

# **Vliv procesních parametrů na smrštění vstřikované součásti**

**Bc. Jan Hanák**

---

Diplomová práce  
2005



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta Technická

---

***Vložit oficiální zadání diplomové/bakalářské práce***

Chtěl bych touto cestou poděkovat za podporu a umožnění provedení experimentální části této práce firmě Robert BOSCH v Českých Budějovicích. Jmenovitě bych chtěl poděkovat panu Pavlu Černohorskému, panu Lubomíru Hrdličkovi a Ing. Martině Laňkové za cenné rady, pomoc a ochotu s jakou se mi věnovali.

Samozřejmě také děkuji vedoucímu mé diplomové práce Ing. Petru Halaškovi, za udělené rady, pomoc a vedení.

Prohlašuji, že jsem na celé diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně, 23. 5. 2005

.....

Jan Hanák

## **ABSTRAKT**

### ***Abstrakt česky***

Tato práce se zabývá problematikou vlivu technologických podmínek, jako je teplota formy, teplota taveniny a dotlak na smršťování vstřikovaných plastových dílů. Experimentální část se zabývá vlivem těchto technologických parametrů na smrštění zkušebních tělísek, reálných výrobků a analýzou smrštění pomocí počítačové aplikace Moldflow. Při těchto experimentech bylo použito materiálů PA66 a POM.

### ***Abstrakt ve světovém jazyce***

This work deals with the influence of technological conditions such as mold temperature, melting temperature and holding pressure, on shrinkage of injected plastic parts. The influence of these technological parameters on shrinkage of specimens and real products and analysis of shrinkage by computer application Moldflow is studied in the experimental part. Materials PA66 and POM were used in the experiments.

**OBSAH**

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| Obsah .....                                                | 5  |
| Úvod.....                                                  | 7  |
| I. Teoretická část .....                                   | 8  |
| 1 Technologie vstřikování polymerů .....                   | 9  |
| 1.1 Vstřikovací stroj.....                                 | 9  |
| 1.2 Vstřikovací cyklus .....                               | 10 |
| 1.2.1 Plnění .....                                         | 11 |
| 1.2.2 Dotlak.....                                          | 13 |
| 1.2.3 Chlazení .....                                       | 14 |
| 2 Smrštění a deformace.....                                | 17 |
| 2.1 Smrštění ve formě .....                                | 17 |
| 2.1.1 Určení smrštění .....                                | 18 |
| 2.1.2 Orientace a napětí ve výstřiku .....                 | 19 |
| 2.2 Deformace.....                                         | 21 |
| 2.2.1 Běžné příčiny nerovnoměrného smrštění výstřiku ..... | 22 |
| 2.3 Smrštění po odformování.....                           | 24 |
| 3 Vliv plniv, vyztužení a pigmentů.....                    | 25 |
| 3.1 Vliv plniva a krátkých vláken .....                    | 25 |
| 3.2 Minimalizace efektu krátkovlákných plniv .....         | 28 |
| 3.3 Vliv pigmentů .....                                    | 28 |
| 4 pvT diagramy .....                                       | 29 |
| 4.1 Predikce smrštění ve formě podle pvT diagramu .....    | 32 |
| 5 Technologické podmínky při vstřikování .....             | 36 |
| 5.1 Zpracovatelské okno .....                              | 40 |
| 5.2 Teplota vstřikované taveniny .....                     | 42 |
| 5.3 Rychlost a tlak vstřikování .....                      | 42 |
| 6 Moldflow analýzy .....                                   | 43 |
| II. Experimentální část.....                               | 44 |
| 7 Stanovení cílů a metodika práce .....                    | 45 |
| 8 Použité materiály .....                                  | 46 |
| 8.1.1 Polyoxometylen POM.....                              | 46 |
| 8.1.2 Polyamid PA .....                                    | 49 |

|        |                                                      |     |
|--------|------------------------------------------------------|-----|
| 9      | Zkušební tělíska .....                               | 51  |
| 9.1.1  | Smrštění zkušebních tělísek Hostaform C 13021 .....  | 53  |
| 9.1.2  | Smrštění zkušebních tělísek Iupital F 20-03 .....    | 55  |
| 9.1.3  | Smrštění zkušebních tělísek Zytel 70G35HSL RA4 ..... | 58  |
| 9.1.4  | Smrštění zkušebních tělísek o tloušťce 1 mm.....     | 61  |
| 10     | Výrobky .....                                        | 65  |
| 10.1   | Výrobek A.....                                       | 65  |
| 10.1.1 | Vzdálenost kružnic K1 a K2 .....                     | 67  |
| 10.1.2 | Průměry kružnic K1 a K2 .....                        | 70  |
| 10.1.3 | Šířky kanálků .....                                  | 73  |
| 10.1.4 | Hmotnost dílů A.....                                 | 75  |
| 10.2   | Výrobek B.....                                       | 77  |
| 10.2.1 | Vzdálenost kružnic K1 a K2 .....                     | 79  |
| 10.2.2 | Rozměry kružnic K1 a K2 .....                        | 83  |
| 10.2.3 | Kanálek .....                                        | 85  |
| 10.2.4 | Hmotnost dílů B.....                                 | 88  |
| 11     | Moldflow analýza .....                               | 91  |
| 11.1   | Moldflow analýza zkušebních tělísek.....             | 91  |
| 11.2   | Moldflow analýza výrobků.....                        | 99  |
|        | Závěr .....                                          | 106 |
|        | Seznam použitých zdrojů.....                         | 108 |
|        | Seznam použitých symbolů a zkratk.....               | 109 |
|        | Seznam obrázků.....                                  | 110 |
|        | Seznam tabulek.....                                  | 114 |

## ÚVOD

S rostoucím trendem nahrazování a vývoje různých konstrukčních prvků výrobky z plastů, rostou nejen požadavky na fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti materiálů, ale také na rozměrovou a tvarovou přesnost a její zaručení i při velkosériové výrobě. Pro výrobu tvarově složitých technických dílů ve velkých sériích, je vhodná technologie vstřikování plastů do formy, která je realizována na tzv. vstřikovacích strojích, popřípadě celých vstřikovacích linkách. Výrobek vzniklý technologií vstřikování se nazývá výstřík.

Finální tvar a rozměry výstříku závisí na mnoha aspektech. Základní tvar a rozměry výstříku jsou dány konstrukčním řešením dutiny formy, na jeho konečné rozměry, fyzikální a mechanické vlastnosti, mají však také nezanedbatelný vliv technologické podmínky při vstřikování, vhodný výběr a příprava vstupního materiálu a skladování výstříku.

Technologickými podmínkami majícími vliv na smrštění výstříku jsou například teplota formy, teplota taveniny, velikost dotlaku, vstřikovací tlak, množství vstřikované taveniny, uzavírací tlak a pochopitelně veškeré technologické časy. Jednotlivé technologické podmínky se vzájemně ovlivňují a tak jako jinde i zde platí rčení, že takřka vše souvisí se vším.

Při konstrukci dutiny formy se pochopitelně počítá se smrštěním výstříku ve formě, avšak vlivem rozdílné tloušťky stěn, rozdílného podélného i příčného smrštění, změnou reologických podmínek při postupném plnění formy atd., dochází k odchýlkám od hodnot získaných ze zkušebních tělísek, mnohdy vyrobených za odlišných podmínek. Forma se proto upravuje ještě po výrobě zkušebních vzorků. Ve výrobě tak může nastat situace, kdy dojde například ke změně vlastností vstupního materiálu z rozdílných šarží, a smrštění výstříku je třeba operativně korigovat změnou technologických podmínek.

Tato práce se zabývá vlivem velikosti dotlaku, teploty formy a taveniny na smrštění výstříku. Tyto podmínky významně ovlivňují smrštění výstříku ve formě a pokud chceme velikost smrštění ovlivnit změnou technologických podmínek, toto může být jedna z cest.

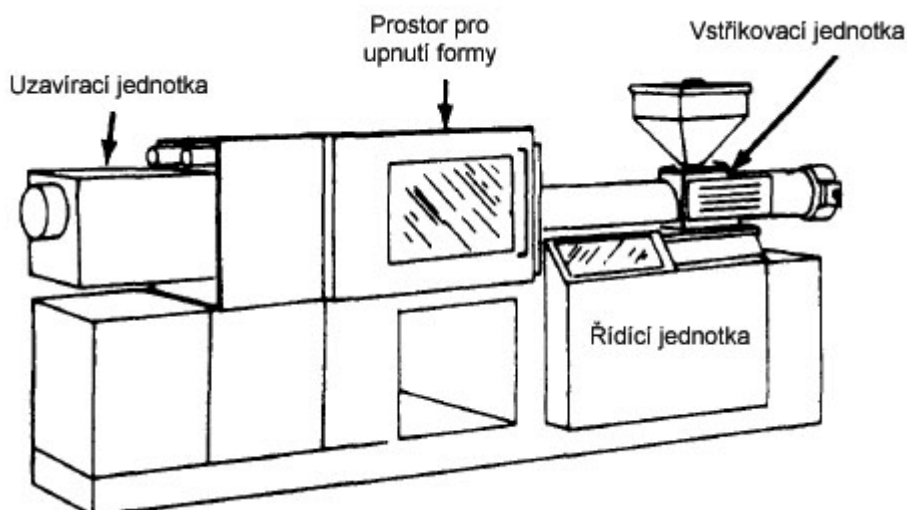
## I. Teoretická část

## 1 Technologie vstřikování polymerů

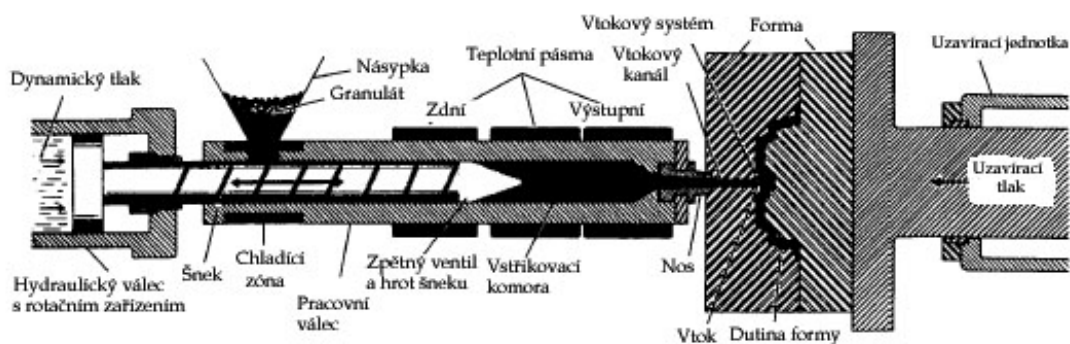
Vstřikování je způsob tváření plastů, při kterém se zpracováváný materiál převede z granulované formy na taveninu, která je pod tlakem vstříknuta do dutiny formy umístěné ve vstřikovacím stroji. Vzhledem k tomu, že teplota formy je mnohem nižší, než teplota taveniny, dochází ve formě k ochlazení taveniny a tedy k jejímu ztuhnutí. Tuhý výstřik je poté vyhozen z formy a dále chladne, nejčastěji na vzduchu.

### 1.1 Vstřikovací stroj

Vstřikování se provádí na tzv. vstřikovacích strojích, někdy též nesprávně označovaných, jako vstřikolisy. Tyto stroje mohou být různé konstrukce, lišící se řešením vstřikovací a plastikační jednotky, uzavírací jednotky i konstrukcí rámu a pochopitelně velikostí, jak stroje, tak jeho uzavírací síly. Nejběžnější konstrukce vstřikovacího stroje je zobrazena na Obr. 1. Jedná se o reciproční (jednostupňový) šnekový stroj s vratným pohybem šneku. Tento stroj se skládá ze tří hlavních částí, vstřikovací jednotky, uzavírací jednotky a řídicí jednotky. Nezbytnou součástí je pochopitelně vstřikovací forma, která je vlastně nástrojem. Schéma šnekového vstřikovacího stroje s formou a popisem základních funkčních částí je zobrazeno na Obr. 2.



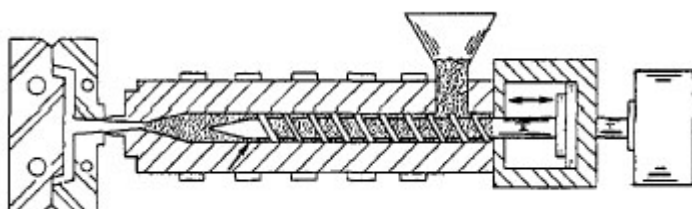
Obr. 1. Náčrt vstřikovacího stroje <sup>[1]</sup>



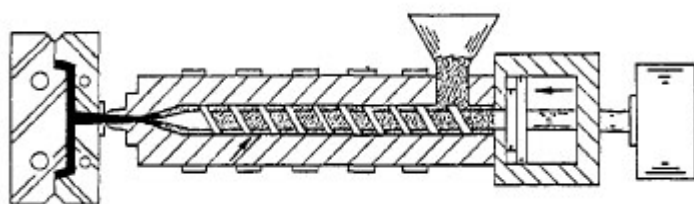
Obr. 2. Schéma šnekového vstřikovacího stroje s formou a popisem základních částí<sup>[1]</sup>

## 1.2 Vstřikovací cyklus

Granulát se přivádí do plastického stavu kombinací vedením tepla z vyhřívaného pracovního válce a frikčního tepla vznikajícího ve zpracovávaném materiálu, vlivem rotace šneku uvnitř pracovního válce. Rotující šnek se pohybuje zpět, přičemž dochází k pohybu granulátu a jeho postupnému převedení do plastického stavu a homogenizaci. Zpětná síla působící na špičku šneku během plastikace je malá, a jakmile je daná dávka vyprodukována, šnek se zastaví. Tato fáze je zachycena na Obr. 3.



Obr. 3. Vstřikovací cyklus – plastikace<sup>[1]</sup>

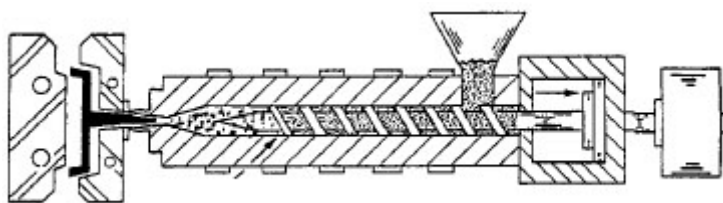


Obr. 4. Fáze plnění, doplňování a chlazení<sup>[1]</sup>

Tavenina se akumuluje před čelem (špičkou) šneku a pohybem šneku vpřed je pod tlakem vstříknuta vtokovým systémem do dutiny formy. Doba po kterou se forma plní, je tzv. doba plnění. Po zaplnění formy šnek dále působí tzv. dotlakem na taveninu. Tato doba se nazývá dobou doplňování. Dotlak má za účel částečně vyrovnat vliv smrštění a také

zabránit unikání materiálu z dutiny formy. V další fázi zůstává zaplněná forma ještě určitou dobu uzavřena - probíhá chlazení výstřiku.

Po zatuhnutí výrobku se forma v dělicí rovině otevře a výstřík lze vyjmout, obvykle pomocí automatických vyhazovačů. Během chlazení a vyjímání výrobku připravuje plastikační jednotka novou dávku roztaveného materiálu tak, aby vstřikovací stroj mohl po uzavření formy zahájit další pracovní cyklus. Vyhození výstřiku je zobrazeno na Obr. 5.



Obr. 5. Vyhození výstřiku<sup>[1]</sup>

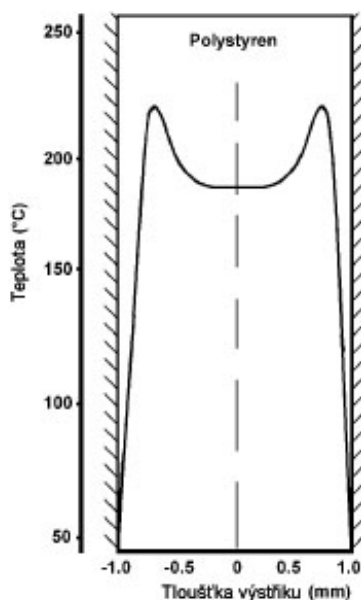
### 1.2.1 Plnění

Tato fáze je v anglosaské literatuře označována jako „Filling“. Na Obr. 4. je zobrazeno schéma vstřikovacího stroje s formou a popisem základních funkčních částí. Dříve než je materiál vstříknut do dutiny formy, je forma uzavřena adekvátním tlakem, závislým na ploše výstřiku v dělicí rovině a vstřikovacím tlaku tak, aby při vstřikování nedošlo k otevření formy. Jakmile je dodán signál pro vstříknutí připravené taveniny, šnek se začne pohybovat vpřed a tlačí taveninu skrze tzv. nos a vtokové kanálky až do dutiny formy. V tomto okamžiku jsou tavenina a forma vystaveny tlaku kolem 1360 bar (20.000 psi). Plnění představuje pro taveninu nejvyšší mechanické i tepelné namáhání v celém vstřikovacím procesu. Vliv na toto namáhání mají zejména nos, vtokové kanálky, tloušťka stěny výstřiku, vstřikované množství, teplota taveniny a teplota dutiny formy.

