

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2020**

**PETRA  
KRČOVÁ**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Krčová** Jméno: **Petra** Osobní číslo: **473462**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Teoretický základ strojírenského inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Problematika výroby a konstrukce forem pro sklářský průmysl**

Název bakalářské práce anglicky:

**Problematic of mould design and production for glass industry**

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod
2. Problematika odlévání skla a konstrukce forem
3. Experiment analýza teplotních polí sklářských forem
4. Zhodnocení a zvěř

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

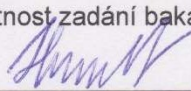
**doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS**


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

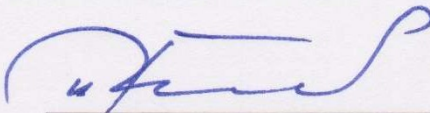
Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2020**

  
doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

  
doc. Ing. Ladislav Kolářik, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

29.4.2020

Datum převzetí zadání

Krčová

Podpis studentky

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Problematika výroby a konstrukce forem pro sklářský průmysl“ vypracovala samostatně a s použitím uvedené literatury a pramenů.

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

V Praze, dne: .....

.....

Krčová Petra

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala vedoucímu této bakalářské práce panu doc. Ing. Aleši Hermanovi, Ph.D. a konzultantu této bakalářské práce Ing. Františku Václavu Štouračovi, CSc. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích. Mé poděkování patří též společnosti KAVALIERGLASS, a.s. za spolupráci při získávání údajů pro experimentální část práce.

## **Anotace**

<b>Vysoká škola:</b>	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
<b>Ústav:</b>	Ústav strojírenské technologie
<b>Název práce:</b>	Problematika výroby a konstrukce forem pro sklářský průmysl
<b>Akademický rok:</b>	2019/2020
<b>Autor:</b>	Krčová Petra
<b>Vedoucí práce:</b>	doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.
<b>Konzultant:</b>	Ing. František Václav Štourač, CSc.
<b>Počet stran:</b>	50
<b>Počet obrázků:</b>	36
<b>Počet tabulek:</b>	3
<b>Klíčová slova:</b>	sklářské formy, analýza teplotních polí, infračervená termografie, sklo SIMAX, lisování skla
<b>Abstrakt:</b>	Tato bakalářská práce se zabývá analýzou teplotních polí forem pro lisování skla. Analýza byla provedena bezkontaktním měřením teploty pomocí termokamery. Provedeným měřením byly zjištěny teploty formy v jednotlivých fázích procesu lisování skla. Na základě naměřených dat je možné řešit problémy životnosti forem pro sklářský průmysl.

## Annotation

- University:** CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
- Department:** Department of Manufacturing Technology
- Title of thesis:** Problematic of mould design and production for glass industry
- Academic year:** 2019/2020
- Author:** Krčová Petra
- Supervisor:** doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.
- Consultant:** Ing. František Václav Štourač, CSc.
- Number of pages:** 50
- Number of pictures:** 36
- Number of tables:** 3
- Keyword:** glass molds, analysis of temperature fields, thermal images, SIMAX glass, glass pressing
- Abstract:** This bachelor thesis deals with of analysis of temperature fields of molds for glass pressuring. Analysis was realized using non-contact temperature measurement using a infrared thermal camera. Performed measurement have been discovered teperatures of mold in individual stages of the glass pressing proces. Based on the measured data, it is possible to solve the service life problems of molds for the glass industry.

## 1. Obsah

1. Úvod .....	8
2. Problematika lisování skla a konstrukce forem.....	9
2.1. Historie sklářství .....	9
2.1.1. Historie výroby skla ve starověku a raném středověku .....	9
2.1.2. Výroba skla v českých zemích.....	10
2.1.3. Užité sklo po roce 1945 .....	11
2.2. Výroba skla .....	12
2.2.1. Rozdělení sklářských surovin .....	12
2.3. Sklářské formy .....	14
2.3.1. Dřevěné sklářské formy .....	14
2.3.2. Kovové sklářské formy .....	16
2.4. Technologie tvarování skla .....	21
2.4.1. Foukání skla.....	21
2.4.2. Lisování skla .....	22
2.4.3. Broušení skla.....	23
3. Společnost KAVALIERRGLASS, a.s. a její historie .....	24
4. Experiment - analýza teplotních polí sklářských forem .....	26
4.1. Sklo SIMAX.....	26
4.2. Naměřená data.....	27
4.2.1. Popis procesu výroby na 12-ti pozičním lisu .....	29
4.2.2. Teplotní analýza cyklu .....	33
5. Zhodnocení a závěr.....	43
6. Seznam zdrojů a použité literatury .....	46
7. Seznam obrázků a tabulek .....	49

## 1. Úvod

Tato bakalářská práce je věnována problematice konstrukce a výroby forem pro sklářský průmysl. Byla vypracována ve spolupráci se společností KAVALIERGLASS, a.s., která sídlí v Sázavě a věnuje se výrobě skla pro potravinářský průmysl, laboratorního skla pro chemický průmysl, farmacii a zdravotnictví. Problém, který firma aktuálně řeší, je nízká životnost sklářských forem vlivem teplotního namáhání. V místech formy, kde je nejvíce materiálu, se shromažďuje teplo a chladnou pomaleji než okolní slabší místa. Vlivem teplotních rázů, které nastávají během lisovacího procesu, vzniká v těchto místech vnitřní pnutí a únava materiálu. Toto pnutí a únava materiálu způsobují praskání forem. Sklářské formy jsou drahé a jejich opravy jsou velmi náročné a na výrobcích bývají často vidět známky toho, že forma byla spravovaná. Proto je snaha životnost forem maximalizovat.

V následujících kapitolách je nejprve stručně shrnuta historie sklářství, a poté je značná část věnována analýze materiálů používaných pro výrobu sklářských forem a také jejich výrobě. Dále jsou v teoretické části popsány technologie tvarování skla.

V experimentální části práce je zkoumáno rozložení teplotních polí sklářské formy během lisovacího procesu. Cílem experimentu bylo analyzovat teplotní namáhání formy. Po dohodě s firmou byla zvolena forma na výrobu čtvercové nádoby. K měření byla použita termokamera značky FLIR.

Na podobné téma byly v sedmdesátých letech na popud společnosti KAVALIERGLASS, a.s. (tehdy národní podnik Kavalier Sázava) vypracovány dvě diplomové práce, které pomohli optimalizovat formy a razník.

### **Cíle práce:**

- Analýza materiálů používaných na výrobu forem pro zpracování skla
- Analýza procesu výroby lisované skleněné nádoby
- Analýza teplotních polí ve sklářské lisovací formě



## 2. Problematika lisování skla a konstrukce forem

### 2.1. Historie sklářství

#### 2.1.1. Historie výroby skla ve starověku a raném středověku

Sklo se začalo vyrábět už dlouho před naším letopočtem během doby bronzové, tedy někdy kolem 5. a 4. tisíciletí př.n.l. ve východním středomoří (Sýrie), ale dlouho se prvenství přikládalo Egyptu. Sklo tehdy vznikalo jako vedlejší produkt keramické výroby. Příímým předchůdcem skla byly sklovité glazury, kterými se zdobily keramické nádoby a šperky. Sklo, které se v té době vyrábělo, nebylo moc čisté a používalo se především na výrobu korálek (obr. 1) a dekorací nebo velmi jednoduchých nádob. Nejstarší známé části dutých nádob pocházejí z konce 16. stol. př. n. l. a byly nalezeny v Asii na území tehdejší Mezopotámie. Nádoby se tehdy vyráběly výhradně technologií na pískové jádro. [1], [2]



Obr. 1 Skleněný korálek Jaroměř, 6. - 5. stol. př.n.l. [1]

V průběhu 1. a 2. století začali syřští skláři sklo vyvážet po celé říši římské a začali také zakládat nové sklárny nejprve v Egejské oblasti a poté i dále v Evropě. Migrace sklářů po Evropě ustala až ve 4. století. V 5. století se začínaly ve sklářství projevovat změny související s úpadkem římské kultury. Odklon od římské technologie však nastal až na konci 1. tisíciletí, kdy se technologie a druhy skla v různých částech Evropy začaly odlišovat. [2]

### 2.1.2. Výroba skla v českých zemích

V českých zemích nastal počátek sklářského řemesla na přelomu 12. a 13. století. Tehdejší sklárny byly situovány v nezáležených horských oblastech s vodními zdroji a dostatkem lesů v okolí, kvůli potřebě dřeva na vytápění pecí. V lesních hutích se tehdy vyrábělo tzv. lesní sklo (obr. 2), které se stalo pro toto období typické i díky své lehce nazelenalé barvě. Lesní sklo dostalo svůj název podle místa, kde se vyrábělo. Nazelenalá barva byla způsobena oxidem železnatým, který byl obsažen ve sklářském písku. Sklo obsahovalo bublinky a nečistoty ve sklovině, což bylo způsobováno nedokonalou tavnou surovin a jejich minimálním čištěním. [3]



Obr. 2 Lesní sklo [4]

Od té doby výroba a využití skla neustále rostla. České sklo a křišťál se staly světoznámými. Svým věhlasem se české sklo rovnalo i benátskému sklu, které je pokládáno za vrchol sklářského řemesla. Za vlády Rudolfa II., tedy koncem 16. a začátkem 17. století, proběhl v českém sklářství rozkvět díky objevení nových technologií a za pomoci italských mistrů, kteří zde působili. Rozmohlo se ryté a broušené sklo, které si získalo světový věhlas. Čeští skláři dále přicházeli s novými možnostmi a přístupy a věhlas, který si získali již v době renesance, si oprávněně udrželi dodnes. [5]

Největšími změnami prošlo české sklářství v 19. století, kdy se začalo přecházet z pecí vytápěných dřevem na pece generátorově vytápěné plynem, a sklárny se začaly přesouvat do průmyslových oblastí. Koncem 19. století začal velký rozmach průmyslu a velký technický pokrok. [1]

### **2.1.3. Užité sklo po roce 1945**

Po druhé světové válce nastala v Čechách nová politická situace a došlo u nás k zestátnění a sjednocení sklářské výroby. V 50. letech se vytvořila nová definitivní organizační struktura, která přetrvala až do konce roku 1989. V 90. letech se vytvořila a stabilizovala nová vlastnická struktura s vysokou zahraniční kapitálovou účastí. [1]



Obr. 3 Skleněná váza vyrobená po roce 1945 [1]

## 2.2. Výroba skla

Sklo se vyrábí ze směsi přírodních látek, která se nazývá kmen. Hlavní surovinou, ze které se sklo vyrábí, jsou sklářské písky s vysokým obsahem oxidu křemičitého, a to v rozmezí 60 – 80%. U běžných skel se jako další základní složky používají oxid vápenatý, oxid sodný a oxid draselný. Tyto suroviny jsou do kmene přidávány buď formou nerostů, nebo jako chemicky připravené látky, jako například sklo, které snižuje teplotu tavení písku. Kromě hlavních sklotvorných složek se do vsázky přidává také nadrcené odpadní sklo, může ho být i vysoké procento obsahu vsázky. Do vsázky se dále přidávají i další pomocné látky, které sklu dodávají specifické vlastnosti, nebo barviva. Přírodní barva skla je díky nežádoucím příměsím nahnědlá až trochu do zelena, čirou barvu získáváme až odbarvováním a čištěním. [6],[7]

### 2.2.1. Rozdělení sklářských surovin

#### 2.2.1.1. Obecné rozdělení sklářských surovin

- Základní (Stabilizující prvky a taviva)
- Pomocné
- Střepy (může být až 50%)

#### Základní sklářské suroviny

Mezi základní suroviny patří sklotvorné látky, které ve kmeni zajišťují oxidy, a tak určují základní skelet skelného uspořádání mřížky. Sklářský kmen je směs sklářských písků. Obsahuje 60 - 80% oxidu křemičitého ( $\text{SiO}_2$ ). Dále obsahuje vápenec, sodu neboli uhličitan sodný ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) a potaš neboli uhličitan draselný ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ). [6],[7]

Jako stabilizující látky se nejčastěji používají uhličitan vápenatý ( $\text{CaCO}_3$ ) a dolomit neboli uhličitan vápenato-hořečnatý ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) nebo méně často i hydroxid hlinitý ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ). [6],[7]

Taviva jsou složky směsi, které se taví při nižších teplotách. Nepoužívanější tavivo pro běžné obalové sklo je soda ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), dále se také používá potaš ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ), která je dražší a je používána hlavně na křišťálová skla. [6],[7]



Obr. 4 Uhličitan vápenatý [8]

### **Pomocné sklářské suroviny**

Pomocné látky jsou hlavně čeřiva, kaliva, barvidla a odbarvovadla, oxidovadla a redukovadla, urychlovače tavení.

