování formou s reálně změřeným profilem, a zelená křivka odchylky výlisků podle softwaru při lisování formou s ideálním profilem R50 mm.

Dále jsou v grafu 14 znázorněné reálné profily všech případů totožnými barvami jako v grafu 13.



Graf 13 – Znázornění výsledných odchylek od stavu R50



Graf 14 – Zobrazení jednotlivých tvarů profilů

Vzhledem k nepatrným rozdílům při tomto měřítku jsou průběhy téměř obdobné. Dominantní rozdíl profilů je pak patrný jen mezi průběhem odchylek reálně vylisovaných elementů a odchylek výlisků získaných simulací lisování formou s ideálním poloměrem.

Z grafu 13 je patrné, že mezi odchylkou získanou ze simulace při lisování ideální formou a odchylkou vzniklou simulací lisováním reálnou formou je jistá korelace. Při větším rozdílu formy od ideálního stavu se více zvětšuje odchylka vylisovaných elementů v simulačním programu. Například na poloměru 4 mm je zelený výkyv představují profil výlisku získaného ze simulace lisování ideální formou rozdílný od ideálního modrého stavu $0,1605 \mu\text{m}$, což je přibližně 10,91 %, a žlutá odchylka představující profil elementu získaného simulací s použitím reálné formy se liší od profilu skutečné formy zhruba $0,6508 \mu\text{m}$, což je přibližně 44,25 %. V případě červeného průběhu reálně vylisovaných elementů a černé křivky představující formu s reálným profilem se křivky od sebe vzájemně rozcházejí. Na poloměru 1 mm jsou odlišné přibližně o 63,23 %, na 2 mm o 64,34 %, se vzdáleností 3 mm o 66,21 %, se 4 mm o 68,82 %, na 5 mm přibližně 71,83 % a na 6 mm o 74,26 %. Vzájemná vzdálenost obou křivek se s vyšším poloměrem zvětšuje, a tedy procentuálně stoupá.

Z grafu 13 a takto reálně zjištěných odchylek červené křivky lze usoudit, že skleněný výlisek ze skla S-FPL53 má po vylisování a tepelném smrštění svůj profil exponenciálně přímo úměrný tvaru formy, kterou byl vylisován. Proto jsou dosažené hodnoty udávané simulačním softwarem, při kterých jsou odchylky nepřímo úměrné lisovacímu nástroji, vyhodnoceny jako neodpovídající. V případě žluté křivky, která je věrohodnější než křivka zelená, vzhledem k jejímu získání ze simulace s reálným nástrojem, je její pozice na poloměru 3,2 mm v grafu 13 totožná s pozicí červené křivky. Dále se pak ale její průběh od reálného stavu odkloňuje k menším odchylkám, až končí na poloměru 6 mm s rozdílem přibližně 82,2 %. V případě, že by horní část formy nebyla změřena a její profil by byl pro simulaci uvažován jako sférický s ideálním rádiem 50 mm, vznikly by výlisky s odchylkou až 142,2 % od požadovaného tvaru. Tento stav je znázorněn zelenou křivkou. Z tohoto důvodu byl simulační program GPM Sim 2.0 pro simulaci lisování výlisků ze skla S-FPL53 vyhodnocen jako nedůvěryhodný a pro získávání korekcí pro výrobu formy jako nevhodný.

V případě porovnání zbytkového napětí ve výlisku, maximálního napětí v elementu při lisování a konečné teploty uvnitř výlisku po rychlém chlazení lisovacího procesu byla sestrojena tabulka 11, do které byly všechny parametry zaneseny. Z tabulky vyplývá, že malá změna geometrie nástroje má na uvedené charakteristiky určitý vliv.

Numerická simulace procesu lisování přesných optických elementů

Vzhledem k nízké korelaci mezi naměřenými a simulovanými tvary výlisku při vyhodnocování softwaru GPM Sim 2.0 se nedá ale posoudit, do jaké míry jsou tyto hodnoty věrohodné.