Tlak vyvolaný šnekem způsobuje, že tavenina pohybující se systémem kanálků, zejména ostrých přechodů a rohů, je ohřívána navíc frikčním teplem. Toto teplo zvyšuje tedy ještě teplotu taveniny. Experimentálně bylo zjištěno, že hodnota o kterou se zvýší teplota taveniny vlivem frikčního ohřevu, je přibližně rovna energii, kterou je třeba tavenině dodat, na překonání odporu při plnění dutiny formy.

Jak tavenina proudí do formy, přichází do kontaktu se stěnou formy a začíná okamžitě chladnout. Tloušťka ochlazené a relativně stabilní plastické hmoty závisí na množství

taveniny prošlé dutinou, či otvorem a na teplotě stěny. Vyšší rychlost proudění taveniny a vyšší teplota stěny, mají za následek tenčí vrstvu tuhé fáze polymeru a vyšší frikční ohřev. Vlivem tření mezi tuhou a plastickou fází dochází k nárůstu frikčního tepla na tomto rozhraní, což je zobrazeno na Obr. 6.



Obr. 6. Teplotní profil taveniny v dutině formy při vstřikování<sup>[5]</sup>

Dalším fenoménem objevujícím se během plnění formy je skutečnost, že molekuly polymeru jsou částečně orientovány a natahovány ve směru proudění. Tato orientace může způsobit větší smrštění neplněného materiálu ve směru toku.

Amorfní materiály se smršťují méně, když jsou chlazeny rychle, než při pomalém chlazení. Nicméně, čas a vystavení teplotě bude podporovat dodatečné smrštění. V průběhu času, speciálně za zvýšené teploty, je změna velikosti přibližně stejná. Amorfní materiály jsou jako krabice plná chipsů. Jejich tvar je takový, že nemohou být uspořádány těsně na sobě. Když s krabicí prudce zatřese a stejně tak náhle přestaneme, je zdánlivý objem v krabici větší, než když s ní třese pozvolna a chipsi se tak lépe urovňají blíže k sobě.

U semikrystalických plastů je řetězec často poskládan v shlukovitém, nebo vrstveném uskupení, stejně jako v případě vzniku krystalu. Ostatní molekulární řetězce jsou normálně vestavěny, takže každý krystal obsahuje části mnoha dalších molekul. Krystalizační proces spočívá v uspořádání dlouhého řetězce vedle sebe, čímž vzniká

mnohem kompaktnější struktura v příčném, než v podélném směru. To má občas za následek větší příčné smrštění.

Jak krystalická molekula chladne, dojde do určité teploty, kdy se začne skládat do krystalu. Vzhledem k tomu, že formování krystalů začíná v mnoha místech více méně současně, různé krystaly tedy nemohou tvořit jeden velký krystal, který by tvořil celý výstřik. Jak se krystaly formují, vydávají teplo, takže teplota materiálu, během formování krystalů se jen velmi málo mění. Když krystaly začnou dosedat navzájem jeden na druhý, zbývající objem uvnitř formované části je amorfni, až do doby, než začne teplota opět klesat. Tato směs amorfniho a krystalického objemu (semikrystalická) vykazuje mnohem větší smrštění, než čistě amorfni materiál, protože krystalická struktura je mnohem hutnější. Spotřebu času k dosažení krystalické struktury také ovlivňuje procento již krystalické fáze. Tedy, teplejší stěna dutiny formy, nebo silnější sekce v dutině, vedou k vyššímu procentu krystalické fáze, oproti studené formě a tenčí stěně výstřiku.

Semikrystalické materiály se chovají jako párátko. Pokud máme nádobu se spoustou párátek uvnitř a prudce s ní třese (podobně, jako když zahříváme polymer), párátko jsou orientována nahodile. Jakmile náhle přestaneme s nádobou třást (rychlé ochlazení), párátko zůstanou uspořádána nahodile. Pokud ale bude intenzita třesení klesat postupně, párátko se srovnají těsně vedle sebe do skupin a stanou se tak vlastně více organizovanou strukturou (krystalizují). Stupeň organizovanosti, závisí na míře poklesu třesení (rychlosti chlazení).

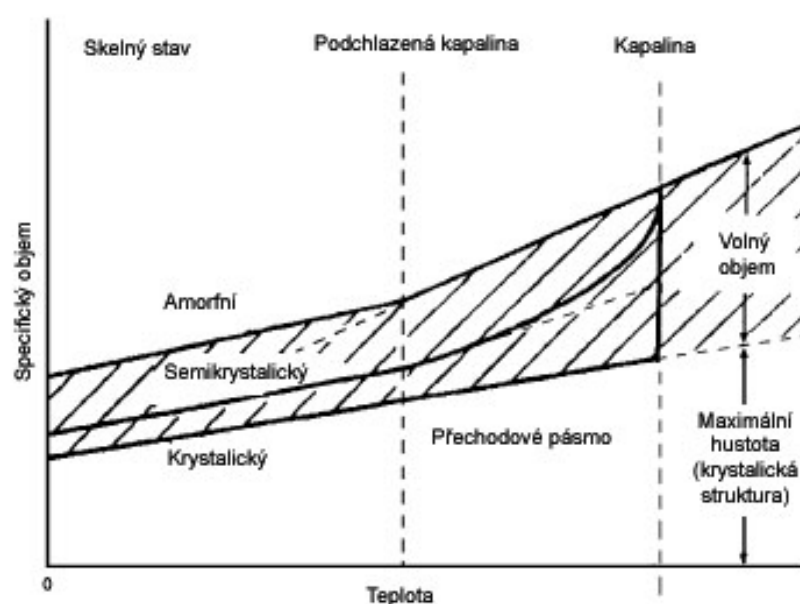
### 1.2.2 Dotlak

Jakmile je forma naplněna, začíná fáze dotlaku. V anglosaské literatuře je tato fáze označována jako „Holding Pressure“. Dotlak je ve formě udržován až do doby, než zatuhne vtokový systém. Během této fáze je doplňováno malé množství taveniny do formy, když v dutině dochází k ochlazování a smršťování vstříknuté taveniny. Čas doby dotlaku a velikosti dotlaku, mají významný vliv na smrštění výstřiku ve formě.

Obr. 7. znázorňuje závislost objemu na teplotě u amorfniích a semikrystalických materiálů. Šrafovaná plocha reprezentuje volné místo mezi molekulami. Když je amorfni, nebo krystalický materiál ve formě taveniny, neexistuje žádná krystalická struktura a jeho objem

závisí především na velikosti volného prostoru mezi molekulami (volný objem). Čím vyšší je teplota, tím více je prostoru mezi jednotlivými molekulami.

Jak tavenina chladne, tak amorfní materiál zmenšuje svůj objem podle křivky nad vyšrafovanou plochou. Vzhledem k tomu, že amorfní materiál netvoří krystaly, volné místo zůstává mezi molekulami. Krystalický materiál zřídka kdy tvoří monokrystalickou strukturu, takže je obvykle volné místo mezi jednotlivými krystaly. Spodní křivka na Obr. 7. tedy reprezentuje objem, který zabírá plně zkrystalizovaný materiál.



Obr. 7. Graf závislosti objemu na teplotě amorfniho a semikrystalického materiálu<sup>[6]</sup>

Semikrystalický materiál spadá někde mezi dvě výše uvedené křivky. U semikrystalického materiálu jsou malé krystalické oblasti mezi amorfni fází. Amorfni oblasti obsahují volná místa, takže tento typ materiálů, nemůže nikdy dosáhnout maxima své teoretické hustoty. Čím intenzivněji ochlazujeme taveninu, tím menší krystalické oblasti získáme. Toto je důvodem jisté nepředvídatelnosti výsledného smrštění semikrystalického materiálu. Bohužel, dokonce i po zchlazení materiálu na pokojovou teplotu, může dále pomalu docházet ke zvyšování procenta krystalinity a tedy i k dalšímu smršťování.

### 1.2.3 Chlazení

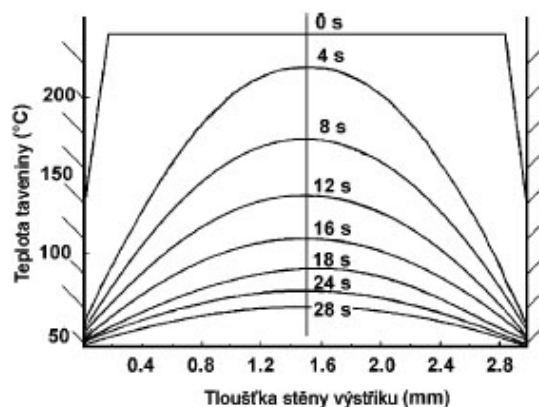
Po dotlaku pokračuje ochlazování plastu, nežli se dosáhne teploty, která umožňuje vyhození výstřiku, který je již dostatečně tuhý a stabilní. Příliš krátký čas chlazení má za následek nadměrné smrštění, popřípadě deformování výstřiku. Příliš dlouhý čas chlazení,

může mít za následek nadměrné residuální pnutí materiálu (tedy nebezpečí lomu) a pochopitelně se tím prodlužuje a prodražuje celý cyklus.

Když je výstřik vyhazován z formy, jeho teplota není ve všech místech stejná. Teplotní profil stěny výstřiku je zobrazen na Obr. 8. v závislosti na času po naplnění formy. Plasty jsou velmi špatnými vodiči tepla. Teplota uvnitř výstřiku, po jeho vyhození z formy, je tedy pochopitelně vyšší, než teplota jeho povrchu. Jádro stěny potřebuje delší čas na zchlazení a smršťuje se tedy pomaleji, než povrch. Z toho je zřejmé, že v každém výstřiku vzniká pnutí už při jeho chlazení ve formě, vlivem rozdílného chladnutí v průřezu stěny. Čím větší je tloušťka stěny výstřiku, tím větší je rozdíl v teplotách a tím vzniká i větší residuální pnutí. Přestože to nemusí být na první pohled patrné, u velmi silných stěn, může být teplota uvnitř tak vysoká, že může po vyhození výstřiku z formy dojít až k přetavení povrchu, což je příčinou nejrůznějších následných potíží. Z těchto důvodů je někdy těmto místům se silnou stěnou věnována zvýšená pozornost a jejich povrch je temperančním systémem udržován rigidní až do doby, než je jádro stěny ochlazeno.

Během ochlazování se amorfnní a krystalické materiály chovají rozdílně. Amorfnní molekuly, oproti vazbám krystalickým, tvoří se sousední molekulou vazby postupně, masa se stává čím dál, tím více viskózní, až je schopna samostatně udržet požadovaný tvar. To je chvíle, kdy je výstřik vyhozen z formy. Pokračující chlazení způsobuje to, že výstřik postupně tuhne, až dosáhne své maximální pevnosti a tuhosti.

Smršťování plastu po jeho vyhození z formy je mnohem komplikovanější, než jednoduchá teplotní kontrakce. Jednoduchá teplotní kontrakce nepočítá s odchylkami tekutého stavu, k jakým při vstřikování dochází. Kromě toho, většina materiálů nemá dlouhé molekulární řetězce, jako plasty. Tato struktura podněcuje další relaxaci napětí a krystalizaci, za teplot, při kterých jsou tyto součásti často používány.



Obr. 8. Teplotní profil v průřezu stěny vstříku, v různém čase, při plnění formy<sup>[6]</sup>

Poté, co jsou amorfní materiály ochlazený na pokojovou teplotu, mění jen velmi málo své vnitřní pnutí. Semikrystalické materiály oproti tomu pokračují ve stavbě krystalické struktury i po okamžiku jejich vyjmutí z formy. Výrazné změny zpravidla probíhají po dobu 48 hodin. Tyto změny nejsou tak výrazné, jako krystalizace ve formě, je však s nimi třeba počítat. Některé semikrystalické materiály, jako je například nylon, jsou hyroskopické a před jejich zpracováním je nezbytné, řádně je vysušit. Po vstříknutí absorbují vlhkost z okolí až do chvíle jejich „nasycení“. Tato vlastnost má vliv nejen na rozměry vstříku, ale také na jeho fyzikální a mechanické vlastnosti. Např. suchý nylon je mnohem více křehký, než „nasycený“, zatímco nylon se skrovným množstvím vody je docela houževnatý. [1]

## 2 Smrštění a deformace

*Smrštění ve formě (in-mold shrinkage)* – ačkoli se jedná o objemový úkaz, obvykle se odkazuje na rozdíl mezi rozměrem formy za pokojové teploty a rozměrem výstřiku během 48 hodin od jeho vyrobení.

*Deformace (warpage)* – zkroucení finálního tvaru výstřiku způsobené rozdílným smrštěním. Vykazuje-li výstřik v jedné oblasti, nebo v určitém směru rozdílný stupeň smrštění, dojde k jeho deformování.

*Smrštění po doformování (post-mold shrinkage)* – toto je další běžný termín, užívaný v souvislosti se smrštěním výstřiků. Zahrnuje smrštění výstřiku zaznamenané po 48 hodinách od jeho vyhození z formy.

Velikost smrštění a deformace výstřiku ovlivňuje každá etapa výroby, od samotného návrhu tvaru výrobku, přes výběr materiálu, návrh a výrobou formy a pochopitelně také technologickými podmínkami při výrobě.

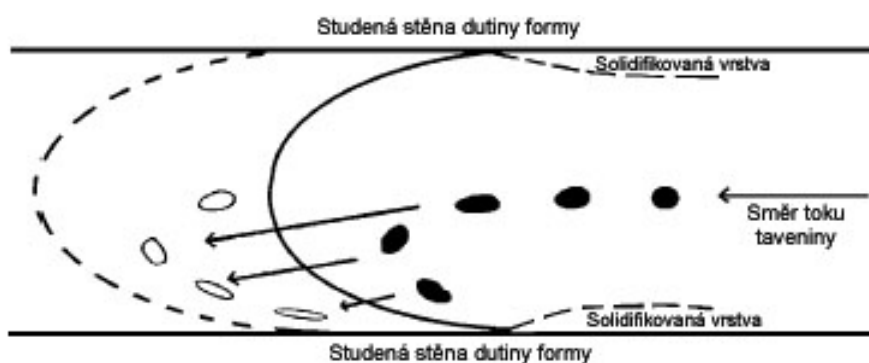
### 2.1 Smrštění ve formě

Během zpracování je obvykle v okamžiku plnění dutiny formy rozdíl tlaků u vtoku a v nejvzdálenějším místě na nejnižší úrovni. Jak materiál chladne, tak nejčastěji tuhne v nejvzdálenějším místě od vtoku. Toto dovoluje udržovat vyšší tlak u vtoku, až do doby, než vtok „zamrzne“. Tento rozdíl tlaků může být významně vyšší, než rozdíl tlaků v okamžiku naplnění dutiny formy. Silnější část vtokové soustavy vede ke snížení tohoto rozdílu.

Dráha, kterou je forma plněna závisí na směru, stupni a typu molekulové orientace ve formě, speciálně na povrchu stěny dutiny formy. Jak tavenina ve formě teče, statistická klubka do kterých jsou jednotlivé řetězce zformovány, mění postupně svůj tvar ze sférického na eliptický, jak znázorňuje Obr. 9. Tento výsledný elipsoid může mít mnohonásobně větší délku, oproti výšce, což má za následek téměř totální narovnání molekulových řetězců a vyztužujících fibril ve směru toku taveniny. Toto se dramaticky projevuje zejména u vstřikovaných pěněných materiálů. Stříbřité pruhování na povrchu je vlastně množství, dříve kruhových, bublin prodloužených u stěny dutiny formy. Právě

prozkoumáním těchto výstřiků bylo zjištěno, že délka každého proužku, je vůči jeho šířce mnohonásobná.

Kontaktem se stěnou formy je tento „natažený“ materiál rychle chlazen, přičemž je zachována jak orientovaná poloha fibril, tak natažení řetězců. Během toho, co materiál u stěny chladne, protéká mezi tímto „zamrzlým“ povrchem další tavenina, která tvoří nové čelo toku. Tento proces pokračuje až do naplnění formy. Relaxace a zaujmutí náhodné polohy probíhá rychleji v tavenině s nízkou viskozitou. U viskóznější a tedy chladnější taveniny, je proto orientace vyšší. Na druhu stranu, vysoká teplota taveniny a formy umožňují náhodnější uložení řetězců i fibril, což vede ke snížení tendence k deformování. I zde je však třeba kompromisu, mezi kvalitní produkcí a ekonomickým hlediskem, protože nižší teplota taveniny a formy, zkracuje čas celého cyklu.