### **Střepy**

Střepy a další skleněný odpad vzniklý ve sklárně např. výrobky, které neprošli kvůli vadě nebo jakékoliv nepřesnosti výstupní kontrolou, se nadrtí a stává se z nich druhotná surovina pro výrobu skla. Někdy se do vsázky přidává střepů vysoké procento.

#### **2.2.1.2. Rozdělení sklářských surovin podle původu**

- Syntetické (uměle vyrobené)
- Přírodní

Pro výrobu skla určeného k lisování se používá borokřemičité sklo. To patří do skupiny skel, která se vyznačuje vysokou teplotní a chemickou odolností a nízkou teplotní roztažností. Určuje je evropská norma ČSN ISO 3585. Pro své vlastnosti jsou určena pro použití ve zdravotnictví, chemickém průmyslu, potravinářském průmyslu a mnoha dalších odvětvích.

Suroviny se mísí ve kmenárnách, které mohou být i zcela automatizované. Kmenárna je samostatný objekt, kde dochází k přípravě sklářské vsázky, jsou vybaveny dopravníky, zásobníky surovin a vážicími systémy. V tomto objektu se také nachází mísiče surovin s dávkovači vody. Podle uspořádání rozlišujeme dva základní typy kmenáren, a to kmenárny řadové a kmenárny věžové. Kmen se následně taví v plynových nebo elektrických sklářských pecích. Sklo se taví při teplotě 1200 až 1500°C, borokřemičité sklo při teplotách až 1630°C. Natavené sklo se vyčeří, případně zakalí, obarví nebo odbarví. V malých pecích se části kmene, které se neroztaví, z hladiny odebírají ve formě sklářské pěny. Ve velkých tavících vanách se sklářský kmen rovnoměrně dosypá na hladinu skla a postupně se protavuje do roztavené skloviny. Tato takzvaná deka zabraňuje přístupu vzduchu do taveniny. Sklovina se následně nechá zchladnout na teplotu asi 700 až 1000°C a začíná se s jejím dalším zpracováním, například odlévání, lisování, foukání nebo tažení. [9]

## 2.3. Sklářské formy

### 2.3.1. Dřevěné sklářské formy

Dřevo vhodné na výrobu sklářských forem je pro svoji vysokou tvrdost převážně buk a hruška. Kmeny se pečlivě vybírají, protože dřevo musí být velmi kvalitní. Je žádoucí, aby kmeny měli husté letokruhy. Žhavé sklo během procesu formu vypaluje (Obr. 7), proto je potřeba k docílení dokonalého finálního tvaru formu neustále obnovovat.

[10], [11]



Obr. 5 Dřevěná forma na zpracování skla [12]

Koncepce výroby dřevěné sklářské formy:

1. První krok je společný pro výrobu všech forem, a to je zhotovení výkresu, který obsahuje veškeré informace o geometrii, tvaru a síle skla. Následně se podle tohoto výkresu vytvoří tzv. pauza. Pauza je šablona, která slouží formaři k výrobě formy.
2. Nejčastěji používané dřevo pro výrobu sklářských forem je bukové. Je nutné, aby bylo dřevo zdravé, a před zpracováním musí být dostatečně nasáklé vodou. Bukové kmeny se proto namáčí do nádrže s vodou, kde zůstávají, dokud neklesnou na dno. Když se kmen potopí na dno, dřevo je dostatečně nasáklé. Vylovené kmeny se nařezou a jsou tak připraveny na další zpracování.
3. Nejprve se kmen opracuje a vznikne tak surový blok dřeva.
4. Surový blok dřeva se upne do soustruhu a dláty se do něj vysoustruží požadovaný tvar. Tento krok je velmi pracný, protože jsou kladeny velké nároky na přesnost.
5. Dalším krokem je rozpůlení formy, ve které se vytvoří známky a řezbářskými dláty se vydlabou detaily (Obr. 6).
6. Posledním krokem je kontrola rozměrů a připevnění dřevěných madel. Tím je forma hotova a připravena k použití. [11]



Obr. 6 Nová dřevěná sklářská forma [11]



Obr. 7 Dřevěná sklářská forma po několikátém použití [13]

## 2.3.2. Kovové sklářské formy

### 2.3.2.1. Materiály kovových forem

Materiál pro výrobu sklářské formy se volí na základě technologických požadavků jednotlivých dílů formy a také podle požadavků zákazníka s ohledem na technologii výroby. [14]

Nejčastěji se používají tyto materiály:

- LLG (litina s lupínkovým grafitem)
- LKG (litina s kuličkovým grafitem)
- Ocelolitina
- Nerezová ocel
- Sklářský bronz

### **LLG EN-GJL-250,300-(ČSN 42 2425,30)**

Jedná se o standardní materiál, který slouží k výrobě ručních sklářských forem nebo na strojní díly, které mají pouze pomocnou konstrukční funkci. Jde tedy o materiál, který nemá přicházet do přímého kontaktu se sklovinou (např. koše, pláště), není zde vhodné příliš vysoké tepelné namáhání. Vyniká relativně vysokou pevností v tlaku. Další mechanické vlastnosti jsou nepříznivě ovlivněny lamelárním tvarem grafitu, zejména pak tažnost. Má nízkou pevnost v tahu a vyšší tepelnou vodivost. Také se vyznačuje značnou schopností tlumení rázů a vibrací. Výhodou je nízká pořizovací cena, se kterou je ale spojena i nevýhoda



a to je nižší životnost, a také nižší užitná hodnota z hlediska údržby dílů forem formového parku. [14]

### **LKG EN-GJS-500,600-(ČSN 42 2305,06)**

LKG má velmi dobré mechanické vlastnosti, její výroba a je ekonomicky výhodná, a také je dobře opracovatelná. V porovnání s LLG má větší tvrdost, modul pružnosti, tvrdost a tažnost. LKG má výrazně lepší životnost než LLG, tím se lepší i celková užitná hodnota dílů forem formového parku. Slouží na výrobu forem, které přicházejí do přímého kontaktu se sklovinou (např. kroužky, dýnky) [14]

### **Ocelolitina AISI 420Cr 17**

Ocelolitina je ušlechtilý materiál. Řadí se k materiálům využívaným ve sklářském průmyslu na výrobu forem skupiny ČSN 42 2906 až ČSN 42 2911. Ocelolitina se zpracovává odléváním. Má vlastnosti vhodné pro využití k výrobě forem pro strojní sklářskou výrobu s vysokou sériovostí a vysokou požadovanou přesností výrobků. Tento materiál je vhodný na výrobu dílů formy, které přicházejí do přímého kontaktu se sklovinou (např. spodní díly sklářských lisovacích forem, razníky). Drsnost povrchu formy může po vyleštění dosahovat až  $Ra < 0,04 \mu m$ , tím se zvyšuje kvalita vyráběného produktu i užitná hodnota dílů forem formového parku. Výrobní cena takové formy je vyšší. Do výsledné ceny se musí promítnout i cena modelového zařízení, které je nutné vyrobit pro odlití formy. [14]

### **Nerezová ocel EN X19CrNi17-2 (ČSN 17 145)**

Jedná se o žáruvzdornou chromovou ocel s dalšími přísadovými prvky. Kovaná nerezová ocel patří v současnosti k nejkvalitnějším materiálům používaným ve sklářském průmyslu. Disponuje vlastnostmi, díky kterým je vhodná zejména pro vysoce sériovou sklářskou výrobu. Drsnost povrchu může po vyleštění dosahovat až  $Ra < 0,04 \mu m$ . Svoji životností několikanásobně překonává formy z litiny, a je vyšší i než životnost forem ocelolitinových. Je vhodná pro použití na všechny díly sklářských forem, které se dostávají do kontaktu se sklovinou. [14]

Materiál EN ISO X19CrNi17-2 lze k výrobě forem použít ve dvou variantách:

1. Volně kované výkovky

Je vhodná na díly vysoce mechanicky a teplotně namáhané, protože má vysoký stupeň prokovaní s vysokou homogenitou materiálu. (např. razníky sklářských lisovacích forem chlazených vodou) [14]

2. Kované přířezy

Přířezy jsou dělené kované tyče tohoto materiálu. Mají zaručený kvalitní stupeň prokovaní s dostatečnou homogenitou materiálu. Jsou vhodné na výrobu spodních dílů sklářských lisovacích forem, lze je použít i na díly chlazené vodou (např. razníky). [14]

### **Nerezová ocel EN X15CrNiSi25-21 (ČSN 17 265)**

Tento materiál je považovaný za nejkvalitnější materiál určený pro výrobu dílů sklářských forem pro vysoce sériovou výrobu. Jedná se o vysoce legovanou žáruvzdornou chromniklovou ocel. Má vyšší životnost v porovnání s ostatními materiály využívanými pro výrobu dílů sklářských forem a je vhodná na všechny díly, které přicházejí do kontaktu se sklovinou. [14]

### **Sklářský bronz AlBr**

Bronz je slitina mědi a cínu s nízkou příměsí dalším kovům. Sklářský bronz je speciálním druhem bronzu, který lze použít i při vyšších teplotách, a má dobré mechanické vlastnosti. Díky svým vlastnostem je vhodným materiálem pro výrobu forem s vysokou sériovostí, používá se pro výrobu dílů sklářských forem, které přicházejí do kontaktu se sklovinou (např. kroužky, ústní formy). [14]

**2.3.2.2. Koncepce výroby ocelových a litinových forem:**

1. Nejprve se vytvoří v CAD programu (např. Autodesk Inventor, SolidWorks) 3D model podle požadavků a k němu odpovídající výkresová dokumentace. V tomto kroku je ještě poměrně snadné provádět úpravy modelu, pokud vytvořený 3D model nespĺňuje reálné představy zákazníka.
2. Druhým krokem je zaformování modelu, opět pomocí CAD programu. V této fázi už se změny provádějí velmi obtížně a zdlouhavě.
3. Následně se sestavuje technologický postup výroby, volí se vhodné nástroje, stroje a řezné podmínky. K této práci lze využít programy jako hyperMILL nebo SURFCAM.

První 3 kroky jsou tzv. předvýrobní.

4. Další etapa je vlastní výroba, která se skládá z obrábění většinou na CNC strojích, případně z ruční nástrojářské práce a nakonec z výstupní kontroly.



Obr. 8 Kovová forma [15]



Obr. 9 Kovová forma [15]

## 2.4. Technologie tvarování skla

### 2.4.1. Foukání skla

Technologií foukání skla se vyrábějí převážně sklenice, vázy, konvice, dekorativní lustry a jiné dekorační předměty. Sklo může být foukané do dřevěných nebo kovových forem. Foukání skla může být prováděno ručně, v tomto případě se většinou vyrábí specifické a dekorativní předměty, které by na stroji nebylo možné vyrobit a je vyžadovaná určitá zručnost a umění skláře. Nebo může být sklo vyfukováno na plně automatizované lince, kdy foukací automaty tvarují především tenkostěnné nádoby, jako např. kádinky, baňky, sklenky a konvice (obr.11). [16,17]

#### 2.4.1.1. Koncepce automatické výroby foukaného skla

1. Promísené a upravené suroviny v kmenárně se nejprve nataví v celoelektrické odporové peci. Z pece je sklovina ke stroji dopravována feedrem, ve kterém je pomocí hořáků nebo elektrod upravována teplota skloviny. Z dávkovače na konci feedru vytéká sklovina ve formě kapky, která je následně ustřižena noži a padá do stroje.
2. Kapka, která je ve stroji uložena na prstencové podložce, pomalu propadá jejím otvorem z části vlivem vlastní váhy, ale převážně tlakem vzduchu vycházejícího z foukací hlavy. Zároveň se otáčí kolem vlastní osy.
3. Když je kapka dostatečně protažena, sevře se kolem ní forma, která má tvar výrobku. Tlak vzduchu zesílí, a tím kapka formu vyplní a získá finální tvar výrobku.
4. Poté je výrobek dopravníkem přesunut na další stroj, kde dochází k odstranění technologického okraje tzv. kopny odtavením. Zde dochází i k tvarování výlevků a podobných prvků. Následuje např. přidání držadla a chlazení. [17]



Obr. 10 Konvice SIMAX vyráběná foukáním skla [17]

### 2.4.2. Lisování skla

Strojní lisování skla patří mezi nejproduktivnější technologie tvarování skla. Provádí se na otočných lisech, které jsou několikapoziční např. 8, 12 nebo 16, na každé pozici se provádí jiná operace. Tímto způsobem lze vyrábět pouze výlisky jednodušších tvarů, nejčastěji skleněné pekáče nebo nádoby na uložení potravin. Člověk v tomto procesu téměř není potřeba, pouze výměna forem probíhá ručně, a to bez přerušení procesu.

