



# Optimalizace chlazení vložky klobouku přístrojové desky automobilu

## Bakalářská práce

*Studijní program:* B2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2301R000 – Strojní inženýrství  
*Autor práce:* **Jan Vysokai**  
*Vedoucí práce:* Ing. Pavel Brdlík, Ph.D.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta strojní  
Akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan Vysokai**  
Osobní číslo: **S15000373**  
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojní inženýrství**  
Název tématu: **Optimalizace chlazení vložky klobouku přístrojové desky automobilu**  
Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Rozbor vlivu chlazení formy na tvar vstříkovaného dílu.
2. Rozbor problematiky výroby a účinnosti tepmeračních okruhů.
3. Výběr dílu a nástroje pro optimalizaci chlazení v programu Autodesk Moldflow.
4. Provedení simulačních výpočtů.
5. Provedení konvenčních a nekonvenčních metod temperace.
6. Vyhodnocení výsledků a doporučení pro výrobu.

Rozsah grafických prací: tabulky, grafy  
Rozsah pracovní zprávy: cca 30  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

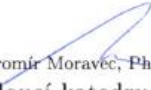
- [1] JOHANNABER, Friedrich a Walter MICHAELI. *Handbuch Spritzgießen*. München: Carl Hanser Verlag, 2004. ISBN 3-446-22966-3.  
[2] MICHAELI, Walter. *Plastics Processing: An Introduction*. Munich: Hanser, 1995. ISBN-13: 978-1569901441.  
[3] SHOEMAKER, Jay. *Moldflow Design Guide A Resource for Plastic Engineers*. Cincinnati: Hanser, 2006. ISBN-13:978-1-56990-403-9.  
[4] AUTODESK. *Manuál programu Autodesk MoldflowInsight*. Autodesk 2014.  
[5] Odborné časopisy.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Brdlík, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání bakalářské práce: 1. února 2016  
Termín odevzdání bakalářské práce: 1. května 2017

  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



  
Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. února 2016

## Prohlášení

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

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

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

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

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 1.7.2016

Podpis:



## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. P. Brdlíkovi, Ph.D za cenné rady při jejím zpracování. Za odborné vedení, děkuji mému konzultantovi Ing. A. Auspergerovi, Ph.D. Chci také poděkovat své rodině za jejich psychickou a hmotnou podporu během mého studia.

Dále bych chtěl poděkovat firmě Magna Bohemia Toolshop za příležitost a možnost optimalizace vložky, firmě TD-IS za poskytnuté softwarové zázemí potřebné k návrhu a analýze, firmě Libeos za technickou a odbornou podporu, firmě Innomia za ochotu a konzultaci.

## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá optimalizací chlazení vložky vstřikovací formy. V práci je provedeno porovnání chladicí účinnosti okruhů a mechanická stabilita vložky stávající, vyrobené konvenční technologií třískového obrábění, a optimalizovaných vložek. První z optimalizovaných vložek je opět vyrobitelná běžným třískovým obráběním. Pro druhý optimalizovaný způsob, tzv. konformní chlazení, je nutné použít technologii „Direct metal laser sintering“. Rozbor efektivity vložek proběhl na základě výsledků ze simulačního softwaru Autodesk Moldflow Insight 2016, kde každá z vložek je zatížena vstřikovacím cyklem. Ze získaných výsledků je možné hodnotit tepelnou stabilitu formy, průběh tuhnutí plastového dílu a deformace vložky formy.

## **Klíčová slova:**

plastový díl, vstřikovací forma, tvárník, tvárnice, vložka formy, optimalizace chlazení, teplota, podíl zatuhnuté tloušťky stěny.

## **Annotation**

This bachelor thesis examines the cooling optimization of the injection mold insert. There is carried out comparison of the cooling channel efficiency and mechanical stability of the existing insert made with conventional technology machining and optimized inserts in the study. The first optimized insert is made with conventional technology. For the second optimized method called “conformal cooling” it is necessary to use a technology called “Direct metal laser sintering”. The analysis of the effectiveness of the inserts was carried out based on the results from the simulation software Autodesk Moldflow Insight 2016. Each of the inserts is loaded by the injection cycle. The results rate the thermal stability of the mold and frozen process of the plastic part and the mold insert deformation.

## **Key words:**

plastic part, injection mold, core, cavity, mold insert, cooling optimization, temperature, frozen layer fraction of the part.

## Obsah

1. ÚVOD .....	12
2. TEORETICKÁ ČÁST .....	13
2.1. Proces vstřikování .....	13
2.2. Plastikace .....	13
2.3. Fáze vstřiku .....	14
2.4. Fáze dotlaku .....	15
2.5. Fáze chlazení .....	15
2.6. Vstřikovací forma .....	15
2.7. Ustálený cyklus .....	18
2.8. Reynoldsovo číslo .....	18
2.9. Obtékání překážky .....	19
2.10. Metodika návrhů chladících okruhů formy .....	20
2.10.1. Zásady návrhu chladícího okruhu .....	20
2.10.2. Konvenční výroba, třískovým obráběním .....	23
2.10.3. Chlazení systémem Contura .....	25
2.10.4. Konformní chlazení .....	26
2.10.5. Vysoce tepelně vodivé materiály .....	27
2.11. DMLS (Direct Metal Laser Sintering) .....	28
2.12. Autodesk Moldflow Insight 2016 .....	29
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	30
3.1. Úvod do experimentální části .....	30
3.2. Tvorba modelu analýzy .....	30
3.2.1. Model plastového dílu .....	30
3.2.2. Tvorba modelu chlazení .....	31
3.2.3. Model prostoru formy .....	33
3.3. Model vložky klobouku .....	34
3.3.1. Aktuální varianta „Var1“ .....	34
3.3.2. 1. optimalizovaná varianta „Var2“ .....	35
3.3.3. 2. optimalizovaná varianta „Var3“ .....	36
3.4. Okrajové podmínky simulace .....	37
3.4.1. Vstřik – dotlak .....	37
3.4.2. Vazby vložky klobouku .....	38
3.5. Výsledky ze simulace .....	39
3.5.1. Tlak v dutině formy .....	39
3.5.2. Analýza variant chlazení klobouku .....	40

3.5.3.	Průběh tlaku vody v okruhu .....	40
3.5.4.	Průběh Reynoldsova čísla v okruhu.....	41
3.5.5.	Teplota chladícího media během cyklu.....	42
3.5.6.	Tepelná zátěž okruhu .....	45
3.5.7.	Kontrola 3D kanálu .....	46
3.5.8.	Definování řezu A .....	48
3.5.9.	Teplota stěny formy .....	48
3.5.10.	Teplota formy.....	52
3.5.11.	Teplota dílu na konci cyklu .....	53
3.5.12.	Průběh tuhnutí dílu .....	54
3.5.13.	Deformace vložky klobouku.....	56
4.	Vyhodnocení výsledků .....	60
4.1.	Tlak v dutině formy .....	60
4.2.	Chlazení vložky klobouku.....	60
4.2.1.	Tlak okruhu .....	60
4.2.2.	Teploty okruhu .....	60
4.3.	Teplota stěny formy.....	61
4.4.	Plastový díl .....	61
4.4.1.	Teplota dílu na konci cyklu .....	61
4.4.2.	Průběh tuhnutí dílu .....	62
4.4.3.	Ekonomické vyhodnocení.....	62
4.5.	Deformace vložky klobouku .....	62
5.	Závěr .....	64
6.	Seznam použitých zdrojů.....	66



## Seznam obrázků

Obr. 2.1 Proces vstřikování [6] .....	13
Obr. 2.2 Nastavení teplot válce .....	14
Obr. 2.3 Řízení vstřiku na stroji .....	14
Obr. 2.4 Řízení dotlaku na stroji.....	15
Obr. 2.5 Vstřikovací forma.....	16
Obr. 2.6 Vstřikovací stroj „lis“ .....	16
Obr. 2.7 Distribuce taveniny formou, horký systém. ....	17
Obr. 2.8 Temperační zařízení .....	17
Obr. 2.9 Teoretická změna teploty stěny formy v cyklu .....	18
Obr. 2.10 Teoretická změna teploty stěny formy v průběhu několika cyklů .....	18
Obr. 2.11 Výpočet reynoldsova čísla.....	19
Obr. 2.12 Průběh proudění kanálem.....	19
Obr. 2.14 Chlazení optimalizované .....	20
Obr. 2.13 Chlazení neoptimalizované .....	20
Obr. 2.15 Závislost rychlostí proudění/intenzitě chlazení/tlakové ztrátě.....	21
Obr. 2.17 Optimální vzdálenost okruhů od plochy formy .....	21
Obr. 2.16 Optimální rozložení okruhů chlazení/temperace mezi sebou.....	21
Obr. 2.18 porovnání doporučeného a nedoporučeného návrhu chlazení .....	22
Obr. 2.19 Graf závislosti doby chlazení na teplotě formy .....	23
Obr. 2.20 Konvenčním způsobem vytvořený okruh ve formě[18].....	24
Obr. 2.21 Zátka okruhu [18] .....	24
Obr. 2.22 Kanál s přepážkou [18].....	25
Obr. 2.23 Přepážka kanálu [18].....	25
Obr. 2.24 Kanál s trubičkou [18].....	25
Obr. 2.25 Teoretická změna teploty stěny formy v průběhu několika cyklů [14], [15] .....	26
Obr. 2.27 Konformní chlazení Inovativní chladící okruh [13] .....	26
Obr. 2.26 Klasicky vrtaný chladící okruh [13].....	26
Obr. 2.28 Průběh teplot v kanále s médiem a ve stěně formy [12].....	27
Tab. 2.29 Tvarové vložky ze slitiny Cu.....	28
Obr. 2.30 metoda výroby DLMS [22].....	29
Obr. 2.31 Použitý software .....	29
Obr. 3.1 Chyba sítě – volné plochy, hrany .....	30
Obr. 3.2 Chyba sítě – překrytí, průniky .....	31
Obr. 3.3 Druhy použitých sítí .....	31
Obr. 3.4 Model chlazení formy .....	32
Obr. 3.5 Chladící kanál Var 3 .....	32
Obr. 3.6 Chladící kanál Var 3 .....	32
Obr. 3.7 Vstupní parametry chlazení .....	33

Obr. 3.8 Model prostoru formy .....	33
Obr. 3.9 Model vložky Var1 .....	34
Obr. 3.10 Kanál s přepážkou.....	35
Obr. 3.11 Model vložky Var2 .....	35
Obr. 3.12 Model vložky Var3 .....	36
Obr. 3.13 Vložka klobouku, popis povrchu.....	37
Obr. 3.14 Vstříkovaný díl .....	37
Obr. 3.15 Okrajové podmínky pohybu vložky klobouku.....	38
Obr. 3.16 Okrajové podmínky pohybu vložky klobouku.....	38
Obr. 3.17 Průběh tlaků při vstřiku.....	39
Obr. 3.18 Průběh tlaků při přepnutí, dotlaku .....	39
Obr. 3.19 Průběh tlaků v dotlaku.....	40
Obr. 3.20 Tvar chlazení jednotlivých variant.....	40
Obr. 3.21 Průběh tlaku v chladicím okruhu.....	41
Obr. 3.22 Reynoldsovo číslo okruhů při 5 [L/min].....	41
Obr. 3.23 Rozdíl teplot, mezi vstupem a výstup kanálu, na začátku ustáleného cyklu.....	43
Obr. 3.24 Rozdíl teplot, mezi vstupem a výstup kanálu, v době $t=15.24$ [s] ustáleného cyklu	43
Obr. 3.25 Změna teploty vody na výstupu, během ustáleného cyklu .....	44
Obr. 3.26 Změna teploty vody na výstupu, v cyklech – od rozjezdu formy .....	45
Obr. 3.27 Chlazení – tepelný tok na začátku cyklu.....	46
Obr. 3.28 Chlazení – čas nejvyššího tepelného toku.....	46
Obr. 3.29 Rozbor 3D chladicího kanálu .....	47
Obr. 3.30 Definování řezu A.....	48
Obr. 3.31 Teplota stěny pevné strany formy .....	49
Obr. 3.32 Teplota stěny pohyblivé strany formy .....	49
Obr. 3.33 Průběh teplot vložky klobouku – v ustáleném cyklu .....	50
Obr. 3.34 Porovnání průběhu teplot vložky klobouku a pevné strany - v ustáleném cyklu.....	51
Obr. 3.35 Porovnání průběhu teplot vložky klobouku a pevné strany formy, ve 20 cyklech....	51
Obr. 3.36 Průběh teplot formy v řezu, během cyklu.....	52
Obr. 3.37 Průběh teplot plastového dílu, v řezu.....	53
Obr. 3.38 Průběh teplot vně a uvnitř plastového dílu, v řezu.....	54
Obr. 3.39 Průběh tuhnutí plastového dílu .....	55
Obr. 3.40 Použitý souřadnicový systém.....	56
Obr. 3.41 Deformace vložky klobouku před otevřením prostředních trysek.....	57
Obr. 3.42 Deformace vložky klobouku na konci vstřiku .....	57
Obr. 3.44 Deformace vložky klobouku na konci cyklu .....	58
Obr. 3.43 Deformace vložky klobouku a zatuhnutá vrstva sílu v 9.8 [s].....	58
Obr. 3.45 Deformace vložky klobouku na konci cyklu .....	59

## Seznam tabulek

Tab. 1 Vzdálenosti kanálů od dutiny formy (tlak v dutině max. 100 [MPa]) [12].....	22
Tab. 2 Temperační prostředky [12] .....	23
Tab. 3 Součinitel teplotní vodivosti materiálů [12].....	27
Tab. 4 Tabulky rozdílů teplot, počáteční a koncové, pro 5. a 20. výrobní cyklus .....	45
Tab. 5 Teplota vstřikovaného dílu uvnitř stěny.....	61
Tab. 6 Teplota stěny vstřikovaného dílu .....	61
Tab. 7 Ekonomické zhodnocení jednotlivých variant .....	62
Tab. 8 Deformace vložky klobouku během vstřiku .....	63
Tab. 9 Deformace vložky klobouku během dotlaku .....	63

## 1. ÚVOD

Vstřikování je nejvíce rozšířené zpracování plastů, které se dnes používá. Na jeho výstupní produkt se dá pohlížet z mnoha hledisek a podle nich také hodnotit jeho kvalitu. Na vstřikovaný díl můžeme pohlížet z hlediska rozměrnosti, tedy požadovaný díl by měl být vyroben co nejpřesněji a své rozměry by si měl udržet i během svého užívání, provozu. Dalším hlediskem může být kvalita povrchu, pokud je díl pohledový je nutné zaručit správný lesk, či stejnoměrně matnou strukturu. Ozubená kola, pouzdra, ventily, či jen obyčejné místo pro uchycení šroubem, tyto a jiné případy vyžadují mechanickou pevnost, tuhost vstřikovaného dílu, tedy další hledisko hodnocení kvality. Některé díly nevyžadují nic speciálního, stačí, pokud bude díl celý, tedy dolitý ve všech směrech, částech tvaru a to už od prvního kusu najeté výroby. Jedním z hlavních faktorů, které ovlivňují významným způsobem výslednou finální kvalitu výrobků, je kvalita temperace, chlazení formy. Tato skutečnost je důvod, proč se v práci věnuji právě této problematice.

Vybraný díl k analýze je ocelová vložka klobouku přístrojové desky. Tvar vložky lze pomyslně rozdělit na dvě části „masivní“, což je část vložky, která se lícuje do formy. Díky svému tvaru „kvádr“ je dobře chladitelná a pevnostně tuhá. Druhá pomyslná část vložky je tzv. oblast „kšiltu“, tato oblast je zakřivený „tenký břít“ lichoběžníkového průřezu. Vzhledem ke svému tvaru se v této části velice špatně realizuje chlazení, tuhost kšiltu je nevyhovující pro tlaky vznikající při výrobě plastového dílu. Tvar se tedy vyznačuje místním přehřátím a nutností podpěr proti ohybu. Pokud by došlo ke změně materiálu nebo technologie, je vyšší pravděpodobnost vzniku problémů, vad vstřikovaného dílu, nutnosti prodloužit cyklus, atd. Tvar je stále používán v různých variacích, a proto je důležité, aby byl analyzován a odladěn. Jeho odladěním vzniknou benefity procesní, zvětšení technologického okna, a závislé na životnosti formy. Tyto výhody šetří čas a materiál, obojí jsou nositeli ceny výrobku. Analýza a optimalizace tedy znamenají snížení nákladů spojených s výrobou formy a nákladů na odladění výrobního procesu vstřikovaného dílu.

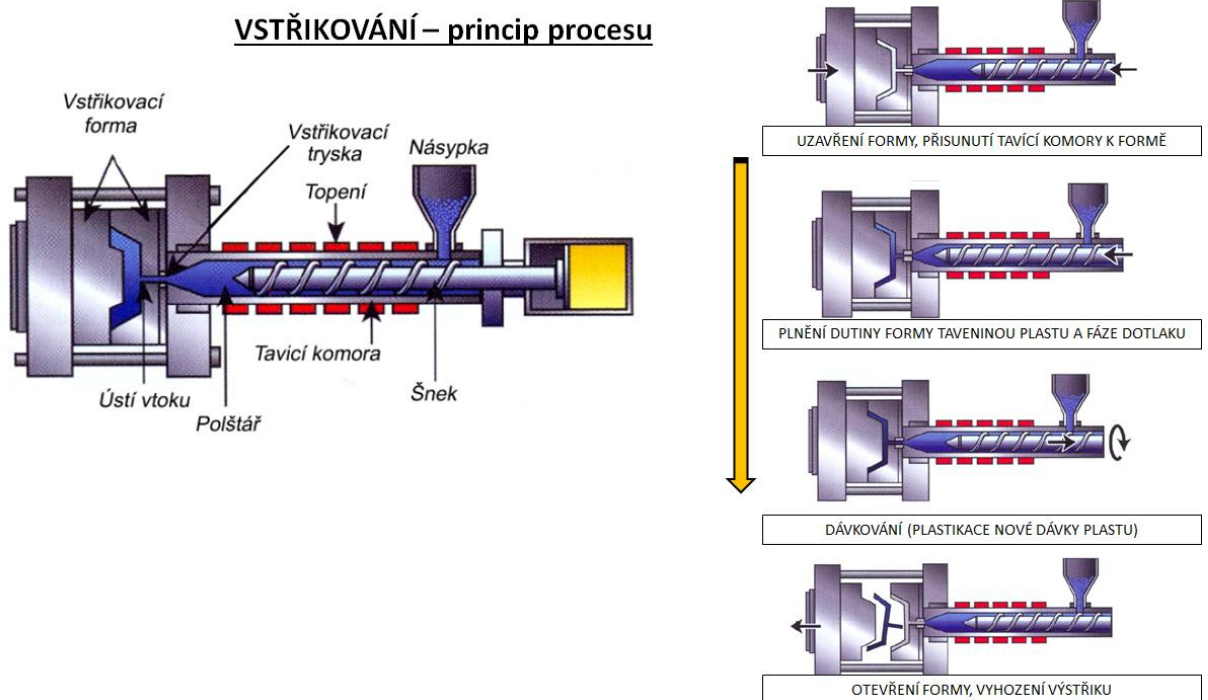
Chlazení vložky lze realizovat konvenčními metodami, tedy vrtáním děr. Další možnost realizace okruhu ve vložce je metodou sintrování, tedy spékání ocelového prášku a po vrstvách tvorba celého modelu, metoda DMLS. Tato varianta dovoluje tvorbu tzv. konturového chlazení.

## 2. TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1. Proces vstřikování

Vstřikování je způsob zpracování plastů viz obr. 2.1. Z granulovaného materiálu, se v procesu zpracování, vytvoří tavenina a tou je následně plněna dutina formy. V dutině formy tavenina chladne a tuhne. Po zatuhnutí a zchlazení dílu na požadovanou teplotu je díl z formy vyjmut.

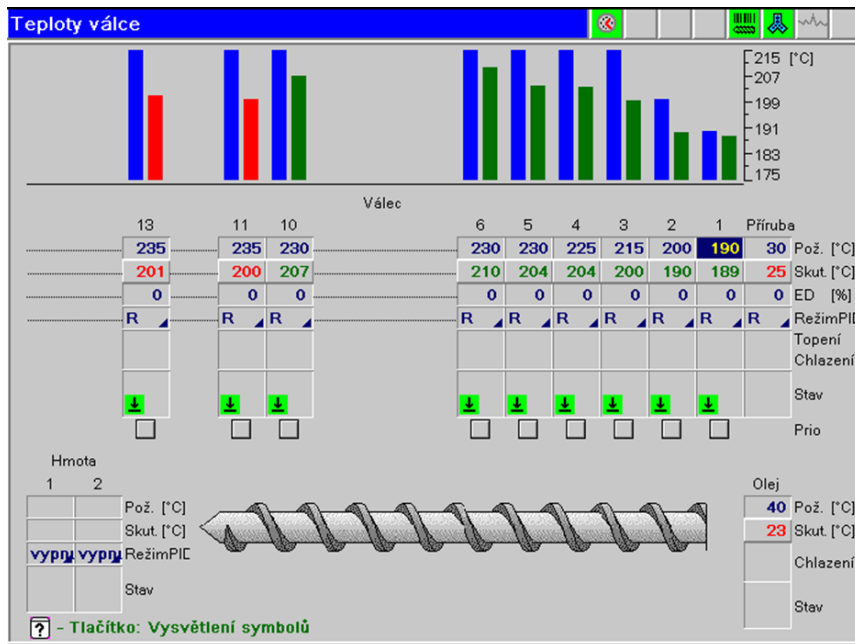
Celý výrobní proces je označován jako cyklus výroby. Tento cyklus se skládá z několika částí které, vzhledem k danému materiálu, vyžadují své nastavení. Celkové nastavení všech výrobních parametrů se nazývá technologií výroby. [1], [3], [4]



Obr. 2.1 Proces vstřikování [6]

### 2.2. Plastikace

Při plastikaci „šnekování“ vytváří šnek v agregátu rotační pohyb, kterým materiál taví, homogenizuje a následně dopravuje před čelo šneku. Materiál před čelem šneku je označován jako tavenina. Aby došlo k roztavení materiálu je nutné ho zahřát na danou teplotu, nastavení viz obr. 2.2. Při průchodu materiálu přes šnek je tato teplota udržována od teplotních pásem agregátu, která vyhřívají komoru šneku. Další teplo je vytvářeno třením materiálu během rotace šneku. [1], [2]

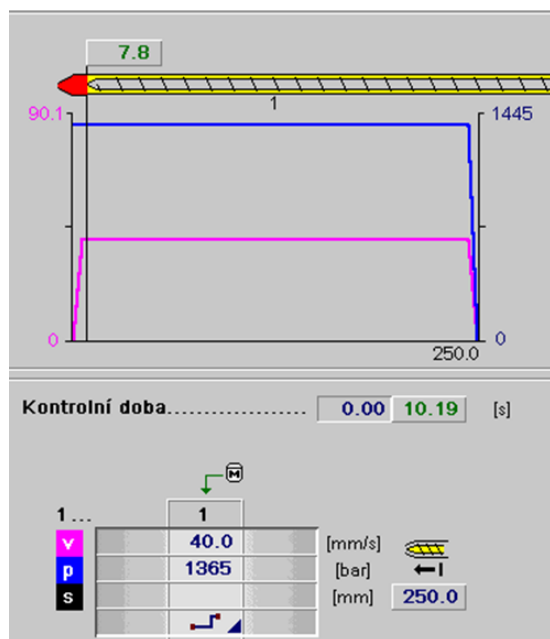


Obr. 2.2 Nastavení teplot válce

### 2.3. Fáze vstřiku

Připravená tavenina je axiálním posuvem šneku vtlačena do dutiny formy. Pohyb šneku je řízen rychlostí posuvu v závislosti na poloze šneku. Řízení vstřiku viz obr. 2.3.

Konec vstřikování je definován tzv. pozicí přepnutí. Pozice přepnutí je místo, nebo doba kdy stroj přestane používat parametry nastavené pro vstřik. Pro další postup cyklu budou použity hodnoty nastavené pro průběh dotlaku. [1], [2]

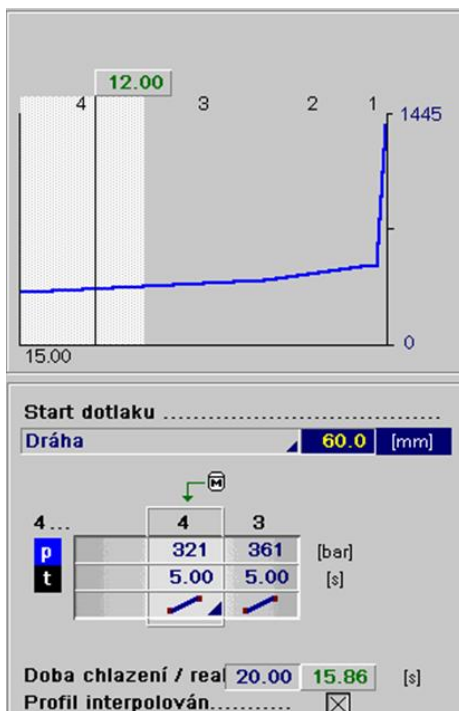


Obr. 2.3 Řízení vstřiku na stroji

## 2.4. Fáze dotlaku

Tato fáze má zásadní vliv na rozměry vstřikovaného dílu. Je zde nahrazován úbytek materiálu ve formě vyvolaný smrštěním hmoty, při solidifikaci polymeru.

Proces dotlaku je řízen nastaveným tlakem po danou dobu. Řízení dotlaku viz obr. 2.4. [1], [2]



Obr. 2.4 Řízení dotlaku na stroji

## 2.5. Fáze chlazení

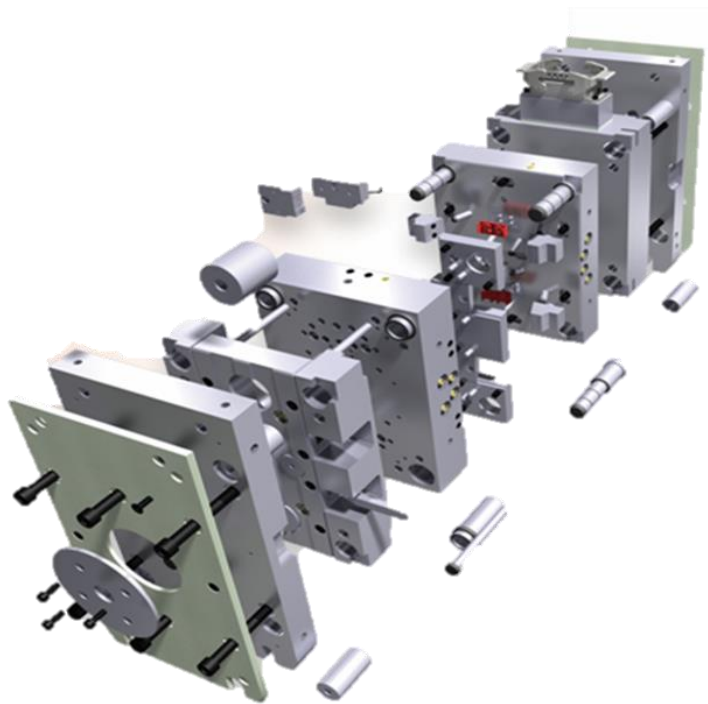
Chlazení je doba, po kterou je díl nutné ponechat ve formě, aby zchladnul na teplotu, při které ho lze odformovat.