Obr. 9. Molekulová orientace u stěny dutiny formy při plnění taveninou <sup>[5]</sup>

### 2.1.1 Určení smrštění

Podle normy ISO 294-4 je smrštění definováno, jako rozdíl mezi rozměrem formy a výstřiku, jež způsobuje spousta faktorů. Mezi faktory způsobující odchylky skutečného smrštění patří:

- Rozměr a tvar výstřiku
- Rozměry a délka vtokového systému včetně nosu plastikační jednotky
- Funkčnost formy, zejména temperačního systému
- Tokové zákonitosti uvnitř formy
- Nastavení technologických podmínek na vstřikovacím stroji

V následující tabulce je popsána reakce smrštění výstřiku na různé technologické podmínky.

Tab. 1. Vliv technologických podmínek na smrštění výstřiku

| <i>Technologická podmínka</i>      | <i>Efekt na smrštění</i>         |
|------------------------------------|----------------------------------|
| S rostoucím vstřikovacím tlakem    | se snižuje                       |
| S rostoucím vstřikovaným množstvím | může být obojí (minoritní efekt) |
| S rostoucím dotlakem               | se snižuje                       |
| S rostoucí dobou dotlaku           | se snižuje do zamrznutí vtoku    |
| S rostoucí teplotou taveniny       | může být obojí                   |
| S rostoucí teplotou formy          | roste                            |
| S uzavíracím tlakem                | obvykle nic, může poklesnout     |
| S tloušťkou stěny                  | může být obojí, obvykle vzrůstá  |
| Se vstřikovaným množstvím          | vzrůstá                          |
| S časem chlazení                   | se snižuje                       |

Minimálního smrštění dosáhneme, jestliže je do formy vstříknuto maximální množství materiálu, v pokud možno co nejdelší době a to výsledkem optimálně navrženého vtokového systému a pokud je tlak udržován na adekvátně vysokém stupni, nežli je výstřik zcela tuhý. Naopak, maximálního smrštění dosáhneme vstříknutím nedostatečného množství materiálu, v kombinaci s nedostatečnou velikostí a dobou dotlaku. U materiálů s vysokou viskozitou je těžké dosáhnout adekvátní velikosti dotlaku, což u nich vede k většímu smrštění.

U některých plastů závisí velikost jejich smrštění na přípravě vstupního materiálu, před vlastním vstřikováním. Například u některých termoplastů absorbujících vlhkost z okolí, musí být před jejich zpracováním provedeno sušení.

K určení velikosti smrštění polymerních materiálů se používají speciální, normou definované formy s dutinami různých tloušťek, do kterých se polymer vstřikuje za určitých technologických podmínek. Změřením výstřiku je pak možné určit jeho podélné a příčné smrštění. Dutina formy je konstruována tak, aby bylo zaručeno její správné plnění. Faktor smrštění je pak určen z naměřených rozdílů rozměrů dutiny formy a výstřiku, za pokojové teploty a to po 48 hodinách od výroby výstřiku.

### 2.1.2 Orientace a napětí ve výstřiku

Změny technologických parametrů při vstřikování, vedoucí k redukci smrštění, obvykle tvoří i residuální pnutí ve výstřiku. Mechanické vlastnosti přímo závisí na vztahu mezi osou orientace molekul a osou mechanického namáhání těchto molekul. Změnitelné vlastnosti, jako jsou například modul a tuhost, se ve směru orientace zvyšují, protože proti

napětí podél osy orientace molekuly, působí silné kovalentní vazby uvnitř molekuly. Zatímco napětí kolmé k této ose, přenášejí jen slabé sekundární vazby mezi molekulami. Z tohoto důvodu ve směru kolmém na osu orientace modul pevnosti klesá a vzrůstá pružnost. Tento efekt je velmi důležitý pro tuhost a flexibilitu většiny fólií a vláken.

Mez zatížení tedy vzrůstá hlavně ve směru toku, nebo dlužení a její hodnota je nejmenší ve směru kolmém. Změny v tuhosti mohou vycházet také z možných existujících koncentrací napětí, jako jsou například mikro a submikrotrhlinky, které se mohou vyvinout paralelně s osou orientace. Pokud je tedy materiál zatížen napětím kolmým ke směru orientace, vede to k dalšímu otevírání trhlinek, zatímco u napětí ve směru orientace toto nenastává. Mírná orientace v tuhých amorfních polymerech, jako je například Polystyren (PS), zvyšuje jeho poddajnost a pružnost v orientovaném směru a snižuje ji ve směru příčném. Vysoký stupeň orientace dloužených plastů může mít za následek opačný efekt, překročením maximální tažnosti.

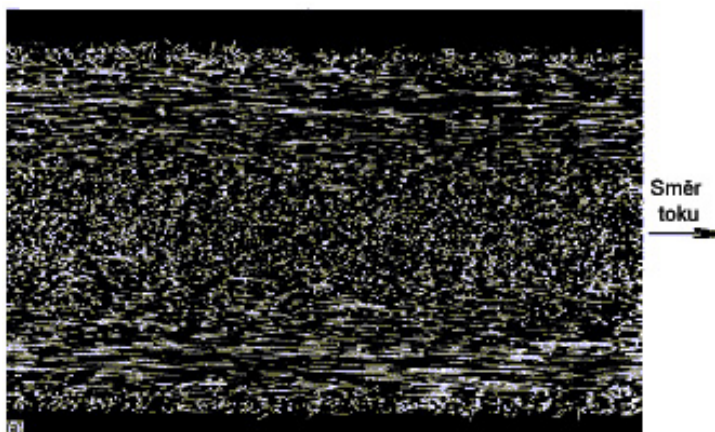
Biaxiální orientace zvyšuje rázovou houževnatost, hlavně je však používána při výrobě balících fólií. Při jednoosé orientaci se rázová pevnost zvyšuje ve směru dlužení, materiál je jen velmi málo odolný v příčném směru, což obvykle vede k protržení svazku vláken při testování rázové pevnosti. Tyto výsledky testů mohou souviset s obsahem plochy pod tahovou křivkou. Biaxiálně orientovaná fólie má mnohem větší obsah plochy pod tahovou křivkou, což může být použito, jako míra nepoddajnosti.

Mechanické vlastnosti vyztužených plastů jsou ještě mnohem více ovlivněny orientací vláken. Hlavní výhodou použití vyztužených materiálů při konstrukci technických dílů, je možnost maximalizovat směrové vlastnosti. Tyto mohou být isotropické, ortotropické, anisotropické. První úspěšné použití teorie kombinující činnost výztuhy a plastu je datováno od roku 1940, kdy bylo použito dřevěných vláken.

Vstřikované vyztužené polymerní materiály vykazují jistou inherentní orientaci vyztužujících vláken. Čím větší je orientace těchto vláken, tím větší je rozdíl mezi smrštěním v podélném a příčném směru. Při tavení jsou molekuly polymeru orientovány nahodile a smíchány tak, že jedna molekula je spletena s mnoha dalšími. Jak materiál teče ze vstřikovací jednotky, vysoká viskozita polymeru způsobuje laminární proudění, vyvíjí se teplo a následkem toho tento materiál inklinuje k rozplétání molekulárních řetězců a

jejich orientaci ve směru toku. Největší stupeň této orientace se odehrává v oblastech, jako je například vtok, kde bývá dosaženo velmi vysokých hodnot smykového napětí. Jak se materiál roztahuje ve formě, při přechodu z vtokového systému do dutiny formy, odehrávají se přídatné reorientace. Turbulence a Brownův pohyb mohou orientaci poněkud redukovat.

Pokud materiál obsahuje krátká skelná vlákna, nebo další vyztužující vlákna, jejich orientace bude předurčena tokovým profilem. Na Obr. 10. je zobrazen průřez stěnou skelným vláknem vyztuženým polypropylenem. Blízko povrchu jsou vlákna orientována dominantně ve směru toku, zatímco uprostřed stěny je orientace náhodná.



Obr. 10. Průřez stěnou výstřiku skelným vláknem plněného polypropylenem <sup>[5]</sup>

## 2.2 Deformace

Deformace výstřiku způsobuje jeho zahnutí, nebo zkroucení tvaru a dochází nejen ke změně rozměrů, ale také obrysu a úhlů. Toto je dobře pozorovatelné na větších a plochých výstřicích. Deformace souvisí s fenoménem smrštění materiálu. Je výsledkem diferenciálního, nebo neuniformního smrštění, které nastane uvnitř výstřiku.

Některé nesouměrné smrštění je výsledkem špatného návrhu části, nebo špatného návrhu vstřikovací formy. Hlavními faktory jsou geometrie a tloušťka stěny části. Některé z příčin deformace jsou například různá tloušťka částí stěn, umístění vtoku v tenké části výstřiku, nesprávné umístění vtokového kanálu, nebo jádra vedoucího ke studeným spojům atd. Abychom se tomuto vyhnuli, je vhodné využít výpočetní techniku, tedy různé simulační programy, které mohou být použity konstruktérem pro optimalizaci výstřiku i nástroje, optimalizaci potenciálního smrštění a deformací dávno před tím, než se začne

forma a výrobek vyrábět. Nicméně je třeba zdůraznit, že zkušený konstruktér a výrobce forem rozeznají potenciální nebezpečí velmi rychle a nelze je pochopitelně zcela nahradit počítačovým programem. Simulační programy slouží pro usnadnění a zrychlení celého předvýrobního procesu a zkušenosti obsluhy jsou pro získání správných výsledků takřka nezbytné. Lidský faktor je hlavním elementem způsobujícím smrštění výstřiku.

Některé nestejnomyšlnosti jsou způsobeny volbou materiálu. Některé plasty, hlavně semikrystalické, vykazují anizotropní smrštění. Amorfni termoplasty jsou méně náchylné k deformacím, než krystalické pryskyřice. Semikrystalické materiály se přirozeně smršťují mnohem více, než amorfni materiály, protože krystaly formující se během chladnutí zvyšují svůj objem méně, než neorientované amorfni molekuly. Vysoké smrštění samo o sobě nezpůsobuje deformace, zvyšuje však pravděpodobnost jejich výskytu. Všechny molekuly mají sice tendenci k orientaci ve směru toku taveniny, ale orientace semikrystalických materiálů vede k anizotropnímu smrštění. Když jsou molekuly orientovány ve směru toku, mají tendenci skládat se do krystalů s paralelními řetězci. Zde je jen nepatrná možnost změny v délce vlákna, ale vlákna se poskládají těsně vedle sebe a tím se smrští více v příčném směru toku. Příčné smrštění je tedy v tomto případě větší. Nicméně, některé materiály mají větší tendenci, při krystalizaci, ke skládání vlákna sama na sebe, což má pak za následek větší smrštění ve směru toku. Týká se to zejména acetalu a nylonu 66. Rozdíl v příčném a podélném smrštění může být důležitější, než průměrná molekulová hmotnost polymeru.

### 2.2.1 Běžné příčiny nerovnoměrného smrštění výstřiku

#### Rozdílná orientace

Smrštění orientovaného materiálu je v zásadě vždy více anizotropní, než smrštění neorientovaného polymeru. Materiál je orientován během plnicího procesu, který má velký význam na konečné smrštění plastu. Během plnění musí tavenina snášet natahování, což má za následek molekulovou orientaci a anizotropní smrštění. Neplněné (nevyztužené) materiály mají větší sklon ke smršťování podél osy toku, oproti smrštění příčnému, kdežto u polymerů vyztužených je smrštění podél směru orientace vláken takřka znemožněno. V případě, že je stupeň orientace, během plnění formy minimalizován, má obvykle smrštění spíše izotropní charakter, existují-li podmínky pro molekulovou relaxaci.

**Rozdílná krystalinita**

Jestliže nějaká část formy, u semikrystalických materiálů, chladne rychleji, bude mít daná oblast vyšší podíl krystalů a díky tomu i větší smrštění. Toto je například případ částí s různou tloušťkou stěny a horkých míst, kde je materiál v kontaktu s vnějšími hranami jader apod.

**Rozdílné chlazení**

Rozdílné chlazení se může vyskytovat tehdy, když je teplota povrchu dutiny formy v různých místech různá. Toto se často stává kolem jader čepů, u vnitřních i vnějších hran uvnitř formy, poblíž vtoku a také tam, kde se mění tloušťka stěny výstřiku. Horká místa jsou problémem ze dvou důvodů, vzniká díky nim rozdílná krystalinita a prodlužuje se doba chlazení.

**Materiálová charakteristika**

Je třeba říci, že kopolymery jsou oproti deformacím odolnější než homopolymery. Určité typy plniv dokáží redukovat celkové smrštění a zvyšují tuhost.

**Teplotní pnutí**

Příčinou teplotního pnutí bývají geometrické efekty, jako jsou například různé tloušťky stěny, ostré rohy, nebo geometrické poměry v chladícím systému, popřípadě může být příčinou i neobvyklá orientace. Čím větší je rozdíl mezi rychlostí chladnutí, tím větší je i následná teplotní napjatost.

**Podmínky při vstřikování**

Nevhodné podmínky při vstřikování mohou vést k nadměrnému namáhání vysokou, nebo naopak příliš nízkou teplotou, či tlakem vstřikované taveniny, nebo nezvykle dlouhou dobou vstřiku, či krátkým cyklem.

**Principy minimalizace deformací**

Obtížnost minimalizace deformací spočívá zejména v tom, že požadavky pro získání minimálního smrštění a minimální deformace jsou někdy protichůdné. Například chladnější forma způsobuje nižší průměrné lineární smrštění, ale podporuje následné deformování, zejména u dílů s vysokým poměrem povrchu ku tloušťce stěny.

Obvykle používané metody pro snížení napětí při vstřikování vedou na druhou stranu k nadměrnému smrštění výstřiku. K dosažení nejnižších deformací je třeba horká forma, vysoká teplota materiálu, minimální vstřikovací tlak a krátký čas vstřiku a dotlaku. Pro získání minimálního smrštění, je na druhou stranu třeba přesný opak. Z tohoto důvodu, je často třeba řešit složité kompromisy.

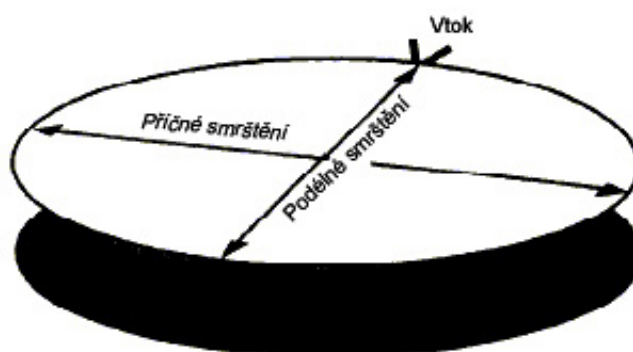
### 2.3 Smrštění po odformování

Studená forma a rychlý cyklus vedou k takzvanému zamrznutí napětí ve výstřiku. Děje se tak zejména ve chvíli, kdy touto cestou chceme snížit smrštění ve formě. Později však můžeme s postupem času, vlivem zvýšené teploty, nebo vlhkosti, zaznamenat dodatečné smrštění takového výstřiku. U vysoce smrštivých materiálů, jako jsou acetal a polyamid, může být smrštění po doformování závažnější, než samotné smrštění ve formě. Použijeme-li tedy horkou formu, dosáhneme delšího času cyklu, což je z ekonomického hlediska nevýhodné, snížíme tím však celkové smrštění.

Při vstřikování je použitý materiál takřka zbaven vlhkosti, po odformování výstřiku jsou však některé materiály schopny absorbovat vlhkost ze vzduchu. Například nylon, pro dosažení svých nejlepších fyzikálních charakteristik, potřebuje vodu, suchý je totiž značně křehký. Nylon je excelentní materiál, avšak u všech hyroskopických materiálů je třeba počítat s jejich navlhavostí při výrobě i při následné aplikaci. Hyroskopické materiály jsou afinní k vodě do takové výše, že jejich hmotnost při kontaktu s vodou významně vzroste. Nylon je jedním z nejcitlivějších materiálů co se týká vlivu vlhkosti na jeho smrštění. Jestliže je účinkům vlhkosti vystavena jen jedna strana stěny hyroskopického materiálu, může dojít ke změně jejího rozměru (zvětšení) a následné deformaci celé stěny. Různé plasty často absorbují vodu, nebo jiné tekutiny, až do takového stupně, že učiní plast pro danou aplikaci nepoužitelným. Přestože navlhavost polykarbonátu, je mnohem nižší v porovnání s nylonem, tak u CD disků, které jsou na jedné z ploch pokovovány, může dojít k jejich prohnutí za tolerovanou hranici. [2]

### 3 Vliv plniv, vyztužení a pigmentů

Běžnou chybou a nedorozuměním, je domnívat se, že hodnoty smrštění, uvedené v materiálovém listu od výrobce, jsou hodnoty, kterých dosáhneme při výrobě. Mnohem více spolehlivým znamením možného pokřivení, jsou hodnoty získané změřením smrštění ve směru toku a ve směru kolmém, tedy hodnoty podélného a příčného smrštění, jak je zobrazeno na Obr. 11.