#### 2.4.2.1. Koncepce výroby lisovaného skla

1. Promísené a upravené suroviny v kmenárně se nejprve nataví v celoelektrické odporové peci. Z pece je sklovina stejně jako u výroby foukaného skla (kapitola 2.4.1.) ke stroji dopravována feedrem, ve kterém je pomocí hořáků nebo elektrod upravována teplota skloviny.
2. V dávkovači na konci feedru vytváří žhavá sklovina kapku, která je automaticky odstřižena nůžkami a padá do lisovací formy.
3. Na formu je přitlačen kroužek, který doplní tvar dutiny formy. Vzápětí hydraulický lis zatlačí skrz otvor v kroužku razník do formy a vylisuje finální tvar.
4. Na dalších pozicích dochází k zapálení otřepů plynovými hořáky, ochlazení formy pomocí proudu vzduchu a vody a vyleštění výrobku.
5. Dále je výrobek dopraven pásem do tvrdící pece, kde se znovu ohřeje a prudce zchladí, a tím je povrchově vytvrzen. [17]



Obr. 11 Mísa SIMAX vyráběná lisováním [17]

### 2.4.3. Broušení skla

Broušené sklo má v České republice dlouholetou tradici. Na našem území funguje mnoho skláren, které se výrobou broušeného skla zabývají. Tradiční ruční broušení skla je velmi náročné na přesnost a také velmi záleží na zručnosti a trpělivosti brusiče.

#### 2.4.3.1. Koncepce výroby broušeného skla

1. Prvním krokem je rozkreslení výrobku, broušený kus je na počátku úplně hladký. Nejprve se výrobek takzvaně rozkreslí, to znamená, že se rozdělí svislými čarami na stejné díly, počet dílů závisí na průměru výrobku. Poté se rozdělí i vodorovnými čarami, a tím vznikne síť. V síti se pak zhotovuje dekor.
2. Po rozkreslení následuje broušení základního motivu. Poté se brousí drobnější prvky jako např. muřiny, kozlíky, křížky.
3. Následuje broušení oblouků horního okraje, které většinou závisí na svislém dělení. Do oblouků se vybrušují zářezy, a tím vznikají zoubky. Zoubky se následně musí zbavit ostrých hran. Některé výrobky mohou mít oblými zářezy ozdobený celý okraj.
4. Jedním z posledních a velmi důležitým krokem je leštění. Sklo se leští v chemické kyselinové lázni.
5. Nakonec se do vyleštěných okének dobrušují velmi jemné motivy jako hvězdy, vídeňská mata, jemné čárky, rylky nebo trojhránky (Obr. 12). [18]



Obr. 12 Mísa z broušeného skla s motivem vídeňská mata [18]

### 3. Společnost KAVALIERGLASS, a.s. a její historie

Společnost KAVALIERGLASS, a.s. se svou 180-ti letou historií je jedním z předních evropských výrobců ve výrobě a zpracování borosilikátového skla a zároveň je největším výrobcem borosilikátového skla na světě s tavicí kapacitou cca 220 tun skloviny za den. Velká část produkce firmy je exportována do více než 9 zemí světa. Věnuje se výrobě varného skla pro domácnost, laboratorního a technického skla a trubic a průmyslových aparatur. [17]

Historie firmy se datuje do roku 1837, kdy byla zahájena práce na první huti v Sázavě. Firmu tehdy řídil František Kavalír, který tam vyvinul tvrdé draselno-vápenaté sklo a dosáhl s ním značného věhlasu i v širokém okolí. Zemřel v roce 1853 a vedení firmy se ujal jeho syn Josef. Za jeho vedení české laboratorní sklo ovládlo světový trh od Spojených států až po Čínu a Josef si z obchodních důvodů změnil příjmení na Kavalier. Josefův bratr Antonín v roce 1870 vyvinul speciální tepelně odolné laboratorní sklo UNEXCELLED. Josef vybudoval v roce 1884 druhou a později v roce 1902 i třetí huť s moderní regenerativní pecí pro zkvalitnění výroby. S novým tisíciletím byla do Sázavy zavedena železnice, což mělo vliv na další rozvoj firmy. Když Josef zemřel, k překvapení rodiny neodkázal firmu svému synovi a tak po 85 letech skončilo vlastnictví firmy rodinou Kavalírovou, Josefův syn Vladimír se stal pouze správcem pozůstalosti. Vladimír začal jako první tavit borokřemičité laboratorní sklo, budoucí PALEX, v roce 1922 uvedl do provozu moderní čtvrtou sklářskou huť a o rok později začala sklárna vyrábět varné sklo pro domácnost. V roce 1935 vyvinuly sklárny Kavalier další speciální skla ISIS, NEUTRAL a K 35. Po Josefově smrti v roce 1919 spadla správa skláren do rukou Legiobanky a ta ji roku 1939 prodala velkopodnikateli Martinkovi. [17], [20], [21]

Po druhé světové válce byla v roce 1947 zahájena první etapa rekonstrukce a modernizace Sázavských skláren. V té době byla zahájena i strojní výroba trubic z borokřemičitého skla. V roce 1952 sklárny vyvinuly a uvedly na trh nové laboratorní borokřemičité sklo třídy 4.8 – SIAL, o pár let později v roce 1958 vyvinul RNDr. Volf varné laboratorní borokřemičité sklo SIMAX, které je plně kompatibilní se světovými skly třídy 3.3.



Druhá etapa rekonstrukce a modernizace skláren byla zahájena v roce 1968. Současně bylo zavedeno elektrické tavení skla a na trh bylo uvedeno varné lisované sklo pro domácnost a foukané sklo SIMAX heat resistant. Soustavná modernizace technologie výroby a zavedení automatů druhé generace do provozu začalo v roce 1980. [17], [20]

Sklárny Kavalier byly až do roku 1990 státní podnik, 1. prosince 1990 se staly akciovou společností. Firma získala v roce 1995 certifikát ISO 9002 a začala spolupracovat s firmou Elektrolux. Sklárny změnil v roce 1998 majitele a staly se součástí holdingu BCT (Bohemia Crystalex Trading). V roce 2002 zavedla firma normu 9001 a začala spolupracovat s americkou firmou Kimble. BCT holding začal mít v roce 2008 finanční problémy, sklárny spadly do insolvence a o rok později je v konkurzu kupuje firma Ojgar a Sklárny Kavalier přejmenovává na KAVALIERGLASS, a.s.. V roce 2012 dochází ke změně koncepce dosavadního balení varného skla, kolekce je rozdělena do 4 produktových řad SIMAX (Collection, Exclusive, Decor, Simax for Kids). [17]

V současnosti firma nabízí široký sortiment domácího, laboratorního a průmyslového skla, také trubic a aparatur. Firma neustále vylepšuje výrobu a nabízí nové výrobky, které prezentuje na světových veletrzích.

## 4. Experiment - analýza teplotních polí sklářských forem

Koncem 60. let 20. století měla společnost Kralice problémy s životností forem pro lisování skleněných hrnců. Formy měly nízkou životnost, praskaly. Společnost se obrátila na VUT v Brně o pomoc. Byly vypracovány dvě práce na řešení teplotních polí forem. Z výsledků získaných těmito pracemi se dosáhlo optimalizovaného tvaru formy a to bez tepelných uzlů. [19]

Experimentální část této bakalářské práce byla realizována ve spolupráci se společností KAVALIERRGLASS, a.s., která sídlí v Sázavě. Experiment byl po dohodě s firmou zaměřen na výrobu skleněné čtvercové nádoby. Nádoba je vyráběna technologií lisování skla na 12-ti a 16-ti pozičních lisech.

### 4.1. Sklo SIMAX

Společnost KAVALIERRGLASS, a.s. používá pro výrobu varného skla do domácnosti vlastní sklo SIMAX, které svým složením patří do skupiny tvrdých boritokřemičitých skel „3.3“. Toto sklo je čiré a vyniká svojí vysokou teplotní a chemickou odolností. Má nízkou teplotní roztažnost a jeho vlastnosti jsou definované mezinárodní normou ČSN ISO 3585. Výrobky ze skla SIMAX jsou hladké, neporézní, čiré a korozně odolné v provozu bez náhlé změny teploty až do 300 °C. SIMAX sklo je velmi šetrné k životnímu prostředí, a také naprosto ekologicky nezávadné. [17], [22]

Složení skla SIMAX	
Složka	Obsah (hmotnostní %)
SiO <sub>2</sub>	80,3
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,4
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	4,3

Tab. 1 Chemické složení skla SIMAX [17]

Vysoká teplotní odolnost skla SIMAX vůči náhlým změnám teploty je získána díky nízkému součiniteli délkové teplotní roztažnosti, nízkému modulu pružnosti v tahu a relativně vysoké teplotní vodivosti. [17]

Při zahřívání a ochlazování skleněného výrobku vzniká ve skle nežádoucí vnitřní pnutí. K prasknutí výrobku vlivem příliš rychlého ochlazování může dojít při překročení

nežádoucího vnitřního pnutí. Odolnost skla SIMAX proti teplotnímu šoku závisí na tloušťce stěny výrobku.

Chlazení skla je tepelný proces, který má za úkol zabránit vzniku vysokého nežádoucího vnitřního pnutí ve výrobku. Také slouží k odstranění již vzniklého vnitřního pnutí, které snižuje odolnost výrobku. Chladicí cyklus se skládá ze tří fází, a to z vyhřívání výrobku na horní chladicí teplotu, výdrže na této teplotě po určitou dobu, při které dochází k vyrovnání teplotních rozdílů ve výrobku a snížení vnitřního pnutí na přípustnou mez a z následného poklesu teploty výrobku z horní chladicí teploty na dolní chladicí teplotu a na konečnou teplotu (teplota okolí). Tento proces se používá u silnostěnných výrobků.

U výrobků, kde je žádoucí vysoká odolnost vůči tepelnému šoku nebo vůči mechanickým rázům, se používá vytvrzení skla (pekáče, důlní lampy). Sklo se nejprve ohřeje ve tvrdící peci na patřičnou teplotu, a pak se prudce ochladí ve vzduchové sprše. Tím se v povrchových vrstvách skla vytvoří tlakové napětí, které výrazně zvýší odolnost skla. [17]

## 4.2. Naměřená data

Experiment byl soustředěn na pozorování rozložení teploty sklářské formy pro výrobu čtvercové nádobky technologií lisování skla. Problém, který firma v této chvíli má, je ten, že formy mají nízkou životnost a praskají, což je způsobeno vysokým teplotním namáháním. Cílem této práce je zmapovat teploty v jednotlivých fázích procesu.

Měření teplot je pro tento proces problematické, protože během procesu většinou něco brání přímému přístupu k formě, např. razník, sklovina, plynové hořáky, rameno pro vyjímání výrobků, přes které není možné změřit teplotu vnitřku formy.

Po dohodě se společností KAVALIERGLASS, a.s. byl pro měření zvolen lis s nejméně pozicemi, tedy 12-ti poziční. Razník a forma jsou vyrobeny z nerezové oceli ČSN 17 145 a kroužek je vyroben z feritické tvárné litiny ČSN 42 2304. Měření bylo provedeno termokamerou značky Flir T640.