Charakteristiky	Jednotky	Simulace s ideální formou	Simulace s reálnou formou	Odchylka	Odchylka [%]
Zbytkové napětí	[Pa]	38,398	33,373	5,025	13,087
Maximální napětí	[Pa]	15 126	15 290	164	1,073
Konečná teplota	[°C]	31,497	30,589	0,908	2,883

Tabulka 11 – Porovnání charakteristik mezi simulací lisování ideální a reálnou formou

5 Závěr

Tato diplomová práce se zabývala simulací lisování skleněných elementů ze skla s označením S-FPL53, samotným lisováním tohoto skla na lisu Nanotech 140 GPM, tvarovým měřením výsledných výlisků a formy pro lisování na měřicím zařízení MarForm MFU 200, opětovnou simulací lisování skla s reálně naměřenou formou R50 mm a výsledným porovnáním vzniklých tvarů s rozměry výlisků udávaných simulačním programem. Veškeré měření bylo provedeno ve spolupráci Výzkumného centra speciální optiky a optoelektronických systémů Toptec v Turnově, který je součástí Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd České republiky. Centrem Toptec byly poskytnuty stroje, zařízení, simulační program a vzorky pro vyhotovení diplomové práce.

V teoretické části jsou popsány materiálové vlastnosti skla. Dále je uveden přehled používaných technologií při lisování a konvenční výroba skleněných čoček. Následuje uvedení materiálových modelů používaných při numerické simulaci, po kterých je popsán samotný lisovací proces.

V praktické části byla nejdříve provedena analýza potřebných dat pro simulaci skla S-FPL53 v softwaru GPM Sim 2.0. Dohledatelné byly všechny parametry až na měrnou tepelnou kapacitu skla, která proto byla zjištěna experimentálně na měřicím stroji TCi-Thermal Conductivity poskytnutém k měření Katedrou energetických zařízení Technické univerzity v Liberci. Zařízení měří pouze efuzivitu a tepelnou vodivost. Ke zjištění správnosti měření efuzivity byla tepelná vodivost důležitá. Tato hodnota byla zjištěna z materiálového listu od výrobce pro dané sklo a dále sloužila k porovnání naměřené tepelné vodivosti a vyhodnocení tak správného měření s podstatnou hodnotou efuzivity pro výpočet tepelné kapacity. Po měření byla měrná tepelná kapacita vypočítána s velikostí $467 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a odchylkou $6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. S tímto parametrem byla sestrojena numerická simulace s uvažovaným ideálním tvarem formy, kde její horní část formy určující finální konkávní profil výlisku má přesný rádiem 50 mm. Mezi výsledky simulace patřila velikost výsledného napětí v elementu po lisování, maximální vzniklé napětí při lisování, teplotní gradient ve výlisku na konci chladicí fáze a rozměr výlisků, který by vznikl podle simulačního softwaru.

Dále bylo provedeno reálné lisování pěti skleněných elementů ze skla S-FPL53 na stroji Nanotech 140 GPM podle totožných parametrů, které byly zadány do předchozí simulace.

Po vylisování bylo pět elementů s horní částí formy změřeno na měřicím zařízení MarForm MFU 200. Získaná data definující povrch všech částí byla vložena do programu MetroPro, kterým byl vykreslen jejich povrch. Pro porovnání simulace a reálného lisování ale bylo zapotřebí data dále zpracovat. Proto byl použit software MATLAB a sestaven program, kterým byla potřebná data získána. Pomocí rovnice (2.22) byly získány asférické koeficienty, ze kterých byl vytvořen reálný profil nástroje v simulačním programu GPM Sim 2.0 a byla provedena opětovná simulace. Touto cestou se dospělo k odlišným výsledkům než s ideální geometrií formy přibližně o 82,2 %. Dále byly zpracovány odchylky naměřených pěti výlisků od ideálního rádia 50 mm, zaneseny do jednoho grafu 12 a vytvořen jejich průměrný průběh. V grafu 13 bylo provedeno celkové porovnání zmiňovaného průměru, reálného a ideálního profilu nástroje, tvaru výlisku po simulaci ideální formou a tvaru výlisku po simulaci reálnou formou. Dále bylo provedeno porovnání vnitřního napětí, maximálního napětí a gradient teploty uvnitř lisovaného elementu při simulaci lisování reálným a ideálním nástrojem.