Obr. 11. Podélné a příčné smrštění<sup>[8]</sup>

Toto platí pro krystalické a amorfní pryskyřice, ale větší pozornost je třeba věnovat semikrystalickým materiálům. Plnivo má také vliv na smrštění, kompenzací objemu polymeru, nízkou hodnotou smrštění částic plniva. Smrštění pryskyřice obsahující izotropní plnivo, jako jsou například skleněné kuličky, nebo prášky, bude více izotropní, než smrštění pryskyřice obsahující vysoký poměr vláknitého plniva, nebo plniva ve formě pelet. Toto je způsobeno orientací plniva ve směru toku, při plnění dutiny formy. Vlákno je známé svojí schopností tvořit extrémní osnovu s omezeným smrštěním ve směru toku, což je kompenzováno zvýšením smrštění polymeru v příčném směru.

#### 3.1 Vliv plniva a krátkých vláken

Ačkoli je téma smrštění a pokřivení plastů extrémně komplikované, mohou být ustaveny všeobecné charakteristické rysy. Např. molekulární řetězce amorfních a krystalických polymerů se balí v průběhu chlazení různě, molekuly krystalických polymerů se balí těsněji a tedy pevněji, z čehož plyne vyšší smrštění semikrystalických materiálů. K tomuto se ještě musí počítat s vlivem plniva, v závislosti na jeho obsahu a typu.

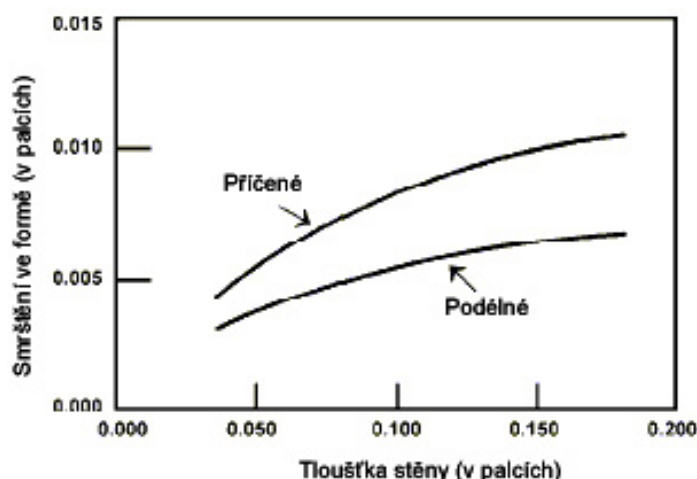
Prášky, vločky a vlákna jsou do plastu obecně začleněny proto, aby selektivně modifikovali mechanické vlastnosti původního polymeru. Např. vysokopevnostní plniva

jsou přidávány pro zvýšení tuhosti a odolnosti proti krípu, pro aplikace vyžadující materiál s vysokým modulem pružnosti. Sekundárním efektem použití plniva je vytvoření materiálu s rozdílným smrštěním. Použitím krátkých vláken získáme dokonce výstřik, který bude mít rozdílné podélné a příčné smrštění, což má často za následek další deformace.

Většina plniv je na bázi anorganických látek, takže mají nízký koeficient teplotní roztažnosti. Když je tedy tento kompozit chlazen v dutině formy, plnivo zmenšuje svůj objem výrazně méně, než okolní polymerní matrice. Jsou-li tedy do amorfního, nebo semikrystalického polymeru přidány plniva ve formě vloček, nebo částic, sníží se celkové smrštění takového kompozitu. Redukce smrštění je přibližně proporcionální ke koncentraci plniva v kompozitu. Prášky, kuličky a vločky, jsou z geometrického hlediska mnohem více pravidelné, než vlákna. Přidání malého poměru plniva ve formě prášků, vloček a kuliček tedy netvoří problémy při smršťování, smršťování je v tomto případě uniformní. Částicové plnivo má tedy schopnost snižovat smrštění ve všech směrech stejně a leze ho tedy za tímto účelem, do jistého stupně, i použít.

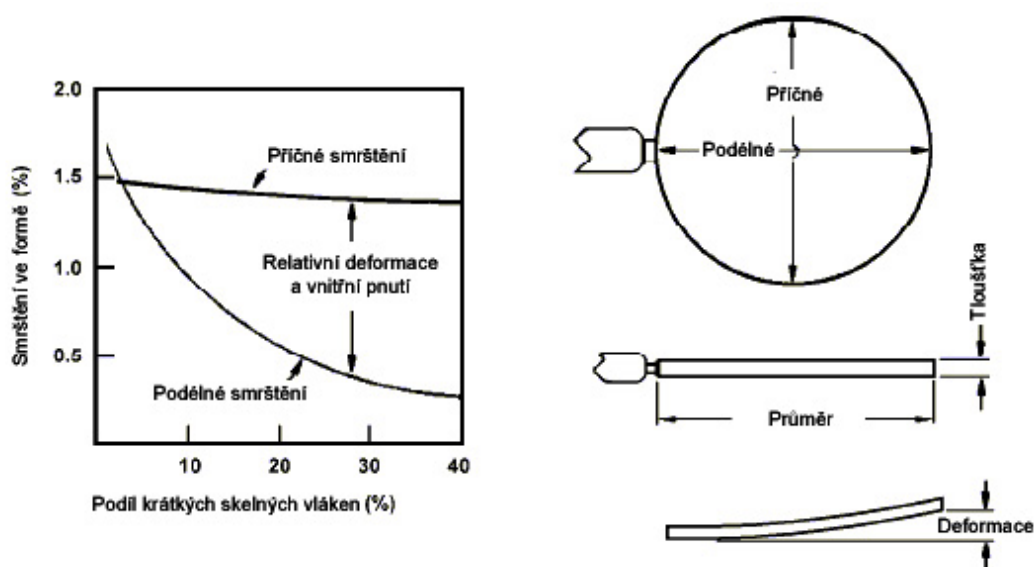
Vlákna jsou z geometrického hlediska definována poměrem jejich délky ku průměru. Anorganická vlákna jsou nejčastěji produkována z materiálů, jako je sklo a uhlík. Když se vlákno chemicky spojí s polymerní matricí, nabízí to mnoho výhod v rámci konečného užití materiálu, může to však přinést i problémy, zejména pak ve zpracování taveniny. Vlákna mají ale také za následek již dříve zmiňované rozdílné podélné a příčné smrštění. Na takovýto druh smrštění se velmi těžko dimenzuje.

Anizotropní smrštění, vláknem vyztužených polymerů, může být způsobeno orientací vláken, během plnění dutiny formy. Na rozdíl od molekul polymeru, nemají vlákna tendenci reorientovat se při chladnutí, tedy relaxovat. Orientace, jaká je vláknům přidělena během plnění, zůstává stejná i po ochlazení výstřiku, vlákna v matrici takzvaně „zamrznou“.



Obr. 12. Podélné a příčné smrštění ve formě, v závislosti na tloušťce stěny – PBT (30% plnění skelným vláknem) <sup>[2]</sup>

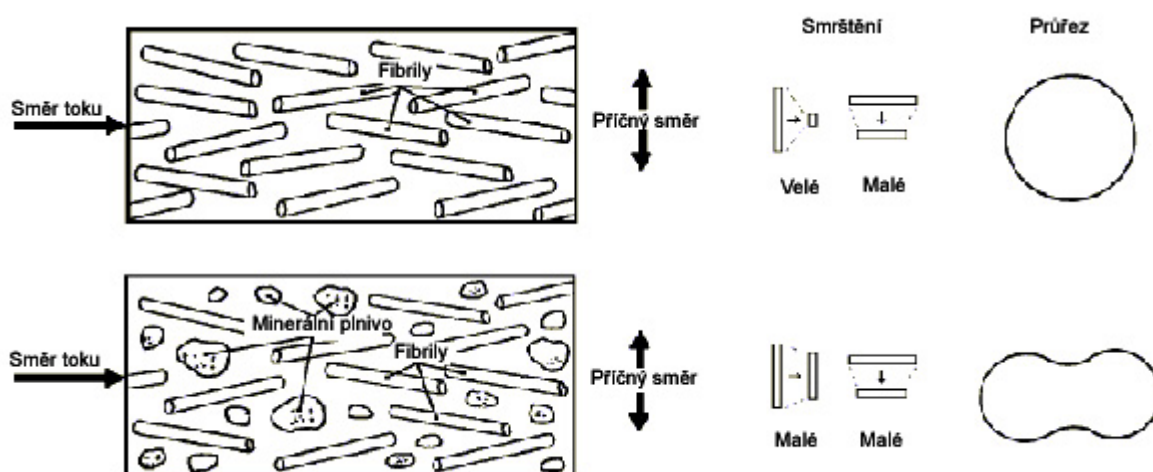
Obr. 13. znázorňuje chování smrštění ve formě, skelným vláknem plněného, semikrystalického materiálu, jako je acetal. U neplněných semikrystalických materiálů (koncentrace plniva = 0), jsou hodnoty obou smrštění, příčného i podélného, relativně vysoké (např. 1,5 – 2 %). Jak vzrůstá koncentrace vláknitého plniva, dramaticky klesá hodnota podélného smrštění, zatímco příčné smrštění klesá jen pozvolna. Rozdíl v tomto chování má primární význam. S rostoucím podílem plniva vzrůstá i rozdíl mezi oběma hodnotami smrštění.



Obr. 13. Závislost velikosti smrštění na koncentraci plnění skelným vláknem a následná možná deformace jednoduchého výstřiku – disku <sup>[8]</sup>

### 3.2 Minimalizace efektu krátkovlákných plniv

Existuje spousta technologií, které dokáží minimalizovat potenciální diferenciální smrštění, ke kterému dochází, při použití krátkovlákných plniv. Nejčastější metodou je použití krátkovlákného plniva spolu s plnivem ve formě vloček. Vločková plniva, mají stejně jako ostatní částicová plniva, nižší průřezový poměr, než vláknová plniva. Tyto hybridní kompozitní materiály spolupracují s oběma plnivy – fibrilami i vločkami tak, že činí kompozit mnohem více izotropní, než konvenční kompozity, plněné pouze krátkým vláknem. Materiál na Obr. 14. je běžně užívaný hybrid, zejména v aplikacích, kde požadujeme vysokou rozměrovou přesnost a stálost.



Obr. 14. Příklad hybridního kompozitu<sup>[7]</sup>

### 3.3 Vliv pigmentů

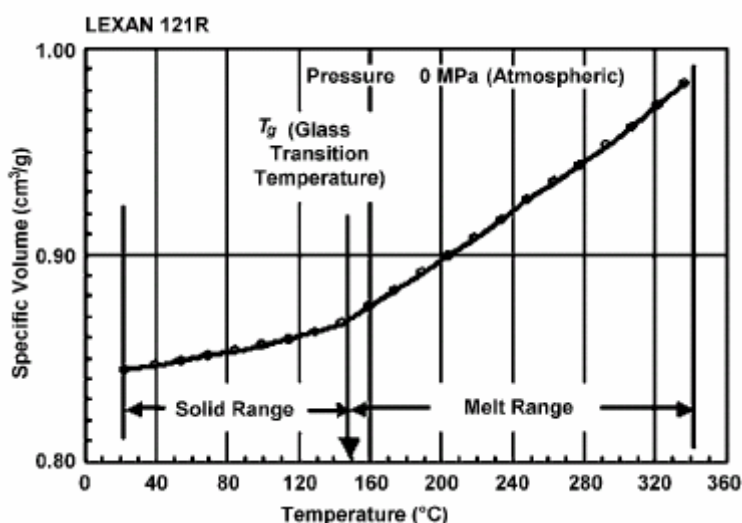
Když jsou do plastu přidány organické pigmenty, smrštění je anizotropní a rozdíl mezi podélným a příčným smrštěním může být až 300 %. Pigmenty jisté geometrie dokážou také obrátit znaménko této anizotropie. Deformace vzniklé použitím těchto pigmentů ve vstřikovaných dílech jsou jen stěží odstranitelné změnou procesních parametrů.

Některé pigmenty, zejména organické, jsou zrodem nukleačních zárodků, ze kterých dále rostou krystaly. V porovnání s materiálem bez pigmentů je počet a rychlost růstu krystalů v těchto materiálech vyšší. [2]

#### 4 pvT diagramy

Teplotní roztažnost, pvT závislosti a teplotní vlastnosti jsou charakteristické vlastnosti polymeru. Tyto vlastnosti jsou stejné, pro jakýkoli vstřikovaný díl z polymeru. Smrštění a deformace nejsou jen vlastnosti materiálu, jsou to spíš „systémové vlastnosti“, nebo vlastnosti závislé na zpracovatelské historii polymeru během jeho zpracování. Výsledné smrštění a deformace budou záviset na vlastnostech materiálu (pvT, teplotních vlastnostech atd.), geometrii části (tloušťce stěny, umístění vtoku atd.) a podmínkách při vstřikování (teplotách formy a taveniny, tlacích, vstřikovaném množství atd.).

Zjednodušený pvT diagram pro amorfní polymer je zobrazen na Obr. 15. Kvůli zjednodušení, prezentuje tento graf jen jediný tlak. pvT diagram ukazuje expanzní chování polymeru od pokojové teploty až po teplotu nevyšší, pod kterou je polymer obvykle zpracováván.



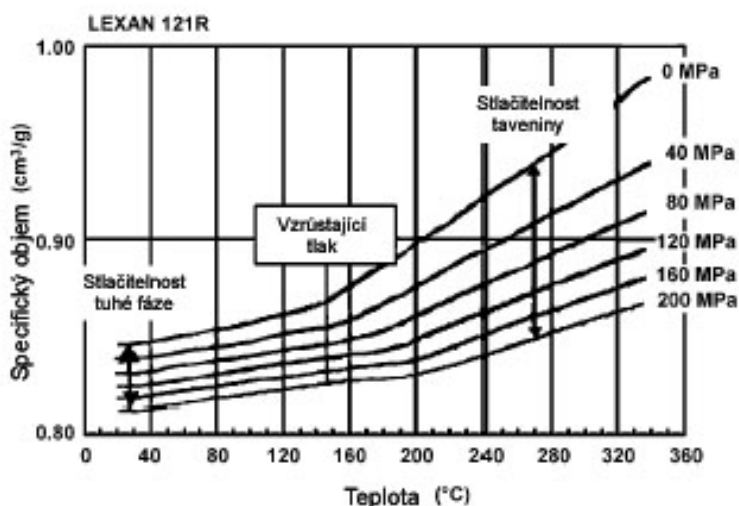
Obr. 15. Zjednodušený pvT diagram polykarbonátu<sup>[2]</sup>

Pro tento amorfní polykarbonát je teplota  $T_g$  (teplota skelného přechodu) jasně zřetelná. Rychlost expanze v tuhé fázi je mnohem menší, než v tavenině. Při ochlazování taveniny polymer kontrahuje rychleji nad  $T_g$ , a rychlost termální kontrakce bude pomalejší jakmile polymer projde přes  $T_g$  a chladne v pevném stavu.

Objem, je jednoduše prostor, obsazený daným množstvím materiálu. Dva materiály nemohou být ovšem srovnávány pouze na základě jejich objemu. Specifický objem je jeden ze způsobů, jak normalizovaně popsat objem materiálu. Materiály mohou být snadno srovnávány používáním jejich specifického objemu. Hustota, normalizovaná hodnota, je

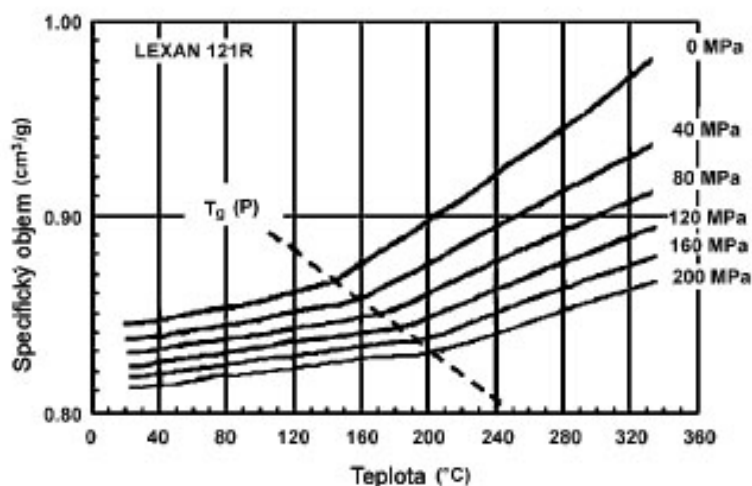
dána měrnou hmotností. Specifický objem je převrácenou hodnotou hustoty. Při zahřívání materiálu se jeho specifický objem zvyšuje, což naznačuje, že se materiál stává lehčím, nebo méně hustým.