Technické parametry Flir T640	
Rozlišení senzoru	640x480
Teplotní citlivost	<0,03 °C
Teplotní rozsah	-40 °C .... + 2000 °C
Spektrální rozsah	7,5 až 14 μm

Tab. 2 Technické parametry termokamery Flir T640 [23]

Za pomoci termografických měřících systémů je možné analyzovat teplotní pole měřeného objektu, ale pouze na jeho povrchu. Termokamery umožňují bezkontaktně změřit a vizualizovat infračervené záření tělesa, pracují na principu Planckova vyzařovacího zákona a Stefan-Boltzmanova zákona. Získaná naměřená data mají formu infračerveného snímku, ze kterého je poté možné určit teplotu v jednotlivých bodech. Určení teploty závisí na několika parametrech. Hlavním parametrem je emisivita. Emisivita je parametr charakterizující schopnost povrchu tělesa tepelně vyzařovat, není konstantní pro celý povrch a je závislá na teplotě a vlnové délce. Čím vyšší je emisivita, tím více tepelného záření objekt vyzaří. Ideální černé těleso má emisivitu rovnu 1, lesklá tělesa mají emisivitu velmi nízkou, klidně i 0,1. Dalším důležitým parametrem je zdánlivá odrazná teplota. Ta charakterizuje tepelné záření odražené od povrchu měřeného objektu. Vztah mezi emisivitou a odrazivostí povrchu tělesa s nepropustným povrchem je  $\rho = 1 - \varepsilon$ , kde  $\rho$  odrazivost a  $\varepsilon$  je emisivita. Ze vztahu vyplývá, že čím menší je emisivita, tím větší bude vliv zdánlivé odrazné teploty. V praxi je proto snazší měřit teploty na povrchu objektů s vyšší emisivitou. Je také důležité zvolit takový spektrální rozsah termokamery, aby emisivita povrchu měřeného objektu byla co nejbližší jeho horní hranici. Vliv zdánlivé odrazné teploty je v praxi třeba kompenzovat a odečíst ji z naměřených hodnot tak, aby výsledkem byla skutečná hodnota intenzity tepelného záření na povrchu měřeného objektu. [24]

Odrazná teplota, která byla použita pro vyhodnocování tohoto experimentu, byla určena pomocí alobalu následujícím postupem. Nejprve byl alobal zmačkan, a poté roztažen na polystyrenovou desku. Následně byl termokamerou pořízen infračervený snímek. Mnoho plošek zmačkaného a opět narovnaného alobalu odráží teplotu za termokamerou, tedy odraznou teplotu. Ze snímku byla zjištěna její hodnota.

Emisivita měření pro tento experiment byla určena tak, že nejprve byla na přístupném místě sklářské formy změřena teplota dotykovým teploměrem. Poté byl pořízen infračervený snímek a v programu FLIR Tool byly nastaveny ostatní parametry měření jako okolní teplota, odrazná teplota, vzdálenost od objektu a vlhkost. Dále byl parametr emisivity měněn tak, aby teplota na infračerveném snímku odpovídala teplotě naměřené dotykovým teploměrem ve stejném místě na objektu.

### **Parametry měření:**

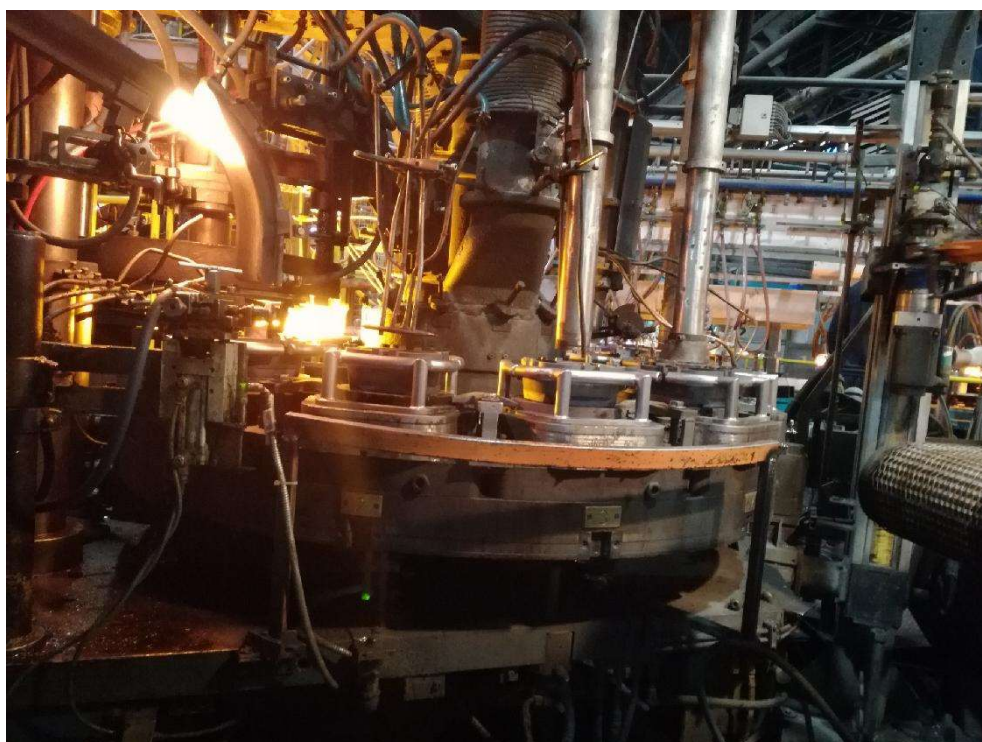
- Použitá termokamera: FLIR T640
- Vzdálenost od objektu: 3 m
- Emisivita: 0,92
- Odrazná teplota: 25 °C
- Vlhkost: 25 %
- Okolní teplota: 30 °C
- Teplota skloviny: 1 330 °C
- Takt stroje: 13 min<sup>-1</sup>
- Váha výlisku: 530 g
- Doba zalisování: 1,1 s

#### **4.2.1. Popis procesu výroby na 12-ti pozičním lisu**

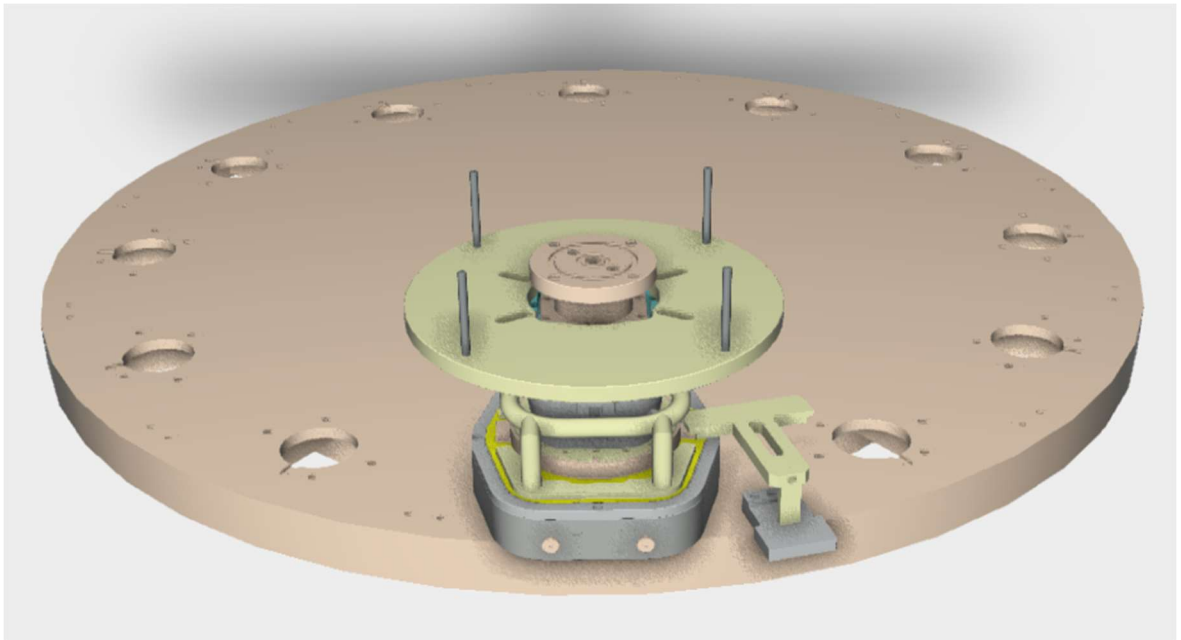
Lisování probíhá na 12-ti pozičním lisu (Obr. 14), kde jsou na karuselu (Obr. 13) umístěny formy (Obr. 15,16). Formy pro lisování skla se skládají pouze ze spodní části. Na formách je umístěno vzduchové chlazení. Samotné lisování nastává pouze na jedné z dvanácti pozic lisu. Na této pozici je nad formou umístěn kroužek a razník, který sjede do spodní části formy umístěné na karuselu a vytlačí sklo do její dutiny (viz. kapitola 2.4.2.). Ostatní pozice na lisu jsou pomocné. Takt stroje je 13 min<sup>-1</sup>, to znamená, že razník sjede do dolní úvrati a provede zalisování 13-krát za minutu. Znamená to také, že každou minutu stroj vyrobí 13 výlisků.