Doba chlazení závisí zejména na tloušťce stěny vylisku, druhu plastu, teplotě taveniny a teplotě formy. [1], [2]

## 2.6. Vstřikovací forma

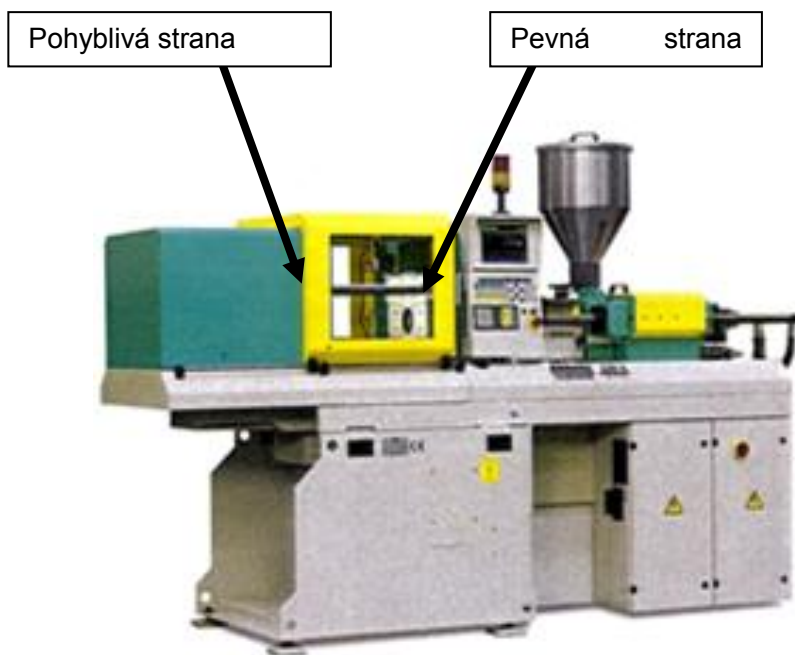
Vstřikovací forma je nástroj pro výrobu lisovaných dílů z plastu. Dává tavenině tvar výsledného výrobku, tavenina v ní se ochlazuje, tuhne. Po dosažení dostatečné tvarové stability díl odformuje a je odebrán hotový výrobek [10].

Základní části formy jsou tvárník, tvárnice, vtokový systém, vyhazovací systém, temperační systém, centrovací a vodící elementy. Rozklad formy viz obr. 2.5.



Obr. 2.5 Vstřikovací forma

Tvárník a tvárnice jsou poloviny formy, jejich spojením vzniká uvnitř formy dutina, kavita. Kavita má tvar vstřikovaného dílu. Tvárník i tvárnice mohou být jak na pohyblivé straně, tak na pevné straně stroje, viz obr. 2.6.

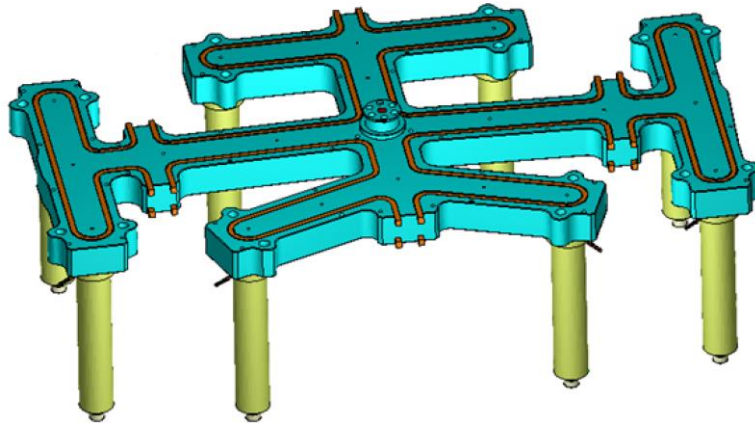


Obr. 2.6 Vstřikovací stroj „lis“



Pevná strana formy je strana upnutá na upínací desku stroje u agregátu. Přes tuto polovinu formy proudí tavenina do kavity, to znamená, že pevná strana musí obsahovat vtokový systém formy.

Vtokový systém může být například vyhřívaný „horký“ systém, viz obr. 2.7. Pohyblivá strana formy, je strana, která při otevírání formy na stroji koná posuvný pohyb. Nejčastěji se na této straně setkáme s vyhazovacím systémem. Vyhazovací systém odformovává a vysouvá díl z formy. [10]



*Obr. 2.7 Distribuce taveniny formou, horký systém.*

Temperační systém formy zaručuje kontinuální průběh temperace, chlazení dílu. Chladicí medium proudí okruhy temperačního systému formy. Proudění a změnu teploty chladiva vytváří temperační zařízení tzv. „Term“ viz obr. 2.8.

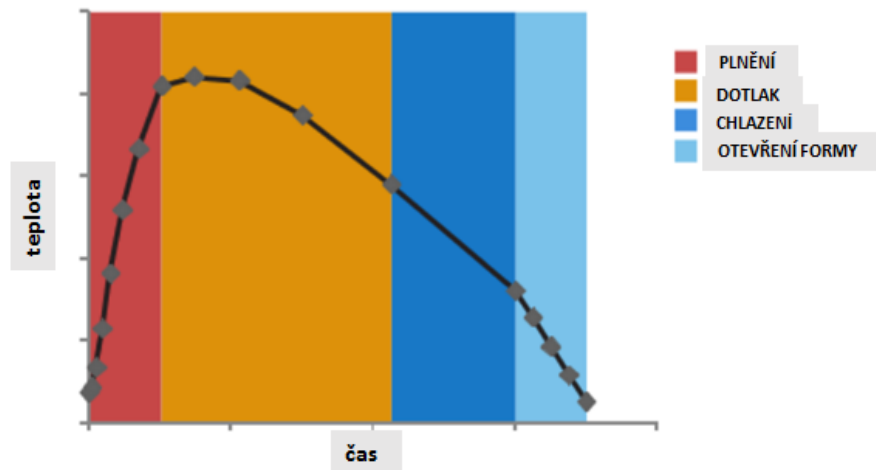


*Obr. 2.8 Temperační zařízení*

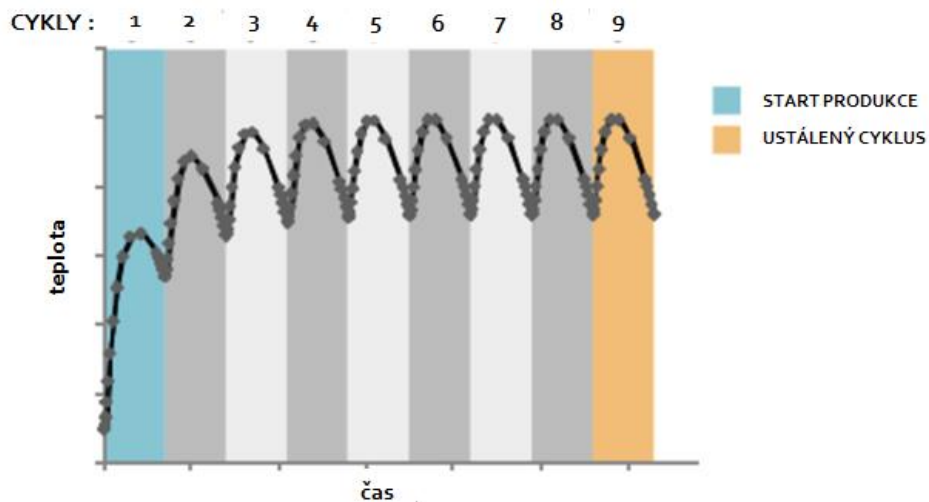
## 2.7. Ustálený cyklus

Ustáleným cyklem je myšlen takový výrobní cyklus, při kterém jsou výrobní hodnoty mezi jednotlivými cykly „stejné“.

Teplota stěny formy na začátku ustáleného cyklu se obvykle pohybuje mezi  $10 \div 30$  [°C] nad teplotou chladicího media. V cyklu teplota stěny kolísá, což je vidět na obr. 2.9. Pokud nárůst teploty stěny během cyklu není chlazení schopno odvést, vzniká rozdíl teplot stěny mezi jednotlivými cykly obr. 2.10. Tento rozdíl teplot je charakteristický pro nájezd formy. Počet zdvihů, po kterých bude mít forma ustálenou teplotu je závislý na kvalitě chlazení.



Obr. 2.9 Teoretická změna teploty stěny formy v cyklu



Obr. 2.10 Teoretická změna teploty stěny formy v průběhu několika cyklů

## 2.8. Reynoldsovo číslo

Pomocí Reynoldsova čísla se určí, zda je proudění laminární, nebo turbulentní. Pro maximální odvod tepla je důležité, aby bylo v chladicím okruhu dosaženo turbulentního

proudění. Proudění v okruhu se uvažuje za turbulentní pokud  $Re > 4000$ . Výpočet viz obr. 2.11. [3]

Při turbulentním proudění částice stále přecházejí z jedné vrstvy do druhé, dochází k intenzivnímu míšení, což značně zvyšuje odpor proti pohybu, rostou ztráty. [6]

$$Re = \frac{v_s \times d}{\nu} \quad (1)$$

Obr. 2.11 Výpočet reynoldsova čísla [6]

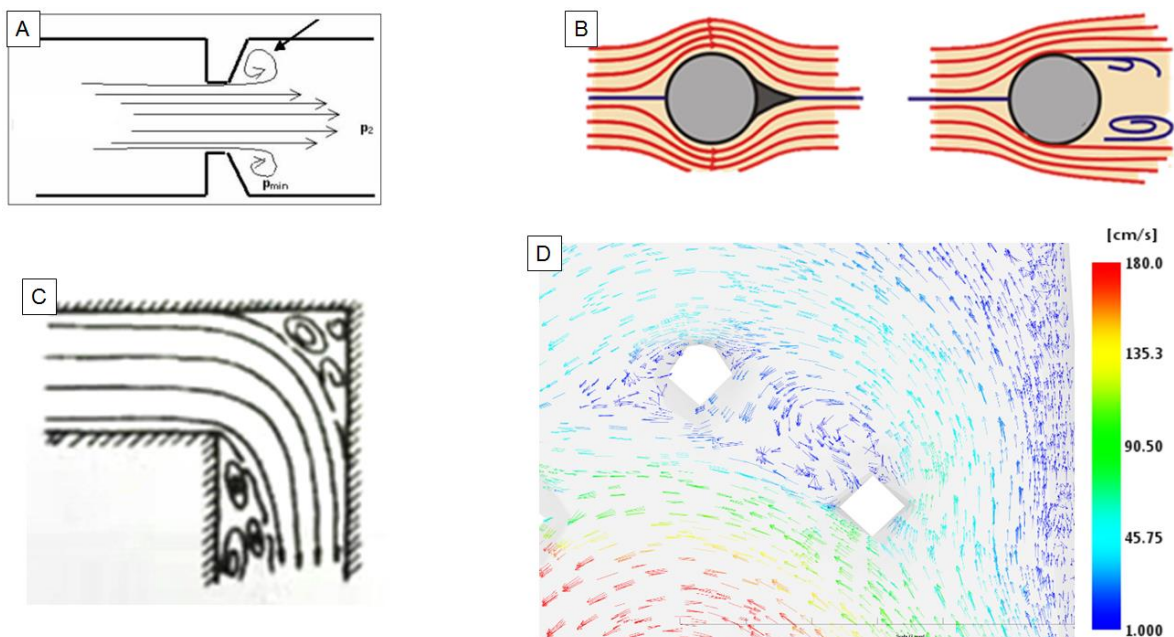
$v_s$  = střední hodnota rychlosti proudění kapaliny v daném průřezu

$d$  = označuje hydraulický průměr trubice

$\nu$  = kinematická viskozita

## 2.9. Obtékání překážky

Stojí-li v cestě proudící tekutině nějaká překážka, tekutina ji obtéká. Za překážkou, v závislosti na rychlosti proudění a tvaru překážky, může vznikat vír, úplav viz obr. 2.12. V těchto místech dochází ke zpomalení výměny chladícího media, které se zde ohřívá na vyšší teplotu. Tyto oblasti pak vykazují místní zvýšenou teplotu formy. [5], [20]



Obr. 2.12 Průběh proudění kanálem

A, B – zobrazují proudění za překážkou, vznik úplavu, vírů. [20]

C – proudění 90° rohem [5]

D – proudění vody 3D kanálem, dle Autodesk Moldflow

## 2.10. Metodika návrhů chladících okruhů formy

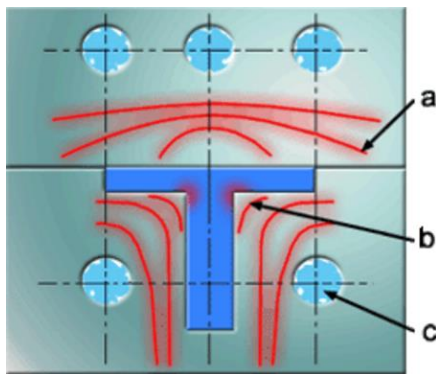
### 2.10.1. Zásady návrhu chladícího okruhu

Temperační systém formy přímo ovlivňuje jakost dílu a ekonomičnost výroby. Z hlediska jakosti dílu ovlivňuje vznik povrchových a strukturálních vad, například studené spoje, diesel efekt, zástřiky, propadliny, lesk/mat plochy, krystalizaci atd. Ekonomičnost výroby je závislá na délce cyklu, jehož majoritní složkou je chlazení dílu, tedy ta část, při které se snižuje teplota dílu na maximální teplotu tvarové stálosti daného materiálu. Rovněž důležitou skutečností, kterou je nutné zohlednit při návrhu temperačního systému vstřikovací formy, je značné namáhání vstřikovací formy v důsledku vysokého tlaku taveniny při vstřikování a dotlaku. Přítomnost temperačních kanálů snižuje mechanickou únosnost vstřikovací formy. [10], [11]

### Homogenní teplotní pole

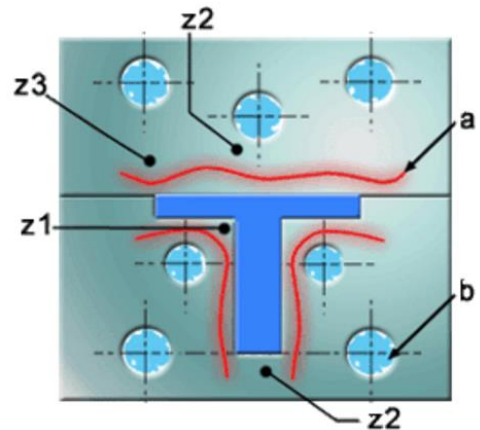
Rovnoměrného teplotního pole lze dosáhnout optimalizací odvodu tepla. Efektivní odvod tepla je zajištěn, pokud jsou správné pozice chladících kanálů, proudění chladiva je turbulentní, rozdíl teploty chladiva mezi vstupem a výstupem z kanálu je  $2\div 3$  [°C]. [11]

Obr. 2.13 Zobrazuje problematicky chladitelnou oblast rohu dílu s rozdílnou tloušťkou stěny. Nejvyšší teplotu vykazují vnitřní rohy a nejnižší plocha užší stěny dílu. Pro zajištění rovnoměrné teploty povrchu formy je nutné optimalizovat pozici chladících kanálů, viz obr 2.14.



Obr. 2.13 Chlazení neoptimalizované

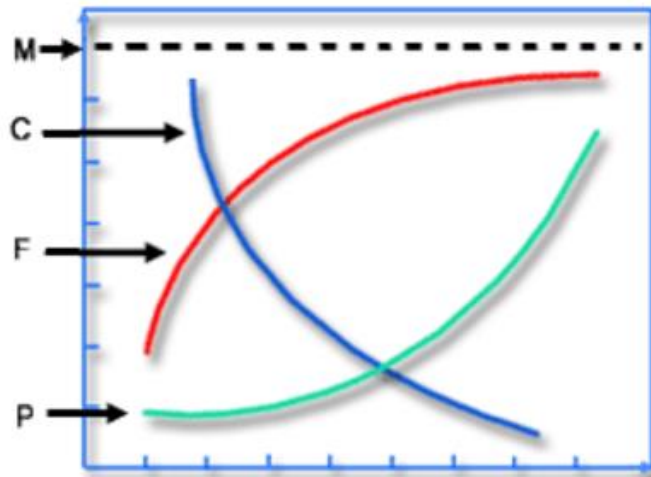
a - Isotherma  
b – přehřátá místa, akumulace tepla  
c – chladící okruh



Obr. 2.14 Chlazení optimalizované

a - Isotherma  
b – chladící okruh  
z1, z2, z3 – porovnávaná místa,  
optimalizovaný odvod tepla

Doporučená hodnota turbulentního proudění je  $10\,000\text{Re}$ . Tato hodnota obsahuje kompromis mezi intenzitou chlazení a tlakovou ztrátou okruhu, viz obr. 2.15.

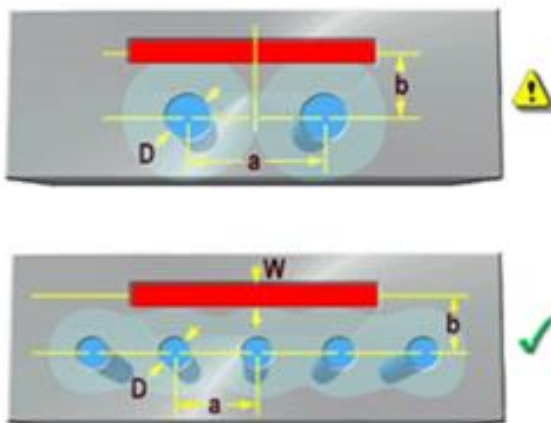


Obr. 2.15 Závislost rychlostí proudění/intenzitě chlazení/tlakové ztrátě  
*M* – maximální tepelný tok, *C* – doba chlazení, *F* – intenzita odvodu tepla, *P* – tlaková ztráta okruhu

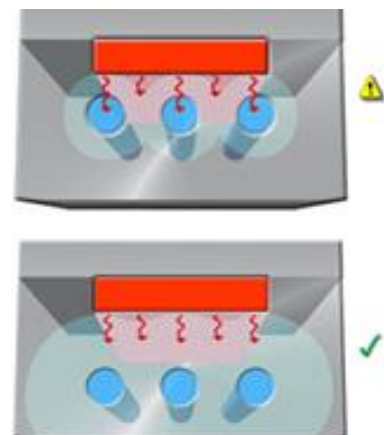
### Jakost povrchu

Homogenní rozložení teplotního pole, je důležité pro vznik vzhledových částí, kopie tvaru dutiny formy [11]. Kopírování povrchu formy je závislé na místní teplotě plochy formy, variace teplot povrchu vzniklé špatně navrženým chladícím okruhem, vytváří rozdílně matné, lesklé plochy. Vzniklá rozdílná reflexe světla v ploše je považována za vzhledovou vadu vstřikovaného dílu.

Při návrhu rovnoměrného chlazení se lze držet zásady, více menších kanálů je lepší než méně velkých, optimální rozložení kanálů, vůči sobě, v závislosti na průměru kanálu je  $3D \div 5D$  viz obr. 2.16. Vzdálenost mezi chladícími kanály a stěnou formy, z hlediska rovnoměrného teplotního pole, je vhodné navýšit například u dezénovaných ploch, které jsou náchylnější na změnu matu, viz obr. 2.17, doporučené hodnoty jsou  $2D \div 2,5D$  od kavity formy.



Obr. 2.16 Optimální rozložení okruhů chlazení/temperace mezi sebou.



Obr. 2.17 Optimální vzdálenost okruhů od plochy formy

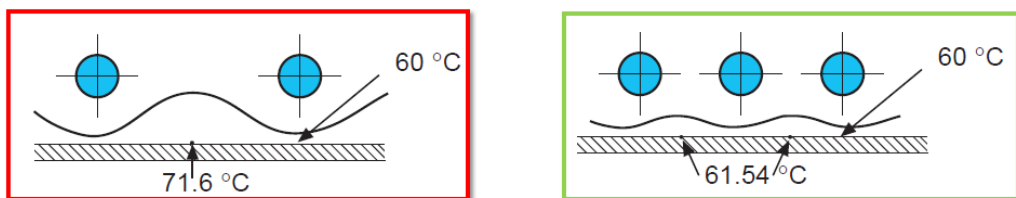
## Ekonomičnost

Hledisko ekonomičnosti předpokládá návrh chlazení podporující maximální intenzitu chlazení, nezávislou na nutnosti tvorby homogenního teplotního pole. Snahou je přiblížit chladicí okruh nejlépe tvaru, nezávisle na vzdálenosti okolních okruhů od plochy formy. Teplota chladicího média je snížena na nejnižší možnou teplotu, nejčastěji takou, aby nedocházelo k orosení formy. V takovémto případě je třeba uvažovat nad možností vzniku deformací vzniklých nerovnoměrným chlazením dílu, vzniku vakuol, zborcení stěny v závislosti na tlaku plastu v dutině formy. Doporučené hodnoty vzdáleností, pro návrh chladicího okruhu od stěny formy, s bezpečností na 100 [MPa] v dutině formy viz tab. 1.

Tab. 1 Vzdálenosti kanálů od dutiny formy (tlak v dutině max. 100 [MPa]) [12]

Ød [mm]	6	8	10	12	14	16	18	20
s [mm]	4	6	8	12	15	20	25	30
t [mm]	10	14	17	20	24	27	30	34
b [mm]	4	5	7	8	10	11	12	14

Vrtání okruhů v oceli je časově náročné, při snaze zlevnit výrobu formy jsou některé návrhy okruhů modelovány, se záměrem snížit počet kanálů na minimum, takováto konstrukce podporuje vznik nežádoucích vad, nebo problémů s plněním dílu. Obvykle jsou nutné delší rozjížděcí cykly, větší množství rozjezdových zmetků. Obr. 2.18 ukazuje rozdíl teplot formy mezi optimálním a nedoporučeným návrhem chlazení. Intenzita chlazení, rozsah použitelných teplot temperace/chlazení je závislý na použitém médiu, klady a zápory viz tab. 2.



Obr. 2.18 porovnání doporučeného a nedoporučeného návrhu chlazení



Tab. 2 Temperační prostředky [12]

\*) v tlakových okruzích možno vodu používat i při vyšších teplotách

\*\*\*) lze potlačit upravením vody

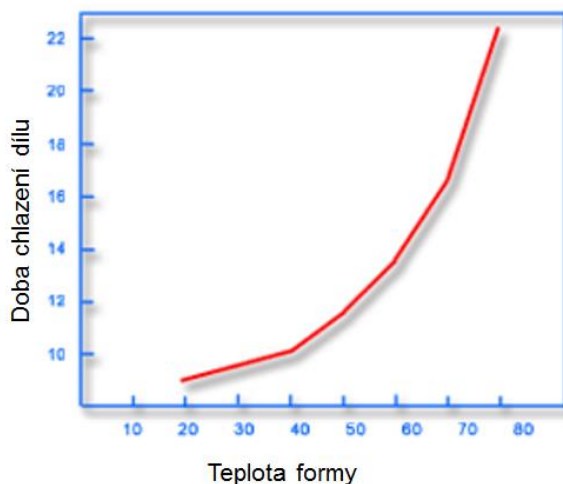
Typ	Výhody	Nevýhody
voda	dobrá přestup tepla, nízká viskozita, nízká cena, ekologická nezávadnost	použitelné do 90 °C *), vznik koroze **), usazování kamene
olej	možnost temperace i nad 100 °C	zhoršený přestup tepla
glykoly <sup>5</sup>	omezení koroze a ucpání systému	stárnutí, znečišťování prostředí

### Doba chlazení

Obvykle materiál ve středu stěny dílu dosáhne teploty zamrznutí, teplota měknutí dle Vicata, během fáze chlazení. Chladicí doba, ve většině případů, dosahuje 80 procent celkové doby cyklu. [11]

Dva hlavní faktory, které ovlivňují dobu chlazení, jsou teplota taveniny a teplota formy. Zkrácení doby chlazení lze provést snížením těchto teplot, nebo navýšením intenzity chlazení.

Změna doby chlazení v závislosti na teplotě formy viz obr.

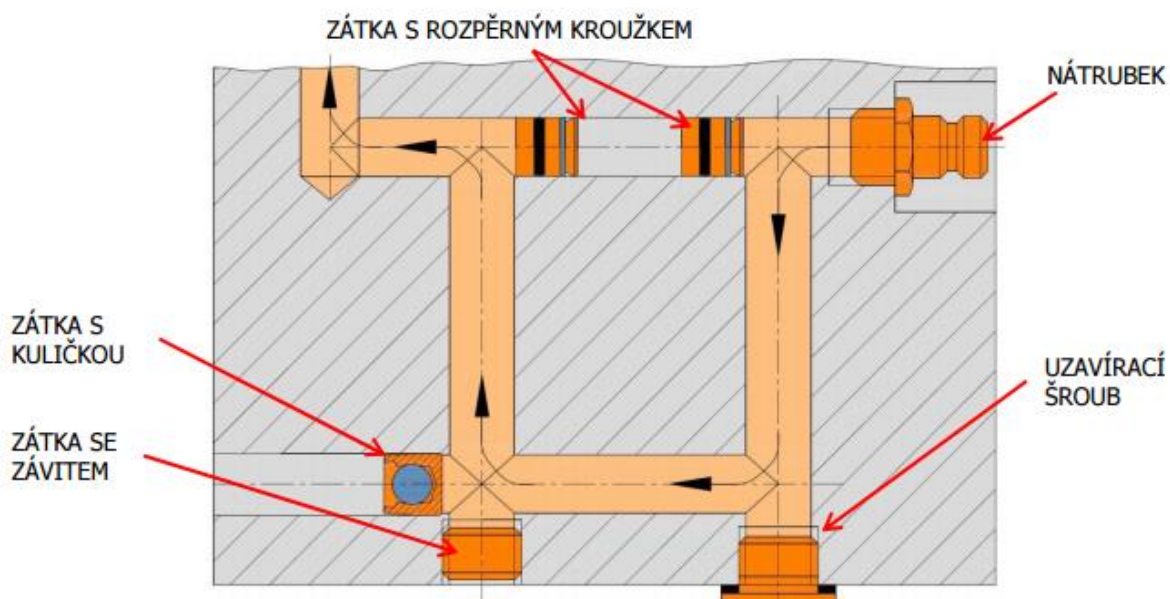


Obr. 2.19 Graf závislosti doby chlazení na teplotě formy

### 2.10.2. Konvenční výroba, třískovým obráběním

Okruh chlazení/temperace formy je soustava protínajících se vrtaných děr, viz obr. 2.20. Během vrtání děr dochází ke spojení jednotlivých okruhů nebo narušení předpokládaného směru proudění chladicího média, v takovýchto případech je nutné použití okruhových zátek viz obr. 2.21, které usměrňují proudění média.

Místa, která nedovolují tvorbu okruhu napojením dvou a více vrtaných děr, lze chladit za pomoci vložených elementů do vrtané díry, které umožňují využití jedné díry pro proudění ve dvou směrech. Tyto normální konvenční chlazení se nazývají: kanál s přepážkou „komín“, kanál s trubičkou „fontána“. Po cestě temperačního média se nesmí vytvářet mrtvé kouty, usazují se zde nečistoty a vzniká koroze. [10], [11]



Obr. 2.20 Konvenčním způsobem vytvořený okruh ve formě [18]



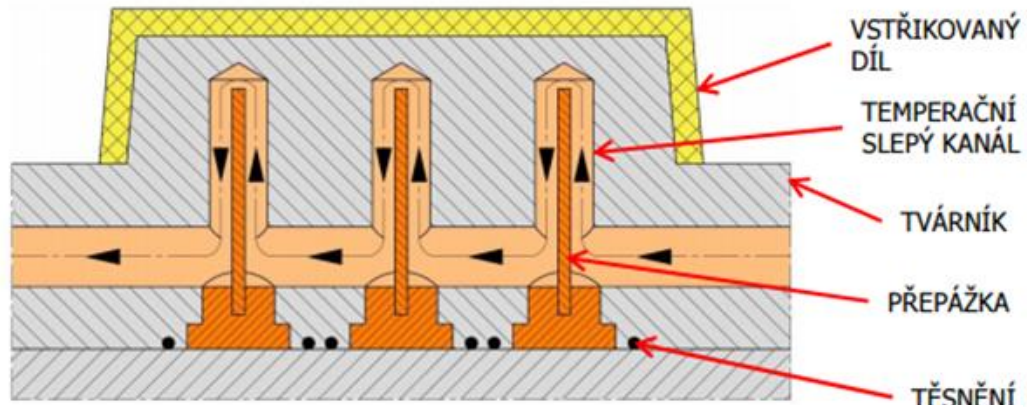
Obr. 2.21 Zátka okruhu [18]

### Kanál s přepážkou

Vrtaný kanál musí zajišťovat proudění média ve dvou směrech, vytvoření okruhu zajišťuje přepážka vložená do středu vrtaného kanálu. Pro proudění je kanál rozdělen na dvě části, čímž dochází ke zmenšení průřezu a tím snížení celkového průtoku okruhu. Kanál, ve kterém je aplikována přepážka, je vhodné navrhovat s větším průměrem, než mají ostatní části okruhu tak, aby polovina kanálu zachovávala minimálně stejný průřez se zbylými částmi okruhu [7].

Kanál s přepážkou viz obr. 2.22. Druhy používaných přepážek viz obr. 2.23.