Dalším důležitým rysem pvT diagramu je jeho znázornění stlačitelnosti polymeru. Na Obr. 16., je kompletní pvT diagram typického amorfního polymeru. Za zvýšeného tlaku, jsou obě fáze, tuhá i tavenina, stlačeny na menší specifický objem. Tento diagram reprezentuje stlačitelnost polykarbonátu v rozsahu tlaků od 0 do 200 MPa (cca 29 000 psi). Všechny metody pro zpracování plastů zahrnují obojí, teplotu a tlak. Polymer bude odpovídat na zvýšení teploty, zvýšením jeho objemu a naopak, při zvýšeném tlaku bude jeho objem menší. Polymer ve fázi taveniny je na teplotu citlivější, než ve fázi pevné (jak ve vidět z rychlosti tepelné expanze), polymerní tavenina je více stlačitelná, než tuhá fáze (jak je vidět z vyšší citlivosti taveniny na změnu objemu pod tlakem).



Obr. 16. pvT diagram neplněného amorfního polykarbonátu, zobrazující jeho stlačitelnost v různých fázích<sup>[2]</sup>

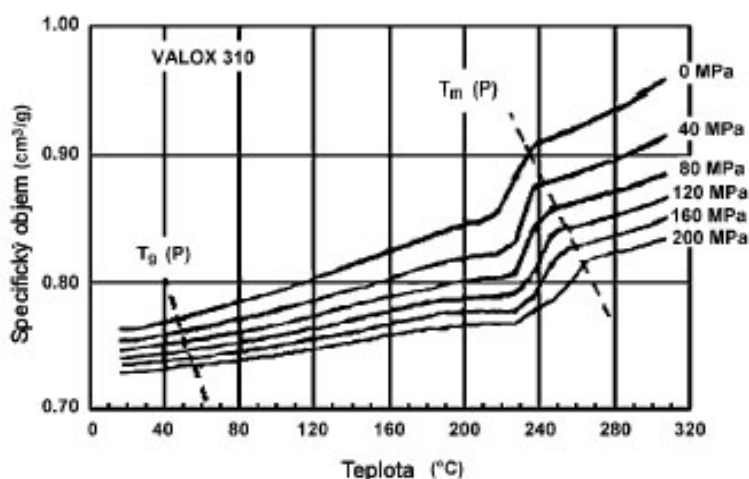
Teplota skelného přechodu  $T_g$  je funkcí teploty a tlaku, jak je zachyceno na Obr. 17. Za teplot značně vyšších, než je  $T_g$ , má polymer dostatečnou viskozitu pro tok za zpracovatelského tlaku. Za vyššího tlaku, je zapotřebí více tepelné energie, aby se jednotlivé řetězce začaly pohybovat. Z tohoto důvodu je  $T_g$  při vyšších tlacích, také vyšší. Když je polymer chlazen pod tlakem, stává se tento účinek podstatným. Polymerní tavenina ztuhne za vyšší teploty, než by tomu bylo u chlazení za nižšího tlaku. Linie reprezentující účinek tlaku na  $T_g$  je v anglosaské literatuře nazývána „freeze line“, protože reprezentuje linii, kde polymer při jeho ochlazování tzv. zamrzne.



Obr. 17. pvT diagram polykarbonátu, zobrazující závislost tlaku na  $T_g$  u amorfního materiálu<sup>[2]</sup>

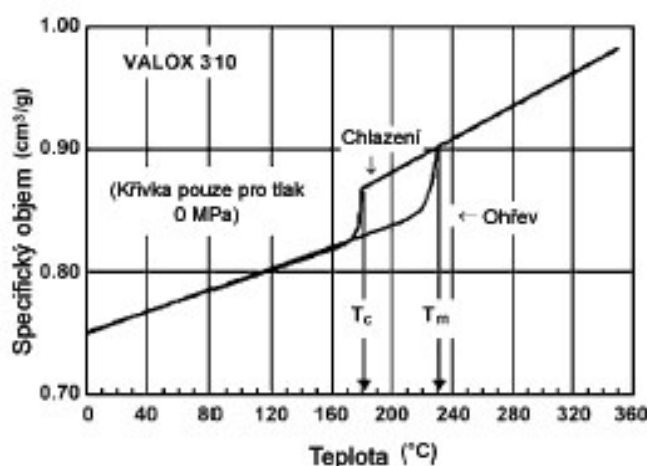
pvT diagram semikrystalického polymeru je oproti amorfnímu rozdílný. U semikrystalického polymeru jsou dva přechody, teplota skelného přechodu  $T_g$ , související s obsahem amorfní fáze a teplota tání krystalu  $T_m$ , související s táním krystalické struktury v polymeru. Obr. 17. ukazuje, jak je objemová roztažnost, spojená s tavením krystalické fáze mnohem více, než expanze spojená s  $T_g$ .

Teplota tání  $T_m$ , je funkcí tlaku. Například u materiálu Valox® 310 (na Obr. 18.), nejvyšší křivka ukazuje, že za nejnižšího tlaku, 0 MPa, taje tento materiál při teplotě 240°C. Toto je nad linií  $T_m$  a je zjištěno, že materiál vysoce expanduje, což je typické pro tání polymeru. Nicméně, když je v takovéto tavenině zvýšen tlak a teplota zůstává konstantní na 240°C, polymer rekrystalizuje, jak je vidět, sledujeme-li čáru teploty směrem dolů. Tento polymer je tedy schopen krystalizace za vyšších teplot, než je uvedeno na průvodním listu od výrobce, jen díky zvýšení tlaku. Při reálném vstřikovacím procesu, kdy je tavenina udržována při chlazení pod tlakem (dotlak), je polymer schopen krystalizovat za vyšší teploty, než by se dalo zprvu očekávat.



Obr. 18. Typický pvT diagram semikrystalického polymeru, zobrazující závislost tlaku na  $T_g$  a  $T_m$ <sup>[2]</sup>

Na Obr. 19. je zachycena teplota krystalizace, vytvořená podle pvT diagramu. Jak je z obrázku patrné, teplota  $T_m$  změřená během ohřevu a krystalizační teplota  $T_c$ , změřená během ochlazování, se významně liší. Studium kinetiky chlazení každého semikrystalického polymeru, je možné stanovit teplotu  $T_c$ , jako funkci rychlosti chladnutí. Používá se pro to speciálně vyvinutých algoritmů.

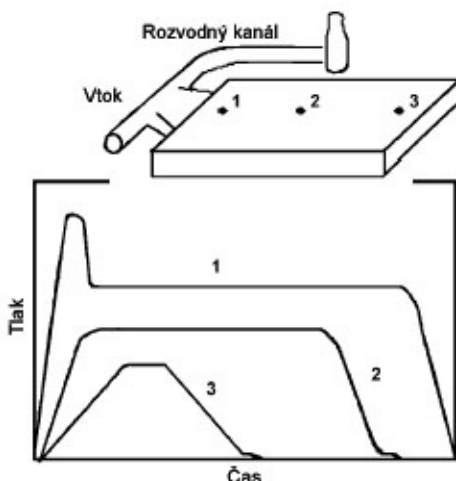


Obr. 19. pvT křivka ohřevu a chlazení semikrystalického polymeru<sup>[2]</sup>

#### 4.1 Predikce smrštění ve formě podle pvT diagramu

Během procesu vstřikování, je horká tavenina přemístěna z válce vstřikovací jednotky, skrze vtok a rozvodné kanály do dutiny formy. Jak roztavený polymer vyplňuje dutinu, tlak taveniny může být zaznamenáván detekčním zařízením, tedy snímačem tlaku. Jestliže je tlakový snímač umístěn blízko vtoku, ve středu dutiny a blízko konce toku, můžeme zaznamenat tři odlišné průběhy tlaku, v závislosti na čase. Obr. 20. ukazuje kolísání tlaku

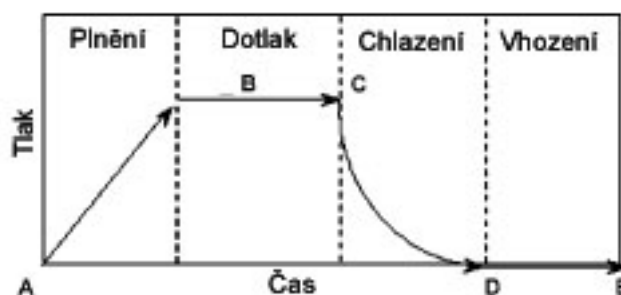
v čase, v těchto třech lokalitách. Poloha (1), nejbližší vtoku, ukazuje nejprve tlakovou špičku, následovaná odezvou v pozici (2) a nakonec i pozici (3). Velikost tlakového plató se také mění s umístěním. Nejvyšší tlaky jsou zaznamenány v blízkosti vtoku, nejnižší na konci toku. Tato tlaková historie je klíčem k porozumění petchování materiálu v dutině a následnému smrštění dílu.



Obr. 20. Průběh tlaku v dutině formy během <sup>[8]</sup>

vstřikovacího cyklu, v závislosti na vzdálenosti od vtoku

Na Obr. 21. je modelový popis průběhu tlaku, v pozici (2), tedy ve střední části dutiny. Obvykle je rozdělen do čtyř odlišných částí, každá odpovídá jisté fázi vstřikovacího procesu. První část znázorňuje nárůst tlaku, během vstřiku taveniny do dutiny nástroje. Tlak narůstá rovnoměrně, jak tavenina vyplňuje dutinu, začíná na hodnotě atmosférického tlaku a končí petchovacím tlakem.

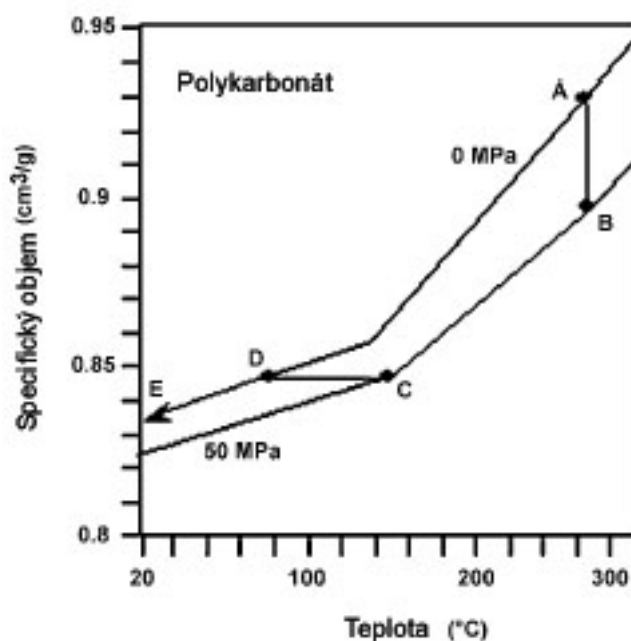


Obr. 21. Jednoduchý model průběhu tlaku v dutině formy, během cyklu <sup>[8]</sup>

V druhém úseku je konstantní tlak, reprezentující fázi dotlaku. Během dotlaku se část ochlazuje, ale tlak v dutině je podporován šnekem. Jakákoliv ztráta objemu materiálu vlivem ochlazení, je během této fáze, okamžitě doplněna další taveninou. Za povšimnutí stojí to, že zatím co celkový objem dílu zůstává konstantní, specifický objem, díky chlazení za konstantního tlaku, klesá.

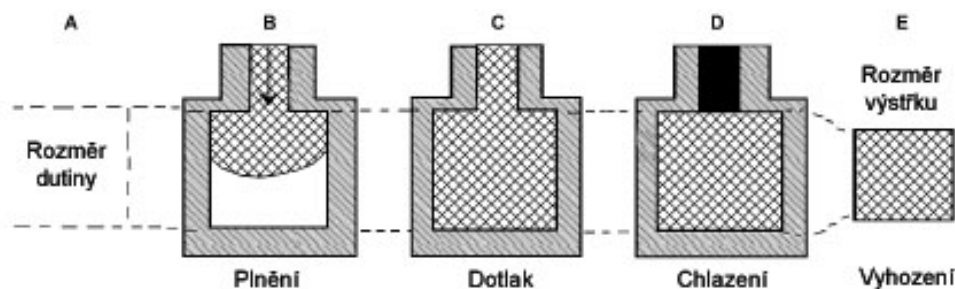
Ihned po zamrznutí vtoku, následuje fáze chlazení. Díky zamrznutému vtoku je část izolována od tlaku šneku. Během chlazení, je objem části považován za konstantní. Jak teplota, tak tlak klesají. Ve finální fázi je výstřik vyhozen z formy a chladne dál při pokojové teplotě.

Stejně čtyři fáze jsou snadno zachytitelné do pvT diagramu, jak je zachyceno na Obr. 22. Spojnice bodů A-B reprezentuje konstantní teplotu během vstřiku, jak tlak vzrůstá až k dotlaku. Během dotlaku materiál chladne a smršťuje se podle křivky B-C. Když část dostatečně ztuhne, je z formy vyhozena. Během této fáze je objem části konstantní a tlak s teplotou se snižují. Finální fáze, úsek D-E, reprezentuje chlazení a smrštění dílu za atmosférického tlaku a pokojové teploty.



Obr. 22. Rozfázovaný pvT diagram. <sup>[2]</sup>

Je důležité pamatovat si, že smrštění výstřiku je rozdíl mezi objemem pracovního nástroje a finálním objemem výstřiku. Na pvT diagramu je objemová změna souvisí s volným chlazením. Skutečné smrštění je tedy v diagramu rozdíl mezi bodem D a bodem E. Tyto čtyři fáze jsou též schématicky zachyceny na Obr. 23.



Obr. 23. Jednotlivé fáze vstřikovacího procesu, korespondující s obr. 28. a 29.

Výstřik se smrští do finálních rozměrů po vyhození z dutiny. Objemové smrštění může být proto vypočteno, jako objemová změna mezi formou a chladným dílem, dělena původním objemem dutiny. Objem smrštění  $S_v$ , je tedy dán rovnicí:

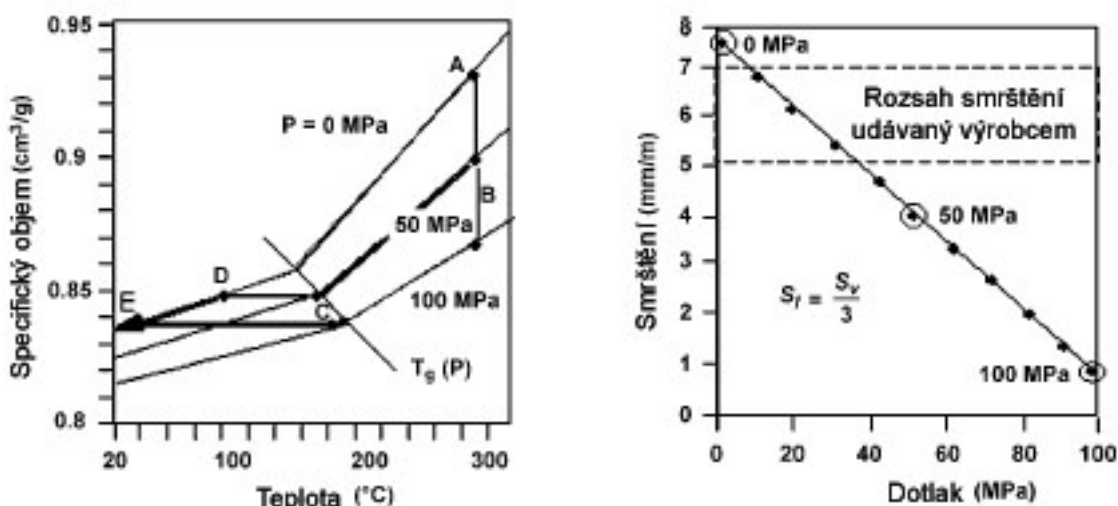
$$S_v = \frac{V_{\text{mold}} - V_{\text{part}}}{V_{\text{mold}}}$$

Kde:  $V_{\text{mold}}$  – objem dutiny formy

$V_{\text{part}}$  – objem ochlazeného výstřiku

$S_v$  – objem smrštění

Na Obr. 24. je znázorněno, jak může změna velikosti dotlaku ovlivnit velikost smrštění a jak je možné toto smrštění předvídat, za pomoci pvT diagramu. [2]



Obr. 24. Efekt velikosti dotlaku na smrštění<sup>[2]</sup>

## 5 Technologické podmínky při vstřikování

Zpracovatelské podmínky významně ovlivňují smrštění a deformace. Mezi tyto podmínky patří teplota taveniny, vstřikovací tlak a rychlost, doba a velikost dotlaku, teplota formy a teplota odformování.