Ze všech měření a zpracování výsledků bylo dosaženo závěru, že výsledky z programu GPM Sim 2.0 jsou pro měřené sklo S-FPL53 nevěrohodné. Při pečlivém zadání všech konstant, podle kterých software pracuje, nebyl dosažen podobný tvar výlisku s reálně vylisovaným elementem na stroji Nanotech o stejných parametrech lisovacího cyklu jako v použitém simulačním programu. Tento komerčně dodávaný program k lisovacímu stroji byl výrobcem odzkoušen pravděpodobně na jiném druhu skla a jiném tvaru formy, u kterého se výsledky simulace s reálným lisováním shodovaly více. Správnost by tedy bylo vhodné přehodnotit a zlepšit v inovaci tohoto softwaru nebo implementovat celý lisovací proces na stroji Nanotech 140 GPM do kvalitnějšího a osvědčenějšího simulačního softwaru.

Seznam použité literatury

- [1] VESELÝ, Petr a Peter ŠIMOVÍČ. *Konvenční a Free-Form technologie*: Lékařská fakulta Masarykovy univerzity. Praha: [online]. [cit. 25. dubna 2018]. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/lf/js12/vyroba_cocek/web/pages/02-1_rozdeleni.html
- [2] MADAPUSI, Shriram Palanthandalam. *A computational tool for numerical prediction of precision glass molding process*. Florida: Univerzity of Florida, 2009.
- [3] ROŠKA, Radim. *Technologie výroby skla 2*: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Zlín: [online]. [cit. 20. května 2018]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/10774413-Technologie-vyroby-skla-2-ing-radim-roska-modernizace-vyuky-nove-zrizeneho-atelieru-designu-skla.html>
- [4] WANG, Y., G. LIU, F. WANG, O. DAMBON, F. KLOCKE, *Using ABAQUS to Simulate the Precision Glass Molding Process for Freeform and Wafer Optics*. Aachen: Fraunhofer Institute for Production Technology IPT, 2011.
- [5] HOTAŘ, V., V. KLEBSA a I. MATOUŠEK. *Technologie automatické výroby skla*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015.
- [6] FANDERLÍK, Ivan. *Vlastnosti skel*. Praha: Informatorium, 1996.
- [7] ROCHESTER, John Deegan. *Precision Glass Molding Technical Brief*. New York: Rochester Precision Optics, 2007.
- [8] GPM Series. *GPM Catalogue*. [DVD]. GPM Series, [cit. 30. dubna 2019].
- [9] Fokus Optic, *Asférické čočky umí zlepšit vidění za šera* [online]. [cit. 30. ledna 2019]. Fokus Optic. Dostupné z: <https://eshop.fokusoptik.cz/asfericke-cocky-umi-zlepsit-videni-za-sera>
- [10] KUNOSIC, Selma. *Study of the glass press molding process: Study of the glass press molding process*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016. Technická univerzita v Liberci.
- [11] Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. *Viskoelastické modely: Viskoelastické modely*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně [30. března 2019].

[12] C-Therm Technologies. Modified Transient Plane Source (MTPS) Technique. *C-Therm Technologies: Principles of Operation* [online]. Canada (New Brunswick): C-Therm Technologies, 2019, [14. duben 2019]. Dostupné z: https://ctherm.com/products/tci_thermal_conductivity/how_the_tci_works/mtps/

[13] WikiVisually. Thermal effusivity. [online], [10. duben 2019]. Dostupné z: https://wikivisually.com/wiki/Thermal_effusivity

[14] Ohara INC. S-FPL 53. *Ohara INC*: [online]. [8. března 2019]. Dostupné z: <https://www.oharacorp.com/pdf/S-FPL53.pdf>

[15] VDOLEČEK, František. *Technická měření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2002.

[16] TopTec Training. *Nanotech 140 GPM: Glass Press Molding Technology*. Moore Tools, 2014.