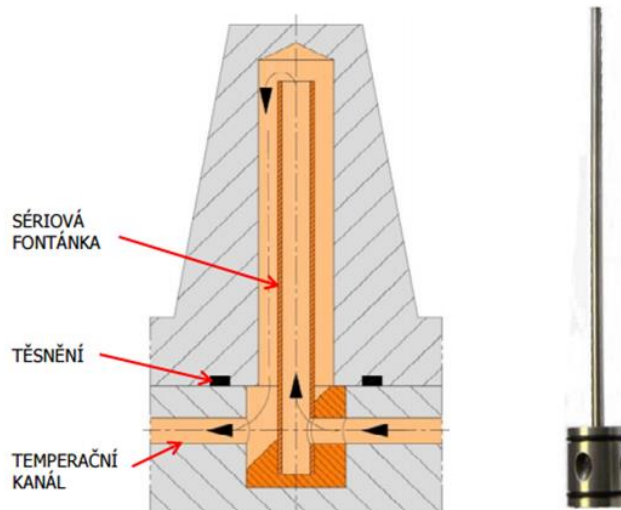
Obr. 2.22 Kanál s přepážkou [18]



Obr. 2.23 Přepážka kanálu [18]

### Kanál s trubičkou

Vrtaný kanál musí zajišťovat proudění média ve dvou směrech, vytvoření okruhu zajišťuje trubička, vložená do středu vrtaného kanálu [11]. Chladivo proudí trubičkou, při výstupu z trubičky vytváří tzv. fontánový efekt „tryskání“ chladivá na protější stranu. V této části vzniká silné turbulentní proudění, vysoká intenzita chlazení. Chladivo po výstupu z trubičky proudí mezi stěnou kanálu a trubičkou zpět ke spodní části, která umožňuje postup proudění pouze výstupním směrem. Kanál s trubičkou viz obr. 2.24.

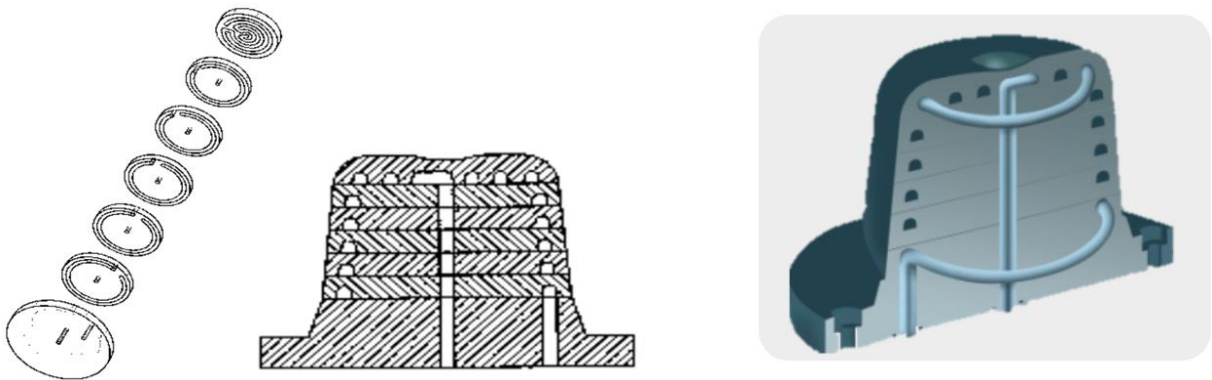


Obr. 2.24 Kanál s trubičkou [18]

### 2.10.3. Chlazení systémem Contura

Systém tvorby chladícího okruhu Contura je založen na přesném kopírování tvaru výrobku [19]. Tvárník je „rozřezán“ na vrstvy, které po složení tvoří celý model, počet vrstev je závislý na velikosti modelu viz obr. 2.25. Na stykových plochách jsou

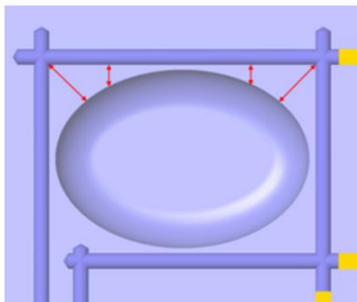
následně vytvořeny temperační kanály, nejčastěji frézováním. Jednotlivé části, vrstvy se do kompaktního, těsného, pevného tvárníku spojí pájením natvrdo v podtlaku. Před uvedením do provozu je nutné provést konečnou úpravu takto vzniklého tvárníku, frézování, leštění. Výhodou takového systému je rovnoměrné rozložení teplotního pole, což v konečném důsledku umožňuje odstranit problémy, které se u tvarově složitých, obtížně chladitelných tvárníků vyskytují. Optimální tvar temperačních kanálů systému Contura umožňuje i zrychlený odvod tepla z dutiny formy, zrychlení je způsobeno přesným kopírováním tvaru a možností umístit chladicí kanál 3 [mm] od stěny formy. Zásadní nevýhodou systému Contura jsou náklady na jeho realizaci. [14], [15], [16], [19]



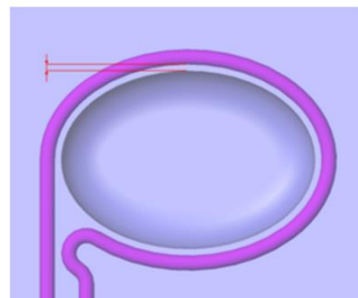
Obr. 2.25 Teoretická změna teploty stěny formy v průběhu několika cyklů [14], [15]

#### 2.10.4. Konformní chlazení

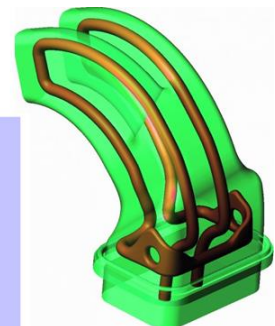
Konformní chlazení znamená, že chladicí okruh kopíruje povrchový tvar v nejmenší možné vzdálenosti od stěny vylisku, min. 3 [mm]. Konformní chlazení je vyráběno spékáním kovového prášku laserem, metoda DMLS. Metodu DMLS - Direct Metal Laser Sintering lze aplikovat do nových forem nebo při opravě formy. Chladicí kanály Konformního chlazení lze na vyžádání ošetřit antikorozní povrchovou úpravou. Porovnání konvenční a konformní metody viz obr. 2.26, obr. 2.27.[13], [15]



Obr. 2.26 Klasický vrtaný chladicí okruh [13]



Obr. 2.27 Konformní chlazení  
Inovativní chladicí okruh [13]

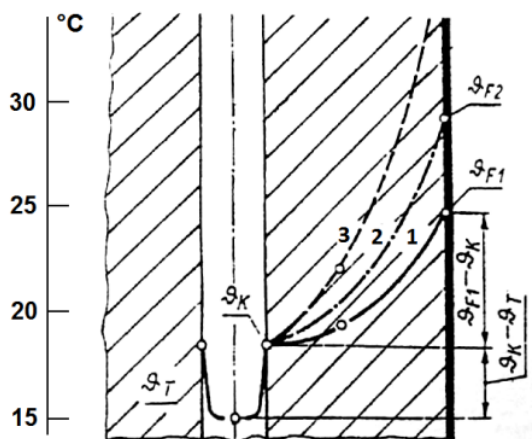


### 2.10.5. Vysoce tepelně vodivé materiály

Přenos tepla přivedeného taveninou plastu do dutiny vstřikovací formy je závislý na tepelné vodivosti materiálů použitých k výrobě příslušných dílů formy. Vysoce tepelně vodivé materiály jako např. měď či její slitiny mají tepelnou vodivost mnohonásobně vyšší než oceli a jsou tedy schopné dané množství tepla odvést mnohonásobně rychleji.

Při výběru optimálního chlazení, je třeba nezapomínat na možnost změny materiálu vyhazovače, vložky formy. Změnou materiálu, cílíme na změnu prostupu tepla danou vložkou, formou. Pokud je prostup tepla, teplotní vodivost, zvýšen, není nutné zavádět sofistikované chlazení, teplo se přes objem vložky dostane do chladicího kanálu „okamžitě“ i když je kanál od plochy více vzdálen. Vzhledem k vysoké tepelné vodivosti musí být z vložky zajištěn dobrý odvod tepla, nutnost chlazení.

Množství tepla, které projde stěnou formy do/z temperačního kanálu je závislé zejména na tepelné vodivosti materiálu „ $\lambda$ “, tloušťce stěny a rozdílu teplot. Průběh teploty v kanálu a ve stěně je znázorněn na obr. 2.28. Jelikož největší vliv má teplotní vodivost, využívají se pro tvarové části formy vložky ze slitin Cu, CuBe, které mají  $\lambda$  mnohem vyšší než běžně používaná ocel. Příklady materiálů s jejich teplotními vodivostmi jsou v Tab. 3. [12]



Obr. 2.28 Průběh teplot v kanále s médiem a ve stěně formy [12]

$\vartheta_K$  – teplota stěny kanálu,  
 $\vartheta_T$  – teplota chladiva,  
 $\vartheta_{F1}, F2, F3$  – teplota stěny dutiny  
 1- beryliový bronz, 2- konstrukční ocel,  
 3- chromová ocel

Tab. 3 Součinitel teplotní vodivosti materiálů [12]

Materiál užitý v simulaci  $\lambda_{P20} = 29 \text{ W/mK}$

Materiál	$\lambda$ [W/mK]
Stříbro	410
Hliník	204
Měď	395
CuBe <sub>2</sub>	113
Ocel měkká	44
Ocel chromová	40
Ocel niklová	26
Plasty	0,2 – 1,2
Vzduch	0,04
Voda	0,19
Olej	0,16

### Popis materiálů Ampco, Ampcoloy, Moldmax

Slitiny mědi a hliníku rozšiřují možnosti volby materiálů ve výrobě forem pro vstřikování plastů a zjednodušují konstrukci těchto nástrojů například tím, že není nutné aplikovat nákladné chlazení. Díky nižším dobám vstřikovacích cyklů umožňují mnohonásobně vyšší výrobní výkon, srovnáno s běžnými typy nástrojových ocelí. Materiály jsou zásadně svařitelné, lze je hloubit, jsou tvarovatelné a lze je povlakovat. V zásadě je možné rozlišovat dvě Oblasti použití: 1. teplotní aplikace například jádra forem, vložky, čelisti, pouzdra pro ústí vtoků, topné hroty 2. mechanické aplikace např. vodící sloupky, vyhazovací prvky, středící prvky, vodící lišty. V praxi se často vyskytuje kombinace nároků teplotních i otěruvzdorných. Při volbě vhodného materiálu je nutné zvolit požadovanou prioritu. Přestože vysoká tepelná vodivost způsobuje při erodování delší dobu zpracování, lze tyto materiály erodováním zpracovávat. Příklady využití viz obr. 2.29. [17]



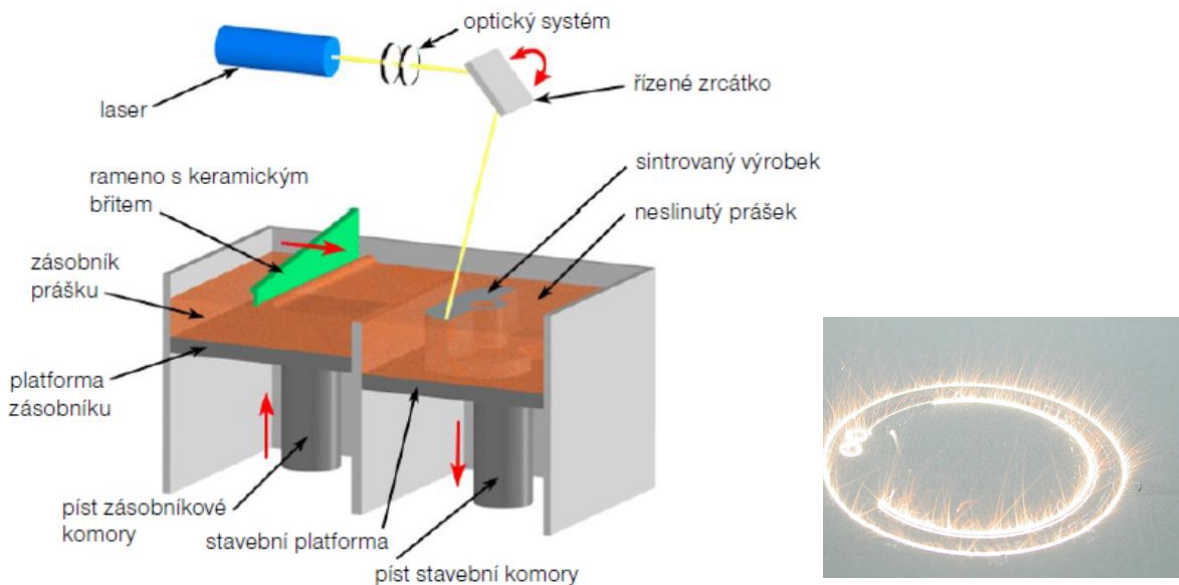
Tab. 2.29 Tvarové vložky ze slitiny Cu

### 2.11. DMLS (Direct Metal Laser Sintering)

Výroba kovových dílů přímo z CAD dat, postup založený na tavení velmi jemných vrstev kovového prášku pomocí laserového paprsku dle obr. 2.30. Do procesního softwaru jsou nejprve importována 3D CAD data vyráběného dílu, operátor stroje navrhne optimální výrobní pozici dílu a zvolí vhodnou tloušťku spékáných vrstev. Správná volba tloušťky vrstev (0,02 mm nebo 0,04 mm) je důležitá zejména s ohledem na přesnost a rychlost výroby – tenčí vrstva znamená vyšší přesnost, ale prodlužuje výrobní čas. Software podle druhu zvoleného materiálu přiřadí správné technologické parametry stavby a „rozřeže“ 3D data na jednotlivé vrstvy. Dále je do pracovní komory zařízení upnuta ocelová platforma, na které jsou vyráběné díly stavěny. V místě dopadu laserového paprsku o výkonu 200 až 400 [W] je kovový prášek lokálně roztaven. Dochází k jeho protavení k podkladové vrstvě a následnému tuhnutí do pevného stavu. V průběhu stavby dílu je nezbytná fixace správné polohy dílu pomocí podpůrné struktury, která je

ukotvena k základní ocelové platformě a je stavěna zároveň s výrobkem. Ocelová platforma zároveň odvádí teplo vznikající při spékání, takže roztavený kov tuhne velmi rychle. [13], [22]

Po zakončení výrobního procesu je platforma s výrobky vyjmuta z pracovního prostoru zařízení a díly jsou odděleny od platformy. Nespotřebovaný prášek je přemístěn odsáním do zásobníku a z 98 procent je znovu použit pro další výrobu. Dokončovací operace jsou nezbytnou součástí výrobního procesu. Nejprve je nutno odstranit podpůrné struktury z povrchu výrobku a poté lze povrch dále tryskat, brousit, leštit či obrábět stejným způsobem, jako klasický kovový materiál. [13], [22]



Obr. 2.30 metoda výroby DLMS [22]

## 2.12. Autodesk Moldflow Insight 2016

Autodesk Moldflow Insight je simulační software, za pomoci kterého lze sledovat průběh plnění dutiny, působení dotlaku, průběh chlazení a následné deformace vstřikovaných dílů. Změnou vstupních parametrů lze proces tedy odladit, či najít nejlepší varianty pro reálné nastavení výrobního cyklu. Autodesk Moldflow, ale nedisponuje jen možností výpočtu plastového dílu, je schopen analyzovat i namáhání částí formy a to jak tepelné, tak mechanické.

Poskytuje nástroje pro vývoj, optimalizaci a kontrolu plastového dílu, vstřikovací formy, procesu vstřikování. [23]



Obr. 2.31 Použitý software



### 3. EXPERIMENTNÁLNÍ ČÁST

#### 3.1. Úvod do experimentální části

Experimentální část obsahuje postup přípravy tvorby analýzy a výsledkovou část. Sledované výsledky analýzy jsou popsány a graficky znázorněny.

Po tvorbě modelů jsou na jednotlivé části nastaveny okrajové podmínky a následně jsou modely sloučeny do analyzované sestavy.

Vypsání výsledky analýzy jsou použity pro srovnání jednotlivých variant. Porovnání je provedeno z hlediska intenzity chlazení a dále z hlediska tuhosti jednotlivých vložek při mechanickém namáhání od taveniny plastu.

#### 3.2. Tvorba modelu analýzy

##### 3.2.1. Model plastového dílu

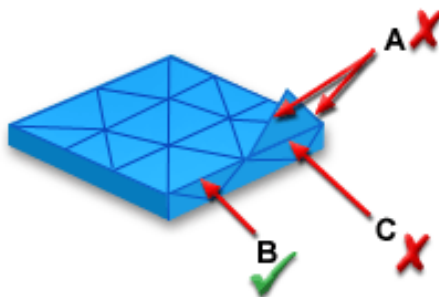
- 1) Vytvoření povrchové sítě modelu plastového dílu, síť „2.5D“

Při základní velikosti elementu sítě 5mm, krok sítě zajišťující dostatečnou přesnost výpočtu, díl obsahuje 132 000 elementů. Síť je následně upravena tak, aby mohla být převedena do 3D.

- 2) Úpravy sítě

Volné hrany:

Díl nesmí obsahovat nespojené části, tzv. volné plochy či hrany dle obr. 3.1. Pokud je vygenerovaná síť obsahuje, je třeba, pomocí ručních operací v programu, části odstranit, nebo dokončit jejich napojení.

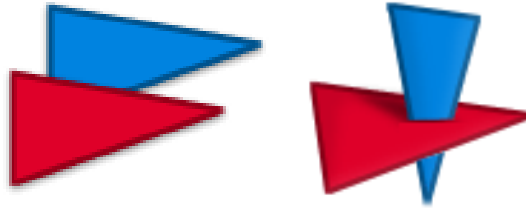


Obr. 3.1 Chyba sítě – volné plochy, hrany

Překrytí či průnik:

Průniky či krytí jednotlivých elementů sítě jsou nepřijatelné pro běh simulace, nejvíce tyto vady vznikají, když dochází k aproximaci povrchu dílu.

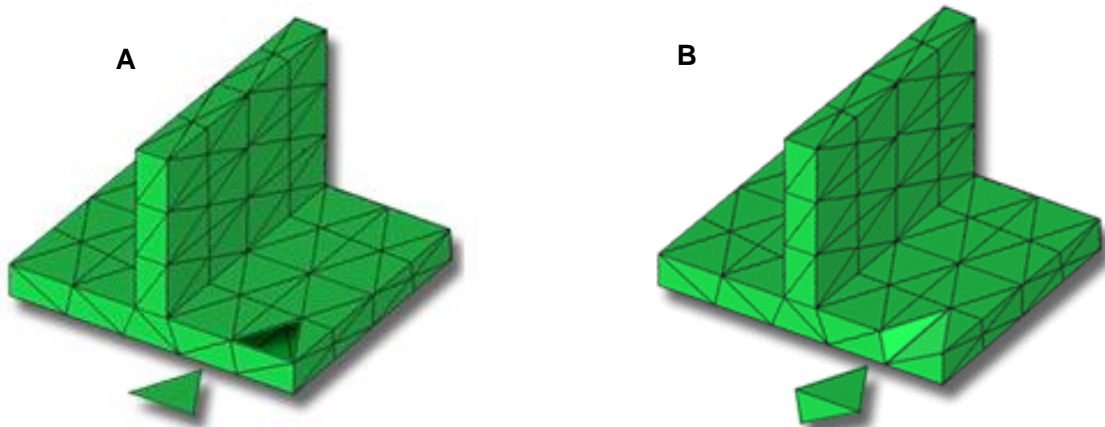
Některé části, např. malé rádiusy, fazetky, bříty jsou při síťování zdeformovány a je nutné tyto části upravit.



Obr. 3.2 Chyba sítě – překrytí, průniky

1) Převod sítě plastového modelu z 2.5D na 3D.

Po úpravě je síť z 2.5D převedena na 3D, rozdíl v síti je vidět na obr. 3.3. Tedy převod z povrchové trojúhelníkové sítě na prostorovou tetrahedrální síť. Díl nyní obsahuje, v šesti vrstvách, 2 000 000 elementů.



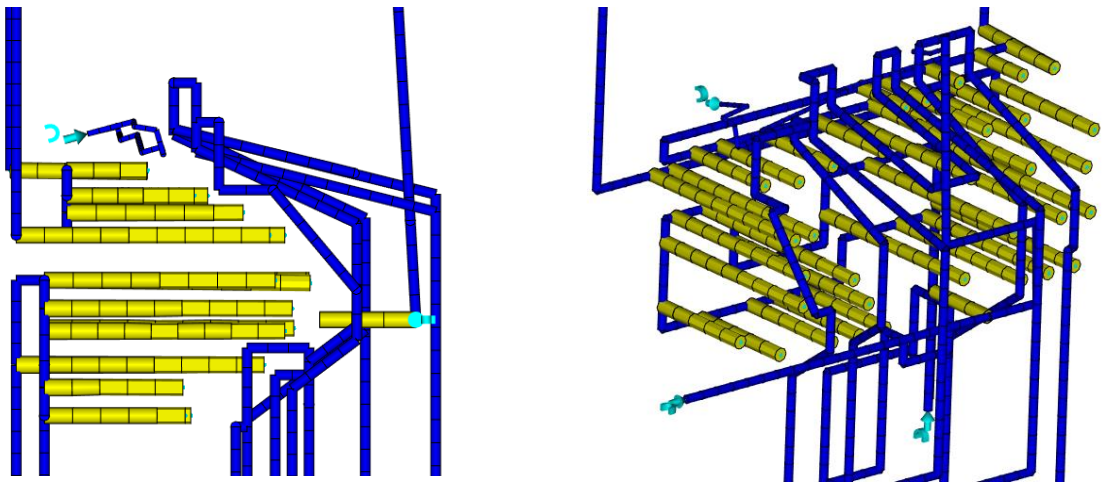
Obr. 3.3 Druhy použitých sítí

A – povrchová síť, B – 3D síť

### 3.2.2. Tvorba modelu chlazení

Studie musí obsahovat i chlazení tvárnice a tvárníku, nikoliv jen chlazení klobouku. Tyto okruhy jsou tedy přemodelovány ze stávajícího chlazení formy. Pro přenesení kanálů z CAD do Moldflow byly použity středy kanálů, pospojované čáry tvořící pouze tu část okruhu, kde proudí voda.

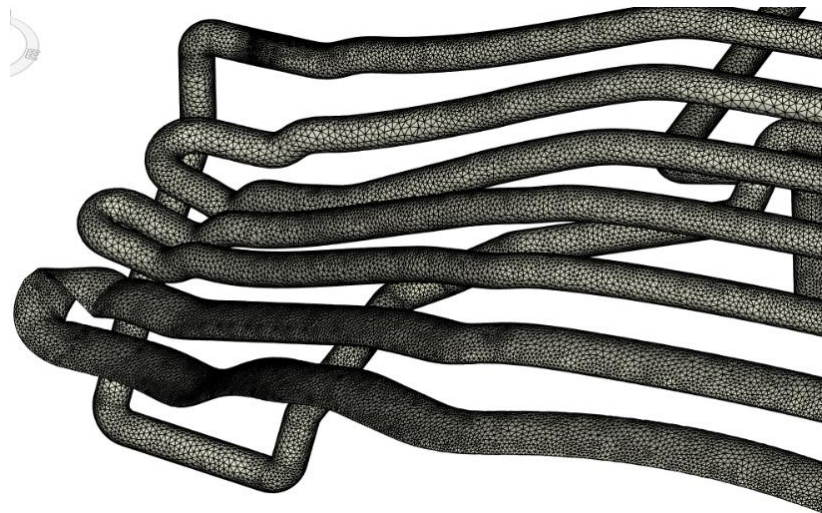
Chladicí okruhy v okolí vložky, zbytku tvaru, jsou vyrobeny konvenční metodou, tedy vrtáním. Obě části formy, jak pevná tak pohyblivá jsou vrtány  $\varnothing 19$  [mm], který slouží jako hlavní část okruhu a na něj jsou napojeny segmenty  $\varnothing 30$  [mm], dvoucestná ramena neboli kanály s přepážkou. Pohyblivá část navíc ještě obsahuje kanál  $\varnothing 10$  [mm] ve vrchní části formy. Model společného chlazení je vidět na obr. 3.4.



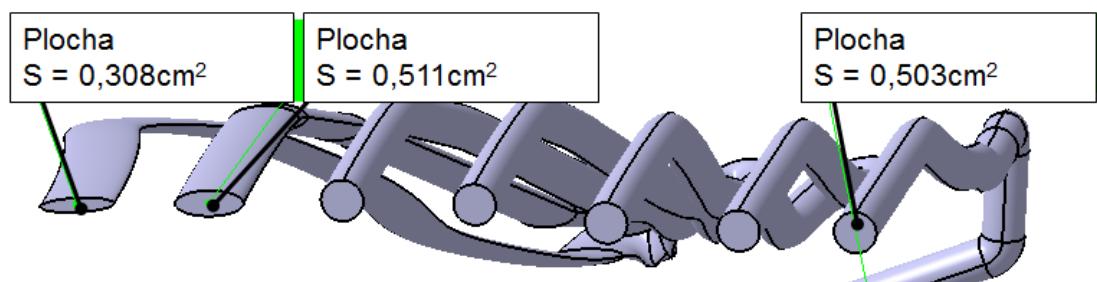
Obr. 3.4 Model chlazení formy

Modely chlazení variant klobouk Var1 a Var2 jsou připraveny stejně, jako předešlé chlazení, tedy jako dvojuzlové elementy.

Varianta chlazení Var3 je složena z přechodů mezi základními geometrickými tvary a bylo tedy nutné připravit síť. Kanál Var3 je tedy tvořen nikoliv dvojuzlovými elementy, ale 3D sítí dle obr. 3.5. Obsahuje 2 700 000 elementů. Řez kanálem s hodnotami průřezů kanálu je na obr. 3.6. Průřezy kanálu Var3 jsou navrženy jako kompromis mezi tlakovými ztrátami, tedy snahou zachovat stejný průřez, a dosažením maximální intenzity chlazení.



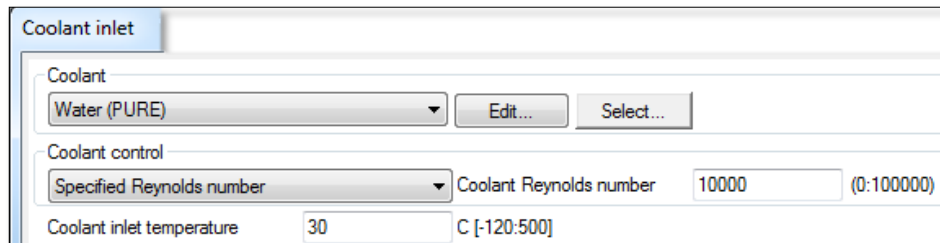
Obr. 3.5 Chladicí kanál Var 3



Obr. 3.6 Chladicí kanál Var 3



Chladicí médium je voda. Vstupní parametry jsou, pro chlazení kolem vložky klobouku, teplota 30 [°C] a rychlost proudění je závislá na Reynoldsově čísle, jak je vidět na obr. 3.7. Reynoldsovo číslo je požadováno 10 000. Vstupní parametry chladiva k chlazení vložky klobouku jsou 30 [°C] a 5 [L/min]. Zda-li je dosaženo minimálního Reynoldsova čísla, tedy 4000, je vidět ve výsledcích simulace.



Obr. 3.7 Vstupní parametry chlazení

*Překlad:*

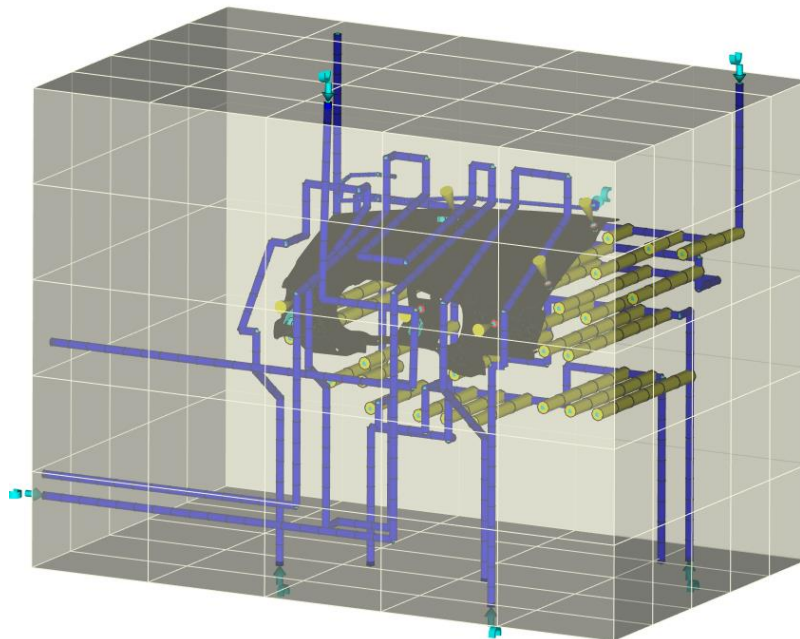
*Water (Pure)* – použité chladivo je voda bez příměsí

*Specified Reynolds number* – okrajová podmínka pro proudění chladiva, 10000 Re

*Coolant inlet temperature* – okrajová podmínka vstupní teploty chladiva

### 3.2.3. Model prostoru formy

Pokud má být výpočet použit nejen pro průměrnou teplotu formy, ale i pro vstup tepla formou a to i v několika cyklech od rozjždění formy, je nutné vymezit prostor pro tento výpočet, dle obr. 3.8. Určíme tedy hranice formy a vytvoříme 3D síť. Velikost sítě je 1 800 000 elementů, což je dostačující pro hledanou přesnost.



