

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav strojírenské technologie



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Chladicí systémy vstřikovacích forem pro enkapsulaci autoskel  
termoplastickými pryžemi

Autor: Bc. Dominik Ferstel  
Vedoucí práce: Ing. Stefan Krebs  
Konzultant: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.

Praha Srpen 2018

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ferstel** Jméno: **Dominik** Osobní číslo: **419978**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojni**  
Zadávající katedra/ústav:  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Chladicí systémy vstřikovacích forem pro enkapsulaci autoskel termoplastickými pryžemi.**

Název diplomové práce anglicky:

**Mould cooling systems for the encapsulation of car glass with thermoplastic rubber.**

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor technologie vstřikování plastů.
2. Popis problematiky enkapsulace autoskel termoplasty.
3. Popis problematiky chlazení autoskla s proměnlivým tvarem enkapsulace.
4. Návrh optimalizace procesu a analýza relevantních parametrů.
5. Posouzení výsledků a závěr.

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Stefan Krebs, ústav strojírenské technologie FS**


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


**doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS**


Datum zadání diplomové práce: **23.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **10.08.2018**

Platnost zadání diplomové práce: **10.08.2018**

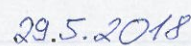
  
Ing. Stefan Krebs  
podpis vedoucí(ho) práce


  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Chladicí systémy vstřikovacích forem pro enkapsulaci autoskel termoplastickými pryžemi“ vypracoval samostatně s použitím literatury a zdrojů, které uvádím v příloženém seznamu.

V Praze dne .....

.....

Bc. Dominik Ferstel

## **PODĚKOVÁNÍ:**

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Stefanu Krebsovi za poskytnutý čas a odborné konzultace, za podnětné rady a návrhy při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Macháčkovi a Ing. Romanu Hynkovi ze společnosti AGC Automotive Czech a.s. za poskytnuté materiály a věcné připomínky. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mojí rodině za podporu během celého studia.

# **ANOTACE**

Cílem diplomové práce je navrhnout řešení pro dosažení účinnějšího chlazení enkapsulovaného autoskla. Teoretická část práce je zaměřena na technologii vstřikování plastů, technologii enkapsulace autoskla a na možnosti optimalizace chlazení. V praktické části jsou rozpracovány různé metody pro analýzu celého chladicího systému. Tyto metody jsou aplikovány pro analýzu daného systému s cílem zlepšení efektivity chlazení.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

vstřikování plastů, enkapsulace, temperační systém, termoplastický elastomer, analýza, optimalizace, tepelná bilance

## **ANNOTATION**

The aim of the master's thesis is to suggest solutions for the achievement of a more effective cooling for encapsulation car-glass in injection moulds. The theoretic part of thesis puts focus on the technology of injection moulding, technology of encapsulation of car-glass and suggestions for the optimization of the cooling. In the practical part different methods for the analysis of the entire cooling system are developed. These methods are applied to the given cooling system in order to make suggestions how to improve its cooling efficiency.

## **KEYWORDS**

injection moulding, encapsulation, tempering system, thermoplastic elastomer, analysis, optimalization, thermal balance

# Obsah

1. Úvod.....	10
I. TEORETICKÁ ČÁST .....	11
2. Technologie vstřikování plastů .....	12
2.1. Rozdělení plastů vhodných pro vstřikování .....	12
2.1.1. Reaktoplasty .....	13
2.1.2. Termoplasty .....	13
2.1.3. Elastomery.....	14
2.1.4. Termoplastické elastomery .....	14
2.2. Příprava plastů před vstřikováním .....	15
2.2.1. Technologie granulace .....	16
2.2.2. Doprava materiálu .....	16
2.2.3. Sušení .....	16
2.3. Vstřikovací cyklus.....	17
2.3.1. Fáze plnění vnitřních dutin formy .....	21
2.3.2. Fáze dotlaku .....	22
2.3.3. Fáze chlazení .....	22
3. Vstřikovací forma .....	24
3.1. Princip vstřikovací formy .....	24
3.2. Tepelná bilance vstřikovací formy .....	25
3.2.1. Měrná tepelná kapacita .....	26
3.2.2. Tepelná vodivost.....	26
3.2.3. Součinitel přestupu tepla .....	27
3.3. Temperace forem .....	27
3.3.1. Materiál formy .....	28
3.3.2. Temperační okruhy .....	29
3.3.3. Vrtané temperační kanály .....	29
3.3.4. Přepážkové systémy.....	31
3.3.5. Další systémy .....	33
3.3.6. Odvzdušnění.....	34
4. Procesní parametry vstřikování .....	35
4.1. Temperační médium formy .....	35
4.2. Laminární nebo turbulentní tok temperačního média .....	36
4.3. Teplota taveniny, formy a vstřikovací tlak.....	36

4.4.	Dotlak.....	37
5.	Technologie enkapsulace autoskla .....	40
5.1.	Definice enkapsulace .....	40
5.2.	Zásadní informace o enkapsulaci autoskla .....	40
5.3.	Popis problematiky chlazení u enkapsulace autoskla .....	42
5.3.1.	Problematika umístění autoskla ve formě.....	42
5.3.2.	Problematika asymetrie výstřiku .....	42
5.3.3.	Problematika asymetrie autoskla .....	43
II.	PRAKTICKÁ ČÁST .....	44
6.	AGC Automotive Czech a.s.....	45
6.1.	Popis technologie vstřikování plastů u AGC Automotive Czech a.s.....	45
6.2.	Forma M2050.....	46
7.	Analýza výstřiku .....	48
7.1.	Moldflow analysis .....	48
7.2.	Průřezová analýza výstřiku .....	49
7.3.	Analýza pomocí termokamery.....	51
7.3.1.	Naměření teploty autoskla.....	51
7.3.2.	Analýza formy před vstřikováním.....	53
7.3.3.	Analýza formy po vstřikování.....	54
8.	Analýza temperačního systému formy .....	56
8.1.	Modely temperačních okruhů ve formě .....	56
8.2.	Měření délek temperačních okruhů.....	57
8.3.	Temperační jednotky.....	58
8.3.1.	Analýza výkonu temperačních jednotek .....	59
9.	Tepelná bilance formy .....	63
9.1.	Postup sestavení tepelné bilance.....	63
9.2.	TPE s označením TC7 WEZ 901 .....	63
9.2.1.	Měrná tepelná kapacita TC7 WEZ 901 .....	64
9.2.2.	Součinitel tepelné vodivosti TC7 WEZ 901 .....	65
9.3.	Teplo přivedené taveninou .....	68
9.4.	Teplo odvedené temperačním systémem formy .....	69
9.4.1.	Způsob proudění v jednotlivých temperačních okruzích .....	70
9.5.	Teplo odvedené ztrátami do okolí .....	70
9.6.	Teplo odvedené autosklem .....	70



9.7.	Hodnocení tepelné bilance.....	71
10.	Návrhy optimalizace .....	72
10.1.	Analýza výstřiku .....	72
10.1.1.	Změna geometrie výstřiku .....	72
10.1.2.	Změna umístění vtoků ve formě .....	72
10.1.3.	Potlačení místního přehřátí .....	72
10.2.	Analýza temperačního systému formy .....	72
10.2.1.	Temperační jednotky .....	72
10.2.2.	Nastavení temperačních okruhů levé a pravé strany formy.....	74
10.2.3.	Vyčištění formy s následným pravidelným čištěním nádrže .....	74
10.2.4.	Změna spojovací součásti .....	75
10.3.	Tepelná bilance.....	76
10.4.	Souhrn .....	76
11.	Závěr .....	77
12.	Seznam zdrojů.....	78
13.	Seznam obrázků.....	83
14.	Seznam tabulek.....	85
15.	Seznam grafů .....	86
16.	Seznam použitých zkratk.....	87
17.	Seznam použitých jednotek.....	88

# 1. Úvod

Používání plastů se od poloviny 20. století neustále zvyšuje a v posledních desítkách let zažívá nevídaný rozmach i přes jejich negativní dopady na životní prostředí. Využívají se v široké škále aplikací od těch nejjednodušších (sáčky, kelímky) až po ty složitější (chladicí rozvody, vzduchové rozvody v automobilech).

Plasty plně nahradily a v mnoha případech dokonce předčily dražší materiály, které byly využívány před jejich objevením. Jejich vlastnosti se liší od zvoleného druhu plastu, přičemž existuje přes 5000 těchto druhů. V celkovém měřítku jsou dnes k výběru typy plastů, které jsou poměrně pevné, za tepla dobře tvářitelné, mají nízkou hustotu, na vzduchu jsou stálé a některé odolávají účinkům žíravín a chemikálií. Jejich další výhodou oproti konvenčním materiálům je nižší spotřeba energie na jejich zpracování.

Pro výrobu plastových dílů nejrůznějších tvarů se používá několik technologií (vstřikování plastů, vytlačování, vyfukování, atd). Nejvyužívanější je technologie vstřikování plastů. Vstřikování umožňuje výrobu tvarově složitých součástí s relativně dobrou rozměrovou přesností.

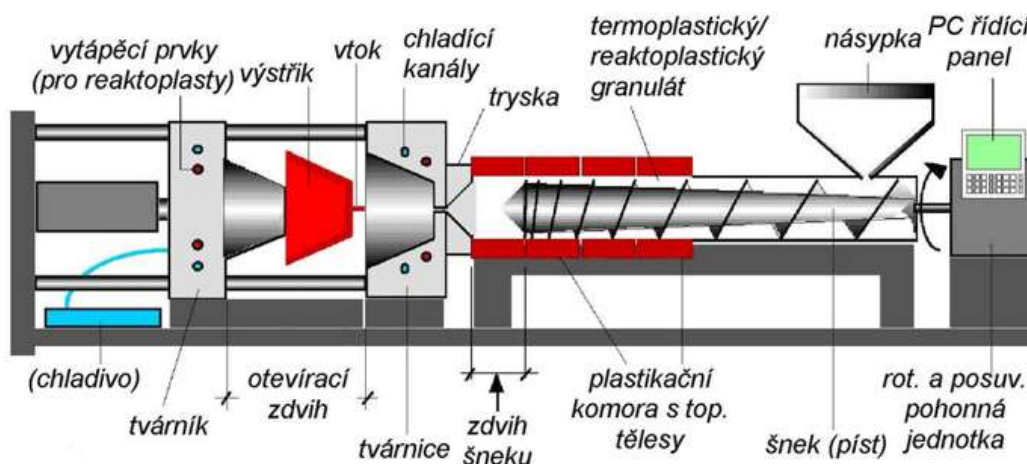
V rámci této diplomové práce budou analyzovány stávající parametry ovlivňující dobu chlazení při enkapsulaci autoskla termoplastickými pryžemi na vstřikovacím stroji ve společnosti AGC Automotive Czech a.s. a navrhnutá řešení pro zlepšení efektivity chlazení, a tím snížení doby cyklu.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 2. Technologie vstřikování plastů

Vstřikování je nejvyužívanější technologií pro zpracování termoplastů, termoplastických elastomerů, polymerních směsí, kompozitů, ale i reaktoplastů, pryží a kaučuků. Podstatou této technologie je cyklické opakování (reprodukovatelnost) procesu tváření materiálu jeho vstřikováním pod tlakem ze zahřátého válce přes vtok (rozdávěcí kanálek, vtokové ústí) do dutiny uzavřené formy. [1] [2]

Granulát plastu se vkládá do násypky, kde je zpravidla nutno plast zbavit vlhkosti (vysušit při teplotě do 150 °C). Poté je granulát nabírán šnekem vstřikovacího stroje do plastifikační jednotky, kde je nahříván na požadovanou vstřikovací teplotu (150 °C - 400 °C). Na nahřívání granulátu se podílí topná tělesa umístěná v plastifikační jednotce, protitlak (plastifikací) a otáčení šneku. Po roztavení granulátu je tavenina vstřikována vysokým tlakem do vstřikovací formy. Formu je následně nutno chladit (temperovat) na provozní teplotu (20 °C – 150 °C). [2]

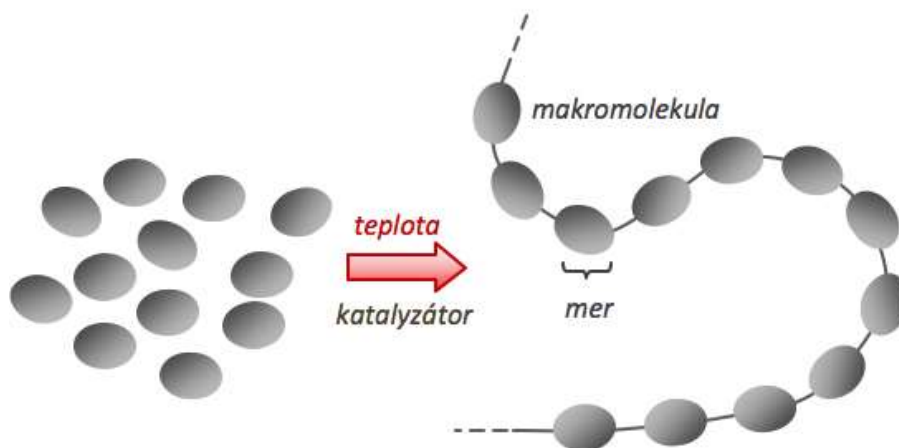


Obr. 1 – Schéma vstřikovacího stroje [3]

### 2.1. Rozdělení plastů vhodných pro vstřikování

Polymery jsou makromolekulární látky, v nichž se jako článek v řetězu mnohokrát opakuje stavební jednotka „[(mono)-mer]<sup>n</sup>“. Délku makromolekuly je možné vyjádřit molární hmotností. Za makromolekulární látku jsou považovány všechny sloučeniny s vyšší molární hmotností než  $10^3 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ , přičemž u polymerů přesahuje molární hmotnost hodnotu  $10^4 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ . [4]

<sup>1</sup>např. polymerace ethyleny (monomer – stavební jednotka) za vzniku polyethyleny (polymer)



Obr. 2 – Schéma makromolekuly [5]

Tab. 1. – Rozdělení polymerních materiálů [6]

Polymery			
Reaktoplasty	Termoplasty	Termoplastické elastomery	Elastomery
Fenolické	Částečně krystalické	S vysokou tvrdostí	NR
Melaminové	Amorfní	S nízkou tvrdostí	SBR
Epoxidové			EPDM
Polyesterové			Další
Další			

### 2.1.1. Reaktoplasty

Reaktoplast při zpracovatelském procesu prochází chemickou reakcí a účinkem tepla, záření nebo síťovacích činidel se původní molekuly sesítují, a tudíž vytvoří sesíťovanou strukturu, kterou není možno znovu roztavit nebo rozpustit. Tato chemická reakce se nazývá vytvrzování. [4]

Produkty vyrobené z reaktoplastů se vyznačují především vysokou chemickou a tepelnou odolností, tvrdostí a tuhostí. [4]

### 2.1.2. Termoplasty

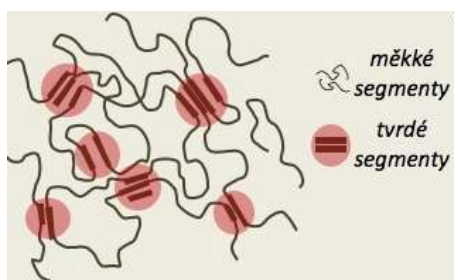
Termoplasty jsou materiály, které nad teplotou tání (popisuje oblast přechodu z tuhého stavu do taveniny) měknou a lze je tvářet. V procesu nedochází k žádné chemické reakci, a tím je možno termoplast po ztuhnutí opět roztavit, a tudíž i tvářet. Teoreticky lze tento proces opakovat nespočetněkrát. Změny, kterými materiál prochází, mají pouze fyzikální charakter. [4]

### 2.1.3. Elastomery

Elastomer je vysoce pružný materiál s nízkou tuhostí, který je možno za běžných podmínek malou silou značně deformovat bez porušení. Vyvolaná deformace je vratná. Typickým představitelem elastomerů jsou přírodní a syntetické kaučuky. Kaučuky jsou amorfní polymery, ze kterých lze vulkanizací (síťování makromolekul vyvolané chemickou reakcí) vyrábět pryže – vysoce pružný materiál, odolný trvalé deformaci. [4]

### 2.1.4. Termoplastické elastomery

Polymerní systém s dvoufázovou strukturou spojující aplikační vlastnosti elastomerů (ohebnost, elasticitu) a zpracovatelské vlastnosti termoplastů (snazší zpracování a recyklovatelnost). Tato struktura se skládá z měkkých a tvrdých segmentů, které jsou vzájemně nemísitelné. Měkké segmenty jsou tvořené elastomerem a tvrdé segmenty, které vytváří uzly sítě, jsou tvořeny amorfním nebo semikrystalickým termoplastem. [7] [8]



Obr. 3 – Struktura TPE [5]

TPE je kaučukový materiál, který je možné zpracovávat technologií vstřikování a vytlačování. Výsledné vlastnosti termoplastických elastomerů leží někde v oblasti mezi pryžemi a termoplasty, protože jejich síť není tak pevná jako chemická síť u pryží. [7] [8]

V současnosti existují různé druhy TPE v široké škále tvrdosti Shore. [7]

Tab. 2. – Příklady druhů termoplastických elastomerů [8]

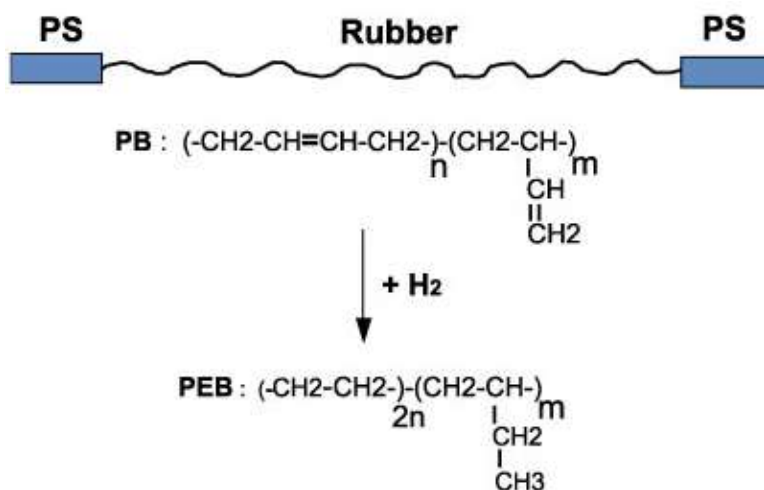
TPE - O	Termoplastické polyolefiny
TPE - V	Vulkanizovaná směs PP/EPDM
TPE - U	Termoplastický polyuretan
<b>TPE - S</b>	Styrenová směs na bázi polyolefinu a SBS, SEBS nebo SEPS
TPE - E	Kopolyesterová směs
TPE - A	Termoplastický polyamid

## Blokové styrenové kopolymery TPE – S

Tento druh polymerů se vyrábí moderní technologií živé aniontové polymerizace. Struktura styrenových blokových kopolymerů je tří-bloková: polystyrenové bloky na obou koncích kaučukovitého středního bloku. Kaučukovým středním blokem je typicky polydien, a to nejčastěji buď polybutadien nebo polyisopren. [9]

Nejběžnějším příkladem tohoto druhu polymeru jsou tedy styren-butadien-styrenové (SBS) kopolymery, a také obdobné styren-isopren-styrenové (SIS) kopolymery. [9]

Pro zlepšení termo-oxidační a UV stability se dien hydrogenuje, čímž vzniknou hydrogenované styrenové blokové kopolymery (HSBC). Struktura hydrogenovaného styrenového blokového kopolymeru je znázorněna na obr. 4. [9]



Obr. 4 – Struktura HSBC [9]

HSBC vykazuje pryžovou elasticitu, neboť tvrdý blok působí jako sesíťovací bod pod teplotou skelného přechodu polystyrenu a měkký blok poskytuje pružnost. Hlavními aplikacemi HSBC jsou termoplastické sloučeniny, lepidla a modifikace polymerů. Sloučeniny se používají pro automobilové a spotřební výrobky nebo jako náhrada materiálu za vulkanizovaný kaučuk nebo PVC. [10]

## 2.2. Příprava plastů před vstřikováním

Před samotným procesem vstřikování plastů se používají technologické postupy a procesy, které připraví nebo upraví plast dle požadovaných konečných vlastností. Lze tam zařadit technologie dopravy plastů, přidávání různých aditiv, recyklace plastů, sušení plastů apod. [1]

### 2.2.1. Technologie granulace

Plasty se pro technologii vstřikování používají ve tvaru granulí, které mohou mít tvar krychle, čoček, válečků atd. Tyto granule mohou být vyrobeny různými technologiemi granulace: granulace z pásů a granulace ze strun (za studena a za tepla). Výběr správné technologie granulace závisí na vlastnostech zpracovávané taveniny (tekutosti, tvrdosti), na prostoru, na požadovaném výkonu a na nákladech celého procesu. [1]

### 2.2.2. Doprava materiálu

Doprava materiálu slouží k dodání suroviny až ke vstřikovacímu lisu. Materiál přichází z chemických závodů již připravený pro zpracování. Dodává se buď v pytlích o váze maximálně 25 kg, nebo ve velkých pytlích (tzv „big bags“) vážících do 500 kilogramů, oktábínech nebo v cisternách. Následné skladování a manipulace by neměla mít vliv na kvalitu a na užité vlastnosti plastu. [1]

Volba dopravního zařízení ve výrobním závodě závisí na množství dopravovaného granulátu, vertikální a horizontální vzdálenosti dopravy, dalších požadavcích na úpravu granulátu (barvení, sušení, přidávání aditiv). [1]



*Obr. 5 – Ukázka centrálního rozvodu polymeru ke vstřikovacím strojům [1]*

### 2.2.3. Sušení

Některé plasty jsou schopny přijímat nebo uvolňovat z, resp. do okolního prostředí nízkomolekulární látky. To se v největší míře týká vlhkosti. [1]



Voda v granulátu může při vstřikování termoplastů tvořit velmi závažné problémy. U výstřiku by obsah vody mohl způsobit zhoršení mechanických vlastností, vznik povrchových vad (nerovnoměrný lesk, stříbření), popř. rozměrovou a tvarovou nepřesnost. Při větším obsahu vody v granulátu by se mohlo stát, že se tekutost taveniny natolik zvýší, že dojde k přetokům do dělicí roviny vstřikovací formy. Proto se před procesem vstřikování granulát suší. [1] [6]

Maximální dovolený obsah vody v granulátu před jeho zpracováním vstřikováním obvykle doporučuje výrobce granulátu – materiálové listy, různé databáze, zkušenosti atd. [6]

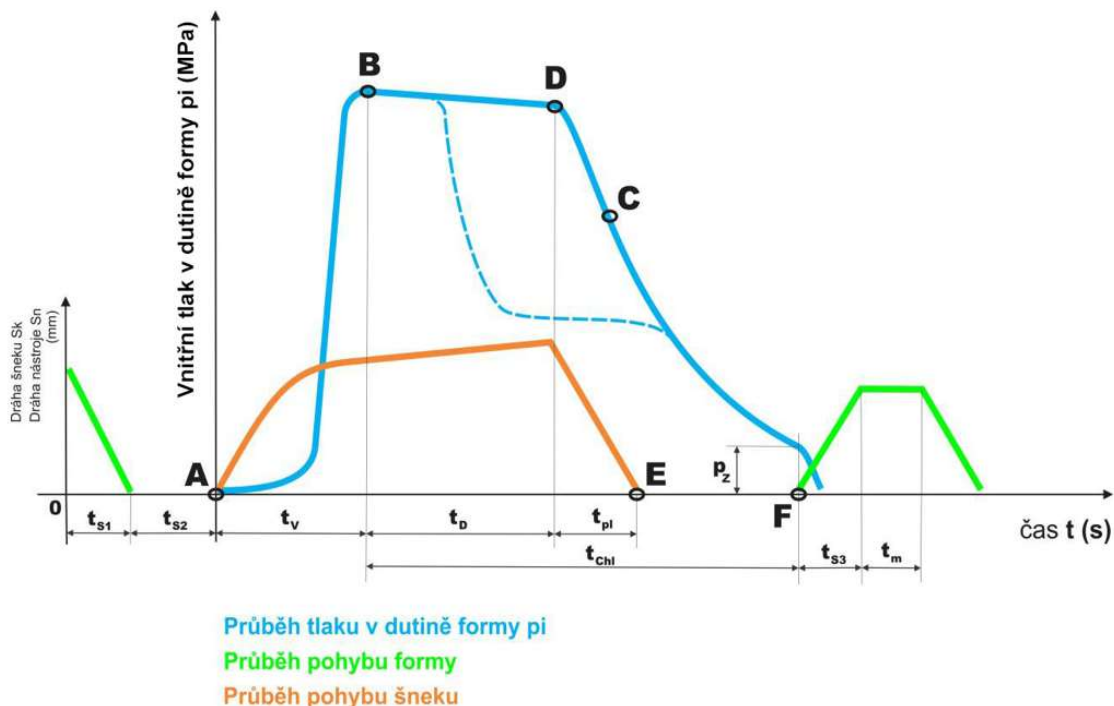
Sušení granulátu může probíhat buď v sušičkách nebo v plastifikačních jednotkách vstřikovacích strojů, které jsou vybaveny odplyněním. Parametry procesu sušení se v těchto dvou způsobech poměrně liší. Sušení granulátu v sušičkách probíhá v rozmezí teplot od 70 °C do 120 °C při současném nízkém parciálním tlaku vodních par. Proces sušení v plastifikačních jednotkách se uskutečňuje v rozmezí teplot od 190 °C do 350 °C při vysokém parciálním tlaku vodních par. [1]