[17] Kovintrade Praha spol. s.r.o. *TOOLOX44: 45 HRC s vlastnostmi ESR* [online]. Praha, Kovintrade Praha spol. s.r.o, [27. únor 2019]. Dostupné z: <http://www.kovintrade.cz/web/uploads/images/soubory/Toolox44.pdf>

[18] RefractiveIndex.info. Optical constants of OHARA-FPL. *RefractiveIndex.info: RefractiveIndex.databaze*. [online]. RefractiveIndex.info, [13. březen 2019]. Dostupné z: <https://refractiveindex.info/?shelf=glass&book=OHARA-FPL&page=S-FPL53>

[19] Mahr, spol. s.r.o. Marform MFU 200 aspheric 3D vysoce přesné 3D měřicí pracoviště. *Mahr, spol. s.r.o.* [online]. Proboštof: Mahr, spol. s.r.o, [27. duben 2019]. Dostupné z: <https://www.mahr.com/cs/Produkty-i-us%C5%82ugi/Techniki-pomiar%C3%B3w-produkcyjnych/Produkty/MarOpto---Przyrz%C4%85dy-pomiarowe-dla-przemys%C5%82u-optycznego/MarForm-MFU-200-Aspheric-3D/>

Seznam příloh

Příloha 1



Vylisovaný Element 2



Vylisovaný Element 3



Vylisovaný Element 4



Vylisovaný Element 5

Příloha 2

```
Standard_R = 0.05;
Conversion = 0.001;
FilePath = 'formaR50\Export\sphere_topo_raw.ascii';
FilterLength = 30;

fileID = fopen(FilePath,'r');
Data = fscanf(fileID,'%f');