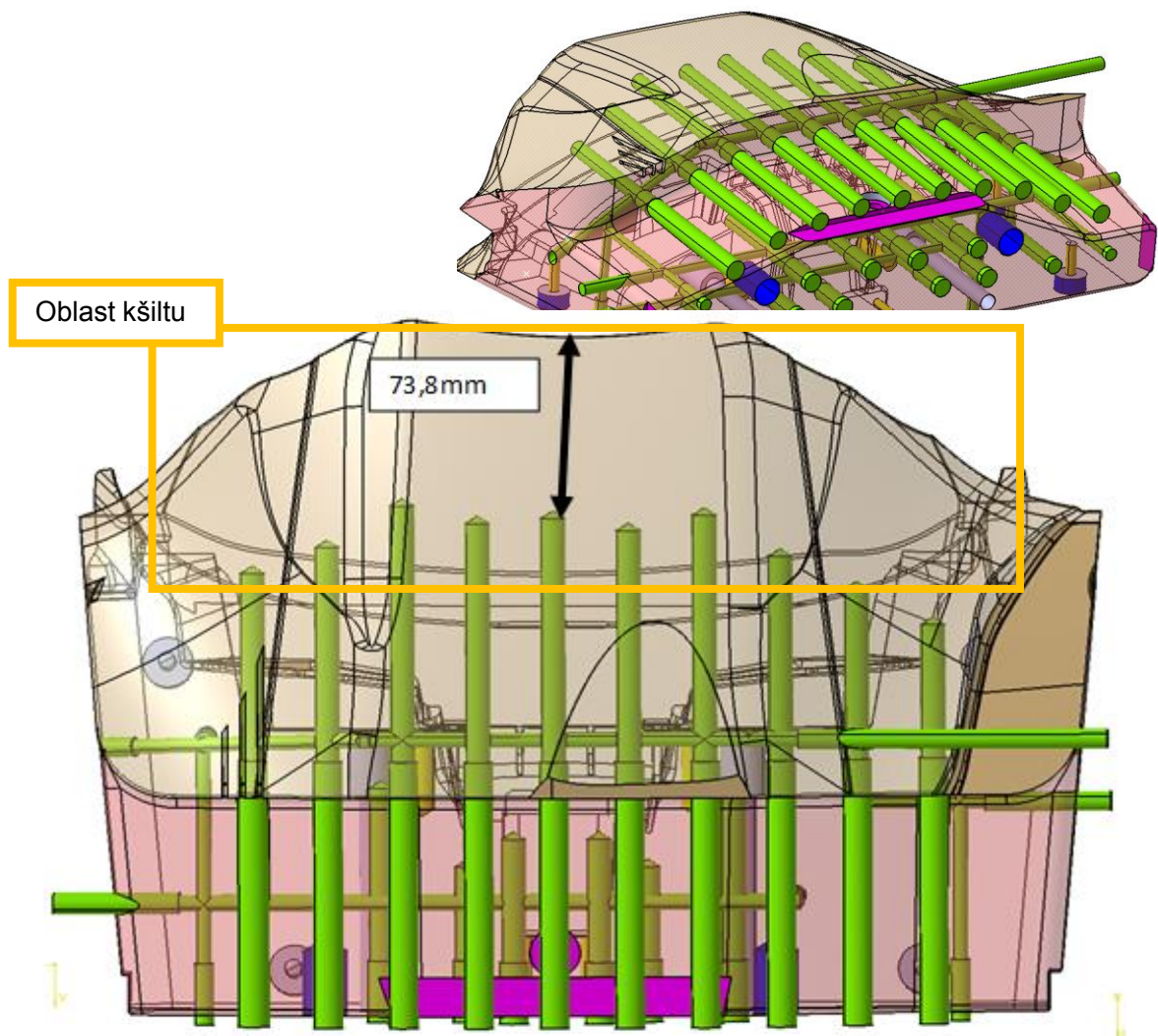
Obr. 3.8 Model prostoru formy

### 3.3. Model vložky klobouku

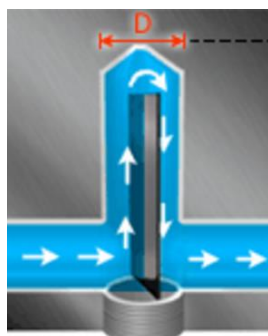
Všechny varianty modelů klobouku mají stejný postup pro přípravu výpočtu v Moldflow. Nejprve je model nahrán v nativním formátu a vysítován na 2.5D. Síť je následně upravena, stejně jako se upravovala síť u plastového dílu a převedena na síť 3D. Velikosti sítí klobouků jsou cca: 4 000 000 elementů. Krok povrchové sítě klobouku je stejný jako u plastového dílu, což napomáhá k přesnějším výsledkům.

#### 3.3.1. Aktuální varianta „Var1“

Chlazení je vyráběno konvenční metodou, vrtáním pod jedním úhlem, dle obr. 3.9. Okruh je vrtán  $\text{Ø}6$  [mm] a  $\text{Ø}10$  [mm]. Do děr  $\text{Ø}10$  [mm], které chladí exponovaný kšilt, viz obr. 3.9, jsou vloženy přepážky. Funkce kanálu s přepážkou je na obr. 3.10. Vzdálenost chlazení od špičky kšiltu ve středu dílu je 73.8 [mm]. Minimální vzdálenost od povrchu vložky je 5.4 [mm]. Cena této varianty je: materiál 22 000Kč, výroba 153 000Kč, kalení 16 000Kč, celkem tedy 191 000Kč.



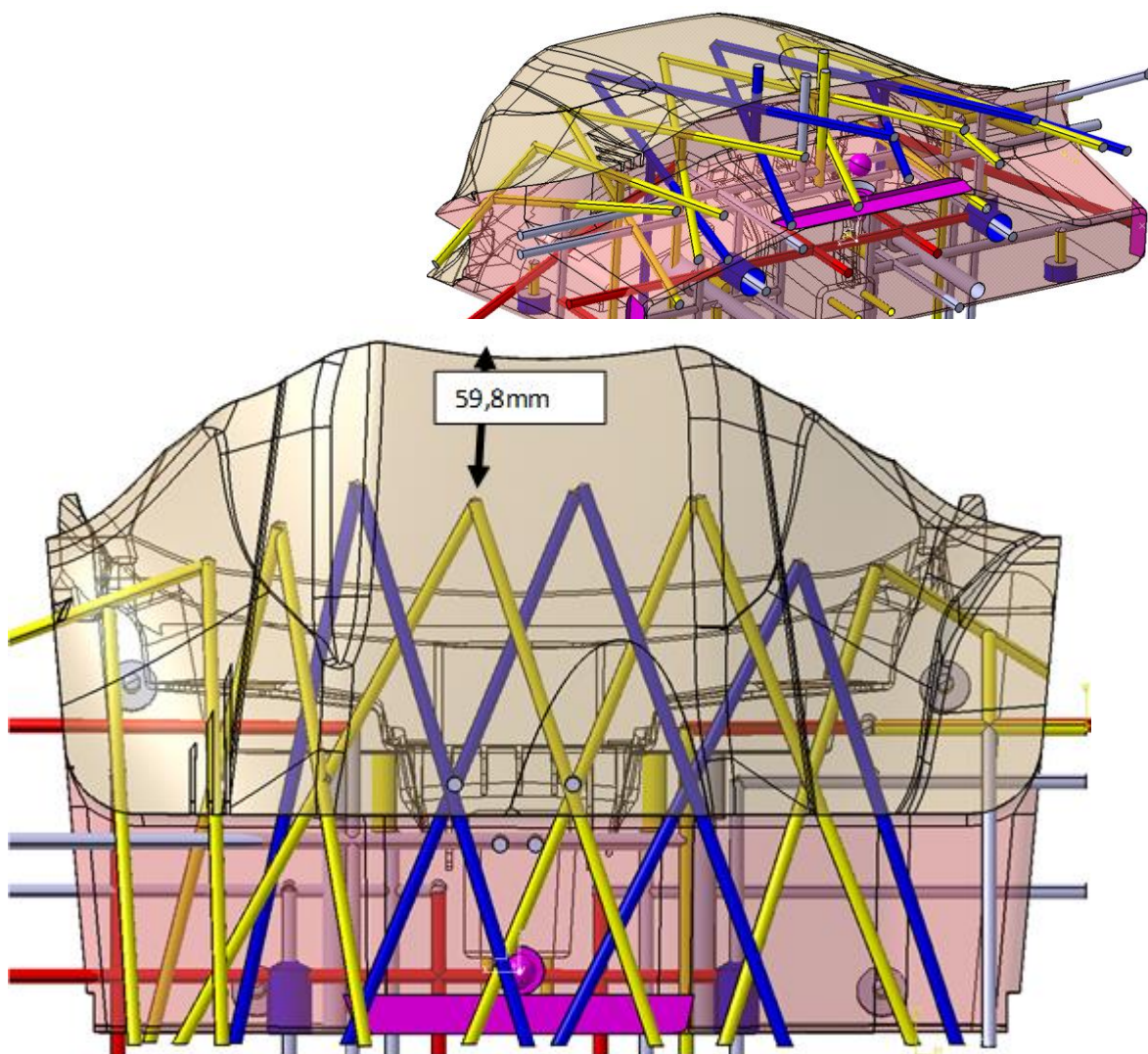
Obr. 3.9 Model vložky Var1



Obr. 3.10 Kanál s přepážkou

### 3.3.2. 1. optimalizovaná varianta „Var2“

Chlazení je vyráběno konvenční metodou, vrtáním pod dvěma úhly, viz obr. 3.11. Okruh je vrtán  $\varnothing 6$ . Vzdálenost chlazení od špičky kšiltu ve středu dílu je 59.8 [mm]. Minimální vzdálenost od povrchu vložky je 4.5 [mm]. Cena této varianty je: materiál 22 000Kč, výroba 168 000Kč, kalení 16 000Kč, celkem tedy 206 000Kč.

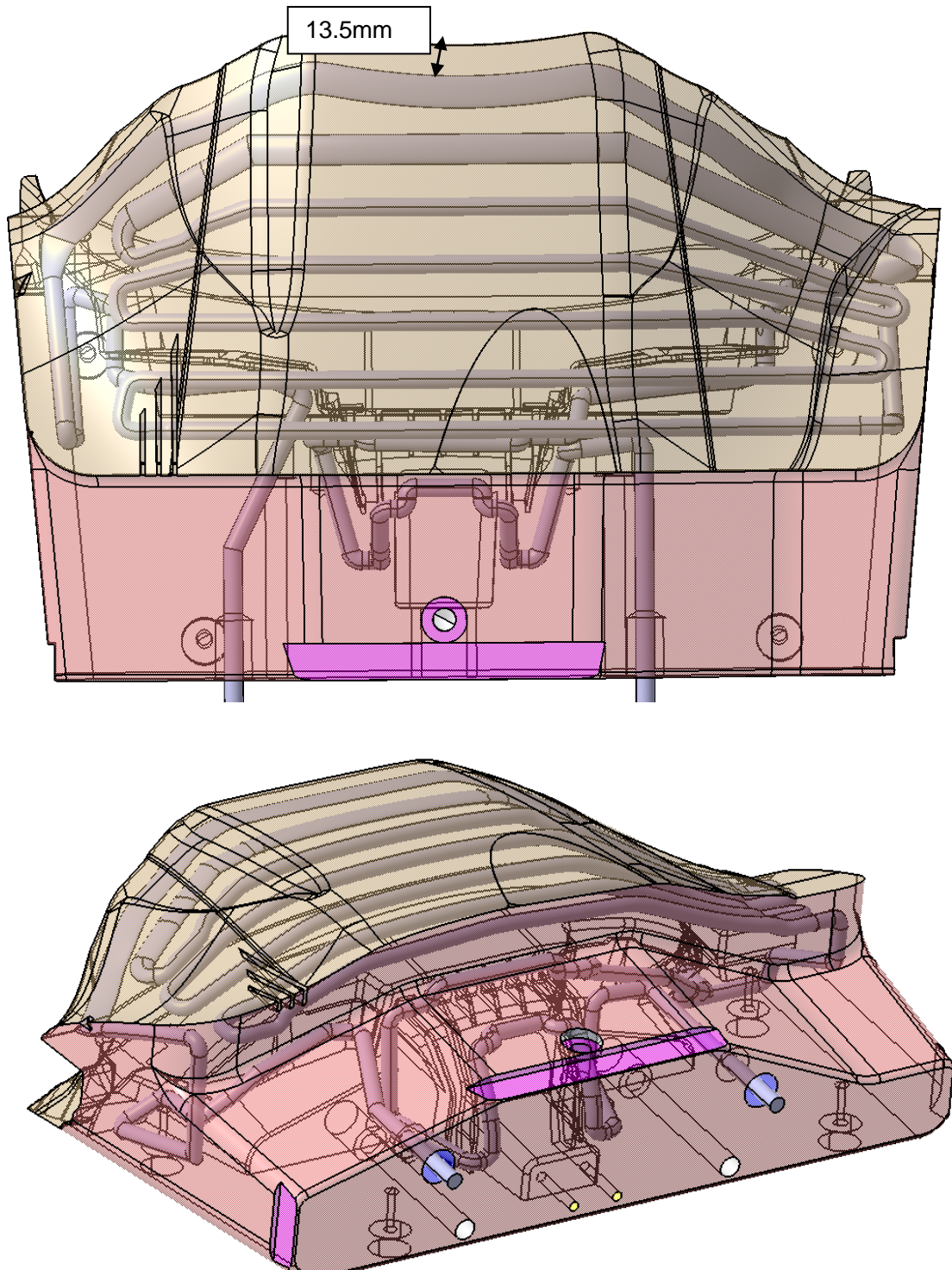


Obr. 3.11 Model vložky Var2



### 3.3.3. 2. optimalizovaná varianta „Var3“

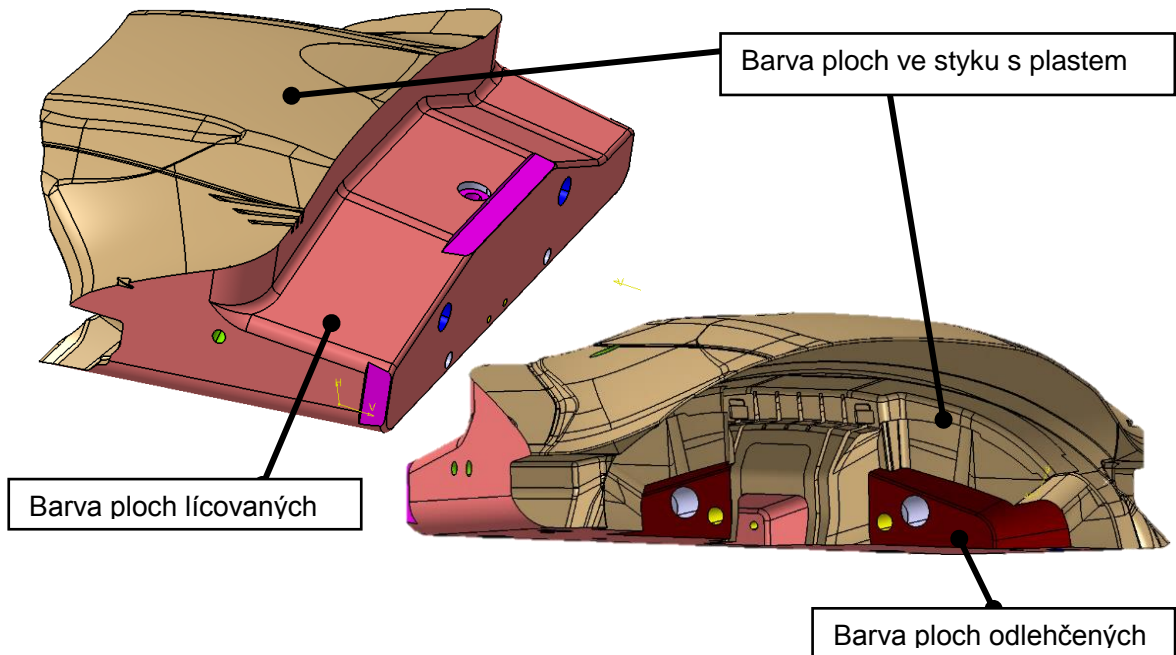
Chlazení je vyráběno metodou DMLS, tedy 3D tiskem, viz obr. 3.12. Základ okruhu je kanál  $\text{Ø}8$  [mm]. Vzdálenost chlazení od špičky kšiltu ve středu dílu je 13.5 [mm]. Navržená minimální vzdálenost od povrchu vložky je 2.5 [mm]. Cena této varianty na zakázku je 740 000Kč.



Obr. 3.12 Model vložky Var3

### 3.4. Okrajové podmínky simulace

Výpočet zahrnuje vstřík – dotlak – chlazení. Plochy ve styku s plastem jsou světle hnědé, zbylé plochy jsou buď lícované, nebo odlehčené viz obr. 3.13.

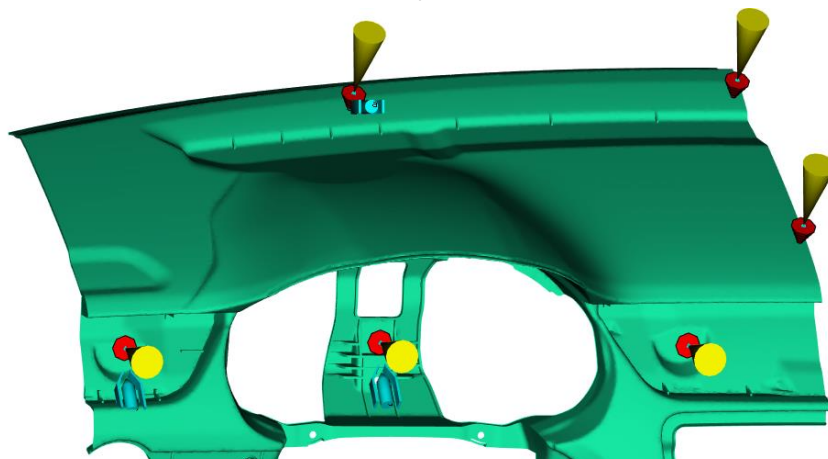


Obr. 3.13 Vložka klobouku, popis povrchu

#### 3.4.1. Vstřík – dotlak

Použitý materiál je Stamax 40YM240, tedy PP se 40% dlouhých skelných vláken. Teplota taveniny je nastavena na 250 [°C], teplota formy doporučená 50 [°C].

Pro simulaci tečení plastu je použit výřez části plastového dílu, výřez je plněn postupně z 6 kaskád, směr zprava do leva viz obr 3.14. Doba vstříku je 1.5 [s], profil je automatický, udržující konstantní plnění dutiny. V dotlaku jsou otevřeny všechny trysky, po dobu 10 [s], tlak je konstantní 65 [MPa] v dutině. Pro použitý materiál je předpokládáno, že v dotlaku se bude tlak pohybovat do 50 [MPa], zatížení pro výpočet deformací je z hlediska bezpečnosti navýšeno na 65 [MPa].

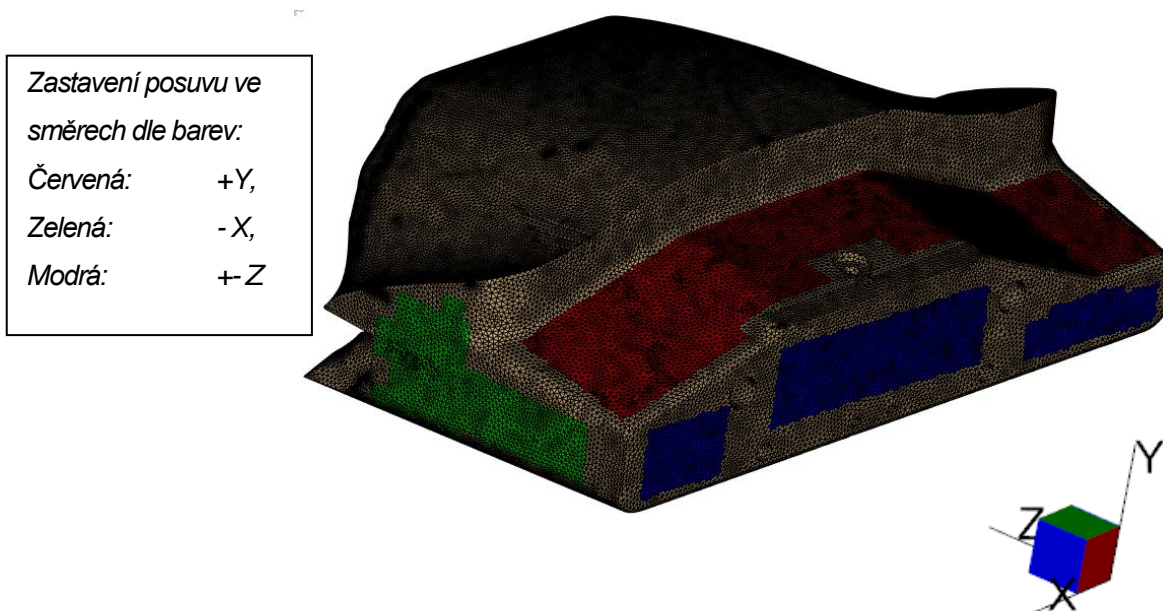


Obr. 3.14 Vstříkovaný díl

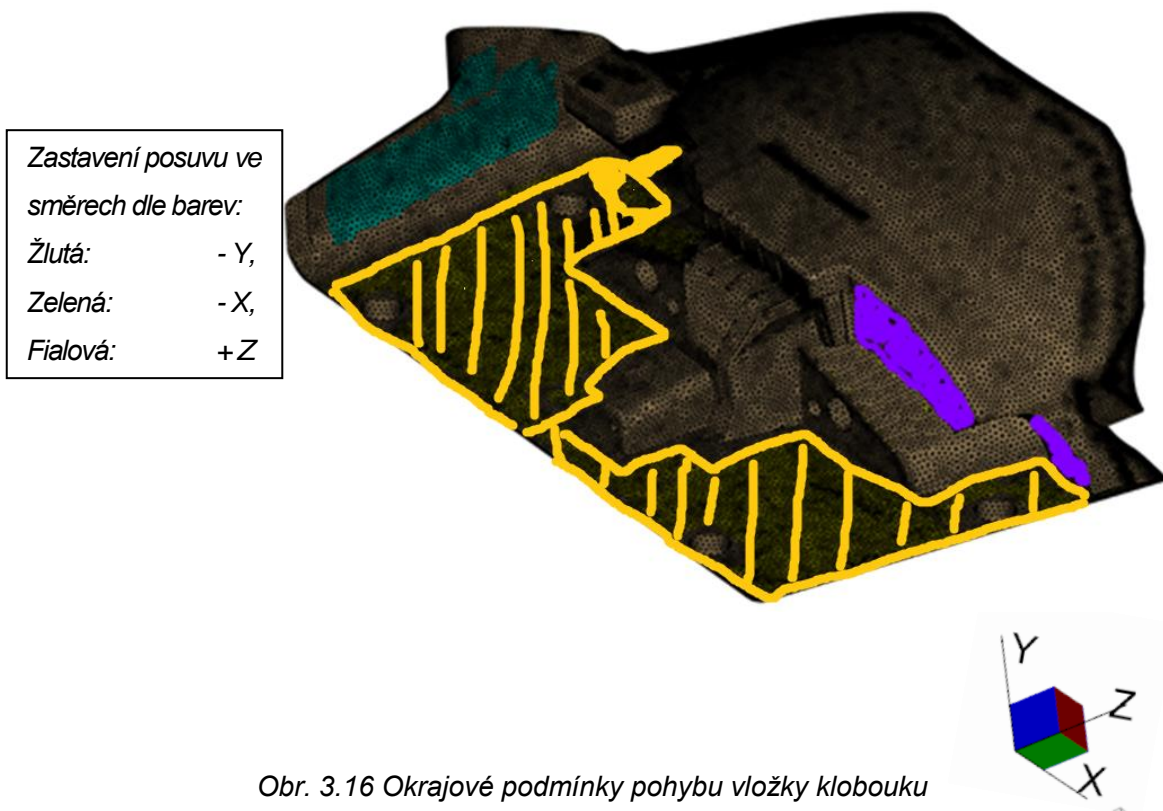


### 3.4.2. Vazby vložky klobouku

Pro výpočet deformací klobouku je třeba zavést okrajové podmínky pohybu vložky. V reálu je díl nalícován do pohyblivé strany formy a následně přišroubován. Vložka dále obsahuje dosedové plochy, které jsou také lícované a při cyklu klobouk podírají. Zobrazení ukotvení je na obr. 3.15, 3.16.



Obr. 3.15 Okrajové podmínky pohybu vložky klobouku

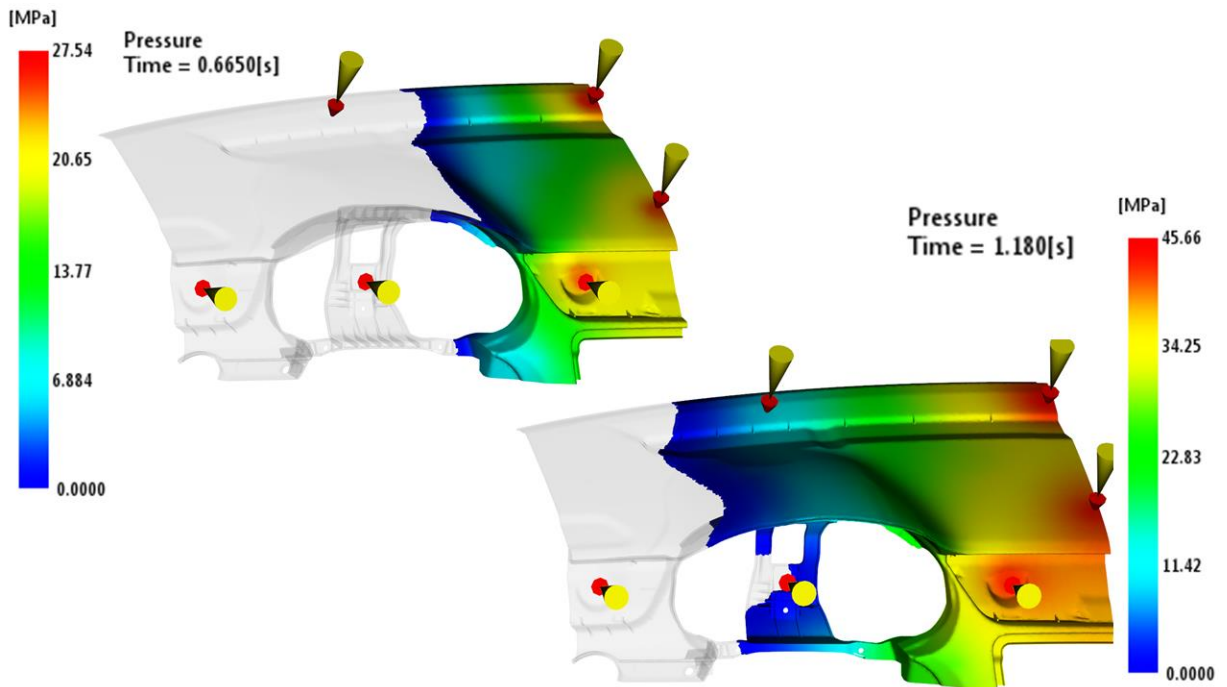


Obr. 3.16 Okrajové podmínky pohybu vložky klobouku

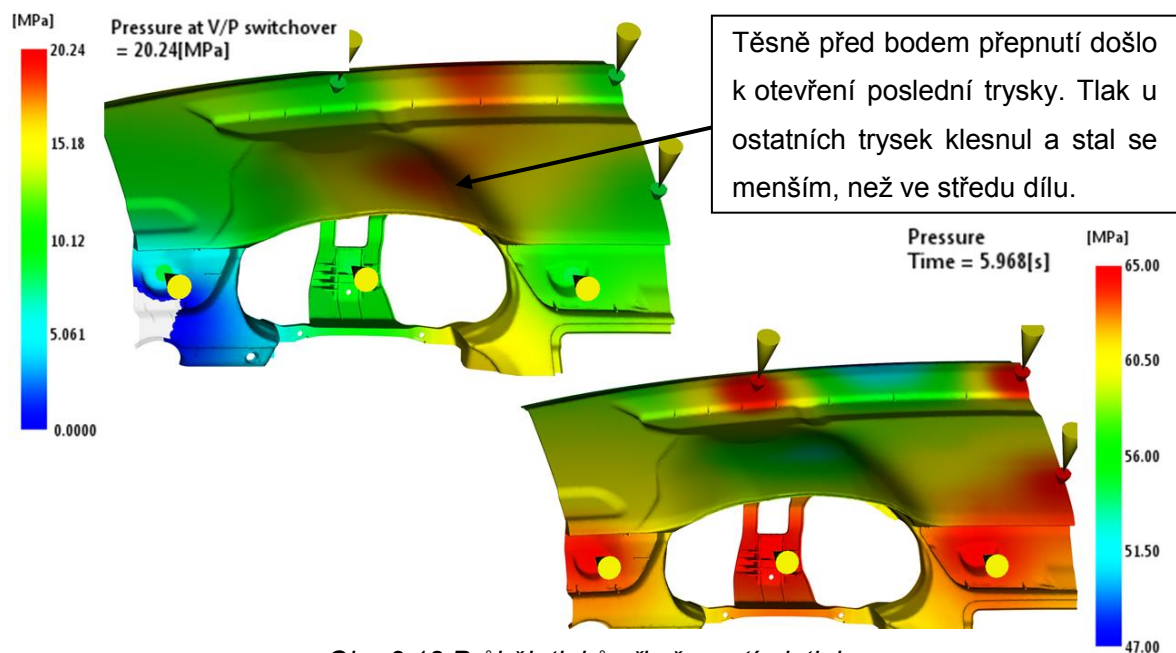
### 3.5. Výsledky ze simulace

#### 3.5.1. Tlak v dutině formy

Výsledek ukazuje průběh tlaku v dutině formy během plnění a dotlaku obr: 3.17, 3.18, 3.19. Nejvyšší tlak během vstřiku je v 1.18 [s] plnění a to 45.7 [MPa]. Tlak používaný v dotlaku je 65 [MPa].