### **2.3. Vstřikovací cyklus**

Vstřikovací cyklus tvoří sled přesně specifikovaných fází, které jsou potřebné pro výrobu vstřikovaných dílů. Během tohoto cyklu prochází vstřikovaný plast teplotním a tlakovým cyklem. Vstřikovací proces se tedy popisuje několika závislostmi, pro které je výhodné jako počátek zvolit okamžik odpovídající impulsu k uzavření vstřikovací formy. [1]

Pro popis vstřikovacího cyklu je vhodné vydefinovat časový průběh vstřikovacího tlaku (obr. 6) a p-V-T diagramů (obr. 8 - 10). [1]

Při popisování grafu (viz obr. 6) se začne v počátku vstřikovacího cyklu, kde se forma nachází v otevřené poloze a její dutina je prázdná. V tom okamžiku (tzn. v počátku) dostane stroj příkaz k zahájení vstřikovacího cyklu. V časovém úseku  $t_{s1}$  se forma uzavře (pohyblivá a pevná část se spojí) a zabezpečí. Úsekem  $t_{s2}$  je popsán pohyb vstřikovací jednotky k formě. Časové úseky  $t_{s1}$  a  $t_{s2}$  jsou označovány jako strojní časy. [1]



**Obr. 6** – Průběh vnitřního tlaku  $p_i$  v dutině formy během procesu vstřikování [1]

V době popsané v grafu (viz obr. 6) bodem A se dává do pohybu šnek v plastifikační komoře a začíná plnění do dutiny vstřikovací formy. Tato fáze je v bodě B ukončena. Úsek od bodu A do bodu B je na ose popisující čas definován jako čas plnění  $t_v$ . Ve fázi plnění dosáhne tlak z celého cyklu vstřikování nejvyšší hodnoty. V okamžiku kdy tavenina vteče do dutiny vstřikovací formy, začíná další fáze vstřikovacího cyklu a tou je fáze chlazení. Tavenina plastu začíná v dutině formy ihned chladnout, a to vlivem různých teplot taveniny a dutiny formy. Fáze chlazení probíhá až do fáze otevření formy a vyhození výstřiku z formy. Tento časový úsek je nazýván jako doba chlazení  $t_{chl}$ . V praxi je běžné tuto dobu rozdělit na dobu chlazení při plném vstřikovacím tlaku a při klesajícím tlaku. Po vyhození z formy tento děj pokračuje již bez tlaku až do vyrovnání teploty výstřiku s teplotou okolí. [1]

Během chlazení se projevuje negativní vlastnost plastů a to smrštění, které je nutno kompenzovat z důvodů možného vzniku propadlin nebo staženin. Kompensace tohoto úbytku materiálu v dutině formy je realizována fází dotlaku. V této fázi se do dutiny formy dotlačí potřebný objem materiálu, aby se zabránilo zmíněným staženinám a propadlinám. Poměr dotlaku ku vstřikovacímu tlaku je doporučen v datovém listu zvoleného materiálu. Dotlak může mít stejnou velikost jako maximální tlak cyklu (viz modrá plná čára na obr. 6) nebo se může po několika

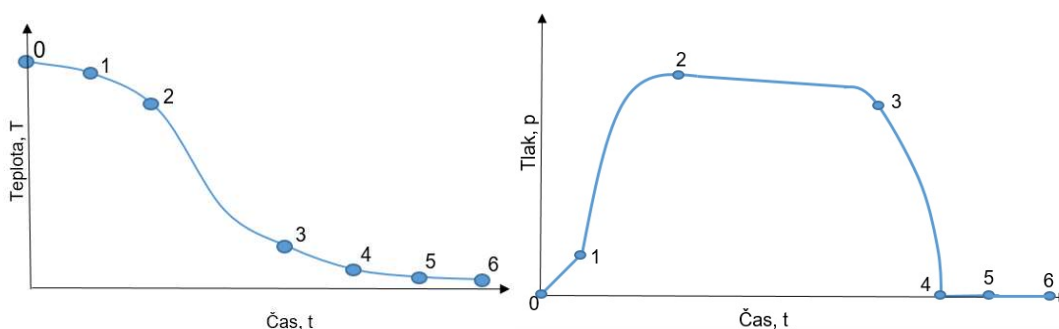
sekundách snížit (viz přerušovaná modrá čára na obr. 6). Doba dotlaku končí v bodě D. [1]

Po fázi dotlaku začíná plastifikace nové dávky plastu, který je v grafu (viz obr. 6) popsán časovým úsekem  $t_{pl}$  končícím v bodě E. V této fázi je plast taven topnými tělesy, frikčním teplem a přeměnou hnětací práce šneku v teplo. Frikčním teplem je myšleno teplo, které vzniká třením plastu o stěny komory a o povrch šneku ve fázi zpětného, otáčivého pohybu šneku, kde je tavený granulát dopravován před čelo šneku. [1]

Podle konstrukce vstřikolisu může následovat odsunutí tavící komory od formy (strojní čas). Během pokračující fáze chlazení tlak ve vstřikovací formě neustále klesá až na hodnotu zbytkového tlaku  $p_z$ , což je tlak, pod nímž se výstřík nachází ve formě těsně před jejím otevřením. Zbytkový tlak přímo ovlivňuje pnutí ve výstřících. Vysoký zbytkový tlak způsobuje vysoké zbytkové pnutí, které může způsobovat deformace výstříku. V časovém úseku  $t_{s3}$  s počátkem v bodě F se vstřikovací forma nejprve otevře a následně je výstřík vyhozen z formy. V případě použití manipulátoru při vyhazování z formy je k tomuto času přičten čas  $t_m$ . [1]

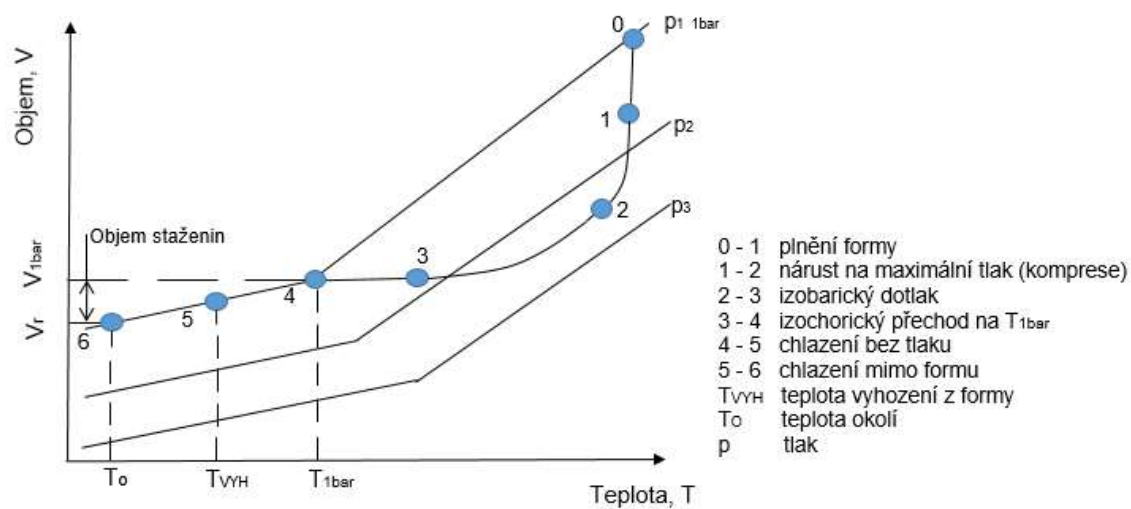
Vstřikovací cyklus, jak již bylo zmíněno, lze popsat pomocí termodynamických veličin, tj. tlaku  $p$ , měrného objemu  $v$  (převrácené hodnoty hustoty) a teplotou hmoty  $T$ . Řízení vstřikovacího cyklu pomocí diagramu  $p$ - $v$ - $T$  je využíváno v moderních metodách zpracování plastů na automatických strojích. [1]

Průběh stavových veličin není ve všech místech výstříku konstantní, ale je závislý na druhu vstřikovaného plastu, tvaru výrobku, tloušťce stěn, vstřikovacím tlaku a dotlaku, vstřikovací rychlosti a teplotě formy. Průběh stavových veličin přímo určuje strukturu a podílí se na změně hmotnosti a rozměrů výstříku. [1]

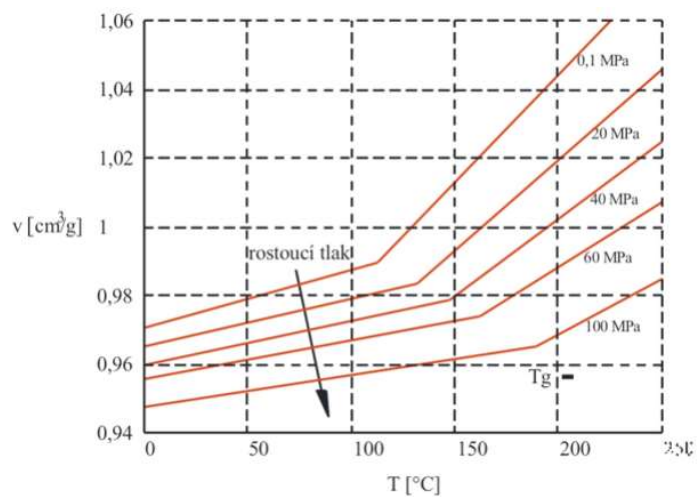


Obr. 7 – Diagram  $T(t)$  a  $p(t)$  vstřikovacího procesu [11]

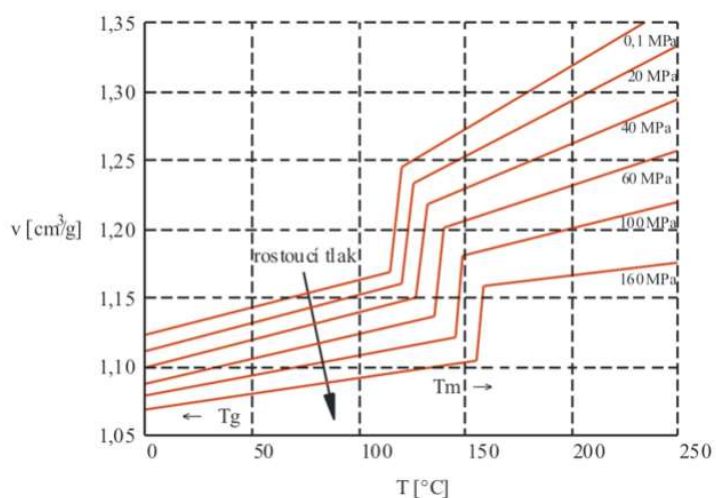




Obr. 8 – Schéma diagramu p-V-T vstřikovacího procesu [11]



Obr. 9 – Diagram p-V-T pro amorfní termoplast [1]

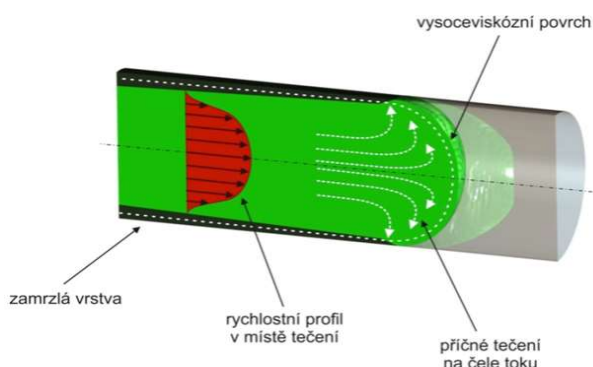


Obr. 10 – Diagram p-V-T pro semikrystalický termoplast [1]

### 2.3.1. Fáze plnění vnitřních dutin formy

Plnění tvarové dutiny vstřikovací formy se řadí k jedné z nejdůležitějších fází celého procesu, protože rozhoduje o zaplnění formy a o vlastnostech výrobku. Tato fáze se pohybuje v řádu zlomků sekund a u složitějších dílů může dosahovat několika málo sekund. Důležité při vstřikování taveniny do vnitřní dutiny formy je zajistit laminární tok. [1] [3] [6]

Doba plnění je požadována v co nejkratších časech, protože vstřikovaná tavenina se stykem s chlazenou formou ochlazuje a ztrácí tekutost, což by nepříznivě ovlivnilo úplné zaplnění formy. Teplota formy [°C] je přibližně 3 až 4 krát nižší než teplota taveniny [°C] z důvodu, že po kontaktu taveniny se stěnou vzniká vrstva ztuhlé taveniny. Vzniklá vrstva je nepohyblivá a plní funkci tepelné izolace. Mezi těmito tepelnými izolacemi je plastické jádro s nízkou viskozitou, což umožňuje další plnění formy. Zvyšující se viskozita směrem ke stěně formy zapříčiňuje rostoucí rychlost v plastickém jádru a způsobuje zakřivení čela. Tlak poté klesá směrem ke stěně formy. Tento děj se nazývá fontánový tok. [1] [3] [6]



**Obr. 11** – Schéma fontánového toku [1]

Technologické parametry ovlivňující fázi plnění formy [6]:

- rychlost vstřikování (doba plnění)
- vstřikovací tlak
- teplota formy
- teplota taveniny
- viskozita taveniny v dávce
- fáze přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak

Doba plnění vnitřní dutiny formy je především závislá na rychlosti vstřikování, tj. od rychlosti pohybu šneku vpřed, která závisí na technologických podmínkách,

zejména na teplotě taveniny a na vstřikovacím tlaku. Další ovlivňující faktory jsou teplota formy, objem výstřiku a jeho geometrický tvar, řešení vtokové soustavy, odvzdušnění a druh vstřikovaného plastu. [3]

### **2.3.2. Fáze dotlaku**

Tato fáze vstřikovacího cyklu je velmi důležitá pro dosažení kvalitních mechanických a rozměrových vlastností výstřiku. Dotlak kompenzuje úbytky objemu (smrštění) během chladnutí plastu ve formě. [1]

Ve fázi vstřikovacího cyklu po naplnění kavity formy následuje stlačování hmoty, kdy tlak prudce stoupne na maximální hodnotu a rychlost náhle klesne. Pokud by tento tlak působil dál, došlo by k vytvoření tlakové špičky, což doprovází zvětšení hmotnosti a rozměrů výstřiku a dochází k dalším nežádoucím jevům. Pro zabránění dosažení tohoto stavu je nutné snížit vstřikovací tlak (dotlak). Správné nastavení přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak je velice důležité. [1] [3]

### **2.3.3. Fáze chlazení**

V terminologii procesu vstřikování plastů rozlišujeme pojmy ochlazování a chlazení. Ochlazování zahrnuje dobu od objemového naplnění vnitřní dutiny formy až po vyhození výstřiku. Zahrnuje tudíž dobu dotlaku a dobu chlazení. Chlazení je doba od skončení dotlaku po dobu vyhození výstřiku z formy. [6]

Technologické parametry ovlivňující fázi ochlazování [6]:

- typ zpracovávaného materiálu,
- konstrukce výstřiku – řídicí tloušťka stěny,
- procesní teploty.

Technologické parametry ovlivňující fázi chlazení [22]:

- doba chlazení,
- teplota formy,
- teplota výstřiku při vyhazování z formy.

#### **Doba chlazení**

Plasty jsou jak známo špatnými vodiči tepla, z tohoto důvodu doba chlazení u tenkostěnných výstřiků dosahuje několika sekund a u tlustostěnných výstřiků i několika minut. Doba chlazení může tedy trvat od 70 % až do 80 % času celého procesu vstřikování plastů. Správnou volbou teploty formy, temperačního média,

konstrukce a dimenzování kanálů se ušetří cenné vteřiny, které se ve finále promítají do celkové produkce, a tím i do ekonomiky podniku. Dále se dosáhne požadované kvality vstřikovaných dílů, tj. rozměrově přesných součástí, kvalitního povrchu, minimální deformace, požadovaných fyzikálních a mechanických vlastností. [3]

### **Teplota formy**

Pojem teplota stěny formy definuje teplotu na povrchu vnitřní dutiny formy těsně před jejím naplněním taveninou. Po fázi vstřiku do vnitřní dutiny formy následkem vyšší teploty taveniny tato teplota roste. V průběhu času následkem mechanismů odvodu tepla je opět snižována na původní hodnotu. Tento proces je průvodní s každým vstřikovacím cyklem. [12]

Minimální teplota formy je určována výrobcem granulátu. Pod touto hodnotou by neměl být prováděn vstřikovací cyklus z důvodu dosažení požadované jakosti.

Zvyšování teploty stěny formy [12]:

- zvyšuje výrobní smrštění,
- snižuje dodatečné smrštění,
- lepší zatečení taveniny vtokovém kanálu,
- u amorfního materiálu snižuje obsah vnitřního pnutí,
- u semikrystalických materiálů zvyšuje krystalinitu a dosažení rovnoměrnější vnitřní struktury,
- zmenšuje dokrystalizaci a dosmrštění,
- zvyšuje odolnost proti tepelné deformaci,
- zvyšuje tuhost, povrchovou tvrdost a odolnost proti otěru,
- zlepšuje kluzné vlastnosti,
- zlepšuje rozměrovou stabilitu,
- snižuje obsah vnitřního pnutí,
- snižuje orientační jevy,
- snižuje odpor proti toku taveniny,
- zvyšuje kopírovatelnost povrchů tvarové dutiny,
- prodlužuje dobu ochlazování (prodloužení cca 2 % na 1 °C),
- lepší reprodukovatelnost kvalitního povrchu

### **Teplota výstřiku při vyhazování z formy**

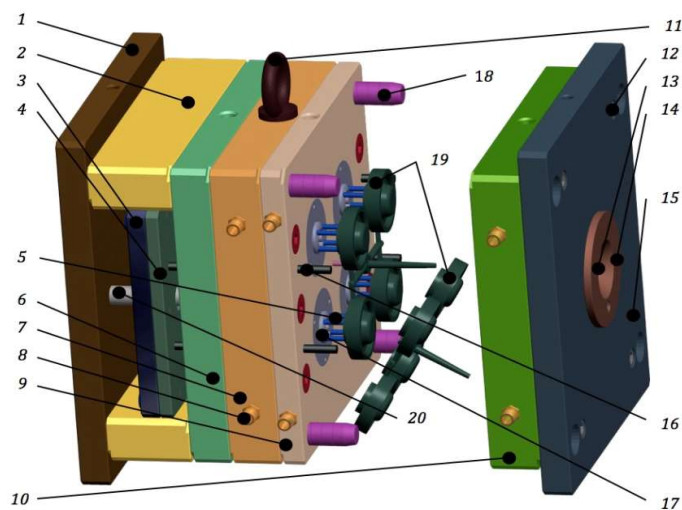
Teplota výstřiku při fázi vyhození z formy musí být taková, aby nedošlo k deformaci výrobku. Doporučená teplota vyhození je stanovena výrobcem plastu, který garantuje, že při této hodnotě bude součást dostatečně tuhá, aby odolala jakékoliv tendenci k deformaci, způsobené změnami smršťování a zbytkovým namáháním a dostatečně tuhá, aby odolala místním silám od vyhazovače. [13]

## 3. Vstřikovací forma

### 3.1. Princip vstřikovací formy

Vstřikovací forma má tři základní funkce: *doprava taveniny; přenos tepla; odformování dílu*. Pod těmito hlavními funkcemi se nacházejí jejich funkční podskupiny, které jsou velice důležité při navrhování formy. Například funkce dopravy taveniny polymeru vyžaduje, aby forma odolávala značně vysokým silám, které mohou vést k otevření formy či jejímu defektu. [4]

Při konstrukci většiny forem jsou z rozsáhlého seznamu všech možných funkcí vstřikovací formy vybrány jen základní hlavní a vedlejší funkce, které jsou zohledněny. Dále se může stát, že některé požadavky na formu jsou ve vzájemném rozporu. Například lepšího odvodu tepla z dutiny vstřikovací formy může být docíleno použitím většího počtu chladících kanálů, které kopírují dutinu formy. Ovšem na druhou stranu odformování dílů může vyžadovat přítomnost většího množství vyhazovacích prvků v místech, kde by z hlediska odvodu tepla bylo výhodné umístit kanály chladícího systému. [14]



**Obr. 12 – Schéma otevřené dvoudeskové formy [1]**

1 – upínací deska pohyblivé části formy  
2 – rozpěra  
3 – hlavní vyhazovací deska  
4 – přidržovací vyhazovací deska  
5 – vyhazovač  
6 – podpěrná deska

7 – „B“ deska  
8 – přípojka chlazení  
9 – „C“ deska  
10 – „A“ deska  
11 – manipulační oko  
12 – hlavní montážní šrouby  
13 – vtoková vložka

14 – středící kroužek pevné části vstřikovací formy  
15 – upínací deska pevné části formy  
16 – vracecí kolíky  
17 – pevné jádro  
18 – vodící sloupky  
19 – vstřikovaný díl  
20 – podpěrné válce

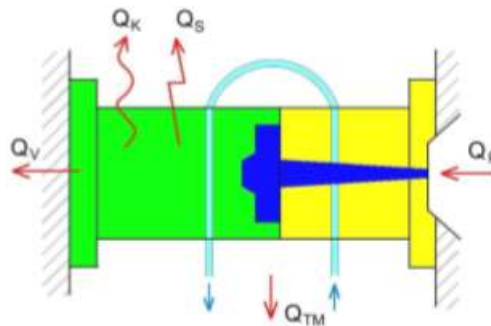


### 3.2. Tepelná bilance vstřikovací formy

Pro dosažení kvalitního výrobku a snížení ceny na minimum (zkrácení doby chlazení), je nutná znalost související s přenosem tepla uvnitř formy. Vstřikovací formu lze chápat jako termodynamický systém (výměník tepla), ve kterém forma shromažďuje teplo z tuhnoucí taveniny a toto teplo dále přestupuje do temperačního média chladicího systému, rámu stroje a do okolního prostředí. K přestupu tepla dochází vedením, prouděním a saláním. Pro správnou funkci formy je důležité dosažení rovnovážného ustáleného stavu pracovního cyklu, které je vyjádřeno tepelnou bilancí. Tepelná bilance na obr. 13 znázorňuje tepelné toky do formy vstupující a z formy vystupující [15]:

$$Q_P = Q_{TM} + Q_Z, \quad (1)$$

kde  $Q_P$  je teplo přivedené,  $Q_{TM}$  je teplo odvedené temperačním systémem a  $Q_Z$  je teplo odvedené ztráty do okolí.



Obr. 13 – Tepelná bilance [16]

Teplo odvedené ztráty ( $Q_Z$ ) do okolí se skládá z tepelné ztráty vedením ( $Q_V$ ), tepelné ztráty prouděním ( $Q_K$ ) a tepelné ztráty saláním ( $Q_S$ ) [15]:

$$Q_Z = Q_V + Q_K + Q_S. \quad (2)$$

Pro sestavení těchto tepelných toků se vychází z několika předpokladů a zjednodušení [15]:

- Forma tvoří uzavřený systém
- Tepelné toky ve formě i teploty jednotlivých částí formy jsou časově konstantní
- Uvažuje se sdílení tepla ve směru normály k teplosměnnému povrchu
- Zanedbává se kolísání teploty povrchu dutiny formy během vstřikovacího procesu
- Za teplotu povrchu dutiny formy se uvažuje střední hodnota jejího teplotního maxima a minima během vstřikovacího cyklu

- Za teplotu temperačního média se považuje střední teplota vstupní a výstupní teploty
- Hodnoty reologických a tepelných charakteristik se berou jako střední v daném intervalu
- Tepelný tok přiváděný do formy se uvažuje jako kladný, tepelný tok odváděný z formy jako záporný

### 3.2.1. Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita  $c$  je definována jako množství tepla  $dQ$ , které je zapotřebí k ohřevu látky jednotkové hmotnosti o teplotu  $dT$  přepsané do vztahu [17]:

$$c = dQ \cdot (m \cdot dT)^{-1}, \quad (3)$$

kde  $c$  je měrná tepelná kapacita [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ],  $dQ$  je množství předaného tepla [ $J$ ],  $m$  je hmotnost látky [ $kg$ ] a  $dT$  je změna po předání tepla.