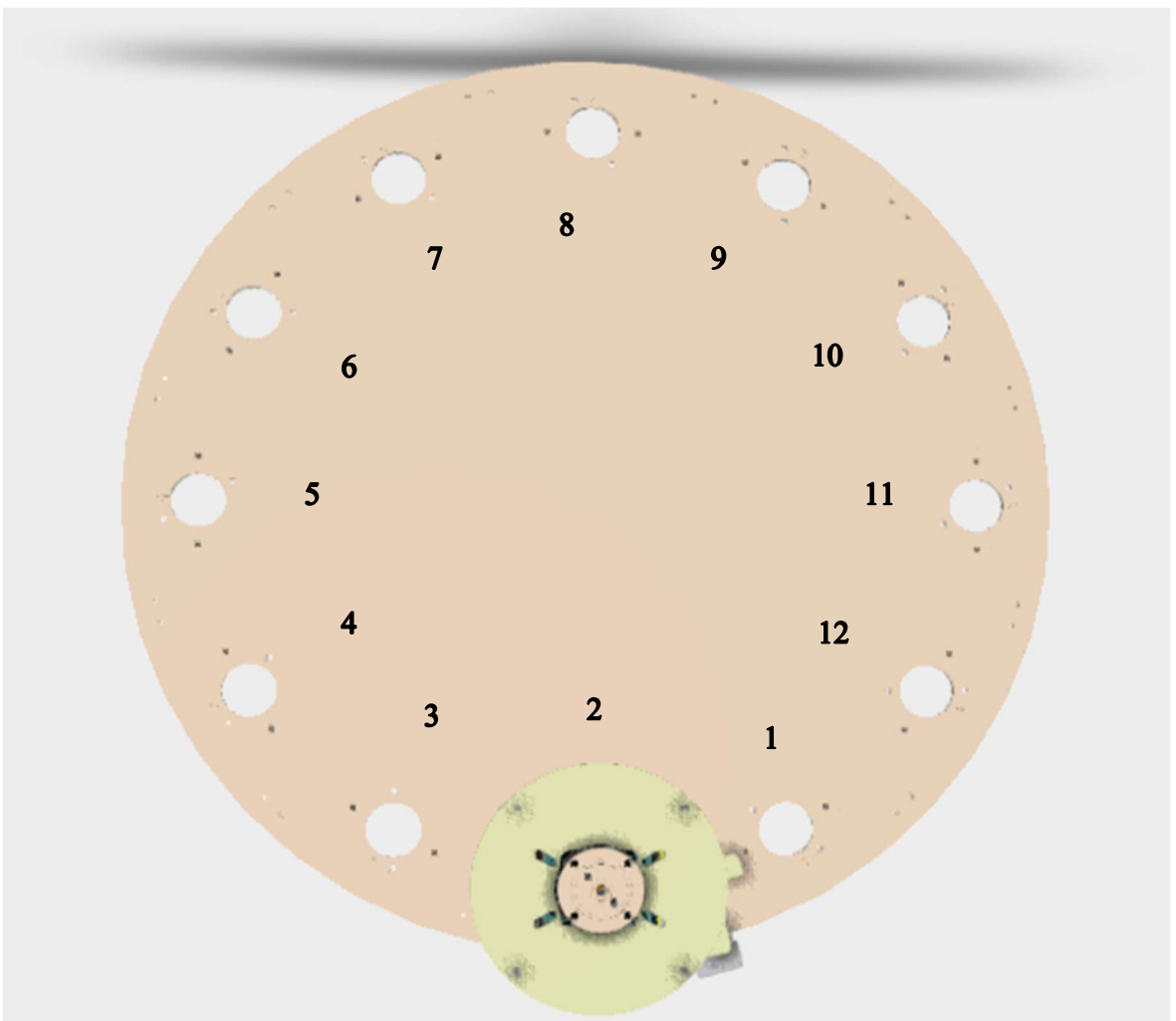
Obr. 13 Karusel bez forem a chlazení



Obr. 14 12-ti poziční lis – pohled od pozice 12, 1



Obr. 15 Schéma umístění forem na lisu



Obr. 16 Rozmístění pozic na lisu

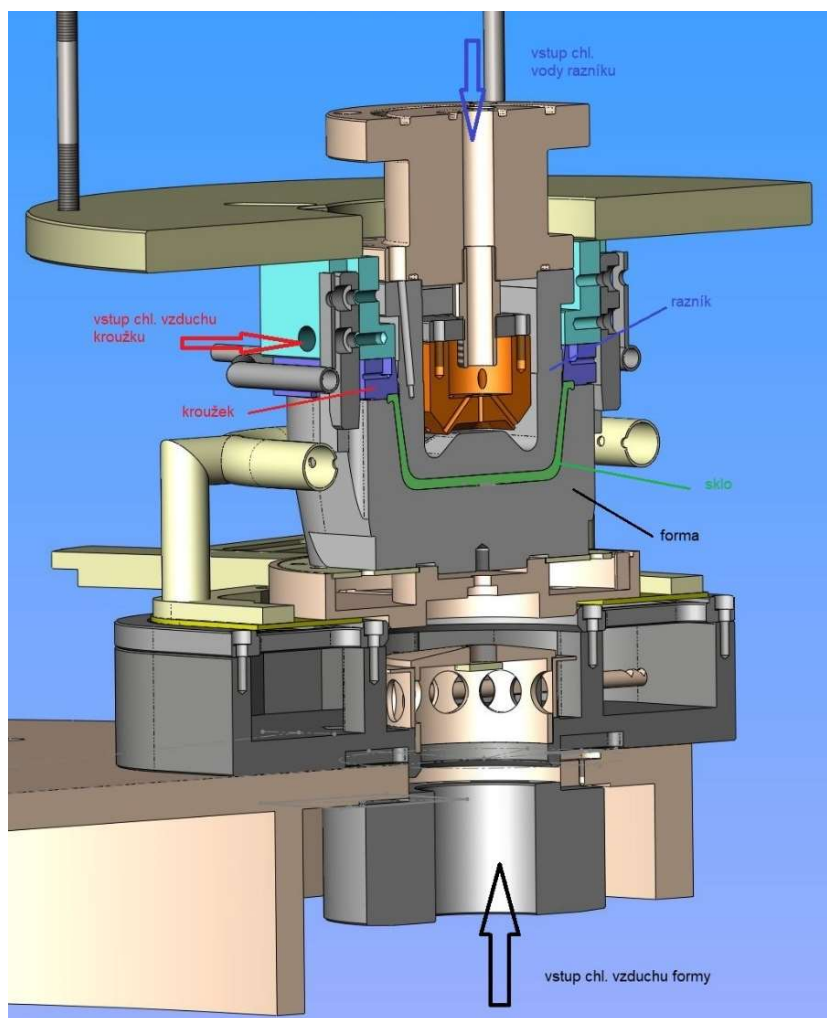
- Pozice 1: Dávkování kapky roztavené skloviny do formy
- Pozice 2: Lisování pozice, kroužek a razník sjedou do formy a zpět do počáteční pozice
- Pozice 3: Zapalování stříhu (stopa po ustrižení kapky) dvěma plynovými hořáky
- Pozice 4: Zapalování vnitřních hran v rozích (otřep styčné plochy razník – kroužek) nádoby čtyřmi plynovými hořáky
- Pozice 5: Zapalování vnitřních hran (otřep styčné plochy razník – kroužek) hlavicí s plynovými hořáky
- Pozice 6: Intenzivní chlazení boků a dna nádoby
- Pozice 7: Intenzivní chlazení dna nádoby
- Pozice 8: Intenzivní chlazení dna nádoby
- Pozice 9: Vyjmutí výlisku z formy
- Pozice 10: Chlazení formy
- Pozice 11: Chlazení formy
- Pozice 12: Chlazení formy



Obr. 17 Forma na zapékačí misku



### 4.2.2. Teplotní analýza cyklu

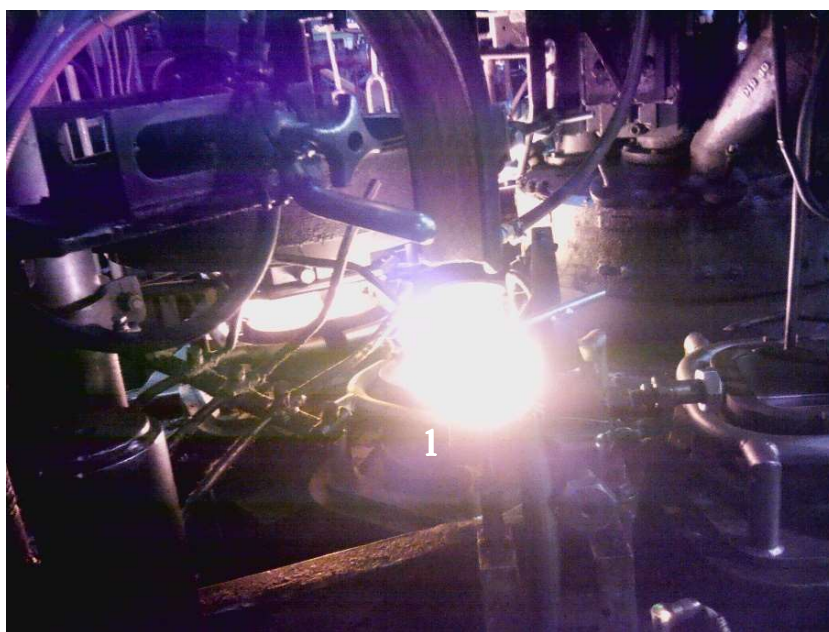


Obr. 18 Chlazení formy a razníku

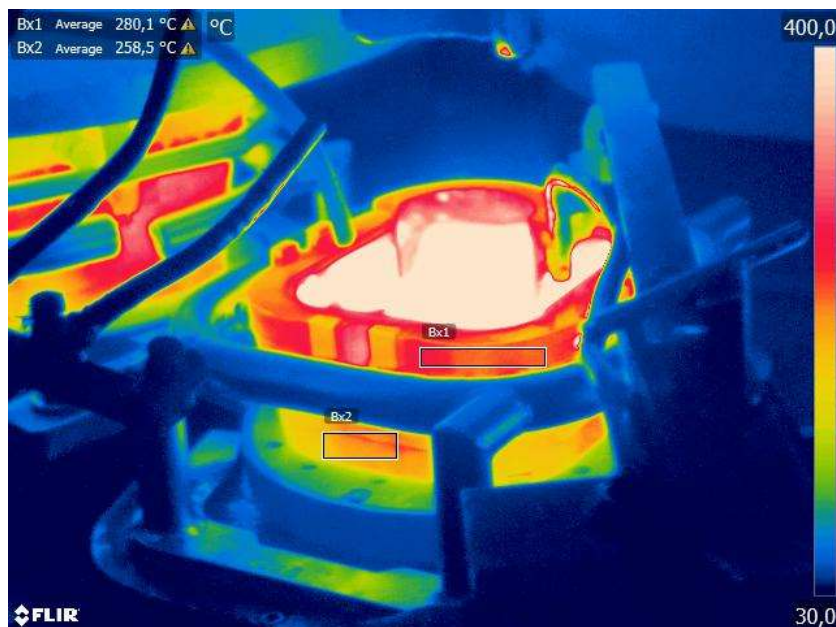
Sklářské formy jsou umístěny na lisu pomocí speciálních přípravků (Obr. 18), součástí je i soustava chladicích trubek, kterými prochází chladicí vzduch. Vzduch je na formu přiveden i ze spodu kvůli nutnosti chlazení dna formy, na které by trubky po obvodu nestačily. Z pohledu chlazení jsou nejproblematictější místa na formě rohy na dně. Teplotu vzduchu ovlivňuje spousta faktorů, například i roční období, které má vliv na teplotu uvnitř výrobní haly. V létě je teplota chlazení vyšší než v zimě a pohybuje se od 70 až do 120 °C.

Na formu sjede společně s kroužkem (Obr. 18) razník (Obr. 18), který na něj dosedá, v tu chvíli probíhá lisování. Kroužek je chlazen v těle kroužku proudícím vzduchem přivedeným soustavou trubek přes nosič kroužku (Obr. 18). Razník je vnitřně chlazený vodou.

Natavená sklovina je umístěna ve vaně ve výrobní hale a je rozvedena obvykle ke dvěma strojům feedry. Tam je na pozici 1 natavená sklovina dávkována ustřížením kapky nad formou. Kapka padá do připravené formy umístěné na lisu (Obr. 19). Ve chvíli ustřížení má kapka skla teplotu cca 1 330 °C. Před dopadem kapky je forma ochlazená na teplotu menší než 300 °C (Obr. 20). Forma má vnější teplotu ve vrchní části cca 280 °C a ve spodní části cca 265 °C.

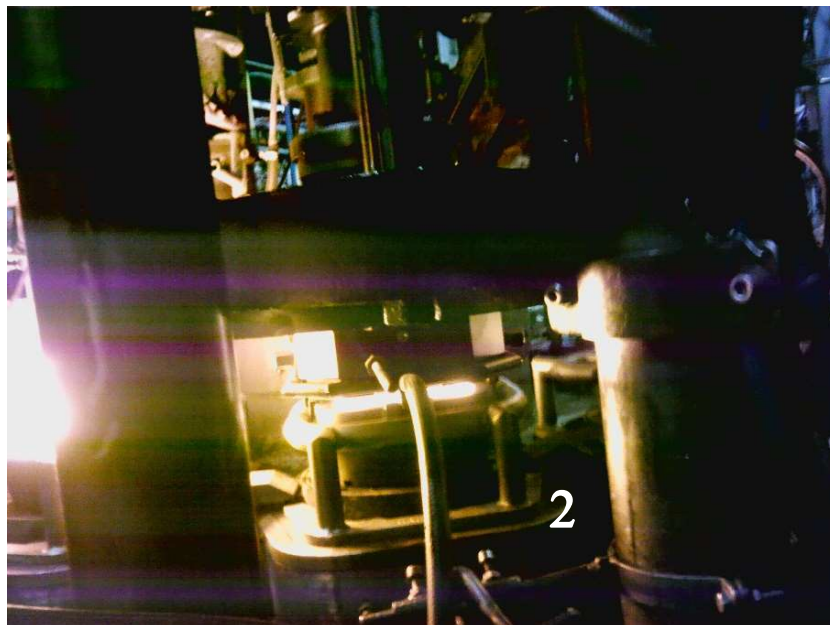


Obr. 19 Kapka roztavené skloviny padající do formy

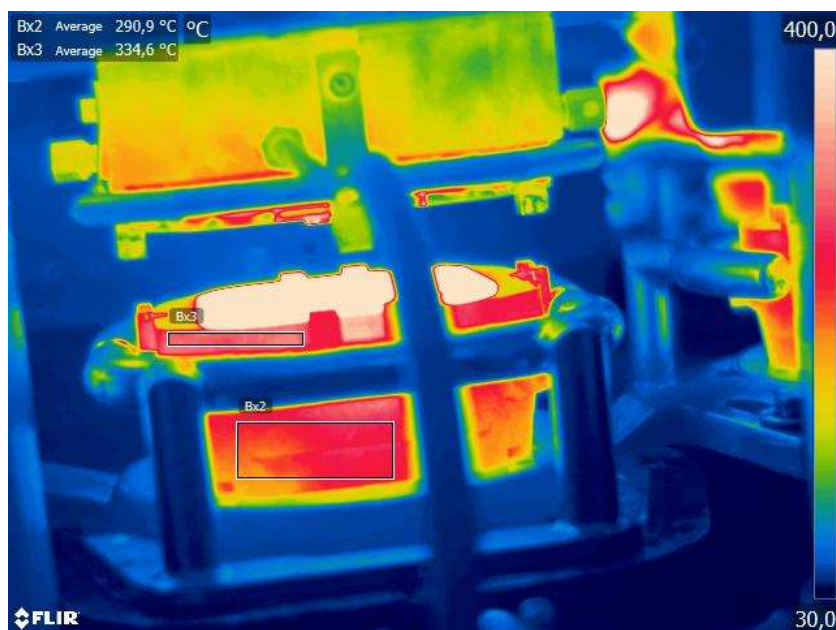


Obr. 20 Infračervený snímek formy před dopadem roztavené skloviny, pozice 1

Na pozici 2 následuje lisování (viz. kapitola 2.4.2.), kdy razník sjede z horní do dolní úvrati (Obr. 21), sklovinu vtlačí do dutiny formy a tím ji zalisuje, a zase se do pozice vrátí, to vše stihne za 1,1 sekundy. Samotné lisování, čas kdy je razník ve formě a působí na roztavenou sklovinu, je mnohem kratší a to cca 0,3 sekundy.