x = Data(1:3:end)*Conversion;
y = Data(2:3:end)*Conversion;
z = Data(3:3:end)*Conversion;

Matrix = [x,y,z];
[Center,Radius] = sphereFit(Matrix);
x = x - Center(1);
y = y - Center(2);

r = (x.^2 + y.^2).^0.5;
RadiusDiff = Standard_R-Radius;
Center(3) = Center(3) - RadiusDiff;

z_Expectation = -r.^2./(Standard_R*(1+(1-r.^2/Standard_R^2).^0.5));
z_Expectation = z_Expectation + Standard_R;
z_Expectation = z_Expectation + Center(3);

Error = z - z_Expectation;

ErrorAndRadius = [r,Error];

ErrorAndRadius = sortrows(ErrorAndRadius,1);

Filtered = medfilt1(ErrorAndRadius(:,2),30);
Filtered(1:FilterLength) = ErrorAndRadius(1:FilterLength,2);
Filtered(end-FilterLength:end) = mean(ErrorAndRadius(end-FilterLength:end,2));

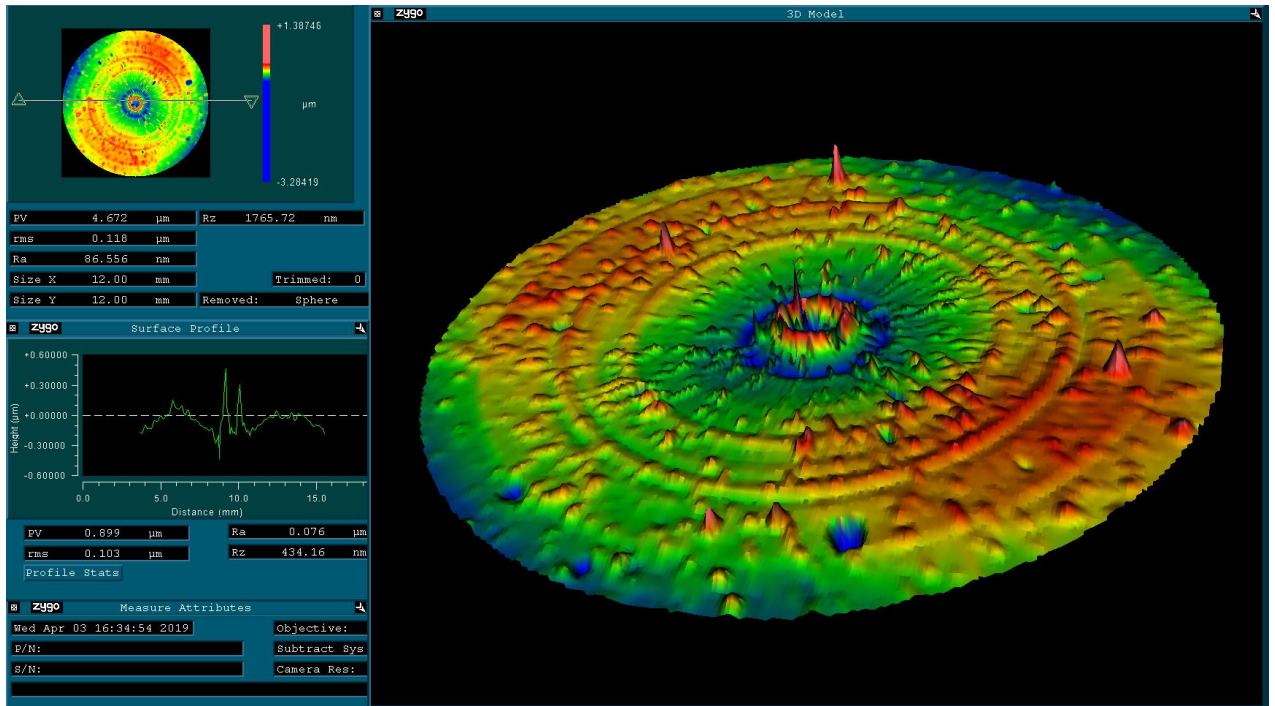
ErrorAndRadius(:,2) = Filtered;

plot(ErrorAndRadius(:,1),ErrorAndRadius(:,2));

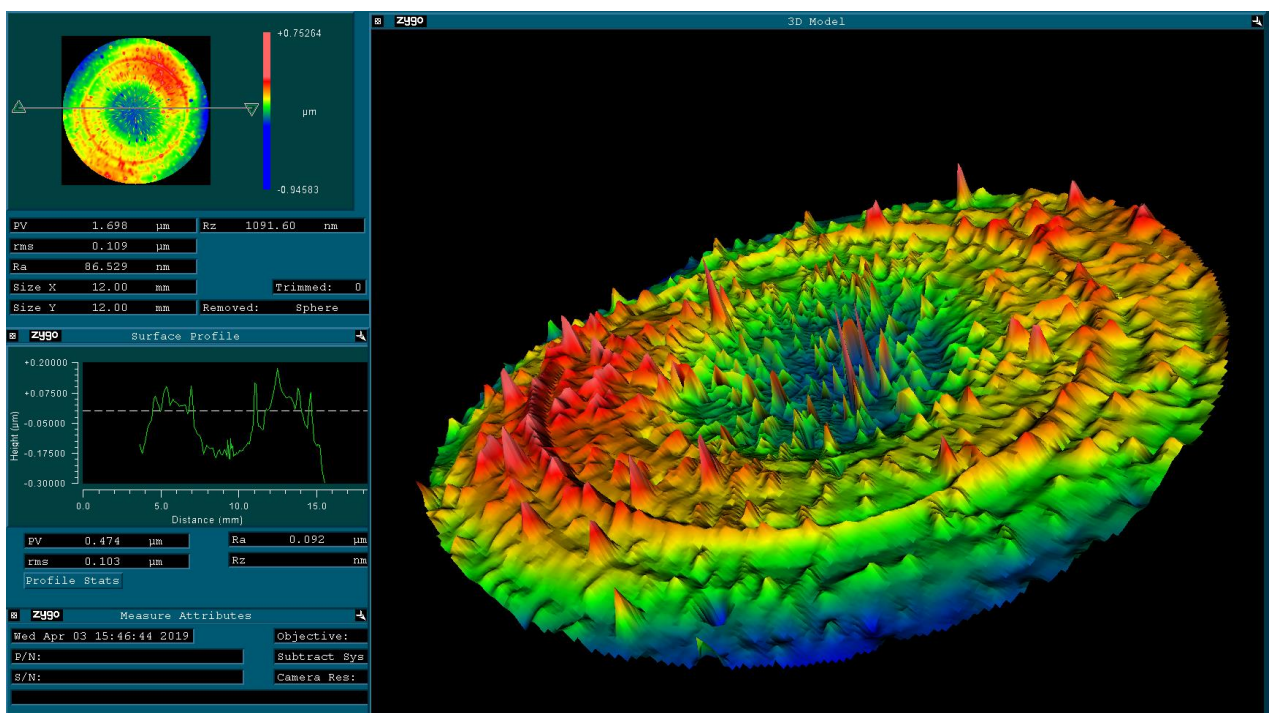
[DilutedRadius,DilutedError] = Dilute(ErrorAndRadius(:,1),ErrorAndRadius(:,2),10^-5);

p = polyfit(DilutedRadius,DilutedError,3);
x1 = DilutedRadius;
y1 = polyval(p,x1);
figure(1);
plot(DilutedRadius,DilutedError,'b');
hold on;
plot(x1,y1,'r');
hold off;
```