Numericky vyjadřuje měrná tepelná kapacita množství tepla potřebného k ohřátí jednotkového množství látky (1kg) o jednotku teploty (1K). [5] [17]

**Tab. 3 – Součinitel měrné tepelné kapacity vybraných materiálů [18] [19]**

Materiál	Měrná tepelná kapacita [ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
temperované autosklo	0,80
uhlíková ocel	0,46
hliník	0,92
měď	0,39

### 3.2.2. Tepelná vodivost

Tepelná vodivost je schopnost látky vést teplo a představuje rychlost, s jakou se teplo šíří z teplejší části látky do jiných, chladnějších částí. Polymery mají tuto schopnost přibližně o 2-3 řády nižší než kovy. Skutečnost špatné tepelné vodivosti polymerů je spojená s dlouhou dobou ochlazování, a tím ovlivnění celé doby vstřikovacího cyklu. [5]

Tepelná vodivost je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti ( $\lambda$ ), který je definován jako množství tepla ( $Q$ ), které projde za jednotku času ( $t$ ) plochou materiálu ( $S$ ) o tloušťce ( $h$ ), při jednotkovém rozdílu teplot mezi plochami ( $\Delta T$ ) [5]:

$$\lambda = Q \cdot t \cdot (S \cdot \frac{\Delta T}{h})^{-1} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (4)$$

**Tab. 4 – Součinitel tepelné vodivosti vybraných materiálů [18] [20]**

Materiál	Součinitel tepelné vodivosti [ W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
temperované autosklo	0,8
uhlíková ocel	50
legovaná ocel	15 až 52 podle obsahu legujících prvků
hliník	222
měď	380

### **3.2.3. Součinitel přestupu tepla**

Součinitel přestupu tepla vyjadřuje schopnost jednoho metru čtverečního rozhraní pevné látky, kapaliny nebo plynu přenášet teplo za jednotku času při teplotním rozdílu 1 K. Definován je podílem hustoty tepelného toku pronikajícího rozhraním a teplotního rozdílu mezi povrchem pevné látky a okolní tekutinou. [21]

Součinitel přestupu tepla nezávisí jen na daném materiálu, ale i na všech parametrech, které souvisí s prouděním. Závisí například na rychlosti a typu proudění, na materiálových vlastnostech kapaliny, tj. hustotě, tepelné vodivosti, kinematické viskozitě, teplotním součiniteli objemové roztažnosti, měrné tepelné kapacitě apod. Hodnota se určuje experimentálně, nebo pro kontrétní případy proudění jsou stanoveny empirické vztahy. [21]

## **3.3. Temperace forem**

Pojem temperace forem zahrnuje proces ochlazování nebo ohřevu tvářecích částí forem pomocí temperačního média na požadovanou teplotu, aby bylo dosaženo konstantního teplotního pole ve formě. U amorfních plastů by se měla požadovaná teplota povrchu tvarových dutin pohybovat v rozmezí  $\pm 5$  °C a u semykristalických plastů v rozmezí  $\pm 10$  °C. Největší prioritou chlazení forem je docílení homogenního a symetrického odvádění tepla. [22] [23]

Chlazením tvářecích částí dochází v tvarové dutině formy k tuhnutí polymerní taveniny a chlazení výstřiku. Teplo dodané do taveniny během fáze plastifikace a zvýšené o třecí teplo při průchodu taveniny rozváděcím systémem formy, je odváděno stěnou vnitřní dutiny formy přes temperační systém a tepelnými ztrátami do okolí, přičemž se uplatní všechny složky odvodu tepla – prouděním, vedením a sáláním. [22]

Temperaci formy lze realizovat pasivně nebo aktivně. Principem aktivní temperace je přímé odvádění nebo dodávání tepla do formy pomocí média

nesoucího teplo, které proudí vyrobenými kanály ve formě. Mezi používaná teplotonosná média patří: voda, vzduch, oleje, glykoly, vodní pára. [24]

Pasivní temperace dosahujeme využitím kombinace vodivých a izolačních materiálů. Temperování teplotně vodivými materiály je vhodné použít pro jinak špatně dostupná místa (např. tenké tvárníky), které mají malou plochu pro odvádění tepla a musí být vyrobeny z dobře teplotně vodivých materiálů. Izolační materiál je využíván především v případech, kdy je nutné předejít formu na požadovanou teplotu. [24]

Přehled úkolů temperačního systému [22]:

- ohřev/chlazení formy na požadovanou teplotu a její udržení v požadovaném tolerančním rozpětí,
- zajištění maximální možné tepelné homogenity, což znamená rovnoměrné rozložení teploty po celém tvářecím povrchu formy, včetně její reprodukovatelnosti,
- odvedení tepla z dutiny formy za požadovaný čas a současně za docílení požadované kvality výstřiku.

Teplota formy, resp. způsob a podmínky temperace vstřikovací formy jsou ve výrobním procesu vstřikování plastů velmi zásadní fází, neboť mají [3]:

- přímý vliv na kvalitu vyráběných dílů,
- přímý vliv na produktivitu výroby,
- přímý vliv na jednotkové náklady vstřikovaného dílu,
- schopnost reprodukovat požadovaný povrch,
- přímý vliv na pracovní a dodatečné smrštění.

Přestože jsou mnohdy požadovány vysoké rychlosti odvodu tepla, může příliš agresivní návrh chladičského systému způsobit problémy s kvalitou výstřiku. [3]

### **3.3.1. Materiál formy**

Přenos tepla je z části závislý na tepelné vodivosti materiálů použitých k výrobě jednotlivých částí formy. Některé materiály (např. měď, či její slitiny) mají mnohonásobně vyšší tepelnou vodivost než oceli (viz tab. 4). Investice do těchto materiálů nemusí být vždy smyslupná, a to z důvodu nízké tepelné vodivosti plastu a omezenou schopností temperačního média pojmout určité množství tepla. Proto

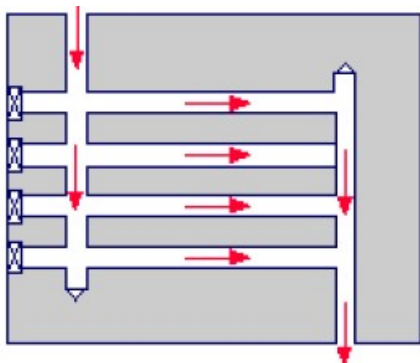
nelze očekávat, že změna materiálů, a tedy tepelné vodivosti formy bude vždy přímo úměrná změně rychlosti odvodu tepla z dutiny formy. [14] [22]

### 3.3.2. Temperační okruhy

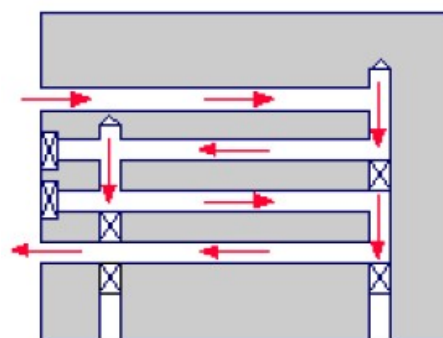
Z ekonomického hlediska a jednoduchosti výroby formy je pro konstruktéry vhodné volit pouze jeden temperační okruh, ale není vhodný pro dosažení správné jakosti výstřiku. [19]

Při zvolení více než jednoho temperačního okruhu je další otázkou, zda použít sériové, či paralelní propojení jednotlivých okruhů. U sériového propojení vstupuje chladící médium do jednoho okruhu, z něhož médium pokračuje do dalšího až k výstupu z formy. Tím dochází k velkému oteplení chladícího média, a tedy nutnosti použít výkonější chladící zařízení k prodloužení doby cyklu a k odlišné jakosti v různých místech výstřiku. [19]

Při použití paralelního propojení se předejde těmto problémům. Chladící médium vstupuje do jednotlivých okruhů ve stejný okamžik a se stejnou teplotou, respektive je možno, v případě potřeby okruhy napájet médiem o různé teplotě. [19]



Obr. 14 – Paralelní chladící systém [29]



Obr. 15 – Sériový chladící systém [29]

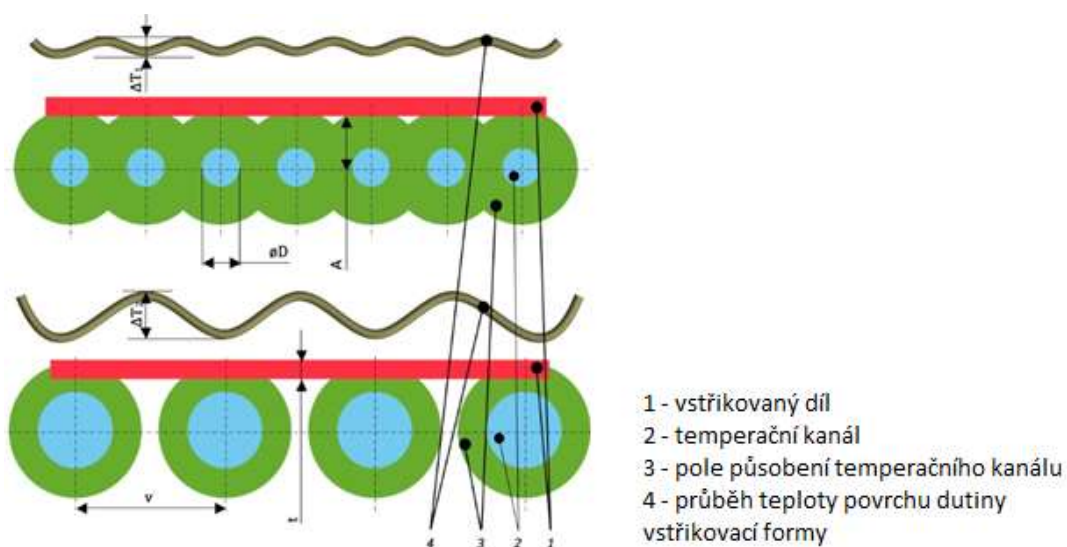
### 3.3.3. Vrtané temperační kanály

Rychlejšího odvodu tepla se může docílit také bližším umístěním temperačních kanálů k dutině vstřikovací formy. Bližším umístěním se dráha přenosu tepla mezi povrchem a chladící částí stává přímější. V důsledku toho může docházet k velkým teplotním rozdílům na povrchu dutiny, pokud nejsou chladící kanály dostatečně blízko u sebe. [15]

Při návrhu počtu a umístění kanálů se však musí dbát na celkovou koncepci vstřikovací formy, především z hlediska tuhosti a pevnosti, ale také z pohledu umístění vyhazovačů, vtoků, šroubů a dalších komponentů formy. V odborné

literatuře je zmíněno, že je lepší použít větší počet kanálů s menším průměrem, než menšího počtu kanálů s větším průměrem z důvodu rovnoměrnějšího chlazení temperačním médiem (viz obr.16). [15]

Temperační kanály jsou nejčastěji vyráběny vrtáním, ale jejich tvar nemusí být vždy kruhový. Frézováním lze vyrobit drážky, které je nutné po celé jejich délce těsnit. Dalším možným způsobem výroby temperačních kanálů je do předem připravených otvorů v deskách vložit trubky z tepelně dobře vodivých materiálů. [15]



**Obr. 16 – Závislost průměru, počtu kanálů na rovnoměrnosti chlazení [15]**

V tab. 5 jsou uvedeny doporučené hodnoty průměrů a parametry umístění temperačních kanálů v závislosti na tloušťce stěny vstřikovaného dílu.

**Tab. 5. - Doporučené rozměry a rozložení temperačních kanálů [14]**

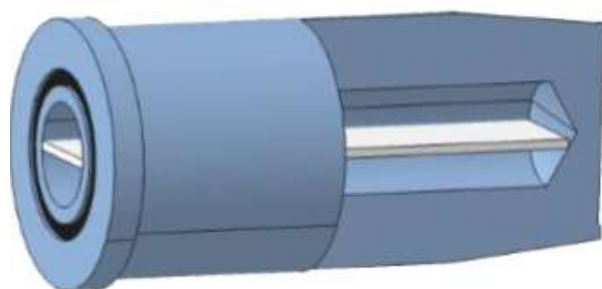
Tloušťka stěny vstřikovaného dílu $t$ [mm]	Vzdálenost osy temperačního kanálu od dutiny vstřikovací formy $A$ [mm]	Vzdálenost os susedních temperačních kanálů $v$ [mm]	Průměr temperačního kanálu $\varnothing d$ [mm]
0 – 1	10 – 14	10 – 12	5 – 6
1 – 2	10 – 20	12 – 16	6 – 8
2 - 4	20 – 25	16 – 22	8 – 10
4 – 6	25 – 35	22 – 28	10 – 12
6 - 8	32 – 42	28 – 36	12 – 16
8 - 12	42 - 52	36 - 50	16 - 20

### 3.3.4. Přepážkové systémy

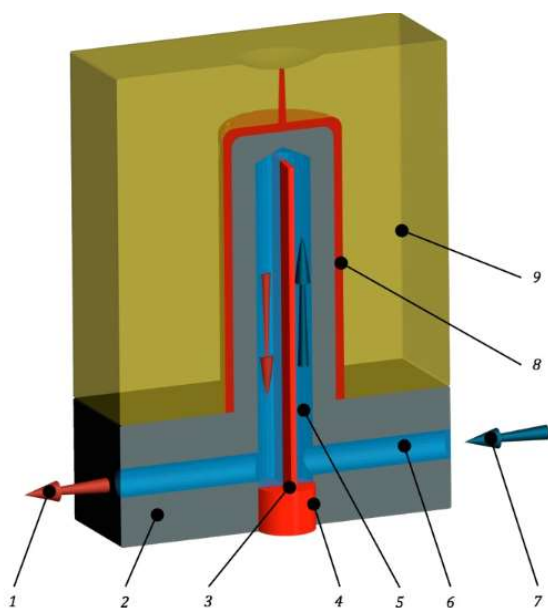
Přepážkové systémy svou konstrukcí umožňují dopravovat temperační médium do míst, která by klasickými temperačními kanály zůstala nepokryta. Především z důvodu složitého tvaru dutiny formy, a tím velmi obtížné vyrobiteľnosti adekvátního tvaru temperačního kanálu. [15] [30]

#### 3.3.4.1. Systém plochých přepážek

Principem tohoto systému je vytvoření hlavního temperačního kanálu a na něj kolmo orientovaného vedlejšího kanálu. Vedlejší kanál je přepážkou rozdělen a zároveň přepažuje hlavní kanál. Temperační médium vstupuje do hlavního temperačního kanálu, kterým následně proudí. Proud temperačního média se přepážkou přepažující hlavní kanál usměrní do vedlejšího kanálu a na konci přepážky změni směr a proudí zpět do hlavního kanálu. [15] [30]



Obr. 17 – Systém plochých přepážek [30]

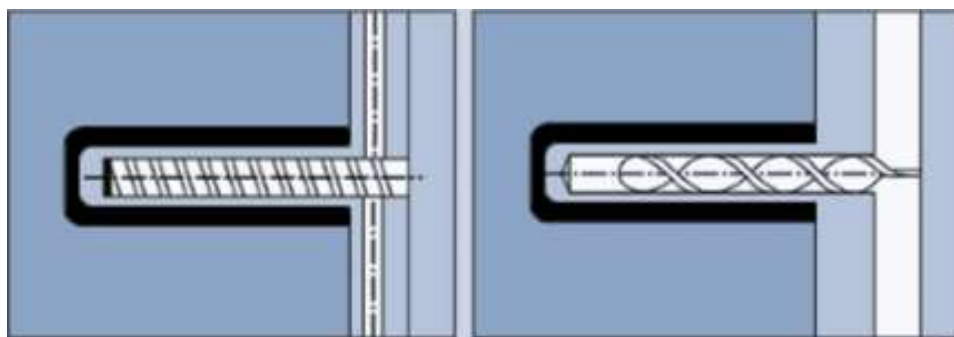


- 1 – výstup temperačního média
- 2 – pohyblivá část vstřikovací formy
- 3 – plochá přepážka
- 4 – úložná plocha ploché přepážky
- 5 – vedlejší temperační kanál
- 6 – hlavní temperační kanál
- 7 – vstup temperačního média
- 8 - vstřikovaný díl
- 9 – pevná část vstřikovací formy

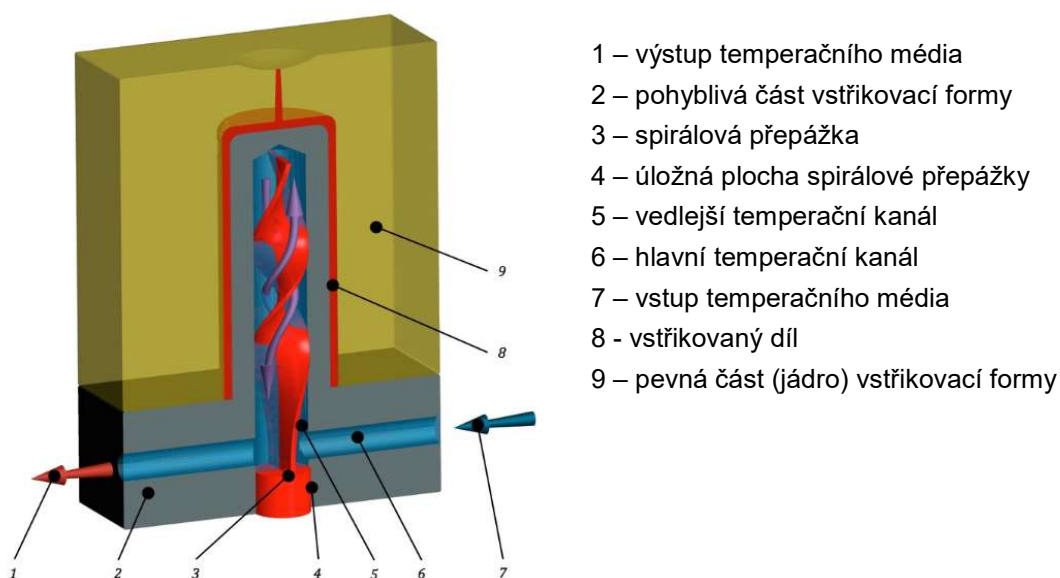
Obr. 18 – Proudění temperačního média v systému plochých přepážek [15]

### 3.3.4.2. Systém spirálových přepážek

Tento systém funguje na stejném principu jako systém plochých přepážek, kromě samotného tvaru, který je v tomto systému odlišný – spirálový. Spirála rozděluje vedlejší kanál na dva závity o velkém stoupání, kde jedním závitem je temperační médium dopraveno až na vrchol kanálu a druhým závitem je z vrcholu odváděno zpět do hlavního kanálu. Systém umožňuje lepší dopravu temperačního média do vrcholu vrtaného kanálu v jádře a zpět, oproti systému s plochými přepážkami. Největší výhodou, kterou tímto systémem dosáhneme, je vytvoření vysoce homogenního teplotního pole okolo dutiny jádra. Konstrukčně se nejčastěji tento systém vyrábí buď s jednou spirálou nebo s dvěma spirálami. [15] [30]



Obr. 19 – Systém spirálových přepážek [30]

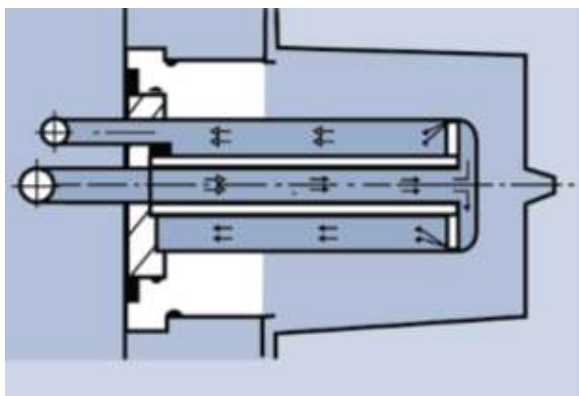


Obr. 20 - Proudění temperačního média v systému spirálových přepážek [15]

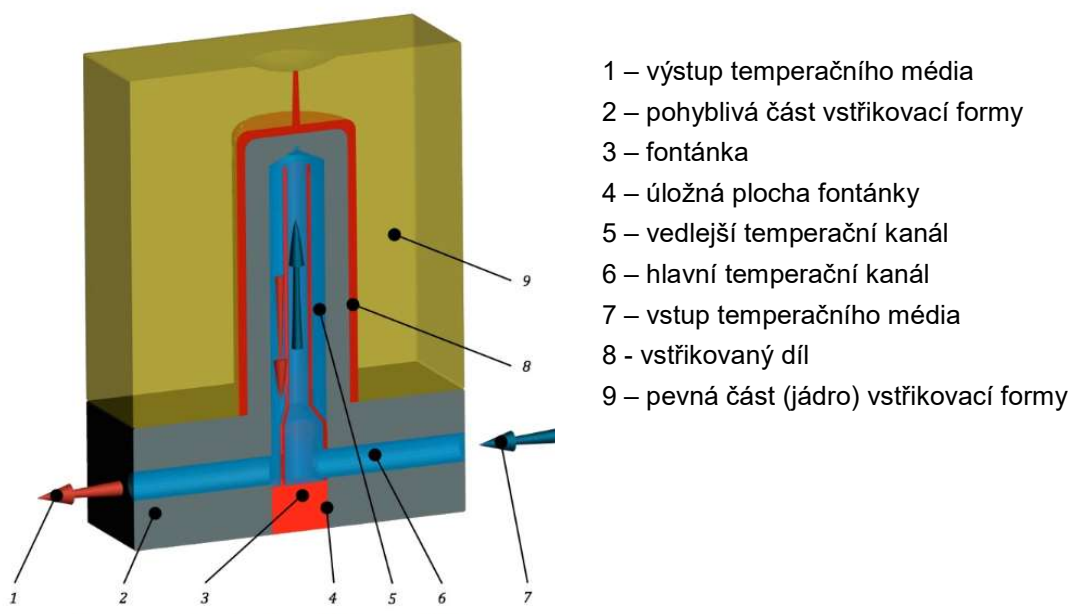


### 3.3.4.3. Systém fontánek

Systém se vyznačuje tenkou trubičkou zakončenou osazením, která nahrazuje plochou přepážku. Temperační médium proudí uvnitř trubice do vrcholu vedlejšího kanálu a zpět se vrací prostorem mezi vnější stranou trubice a vnitřní stěnou dutiny uvnitř jádra. [15] [30]



Obr. 21 - Systém fontánek [30]

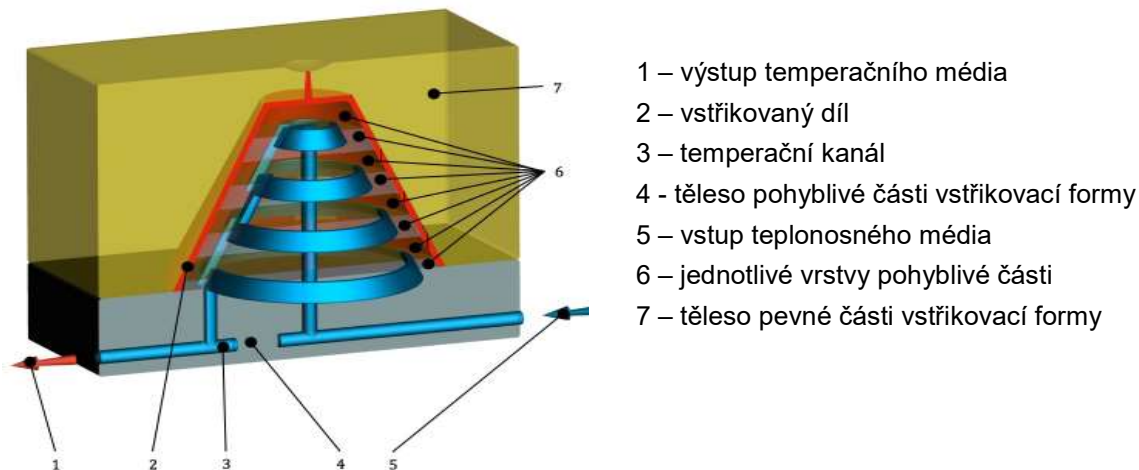


Obr. 22 - Proudění temperačního média v systému fontánek [15]

### 3.3.5. Další systémy

Dalším možným optimalizováním rychlosti odvodu tepla je použití konstrukčního systému CONTURA<sup>®</sup>, jehož principem je přesné kopírování tvaru výrobku v určité vzdálenosti. Přesného kopírování tvárníku se dosahuje jeho rozdělením na několik vrstev (obvykle 2 – 7 popřípadě 8 podle velikosti tvárníku) a na těchto plochách jsou vytvořeny temperační kanály, nejčastěji technologií frézování. Vrstvy jsou následně

spojeny k sobě ve vakuu pájením na tvrdo. Další možností je výroba pomocí 3D tisku technologií, založenou na laserové sintraci. Nevýhodou tohoto konstrukčního řešení jsou náklady na jeho realizaci.[14]



Obr. 23 – Systém CONTURA® [15]

### 3.3.6. Odvzdušnění

Odvzdušnění vstříkovacích forem slouží k odvedení vzduchu uzavřeného v tvarových dutinách vstříkovacích forem. Špatné navržení odvzdušňovacího systému může vyvolat technologické problémy [6]:

- nedostříky,
- spálená místa na výstřících vyvolaná tzv. Dieselovým efektem,
- tvorba bublin ve stěnách výstřiku s větší tloušťkou stěn,
- zvýšení nebezpečí výskytu studených spojů a s nimi spojených vad povrchu a lokálním snížením pevnosti,
- vnesení vnitřního pnutí,
- zvýšení anizotropie vlastností výstřiku,
- nutnost enormního zvýšení vstříkovacího tlaku,
- velké tlakové spády v dutině formy.