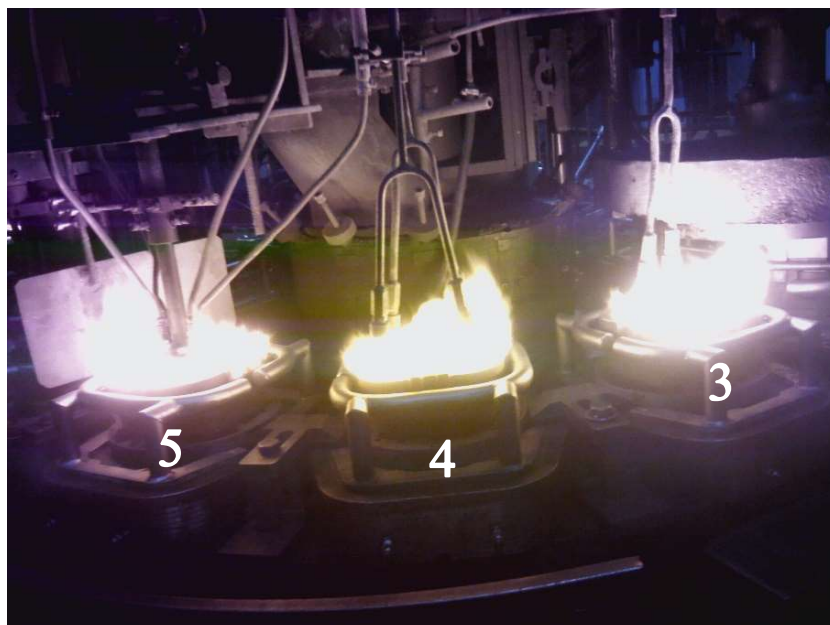


Obr. 21 Razník vyjíždějící z formy

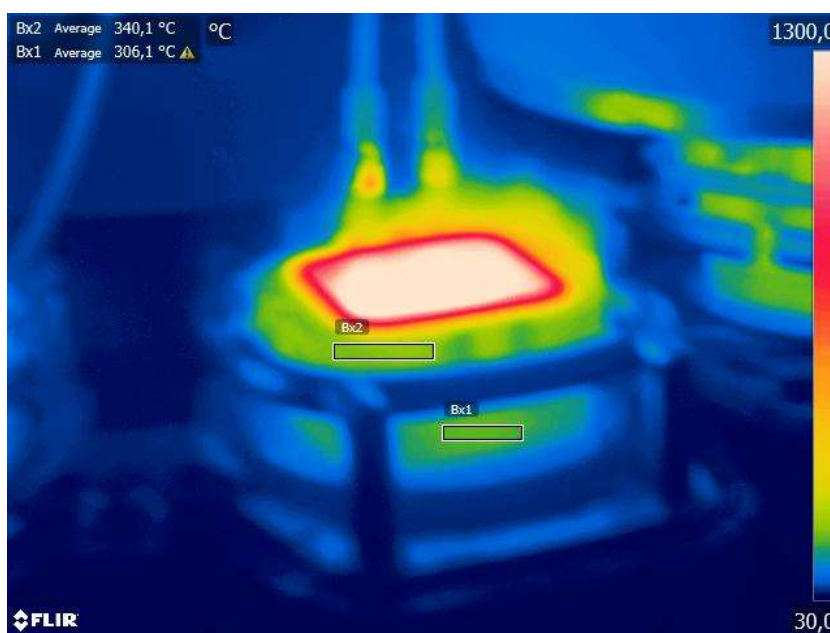


Obr. 22 Infračervený snímek formy, kroužku a nosiče kroužku, pozice 2

Z infračerveného snímku (Obr. 22) je patrné, že forma má v tuto chvíli vnější teplotu na vrchní části cca 335 °C a na spodní části cca 290 °C. Vnitřek formy se zahřívá podstatně více než vnější strana, a to až na 600 °C. Na následujících 3 pozicích, tedy na pozicích 3,4 a 5, probíhá zapalování hran vylisované nádoby ve formě (Obr. 23). Zapalování je realizováno plynovými hořáky a slouží k odstranění otřepů a ostrých hran. Hořáky zapalují vady na výrobku a vnášejí do procesu další nežádoucí teplo.



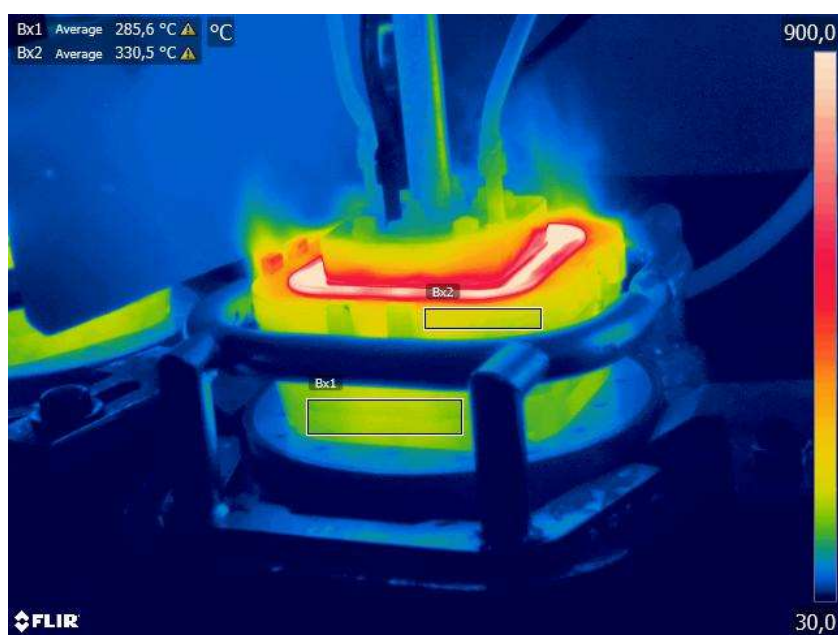
Obr. 23 Zapalování hran plynovými hořáky



Obr. 24 Infračervený snímek zapalování hran dvěma plynovými hořáky, pozice 3



Obr. 25 Infračervený snímek zapalování hran čtyřmi plynovými hořáky, pozice 4

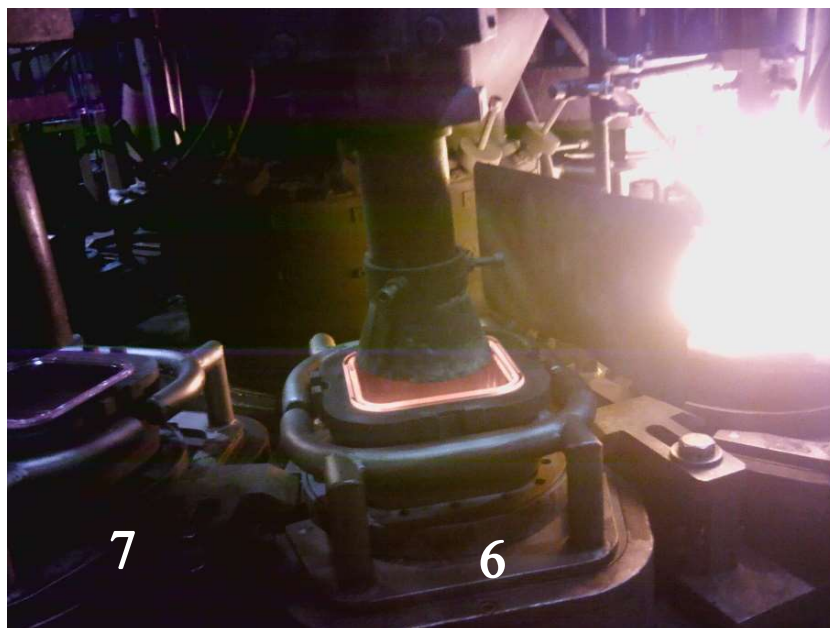


Obr. 26 Infračervený snímek zapalování hran hlavicí s plynovými hořáky, pozice 5

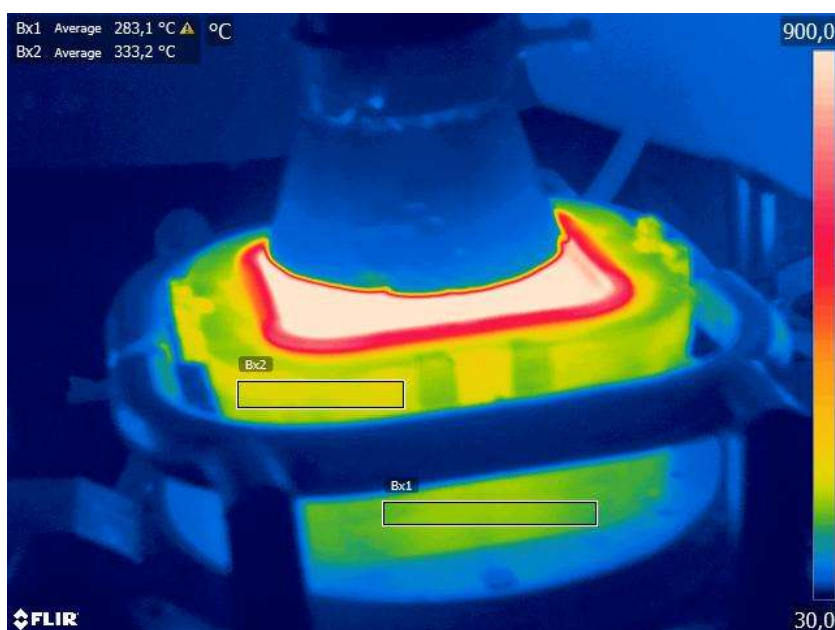
Zapálení hran je realizován plynovými hořáky s teplotou plynu dosahující až 3000 °C. Hlavice, ve které jsou umístěny hořáky, má teplotu cca 660 °C a forma je z vnější strany ohřívána na teplotu na vrchní části 330 až 340 °C a na části spodní na teplotu cca 300 °C (Obr. 24,25 a 26), sklo ve formě má teplotu až 1 000 °C.

Infračervené snímky pozic 3 a 4 mají špatnou kvalitu, což je zapříčiněno vysokou teplotou plamenů hořáků, se kterou si termokamera nedokázala poradit. Řešením by bylo zvolit kameru s jiným spektrálním rozsahem.