Plastické materiály mají pozitivní součinitel teplotní roztažnosti a jsou stlačitelné v roztaveném stavu. Následkem toho, mění materiál svůj objem jak s teplotou, tak tlakem.

- 1) Nejnižší možná teplota taveniny, dovolující vyrábět dobré výrobky, vytváří malé smrštění. Čím menší je rozsah teplot, mezi roztaveným plastem vstupujícím do formy a pokojovou teplotou, tím menší je teplotní kontrakce a tím méně času je pro krystalizaci.
- 2) Protože plast je stlačený, velikost dotlaku (po naplnění dutiny formy) ovlivňuje smrštění zásadním způsobem. Trvání a účinnost zpětného tlaku, je do značné míry závislá na velikosti a návrhu vtoku a celého vtokového systému. Jakmile totiž vtokový systém zamrzne, nemůžeme již dalším zvyšováním dotlaku nic získat. Čím vyšší je tlak v dutině, před zamrznutím vtoku, tím více materiálu zůstane ve formě a tím nižší bude i celkové smrštění výstřiku. Vyšší dotlak vede globálně ke zmenšení smrštění ve formě. Bohužel, tlaky v dutině formy se různí od maxima u vtoku, k minimu v nejvzdálenějším místě dutiny, vlivem stlačitelnosti taveniny a její viskozitě. Rozdíl tlaků po celé délce dutiny může být velmi významný, zvláště pro větší délky, nebo tenčí části. Tento rozdíl tlaků, který nastane během cyklu, má za následek to, že hodnoty smrštění ve formě jsou větší směrem od konce dutiny ke vtoku. Toto může vést ke zkroucení či pokřivení výstřiku.
- 3) Delší doba dotlaku, během chlazení části, může být příčinou mírného natažení plastu ve formě, čímž se sníží zjevné smrštění. Jádra, nebo další části formy zadržují smrštění tak dlouho, dokud je výrobek ve formě. Toto způsobuje natahování plastového dílu, pokud je vstřikovací cyklus dlouhý. Forma sama o sobě vystupuje, jako fixační chladicí součást.
- 4) Horká forma zvyšuje smrštění ve formě, ale redukuje smrštění po doformování. Chladné formy mají účinek opačný. Chladná forma (chladí plast tak rychle, jak je to jen možné), redukuje smrštění hlavně u krystalických materiálů. Nicméně, ve

chladné formě dochází k tzv. zamrznání pnutí, tedy vzniku reziduálního pnutí, které se může projevit až po nějakém čase, či při vystavení výstřiku zvýšené teplotě.

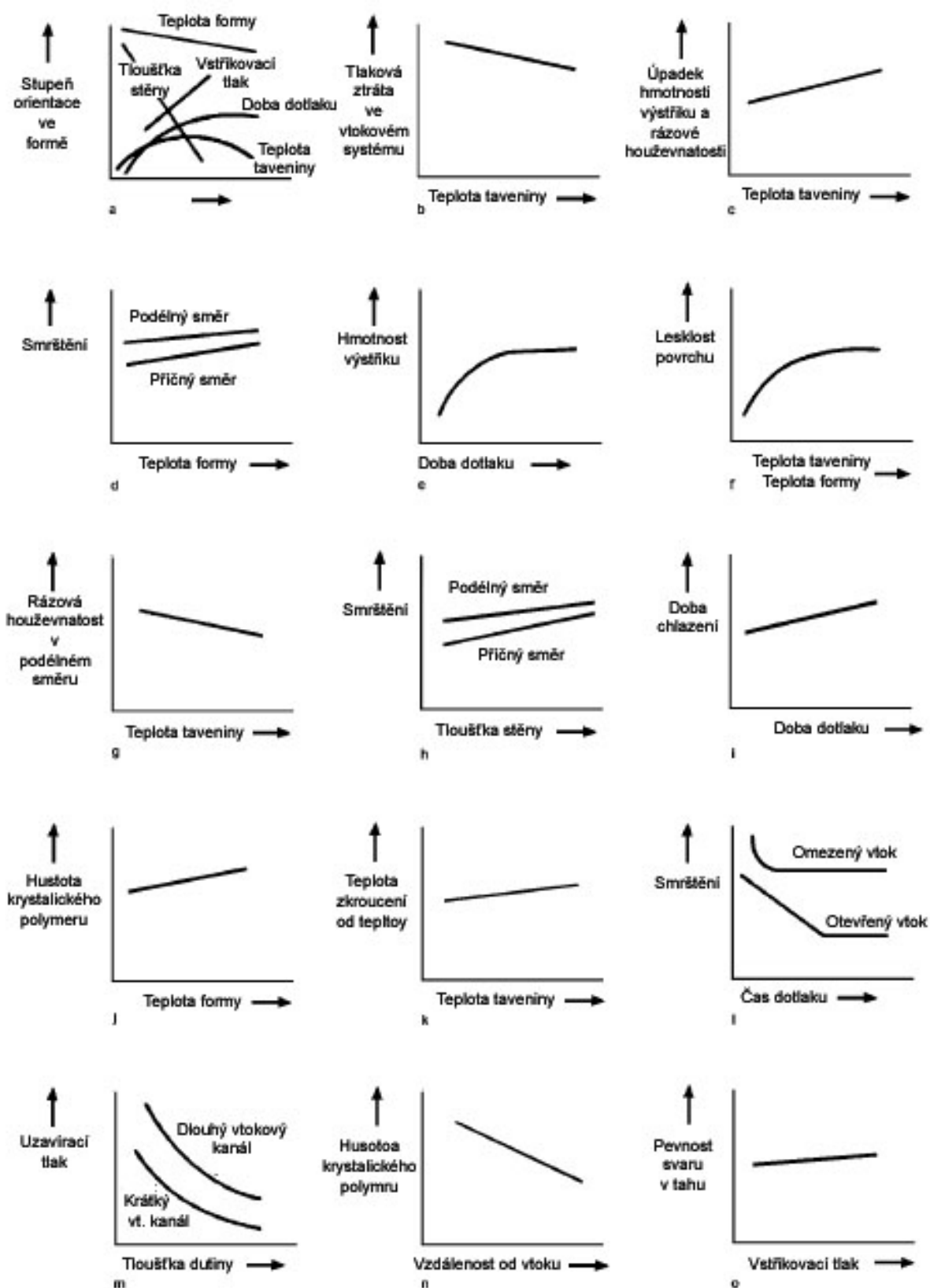
- 5) Semikrystalické materiály jsou zvláště ovlivněny rychlostí chladnutí. Polymerní řetězce v tavenině jsou, z krystalického hlediska, v chaotickém stavu a solidifikací tvoří hutnou strukturu. Se zvyšující se krystalinitou vzrůstá i hustota a smrštění výstřiku.
- 6) Zvláštní chlazení je požadováno u jader čepů a uvnitř rohů, aby se plast ochlazoval, pokud možno, rovnoměrně. Jádra čepů a externí rohy jádra formy mají větší plochu povrchu, a jsou tedy vystaveny většímu teplotnímu namáhání, než další oblasti formy.

Efekty různých změn technologických podmínek při vstřikování, jsou zobrazeny na sérii grafů, označených od (a) až do (o) na Obr. 25.

Graf (a) objasňuje účinek na molekulovou orientaci při změně několika dalších proměnných. Se zvyšující se teplotou formy, nebo tloušťkou dutiny, je více času pro relaxaci napjatých molekul a tudíž k jejich znovuzorientování dříve, než stačí materiál zatuhnout. Jak se zvyšuje vstřikovací tlak a doba dotlaku, tím více napětí se vyskytuje v molekulách v čase zamrznutí. Toto zvyšuje orientaci dvěma způsoby. Vyšší tlak způsobuje především vyšší orientaci. Delší čas dotlaku udržuje nízkou úroveň toku do formy po delší dobu, který udržuje také vyšší orientaci. Zpočátku, za zvýšené teploty taveniny, jednotlivé molekuly mají více svobody k tomu, aby se seřadili s tokem materiálu.

Graf (b) zobrazuje ztrátu tlaku taveniny, průchodem vtokovým kanálem, která se s rostoucí teplotou snižuje, protože plast se stává méně viskózní a lépe teče. Za nízkých teplot, je pochopitelně tlakově náročnější naplnit dutinu. Jak bylo již několikrát dříve zmiňováno, nízké smrštění je spojeno s nízkou vstřikovací teplotou. Se zvyšující se teplotou vzrůstá smrštění, ale dutina se snadněji naplní a i dotlak je efektivnější.

Graf (c) zachycuje ztrátu hmotnosti a rázové pevnosti části, v závislosti na teplotě taveniny. Vyšší teplota dovolí naplnit dutinu za nižšího tlaku, s delším časem pro odstranění vnitřního pnutí. Obojí přináší nižší napětí ve výstřiku a vyšší rázovou houževnatost.



Obr. 25. Vliv technologických podmínek nastavených na vstřikovacím stroji, na vlastnosti termoplastu<sup>[2]</sup>

Graf (d) reprezentuje účinek teploty formy na smrštění v podélném a příčném směru. Vyšší teploty poskytují více času pro deorganizaci molekul a tak se více vyrovná napětí. U semikrystalických materiálů poskytne vyšší teplota formy více času pro krystalizaci a tedy větší smrštění.

Graf (e) zobrazuje zvyšování hmotnosti výstřiku, v závislosti na prodlužování doby dotlaku, než zamrzne vtok. Po tomto okamžiku nemá pokračování ve zpětném tlaku vliv na hmotnost výstřiku.

Vyšší teplota taveniny a formy, jak je zobrazeno na grafu (f), poskytuje materiálu více času k tomu, aby se dokonale přizpůsobil povrchu formy. Tímto dosahuje povrch vyšší úrovně lesku.

Vyšší teplota taveniny, graf (g), může ovlivnit rázovou houževnatost dvěma způsoby. První je delší vystavení taveniny vyšší teplotě, což může vést k degradaci a zhoršení vlastností materiálu. Za jistých okolností způsobuje vyšší teplota molekulovou orientaci. Proto je část více křehká.

Se zvyšující se tloušťkou dutiny, graf (h), zkracuje se čas potřebný pro uvolnění vnitřního pnutí. Větší procento tloušťky části, bude pod napětím. Je také více času pro krystalizaci semikrystalických materiálů, čímž se zvyšuje smrštění.

Graf (i) ukazuje, že prodloužení času dotlaku a zvýšení tlaku, prodlužuje čas chlazení. Zvyšováním dotlaku a doby dotlaku je do dutiny vstříknuto více materiálu. Jakmile je v dutině více materiálu, je třeba prodloužit i dobu chlazení, díky zvýšenému objemu, který je třeba zchladit.

Jak vzrůstá teplota formy, graf (j), je poskytnuto více času pro formování krystalů. To znamená, že plast bude hustější, díky vyššímu stupni krystalizace.

Vyšší teplota taveniny, graf (k), redukuje napětí při plnění formy, protože viskozita materiálu je nižší. Vyšší teplota taveniny též umožní relaxaci materiálu před jeho zchlazením. Nižší hodnota reziduálního pnutí může mít vliv na odolnost výstřiku proti zvýšeným teplotám, tedy výstřik odolává lépe vyšším teplotám bez deformací.

Čím více materiálu se podaří napěchovat do dutiny formy, před zamrznutím vtoku, tím menší bude smrštění. Graf (l) ukazuje, že čím déle je vtok tekutý, tím nižší je výsledné smrštění. Jakmile jednou vtok zamrzne, je zbytečné pokračovat v dotlaku. Graf ukazuje tyto efekty pro omezený a otevřený vtok. To též ukazuje účinek malých a velkých průměrů vtoků. Čím větší vtok, tím snadnější plnění dutiny taveninou. Tím pádem vede větší vtok k menšímu smrštění a rychlejšímu plnění formy. Navíc, větší vtok zamrzne později a tak je možné lépe naplnit dutinu formy, což také snižuje smrštění.

Graf (m) ukazuje, že silnější části, nebo krátký vtokový kanál, plní dutinu snadněji a za nižších tlaků, než tenké, nebo dlouhé kanály. Čím nižší tlak je potřeba k plnění dutiny, tím nižší je třeba uzavírací tlak formy. Naopak, dlouhý kanál, nebo tenký díl, požaduje vyšší vstřikovací tlaky, vyžadující vyšší uzavírací tlak, aby nevznikla škvíra v dělicí rovině formy.

Graf (n) ukazuje, že se zvyšující se vzdáleností od vtoku, se snižuje hustota polymeru. Toto je způsobena dvěma úkazy. Plast nejvzdálenější vtoku, je chladnější, než polymer u vtoku. Z tohoto důvodu nemá tolik času pro krystalizaci. Druhým důvodem je vyšší tlak u vtoku, než kdekoli jinde v dutině. Nižší tlak u vtoku, vede také k nižší hustotě.

Se zvyšujícím se vstřikovacím tlakem, vzrůstá i pevnost „svarů“ (studených spojů), jak je zobrazeno v grafu (o), protože pevnost svařovací linie je úměrná síle, kterou jsou oba toky spojeny. Rovněž má vyšší vstřikovací tlak vliv na zvýšení teploty taveniny na čele, tedy v místě spoje.

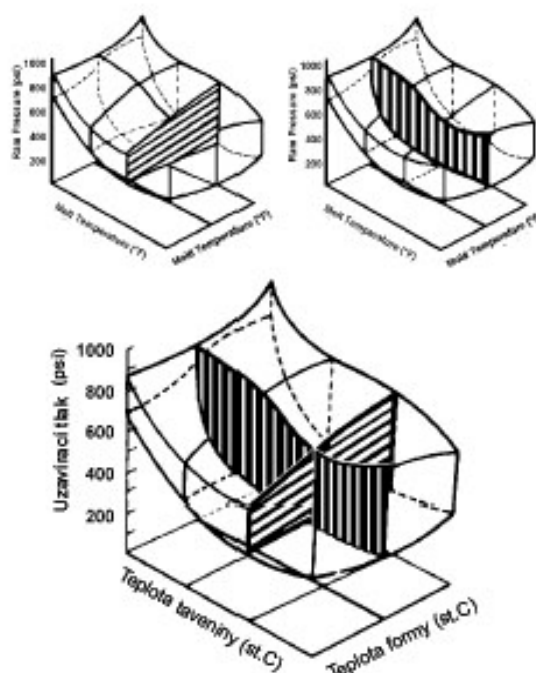
## 5.1 Zpracovatelské okno

Vzhledem k tomu, že existují horní a dolní limity pro teplotu formy, teplotu taveniny a vstřikovací tlak, které vedou k produkci plně naplněných dílů bez otřepů, je možné vytvořit tzv. zpracovatelské okno. Obr. 26. prezentuje typické horní a dolní hranice vstřikovacího tlaku a teplotu formy pro danou teplotu taveniny. Oblast uzavřená křivkami je tzv. zpracovatelské okno. Vyšší teplota, nebo tlak mají za následek vznik otřepů kolem výstřiku. Nižší teplota, nebo tlaky mají za následek tzv. „zmetkový výlisek“ (short shot), tj. neúplný výstřik.

Více přesná prezentace zpracovatelského okna je trojrozměrný obrazec tolerovaných podmínek, při kterých lze formu plně naplnit bez vzniku otřepů. Na Obr. 27. je takovýto obrazec znázorněn. Velikost a tvar okna bude kolísat v závislosti na tvaru části, formě a plastu, který je pro vstřikování použit. Také rychlost, kterou je dutina plněna, má vliv na velikost a tvar tohoto okna, jakkoli je tento vliv relativně malý. Čím větší je toto zpracovatelské okno, tím větší možnost ke korekci smrštění a deformací má obsluha vstřikovacího stroje.