Během každého výrobního cyklu jsou tvarové dutiny formy (kavity) před naplněním polymerní taveninou zavzdušněny. Konstrukce formy musí zajistit úplný odvod vzduchu a případných plynných zplodin. V procesu odvzdušnění platí závislost – čím je větší rychlost plnění, tím účinnější musí být odvzdušnění kavity. [6]

## 4. Procesní parametry vstřikování

### 4.1. Temperační médium formy

Temperační médium by mělo kanálem protékat turbulentně, aby bylo dosaženo účinnější teploty. Při turbulentním proudění se zvyšuje součinitel přestupu tepla temperačního média. Tohoto proudění můžeme dosáhnout správnou volbou temperačního přístroje. Dále můžeme ovlivnit druh proudění samotnou drsností temperačního kanálu. Doporučená hodnota drsnosti pro docílení turbulentního proudění je Ra12. [23]

Tab. 6. – Přehled nejpoužívanějších temperačních medií [31]

Typ	Výhody	Nevýhody	Poznámky
voda	vysoký přestup tepla ( $\lambda = 0,552$ až $0,666$ v rozmezí $0$ až $200$ °C) nízká viskozita nízká cena ekologická nezávadnost	použitelné do $90$ °C *) vznik koroze **) usazování kamene ***)	*) v tlakových okruzích je možné vodu použít i při vyšších teplotách **) lze potlačit upravením vody ***) 1mm vodního kamene snižuje účinnost temp. systému až o 10 %
oleje	možnost teploty i nad $100$ °C omezení koroze	horší přestup tepla vyšší cena ekologicky závadné	
ethylenglykol	omezení koroze a ucpávání systému ( $\lambda = 0,304$ až $0,259$ v rozmezí $0$ až $60$ °C)	stárnutí ekologicky závadné	
vodní pára	vysoký přestup tepla	finanční náklady	

### Nanokapaliny

Nanokapalina je systém nanočástic v kapalině. Částice jsou v kapalině rozptýleny rovnoměrně, nedochází k sedimentaci a dokáží vytvořit stejnorodou složku. Mnoho výzkumů se zabývalo jejich zvýšenou tepelnou vodivostí. Tuto vlastnost ovlivňuje několik faktorů jako druh základní kapaliny, druh částic, jejich velikost, tvar a koncentrace, druh a koncentrace stabilizačních příměsí. [32]

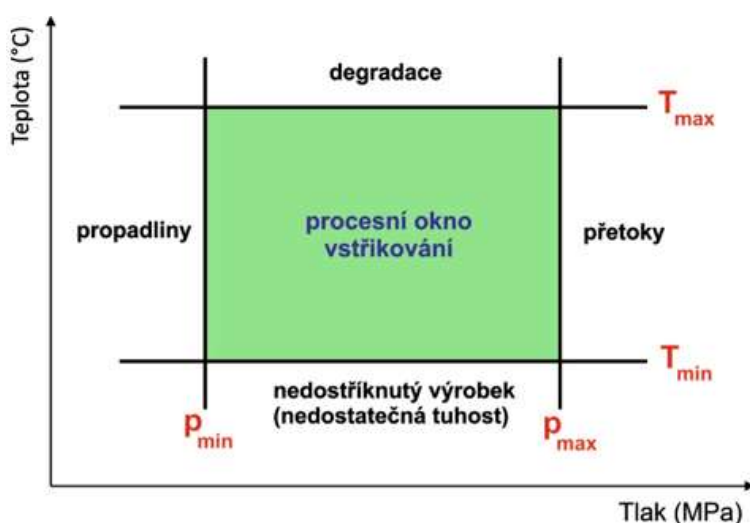
Výzkumy [33], [34], [35], [36], [37], [38] potvrdily zvýšení tepelné vodivosti kapalin s nanočásticemi Fe, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> a uhlíkovými nanovláknými obvykle o 20 – 40 %.

## 4.2. Laminární nebo turbulentní tok temperačního média

Výpočtem Reynoldsova čísla, které se rovná součinu rychlosti proudění a hydraulického průměru kanálu, podělené kinetickou viskozitou temperačního média v daném místě kanálu, zjistíme druh proudění (laminární, přechodové, turbulentní) a tedy i účinnost temperace. Pokud je v daném místě kanálu hodnota Reynoldsovo číslo vyšší než 4 000, je proudění turbulentní. Přechodová část je od 2 300 do 4 000. Hodnota Reynoldsova čísla menší než 2 300 značí laminární tok temperačního média. Zvýšit Reynoldsovo číslo lze zvětšením hydraulického průměru kanálu a rychlosti proudění média. [28]

## 4.3. Teplota taveniny, formy a vstřikovací tlak

Teplota taveniny, teplota formy a vstřikovací tlak patří mezi nejvýznamější technologické parametry. Mezi další významné parametry řadíme dobu dotlaku, vstřikovací rychlost, tlak a bod přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak. Doporučené rozmezí jednotlivých technologických parametrů dodává výrobce plastu. Pro pochopení vlastního procesu je možno vytvořit „procesní“ technologické okno (viz obr. 24). Okno vymezuje oblast přijatelných hodnot teplot a tlaků, které je možno použít pro dosažení kvalitního výrobku. [1]



Obr. 24 – Procesní okno u technologie vstřikování [1]

## **Teplota formy**

Problematika teploty formy byla částečně probrána v kapitole 2.3.3. V této kapitole je blíže rozebrán její vliv na chladnutí výstřiku.

Jak již bylo zmíněno, teplota formy ovlivňuje mnoho parametrů vstřikování (zabíhavost, plnění atd.). Dále zaleží na rychlosti ochlazování formy a s tím související dobou chladnutí výstřiku. Z ekonomického hlediska je výhodnější, aby teplota formy byla co nejnižší a cyklus co nejkratší, ale z technologického hlediska by teplota formy měla být co nejvyšší a rychlost chladnutí co nejpomalejší. Z uvedených hledisek je zřejmé, že teplotu formy je nezbytné volit jako kompromis ekonomického a technologického hlediska. [39]

Zvýšení teploty formy o 1 °C způsobí navýšení doby chlazení přibližně o 2 %. Nejvyšší možná teplota formy musí být nižší, než je teplota tuhnutí příslušného vstřikovaného plastu. U semikrystalických plastů je tato hranice teplota krystalinity  $T_m$  a u amorfních plastů je to teplota zesklennění  $T_g$ . [39]

S ohledem na finální požadované vlastnosti výstřiku je žádoucí, aby se plastická hmota v dutině ochlazovala ve všech místech stejně rychle. Nerovnoměrnost chlazení způsobuje vnitřní pnutí a kolísání vlastností v jednotlivých místech výstřiku. Teplota formy se reguluje pomocí média, které protéká temperačním systémem. Teplota formy není konstantní, ale kolísá okolo střední hodnoty. Pokud forma přijme více tepla během cyklu, pak začne účinněji pracovat, aby se vyrovnal nevýhodný stav a obráceně. Na tomto zjednodušeném principu vlastně pracují současné regulátory teploty používané u vstřikolisů. [39]

## **4.4. Dotlak**

V kapitole 2.3.2. je vysvětleno, z jakého důvodu je fáze dotlaku zařazena do vstřikovacího procesu. V této kapitole bude tato fáze více rozebrána pro optimalizaci chlazení. Správné nastavení dotlaku způsobí, že plast má ve formě dobrý tepelný kontakt se stěnou formy, a tím je efektivněji chlazen.

Pokud je použito vstřikování se studeným vtokem, pak je čas pro fázi dotlaku omezen. Ústí vtoku má velmi malý průměr, kde dochází k zatuhnutí taveniny plastu. Z důvodu vytvoření „přetlačení“ se doporučuje ukončit tuto fázi ještě před zatuhnutím ústí vtoku. Při použití horkých vtokových systémů k zatuhnutí vtoku nedochází, a to z důvodu neustálého ohřívání taveniny plastu. [1] [3]

Bod přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak se definuje v závislosti na:

- objemu vstřikované taveniny
- tlaku v hydraulickém systému vstřikovacího stroje nebo na tlaku vyvolaném pohonem šneku při vstřiku
- tlaku v horkém rozvodu formy
- tlaku v dutině formy
- čase

Tlakové přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak, bez ohledu na místo měření tlaku, umožňuje oproti objemovému přepnutí nejlepší reprodukovatelnost jakostních parametrů výstřiku. Nejuzší toleranční pásmo je při přepnutí tlaku v dutině formy, kdy je měřicí snímač umístěn co nejbližší ústí vtoku. Poté následuje umístění tlakového senzoru v horkém rozvodu formy – horká tryska otevřená nebo s jehlovým uzávěrem. Nejhorších výsledků z tlakového přepnutí dosahuje přepnutí podle tlaku v pohonech systému vstřikovacího stroje.

Přepnutí podle času není doporučeno používat, protože čas oproti tlaku nebo objemu je nezávislá veličina, která není spojena s procesem plnění kavity.

Příliš pozdní přepnutí se projeví na šneku, který po přepnutí odskočí dozadu. Při brzkém přepnutí se kavita zcela nezaplní při fázi plnění a po přepnutí dochází k plnění dotlakem, což je regulace tlaková, která jen zřídka umožňuje ovlivňovat povrchové vady výstřiku. [6]

Pozdní přepnutí může způsobit [6]:

- **vysoké tlakové maximum,**
- vznik přetoků v dělicí rovině formy,
- přeplnění dutiny formy taveninou, zvýšení hmotnosti výstřiku,
- větší obsah vnitřního pnutí ve výstřicích,
- vznik nežádoucí orientace v blízkosti ústí vtoku v důsledku zpětného toku taveniny,
- **zvýšené namáhání formy s možností poškození čelistí,**
- vysoké zatížení uzavírací jednotky vstřikovacího stroje.

Předčasné přepnutí může způsobit [6]:

- tlakové minimum v dutině formy – propad tlaku,
- neúplně objemové a tvarové naplnění kavity,
- zmenšení hmotnosti výstřiku,
- doplnění výstřiku v dotlakové fázi,
- vady povrchu výstřiku – tokové čáry, zviditelnění studených spojů apod.,
- větší smrštění,
- staženiny a propadliny

Maximální možnou hodnotu dotlaku, aniž by došlo k přetokům a přeplnění formy, je možné určit z této nerovnosti:

*poměr plochy hydraulického pístu vstřikovacího válce a plochy šneku  $\times$  dotlak  $\leq$  maximální vnitřní tlak v dutině formy  $\leq$  poměr uzavírací síly vstřikovacího stroje a průmětné plochy zdvihu (všechny výstřiky + vtokový rozvod) do dělicí roviny formy.*

Doba dotlaku závisí zejména na průměru vtokového kanálu, ale i na teplotě taveniny a teplotě vstřikovací formy. Řádově se tato doba pohybuje od několika málo sekund až po desítky sekund. Optimální dobu dotlaku je možné určit metodou vážení. Při nastavené úrovni dotlaku prodlužujeme dobu jeho působení a následně každý výstřik vážíme. Čas, při kterém se již nepozoruje zvyšování hmotnosti výstřiku, považujeme za optimalizovanou dobu dotlaku. [1] [3]

## 5. Technologie enkapsulace autoskla

### 5.1. Definice enkapsulace

Enkapsulace je proces uzavření nebo zachycení materiálu (kapaliny, plynu, pevné částice, buňky atd.). Materiál, který je zapouzdřený se nazývá „core material“ a materiál použitý pro obalení nebo zachycení se nazývá „shell material“. [25]

### 5.2. Zásadní informace o enkapsulaci autoskla

Autosklo se enkapsuluje termoplastickými pryžemi nebo měkkým polyvinylchloridem. Tyto materiály jsou používány pro docílení dostatečné ochrany, těsnění skla a tlumení hluku v karoserii auta. Celý proces před a po enkapsulaci autoskla ve společnosti AGC Automotive Czech a.s. se skládá z mnoha operací [26]:

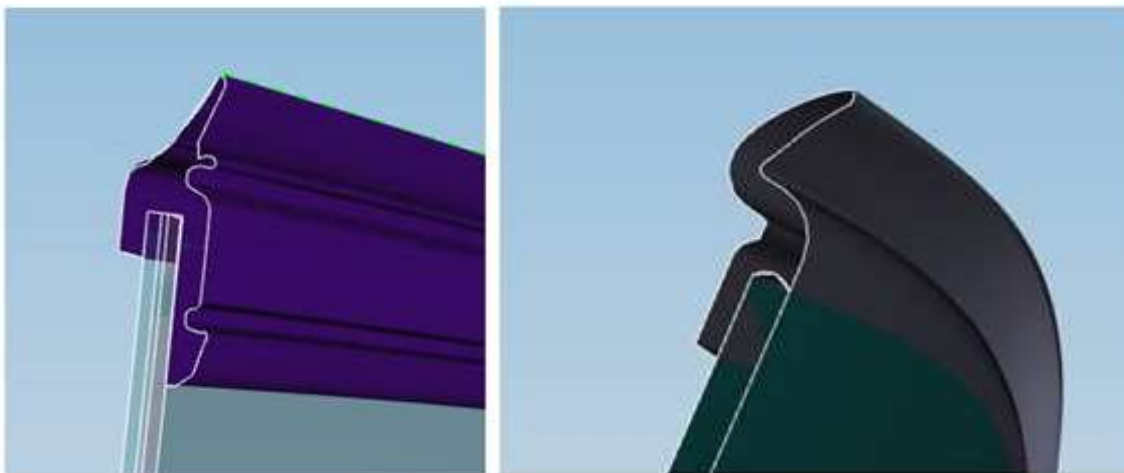
- vstupní kontrola všech dílů (sklo, primer, piny, inserty, lišty atd.),
- příprava skla – primerování,
- předeřev skel,
- pozicování skel,
- pozicování přídatných dílů,
- kontrola teploty skel před založením do formy,
- založení přídatných dílů do formy,
- založení skel do formy,
- **enkapsulace** (vstřikováním),
- odformování dílu z formy,
- uložení skel na vyvážecí dopravník,
- dokončování dílu po enkapsulaci,
- výstupní kontrola.

Pro lepší zachycení TPE/PVC je používán tzv. primer. Primer je nanesen na autosklo do oblastí, kam je následně vstříknut TPE/PVC. Docílení reakce mezi primerem a TPE/PVC je závislá na technologických parametrech, které jsou „know how“ společnosti AGC Automotive Czech a.s., a tudíž nemohou být zmíněny v této práci [26].



Výhody použití TPE oproti PVC pro enkapsulaci autoskla [15]:

- lehčí konečný výrobek,
- nižší hustota o 20 % - 30 %,
- dlouhá životnost stroje,
- bezpečný pro lidské zdraví,
- ekologické zpracování,
- nízké smrštění a stabilita součástí.



**Obr. 25** – Technologie třístranné a dvoustranné enkapsulace autoskla [26]

Na obr. 26 a 27 lze vidět třístranně enkapsulované autosklo z pohledové (A) a nepohledové (B) strany.



**Obr. 26** – Vyrobená autoskla - strana B (nepohledová)



*Obr. 27 – Vyrobené autosklo – strana A (pohledová)*

### **5.3. Popis problematiky chlazení u enkapsulace autoskla**

#### **5.3.1. Problematika umístění autoskla ve formě**

Autosklo svými fyzikálními vlastnostmi, teplotou a plochou, kterou je ve styku s taveninou ovlivňuje do určité míry rychlost a rovnoměrnost chlazení výstřiku. Vyznačuje se především vysokou měrnou tepelnou kapacitou a velmi nízkým součinitelem tepelné vodivosti viz tab. 3 a tab. 4.

#### **5.3.2. Problematika asymetrie výstřiku**

Se zvětšující se tloušťkou stěny výstřiku se zvětšuje místní smrštění. Tato skutečnost je principiálně dána tím, že u větších tloušťek stěn, při zamrznutí ústí vtoku, je v nich větší uzavřený tepelný obsah, než u stěn s menší tloušťkou. Vyšší teplota uvnitř průřezu stěny má za následek vyšší smrštění. [6]

Tloušťka stěny má dále vliv na rychlost chlazení, strukturu a vady. Tavenina chladne v tvarové dutině formy rychleji v průřezu stěny o menší tloušťce, než-li ve stěně o větší tloušťce za předpokladu stejných podmínek. U menších tloušťek stěn výstřiku má plast kratší dobu na krystalizační procesy, i procesy vedoucí ke vzniku vnitřního pnutí při chlazení. [6]

Rozdíly ve smrštění vyvolávají především u pružných plastů deformace - propadliny, lunkry (vakuoly). Pro odstranění těchto vad je důležitá dotlaková fáze. Dalšími vadami jsou studené spoje, kde tloušťka stěny ovlivňuje především její pevnost. Čím je studený spoj v menší tloušťce stěny, tím je pevnostní pokles výraznější. [6]

### **5.3.3. Problematika asymetrie autoskla**

Autosklo nemá ideálně rovnou plochu, ale je mírně vypouklé. Tento tvar ztěžuje návrh a výrobu temperačních kanálů do desek formy. Zejména při vrtání kanálů, kdy nejde manipulovat s určitým tvarem flexibilně, tudíž některé části kavity jsou v ideální vzdálenosti od temperačního systému kanálů, ale některá místa naopak mají tuto vzdálenost vyšší, než je právě ideální. To je způsobeno tvarem autoskla a vysokým tlakem vstřikování, který neumožňuje přiblížit se vrtáním blíže. Musí být dodržena určitá pevnost stěny formy. [42]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6. AGC Automotive Czech a.s.

Firma AGC Automotive Czech a.s., která je součástí největšího světového výrobce skel, koncernu AGC se zaměřuje na výrobu autoskla. Firma sídlí v Bílině – Chudeřice a zaměstnává přibližně 2500 zaměstnanců. Investice této firmy dosahují každoročně 15 milionů euro, což dovoluje intenzivní rozvoj technologií. Firma vyvinula například největší samozatmavovací panoramatické sklo do osobních vozů, nebo speciální skla pro první hybridní Porsche 918 Spyder. [40]

### 6.1. Popis technologie vstřikování plastů u AGC Automotive Czech a.s.

Technologie enkapsulace je specifický způsob vstřikování plastů. Platí pro ní popis technologie vstřikování v kapitole 2.

V následující tab. 7 jsou uvedeny všeobecné procesní a konstrukční parametry spojené s enkapsulací všech typů autoskel ve společnosti AGC Automotive.

*Tab. 7 – Všeobecné parametry spojené s enkapsulací ve společnosti AGC Automotive*

Parametry		Spojitosť s teoretickou částí
vstřikovaný materiál	termoplastický elastomer (TPE)	kapitola 2.1.4.
	měkký polyvinylchlorid (PVC)	kapitola 2.1.2.
typ granulátu	čočky	kapitola 2.2.1.
doprava materiálu do závodu	„big bags“	kapitola 2.2.2.
doprava materiálu po hale	centrální vakuový systém	kapitola 2.2.2. (viz obr. 5)
sušení granulátu	v sušičkách	kapitola 2.2.3.
vkládání autoskla do formy	robotem / ručně	-
vyjímání autoskla z formy	robotem / ručně	-
počet autoskel vyrobených během jednoho vstřikovacího cyklu	maximálně 2 (u všech forem)	-
temperační médium	voda s antikorzními přísadami	kapitola 4.1
materiál formy	1.2311, 1.2312	kapitola 3.3.1.

## 6.2. Forma M2050

Ve společnosti AGC Automotive Czech a.s. byla vybrána forma s označením M2050, kde je realizován projekt Ford CD539 FFX Black. Tato forma byla vybrána na základě velkých rozdílů tloušťek stěn a průřezů výstřiku, což jsou parametry, které ztěžují docílení optimálního chlazení.

V tab.8 jsou uvedeny parametry, které jsou specifické pro tuto vybranou formu a doplňují tak tab.7 o další relevantní parametry procesu enkapsulace.

**Tab. 8 – Parametry enkapsulace pro formu M2050**

Plast		Spojitost s teoretickou částí
označení vstřikovaného materiálu	TC7 WEZ 901	
typ vstřikovaného materiál	HSBC	kapitola 2.1.4.
teplota taveniny	200 °C	kapitola 4.3
teplota odformování	70 °C	kapitola 2.3.3.
<b>Procesní parametry</b>		
doba cyklu	93 s	
doba plnění	2,97 s	kapitola 2.3.1.
rychlost plnění	55 mm . s <sup>-1</sup>	kapitola 4.3.
doba dotlaku	20 s ± 5	kapitola 4.4.
dotlak	32 barů	kapitola 4.4.
doba chlazení	60 s ± 10	kapitola 2.3.3.
teplota pevné desky	40 °C	kapitola 4.3
teplota pohyblivé desky	35 °C	kapitola 4.3
temperační jednotka pro pevnou desku	Piovan THP 112-ID-F	kapitola 4.1
temperační jednotka pro pohyblivou desku	Piovan THW 9	kapitola 4.1
<b>Konstrukční parametry</b>		
materiál formy	1.2311	kapitola 3.3.1.
temperační okruhy	5 okruhů (3 na pevné desce a 2 na pohyblivé)	kapitola 3.3.2.
temperační kanály	vrtané	kapitola 3.3.3.
průměr kanálků	13 mm	kapitola 3.3.3.
vzdálenost kanálků od kavity	35 – 38 mm	kapitola 3.3.3.

Tavenina plastu je dopravována do kavit formy M2050 pomocí horkého rozvodu, který je umístěn v pevné části formy. Horký systém je v této části uložený na malých kontaktních plochách. Zbylá plocha horkého rozvodu je izolována vzduchem, aby se do formy nedostávalo nechtěné teplo.

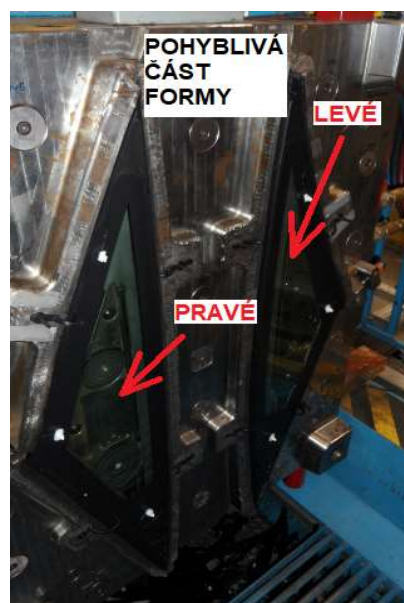
Pro chlazení výstřiku po fázi plnění jsou jak do pevné, tak do pohyblivé části formy vyvrtané dva temperační okruhy. Jeden z okruhů je pro levé autosklo a druhý z okruhů pro pravé autosklo. Dále je v pevné části této formy vyvrtán temperační okruh pro chlazení jádra. Těmito okruhy proudí vybrané temperační médium.