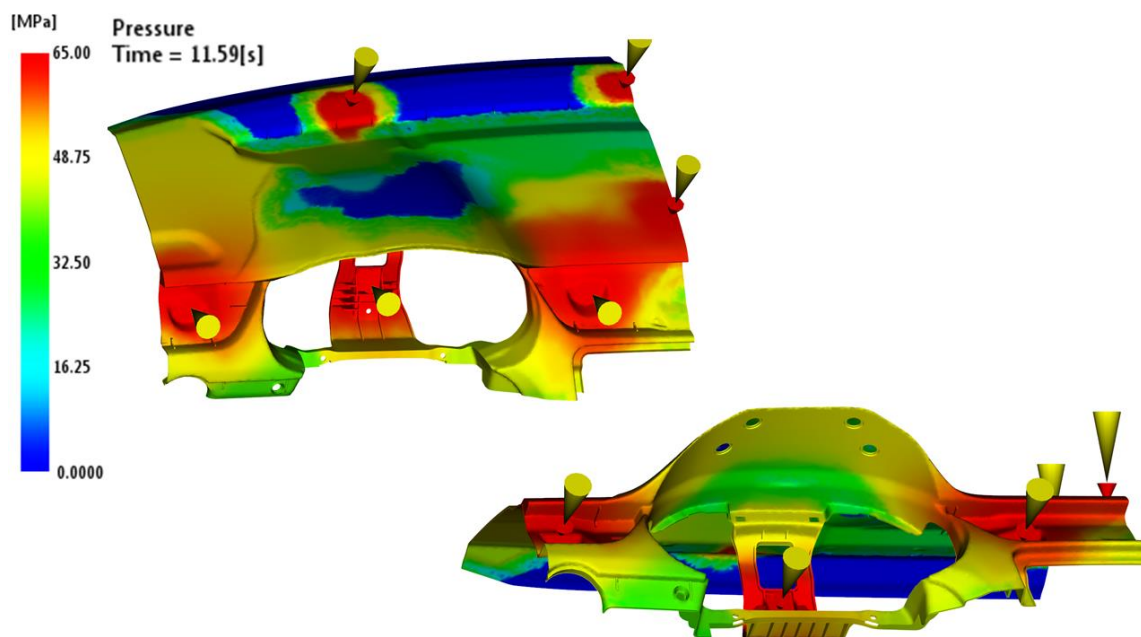


Obr. 3.17 Průběh tlaků při vstřiku



Obr. 3.18 Průběh tlaků při přepnutí, dotlaku

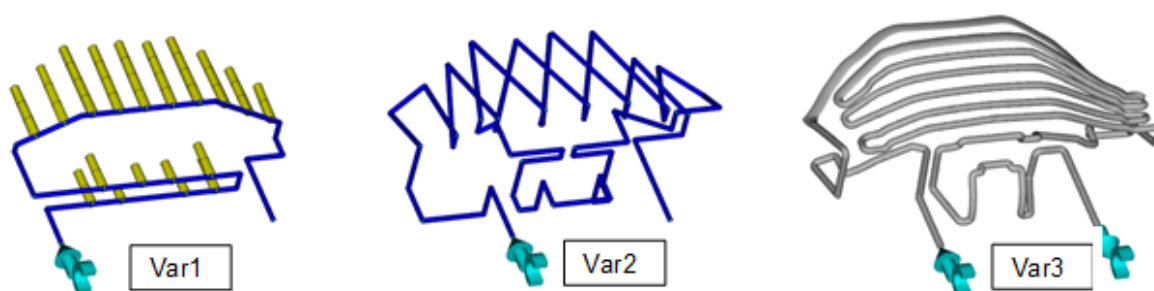
Pressure at V/P switchover – tlak v dutině formy v bodě přepnutí na dotlak



Obr. 3.19 Průběh tlaků v dotlaku

### 3.5.2. Analýza variant chlazení klobouku

Jednotlivé varianty byly zatíženy 20 výrobními cykly dílu a to od rozjezdu formy, teploty 30 [°C]. Konstrukce jednotlivých variant je na obr. 3.20.



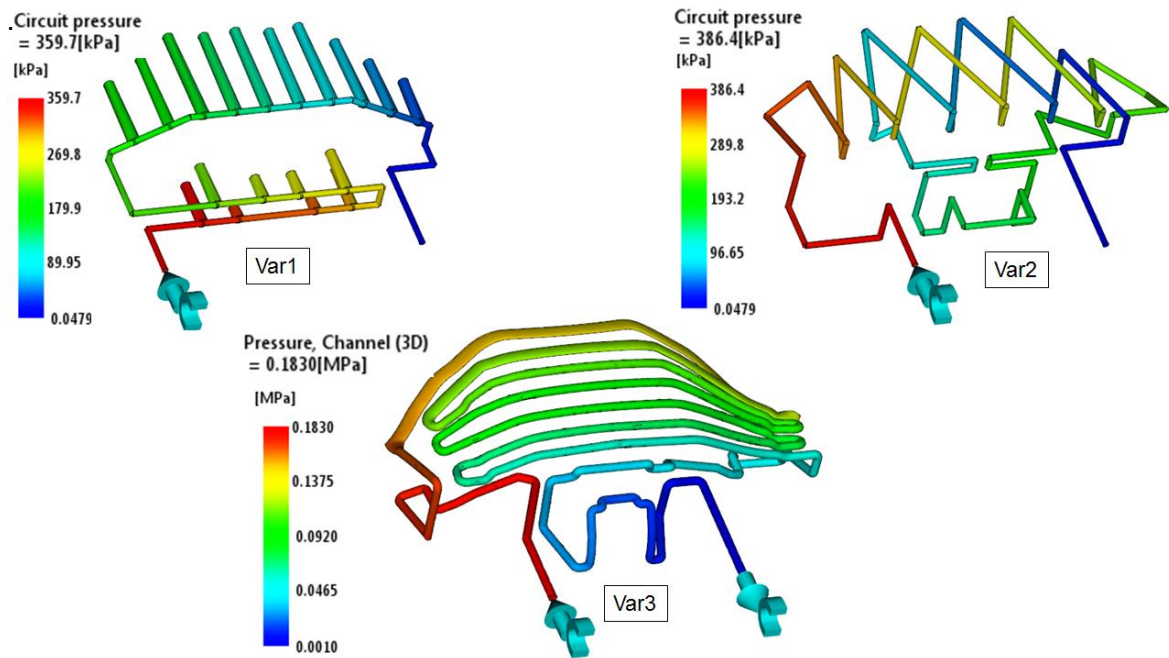
Obr. 3.20 Tvar chlazení jednotlivých variant

### 3.5.3. Průběh tlaku vody v okruhu

Analýza tlaku je počítána v závislosti na tlakové ztrátě okruhu a v našem případě i za podmínky udržení průtoku 5 [l/min]. Tlaky, které výsledek ukazuje, jsou minimální nutné k tomu, aby okruh byl schopen udržet daný průtok.

Nejvyšší vstupní tlaku vykazuje Var2, dle obr. 3.21, a to 3.86 [Bar].



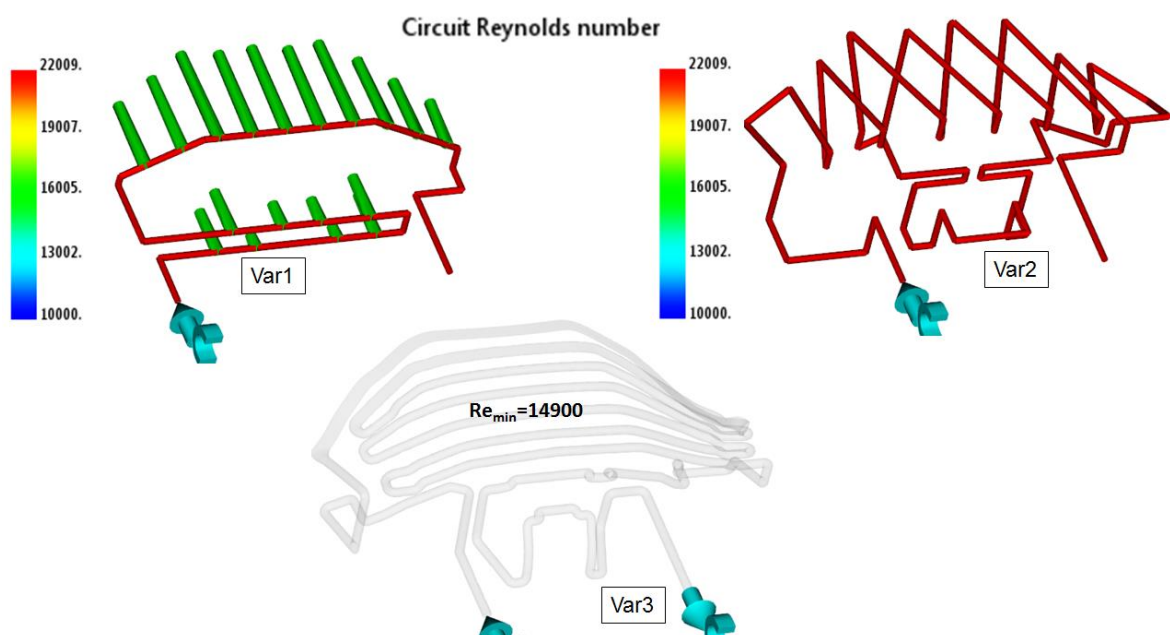


Obr. 3.21 Průběh tlaku v chladícím okruhu

#### 3.5.4. Průběh Reynoldsova čísla v okruhu

Kontrolou Reynoldsova čísla zjišťuje charakter proudění v okruhu. Pro odvod tepla je důležité udržet v okruhu turbulentní proudění, tedy aspoň  $4000Re$ . Vzhledem k tomu, že se zvyšujícím se číslem roste jak efektivita chlazení, tak ale i tlaková ztráta okruhu, je doporučená hodnota  $Re=10000$ . [3], [21]

Jednotlivé průběhy jsou na obr. 3.22.



Obr. 3.22 Reynoldsovo číslo okruhů při 5 [L/min]

### 3.5.5. Teplota chladícího media během cyklu

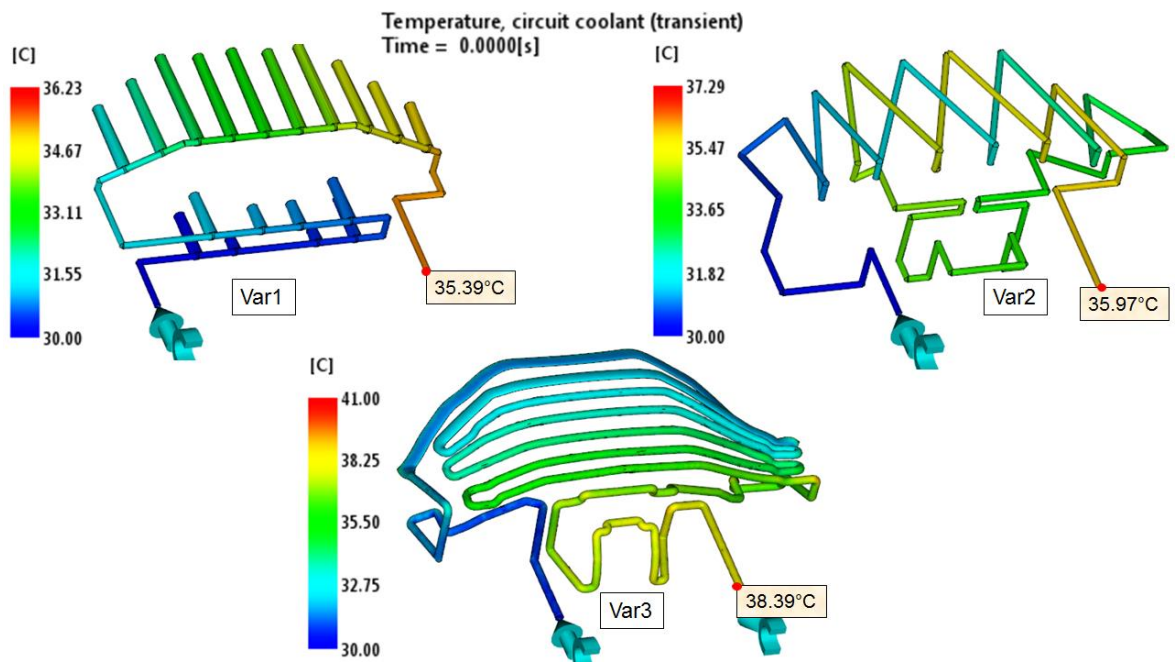
Výsledek ukazuje změnu teploty vody v ustáleném cyklu, viz obr. 3.23, 3.24. Teplota vody na začátku cyklu, při výstupu z okruhu, by měla být shodná, blízká s teplotou nastavenou na vstup do okruhu, tedy 30 [°C]. Pokud se teploty liší, znamená to, že chlazení ve formě není dostatečné pro danou rychlost cyklu. Tento problém nastává při špatně navrženém chlazení, které by mělo být navrženo dle dílu, tedy objemu materiálu v jeho jednotlivých částech a dle technologie vstřiku. [4], [21]

Technologie vstřiku určuje, jaké množství taveniny proteče v jednotlivých částech dutiny formy, tedy jakým množstvím tepla budou jednotlivé části namáhány.

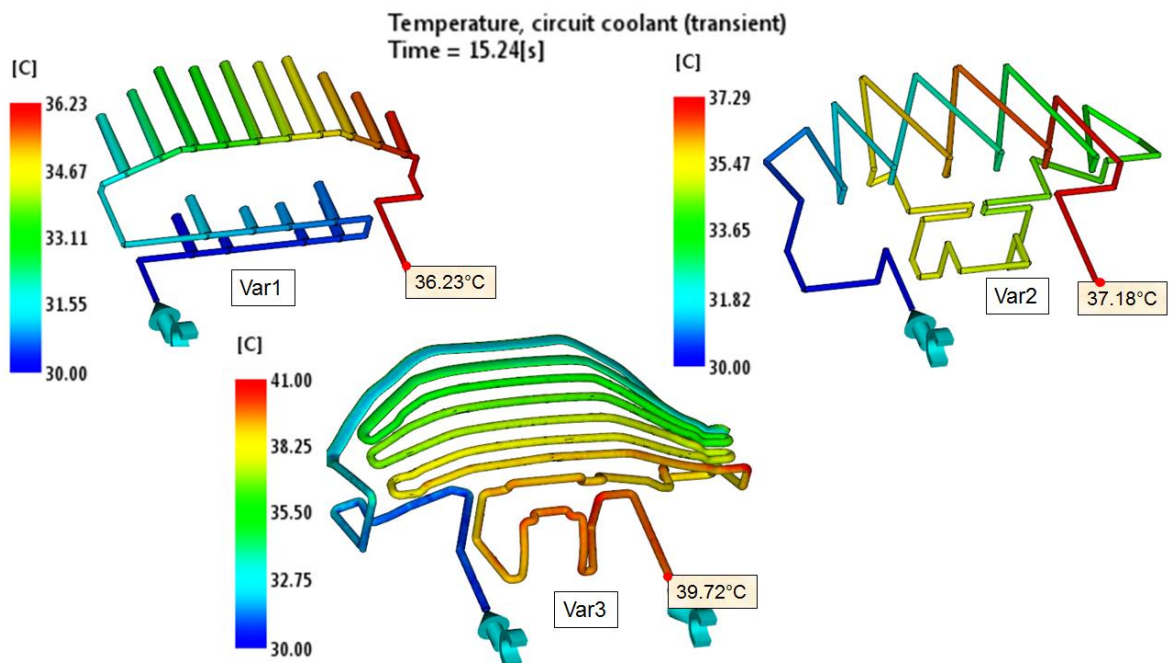
Je také třeba uvažovat nad délkou a složitostí okruhu. Okruh může být příliš dlouhý a i když jsou okruhy vhodně navrženy, tak je stejně chlazení nedostatečné. Voda při proudění kanálem zvyšuje teplotu, což znamená, že tvar u vstupu bude chlazen teplotou vody blízkou teplotě vstupu a tvar u výstupu chlazen vodou o vyšší teplotě.

Nedostatečný průtok chladiva také navyšuje rozdíly v teplotách mezi vstupem a výstupem z okruhu. Tvar okruhu může být navržen optimálně pro chlazení v daném cyklu, ale aby fungoval, je třeba v něm udržet předpokládanou rychlost proudění. U kratších okruhů je tato rychlost odvozována dle Reynoldsova čísla, tedy aby bylo zachováno turbulentní proudění. U delších kruhů, je třeba udržet nejen turbulentní proudění, ale rychlost proudění musí zaručit maximální výchylky v teplotách mezi vstupem a výstup cca 3÷5 [°C], [21], záleží na materiálu dílu. V závislosti na složitosti okruhu je potřeba udržet určitý tlak na vstupu a tím zajistit požadovaný průtok. Vstupní tlak závisí na rozměrech hadic a náustků. Vstupní tlak také ovlivňuje rozvod chlazení přes distributory vody. V simulacích se, jako okrajová podmínka proudění, užívá zachování Reynoldsova čísla, nastavení průtoku, nebo tlaku na vstupu. V reálu je pak okruh zapojen přes distributor, což vede ke snížení tlaků. [4], [21]

U 3D tisknutých kanálů, lze použít „jakékoliv“ tvary a přechody k vytvoření kanálu. V tomto případě je největší problém s tvorbou vírů, úplavů a míst kde je minimální rychlost proudění vody viz obr. 2.12. Všechny tyto případy generují místní přehřátí kanálu. To znamená, že teplotní rozdíl mezi vstupem a výstup může být akceptovatelný, ale i přesto bude tvar formy v určitých částech vykazovat místní přehřátí tvaru. Proto je nutná kontrola celého temperačního systému.



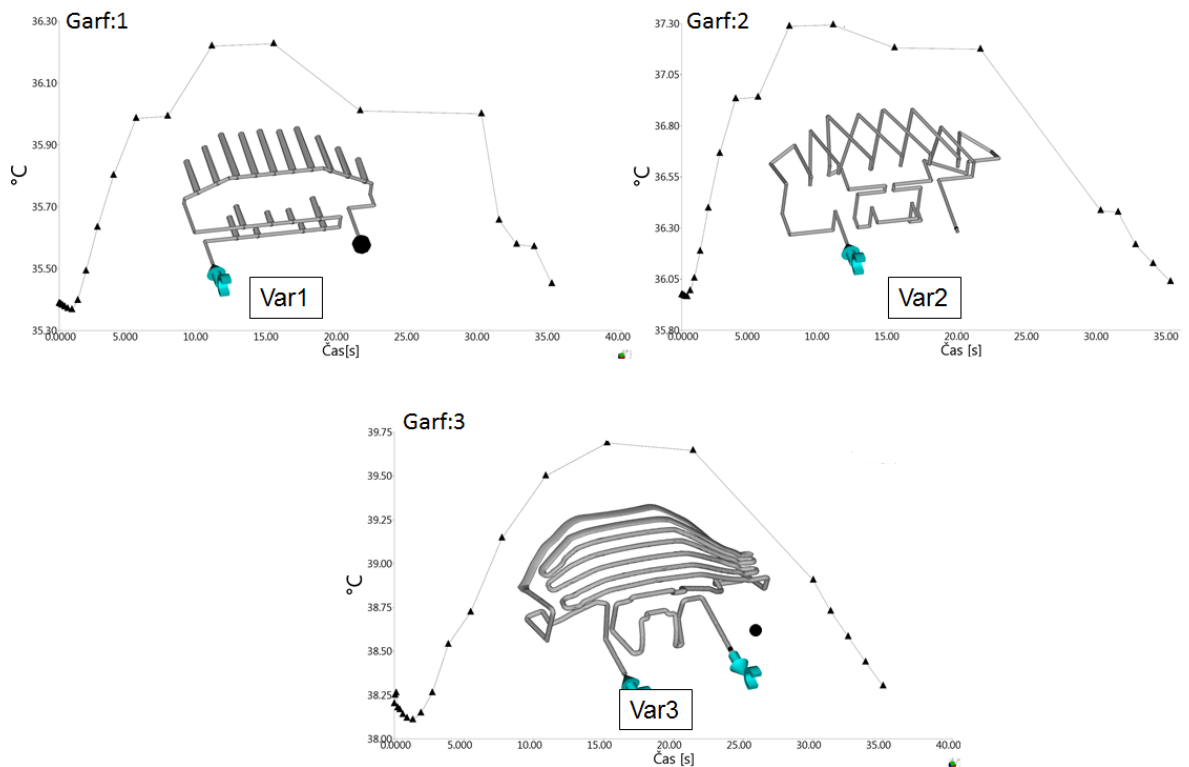
Obr. 3.23 Rozdíl teplot, mezi vstupem a výstup kanálu, na začátku ustáleného cyklu



Obr. 3.24 Rozdíl teplot, mezi vstupem a výstup kanálu, v době  $t=15.24$  [s] ustáleného cyklu

Rozdíly teploty znamenají rozdílnou intenzitu chlazení a tedy i rozdílné podmínky při tuhnutí dílu.

Porovnáním grafů, výstupní teploty vody během jednoho ustáleného cyklu, je vidět charakter chlazení, tedy jak kvalitně je chlazení navrženo, viz obr. 3.25. Optimální chlazení bude mít „hladký“ nárůst teploty, tedy bez ostrých přechodů. Ostrý přechod znamená, že chladicí kanál je dále od tvaru a tak tato část okruhu „čeká“ až k ní naakumulované teplo prostoupí skrz větší objem oceli. To znamená vznik špatně odchlazených oblastí, které pak prodlužují cyklus, nebo vytváří větší deformace dílu. [4], [21]

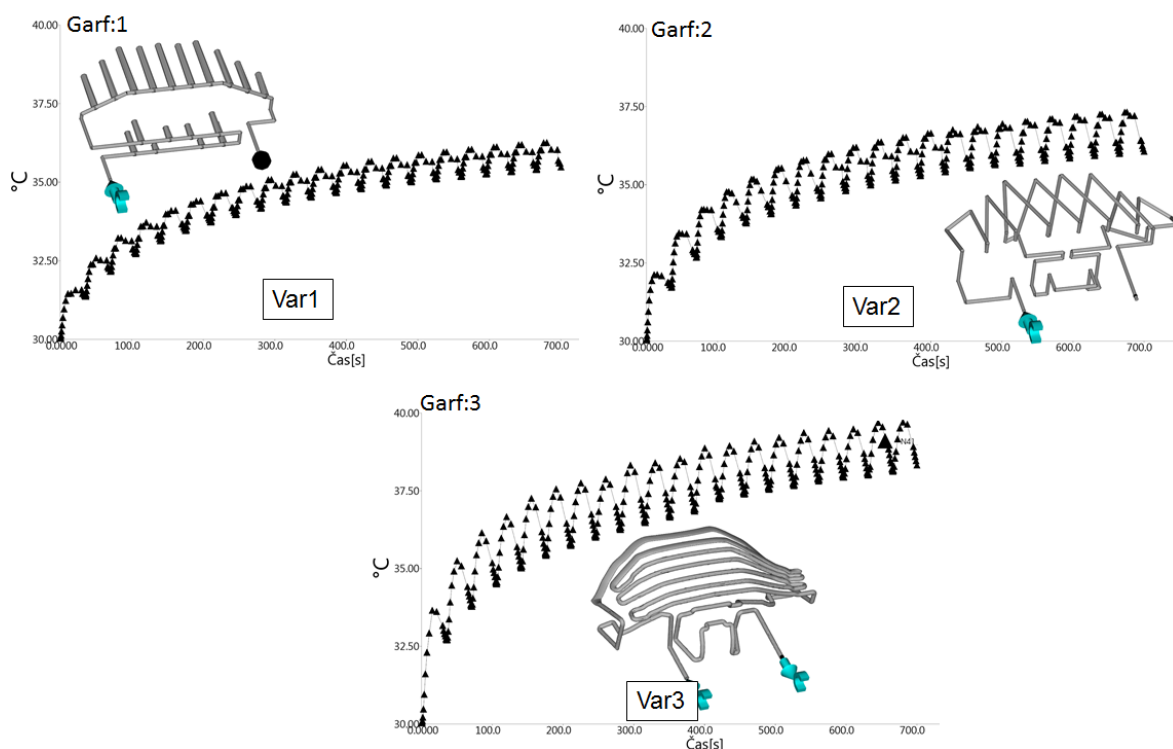


Obr. 3.25 Změna teploty vody na výstupu, během ustáleného cyklu

Jednotlivé varianty byly zatíženy 20 výrobními cykly dílu, a to od rozjezdu formy, počáteční teplota dle termu 30 [°C]. Grafy změny teploty vody na výstupu, viz obr. 3.26, měřené v průběhů 20 cyklů vykazují neustálý nárůst teploty, tedy každý další cyklus má počáteční teplotu stěny formy vyšší než ten předešlý. Pokud se ale zaměříme na velikost výchylek, zjistíme, že po 5. cyklu jsou rozdíly teplot o 0,3 [°C] viz tab. 4.