Obr. 26. Zpracovatelské okno dané teplotou taveniny<sup>[2]</sup>



Obr. 27. Trojrozměrné zpracovatelské okno<sup>[2]</sup>

## 5.2 Teplota vstřikované taveniny

Křivka tvaru písmene U, zobrazená na Obr. 28., ukazuje, že smrštění je vyšší jak za vysoké, tak za nízké teploty taveniny. Za nízké teploty taveniny plast sotva naplní dutinu formy, před zamrznutím vtoku. Tlakový gradient z místa u vtoku, ke konci toku je vysoký a není čas napěchovat dutinu taveninou. Tlak na konci toku je nízký, smrštění je tedy velké. Při vysoké teplotě taveniny, je vyšší smrštění následkem teplotní změny. Za velmi vysoké teploty taveniny se může stát, že dotlak bude ukončen dříve, než zamrzne vtok.



Obr. 28. Závislost velikosti smrštění na teplotě taveniny<sup>[2]</sup>

## 5.3 Rychlost a tlak vstřikování

Vstřikovací rychlost a vstřikovací tlak úzce souvisejí se vstřikovacím procesem. Na starších vstřikovacích strojích bylo možné regulovat jen maximální průtok ventilovým rozvodem, ale minimální dávka byla určena nastaveným vstřikovacím tlakem. Vstřikovací rychlost má dvojí účinek:

- Zaprvé, pomalá rychlost vstřikování umožní vytvořit silnější stěnu, jak materiál vtéká do formy, zvyšují se ale tlakové požadavky na naplnění celé dutiny. Pomalá rychlost vstřikování má za následek chladnější materiál na konci plnicího cyklu. Chladný plast může způsobit i předčasné zamrznutí vtoku, nižší efekt dotlaku, větší orientaci a tím i větší smrštění.
- Za druhé, jisté množství frikčního tepla u vtoku, může způsobit pokles tlaku ve vtoku. Větší plnicí dávka zvyšuje teplotu taveniny v dutině. [2]

## 6 Moldflow analýzy

Simulační analýzy vstřikování tavenin plastů postupně pronikají do vědomí stále širšího okruhu plastikářské odborné veřejnosti. S prvními simulacemi u nás se začalo již před více než 15 lety a simulační výpočty prodělaly od té doby obrovský vývoj. V současné době je možné simulovat prakticky všechny etapy výrobního procesu, včetně nových moderních technologií jako jsou vstřikování za podpory plynu (GIM), dvojkomponentní vstřikování, vstřikování do pootevřené formy aj. Analýza smrštění a deformace u klasického vstřikování patří také ke konstrukčním podkladům, které byly ještě nedávno nedostupné.

K simulaci se hodí jen takové tary plastových dílců, u kterých byly alespoň částečně dodrženy principy pro konstrukci plastových dílců. Výpočtové problémy mohou také nastat u některých typů granulátů, neboť ne vždy jsou pro ně dostupná potřebná materiálová data, zejména koeficienty lineární roztažnosti v podélném a příčném směru atd. Obvyklá simulace vstřikování neprobíhá v tvarové dutině reprezentované reálným tvarem plastového dílce, nýbrž se používá tzv. střednicový model, tedy model tvořený střednicovými plochami u nichž třetí rozměr (tloušťka stěny) je zadán číselně.

Výsledky analýz se zobrazují ve formě barevných obrázků v postprocesoru programu. Mimo jiné je možné získat výsledky časového průběhu plnění tvarové dutiny, teplotní a tlakové průběhy, rozložení smykových napětí a rychlostí tečení taveniny, velikost smrštění a deformací atd.

Tyto analýzy pomáhají nalézt odpovědi na řadu konstrukčních a technologických otázek, jako jsou například: Je design plastového dílce vhodný pro vstřikování? Naplní se tvarová dutina zcela taveninou? Kde budou umístěny studené spoje? Jaká bude uzavírací síla stroje? Moldflow analýzy jsou cestou ke snížení ceny úprav vstřikovacích forem a celkovému zkrácení vývojové doby u nových konstrukčních výrobků.

## II. Experimentální část

## 7 Stanovení cílů a metodika práce

Finální tvar a rozměry výstřiku závisí na mnoha aspektech. Základní tvar a rozměry výstřiku jsou dány konstrukčním řešením dutiny formy, na jeho konečné rozměry, fyzikální a mechanické vlastnosti, mají však také nezanedbatelný vliv technologické podmínky při vstřikování, vhodný výběr a příprava vstupního materiálu a skladování výstřiku. Ve výrobě může také nastat situace, kdy dojde například ke změně vlastností vstupního materiálu z rozdílných šarží, a smrštění výstřiku je třeba operativně korigovat změnou technologických podmínek.

Tato práce se zabývá vlivem velikosti dotlaku, teploty formy a taveniny na smrštění výstřiku. Tyto podmínky významně ovlivňují smrštění výstřiku ve formě. Cílem této práce je ověřit vliv jednotlivých výše uvedených podmínek na smrštění zkušebních tělísek a reálných výrobků. Z naměřených hodnot smrštění pak vytvořit grafické závislosti a tyto porovnat s teoretickými a s hodnotami získanými analýzou modelů v Moldflow. V podstatě se jedná o porovnání teoretických předpokladů s reálným chováním vstřikovaných dílů.

V první řadě bude třeba vyrobit zkušební tělíska pro určení podélného a příčného smrštění a to, pokud možno, o dvou různých tloušťkách stěny a z minimálně dvou různých materiálů. U těchto tělísek provést měření a vyhodnocení podélného a příčného smrštění, spolu s vytvořením grafických závislostí a také porovnat chování různých materiálů a tělísek o různé tloušťce stěny.

Dále bude třeba vyrobit vzorky reálných výrobků, na kterých bude provedeno měření definovaných rozměrů a bude sledována závislost změny těchto rozměrů, ovlivněná jednotlivými technologickými podmínkami. Tyto získané závislosti graficky zpracovat a vzájemně porovnat.

Ve vhodném software pro parametrické modelování, bude třeba vytvořit 3D modely zkušebních tělísek pro analýzu v programu Moldflow (pro analýzu reálných dílů bude vhodné použít přímo modely získané z vývojového oddělení). Vytvořit analýzy v programu Moldflow a jejich výsledky diskutovat s hodnotami naměřenými na reálných vzorcích.

## 8 Použité materiály

Při výrobě zkušebních tělísek i výrobků, byly použity materiály POM a PA, jejichž bližší specifikace je uvedena níže.

### 8.1.1 Polyoxometylen POM

Jedná se o termoplastický polymer na bázi formaldehydu, v technické praxi označovaný jako polyformaldehyd. Formaldehyd sám polymeruje velmi snadno a velice reaktivní monomerní formaldehyd se obtížně připravuje ve vysoce čisté formě, neboť polymeraci vyvolávají již stopy nečistot. Pro výrobu technicky použitelného polymeru je zapotřebí velice čistý monomerní formaldehyd, nebo jeho trimer trioxan bez polárních nečistot. Již stopové množství vody působí při aniontové a kationtové polymeraci jako přenašeč. Odstraňování nežádoucích nečistot působících jako přenašeče nebo retardéry na přípustnou koncentraci je velmi obtížné.

Homopolymery dosahují průměrné molární hmotnosti od 30 000 do 90 000. Vyznačují se vysokou tvrdostí, pevností a rázovou houževnatostí až do  $-40^{\circ}\text{C}$ , a jsou proto vhodné pro výrobu předmětů, které musí odolávat náhlým nárazům. Mají malý součinitel tření a hodí se pro výrobu ložisek s malým mazáním, nebo bez mazání. Spolu s polyamidy mají největší odolnost proti oděru. Mají dobré elektroizolační vlastnosti. Z termoplastů mají jedinečně fluroplasty větší odolnost vůči organickým rozpouštědlům, než polyformaldehyd. Výtečná odolnost POM vůči téměř všem organickým rozpouštědlům je spojována s vysokým stupněm krystalinity polymeru.

Polymer se zpracovává vstřikováním (90%), vytlačováním i vyfukováním při 200 až  $210^{\circ}\text{C}$ . Přídavkem nukleačních činidel lze zvýšit krystalizační rychlost při vstřikování a zkrátit tím tak pracovní cyklus. Materiál se dá svařovat. Zpracovatelům je dodáván ve formě bílých granulí. Hlavním výrobcem homopolymeru je DuPont (USA). [3]

**Vlastnosti materiálu POM – Hostaform C 13021**

|                        |             |
|------------------------|-------------|
| Skupina:               | Acetaly     |
| Výrobce:               | Targor      |
| Materiálová struktura: | Krystalická |
| Plnění:                | Neplněn     |

**Doporučené podmínky zpracování (dle výrobce)**

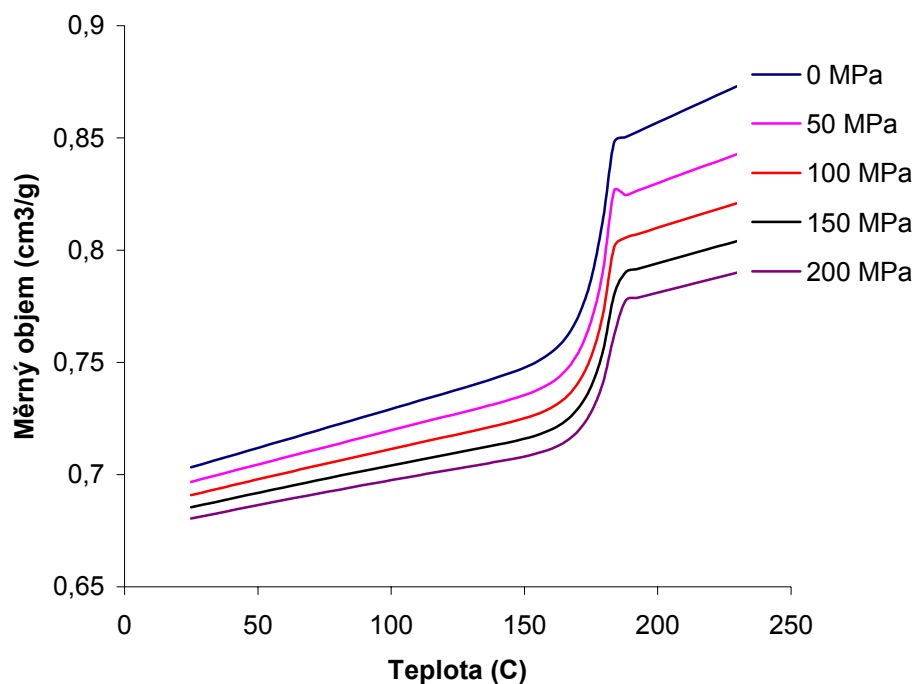
|                            |                                          |
|----------------------------|------------------------------------------|
| Teplota formy:             | min. 50 °C, max. 105 °C, optimum 70 °C   |
| Teplota taveniny:          | min. 180 °C, max. 235 °C, optimum 225 °C |
| Teplota vyhození výstřiku: | 118 °C                                   |
| Max. smykové napětí:       | 0,55 MPa                                 |
| Max. smyková rychlost:     | 40 000 1/s                               |

**Reologické aj. vlastnosti**

|                                            |                          |
|--------------------------------------------|--------------------------|
| Teplota tečení $T_f$ :                     | 140 °C                   |
| Index toku taveniny IIT:                   | 15,6 g/10 min            |
| Koeficient teplotní roztažnosti $\alpha$ : | 0,00014 1/°C             |
| Hustota taveniny $\rho_m$ :                | 1,1488 g/cm <sup>3</sup> |
| Hustota tuhé fáze $\rho_s$ :               | 1,4219 g/cm <sup>3</sup> |

**Mechanické vlastnosti**

|                              |          |
|------------------------------|----------|
| Youngův modul pružnosti E:   | 1740 MPa |
| Poissonova konstanta $\nu$ : | 0,00014  |
| Modul pružnosti ve smyku G:  | 619 MPa  |

**pvT diagram - Hostaform C 13021**

Obr. 29. pvT diagram materiálu Hostaform C 13021, uváděný výrobcem

**Vlastnosti materiálu POM – Iupital F20-03**

|                        |                  |
|------------------------|------------------|
| Skupina:               | Acetaly (POM)    |
| Výrobce:               | Mitsubishi Group |
| Materiálová struktura: | Krystalická      |
| Plnění:                | Neplněn          |

**Doporučené podmínky zpracování (dle výrobce)**

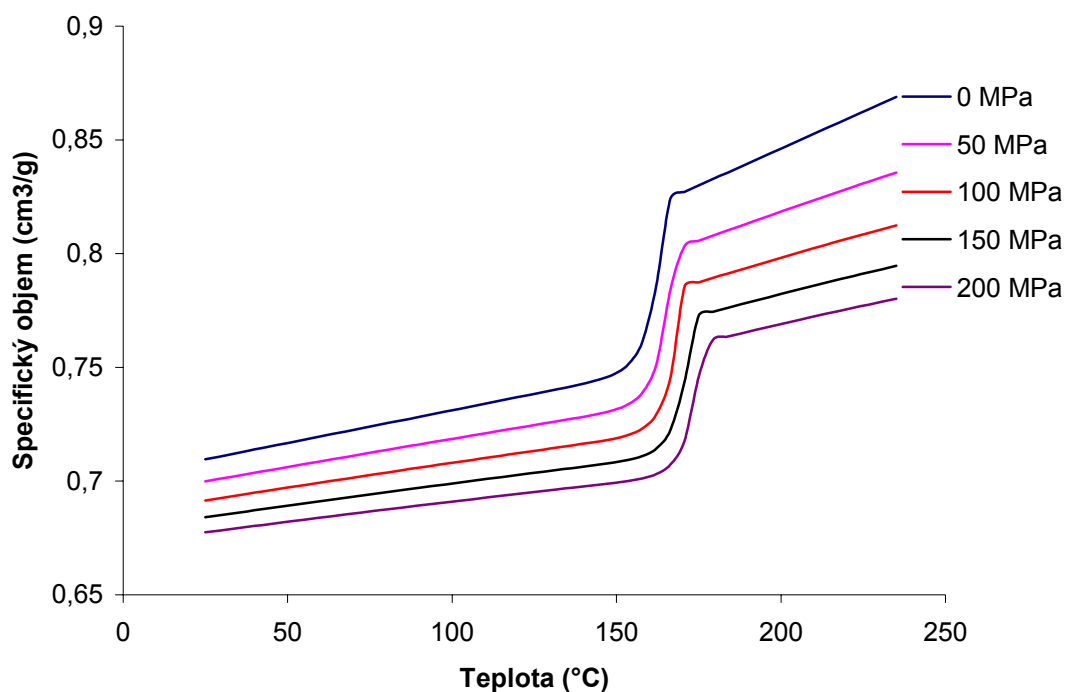
|                            |                                          |
|----------------------------|------------------------------------------|
| Teplota formy:             | min. 50 °C, max. 105 °C, optimum 70 °C   |
| Teplota taveniny:          | min. 180 °C, max. 235 °C, optimum 225 °C |
| Teplota vyhození výstřiku: | 118 °C                                   |
| Max. smykové napětí:       | 0,55 MPa                                 |
| Max. smyková rychlost:     | 40 000 1/s                               |

**Reologické aj. vlastnosti**

|                                            |                           |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Teplota tečení $T_f$ :                     | 140 °C                    |
| Koeficient teplotní roztažnosti $\alpha$ : | 0,00014 1/°C              |
| Hustota taveniny $\rho_m$ :                | 1,1595 g/cm <sup>3</sup>  |
| Hustota tuhé fáze $\rho_s$ :               | 1,42094 g/cm <sup>3</sup> |

**Mechanické vlastnosti**

|                              |          |
|------------------------------|----------|
| Youngův modul pružnosti E:   | 1740 MPa |
| Poissonova konstanta $\nu$ : | 0,00014  |
| Modul pružnosti ve smyku G:  | 619 MPa  |

**pvT diagram - Iupital F 20-03**

Obr. 30. pvT diagram materiálu Iupital F 20-03, uváděný výrobcem

### 8.1.2 Polyamid PA

Polyamidy jsou lineární polymery obsahující v řetězci amidové skupiny  $-\text{CONH}-$ . Nejvýznamnější a nejrozšířenější jsou polyamidy s alifatickými řetězci, na trhu jsou však i typy aromatické. K jednoduchému označování alifatických polyamidů byl zaveden systém, který udává počet uhlíkových atomů ve stavebních jednotkách řetězců.