Analýza právě této formy by měla napomoci nalezení optimálního nastavení temperačního systému. Uvedená doporučení pro optimalizaci by měla přispět i u jiných forem ke zlepšení výkonu chlazení temperačního systému, snížení celkové doby cyklu a zvýšení produktivity.

Pro lepší orientaci v dalším pokračování práce jsem popsal levé a pravé autosklo uložené ve vstřikovací formě (viz obr. 28 a obr. 29).



**Obr. 28** – Rozdělení autoskel – pohled na pevnou část formy



**Obr. 29** - Rozdělení autoskel – pohled na pohyblivou část formy

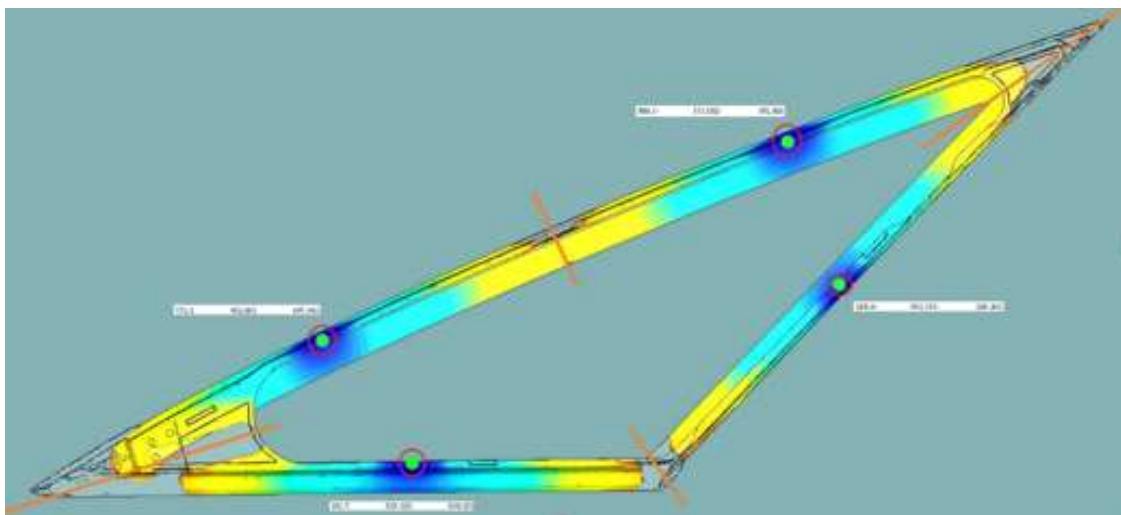
## 7. Analýza výstřiku

### 7.1. Moldflow analysis

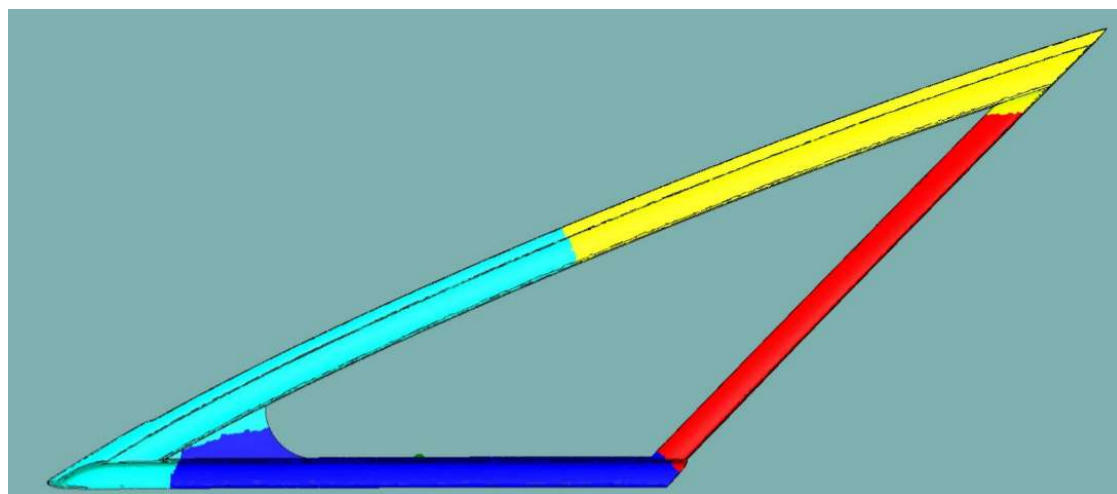
Společnost AGC provedla analýzu plnění výstřiku pro Ford CD539 FFX Black v softwaru Cadmould 3D-F, ze které jsou zřejmé především dva důležité parametry:

- místa vtoků,
- místa svarů proudů taveniny.

Výstřik byl konstruován tak, že jsou potřeba čtyři vtoky horkého systému, a tudíž i čtyři místa svarů. Umístění vtoku při enkapsulaci autoskla je poměrně složitá problematika z důvodu vysokého vstřikovacího tlaku, který při špatném umístění vtoků způsobí posunutí autoskla ve formě.



*Obr. 30 – Průběh plnění Ford\_CD539\_FFX\_Black [41]*



*Obr. 31 – Čtyři části vstřiku rozdělené místem svaru [41]*

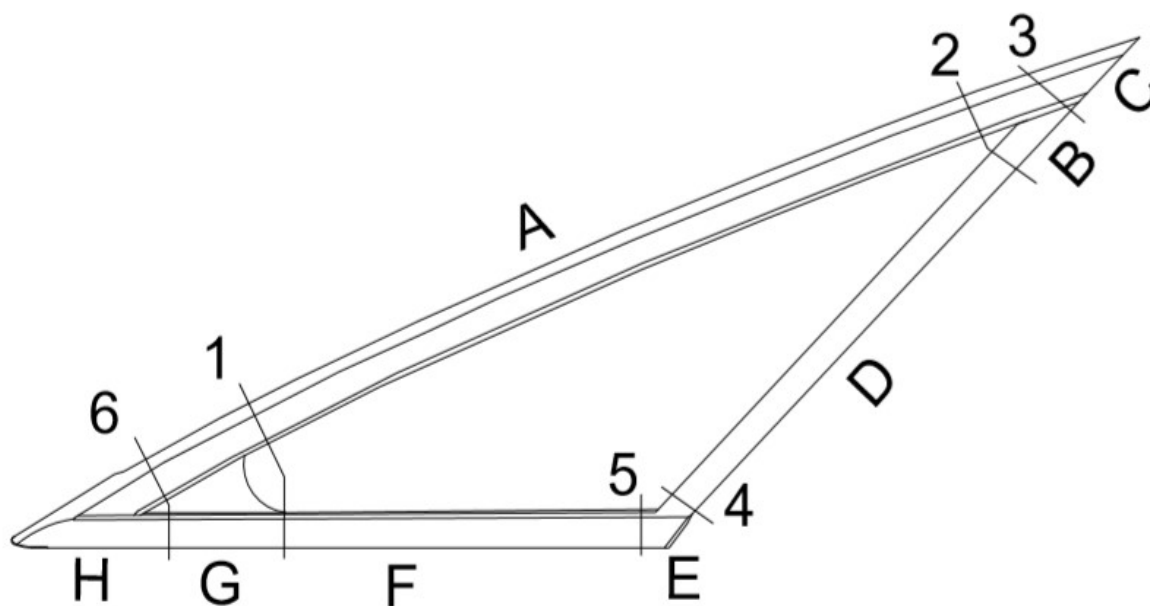


Z hlediska optimalizace efektivity chlazení je přínos výsledku Moldflow analysis:

- a) Do míst vtoků se materiál dostává během plnění kavity jako první, a tudíž má delší kontakt s formou (tmavě modré oblasti na obr. 30). Materiál má v této oblasti delší chladicí dobu, čímž je při odformování chladnější a stabilnější.
- b) Do míst svarů se tavenina dostává jako poslední. Materiál má tedy nejkratší kontakt se stěnou formy, a tím i nejkratší chladicí dobu. Při odformování vykazuje teplejší a měkčí povrch. Není jasné zda v těchto místech došlo ke krystalizaci. Tato místa jsou z pohledu chlazení kritická.

## 7.2. Průřezová analýza výstříku

Pro lepší pochopení reálných teplot v různých částech výstříku ve fázi vyhození ze vstřikovací formy jsem se rozhodl provést průřezovou analýzu. Výstřík pro tuto analýzu bylo nutné oddělit od autoskla. Toho jsem dosáhl sejmutím výstříku, těsně po vyhození z formy, kdy má výstřík i autosklo stále ještě poměrně vysokou teplotu, a tudíž je poměrně snadné s výstříkem manipulovat oproti situaci, kdy autosklo i výstřík jsou schlazeny na okolní teplotu. Poté jsem výstřík na jednotlivé části a měřil jejich obsah průřezů a maximální tloušťky stěn. V určitých částech výstříku byla geometrie průřezů konstantní, proto jsem tuto celou oblast popsal jedním obsahem průřezu a jednou maximální tloušťkou stěny (viz obr. 32 oblast A).



*Obr. 32 – Průřezová analýza výstříku jednoho autoskla*

U některých oblastí byla maximální tloušťka stěny konstantní, ale geometrie průřezů se měnila v minimálním rozsahu, a tudíž jsem zvolil střední hodnotu obsahu průřezů této oblasti (viz obr. 32 oblasti D,F). U zbylých oblastí jsem se rozhodl jejich proměnlivý průřez vyjádřit vždy minimální a maximální hodnotou obsahu průřezů této oblasti (viz obr. 32 oblasti B,C,E,G,H). Všechny zjištěné hodnoty jsou uvedené v tab. 9.

**Tab. 9 – Hodnoty zjištěné z průřezové analýzy**

Úsek	Hranice	Obsah průřezu [mm <sup>2</sup> ]	Maximální tloušťka stěny [mm]	Objem části [mm <sup>3</sup> ]
A	1	202	7	134 000
	2			
B	2	min. 390 – max. 523	7	15 000
	3			
C	3	max. 390	7	15 000
	-			
D	2	~ 200	5	80 650
	4			
E	4	min. 192 – max. 202	7	9 600
	5			
F	5	192	7	60 200
	1			
G	1	min. 392 – max. 520	7	47 400
	6			
H	6	max. 392	7	35 500
	-			

Hodnoty z tab.9 jsem porovnal s již zjištěným průběhem plnění (viz kap. 7.1).

Z hlediska optimalizace efektivity chlazení je přínos výsledku průřezové analýzy výstřiku:

- a) Většina výstřiku má obsah průřezu okolo 200 mm<sup>2</sup> (obr. 32 oblasti A, D, F). Toto jsou ideální podmínky pro vysokou efektivitu chlazení formy, protože chladicí výkon by mohl být rozložený rovnoměrně po celé formě.

- b) Bohužel v designu výstřiku existují místa, která mají 2 až 2,5 krát větší průřez, než části uvedené v bodě a). Z pohledu chladnutí by bylo nejlepší plnit, jako první místa s největším obsahem průřezu (viz obr. 32 oblasti B, C, G, H). Tyto oblasti jsou z pohledu chlazení kritické.
- c) Součet objemů oblastí B, C, G, H je 15 % z objemu celého výstřiku. Tato skutečnost značí, že právě těchto 15 % výstřiku potřebuje lepší systém pro odvod tepla, než je ve zbylých 85 % formy.

Společně s výsledkem z kapitoly 7.1.b) lze pozorovat, že tyto geometricky nevhodné oblasti jsou plněny jako poslední, tudíž i fáze chlazení začíná o něco později než v jiných oblastech.

Společnost AGC si toto řešení vtoků obhájila skutečností, že autosklo je do formy umístěno a podtlakem drženo v určité pozici. Pokud by pozice vtoků byly například v místech s největším průřezem, pak by se autosklo mohlo vysokým tlakem vstřikování posunout z požadované polohy. Dalším důvodem je velikost horkého rozvodu, který by se přiblížením k rohům výstřiku (viz obr. 32 oblast H a C) zvětšil.

### **7.3. Analýza pomocí termokamery**

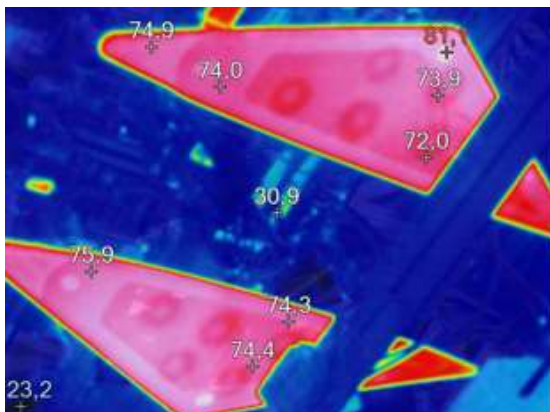
Na formě M2050 jsem pomocí termokamery Fluke provedl analýzu pro zjištění dalších velmi důležitých parametrů ovlivňujících dobu chlazení enkapsulovaného autoskla. Mezi tyto parametry řadím teplotu kavity před vstřikováním, teplotu autoskla před enkapsulací a po pootevření formy a teploty v různých částech výstřiku při fázi vyhození.

Termosnímky jsem pořídil v různých etapách procesu enkapsulace autoskla.

#### **7.3.1. Naměření teploty autoskla**

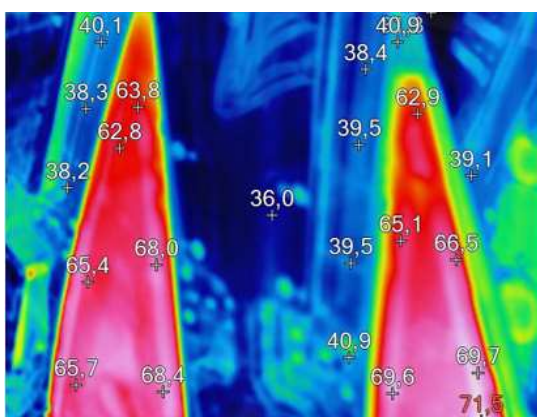
V kapitole 5.3.1. bylo zmíněno, že teplota autoskla ovlivňuje do určité míry rovnoměrnost a rychlost přenosu tepla z výstřiku. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl použít termokameru pro zjištění průměrné teploty autoskla ve fázi jeho vložení do pevné části formy (počátek procesu enkapsulace).

Na obr. 33 je termosnímek zachycující teplotu autoskla těsně před jeho vložení do pevné části formy. Teplota autoskla se v této fázi pohybovala okolo 75 °C.

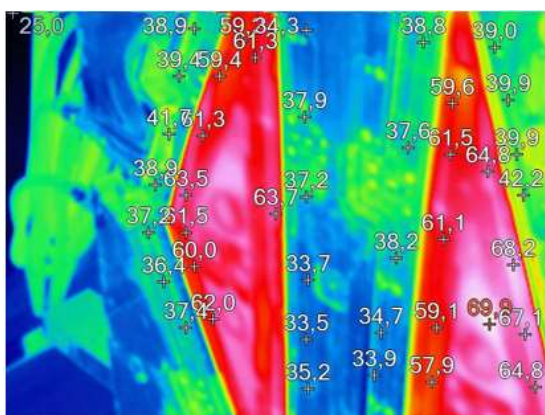


**Obr. 33** – Termosnímek autoskel umístěných v robotu těsně před vložením do formy

V další fázi jsem nasnímal autoskla ihned po jejich vložení do pevné části formy. Termosnímek (viz obr. 34) jsem pořídil po 5 vteřinách od vložení autoskel do pevné části formy. Termosnímek (viz obr. 35) jsem pořídil po 12 sekundách od vložení autoskel do pevné části formy.



**Obr. 34** - Termosnímek vrchní poloviny pevné části formy s autosklem před procesem vstřikování TPE

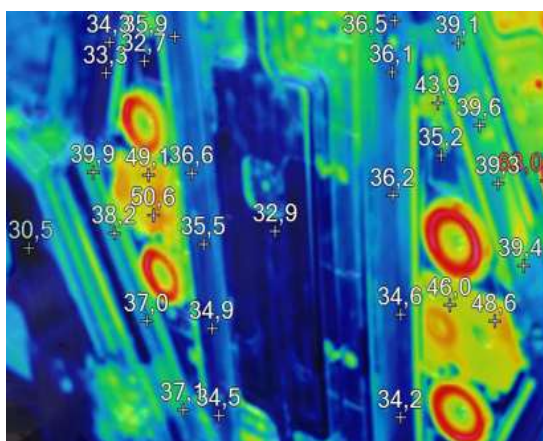


**Obr. 35** – Termosnímek pevné části formy s autosklem před procesem vstřikování TPE

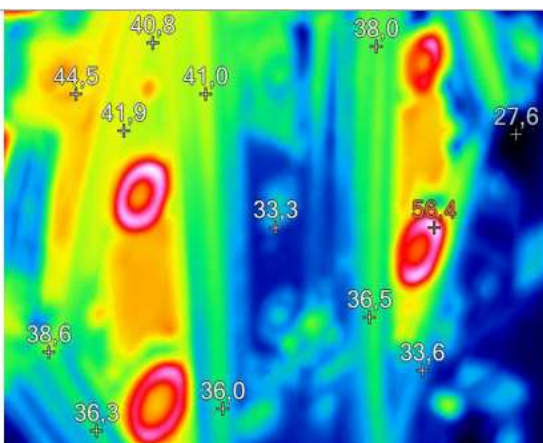
Z těchto termosnímků jsem určil průměrnou teplotu autoskel (66 °C) po vložení do pevné části formy. Tato hodnota bude použita při kalkulaci tepla odvedeného autosklem v kapitole 9.6..

### 7.3.2. Analýza formy před vstřikováním

Na obr. 36 je termosnímek pevné části formy pořizený po pootvření formy. Tento termosnímek oproti snímkům na obr. 34, 35 poskytuje analýzu ploch formy, které zakrývají při procesu autoskla. Z tohoto termosnímků je zřejmé, že pozice (savky), kde je sklo pomocí vakua (podtlaku) uchyceno, má oproti fomě podstatně větší teplotu cca. 60 °C. Plocha mezi těmito pozicemi je též nadprůměrná vůči zbytku formy (45 – 50 °C). Tato skutečnost ukazuje na nedostatečné chlazení této plochy, která může ovlivňovat svou vysokou teplotou chlazení určité části výstříku, resp. středovou část oblasti A, oblast E a část oblasti D a F sousedící s oblastí E, které jsou znázorněné v průřezové analýze (viz obr. 32). U pohyblivé části výstříku lze sledovat ten samý problém (viz obr. 37).



**Obr. 36 - Termosnímek pevné části formy před procesem vstřikování TPE**



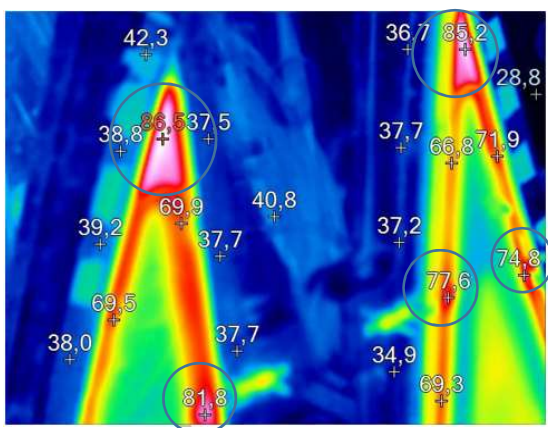
**Obr. 37 - Termosnímek pohyblivé části formy před procesem vstřikování TPE**

Z hlediska optimalizace efektivity chlazení je přínos výsledku analýzy formy před vstřikováním:

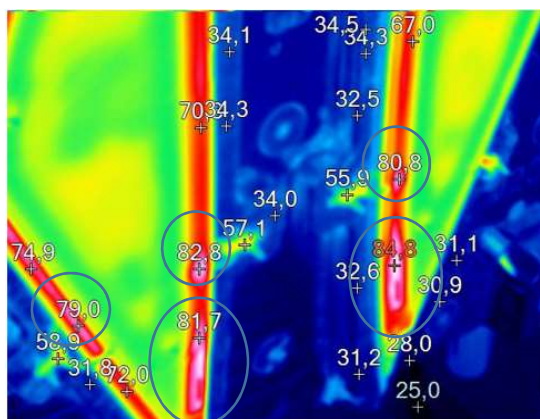
- a) V pozicích savek na pevné i nepohyblivé části formy jsou teploty před vstřikováním o 10 – 15 % vyšší než ve zbylých částech formy. Tyto části o zvýšené teplotě ovlivňují především oblast A, oblast E a část oblasti D a F sousedící s oblastí E. Tato místa jsou z pohledu chlazení kritická.

### 7.3.3. Analýza formy po vstřikování

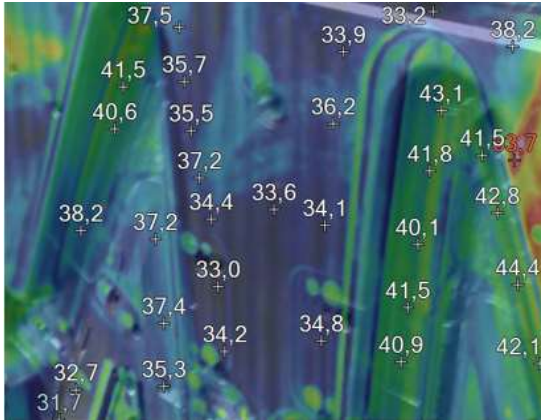
Na termosnímcích (viz obr. 38 a obr. 39) jsou zobrazeny teploty v různých částech výstřiků na pravém a levém autoskle. Termosnímek (viz obr. 40) poskytuje detailnější teplotní analýzu vrchní poloviny kavity na pevné části formy.



**Obr. 38 – Termosnímek horní poloviny pohyblivé formy s výstřikem**



**Obr. 39 - Termosnímek dolní poloviny pohyblivé formy s výstřikem**



**Obr. 40 - Termosnímek kavity pevné části formy před procesem vstřikování TPE**

Z hlediska optimalizace efektivity chlazení je přínos výsledku analýzy formy po vstřikování:

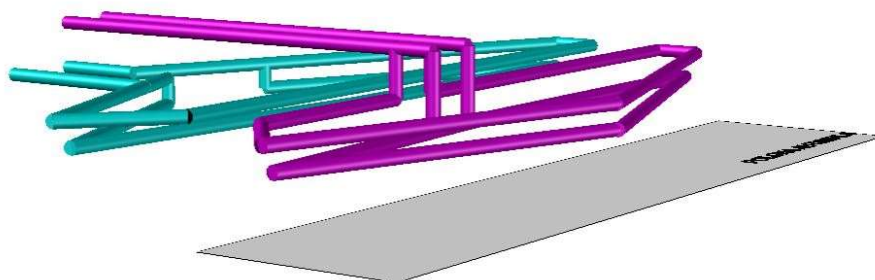
- a) Teploty v jednotlivých částech výstřiku jsou výrazně nerovnoměrné. Místa s teplotou okolo 80 °C jsou na obr. 38 a obr. 39 zakroužkována. Nejvyšší teploty (82 až 86,5 °C) jsou naměřeny v oblasti B, C, H a G. Tyto oblasti jsou z pohledu chlazení kritické. Tyto termosnímky potvrdily výsledky z kapitoly 7.2.b.
- b) Teplota výstřiku pravého autoskla je vyšší než teplota výstřiku levého autoskla.
- c) Kavita před vstřikováním má na pevné části formy v kritických oblastech teplotu 43 až 44 °C a v ostatních oblastech teplotu okolo 40 až 42 °C. Temperační systém formy nestíhá chladit celou kavitu na stejnou teplotu, ideálně na teplotu 40 °C (viz tab. 8).