Tab. 4 Tabulky rozdílů teplot, počáteční a koncové, pro 5. a 20. výrobní cyklus

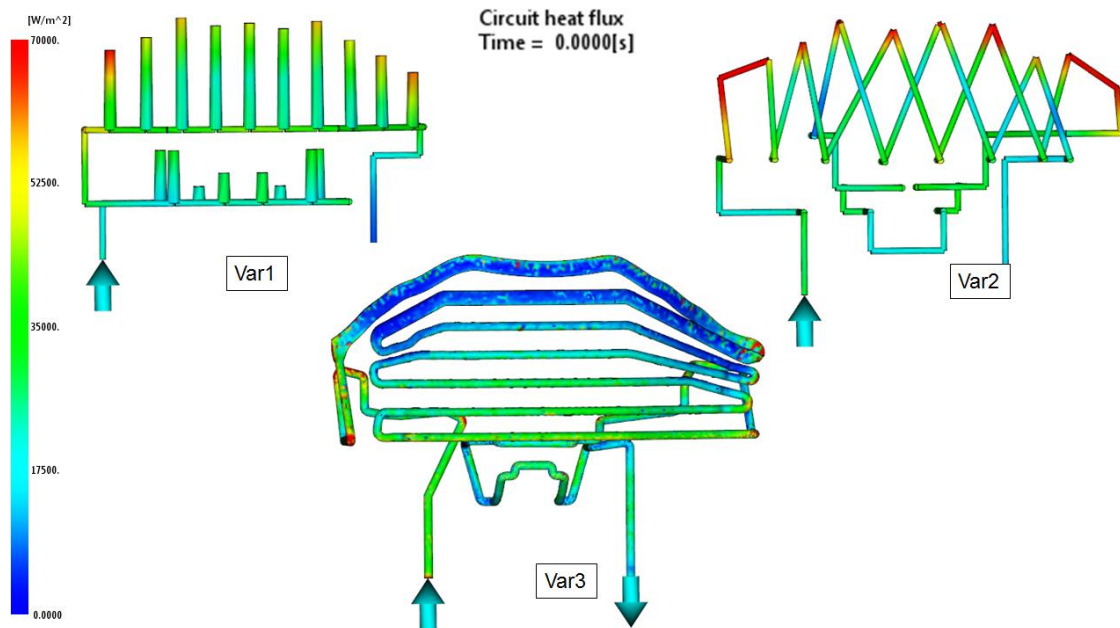
Var1		Var2		Var3	
5. cyklus	0,33 °C	5. cyklus	0,3 °C	5. cyklus	0,3 °C
20. cyklus	0,08 °C	20. cyklus	0,06 °C	20. cyklus	0,1 °C



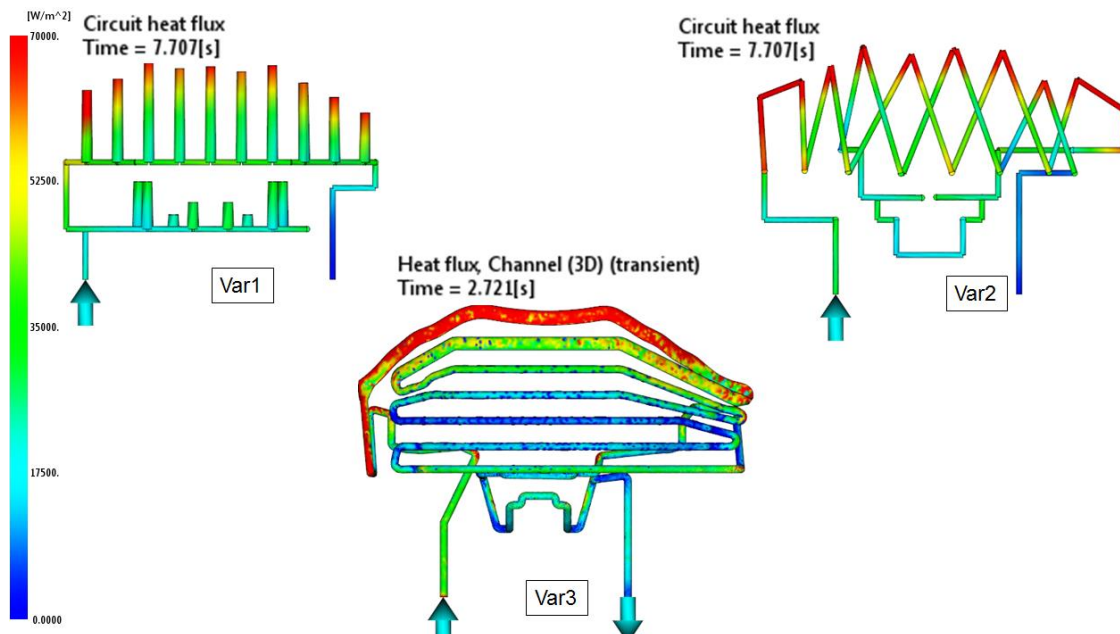
Obr. 3.26 Změna teploty vody na výstupu, v cyklech – od rozjezdu formy

### 3.5.6. Tepelná zátěž okruhu

Výsledek z tepelného toku „Q“ použijeme pro vizualizaci, tedy jestli je zahřívána voda, nebo vodou je vyhřívána forma, viz obr. 3.27 a obr. 3.28. Modrá barva znázorňuje tepelný tok blízký nule, nebo záporný. Záporný Q znamená, že voda v okruhu zahřívá vložku, např. před najeťm výroby je forma nějakou dobu temperována na provozní teplotu, v našem případě na 30 [°C]. Ostatní barvy, blížíci se k červené, mají Q kladné a dochází tedy k odebírání tepla, k chlazení. Během cyklu by mělo být Q kladné - barvy blízké červené, na začátku dalšího cyklu by mělo být Q kladné - blížíci se k nule. Záporné Q v cyklu značí distribuci tepla z jedné části vložky do jiné části, tedy místo předpokládaného chlazení, dochází k nežádoucí temperaci. [4], [21]



Obr. 3.27 Chlazení – tepelný tok na začátku cyklu

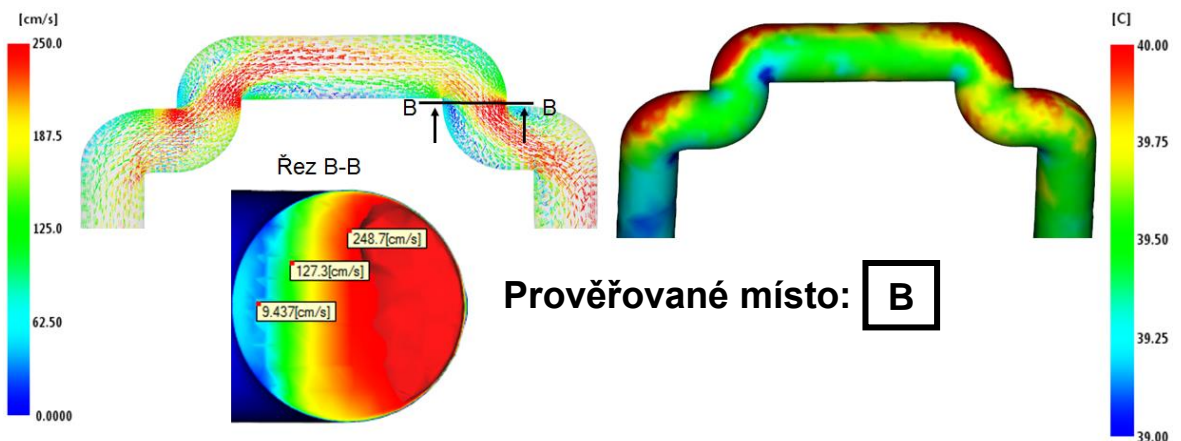
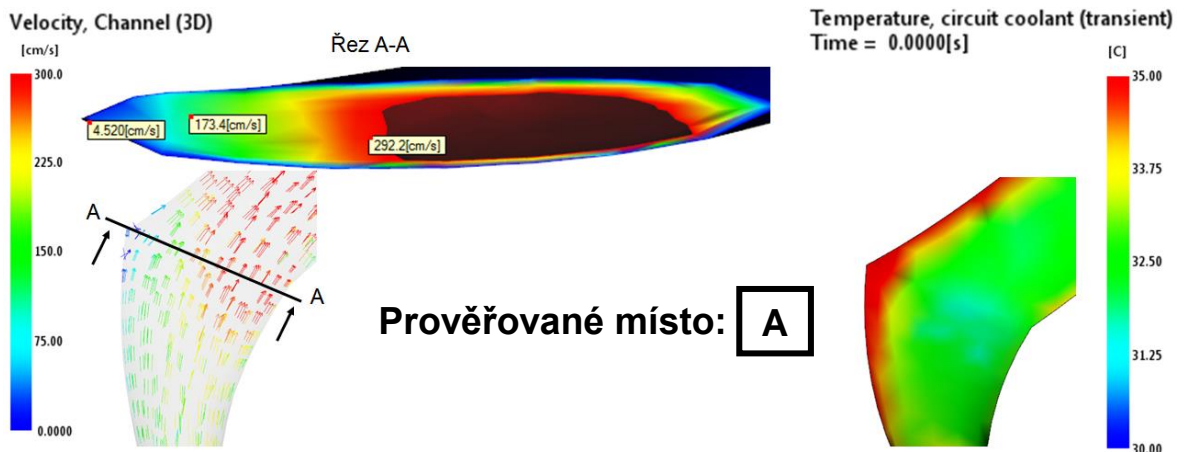
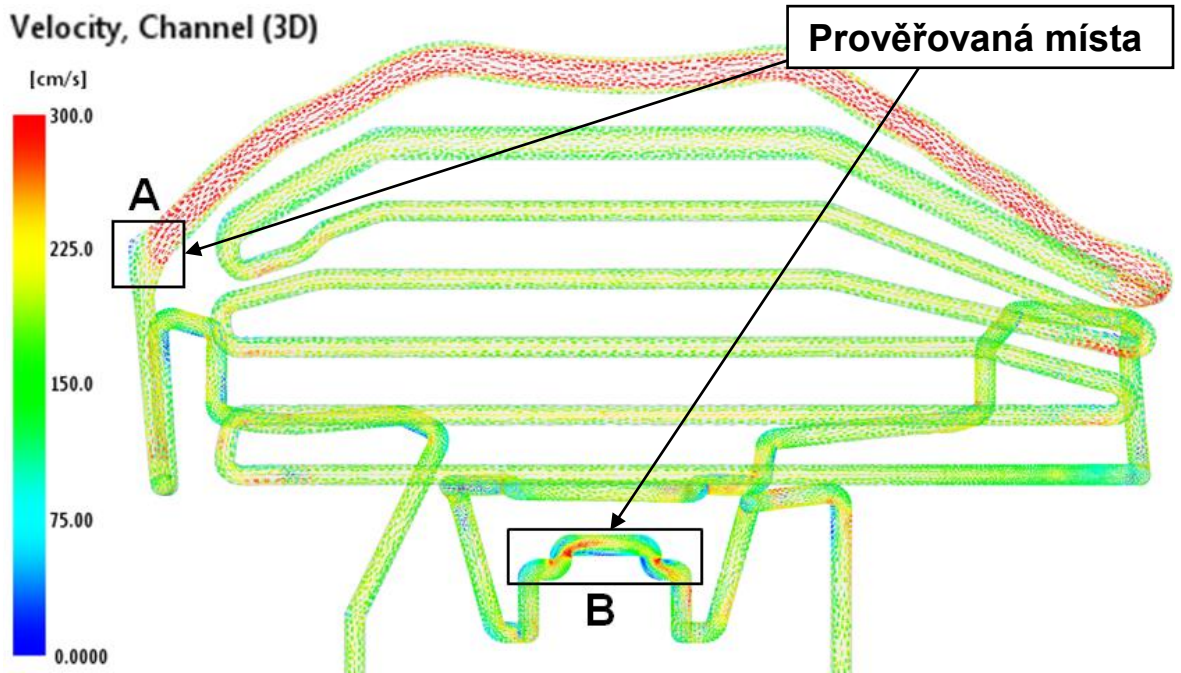


Obr. 3.28 Chlazení – čas nejvyššího tepelného toku

### 3.5.7. Kontrola 3D kanálu

Kontrolou kritických míst 3D kanálu je myšlena analýza některých úseků kanálu, které mohou vykazovat horší podmínky pro chlazení, či proudění. Tyto místa lze většinou lehkou změnou upravit a znatelně zlepšit, např. rádiusem, zkosením. Tvar může obsahovat i místa, která zcela nevyhovují. Většinou jsou to úzké části, bity, překážky, které místně zpomalují, či zastavují proudění. Tyto místa pak teplo neodvádějí, ale akumulují. Pokud to lze, je třeba je odstranit. Na obr. 3.29 jsou blíže vidět analyzovaná místa A a B, pozice míst zobrazena v obr. 3.29. Levý bok tvaru A by mohl být zkrácen, nebo ubrán větším rádiusem. Tvar B, by měl být vyhlazen, tedy blížit se tvaru hlavního proudění.

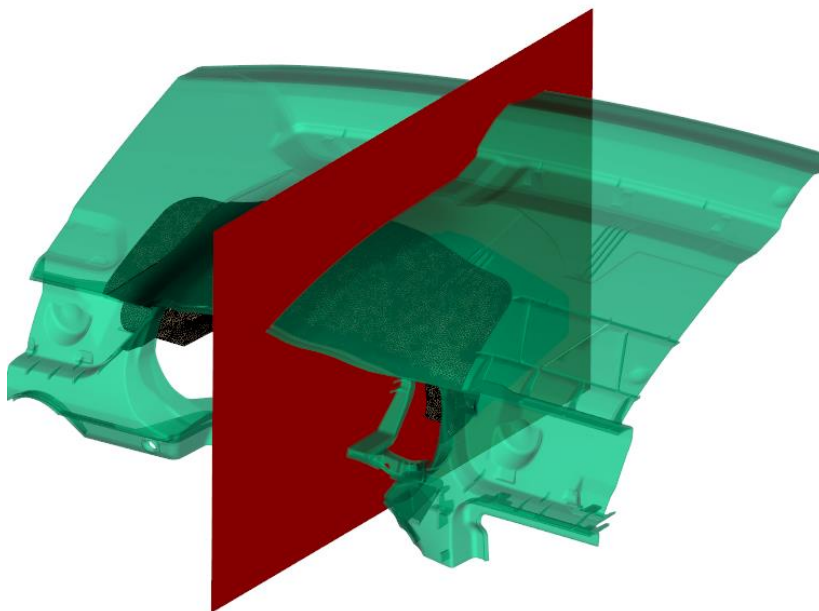




Obr. 3.29 Rozbor 3D chladícího kanálu

### 3.5.8. Definování řezu A

Řez „A“, viz obr. 3.30, definuje rovinu řezu, ve které budou zobrazovány, hodnoceny některé analýzy. Nebo bude využit jako doplňující zobrazení výsledku. Pozice řezu je zvolena středem klobouku, špička kšiltu klobouku je problematické místo, které je v řezu dobře hodnotitelné.



Obr. 3.30 Definování řezu A

### 3.5.9. Teplota stěny formy

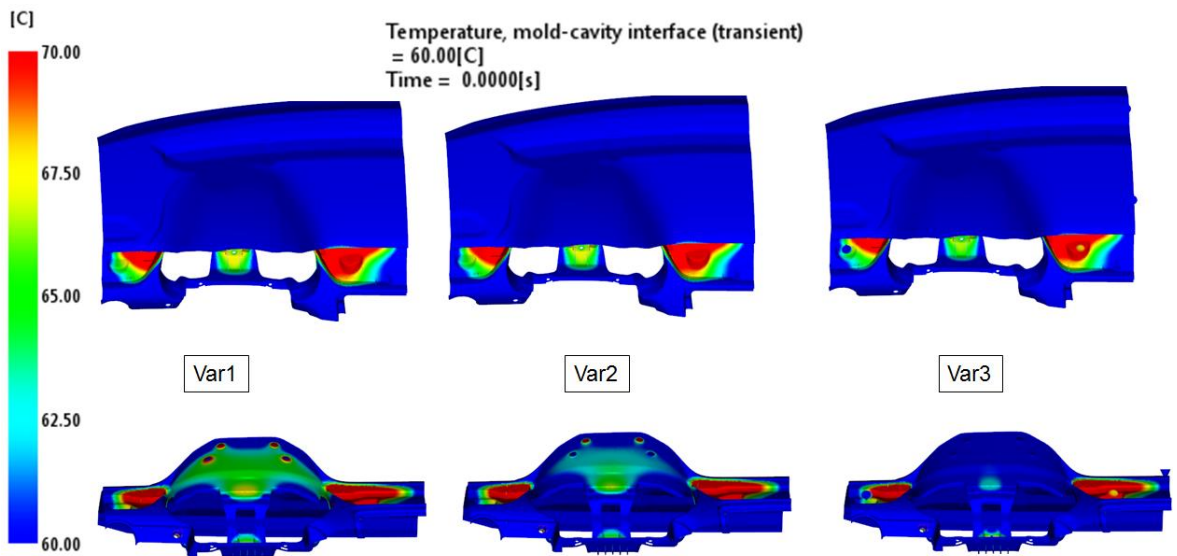
Teplotou povrchu formy je myšlena teplota stěny formy, která je v kontaktu s plastem. Rozdíl teplot by se měl pohybovat v doporučených mezích dle daného materiálu. Teplota stěny je obvykle vyšší, než je teplota chladicího média.

Minimální a maximální hodnota teploty stěny formy by měla být do 10 [°C] u amorfních materiálů a do 5 [°C] u materiálů semikrystalických [21].

Teplota stěny formy na začátku ustáleného cyklu se obvykle pohybuje mezi 10÷30 [°C] nad teplotou chladicího media. V cyklu teplota stěny kolísá. Pokud nárůst teploty stěny během cyklu není chlazení schopno odvést, vzniká rozdíl teplot stěny mezi jednotlivými cykly. Tento rozdíl teplot je charakteristický pro nájezd formy. [4], [21]

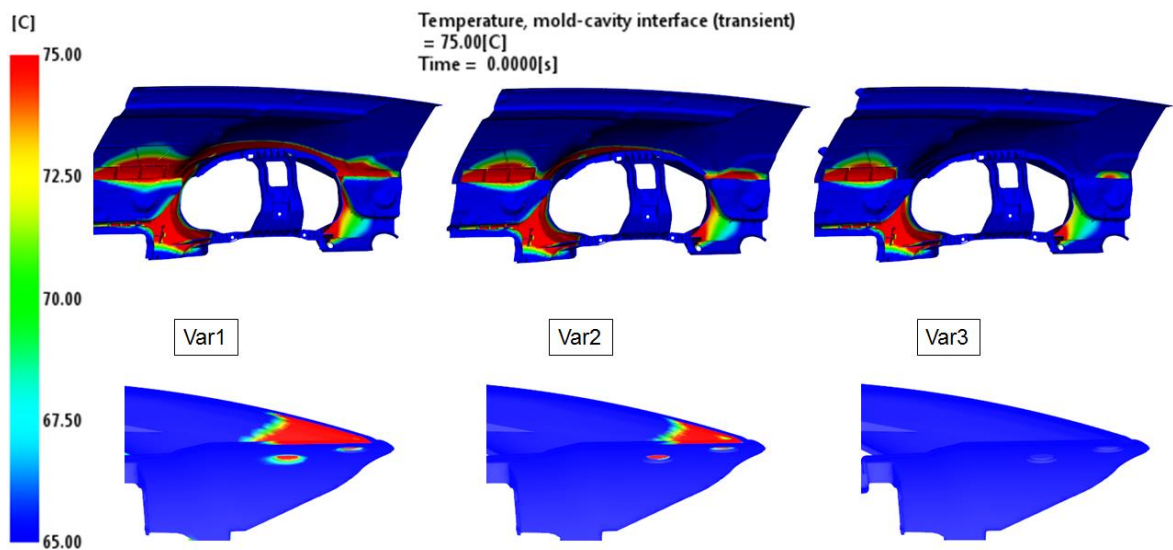
Na obr. 3.31 je vidět rozložení teplot pevné strany formy. Rozsah povolených teplot byl určen od 50 [°C] do 60 [°C] teploty povrchu formy. Modrá barva tedy znázorňuje akceptované rozmezí teplot, ostatní barvy znázorňují překročení akceptovatelného maxima. V místech s jinou barvou než modrou by měla být zvýšena intenzita chlazení.





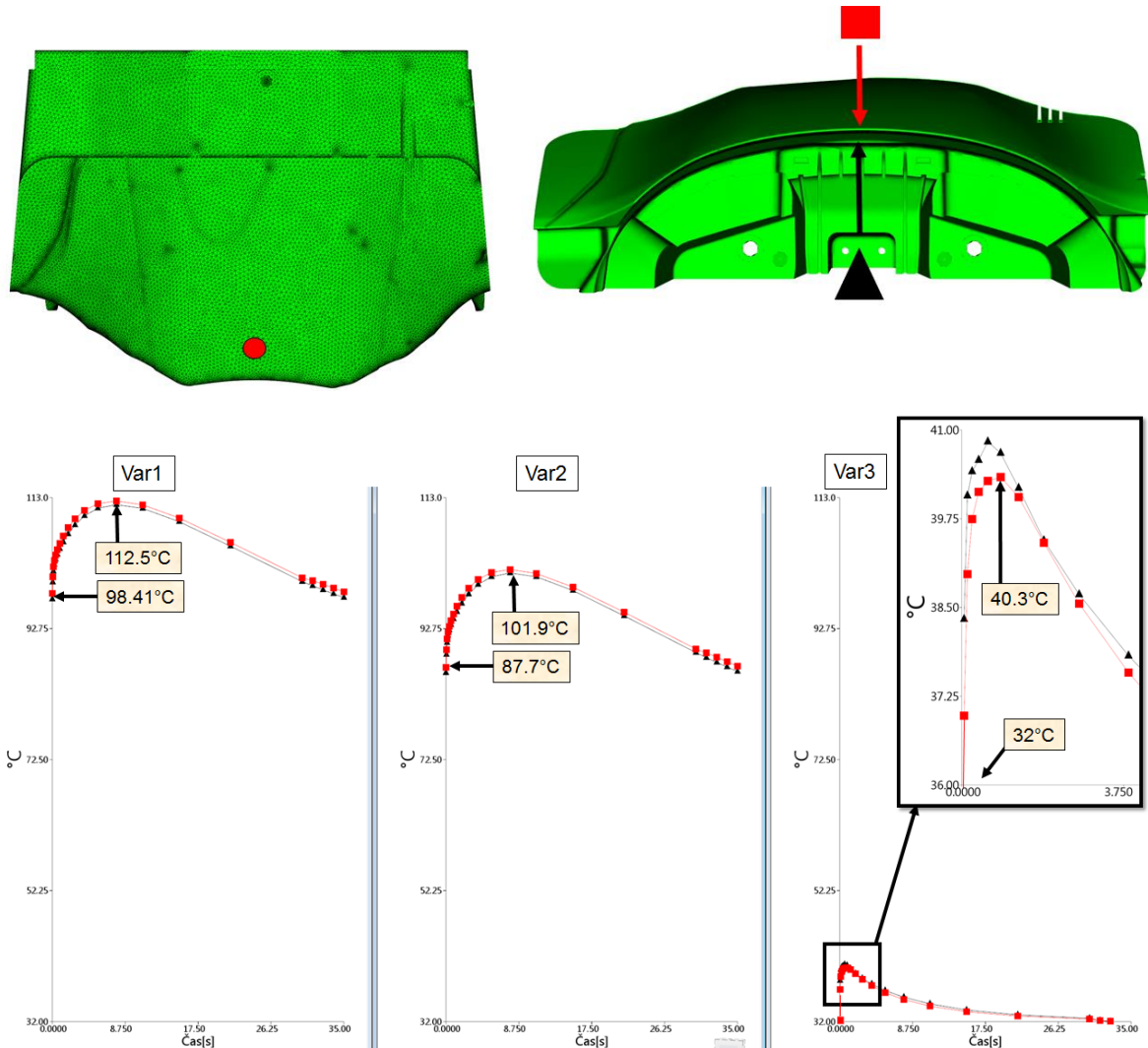
Obr. 3.31 Teplota stěny pevné strany formy

Na obr. 3.32 je vidět rozložení teplot pohyblivé strany formy. Rozsah povolených teplot byl určen od 55 [°C] do 65 [°C] teploty povrchu formy. Modrá barva tedy znázorňuje akceptované rozmezí teplot, ostatní barvy znázorňují překročení akceptovatelného maxima. V místech s jinou barvou než modrou by měla být zvýšena intenzita chlazení



Obr. 3.32 Teplota stěny pohyblivé strany formy

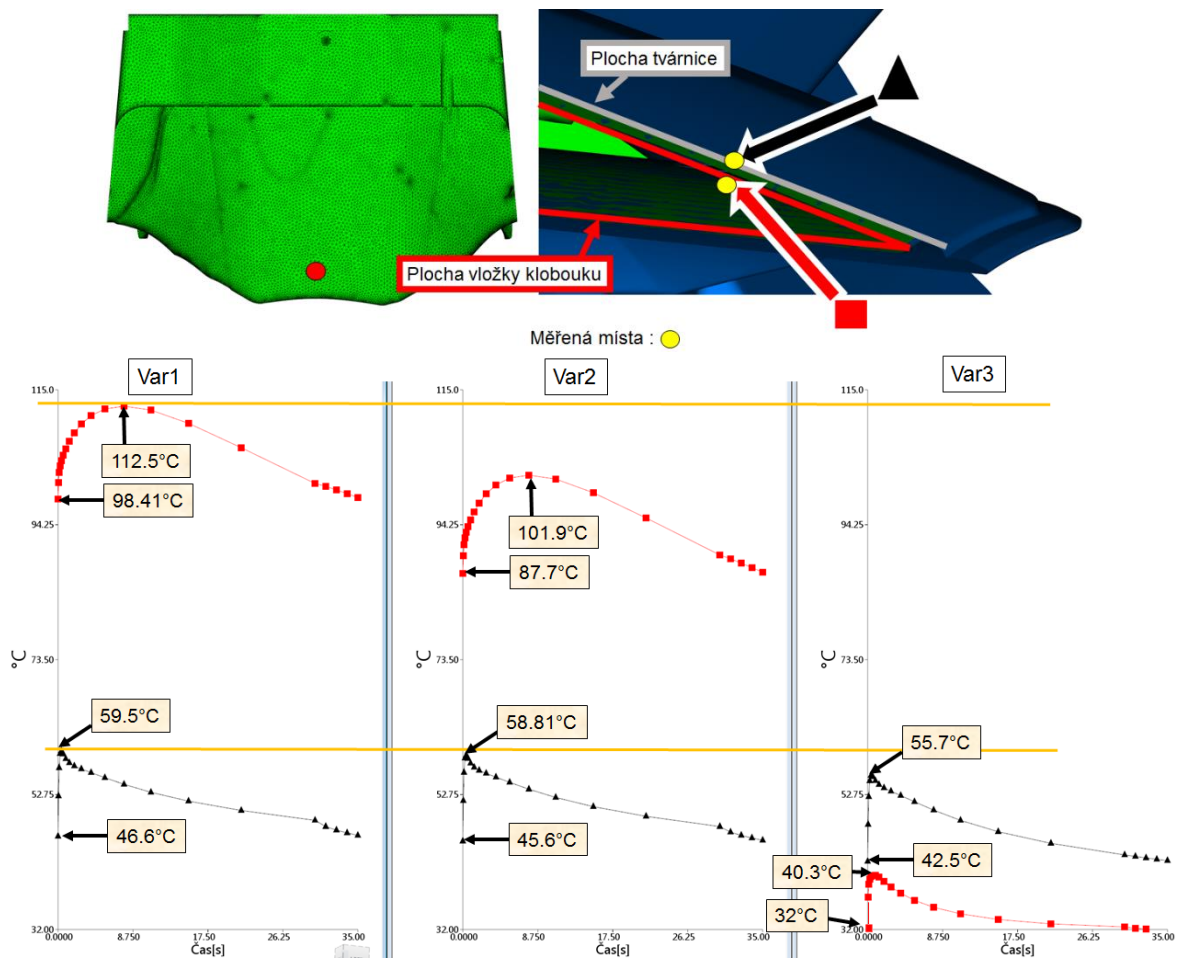
Na obr. 3.33 je porovnána bodová teplota tvaru vložky klobouku. Výsledky prokazují zvýšení chladícího efektu u Var2 i Var3. Vzhledem k tomu, že průběh a velikosti teplot v jednotlivých bodech jsou podobné, byly na grafech vypsány pouze hodnoty vrchního bodu.