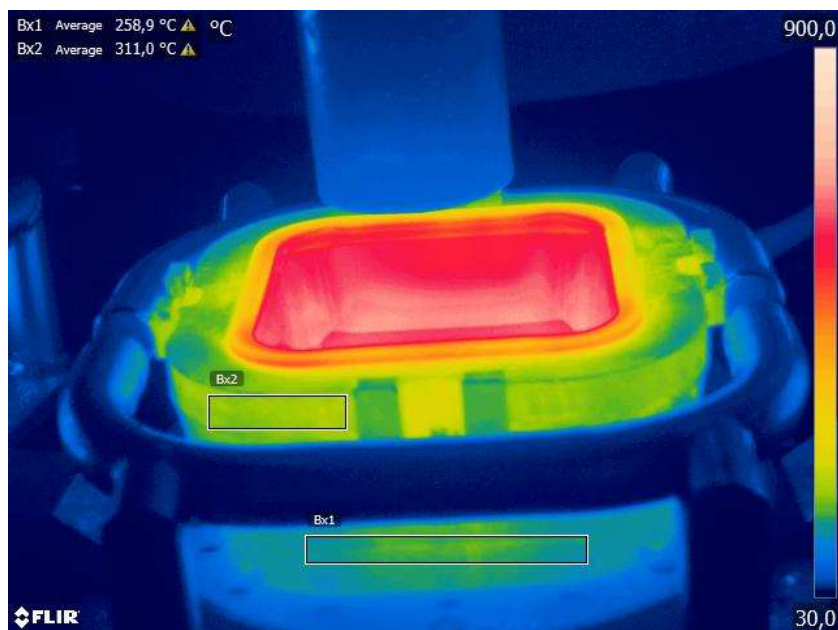
Na pozicích 6,7 a 8 je výlisek ve formě chlazený proudícím vzduchem (Obr. 27), aby bylo možné ho z formy automaticky vyjmout pomocí robotického ramena. Sklo je možné oddělit od formy při teplotách menších než cca 550 °C. Do této teploty má vysokou přilnavost a nelze ho od formy snadno oddělit.



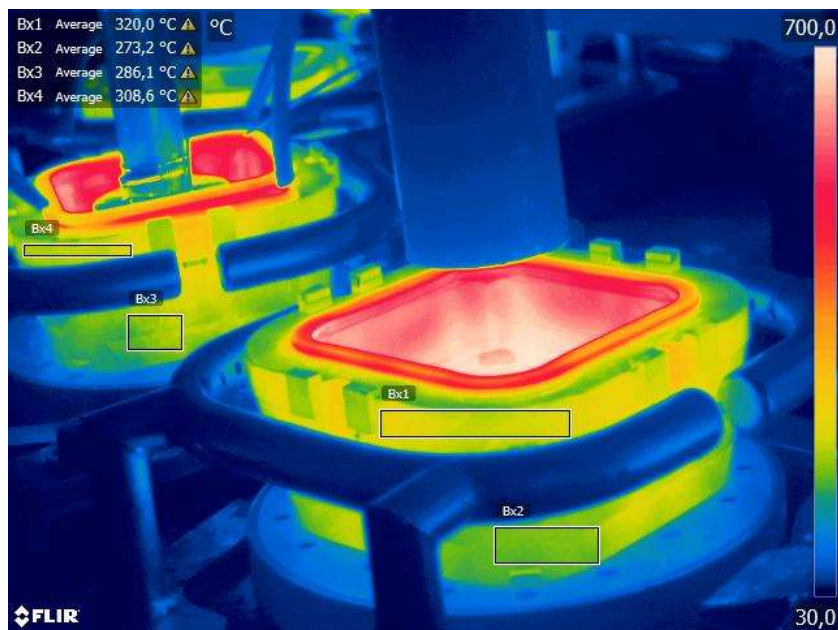
Obr. 27 Chlazení výlisku



Obr. 28 Infračervený snímek chlazení výlisku, pozice 6



Obr. 29 Infračervený snímek chlazení vylisku, pozice 7



Obr. 30 Infračervený snímek chlazení vylisku, pozice 8

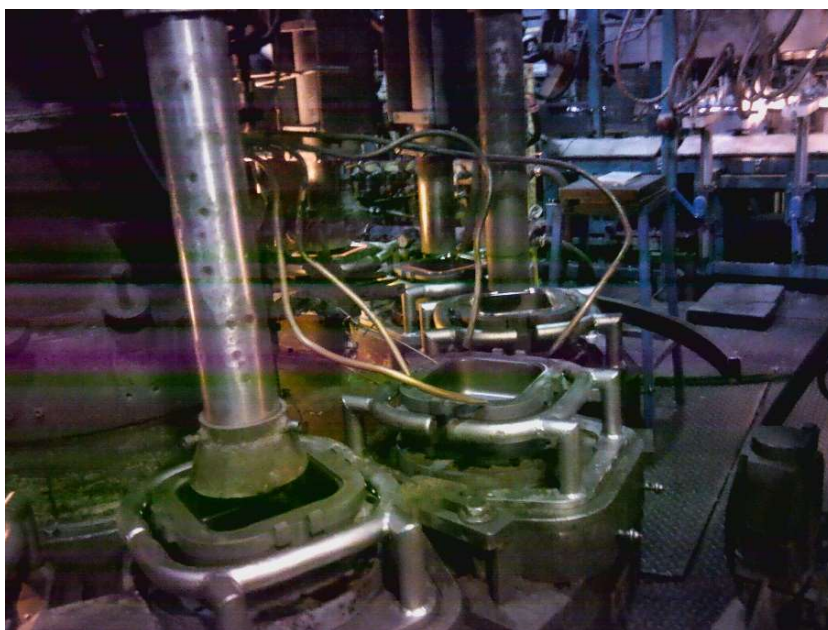
Z infračerveného snímku (Obr. 28) je vidět, že vnější teplota formy na první chladicí pozici, tedy na pozici 6, je na vrchní části cca 330 °C a na spodní části cca 285 °C. V této chvíli dosahuje teplota skla uvnitř formy až 900°C.

Na další chladicí pozici (Obr. 29) je vnější plocha formy ochlazena na vrchní části na teplotu cca 320 °C a na spodní části na teplotu cca 280 °C.

Na poslední pozici před vyjmutím výlisku (Obr. 30) je teplota vnější plochy formy na vrchní části cca 315 °C a na spodní části cca 280 °C. Při odebrání výlisku je vnější teplota formy stále na vrchní části cca 315 °C a na spodní části cca 280 °C

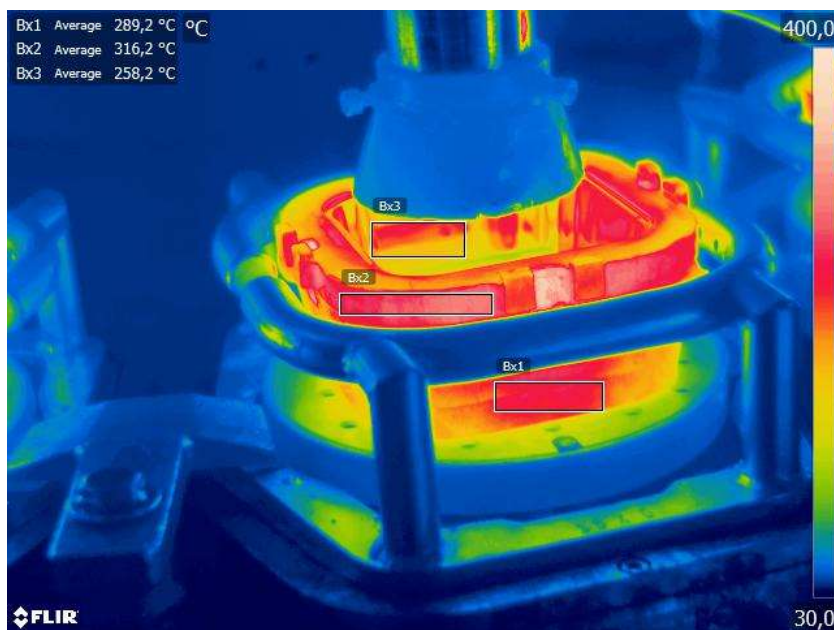
Poté, co forma s výliskem projde chlazením, je výlisk vyjmut na pozici 9 pomocí robotického ramena a umístěn na pás, kde dochází k zapálení vnějších hran, které nebyly přístupné, když byl výlisk ve formě. Dále putují výrobky na pásu do vytvrzovací komory, kde jsou vytvrzeny a postupně schlazeny na teplotu okolí. Následuje kontrola kvality, kde jsou vybrány zmetky, kterou jsou recyklovány a znovu přidány do vsázky. Sklárna má díky tomu nulový skelný odpad.

Forma, poté co z ní byl na pozici 9 vyjmut výlisk, projde zbylé pozice 10, 11 a 12, kde je stále chlazena (Obr. 31), až dojde opět na pozici 1, kde je do ní znovu nadávkována kapka roztavené skloviny a celý proces se opakuje.

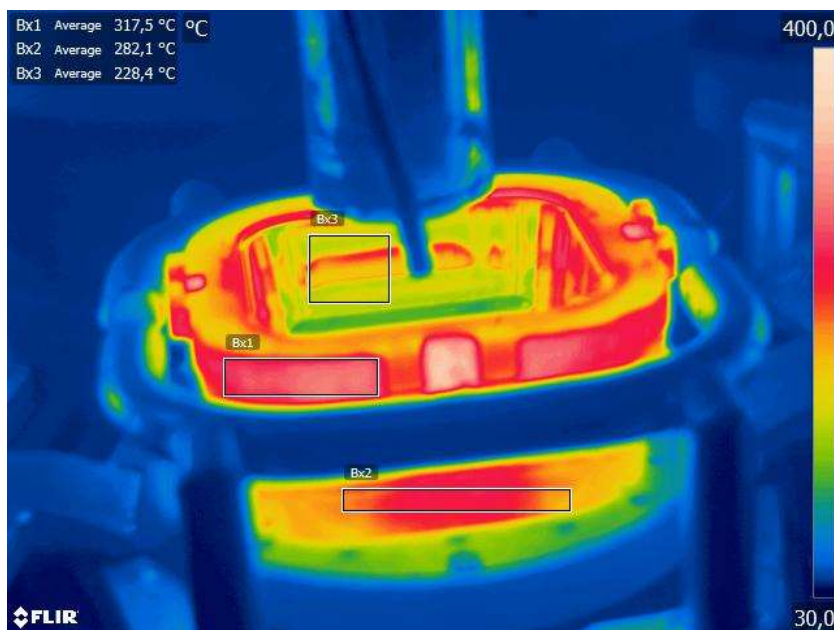


Obr. 31 Formy po vyndání výlisku



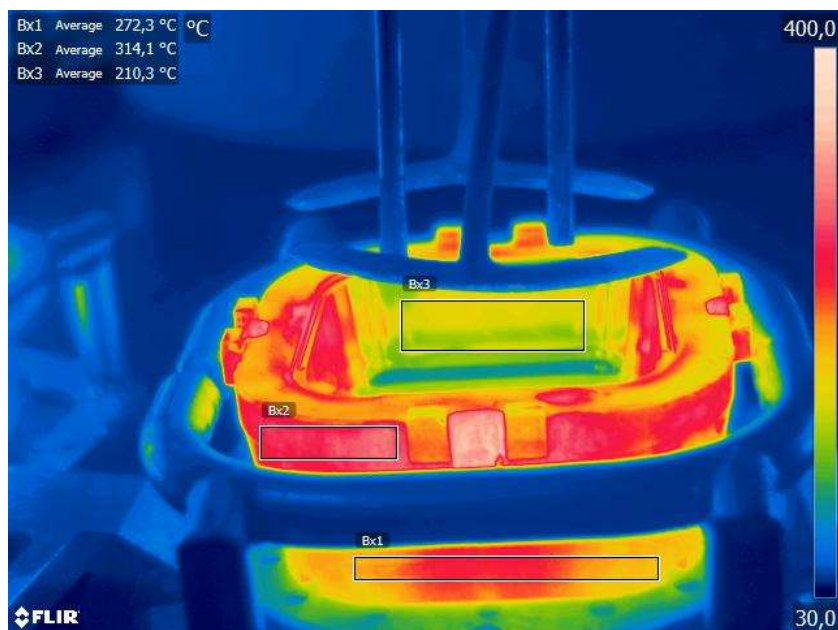


Obr. 32 Infračervený snímek chlazení formy, pozice 10



Obr. 33 Infračervený snímek chlazení formy, pozice 11

Na pozicích 10 a 11 probíhá chlazení formy nejen z vnější strany, kde se teplota na začátku chlazení pohybuje v rozmezí cca 270 až 320 °C, ale i jejího vnitřku, kde teplota dosahuje až cca 280 °C.



Obr. 34 Infračervený snímek chlazení formy, pozice 12

Teplota formy se před dalším opakováním procesu, to znamená než je do ní znovu odstřížena kapka skloviny, pohybuje v rozmezí 200 až 320 °C (Obr. 34). Teplota v různých částech formy závisí na tloušťce formy v tomto místě. Silnější místa jsou teplejší, protože se ochlazují pomaleji. Teplota chladících trubek je okolo 70 °C.