## 8. Analýza temperačního systému formy

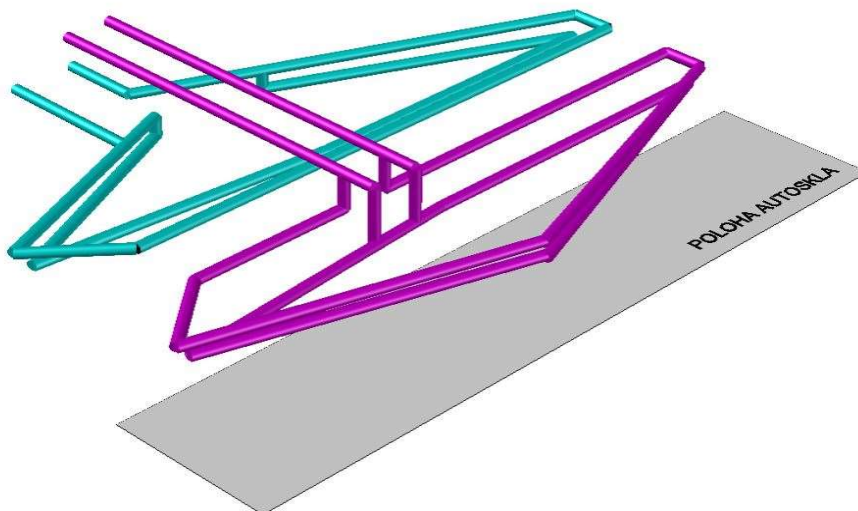
### 8.1. Modely temperačních okruhů ve formě

Jak již bylo zmíněno v kapitole 6., každá část formy má dva temperační okruhy pro chlazení výstřiku. Na obr. 41,42,43 a 44 jsou zobrazeny modely temperačních okruhů pevné i pohyblivé části formy dle barev. Pro lepší rozlišení jednotlivých temperačních okruhů byla v kapitole 6.2. autoskla rozdělena na levé a pravé (viz obr. 28 a obr. 29).

Světle modrý a fialový okruh se nachází v pohyblivé části formy, přičemž světle modrý okruh temperuje primárně levé autosklo a fialový okruh temperuje primárně pravé autosklo. Tmavě modrý a žlutý okruh se nachází v pevné části formy, přičemž tmavě modrý okruh temperuje primárně pravé autosklo a žlutý okruh temperuje primárně levé autosklo. Z modelů lze pozorovat, že všechny čtyři okruhy mají jinou délku.

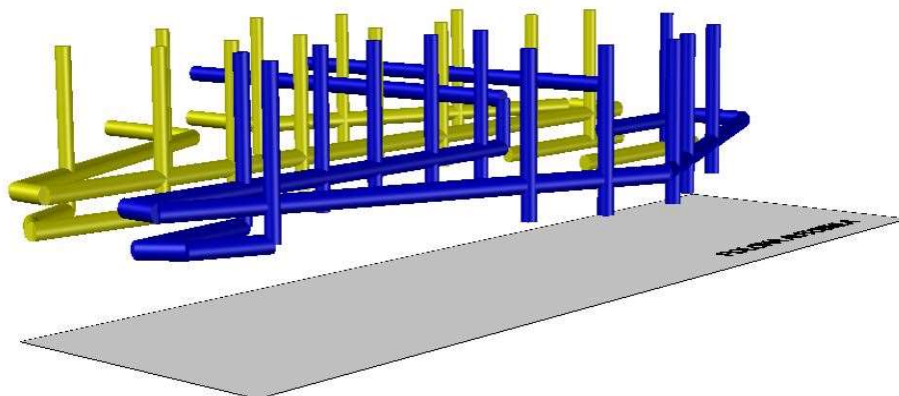


Obr. 41 – Model temperačních okruhů v pohyblivé části formy – pohled 1

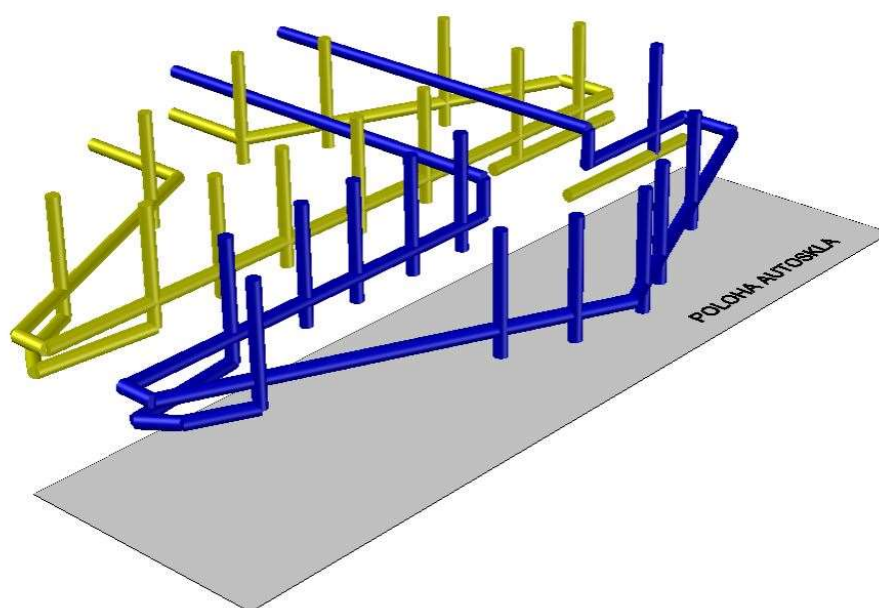


Obr. 42 - Model temperačních okruhů v pohyblivé části formy – pohled 2





*Obr. 43 - Model temperačních okruhů v pevné části formy – pohled 1*



*Obr. 44 - Model temperačních okruhů v pevné části formy – pohled 2*

## 8.2. Měření délek temperačních okruhů

Pro změření délek jednotlivých temperačních okruhů jsem využil výkresovou dokumentaci, kterou mi poskytla společnost AGC Automotive Czech a.s.. Zjištěné hodnoty jsem uvedl do tab. 10. Při srovnání temperačních okruhů pro levé a pravé autosklo v pevné části formy jsem zjistil rozdíl 1,76 metru. Porovnáním délek temperačních okruhů pro pravé a levé autosklo v pohyblivé části formy jsem zjistil rozdíl 0,7 metru.

*Tab. 10. – Délka jednotlivých temperačních okruhů*

	Levé autosklo [m]	Pravé autosklo [m]
Pevná část formy	3,78	5,54
Pohyblivá část formy	4,1	4,8

Rozdíly jsou způsobené především konstrukčním rozhodnutím, že přívod do obou temperačních okruhů bude z té samé strany formy. K pravému autosklu se tedy temperační médium musí dostat téměř přes celou šířku formy.

Z hlediska optimalizace efektivity chlazení je přínos výsledku měření délek temperačních okruhů (tab. 10):

- a) Rozdíly v délkách temperačních okruhů pravé a levé části formy jsou poměrně velké (pevná část 32 %, pohyblivá část 15 %)
- b) Tyto rozdíly mohou mít vliv na již zjištěné rozdíly teploty výstřiků pravého a levého autoskla při vyhození z formy (viz výsledky 7.3.3.b a 7.3.3.c)

Pro podložení těchto zjištění jsem se dále rozhodl analyzovat výkon temperačních jednotek.

### 8.3. Temperační jednotky

Pro formu M2050 jsou určeny dvě temperační jednotky značky Piovan. Menší z jednotek Piovan THW 9 (viz obr. 45) reguluje teplotu pohyblivé desky formy. Větší z jednotek Piovan THP 112-ID-F (viz obr. 46) naopak reguluje teplotu pevné části formy.



Obr. 45 – Piovan THW 9



Obr. 46 – Piovan THP 112-ID-F



**Obr. 47** – Zadní strana temperačních jednotek



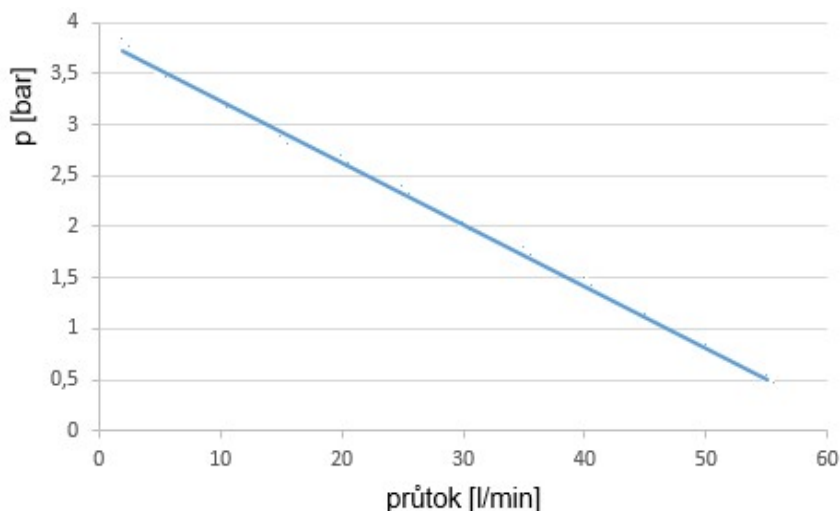
**Obr. 48** - Hadice jednotlivých temperačních okruhů

Temperační jednotka Piovon THP 112-ID-F je tlaková oproti temperační jednotce Piovon THW 9, která je beztlaková. Obě tyto jednotky mají uzavřený okruh, a tudíž proudí formou neustále stejná voda s antikorozními přísadami, která je během cirkulace ohřívána a chlazena na potřebnou teplotu. Pokud nastane úbytek vody v okruhu temperační jednotky (např. odpařením nebo nechtěným vypuštěním), pak se voda doplní automaticky z centrální nádrže.

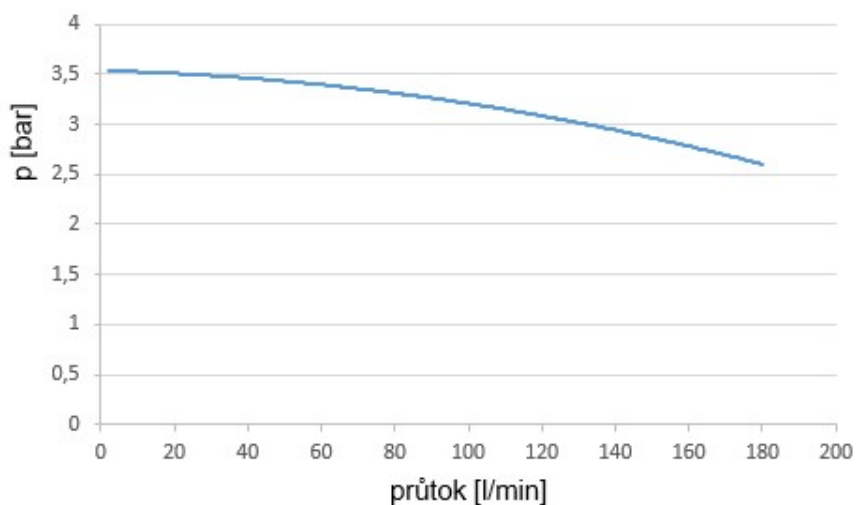
### 8.3.1. Analýza výkonu temperačních jednotek

Výrobce temperačních jednotek dal společnosti AGC k dispozici pro každou jednotku závislost dopravované výšky na průtoku. Dopravovanou výšku jsem přepočel na tlak, abych dostal závislost tlaku na průtoku (viz graf 1 a 2). Pro zjištění efektivnosti temperačních jednotek jsem změřil průtoky na výstupu. Naměřené hodnoty (viz tab.11) jsem následně vynesl do grafů 1 a 2 (viz graf 3, 4, 5, 6 a 7).

**Graf 1** - Výkon temperační jednotky Piovon THW 9



**Graf 2 - Výkon temperační jednotky. Piován THP 112-ID-F**



Pro měření průtoku jsem použil upínací průtokový snímač Keyence (viz obr. 49). Tento přístroj musí být upnut na kovové trubici, a tudíž jsem zvolil místo měření průtoku, které je zobrazeno na obr. 49.

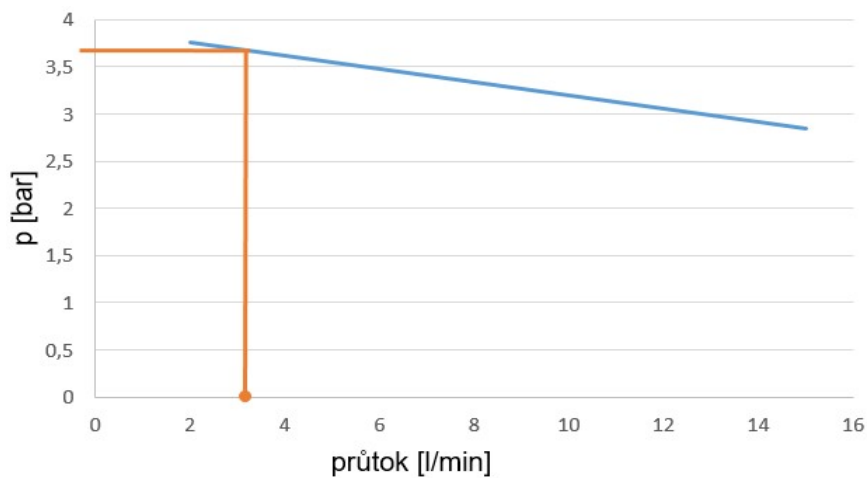


**Obr. 49 – Měření průtokoměrem Keyence**

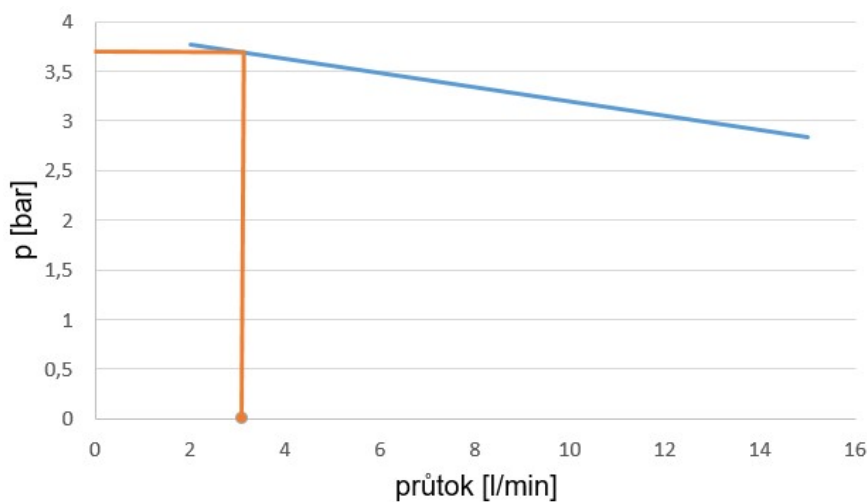
**Tab. 11 – Naměřené hodnoty průtoku v temperačních okuzích**

Pohyblivá deska [l. min <sup>-1</sup> ]		Pevná deska [l. min <sup>-1</sup> ]	
	výstup		výstup
LH (levá strana)	3,4	LH (levá strana)	10,0
RH (pravá strana)	3,2	RH (pravá strana)	9,1
		Core (jádro)	8,3

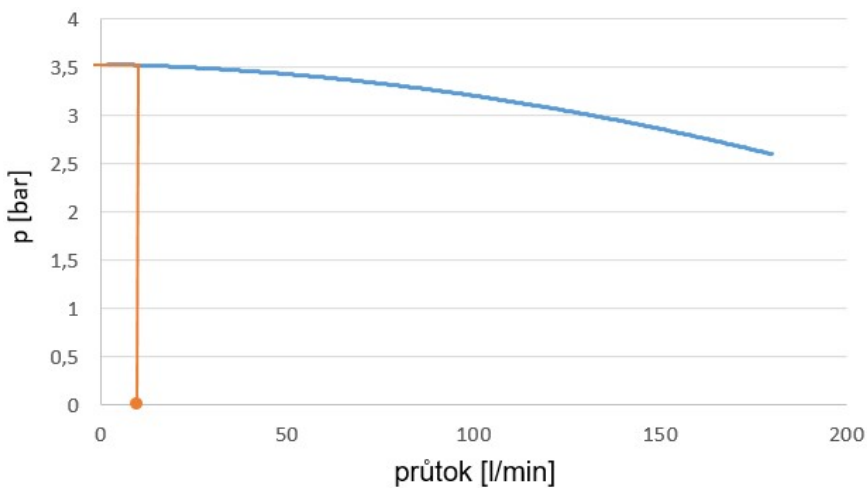
**Graf 3 – Odpor systému v závislosti na výkonu čerpadla  
u LH pohyblivé části**



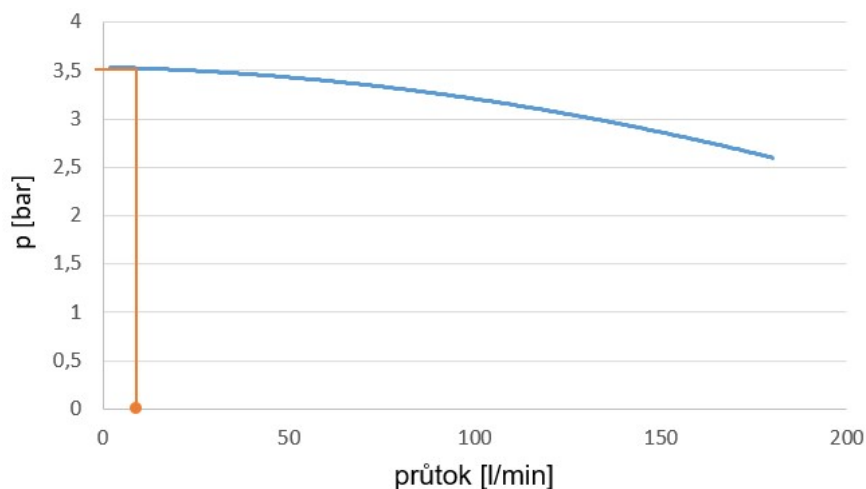
**Graf 4 – Odpor systému v závislosti na výkonu čerpadla  
u RH pohyblivé části**



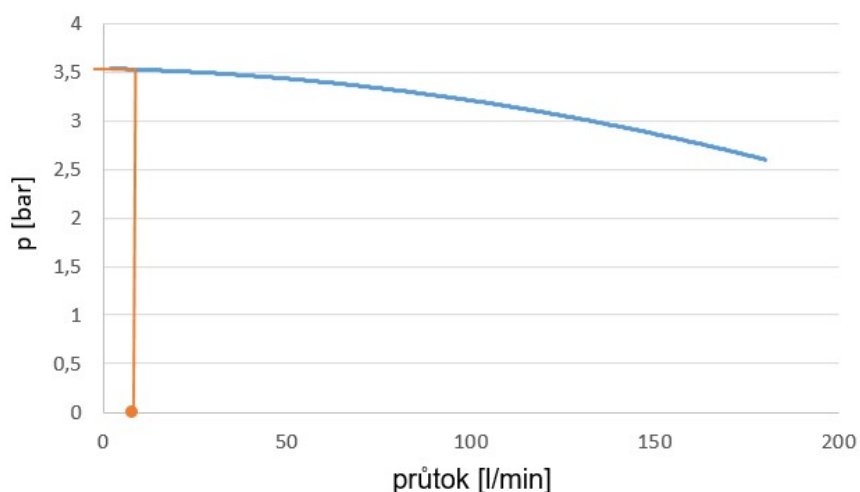
**Graf 5 – Odpor systému v závislosti na výkonu čerpadla  
u LH pevné části**



**Graf 6 - Odpor systému v závislosti na výkonu čerpadla  
u RH pevné části**



**Graf 7 - Odpor systému v závislosti na výkonu čerpadla  
u „core“ pevné části**



Z hlediska optimalizace efektivity chlazení je přínos výsledku analýzy výkonu temperačních jednotek:

- Temperační jednotka Piovon THW 9 je málo výkonná pro tento systém, který vyvolá odpor 3,5 baru.
- Temperační jednotka Piovon THP 112-ID-F docílí sice vyššího průtoku při dosažení stejného odporu (viz graf 5, 6 a 7), ale vůbec není využít potenciál možného dosažení průtoku až 180 l.min<sup>-1</sup>.
- Obě temperační jednotky jsou limitovány tlakem okolo 3,5 baru, při kterých mají minimální možné průtoky, které mohou poskytnout – proč je hydraulický odpor temperačního systému tak vysoký?

## 9. Tepelná bilance formy

### 9.1. Postup sestavení tepelné bilance

Pro bližší pochopení tepelných pochodů uvnitř formy a v jejím blízkém okolí jsem se rozhodl vytvořit její tepelnou bilanci podle kapitoly 3.2.. Tepelnou bilanci formy M2050 jsem zjistil kolik přibližně tepla (energie) je do formy vneseno během jednoho výrobního cyklu a jakými tepelnými přenosy se toto přebytečné teplo z formy opět odvede před započítáním následujícího cyklu tak, aby bylo dosaženo již zmíněné reprodukovatelnosti procesu.

Předpokládal jsem teplo přivedené taveninou plastu za jediný zdroj tepla vnášeného do formy. Teplo přivedené horkým systémem jsem zanedbal kvůli samostatnému chlazení jehel a vzduchové izolaci horkého rozvodu od zbytku formy.

Odvod tepla jsem rozdělil na odvod tepla temperačním systémem a na odvod tepla tepelnými ztrátami: vedením, prouděním a sáláním. Pokud by byl navrženy temperační systém v pořádku, pak by většinu tepla odvedl temperační systém a menší část by byla odvedena tepelnými ztrátami.

Pro vytvoření tepelné bilance jsem potřeboval procesní, geometrické a fyzikální údaje. Procesní a geometrické údaje jsem obdržel od společnosti AGC Automotive Czech a.s.. U plastu TPE jsem dostal od firmy AGC Automotive Czech a.s. data list poskytnutý výrobcem granulátu.

### 9.2. TPE s označením TC7 WEZ 901

Tento termoplastický elastomer patří do kategorie hydrogenovaného styrenového blokového kopolymeru (viz kap. 2.1.4.). Materiál je semikrystalický.

V tab. 14 jsou vybrané hodnoty z data listu poskytnutého výrobcem plastu.

**Tab. 12** – Hodnoty z data listu TC7 WEZ 901

TPE TC7 WEZ 901	
Tvrdość	75 shore A
Hustota	0,93 $g \cdot cm^{-3}$
Pevnosť v tahu	7 $N \cdot mm^{-2}$
Staženiny	0,9 – 1,4 %
Bod tání	> 120 °C
Bod vzplanutí	> 250 °C

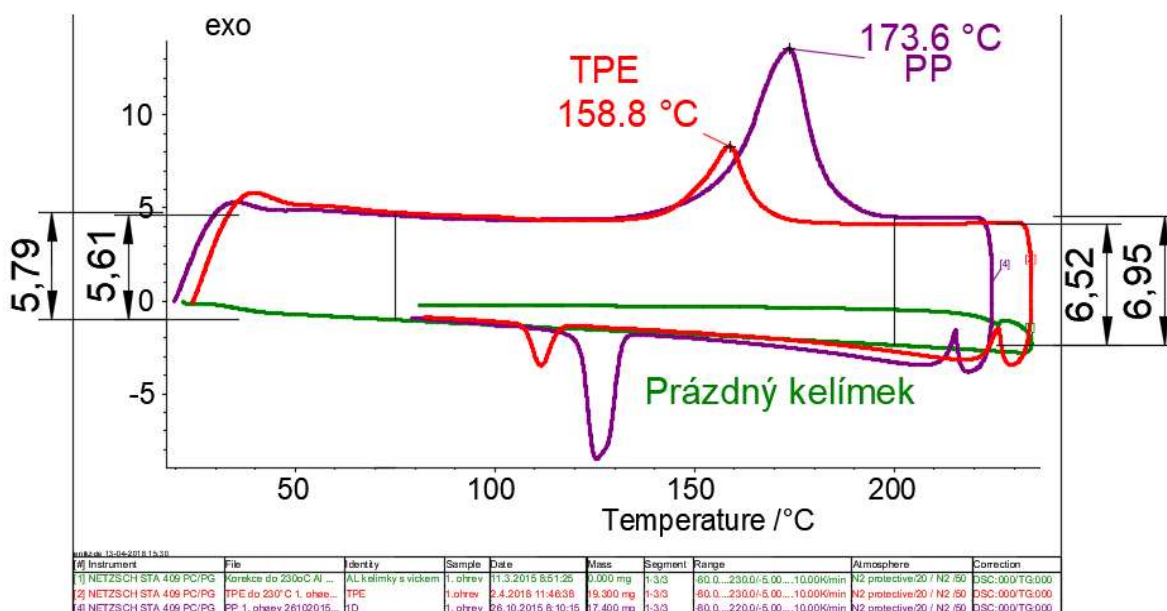
Bohužel nejsou v technickém listu důležité hodnoty tepelného chování plastu, které jsou velmi zásadní pro optimalizaci chladicího systému formy. Z těchto důvodů jsem se rozhodl zjistit tyto hodnoty, které jsou potřebné pro tepelnou bilanci pomocí různých zkoušek (viz kapitola 9.2.1. a 9.2.2.).