Příloha 3

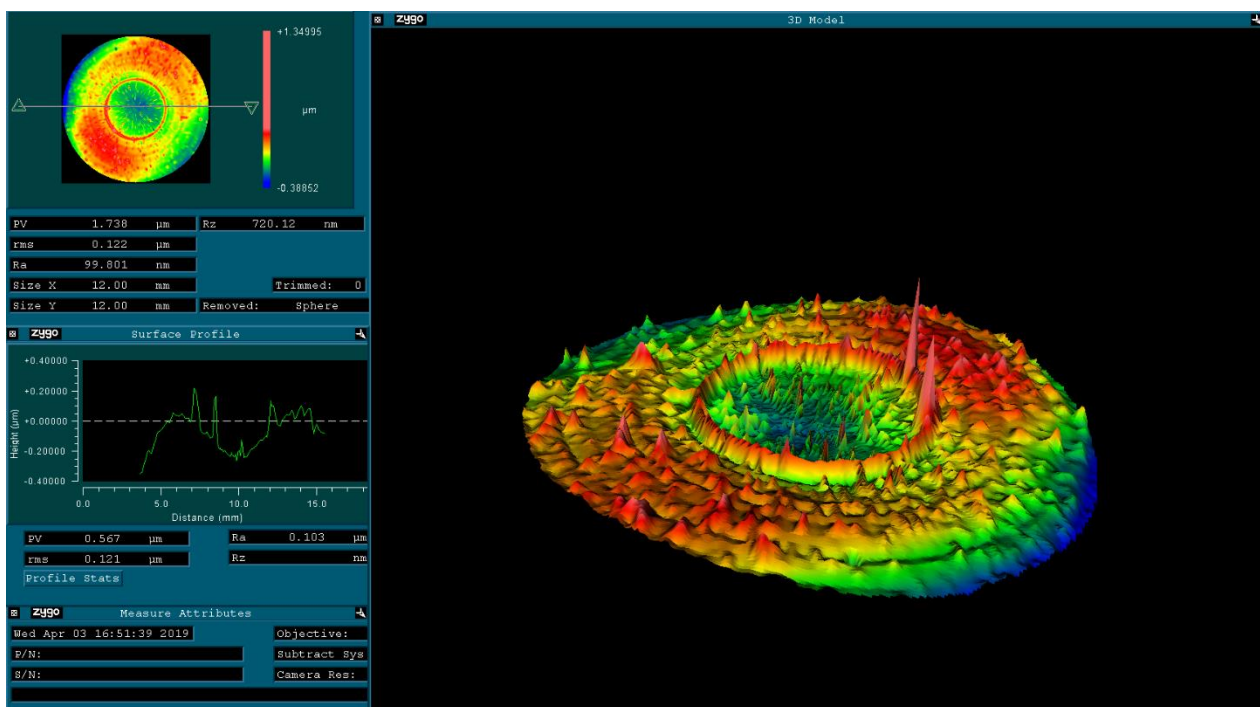


Vizualizace odchylek Elementu 1 ze softwaru MetroPro

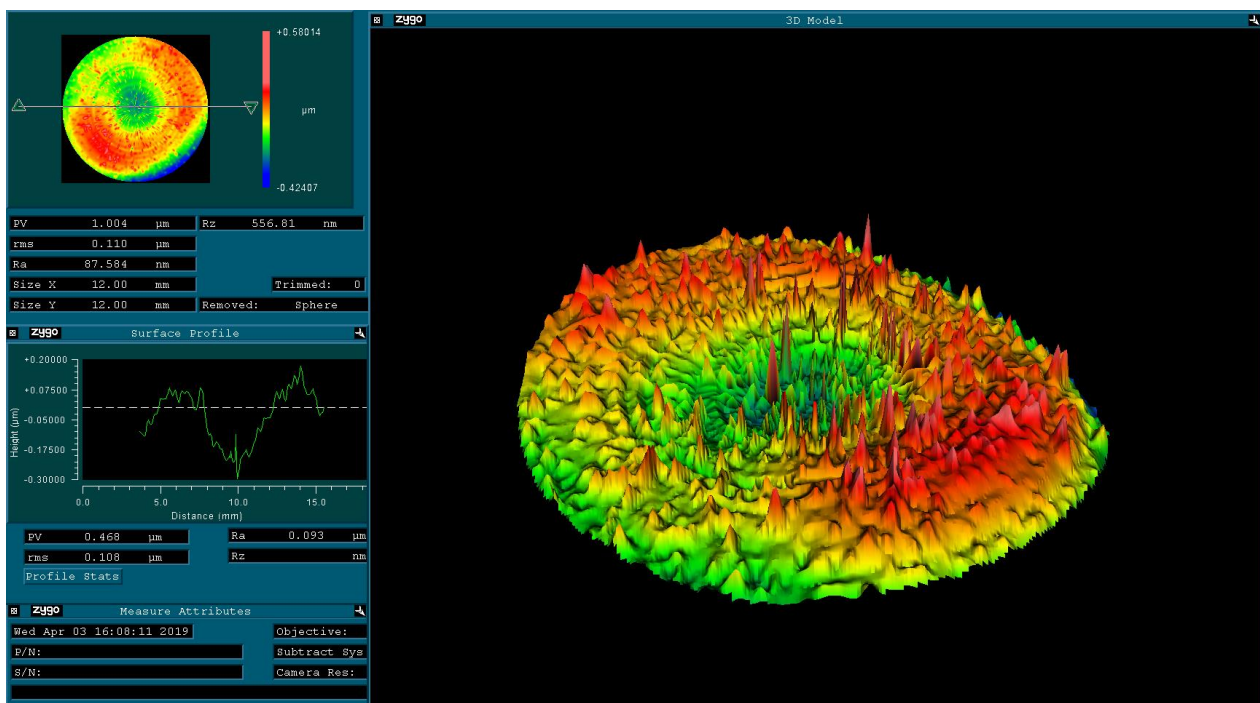


Vizualizace odchylek Elementu 2 ze softwaru MetroPro