## 5. Zhodnocení a závěr

Cílem této bakalářské práce bylo analyzovat materiály používané na výrobu forem pro zpracování skla, analyzovat proces výroby lisované čtvercové skleněné nádoby, a také analyzovat teplotní pole ve sklářské lisovací formě. Používané materiály a proces výroby skla lisováním jsou popsány v teoretické části této práce. Analýze teplotních polí byl věnován experiment.

Experiment byl proveden ve spolupráci s firmou KAVALIERRGLASS, a.s. a jeho cílem bylo popsat postup výroby skleněné lisované čtvercové nádoby (Obr. 35) a pokusit se zmapovat průběh teplot sklářské formy při lisování skla. Měření teplot bylo prováděno termokamerou FLIR T640. Ze získaných infračervených snímků byly určeny teploty formy při různých fázích procesu výroby. Dále bylo zjištěno, ve které fázi procesu je teplota formy nejvyšší a nejnižší a také kritická místa formy, která jsou nejvíce tepelně namáhaná vlivem výrazných změn teploty během výrobního procesu. Forma se nejvíce zahřívá a chladne na nejslabších místech, silnější místa si snáze drží teplotu, ale je těžší je uchládit, aby bylo možné výlisek z formy vyjmout. Následující tabulka (Tab. 3) ukazuje průměrné teploty formy během lisovacího procesu.

Pozice na lisu	Vnější teplota formy [°C]		
	Spodní část	Vrchní část	Uvnitř (boky)
<b>1</b>	265	300	-
<b>2</b>	290	335	-
<b>3</b>	305	340	-
<b>4</b>	300	340	-
<b>5</b>	290	330	-
<b>6</b>	285	330	-
<b>7</b>	280	320	-
<b>8</b>	280	315	-
<b>9</b>	280	315	-
<b>10</b>	280	310	260
<b>11</b>	275	305	230
<b>12</b>	270	300	210

Tab. 3 Teploty sklářské formy během lisovacího cyklu

Výběrem termokamery Flir T640 se spektrálním rozsahem 7,5 až 14  $\mu\text{m}$  bylo zapříčiněno, že některá místa procesu nebylo možné dobře změřit, a to zejména pozice 3,4 a 5, kde probíhá zapalování plynovými hořáky. Výsledné infračervené snímky (Obr. 24, 25) nejsou jasné, skrz plyn není vidět teplota sklářské formy, zde by bylo vhodné použít termokameru s jiným spektrálním rozsahem cca 1 – 5  $\mu\text{m}$ , která dokáže plameny odfiltrovat.

Bezkontaktní měření termokamerou má svá úskalí, protože jeho přesnost je ovlivněna mnoha faktory. Každá plocha má jinou povrchovou úpravu a ta ovlivňuje emisivitu. Emisivita byla nastavena pro vnější povrch formy, který není leštěný, ale vnitřní povrch leštěný je. Emisivita se proto může pro vnitřní povrch formy výrazně lišit. Během rychlého výrobního cyklu ale není možné emisivitu uvnitř formy zjistit bez zastavení výrobní linky. Další nezanedbatelný vliv má na měření to, že emisivita je závislá na teplotě. Takže pokud bude teplota okolí, ve kterém se měří termokamerou, 30°C a teplota formy 500°C, v okolí formy bude teplota výrazně vyšší než je teplota okolí. Emisivita je také směrová hodnota, to znamená, že nejpřesnější výsledky získáme, když je povrch kolmo k termokameře. Aby bylo možné reálně změřit teplotu na dně formy, musela by být termokamera umístěna kolmo nad ní, to ale není vzhledem k uspořádání stroje možné. Reálné hodnoty emisivity je možné získat do úhlu náklonu 30°, poté se emisivita výrazně mění. Z těchto důvodů hodnoty teploty na vnitřních stěnách formy uvedené v Tab. 3 neodpovídají skutečnosti. Firma udává, že teplota se zde reálně pohybuje nad 400 °C.

Při zkoumání technologie a samotného průběhu výroby lisované skleněné nádoby (Obr. 35) byl zjištěn jeden problém. Při dopadu kapky roztavené skloviny do formy vzniká na dně výrobku nepatrné, ale přesto okem viditelné vrásnění – tzv. gramofon (Obr. 36).



Obr. 35 Lisovaná skleněná nádobka

Tento problém vzniká vlivem vysokého rozdílu teplot mezi kapkou skloviny, která má cca 1330 °C a formou, jejíž dno má teplotu kolem 450 °C. Při tomto kontaktu sklovina zatuhne na dně rychleji, než dojde k zalisování a dně tak zůstane vrásnění. Tzv. gramofon mizí, pokud je teplota formy při dávkování skla 490 – 500 °C. Pokud je teplota formy pod 450 °C je gramofon velice výrazný. Proto pokud by byly teploty v Tab. 3 správné, bylo by to na výrobcích vidět. Návrh řešení tohoto problému je nad rámec této bakalářské práce.



Obr. 36 Viditelné vrásnění - gramofon na dně nádobky

## 6. Seznam zdrojů a použité literatury

[1] *Skleněný shop cz* [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.sklenenishop.cz/historie-skla/>

[2] *Historie skla* [online]. [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <http://www.hanaglass.cz/html/cj3.htm>

[3] *Historické zelené sklo* [online]. [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <https://www.lesnisklo.cz/>

[4] *Crystal HB* [online]. [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <https://www.crystalhb.cz/ostatni.php>

[5] *Glassimo* [online]. [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <http://cz.glassimo.eu/historie-ceskeho-skla/>

[6] *Asociace sklářského a keramického průmyslu v ČR* [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://askpcr.cz/o-skle/cesky-sklarsky-prumysl>

[7] *Asociace sklářského a keramického průmyslu v ČR* [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://askpcr.cz/o-skle/vyroba-skla>

[8] *Učebnice chemie* [online]. [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: [http://www.zschemie.euweb.cz/prvky\\_II/prvky\\_II5.html](http://www.zschemie.euweb.cz/prvky_II/prvky_II5.html)

[9] *Skleněný shop cz* [online]. [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: <https://www.sklenenishop.cz/zajimavosti-o-skle-vyroba-a-druhy-skla/>

[10] *Ruckl* [online]. [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: <https://www.ruckl.com/cs/cms/5/know-how>

[11] *Sklárna a minipivovar Novosad a syn* [online]. [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <http://www.sklarnaharrachov.cz/sklarna/postup-vyroby>

[12] *Glass atelier Morava* [online]. [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <https://www.glass-czech.cz/postup-vyroby/>

[13] *Turistický portál Harrachova* [online]. [cit. 2020-02-26]. Dostupné z: <http://www.ubytovani-harrachov.cz/cz/harrachov/restaurace-harrachov/pivovar-harrachov-harrachov-357.html>

[14] *Nedform* [online]. [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <http://test28.nowonet.com/material>

[15] *Desko* [online]. [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <https://www.desko.cz/cs/prumyslova-zarizeni/sklarske-formy/>

[16] *Pexels* [online]. [cit. 2020-01-31]. Dostupné z: <https://www.pexels.com/cs-cz/foto/foukani-skla-kontejner-kreativni-muz-220990/>

[17] *KAVALIER* [online]. [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://www.kavalier.cz/>

[18] *Broušené sklo Crystal* [online]. [cit. 2020-01-31]. Dostupné z: <https://www.crystal-bohemia.cz/brousenesklo/6-o-S-K-L-E/18-JAK-SE-DELA-POSTUP-PRACI>

[19] ŠTOURÁČ, František. *Matematicky - na analogonu vyřešte přestup tepla ze skloviny do jednotlivých částí daného nástroje*. Brno, 1972. Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Doc. Ing. Miloslav Jagoš, CSc.

[20] ŠKÁPÍKOVÁ, Jitka a Magdalena ŠORELOVÁ. *Příběhy slavných značek: Kavalier: Proč vyhlášenou českou sklárnu neodkázal majitel svému synovi?* [online]. 11.2.2020 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://dvojka.rozhlas.cz/kavalier-proc-vyhlasenou-ceskou-sklarnu-neodkazal-majitel-svemu-synovi-8146766>

[21] KAVALÍROVÁ, Kateřina. *Historie skláren Kavalier a rodiny Kavalírovy* [online]. Pardubice, 2012 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: [https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/47598/KavalirovaK\\_Historiesklaren\\_TJ\\_2012.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/47598/KavalirovaK_Historiesklaren_TJ_2012.pdf?sequence=3&isAllowed=y). Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Tomáš Jiránek.

[22] ISO 3585. *Sklo boritokřemičité 3,3 - Vlastnosti (71 4016)*. 3. vydání. 1999.

[23] *FLIR* [online]. [cit. 2020-06-27]. Dostupné z:

<https://www.termokamery-flir.cz/termokamera-flir-t600-t620-t640/>

[24] SOVA, Jan. Bezdotykové měření teplotních polí II. *Aldebaran Bulletin: Týdeník věnovaný aktualitám a novinkám z fyziky a astronomie* [online]. 2017, **2017**(19), 1 [cit. 2020-06-28]. ISSN 1214-1674. Dostupné z: [https://www.aldebaran.cz/bulletin/2017\\_19\\_erm.php](https://www.aldebaran.cz/bulletin/2017_19_erm.php)



## 7. Seznam obrázků a tabulek

Tab. 1 Chemické složení skla SIMAX [17] .....	25
Tab. 2 Technické parametry termokamery Flir T640 [23] .....	26
Tab. 3 Teploty sklářské formy během lisovacího cyklu .....	42
Obr. 1 Skleněný korálek Jaroměř, 6. - 5. stol. př.n.l. [1] .....	9
Obr. 2 Lesní sklo [4] .....	10
Obr. 3 Skleněná váza vyrobená po roce 1945 [1] .....	11
Obr. 4 Uhličitan vápenatý [8] .....	13
Obr. 5 Dřevěná forma na zpracování skla [12] .....	14
Obr. 6 Nová dřevěná sklářská forma [11] .....	15
Obr. 7 Dřevěná sklářská forma po několikátém použití [13] .....	16
Obr. 8 Kovová forma [15] .....	19
Obr. 9 Kovová forma [15] .....	20
Obr. 10 Konvice SIMAX vyráběná foukáním skla [17] .....	21
Obr. 11 Mísa SIMAX vyráběná lisováním [17] .....	22
Obr. 12 Mísa z broušeného skla s motivem vídeňská mata [18] .....	23
Obr. 13 Karusel bez forem a chlazení .....	30
Obr. 14 12-ti poziční lis - pohled od pozice 12, 1 .....	30
Obr. 15 Schéma umístění forem na lisu .....	31
Obr. 16 Rozmístění pozic na lisu .....	31
Obr. 17 Forma na zapékací misku .....	32
Obr. 18 Chlazení formy a razníku .....	33
Obr. 19 Kapka roztavené skloviny padající do formy .....	33
Obr. 20 Infračervený snímek formy před dopadem roztavené skloviny, pozice 1 .....	34
Obr. 21 Razník vyjíždějící z formy .....	35
Obr. 22 Infračervený snímek formy, kroužku a nosiče kroužku, pozice 2 .....	35
Obr. 23 Zapalování hran plynovými hořáky .....	36
Obr. 24 Infračervený snímek zapalování hran dvěma plynovými hořáky, pozice 3 .....	36
Obr. 25 Infračervený snímek zapalování hran čtyřmi plynovými hořáky, pozice 4 .....	37
Obr. 26 Infračervený snímek zapalování hran hlavicí s plynovými hořáky, pozice 5 ...	37
Obr. 27 Chlazení výlisku .....	38
Obr. 28 Infračervený snímek chlazení výlisku na pozici 6 .....	38

Obr. 29 Infračervený snímek chlazení výlisku, pozice 7 .....	39
Obr. 30 Infračervený snímek chlazení výlisku, pozice 8 .....	39
Obr. 31 Formy po vyndání výlisku .....	40
Obr. 32 Infračervený snímek chlazení formy, pozice 10 .....	41
Obr. 33 Infračervený snímek chlazení formy, pozice 11 .....	41
Obr. 34 Infračervený snímek chlazení formy, pozice 12 .....	42
Obr. 35 Lisovaná skleněná nádobka .....	45
Obr. 36 Viditelné vrásnění - gramofon na dně nádoby .....	45