### 9.2.1. Měrná tepelná kapacita TC7 WEZ 901

Pomocí metody diferenciálního skenovacího kalorimetru (DSC) jsem určil hodnoty měrné tepelné kapacity při teplotě pootevření formy (75 °C) a teplotě vstřikování termoplastického elastomeru (200 °C), který je použit pro enkapsulaci autoskla Ford CD539 FFX Black.

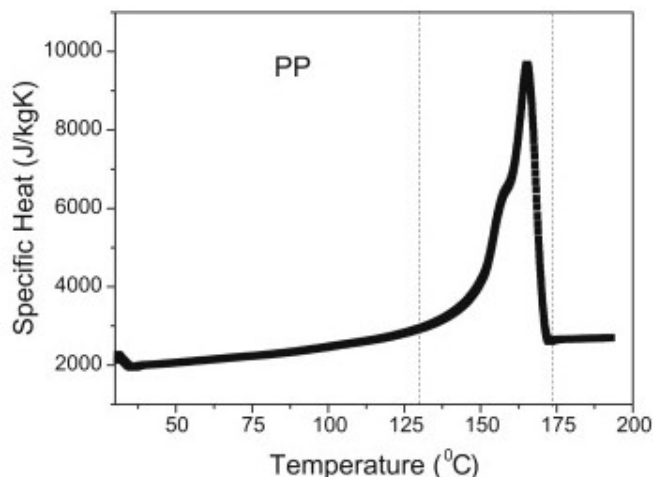
Využil jsem DSC zařízení poskytnuté Ing. Zdeňkou Jeníkovou. Před vytvořením DSC křivky TPE jsem si nejprve vyřízl z výtříku zkušební vzorek o hmotnosti 19,3 mg. Před vložením zkušební vzorku jsem si zvážil samotnou mističku a poté i mističku s víčkem. Následně jsem zkušební vzorek uzavřený v mističce s víčkem vložil i s prázdnou mističkou s víčkem do zařízení DSC. Následovalo zadání podmínek ohřevu do počítače a spuštění samotného DSC zařízení. Křivku ohřátí PP a prázdné mističky s víčkem jsem získal od Ing. Jeníkové (obr. 50).

Postup vyhodnocování měrné tepelné kapacity probíhal dle normy ČSN EN ISO 11357-4.



Obr. 50 – DSC křivky prázdný kelímeček, PP a TPE





**Obr. 51** – Závislost měrné tepelné kapacity PP na teplotě

$$c_p^{sp} = c_p^{cal} \cdot \frac{m^{cal}}{m^{sp}} \cdot \frac{\Delta Q^{sp} - \Delta Q^{blank}}{\Delta Q^{cal} - \Delta Q^{blank}} \quad (5)$$

Měrná tepelná kapacita TC7 WEZ 901 pro teplotu 200 °C je:

$$c_p^{sp} = 2,675 \cdot 17,4 \cdot (19,3)^{-1} \cdot 6,52 \cdot (6,95)^{-1} \cong 2,26 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (6)$$

Měrná tepelná kapacita TC7 WEZ 901 pro teplotu 75 °C je:

$$c_p^{sp} = 2,25 \cdot 17,4 \cdot (19,3)^{-1} \cdot 5,79 \cdot (5,61)^{-1} \cong 2,1 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7)$$

$c_p^{sp}$  – měrná tepelná kapacita TPE

$\Delta Q^{sp} - \Delta Q^{blank}$  – vzdálenost od křivky

$c_p^{cal}$  - měrná tepelná kapacita PP

ohřevu prázdného kelímku k ohřevu TPE

$m^{cal}$  – hmotnost PP

$\Delta Q^{cal} - \Delta Q^{blank}$  - vzdálenost od křivky

$m^{sp}$  – hmotnost TPE

ohřevu prázdného kelímku k ohřevu PP

### 9.2.2. Součinitel tepelné vodivosti TC7 WEZ 901

Součinitel tepelné vodivosti patří mezi základní fyzikální veličiny popisující chování TPE během cyklu vstřikování. Pro zjištění této hodnoty jsem musel vytvořit vzorek o minimálních rozměrech 6x6x2 cm. Vzorek jsem nemohl vyříznout z výstřiku z důvodu jeho nevyhovujících rozměrů.

Vytvořil jsem tedy formu z lukoprenového tmelu. Tato forma tuhne obvykle několik hodin. Pro urychlení tuhnutí jsem vytvořil katalyzátor z vody a čisticího prostředku, který obsahuje glycerin (např. čisticí prostředek pro mytí ovoce). Vytlačím lukoprenu do katalyzátoru a následným hnětením jsem dosáhl méně tvárné hmoty. Ve správnou chvíli jsem hmotu z katalyzátoru vyndal a začal jsem obkládat dřevěný přípravek o rozměrech 8x8x3cm. Takto obalený přípravek jsem nechal za běžných pokojových podmínek schnout přibližně dvě hodiny. Po zaschnutí lukoprenu jsem

dřevěný přípravek odstranil a získal jsem lukoprenovou formu, která vydrží až 300 °C.

Následně jsem pomocí staré trouby roztavil granulát na teplotu přibližně 200 °C. Taveninu jsem se snažil vlít do formy. Viskozita TPE byla však velmi vysoká, a tudíž bych bez použití tlaku nedosáhl požadovaného tvaru. Potřebného tlaku jsem docílil pomocí plechu a závaží. Tímto postupem jsem vytvořil vzorek č.1 (viz obr. 57). Tento vzorek vykazoval velkou poróvitost, což by zkreslovalo výsledky zkoušky. Následně jsem tedy vytvořil vzorek č.2 (viz obr. 56). Jako formu jsem použil skleněný popelník, který svými tepelnými vlastnostmi udržel poměrně dlouhou dobu plast v podobě taveniny. Za pomoci tlaku jsem dosáhl lepší struktury než u vzorku č.1. Vnitřní strukturu vzorku č.2 lze pozorovat na obr. 58 a 59.



**Obr. 52 – Tvarování formy**



**Obr. 53 – Forma z lukopren**



**Obr. 54 – Granulát TPE**



**Obr. 55 – Lítí taveniny do formy**



**Obr. 56** – Vzorek č.2 pro Isomet 2114



**Obr. 57** – Vzorek č.1 pro Isomet 2114



**Obr. 58** – Vnitřní struktura vzorku č.2 -  
pohled 1



**Obr. 59** – Vnitřní struktura vzorku č.2 -  
pohled 2



**Obr. 60** – Zkouška na Isometu 2114

Pomocí Isometu 2114 (viz obr. 60) jsem naměřil pět hodnot tepelné vodivosti TPE. Naměřené hodnoty jsem uvedl do tab. 13.

Tab. 13 – Naměřené hodnoty tepelné vodivosti TC7 WEZ 901 u vzorku 2

Měření	1	2	3	4	5
Hodnoty [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]	0,2114	0,2121	0,2127	0,2118	0,2122

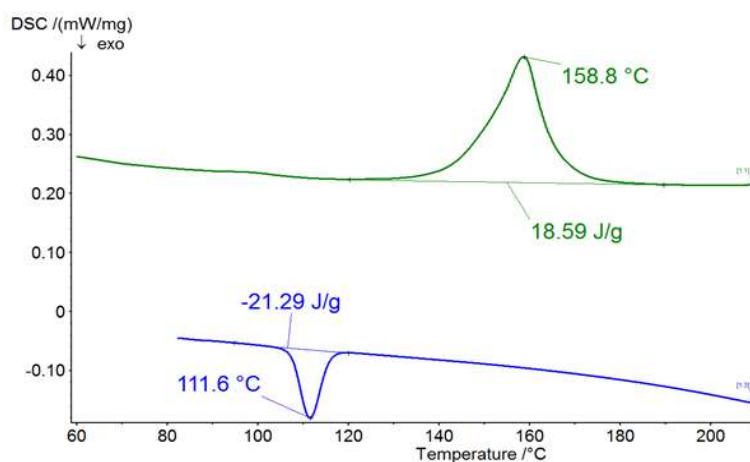
Výpočtem jsem následně získal střední hodnotu  $\bar{\lambda} = 0,212 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ .

$$\bar{\lambda} = (0,2114 + 0,2121 + 0,2127 + 0,2118 + 0,2122) \cdot 5^{-1} = 0,21204 \doteq 0,212 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} \quad (8)$$

Tato hodnota potvrzuje, že stejně jako u jiných plastů je tepelná vodivost TPE s označením TC7 WEZ 901 malá. Vzhledem k procesu vstřikování ovlivňuje tato hodnota především odvod tepla z výstřiku (chlazení výstřiku a formy). Tato hodnota tedy vyjadřuje omezení přenosu tepla z výstřiku do formy za určitý čas.

### 9.3. Teplo přivedené taveninou

Doba, po které se pootevirá forma, se ve firmě zjišťuje iterační metodou, a to jejím prodlužováním, než se dosáhne ztuhlého výstřiku bez povrchových vad.



Obr. 61 – DSC křivka ohřevu a chlazení TPE

Pro výpočet přivedeného tepla taveninou nelze počítat pouze s rozdílem entalpií vynásobené hmotností potřebné taveniny, ale musí se připočíst teplo potřebné na roztavení plastu (dosažení tzv. píku viz obr. 66), které je  $18,59 J \cdot g^{-1}$ .

#### Teplo přivedené

$$Q_{pl} = [(m \cdot \Delta h) + Q_{pik}] \cdot t_c^{-1} [W] \quad (9)$$

$$Q_{pl} = [1,022 \cdot (1\,069 - 731) \cdot 1000 + 19\,000] \cdot 93^{-1} \cong 3\,918 W = 3,9 kW \quad (10)$$

$m$  – hmotnost výstřiku i s vtoky [kg]

$\Delta h$  – rozdíl měrné entalpie při vstřikování a při odformování [ $J \cdot kg^{-1}$ ]

$Q_{pik}$  – teplo potřebné na dosažení píku [J]

$t_c$  – celková doba vstřikovacího cyklu [s]

### Hmotnost výstřiku s vtoky

$$m = V \cdot \rho \text{ [kg]} \quad (11)$$

$$m = 1099 \cdot 0,93 = 1022 \text{ g} = 1,022 \text{ kg} \quad (12)$$

V – objem výstřiku [m<sup>3</sup>]

$\rho$  – hustota plastu [kg . m<sup>-3</sup>]

### Měrná entalpie

$$h = c_p \cdot T \text{ [kJ . kg}^{-1}\text{]} \quad (13)$$

$c_p$  – měrná tepelná kapacita plastu [J . g<sup>-1</sup> . K<sup>-1</sup>]

T – teplota [K]

$$h_{200} = 2,26 \cdot 473,15 \cong 1069 \text{ kJ . kg}^{-1} \quad (14)$$

$$h_{70} = 2,1 \cdot 348,15 \cong 731 \text{ kJ . kg}^{-1} \quad (15)$$

## **9.4. Teplo odvedené temperačním systémem formy**

$$Q_{TS} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \text{ [W]} \quad (16)$$

$\dot{m}$  – průtok [l . min<sup>-1</sup>]

$c_p$  – měrná tepelná kapacita vody při 40 °C [kJ . kg<sup>-1</sup> . K<sup>-1</sup>]

$\Delta T$  – rozdíl teploty vstupujícího a vystupujícího chladícího média [K]

### Pohyblivá část, LH

$$Q_{TS} = 0,057 \cdot 4 \cdot 180 \cdot (-1,2) = -286 \text{ W} \quad (17)$$

### Pohyblivá část, RH

$$Q_{TS} = 0,053 \cdot 4 \cdot 180 \cdot (-1,2) = -266 \text{ W} \quad (18)$$

### Pevná část, LH

$$Q_{TS} = 0,167 \cdot 4 \cdot 180 \cdot (-1,5) = -1047 \text{ W} \quad (19)$$

### Pevná část, RH

$$Q_{TS} = 0,152 \cdot 4 \cdot 180 \cdot (-1,5) = -953 \text{ W} \quad (20)$$

### Pevná část, jádro

$$Q_{TS} = 0,138 \cdot 4 \cdot 180 \cdot (-1,5) = -865 \text{ W} \quad (21)$$

### Celkové odvedené teplo temperačním systémem

$$Q_{CTS} = -(286 + 266 + 1047 + 953 + 865) = -3417 \text{ W} \quad (22)$$

### 9.4.1. Způsob proudění v jednotlivých temperačních okruzích

#### Pohyblivá část, LH

$$Re = v \cdot d \cdot \nu = 0,43 \cdot 0,013 \cdot (0,658 \cdot 10^{-6})^{-1} = 8\,495 \rightarrow \textit{turbulentní} \quad (23)$$

#### Pohyblivá část, RH

$$Re = v \cdot d \cdot \nu = 0,4 \cdot 0,013 \cdot (0,658 \cdot 10^{-6})^{-1} = 7\,903 \rightarrow \textit{turbulentní} \quad (24)$$

#### Pevná část, LH

$$Re = v \cdot d \cdot \nu = 1,15 \cdot 0,013 \cdot (0,658 \cdot 10^{-6})^{-1} = 22\,720 \rightarrow \textit{turbulentní} \quad (25)$$

#### Pevná část, RH

$$Re = v \cdot d \cdot \nu = 1,26 \cdot 0,013 \cdot (0,658 \cdot 10^{-6})^{-1} = 24\,894 \rightarrow \textit{turbulentní} \quad (26)$$

#### Pevná část, jádro

$$Re = v \cdot d \cdot \nu = 1,04 \cdot 0,013 \cdot (0,658 \cdot 10^{-6})^{-1} = 20\,547 \rightarrow \textit{turbulentní} \quad (27)$$

$v$  – rychlost proudění [ $m \cdot s^{-1}$ ]

$d$  – průměr kanálu [ $m$ ]

$\nu$  – kinetická viskozita vody [ $s^{-1}$ ]

### 9.5. Teplo odvedené ztrátami do okolí

$$Q_S = [\alpha_V \cdot S_T \cdot (T_\infty - T_S)] [W] \quad (28)$$

$$Q_S = [5 \cdot 3,6 \cdot (24 - 33)] = -162 W \quad (29)$$

$\alpha_V$  – součinitel přestupu tepla vzduchu [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]

$T_\infty$  – teplota vzduchu [ $K$ ]

$T_S$  – teplota stěny [ $K$ ]

$S_{T2}$  – teplosměnná plocha mezi formou a okolím [ $m^2$ ]

### 9.6. Teplo odvedené autosklem

$$Q_S = [(m \cdot c_p) \cdot \Delta T] \cdot t_c^{-1} \quad (30)$$

$$Q_S = (2,54 \cdot 800) \cdot (66 - 80) \cdot (93)^{-1} = -306 W \quad (31)$$

$m$  – hmotnost autoskla [ $g$ ]

$c_p$  – měrná tepelná kapacita temperovaného skla [ $J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$\Delta T$  – rozdíl průměrné teploty autoskla před a po enkapsulaci [ $K$ ]

## 9.7. Hodnocení tepelné bilance

Tepelná bilance ukázala, že během jednoho cyklu (93 s) se do formy M2050 přivede přibližně 3,9 kW energie (tepla) a téměř stejné množství se odvede. Rozdíl mezi vypočtenou hodnotou přivedeného tepla a odvedeného tepla je méně než 1 %, což je kvantitativně správně.

Temperační systém odvede přibližně 87 % přivedeného tepla, což je pozitivní zjištění. Zbylých 13 % se rozdělilo do odvodu tepla autosklem a odvodu tepla do okolí.

Tyto formulace mohou být dále použity při změnách procesu, pro výpočet jejího vlivu na efektivitu chlazení → snížení doby cyklu.

## **10. Návrhy optimalizace**

### **10.1. Analýza výstřiku**

#### **10.1.1. Změna geometrie výstřiku**

Tato provedená analýza výstřiku ukázala, že řešení designu výstřiku není optimální (Moldflow analysis 7.1.b), Průřezová analýza výstřiku 7.2.b, Analýza pomocí termokamery 7.3.3.a) . Pro efektivnější chlazení by bylo vhodné domluvit design se zákazníkem tak, aby výstřik neměl příliš velké průřezy a tloušťky stěn (viz kap. 7.2.b a tab. 9).

#### **10.1.2. Změna umístění vtoků ve formě**

Do budoucích projektů bych tedy doporučil koordinovat návrh designu výstřiku s umístěním vtoků. Cílem je nalézt optimální umístění vtoků tak, aby místa s největším průřezem a tloušťkou stěny výstřiku nebyla plněna jako poslední. Docílilo by se rychlejšího a rovnoměrnějšího chlazení výstřiku. Tato koordinace by mohla být podpořena programem CadMould 3D-F nebo jiným simulačním programem.

#### **10.1.3. Potlačení místního přehřátí**

Jak již bylo zmíněno, tak v analýze výstřiku se objevily oblasti se zvýšenou teplotou (viz kap.7.3.3.a, c). Návrh nové formy by měl těmto místům věnovat pozornost a aplikovat v nich přepážkové systémy (viz kap. 3.3.4.).

### **10.2. Analýza temperačního systému formy**

#### **10.2.1. Temperační jednotky**

Z analýzy provedené pomocí termokamery jsem zjistil nejen nerovnoměrnost teplot v různých částech výstřiku, ale také nerovnoměrnost teplot výstřiků na levém a pravém autoskle. Následná analýza délek temperačních kanálů ukázala, že na pohyblivé části formy je rozdíl v délkách temperačních okruhů 15 % a na pevné části formy je rozdíl 32 %. Jak již bylo zmíněno v kapitole 9.2., oba přírůdky chladící vody jsou z jedné strany formy. Z těchto analýz bych doporučil vrtat temperační kanály z obou stran formy tak, aby délky temperačních okruhů byly pro pravé i levé autosklo stejné. Další možností jak minimalizovat tyto rozdíly je zakoupit výkonnější temperační jednotky, které podle analýzy v kapitole 9.3.



nejsou vhodné pro chlazení těchto forem. Navrhuji použít pro pohyblivou část formy temperační jednotku Piovan THP-6-12. a pro pevnou část formy Piovan THP-L4.

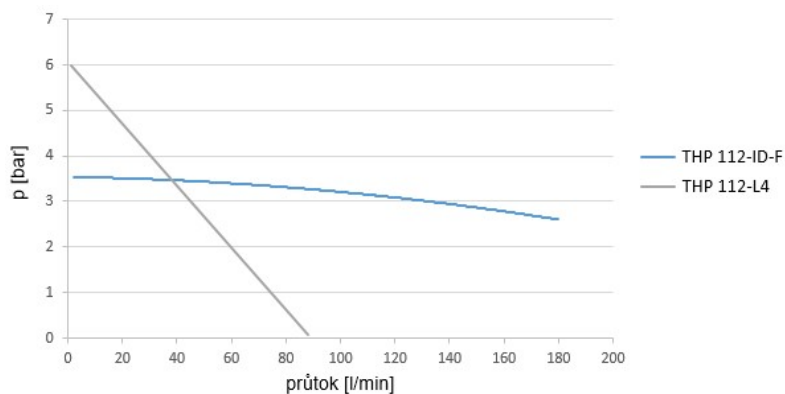
**Tab. 14 – Porovnání temperační jednotky THW-9 s THP-6-12**

	THW-9	THP-6-12
	beztlaková	tlaková
Maximální průtok [ $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	60	40
Maximální tlak [bar]	4	6
Spotřeba [kW]	0,75	0,75

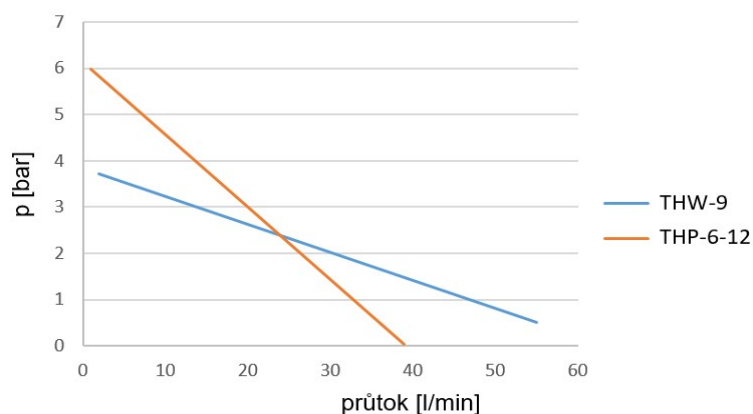
**Tab. 15 – Porovnání temperační jednotky THP 112-ID-F s THP 112-L4**

	THP 112-ID-F	THP 112-L4
	tlaková	tlaková
Maximální průtok [ $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	180	90
Maximální tlak [bar]	3,5	6
Spotřeba [kW]	1,5	1,5

**Graf 8 – Porovnání výkonu temperační jednotky THP 112-ID-F s THP 112-L4**



**Graf 9 – Porovnání výkonu temperační jednotky THW-9 s THP-6-12**



### 10.2.2. Nastavení temperačních okruhů levé a pravé strany formy

Analýza pomocí termokamery (viz kap. 7.7.3. b) a měření délek temperačních okruhů (viz kap. 8.2. a) ukázaly, že teplota kavity a výstřiku u pravého autoskla je vyšší než u levého. Navrhuji níže uvedená řešení:

- Změnit konstrukční řešení temperačních kanálů levého a pravého okruhu – snížit rozdíly v délkách okruhů pro pravé a levé sklo (kap. 8.1., 8.2., 9.4.).
- Změnit konstrukční řešení temperačních kanálů levého a pravého okruhu – seřadit pomocí změny průměru kanálů (kap. 9.4.).
- Změnit průtok kanálu škrcením (kap. 9.4.1.).
- Zvýšit průtok ve druhém kanálu (kap. 8.3.).
- Využít ve všech případech tepelnou bilanci.

### 10.2.3. Vyčištění formy s následným pravidelným čištěním nádrže

Měření průtoků v kapitole 8.3.1. ukázalo, že hydraulický odpor kanálů je vysoký. Při stejném měření byly náhodně nalezeny usazeniny na jednom ze šroubení viz obr. 62 a obr. 63 (poloha šroubení zakroužkována na obr. 48), který spojuje průtokoměr a hadici vedoucí ke vstupu do temperačního kanálu. Vrstva usazenin byla výrazná a značně zužovala otvor pro průtok vody do hadice. Tyto usazeniny byly následně nalezeny i na ostatních šroubeních.



**Obr. 62** – Zanešené šroubení (pohled 1)



**Obr. 63** - Zanešené šroubení (pohled 2)

Pro zjištění, zda se tyto usazeniny vyskytují i v temperačních kanálech, jsem provedl měření průtoku před a po jejich vyčištění (viz obr. 54). Dobu čištění jsem z časových důvodů stanovil na tři hodiny.



**Obr. 64 – Čištění temperačních kanálů**

Čištění temperačních okruhů se ukázalo jako správné opatření pro efektivnější chlazení. Po čištění se v obou okruzích zvýšil průtok. U levé strany v pevné části formy o 26,3 % a u pravé strany pohyblivé části formy o 14,7 % (viz tab. 16).

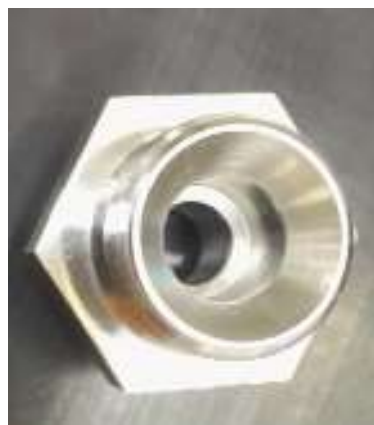
**Tab. 16 – Naměřené průtoky před a po vyčištění temperačních kanálů**

	<b>Pevná část formy LH výstup</b>	<b>Pohyblivý část formy RH výstup</b>
Před čištěním [l. min <sup>-1</sup> ]	13,5	31,3
Po 2 hodinách čištění [l. min <sup>-1</sup> ]	16,6	34,6
Po 3 hodinách čištění [l. min <sup>-1</sup> ]	18,3	36,7
Po výplachu [l. min <sup>-1</sup> ]	18,3	36,7
Zvýšení průtoku o [%]	<b>26,3</b>	<b>14,7</b>

#### **10.2.4. Změna spojovací součásti**

Pro vyšší odolnost proti usazeninám bych jako prevenci volil šroubení z antikorozi oceli (obr. 65) namísto pozinkovaného šroubení (obr. 62, 63).

Antikorozi oceli je odolnější proti chemickým příměsím obsaženým ve vodě, kterou se formy temperují.