Numerická simulace procesu lisování přesných optických elementů

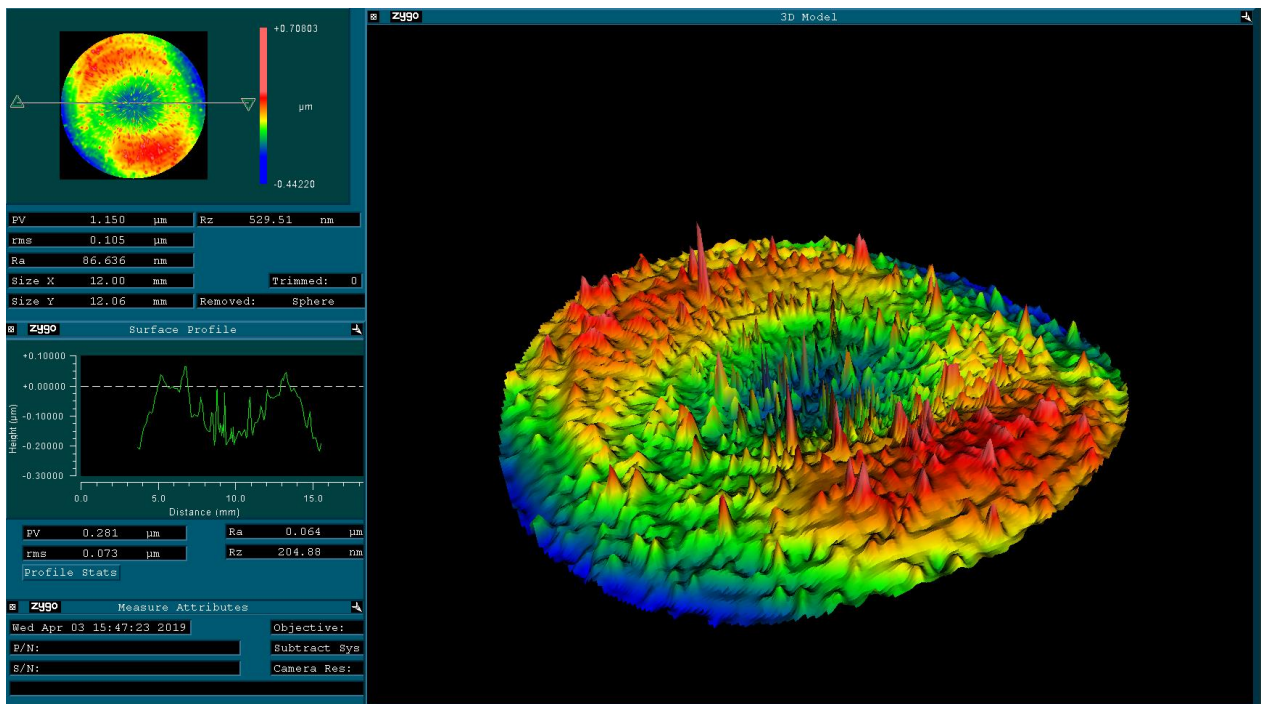


Vizualizace odchylek Elementu 3 ze softwaru MetroPro

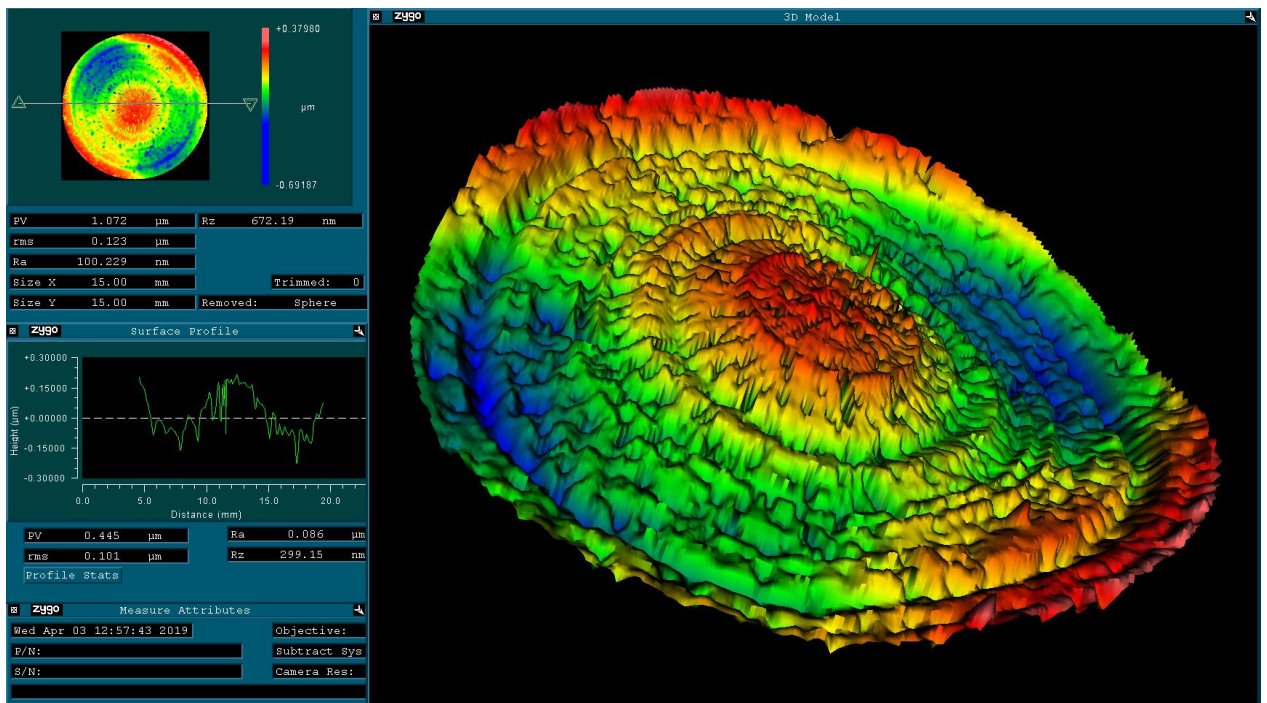


Vizualizace odchylek Elementu 4 ze softwaru MetroPro

Numerická simulace procesu lisování přesných optických elementů



Vizualizace odchylek Elementu 5 ze softwaru MetroPro



Vizualizace odchylek horní části formy ze softwaru MetroPro