Obr. 3.33 Průběh teplot vložky klobouku – v ustáleném cyklu

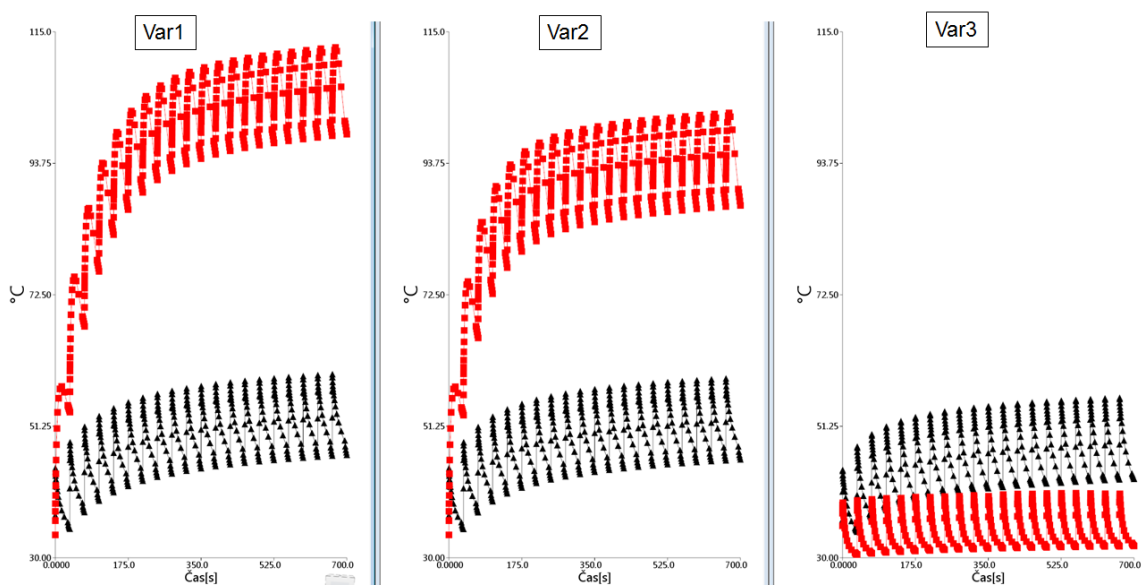
Na obr. 3.34 byla porovnána bodová teplota tvaru vložky a tvárnice. U Var1 a Var2 je na grafu vidět značný rozdíl teploty mezi protějšími body. Maximální rozdíl je, u Var1 a Var2, cca v 7 [s] cyklu. U Var1 je tento rozdíl +57 [°C], u Var2 +47 [°C]. Rozdíl teplot u Var3 je -13 [°C]. Problematicky chladitelná vložka má u Var3 lepší chlazení, než „jednoduše“ chladitelná tvárnice.

Při porovnání průběhů teplot na obr. 3.34 zjistíme, že tvárnice v měřeném bodě zvyšuje teplotu cca do 1 [s] cyklu. Var1 a Var2 ale navyšuje teplotu cca do 7 [s] cyklu. Var3 má stejný tvar křivky průběhu chlazení, jako tvárnice. Tvar křivky chlazení je optimální u tvárnice. Křivka teplot vložky Var1, Var2 předpokládá neprochlazené části tvaru, tedy akumulaci tepla.



Obr. 3.34 Porovnání průběhu teplot vložky klobouku a pevné strany - v ustáleném cyklu

Na obr. 3.35 jsou vidět grafy průběhů teplot a to od rozjezdu formy po 20 cyklů. Hodnoty jsou měřeny v bodech dle obr. 3.34. Rozdíl teplot mezi cykly na vložce jsou: Var1 – 13. cyklus +0.4 [°C], Var2 – 10. cyklus +0.4 [°C], Var3 – 5. cyklus +0.1 [°C].



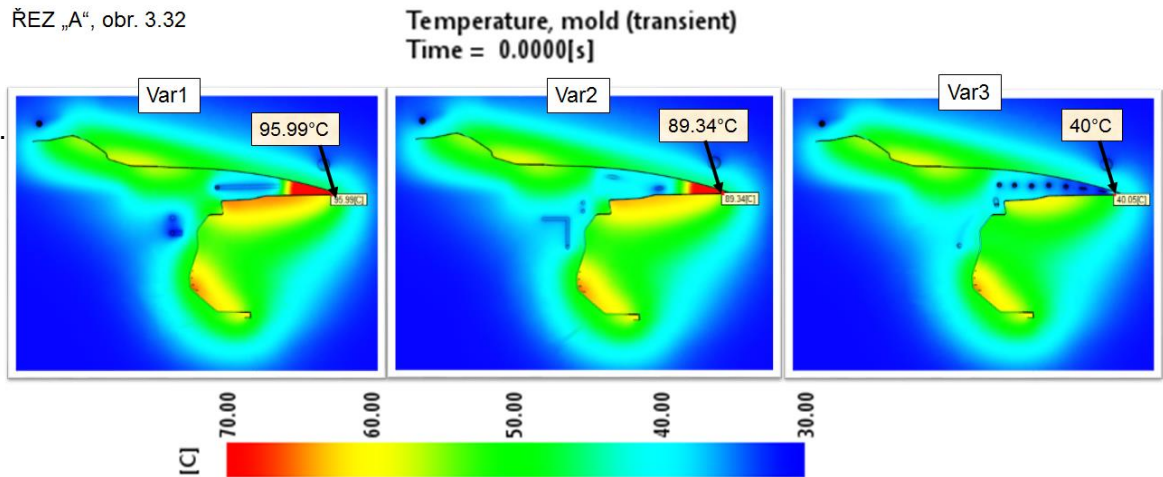
Obr. 3.35 Porovnání průběhu teplot vložky klobouku a pevné strany formy, ve 20

### 3.5.10. Teplota formy

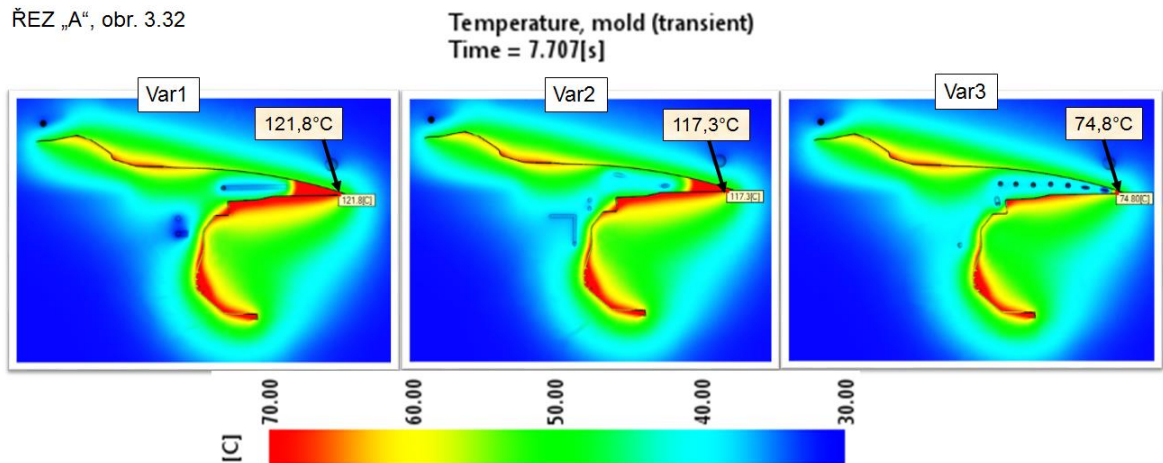
Průběh teplot v řezu formou lze použít pro kontrolu prostupu tepla formou. Tedy pokud chceme temperovat, lokalizuje se místo s největšími úniky. Pokud chceme chladit, lokalizují se místa přehřátá, místa s nedostatečnou intenzitou chlazení.

Obr. 3.36 ukazuje průběh teplot jednotlivých variant, v časech 0 [s], 7,7 [s], 31.39 [s].

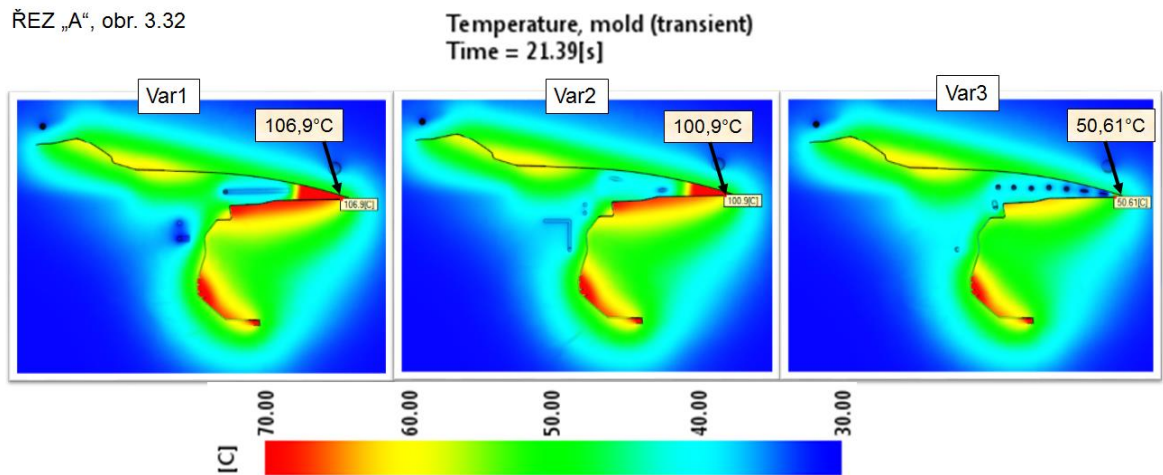
ŘEZ „A“, obr. 3.32



ŘEZ „A“, obr. 3.32



ŘEZ „A“, obr. 3.32

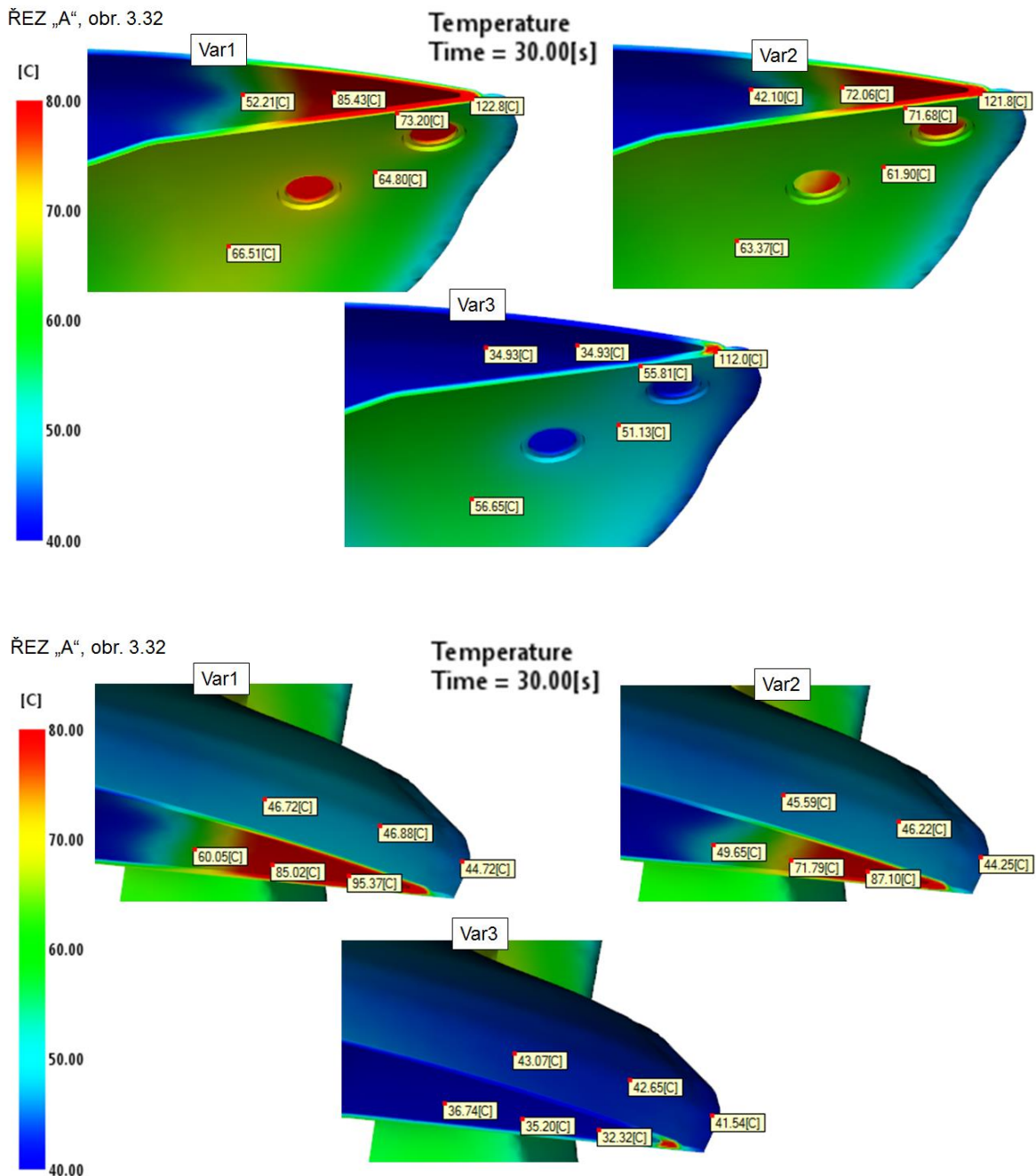


Obr. 3.36 Průběh teplot formy v řezu, během cyklu.



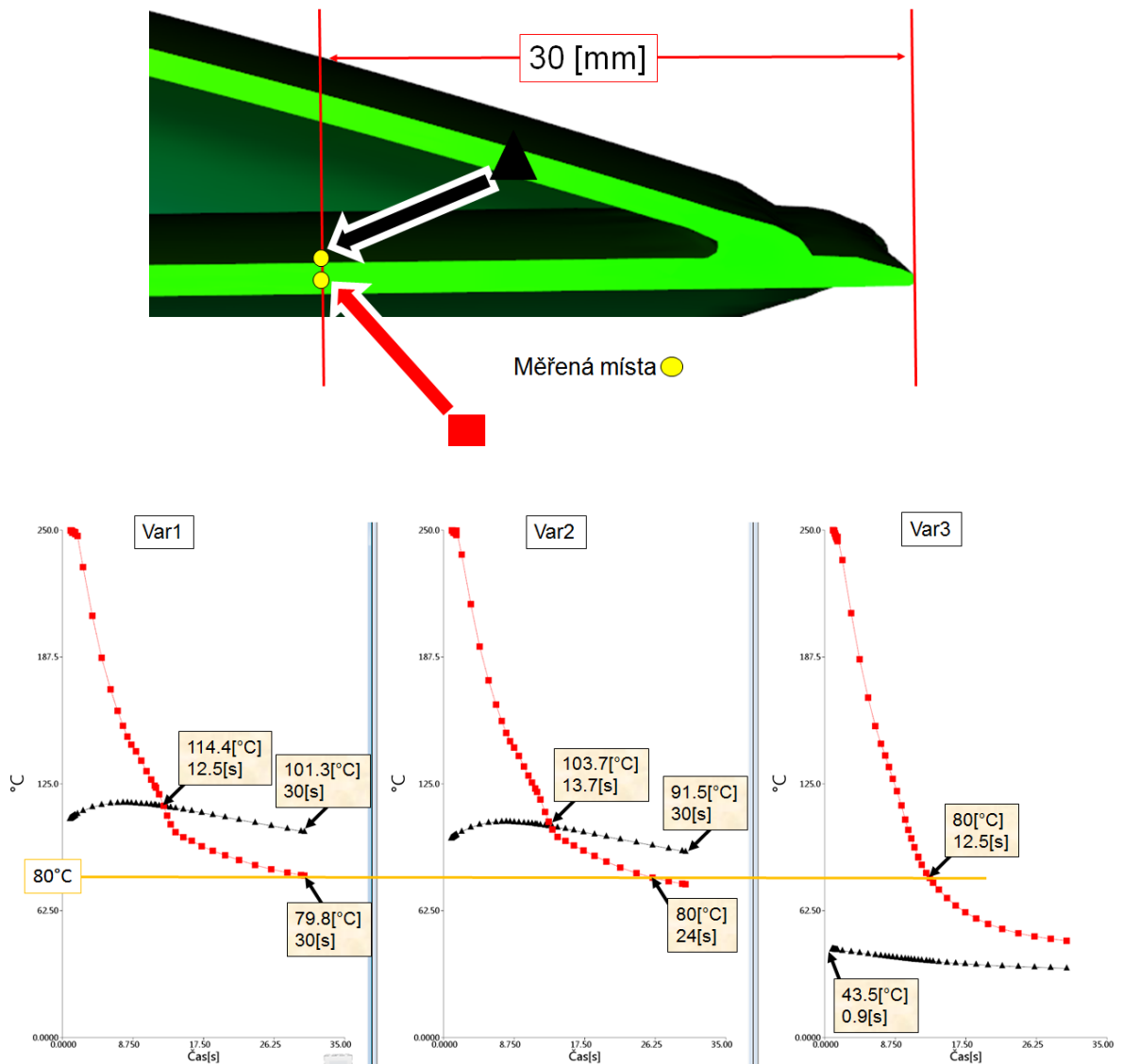
### 3.5.11. Teplota dílu na konci cyklu

Obr. 3.37 ukazuje teploty dílu na konci ustáleného cyklu. Díl může být vyhozen až tehdy, pokud má dostatečnou tvarovou stálost, aby nedošlo k jeho deformaci při odformování. Dle materiálového listu by teplota pro vyhození měla být minimálně 80 [°C]. Vyhovuje pouze Var3, zbylé varianty vyžadují delší dobu chlazení. Porovnání průběhu teplot vně a uvnitř vylisku viz obr. 3.38.



Obr. 3.37 Průběh teplot plastového dílu, v řezu.





Obr. 3.38 Průběh teplot vně a uvnitř plastového dílu, v řezu.

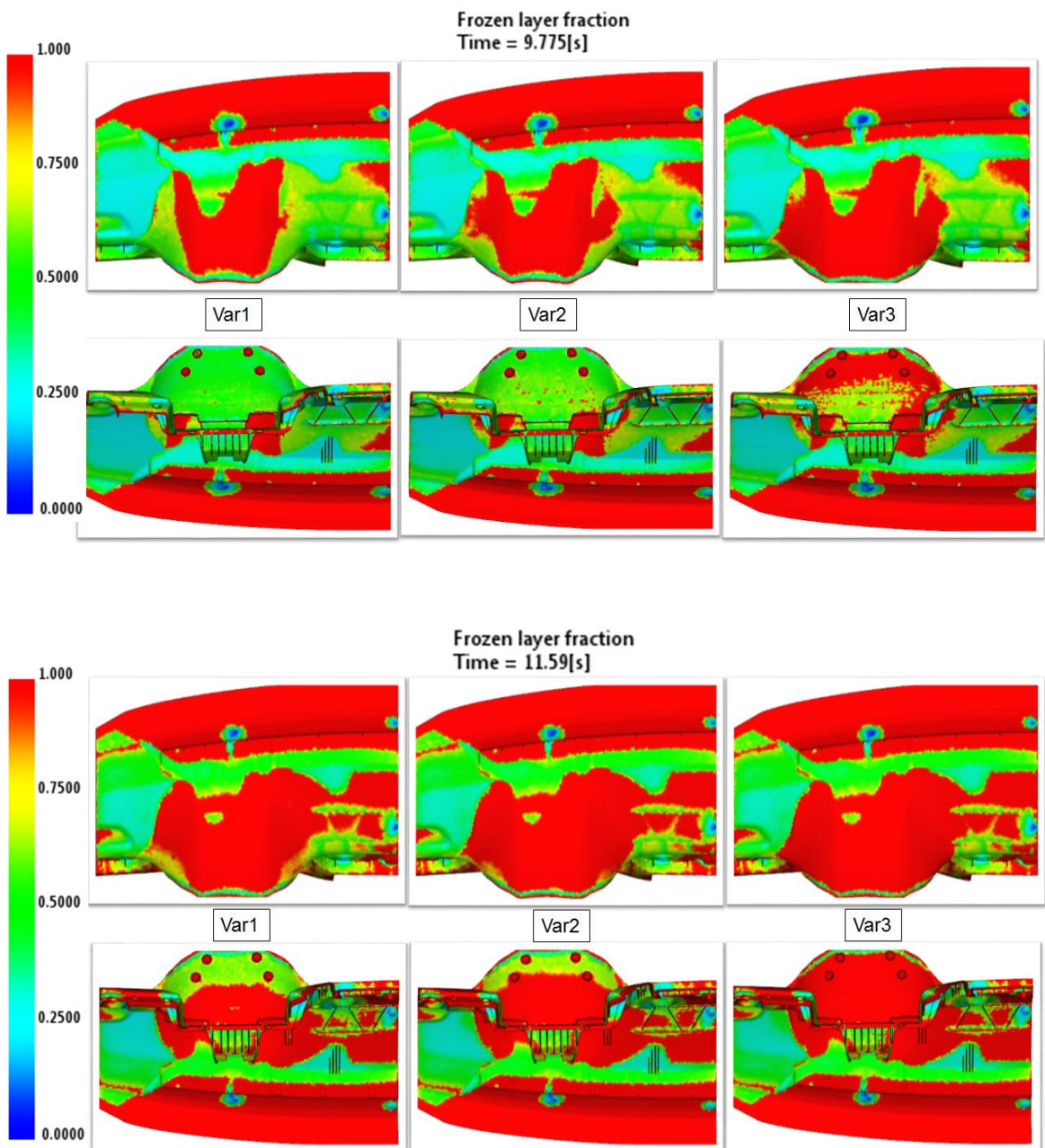
### 3.5.12. Průběh tuhnutí dílu

Výsledek ukazuje velikost zatuhnuté vrstvy tloušťky stěny dílu, viz obr. 3.39. Hodnoty jsou od 0 do 1, tedy 0 značí 100% taveniny a 1 značí 100% zatuhnutí dílu. Použitý plast je považován za zatuhnutý, když jeho teplota klesne pod transitní teplotu. Transitní teplotou je myšlena teplota, pod kterou materiál v dutině formy nedovoluje další doplňování taveninou, fáze dotlaku nemá účinek. Transitní teplota použitého materiálu je 122 [°C]. [4], [21]

Průběh tuhnutí dílu je závislý nejen na intenzitě chlazení, ale i na technologii vstřiku. Pokud plníme dutinu formy konstantní rychlostí čela taveniny, tak dochází k neustálému proudění nového materiálu mezi stěnami formy. Tuhnutí dílu pak není tak rychlé, protože teplo odvedené je nahrazováno teplem proudícího materiálu.

To jakým způsobem dochází k tuhnutí během plnění, ovlivňuje potřebu tlaku pro udržení rychlosti plnění dutiny formy. V dotlaku se přes zatuhnuté části dílu nedistribuuje tlak. Působení tlaku v dotlaku je důležité nejen z hlediska vad na díle, ale zatuhnutá místa mění působení tlaku na formu. Rozdílné tlaky vytvářejí nesouměrné namáhání, což podporuje prohnutí, deformace tvarů formy.

Na obr. 3.39 je vidět průběh tuhnutí dílu v čase 9.8 [s] a 11.6 [s]. Var1 a Var2 mají rozdílné tuhnutí dílu pod a nad kloboukem.

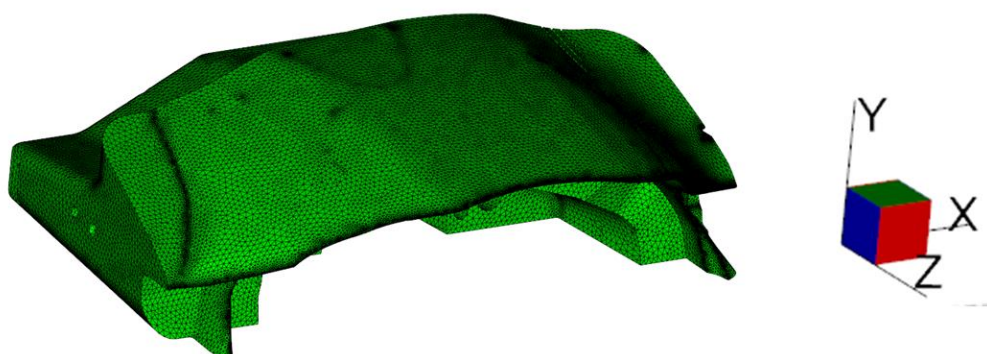


Obr. 3.39 Průběh tuhnutí plastového dílu

### 3.5.13. Deformace vložky klobouku

Výsledek ukazuje průběh deformace vložky klobouku. Deformace je závislá na průběhů tlaků v dutině formy, tyto tlaky jsou závislé na materiálu, technologii plnění dutiny a chlazení formy.

Všechny zobrazené deformace jsou deformace celkové, ve všech osách, 50x zvětšené. Protože nás zajímá hlavně deformace v ose Y, jsou barvy a odečítané hodnoty vztaženy jen na deformaci v ose Y. Směr osy Y je na obr. 3.40.



Obr. 3.40 Použitý souřadnicový systém

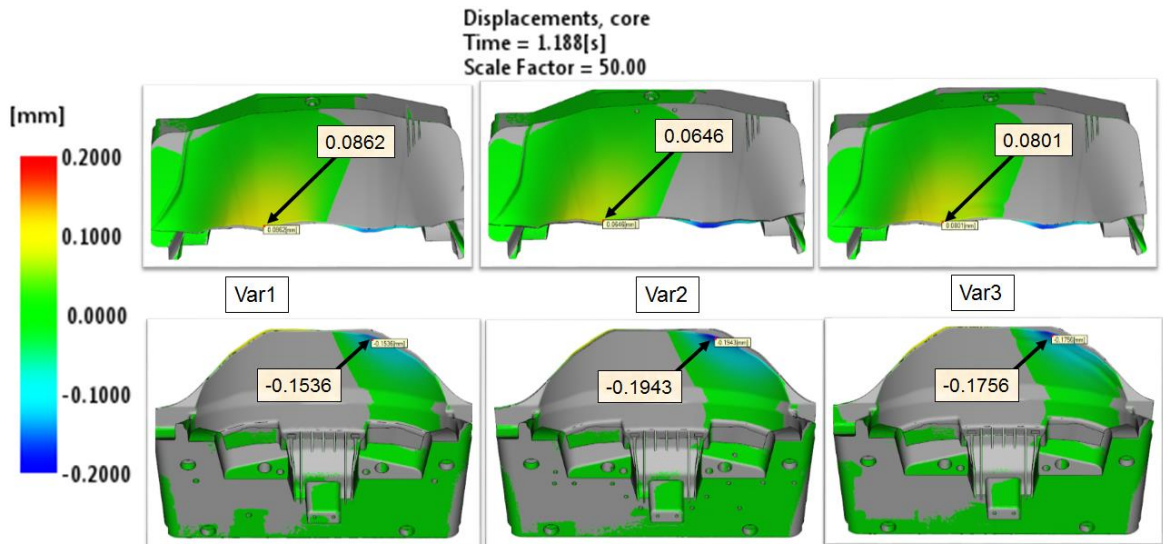
Vzhledem ke zjištění, že průběh chlazení vložky má vliv na síly na ni působící, viz obr. 3.19, je v simulaci nastaven stejný chladičí účinek pro všechny varianty, tedy nezávislý na tvaru chlazení vložky. Můžeme tedy porovnat tuhost jednotlivých variant za stejných podmínek namáhání. Závislost namáhání na průběhu změn tuhnutí materiálu v oblasti klobouku není vzhledem k rozsahu práce provedena.

Použitý materiál pro analýzu je ocel P20,  $E = 205000$  [MPa],  $\mu = 0,29$ .

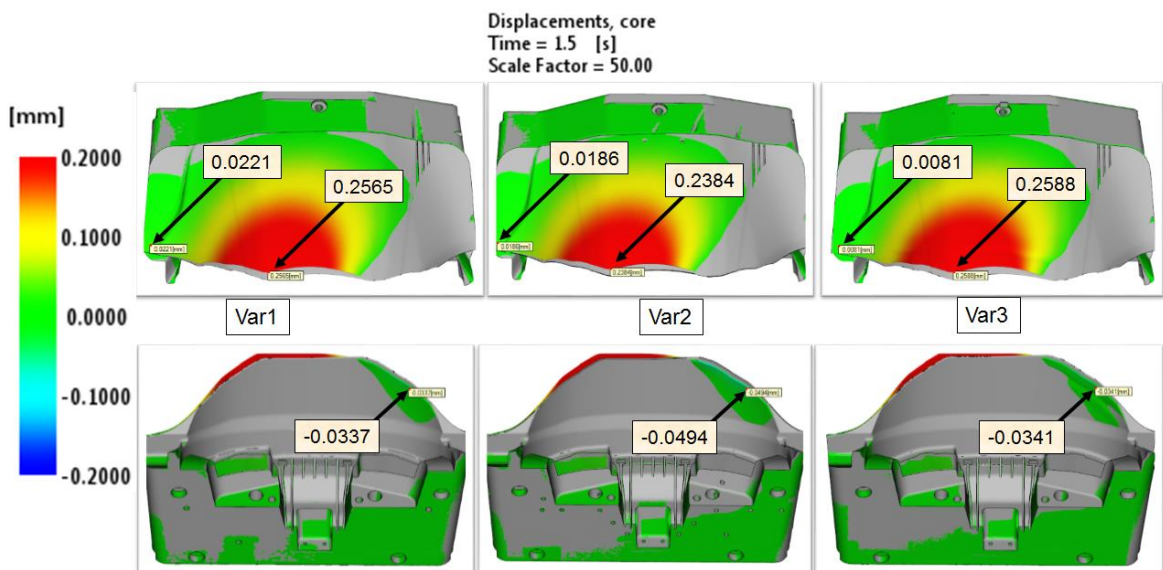
Deformace vzniklé během fáze vstřikování jsou nejvíce závislé na nastavené technologii vstřiku. Tryska pod kloboukem, při dané rychlosti plnění, vytváří vysoký tlak na spodní část klobouku a tím i znatelnou deformaci.