**Obr. 65 – Šroubení z antikorozi oceli**

### 10.3. Tepelná bilance

Metoda tepelné bilance v kapitole 9. obsahuje relevantní zdroje přívodu a odvodu tepla v energetickém systému formy. Tato metoda může být přínosem při navrhování optimalizací. Tepelnou bilancí lze zjistit předpokládané změny při realizaci dané optimalizace. Tuto metodu lze využít i obráceně (např. požadujeme-li určitou dobu cyklu, pak pomocí tepelné bilance můžeme zjistit potřebný průtok).

V našem případě může tepelná bilance podpořit následující změny (kap. 9.4):

- výběr nové temperační jednotky,
- konstrukce nové formy: změnit průměr nebo délku vrtání temperačních kanálů.

### 10.4. Souhrn

Tab. 17 – Přehled doporučení pro zlepšení výkonu chlazení

	Návrh	Kapitola
Analýza výstřiku	změna geometrie výstřiku	10.1.1.
	změna umístění vtoků ve formě	10.1.2.
	vyhnutí se místnímu přehřátí	10.1.3.
Analýza temperačního systému formy	změna temperačních jednotek	10.2.1.
	seřízení temperačních okruhů	10.2.2.
	vyčištění formy s následným pravidelným čištěním nádrže	10.2.3.
	antikoroziční spojovací součásti	10.2.4.
Tepelná bilance	výběr nové temperační jednotky – dimenzování výkonu jednotky	10.3.
	konstrukce nové formy: změnit průměr nebo délku vrtaných temperačních kanálů	

## 11. Závěr

Diplomová práce byla vypracována na základě spolupráce se společností AGC Automotive Czech a.s., která poskytla formu M2050. Cílem této diplomové práce bylo analyzovat právě tuto formu při procesu enkapsulace autoskla. Následná zjištění přenést do návrhů, které by zvýšily efektivitu chlazení, snížily čas celého cyklu na vstřikovací stroj a optimalizovaly související náklady.

Teoretická část práce nejprve popisuje technologii vstřikování plastů a materiály, které se pro tuto technologii využívají. Následně jsou detailněji popsány jednotlivé fáze vstřikovacího procesu a uvedeny hlavní funkce vstřikovací formy. Na základě jedné z hlavních funkcí vstřikovací formy (přenosu tepla) jsou uvedeny různé konstrukční a procesní parametry, které přenos tepla zvyšují. V závěru teoretické části práce je popsána technologie a problematika enkapsulace autoskla.

Praktická část diplomové práce představuje společnost AGC Automotive Czech a.s. a obsahuje důležité procesní a konstrukční parametry formy M2050. Na základě těchto parametrů jsou vypracovány analýzy: mouldflow analysis, průřezová analýza výstřiku, analýza temperačního systému formy a tepelná bilance formy. Závěry z těchto analýz přispěly k navržení konstrukčních a procesních opatření tak, aby bylo docíleno efektivnějšího chlazení. Souhrn navržených opatření je uveden v kapitole 10.4..

V budoucích výzkumech a odborných pracích bych se zaměřil především na návrh média a celkového temperačního systému tak, aby se snížilo zanášení temperačních kanálků a jiných částí systému na minimum.

## 12. Seznam zdrojů

- [1] LENFELD, prof. Dr. Ing. Petr. *Technologie vstřikování* [online]. 1. Liberec: Publi, 2015 [cit. 2017-12-16]. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/Cover.html>
- [2] KREBS, Ing. Stefan. *Technologie zpracování plastů a kompozitů* [online]. Praha [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/116/TZPK-Pr-4-ATT00154.pdf>. Přednáška. ČVUT.
- [3] LENFELD, Doc. Dr. Ing. Petr. *Vstřikování plastů*. Liberec. Výuková práce. TUL. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/04.htmv](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htmv)
- [4] KAZMER, David O. *Injection Mold Design Engineering. 2*. Munich: Hanser, 2016. ISBN 978-1-56990-570-8.
- [5] BĚHÁLEK, Ph.D. Ing. Luboš. *Polymery* [online]. 1. Svitavy: Publi, 2016 [cit. 2018-03-05]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [6] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [7] TPE – Termoplastický elastomer. *RESINEX* [online]. ČR: RESINEX Group, ©2018 [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: [http://www.resinex.cz/polymerove-typy/tpe.html?gclid=EAlaIqobChMI9OXhybnQ2QIVwbvtCh3r6wDhEAMYASAAEg LX4\\_D\\_BwE](http://www.resinex.cz/polymerove-typy/tpe.html?gclid=EAlaIqobChMI9OXhybnQ2QIVwbvtCh3r6wDhEAMYASAAEg LX4_D_BwE)
- [8] Glass Encapsulation. *Elastron Thermoplastic Elastomers* [online]. COPYRIGHT © 2017 ELASTRON [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <http://www.elastron.com/glass-encapsulation>
- [9] Hydrogenated Styrenic Block Copolymer Offers Benefits for PSAs. *ASI* [online]. All Rights Reserved BNP Media: Copyright ©2018, 2003 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <https://www.adhesivesmag.com/articles/85446-hydrogenated-styrenic-block-copolymer-offers-benefits-for-psas>

- [10] GRÜNDKEN, M. a S. KUWAHARA. New styrene block copolymer with low oxygen transmission rat. *TPE magazine* [online]. 2013 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z:  
[https://www.kuraray.eu/fileadmin/presse/publikationen/downloads\\_k\\_fair\\_2013/Elastomer/publications/2013\\_TPE\\_Magazine\\_2013-04\\_technical\\_report.pdf](https://www.kuraray.eu/fileadmin/presse/publikationen/downloads_k_fair_2013/Elastomer/publications/2013_TPE_Magazine_2013-04_technical_report.pdf)
- [11] Zhou, H (ed.) 2013, *Computer Modeling for Injection Molding : Simulation, Optimization, and Control*, Wiley, Somerset. Available from: ProQuest Ebook Central. [24 February 2018].
- [12] ZEMAN, Lubomír. Temperace vstřikovacích forem - důležitá podmínka výroby výstřiků z termoplastů, 2. část. *Temperace vstřikovacích forem* [online]. PLAST FORM SERVICE, s.r.o, 2015 [cit. 2017-12-16]. Dostupné z:  
<http://www.plasticportal.cz/cs/temperace-vstrikovacich-forem-dulezita-podminka-vyroby-vystriku-z-termoplastu-2-cast/c/3086>
- [13] Ejection temperature. *Autodesk Knowledge Network* [online]. 2018 [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/MoldflowInsight/files/GUID-B9945158-A176-40D7-882E-E45B178D04E7-htm.html>
- [14] BOBEK, PH.D., Ing. Jiří. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů* [online]. 1. Liberec: Publi, 2015 [cit. 2017-12-16]. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné z:  
<https://publi.cz/books/179/Cover.html>
- [15] BĚHÁLEK, L.: Teplotní analýza vstřikovacích forem s ohledem na kvalitu plastových výrobků. In *Mezinárodní vědecké sympozium u příležitosti 25. výročí katedry tváření a plastů*, [cit. 2018-4-17]. Liberec : TU v Liberci, 2004, s. 29-36. ISBN 80-7083-856-6.
- [16] *VÝROBA VSTŘIKOVACÍ FORMY* [online]. Brno, 2009 [cit. 2018-03-07]. Dostupné z:  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=14760](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=14760).  
 Diplomová práce. VUT.
- [17] Tepelná kapacita, měrná tepelná kapacita. *Nabla* [online]. Čr: ∇ nabla, 2013 [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: <http://www.nabla.cz/obsah/fyzika/molekulova-fyzika-a-termika/tepelna-kapacita-merna-tepelna-kapacita.php>

- [18] AUTOMOTIVE GLAZING. *SAINT-COBAIN* [online]. [cit. 2018-07-16]. Dostupné z: <http://www.saint-gobain-sekurit.com/glossary/automotive-glazing>
- [19] GLÜCK, B.: Heizwasser Netze, VEB Verlag für Bauwesen Berlin. Berlin 1985
- [20] ZEMAN, Lubomír. Temperace vstřikovacích forem - důležitá podmínka výroby výstřiků z termoplastů, 3. část. *PlasticPortal.eu* [online]. ČR: PLAST FORM SERVICE, s.r.o, 2015 [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: [www.plasticportal.cz/cs/temperace-vstrikovacich-forem-dulezita-podminka-vyroby-vystriku-z-termoplastu-3-cast/c/3087/](http://www.plasticportal.cz/cs/temperace-vstrikovacich-forem-dulezita-podminka-vyroby-vystriku-z-termoplastu-3-cast/c/3087/)
- [21] Raček J.: Technická mechanika. Mechanika tekutin a termomechanika. Nakladatelství Z. Novotný, Brno, 2007
- [22] ZEMAN, Lubomír. Vliv temperace vstřikovacích forem na kvalitu a cenu výstřiků z termoplastů (část 1.) [online]. PLAST FORM SERVICE, s.r.o, 2013 [cit. 2017-12-16]. Dostupné z: <http://www.plasticportal.sk/sk/vliv-temperace-vstrikovacich-forem-na-kvalitu-a-cenu-vystriku-z-termoplastu-cast-1/c/1768>
- [23] ZEMAN, Lubomír. Vliv temperace vstřikovacích forem na kvalitu a cenu výstřiků z termoplastů (část 2.) [online]. PLAST FORM SERVICE, s.r.o, 2013 [cit. 2017-12-16]. Dostupné z: <http://www.plasticportal.sk/sk/vliv-temperace-vstrikovacich-forem-na-kvalitu-a-cenu-vystriku-z-termoplastu-cast-1/c/1768>
- [24] PH.D. A KOLEKTIV, doc. Ing. Martin, Ing. Eduard MÜLLER a Ing. Štěpán HELLER. *TEMPERACE VSTŘIKOVACÍCH FOREM*. Plzeň, 2013. Projekt. ZCU.
- [25] *Encapsulation*. Loughborough Leicestershire, 2006. Článek. Loughborough University.
- [26] Vstřikování plastů. *AGC automotive Czech a.s.* [online]. ©Procesní skupina, 2015 [cit. 2018-07-16].
- [27] KREBS, Stefan. Osobní rozhovor. Praha 18.5.2018
- [28] ZEMAN, Lubomír. Temperace vstřikovacích forem - důležitá podmínka výroby výstřiků z termoplastů, 3. část. *PlasticPortal.eu* [online]. ČR: PLAST FORM SERVICE, s.r.o, 2015 [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: [www.plasticportal.cz/cs/temperace-vstrikovacich-forem-dulezita-podminka-vyroby-vystriku-z-termoplastu-4-cast/c/3088/](http://www.plasticportal.cz/cs/temperace-vstrikovacich-forem-dulezita-podminka-vyroby-vystriku-z-termoplastu-4-cast/c/3088/)



- [29] Cooling-channel configuration. *FlyingEagle* [online]. China: CNF Molds & Plastic Co., Limited., 2011 [cit. 2018-06-04]. Dostupné z: <http://www.cnf-moldmaking.com/Mold%20Technology%20Blog/Cooling-channel%20configuration,%20china%20injection%20mold%20%20China%20Mould%20maker%20%20china%20injection%20mold%20factory,%20mold%20china.htm>
- [30] BĚHÁLEK, Ing. Luboš. *TEORIE ZPRACOVÁNÍ NEKOVOVÝCH MATERIÁLŮ: Temperace vstřikovacích forem* [online]. Liberec [cit. 2018-08-04]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/2931795-Teorie-zpracovani-nekovovych-materialu.html>. Prezentace. TUL.
- [31] SOVA, Miloš. Termoplasty v praxi: praktická příručka pro konstruktéry, výrobce, zpracovatele a uživatele termoplastů. 1. vyd. Praha: Dashöfer, 1999. ISBN 80-862-2915-7.
- [32] Kapitola I. Nové technologie zaměřené na dopravní a manipulační zařízení. *INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ* [online]. VŠB-TU Ostrava, ©2009 [cit. 2018-06-05]. Dostupné z: <http://projekt150.ha-vel.cz/node/50>
- [33] Lai W.Y., Vinod S., Phelan P.E., Prasher R., Convective Heat Transfer for Water-Based Alumina Nanofluids in a Single 1.02 mm Tube, *Journal of Heat Transfer* 2009, 131:112401-1–112401-9.
- [34] Heris S.Y., Etemad S.G., Esfahany M.N., Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer, *Heat and Mass Transfer* 2006, 33:529-535.
- [35] Nguyen C.T., Roy G., Gauthier C., Galanis N., Heat transfer enhancement using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid for an electronic liquid cooling system, *Applied Thermal Engineering* 2007, 1501-1506.
- [36] Chen H., Yang W., He Y., Ding Y., Zhang L., Tan C., Lapkin A.A., Bavykin D.V., Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of titanate nanotubes (nanofluids), *Powder technology* 2008, 183:63-72.
- [37] He Y., Jin Y., Chen H., Ding Y., Cang D., Lu H., Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO<sub>2</sub> nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2007, 50:2272-2281.

- [38] Masuda H., Ebata A., Teramae K., Hishinuma N., Alternation of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of  $\gamma$  Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, and TiO<sub>2</sub> ultra-fine particles), *Netsu Bussei* 1993, 4:227-233.
- [39] LENFELD, P.: Teplotní pole ve vstříkovacích formách [ disertační práce ], TU v Liberci, 1997
- [40] *AGC Automotive Czech* [online]. 2018 [cit. 2018-08-04]. Dostupné z: <http://www.agcautomotive.cz/cs/>
- [41] *Moldflow analysis*. AGC, 2013.
- [42] Macháček, Jiří. Osobní rozhovor. Praha 20.3.2018

## 13. Seznam obrázků

Obr. 1 – Schéma vstřikovacího stroje [3] .....	12
Obr. 2 – Schéma makromolekuly [5].....	13
Obr. 3 – Struktura TPE [5] .....	14
Obr. 4 – Struktura HSBC [9] .....	15
Obr. 5 – Ukázka centrálního rozvodu polymeru ke vstřikovacím strojům [1] .....	16
Obr. 6 – Průběh vnitřního tlaku $p_i$ v dutině formy během procesu vstřikování [1] .....	18
Obr. 7 – Diagram $T(-t)$ a $p(-t)$ vstřikovacího procesu [11].....	19
Obr. 8 – Schéma diagramu $p-V-T$ vstřikovacího procesu [11].....	20
Obr. 9 – Diagram $p-V-T$ pro amorfní termoplast [1].....	20
Obr. 10 –Diagram $p-V-T$ pro semikrystalický termoplast [1] .....	20
Obr. 11 – Schéma fontánového toku [1] .....	21
Obr. 12 – Schéma otevřené dvoudeskové formy [1] .....	24
Obr. 13 – Tepelná bilance [16] .....	25
Obr. 14 – Paralelní chladicí systém [29] .....	28
Obr. 15 – Sériový chladicí systém [29] .....	29
Obr. 16 – Závislost průměru, počtu kanálů na rovnoměrnosti chlazení [15].....	30
Obr. 17 – Systém plochých přepážek [30] .....	31
Obr. 18 – Proudění temperačního média v systému plochých přepážek [15].....	31
Obr. 19 – Systém spirálových přepážek [30] .....	32
Obr. 20 - Proudění temperačního média v systému spirálových přepážek [15].....	32
Obr. 21 - Systém fontánek [30].....	33
Obr. 22 - Proudění temperačního média v systému fontánek [15] .....	33
Obr. 23 – Systém CONTURA® [15] .....	34
Obr. 24 – Procesní okno u technologie vstřikování [1].....	36
Obr. 25 – Technologie třístranné a dvoustranné enkapsulace autoskla [26] .....	41
Obr. 26 – Vyrobena autoskla - strana B (nepohledová) .....	41
Obr. 27 – Vyrobena autoskla – strana A (pohledová) .....	42
Obr. 28 – Rozdělení autoskel – pohled na pevnou část formy .....	47
Obr. 29 - Rozdělení autoskel – pohled na pohyblivou část formy.....	47
Obr. 30 – Průběh plnění Ford_CD539_FFX_Black [41].....	48
Obr. 31 – Čtyři části vstřiku rozdělené místem svaru [41] .....	48
Obr. 32 – Průřezová analýza výstřiku jednoho autoskla .....	49
Obr. 33 – Termosnímek autoskel umístěných v robotu těsně před vložením do formy ....	52

<b>Obr. 34</b> - Termosnímek vrchní poloviny pevné části formy s autosklem před procesem vstřikování TPE.....	52
<b>Obr. 35</b> – Termosnímek pevné části formy s autosklem před procesem vstřikování TPE	52
<b>Obr. 36</b> - Termosnímek pevné části formy před procesem vstřikování TPE.....	53
<b>Obr. 37</b> - Termosnímek pohyblivé části formy před procesem vstřikování TPE .....	53
<b>Obr. 38</b> – Termosnímek horní poloviny pohyblivé formy s výstřikem .....	54
<b>Obr. 39</b> - Termosnímek dolní poloviny pohyblivé formy s výstřikem.....	54
<b>Obr. 40</b> - Termosnímek kavity pevné části formy před procesem vstřikování TPE.....	55
<b>Obr. 41</b> – Model temperačních okruhů v pohyblivé části formy – pohled 1 .....	56
<b>Obr. 42</b> - Model temperačních okruhů v pohyblivé části formy – pohled 2 .....	56
<b>Obr. 43</b> - Model temperačních okruhů v pevné části formy – pohled 1 .....	57
<b>Obr. 44</b> - Model temperačních okruhů v pevné části formy – pohled 2 .....	57
<b>Obr. 45</b> – Piovan THW 9 .....	58
<b>Obr. 46</b> – Piovan THP 112-ID-F .....	58
<b>Obr. 47</b> – Zadní strana temperačních jednotek.....	59
<b>Obr. 48</b> - Hadice jednotlivých temperačních okruhů .....	59
<b>Obr. 49</b> – Měření průtokoměrem Keyence.....	60
<b>Obr. 50</b> – DSC křivky prázdný kelímek, PP a TPE.....	64
<b>Obr. 51</b> – Závislost měrné tepelné kapacity PP na teplotě.....	65
<b>Obr. 52</b> – Tvarování formy.....	65
<b>Obr. 53</b> – Forma z lukopren.....	66
<b>Obr. 54</b> – Granulát TPE .....	65
<b>Obr. 55</b> – Lítí taveniny do formy .....	66
<b>Obr. 56</b> – Vzorek č.2 pro Isomet 2114 .....	67
<b>Obr. 57</b> – Vzorek č.1 pro Isomet 2114 .....	67
<b>Obr. 58</b> – Vnitřní struktura vzorku č.2 - pohled 1.....	67
<b>Obr. 59</b> – Vnitřní struktura vzorku č.2 - pohled 2 .....	67
<b>Obr. 60</b> – Zkouška na Isometu 2114.....	67
<b>Obr. 61</b> – DSC křivka ohřevu a chlazení TPE.....	68
<b>Obr. 62</b> – Zanešené šroubení (pohled 1) .....	73
<b>Obr. 63</b> - Zanešené šroubení (pohled 2).....	74
<b>Obr. 64</b> – Čištění temperačních kanálů .....	75
<b>Obr. 65</b> – Šroubení z antikorozi oceli.....	75

## 14. Seznam tabulek

<b>Tab. 1.</b> – Rozdělení polymerních materiálů [6].....	13
<b>Tab. 2.</b> – Příklady druhů termoplastických elastomerů [8].....	14
<b>Tab. 3.</b> – Součinitel měrné tepelné kapacity vybranných materiálů [18] [19] .....	26
<b>Tab. 4.</b> – Součinitel tepelné vodivosti vybranných materiálů [18] [20] .....	27
<b>Tab. 5.</b> - Doporučené rozměry a rozložení temperačních kanálů [14] .....	30
<b>Tab. 6.</b> – Přehled nejpoužívanějších temperačních medií [31] .....	35
<b>Tab. 7.</b> – Všeobecné parametry spojené s enkapsulací ve společnosti AGC Automotive .	45
<b>Tab. 8.</b> – Parametry enkapsulace pro formu M2050 .....	46
<b>Tab. 9.</b> – Hodnoty zjištěné z průřezové analýzy.....	50
<b>Tab. 10.</b> – Délka jednotlivých temperačních okruhů.....	57
<b>Tab. 11.</b> – Naměřené hodnoty průtoku v temperačních okuzích .....	60
<b>Tab. 12.</b> – Hodnoty z data listu TC7 WEZ 901 .....	63
<b>Tab. 13.</b> – Naměřené hodnoty tepelné vodivosti TC7 WEZ 901 u vzorku 2 .....	68
<b>Tab. 14.</b> – Porovnání temperační jednotky THW-9 s THP-6-12 .....	73
<b>Tab. 15.</b> – Porovnání temperační jednotky THP 112-ID-F s THP 112-L4.....	73
<b>Tab. 16.</b> – Naměřené průtoky před a po vyčištění temperačních kanálů.....	75
<b>Tab. 17.</b> – Přehled doporučení pro zlepšení výkonu chlazení .....	76

## 15. Seznam grafů

<b>Graf 1</b> - Výkon temperační jednotky Piován THW 9.....	59
<b>Graf 2</b> - Výkon temperační jednotky. Piován THP 112-ID-F.....	60
<b>Graf 3</b> – Odpor systému v závislosti na výkonu čerpadla u LH pohyblivé části .....	61
<b>Graf 4</b> – Odpor systému v závislosti na výkonu čerpadla u RH pohyblivé části.....	61
<b>Graf 5</b> – Odpor systému v závislosti na výkonu čerpadla u LH pevné části .....	61
<b>Graf 6</b> - Odpor systému v závislosti na výkonu čerpadla u RH pevné části.....	62
<b>Graf 7</b> - Odpor systému v závislosti na výkonu čerpadla u core pevné části.....	62
<b>Graf 8</b> – Porovnání výkonu temperační jednotky THP 112-ID-F s THP 112-L4.....	73
<b>Graf 9</b> – Porovnání výkonu temperační jednotky THW-9 s THP-6-12.....	73

## 16. Seznam použitých zkratk

NR – (Natural Rubber) přírodní kaučuk

SBR – (Styrene Butadiene Rubber) styren butadienový kaučuk

EPDM – (Ethylene Propylene Diene Monomer) ethylen – propylen pryž

TPE – termoplastický elastomer

HSBC - hydrogenovaný styrenový blokový kopolymer

PVC – polyvinylchlorid

AGC – (Automotive Glass Company) automobilová sklářská společnost

3D - trojrozměrný

Re – Reynoldsovo číslo

Fe – železo

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – oxid hlinitý

TiO<sub>2</sub> – oxid titaničitý

LH – levá strana

RH – pravá strana

PP – polypropylen

DSC – digitální skenovací kalolimetr

## 17. Seznam použitých jednotek

- g.mol<sup>-1</sup> – gram na mol (jednotka molární hmotnosti)  
° C – Celsiův stupeň (jednotka teploty)  
bar – bar (jednotka tlaku)  
J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> – joule na kilogram, Kelvin (jednotka měrné tepelné kapacity)  
J.g<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> – joule na gram, Kelvin (jednotka měrné tepelné kapacity)  
kJ.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> – kilojoule na kilogram, Kelvin (jednotka měrné tepelné kapacity)  
W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> – watt na metr, Kelvin (jednotka součinitele tepelné vodivosti)  
g.cm<sup>3</sup> - gram na centimetr krychlový (jednotka hustoty)  
l.min<sup>-1</sup> – litr za minutu (jednotka průtoku)  
m – metr (jednotka délky)  
mm – milimetr (jednotka délky)  
N.mm<sup>-2</sup> – newton na milimetr čtverečný (jednotka pevnosti v tahu)  
N.mm<sup>-1</sup> – newton na milimetr (jednotka odolnosti proti roztžení)  
J.kg<sup>-1</sup> – joule na kilogram (jednotka měrné entalpie)  
kJ.kg<sup>-1</sup> – kilojoule na kilogram (jednotka měrné entalpie)  
m.s<sup>-1</sup> – metr za sekundu (jednotka rychlosti)  
kg – kilogram (jednotka hmotnosti)  
g – gram (jednotka hmotnosti)  
W – watt (jednotka výkonu)  
kW – kilowatt (jednotka výkonu)  
s – sekunda (jednotka času)  
J – joule (jednotka energie a práce)  
s<sup>-1</sup> - jednotka kinetické viskozity  
K – Kelvin (jednotka tepla)  
m<sup>2</sup> – metr čtverečný (jednotka plochy)  
mm<sup>2</sup> – milimetr čtverečný (jednotka plochy)  
mm<sup>3</sup> – milimetr krychlový (jednotka objemu)  
MPa – megapascal (jednotka tlaku)  
W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup> - watt na metr čtverečný, Kelvin (jednotka součinitele přestupu tepla)