Obr. 3.41 zobrazuje deformace v čase 1.18 [s] cyklu, tedy těsně před otevřením prostředních trysek, viz obr. 3.17.

Obr. 3.42 zobrazuje deformace v čase 1.5 [s], tedy na konci vstřikovací fáze.



Obr. 3.41 Deformace vložky klobouku před otevřením prostředních trysek



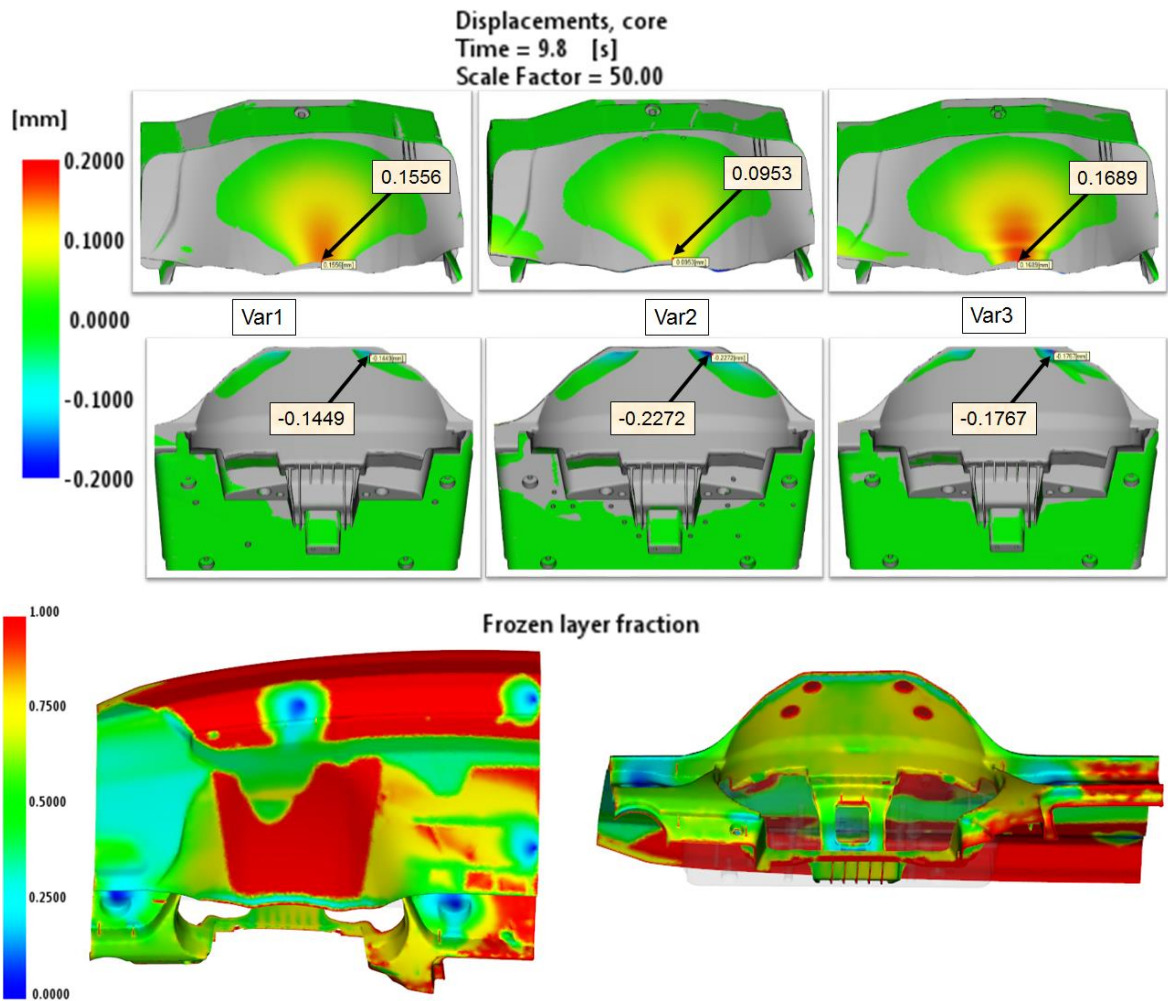
Obr. 3.42 Deformace vložky klobouku na konci vstřiku

Deformace, vzniklé během fáze dotlaku, jsou závislé na průběhu distribuce tlaku v dutině. Distribuce tlaku je ovlivněna tuhnutím dílu, tedy intenzitou chlazení.

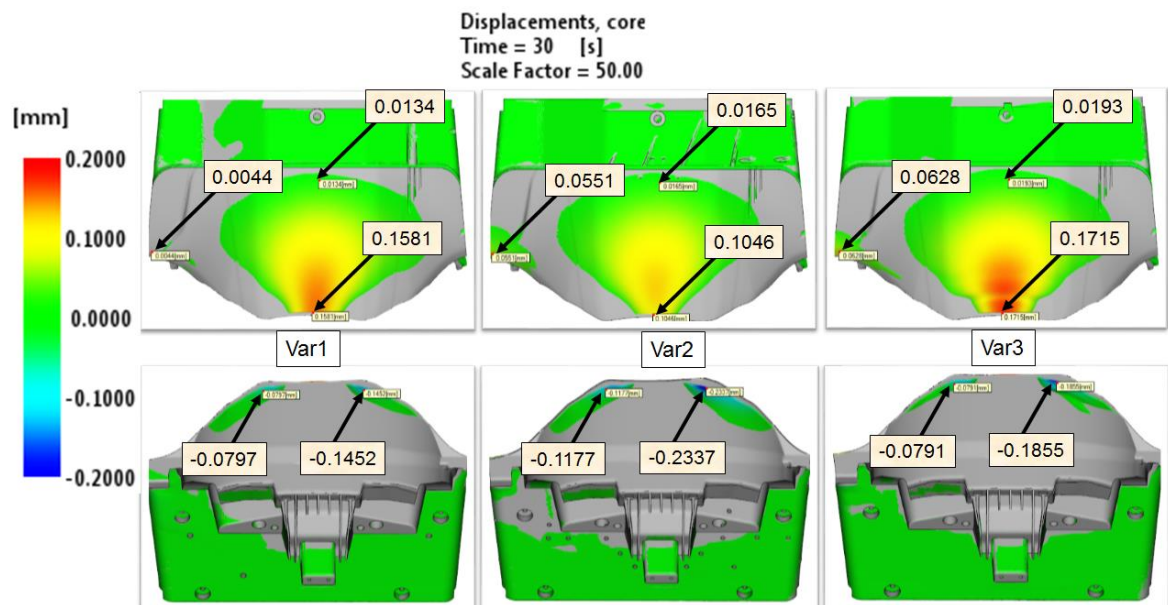
Na obr. 3.43 je zobrazena deformace vložky klobouku v čase 9.8 [s]. V tomto čase dotlaku je nejvíce znatelný rozdíl mezi tlakem nad a tlakem pod vložkou. Tento rozdíl tlaků je způsoben tím, že vrchní část klobouku je již zatuhnutá a spodní nikoliv, viz obr. 3.43.

Obr. 3.44, 3.45 zobrazují deformaci na konci cyklu.



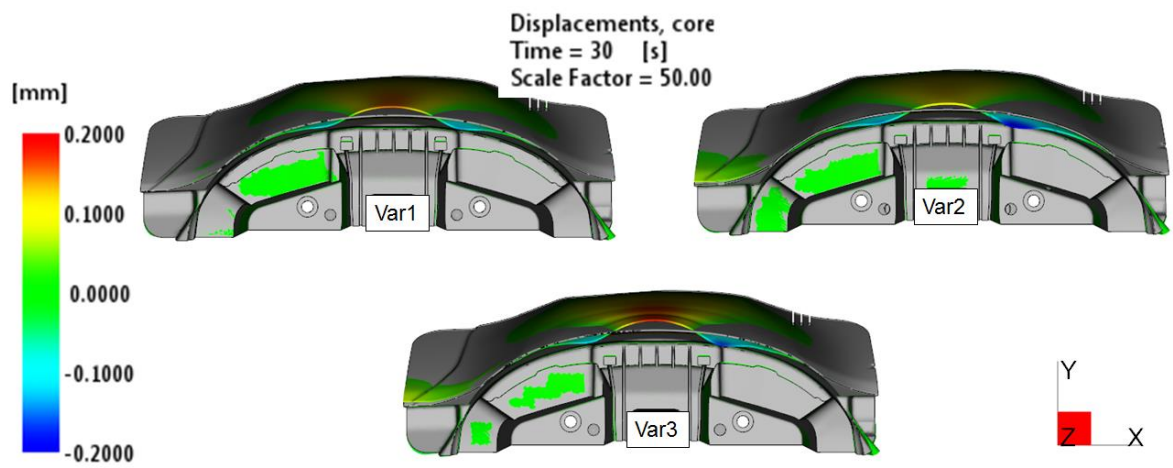


Obr. 3.43 Deformace vložky klobouku a zatuhnutá vrstva sílu v 9.8 [s]



Obr. 3.44 Deformace vložky klobouku na konci cyklu





Obr. 3.45 Deformace vložky klobouku na konci cyklu

## 4. Vyhodnocení výsledků

### 4.1. Tlak v dutině formy

Průběh tlaku, během plnění dutiny, ukazuje namáhání klobouk ve směru tečení taveniny, obr. 3.17, obr. 3.18. V dotlaku dochází, vlivem nestejnomyšerného tuhnutí plastového dílu, k jednostrannému namáhání. Tedy pod vložkou klobouku stále působí tlak od trysky na celou plochu, ale nad vložkou je velká část materiálu zatuhnutá, což omezuje distribuci tlaku nad klobouk, viz obr. 3.19. Rozdíl mezi tlaky vložku deformuje směrem vzhůru.

### 4.2. Chlazení vložky klobouku

#### 4.2.1. Tlak okruhu

Minimální vstupní tlak pro udržení průtoku v kanálu je u Var1: 3.6 [Bar], Var2: 3.7 [Bar], Var3: 1.8 [Bar]. Nejvyšší vstupní tlaku tedy vykazuje Var2, dle obr. 3.21. V závislosti na síle čerpadla a designu zapojení okruhu, tedy počtu fitinků a délky hadic, je možné že, okruh nebude v reálu zásobován dostatečným tlakem a jeho průtok může být nižší, než vypočtený. Po porovnání tlaků jednotlivých variant je zřejmé, že Var3, jakožto kanál s nejnižším potřebným vstupním tlakem, bude v reálu mít vyšší průtoky media a tím i vyšší efektivitu chlazení.

#### 4.2.2. Teploty okruhu

Rozdíly teploty vody mezi vstupem a výstupem jsou u všech variant nevyhovující. Čím více se zkvalitňuje tvar chlazení, tím větší je rozdíl teplot. Pro daná řešení, je tedy důležitý průtok, tedy zaměření se na vstupní tlak do okruhu. Pokud porovnáme aktuální tlakové ztráty jednotlivých variant, lze předpokládat, že v reálných podmínkách bude Var3 dovolovat vyšší průtoky, čímž se zvýší intenzita chlazení a klesne rozdíl vstupní a výstupní teploty. Nebude tedy docházet k převádění tepla do jiné části vložky a tvar tak získá stabilnější teplotu.

Při porovnání změn výstupních teplot z kanálů, viz obr. 3.25, je vidět, že Var2 má lepší průběh chlazení než Var1. Návrh Var2 bude vykazovat méně přehřátých míst vložky a tyto místa budou mít i menší akumulaci tepla, než u Var1. Průběh Var3 je optimální, nejlepší výsledek ze všech variant.

Tab. 1 a obr. 3.26 porovnávají ustálení výstupních teplot. Nejlépe vychází Var2, ale v reálu bude mít Var3 větší průtok, díky nižšímu odporu proudění a lze tedy předpokládat, že dosáhne stability mnohem dříve než zbylé dvě Varianty.

Na obr. 3.27 je vidět průběh Q na začátku ustáleného cyklu. Var1 a Var2 stále vykazují vysoké hodnoty Q, což značí, že nestihly vychladit určité části tvaru. Tvar tak může vykazovat znatelné rozdíly teplot. Var3 má Q blížící se k nule. Okruh nemá přehřátá místa, u tvaru se nepředpokládají vysoké rozdíly teplot.

Na obr. 3.28 je vidět průběh Q v čase největšího Q. Var3 dosahuje max. hodnot již po 2.7 [s] cyklu. Okruh je blíže exponované části tvaru, udrží tak její nižší teplotu a tím, že o 5 [s] odvádí teplo dříve, má pak při stejném cyklu 5 [s] navíc k vyrovná teplot vložky.

### 4.3. Teplota stěny formy

Při porovnání teploty stěny vložky klobouku a protější stěny tvárnice, viz obr. 3.34, jsou vidět vysoké rozdíly teplot. Var1 +57 [°C], Var2 +47 [°C], Var3 -13 [°C]. I přesto, že Var2 vykazuje znatelné zlepšení je hodnota +47 [°C] neakceptovatelná. Var3 vykazuje intenzivnější chlazení než plocha tvárnice. Při kontrole ustálení teplot tvaru, je Var3 ideální viz obr. 3.35.

### 4.4. Plastový díl

#### 4.4.1. Teplota dílu na konci cyklu

Při porovnání teplot dílu na konci cyklu, uvnitř a na povrchu stěny dílu, je zjištěno, že teplota stěny výlisku u Var1 a Var2 je nevyhovující, viz tab. 6. Materiál má doporučenou teplotu pro vyhození 80[°C], tuto teplotu splňuje jen Var3. Var2 vykazuje znatelné zlepšení, ale i přesto je pro tuto variantu cyklus příliš krátký. Průběh změny teplot viz obr. 3.38.

Dle hodnot v tab. 5, tab. 6, naměřených na grafu obr. 3.38, lze odečíst předpoklad doby cyklu pro jednotlivé varianty. Var1 předpokládá prodloužení cyklu o 40 [s]. Var2 předpokládá prodloužení cyklu o 15 [s]. Var3 lze teoreticky vyjmout z formy po 12.5 [s] cyklu, to znamená snížení cyklu o 17.5 [s].

Tab. 5 Teplota vstřikovaného dílu uvnitř stěny

Teplota plastového dílu na konci cyklu - ve středu stěny (uvnitř)			
	Var1	Var2	Var3
[°C]	79.8	75.5	47.7
			80°C dosáhne ve 12.5[s]

Tab. 6 Teplota stěny vstřikovaného dílu

Teplota plastového dílu na konci cyklu - na stěně (vně)			
	Var1	Var2	Var3
[°C]	101.3	91.5	34
			teplota nepřesáhne 43.5°C
Předpokládaná doba cyklu	+40[s] celkem 35+40=75[s]	+15[s] celkem 35+15=50[s]	

#### 4.4.2. Průběh tuhnutí dílu

Průběh tuhnutí dílu je v tomto případě důležitý z hlediska působení tlaku na vložku klobouku, tedy na výslednou deformaci vložky. Problém s nepoměrem tuhnutí protějších ploch je spíše závislý na špatném chlazení tvárnice pod kloboukem. Tvar nad vložkou je chlazen intenzivněji, rychleji tuhne a tím narůstá nerovnováha působící síly, viz obr. 3.38.

Var2 má intenzivnější chlazení, proces tuhnutí je tedy rychlejší, ale poměr zatuhnuté spodní a vrchní plochy klobouku je stejný jako u Var1. Nebude mít vliv na změnu namáhání. Deformace vzniklé v dotlaku budou znatelné.

Intenzita chlazení Var3 je tak vysoká, že „nahrazuje“ chlazení tvárnice. Průběh tuhnutí taveniny nad a pod kloboukem je stejnoměrný. Deformace vzniklé působením dotlaku budou minimální.

#### 4.4.3. Ekonomické vyhodnocení

Po kontrole průběhů změn teploty dílu, uvnitř a vně stěny, je zjištěno, že Var1 a Var2 vyžadují prodloužení cyklu, aby bylo docíleno akceptovatelných teplot pro vyjmutí dílu z formy. Var3 je akceptovatelný, umožňuje i snížení doby cyklu.

Životnost formy je předpokládána 1000 000 zdvihů. Porovnání úspor, či prodražení Var2 a Var3 vůči Var1 viz tab. 7.

Tab. 7 Ekonomické zhodnocení jednotlivých variant

Cena strojehodiny: 1850[Kč/hod] => 0.514[Kč/s]								
	Min. čas cyklu [s]	Cena stroje [Kč] pro 1cyklus	Úspora vůči Var1 [Kč] na jednom dílu	Úspora vůči Var1 [Kč] na 1 000 000 [ks]	Cena výroby varianty [Kč]	Rozdíl ceny výroby vůči Var1 [Kč]	Návratnost investice [ks]	Celková úspora při 1 000 000 [ks]
Var1	75	$0,514 \times 75 = 38,55$	0	0	191 000	0	0	0
Var2	50	$0,514 \times 50 = 25,7$	12,85	12 850 000	206 000	+ 15 000	1168	$12 850 000 - 15 000 = 12 835 000$
Var3	12,5	$0,514 \times 12,5 = 6,43$	32,12	32 120 000	740 000	+ 549 000	17093	$32 120 000 - 549 000 = 31 571 000$

#### 4.5. Deformace vložky klobouku

Deformace vložky klobouku je závislá na průběhu tuhnutí dílu, proto je, pro výpočet deformací, rozdílné chlazení vložky ignorováno. Intenzita chlazení je pro všechny varianty „stejná“.

V dotlaku je vložka zatěžována nesouměrným tlakem, protože tuhnutí dílu nad a pod vložkou je rozdílné. Dochází tedy k jednostrannému namáhání a vzniku větších deformací. Deformace vzniklé během dotlaku se po zatuhnutí dílu, uvolnění tlaku, vracejí do původního

stavu a tím namáhají zatuhnutý plastový díl. Může dojít k deformaci dílu, nebo ke změně tloušťky stěny dílu.

Vzhledem k tomu, že lze vložku klobouku ve směru  $-Y$  podepřít, jsou pro porovnání brány pouze hodnoty deformací  $+Y$ , viz obr. 3.40. Hodnoty deformací viz tab. 8, tab. 9. Nejmenší deformace a tedy nejvyšší tuhost ve směru  $+Y$  vykazuje návrh Var2.

*Tab. 8 Deformace vložky klobouku během*

Maximální deformace, ve směru +Y, během vstřiku			
	Var1	Var2	Var3
[mm]	0.2565	0.2384	0.2588
		nejmenší deform.	

*Tab. 9 Deformace vložky klobouku během*

Maximální deformace, ve směru +Y, během dotlaku			
	Var1	Var2	Var3
[mm]	0.1581	0.1046	0.1715
		nejmenší deform.	



## 5. Závěr

Bakalářská práce se zabývá rozbořem možností návrhů temperačních okruhů ve výrobné problematice části vstřikovací formy.

V teoretické části je představen průběh cyklu výroby vstřikovaného dílu, nastavení a technologické parametry, které se promítají do jednotlivých výsledků v experimentu. Představení pojmů „pevná“ a „pohyblivá“ strana formy, temperační zařízení, horký systém jsou důležitá pro další porozumění výsledků simulace. Teoreticky popsany výraz „ustálený cyklus“ je důležitý pro vysvětlení různých variací výsledků od zde představených, je to jedna z hlavních okrajových podmínek pro porovnání výsledků simulace s reálnými hodnotami. Pro rozbor výsledků proudění chladiva v kanálech bylo využito teorie Reynoldsova čísla a obtékání překážky. Závěr teoretické části je věnován možnostem návrhu chladicího systému a jeho vlivu na kvalitu výrobku.

V úvodu experimentální části je popsána tvorba modelů a výpočtových sítí. Po přípravě modelů, vysvětlení jednotlivých kroků nezbytných k získání relevantních výsledků byly následně aplikovány okrajové podmínky. Okrajové podmínky, kterými lze ovlivnit přesnost a výpočtový čas simulační analýzy byly podřízeny vyšší přesnosti, tedy delším výpočtovým časům. Experiment dále objasňuje plnění dutiny formy a průběh tlaků. Jednotlivé varianty chladících okruhů vložky klobouku jsou porovnány z mnoha aspektů, jako jsou tlakové ztráty, průběh změny teplot, intenzita chlazení. U Var3 (vložka vyrobená DMLS technologií) je na chladicí okruh použita analýza proudění, lze tedy přezkoumat kanál a najít problematické části. Jednoduchými úpravami lze tak navýšit, už tak vysokou, intenzitu tohoto nekonvenčního chlazení. V experimentální části byl proveden rozbor teplot povrchu kavity formy, průběh prostupu tepla formou a teplot vstřikovaného dílu. Veškeré hodnoty jsou vzájemně porovnány, hodnoceny vůči hodnotám doporučeným, které jsou v jednotlivých kapitolách představeny.

Z provedených experimentů, a z porovnání výsledků konstrukčních variant temperačních vložek, vykazují Var2 i Var3 znatelná zlepšení. Z hlediska odvodu tepla vykazuje nejlepší hodnoty Var3. Chladicí intenzita Var3 přesahuje i chladicí intenzitu protější stěny, tvárnice. Vypočtená intenzita je závislá na průtoku vody vložkou. Var3 vykazuje nejmenší tlakovou ztrátu ze všech variant, lze tedy předpokládat, že v reálných podmínkách by fungovala za vyšších průtoků než zbylé dvě varianty. Reálné navýšení intenzity chlazení vůči Var1 lze předpokládat ještě vyšší než vypočtené.

Ekonomický přínos, vztažený k výrobě 1 000 000 ks dílů, je u Var2: 12 835 000 Kč, u Var3: 31 571 000 Kč. Optimalizované varianty vykazují vícenásobky, jejich návratnost je u Var2: 1168 dílů, u Var3: 17093 dílů. Ekonomické zhodnocení je vztaženo pouze k oblasti vložky klobouku, okolní části vstřikovaného dílu, formy nejsou do zhodnocení uvažovány. Studie zkoumá a optimalizuje pouze oblast vložky klobouku, okolní části jsou využity jen pro distribuci zatížení, přiblížení se reálným hodnotám teplot a tlaků procesu. Ekonomické zhodnocení je tedy teoretické, pokud chceme v reálu docílit daných přínosů, je nutné optimalizovat i zbytek formy.

Experimentální část zkoumá i deformace, tuhost jednotlivých variant vložek klobouku. Nejlepšího výsledku dosahuje Var2, zlepšení přibližně 34%. Tuhost Var3 je horší než u Var1. V průběhu kontroly tlaků a tuhnutí dílu se zjistilo, že namáhání kšiltu vložky, během dotlakové fáze, je závislé na poměru tuhnutí materiálu nad a pod vložkou. Tuhnutí není stejnoměrné, nevyvážením podporuje působení tlaku jen z jedné strany vložky a tím i vznik deformací. Z výsledků chlazení vyplývá, že za nerovnovážné chlazení nemůže jen chlazení ve vložce klobouku, ale hlavně chlazení okolních tvarů, chlazení tvárnice. Posuzovaný výsledek deformací ocelové vložky klobouku, je závislý na zatížení, jež je ve všech variantách „stejně“, nezávislé na rozdílech intenzity chlazení vložky. V analýze má vložka Var3, tak intenzivní chlazení, že dochází ke stejnému průběhu tuhnutí pod i nad vložkou, „nahrazuje chlazení tvárnice“. Reálné namáhání, během fáze dotlaku, bude tedy menší než u zbylých dvou variant, což znamená, že i přesto, že Var3 má nejnižší tuhost ze všech variant, mohla by tato tuhost v dotlakové fázi, vzhledem optimálnímu tuhnutí dílu, být dostačující. Deformace vzniklé během fáze vstřiku jsou závislé na technologii vstřiku, rychlosti plnění a tlacích. Tryska pod kloboukem, při dané rychlosti plnění, vytváří nejvyšší namáhání, deformaci klobouku v celém cyklu.

## 6. Seznam použitých zdrojů

- [1] Krebs, J. Teorie zpracování nekovových materiálů. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006. ISBN 80-7372-133-3.
- [2] Lenfeld, P. Technologie II – 2. část (Zpracování plastů). Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-467-2.
- [3] Kulharni, S. Robust Process Development and Scientific Molding – Theory and Practice, 2010. ISBN 978-3-446-42275-9
- [4] Shoemaker, J. Moldflow Design Guide – A Resource for Plastics Engineers, 2006. ISBN 13: 978-1+56990-403-9.
- [5] Nožička, J. Mechanika tekutin. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2006. ISBN 80-01-02865-8
- [6] Urbášek, J. Termomechanika a mechanika tekutin – Přehled základních fyzikálních veličin, zákonů a rovnic, Liberec 1990
- [7] Řehulka, Z. Konstrukce výlisků z plastů a forem pro zpracování plastů, Brno 2013
- [8] Zeman, L. Vstřikování plastů. Praha: BEN – technická literatura, 2009. 248 s. ISBN 80-7300-023-1
- [9] Roseto, V. *Injection Molding Handbook*. Norwell: Kluwer Academic Publisher, 2000. ISBN 0-7923-8619-1.
- [10] Gastrow, Hans Injection Molds: 108 Proven Designs Edited by K. Stoeckhert. Hanser Publishers, Munich Vienna New York 1993.
- [11] Menges, G. and Mohren, P. How To Make Injection Molds, 2nd Edition Hanser Publishers, Munich Vienna New York 1992.
- [12] skripta vutbr [online], [http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/cviceni\\_soubory/htn\\_tvareci\\_nastroje\\_vstrikovaci\\_formy\\_zak.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/cviceni_soubory/htn_tvareci_nastroje_vstrikovaci_formy_zak.pdf)
- [13] konformní chlazení [online], <http://www.innomia.cz/sluzby/konformni-chlazení>
- [14] chlazení Contura [online], <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/52753-Molde-con-control-de-temperatura-close-contour-para-superficies-tip-top-de-ciclos-cortos.html>
- [15] temperace vstřikovacích forem [online], <https://publi.cz/books/179/08.html>
- [16] temperace vstřikovacích forem [online], <http://www.plasticportal.cz/cs/temperace-vstrikovacich-forem-dulezita-podminka-vyroby-vystriku-z-termoplastu-4-cast/c/3088>
- [17] materiál Moldmax [online], <http://www.uddeholm.cz/czech/files/moldmax-hh.pdf>
- [18] temperace vstřikovacích forem [online], [https://www.kks.zcu.cz/projekty-ver-fin/OPVK\\_PU/KA\\_05\\_publikace/KA05\\_Temperace\\_vstrikovacich\\_forem.pdf](https://www.kks.zcu.cz/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publikace/KA05_Temperace_vstrikovacich_forem.pdf)
- [19] vstřikovací formy pro zpracování termoplastů [online], <https://publi.cz/books/179/Cover.html>
- [20] skripta mff – obtékání, mezní vstvy a úplav [online], [http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz\\_fyziky\\_pro\\_DS/display.php/kontinuum/4\\_6](http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/4_6)

- [21] Autodesk. Manuál programu Autodesk Moldflow Insight. [online],  
<http://help.autodesk.com/view/MFIA/2016/ENU/?guid=GUID-66B3B0E8-DB05-4DC5-8E8F-CCA29A11A7ED>
- [22] metoda DLMS [online], <http://www.3d-tisk.cz/technologie-dmls-pri-opravach-forem-prostrednictvim-3d-tisku-kovovym-materialem/>
- [23] program Moldflow [online], <http://www.td-is.cz/cs/produkty/autodesk-simulation/moldflow.htm>