Vlastnosti polyamidů se mění v závislosti na výchozích monomerech. Typické polyamidy jsou v tuhém stavu z 30 až 50 % krystalické a neprůhledné. Řetězové molekuly jsou propojovány vodíkovými můstky mezi amidovými skupinami. Jejich množství ovlivňuje krystalickou strukturu, bod tání,  $T_g$  a většinu dalších vlastností. Vysoká houževnatost, tvrdost, odolnost proti oděru a dobré elektroizolační charakteristiky jsou vlastnosti, na nichž spočívá použití polyamidů jako plastů i vláken. Mechanické vlastnosti jsou závislé na typu, molekulové hmotnosti a obsahu vody. Nasákavost je dána koncentrací amidových skupin. Čím vyšší je poměr skupin  $-\text{CONH}-$  a  $-\text{CH}_2-$ , tím větší je nasákavost a změkčující účinek vody. Vedle nasákavosti je jednotlivé typy liší výrazně bodem tání  $T_g$  a rozpustností v různě koncentrované kyselině mravenčí. Vzhledem k relativně polárnímu charakteru a vysoké nasákavosti, nedochází u polyamidů ke vzniku elektrostatického náboje a k přitahování prachových částic. Polarita také usnadňuje snášenlivost s řadou plniv, jako jsou křída, talek, azbest a skelná vlákna. Všechny polyamidy odolávají účinkům pohonných látek, olejů a velké řady technických rozpouštědel alkálií.

Alifatické polyamidy lze zpracovávat všemi postupy obvyklými pro termoplasty a zvláknovat z taveniny. U plastů je nejvýznamnější vstřikování a vytlačování na fólie. Lze jej svařovat, lepit, potiskovat i pokovovat.

V praxi se osvědčily polyamidy z hexametylendiaminu a kyseliny adipové (PA 66), nebo sebakové (PA 10). Hlavním důvodem je nejsnadnější dostupnost monomerů.

Polyamid 66 má výhodu ve vysokém bodu tání a v poněkud vyšší pevnosti a nižší navlhavosti, než polyamid 6. Polyamid 66 slouží v širokém měřítku jako plast i jako materiál pro výrobu vláken a fólií. [3]

**Vlastnosti materiálu PA66 Zytel 70G35HSL RA4**

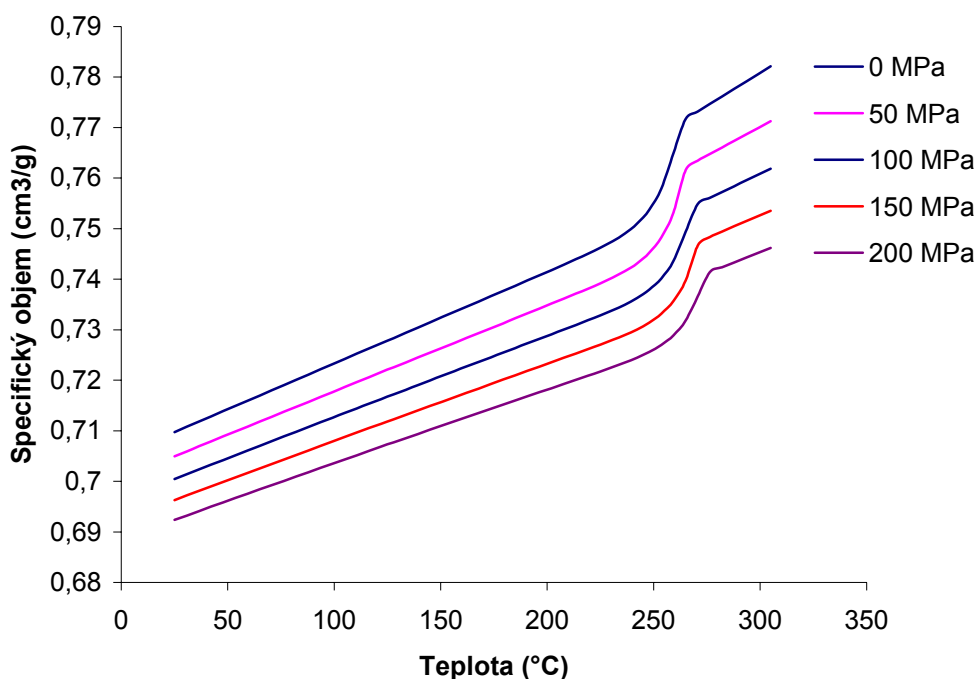
|                                                     |                                          |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Skupina:                                            | Polyamidy                                |
| Výrobce:                                            | DuPont Engineering Polymers              |
| Materiálová struktura:                              | Krystalická                              |
| Plnění:                                             | 35% skelné vlákno                        |
| <b>Doporučené podmínky zpracování (dle výrobce)</b> |                                          |
| Teplota formy:                                      | min. 65 °C, max. 120 °C, optimum 110 °C  |
| Teplota taveniny:                                   | min. 285 °C, max. 305 °C, optimum 295 °C |
| Teplota vyhození výstřiku:                          | 202 °C                                   |
| Max. smykové napětí:                                | 0,5 MPa                                  |
| Max. smyková rychlost:                              | 60 000 1/s                               |

**Reologické aj. vlastnosti**

|                                            |                          |
|--------------------------------------------|--------------------------|
| Teplota tečení $T_f$ :                     | 221 °C                   |
| Koeficient teplotní roztažnosti $\alpha$ : | 0,00014 1/°C             |
| Hustota taveniny $\rho_m$ :                | 1,2829 g/cm <sup>3</sup> |
| Hustota tuhé fáze $\rho_s$ :               | 1,409 g/cm <sup>3</sup>  |

**Mechanické vlastnosti**

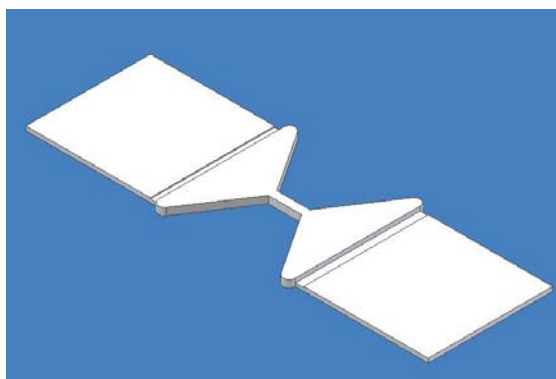
|                                   |                  |
|-----------------------------------|------------------|
| Youngův modul pružnosti $E_1$ :   | 9763,35 MPa      |
| Youngův modul pružnosti $E_2$ :   | 5667,59 MPa      |
| Poissonova konstanta $\nu_{12}$ : | 0,4163 $10^{-5}$ |
| Poissonova konstanta $\nu_{23}$ : | 0,4692 $10^{-5}$ |
| Modul pružnosti ve smyku $G$ :    | 2449,8 MPa       |

**pvT diagram - Zytel 70G35HSL RA4**

Obr. 31. pvT diagram materiálu Zytel 70G35HSL RA4, uváděný výrobcem

## 9 Zkušební tělíska

Zkušební tělíska pro určení podélného a příčného smrštění při vstřikování plastů, jsou v podstatě destičky o různé tloušťce, jejichž rozměry jsou porovnávány s rozměry formy a tak je možné experimentálně určit velikost smrštění materiálu.

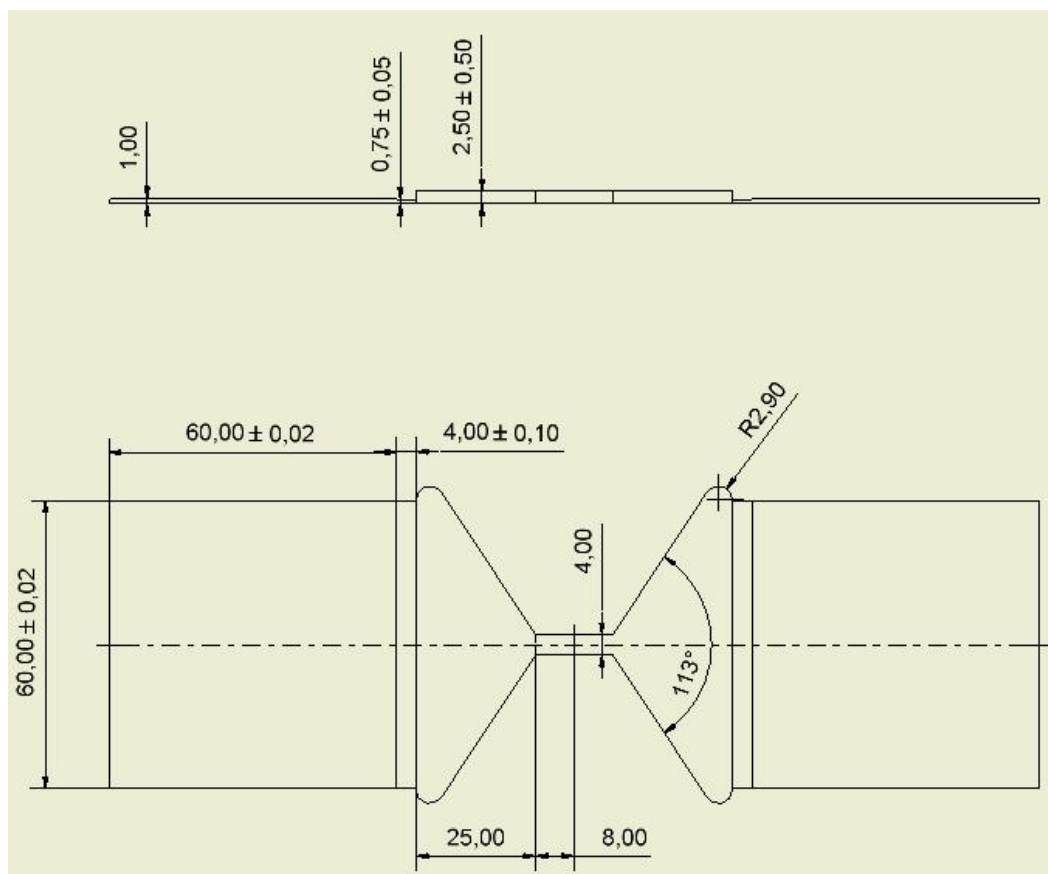


Obr. 32. Zkušební tělísko pro určení smrštění

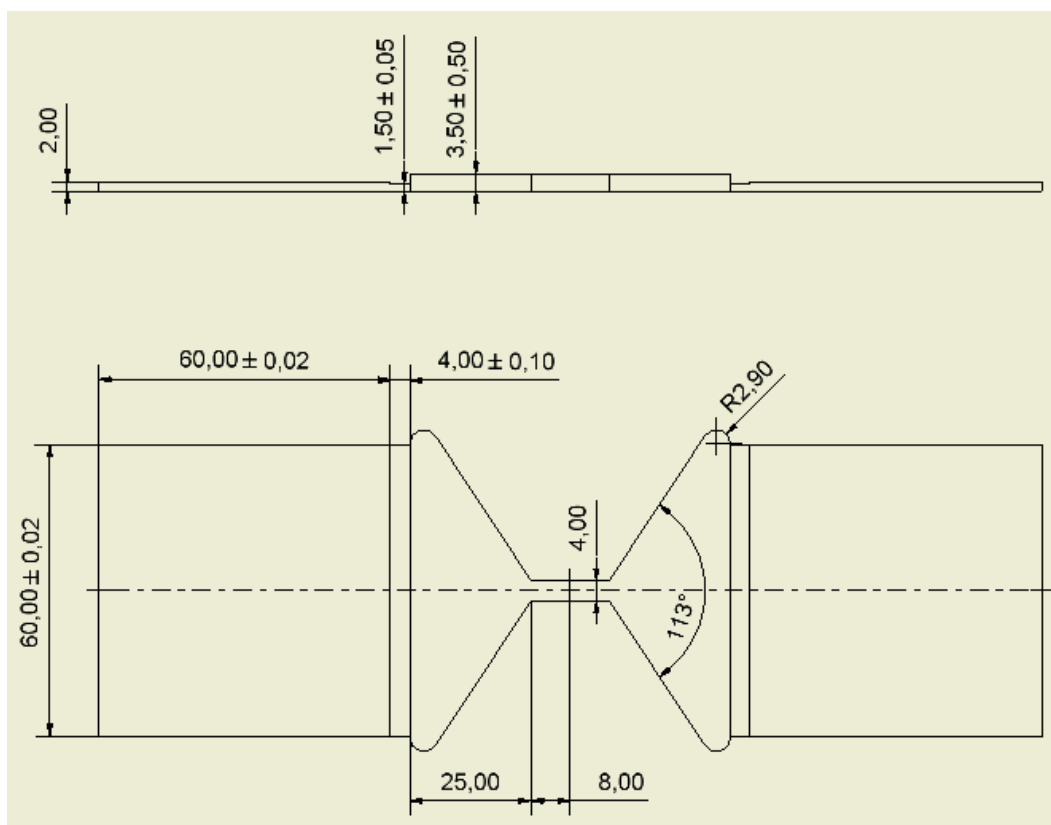
Na Obr. 32. je zobrazeno zkušební tělísko, respektive jeho model vytvořený v programu *Autodesk Inventor 6*. Na Obr. 33. a Obr. 34. jsou zakótovány rozměry tělísek respektive dutiny formy, pro tělíska o tloušťce 1 a 2 mm, kterých bylo při experimentu použito.

Destičky byly vyrobeny na stroji *Arburg 700C*. Pro každý materiál byly zvoleny specifické technologické podmínky a to v největším možném rozsahu tak, aby byl vliv jednotlivých změn pokud možno co nejvíce patrný.

Na velikost smrštění má mimo jiné vliv i tloušťka stěny, takže tělíska byla vyrobena ve dvou tloušťkách (1 a 2 mm). Pro každý materiál a tloušťku bylo vyrobeno 10 sérií, každá po 10 ks zkušebních tělísek s různým nastavením velikosti dotlaku, teploty taveniny a teploty formy. Celkem tedy 600 ks zkušebních tělísek. K měření smrštění byly vybrány poslední tři kusy z každé série, tedy kusy, u nichž je vysoká pravděpodobnost, že cyklus je nejlépe ustálený. U těchto tělísek byly zjištěny rozměry v definovaných bodech, z nichž byly vytvořeny i níže uvedené závislosti velikosti smrštění na jednotlivých vybraných technologických podmínkách.



Obr. 33. Rozměry zkušebního tělíska tl. 1mm, pro určení smrštění



Obr. 34. Rozměry zkušebního tělíska tl. 2 mm, pro určení smrštění

### 9.1.1 Smrštění zkušebních tělísek Hostaform C 13021

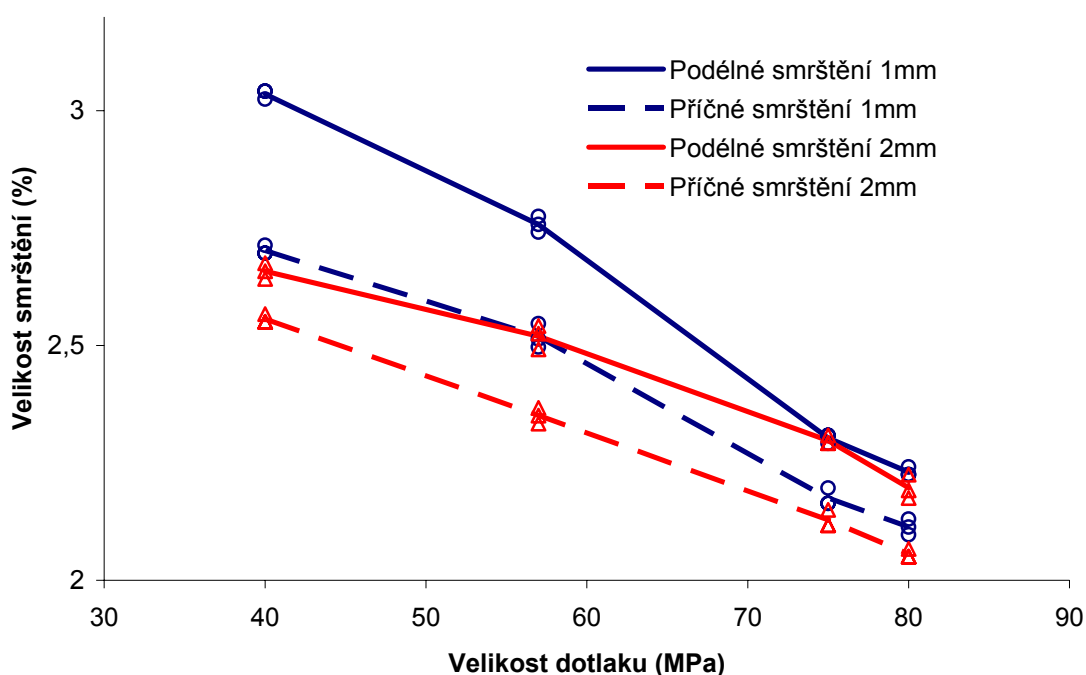
V Tab. 2. je zaznamenán rozsah parametrů, použitých při vstřikování zkušebních tělísek z materiálu *Hostaform C 13021*. Aby bylo možné vyhodnotit vliv jednotlivých parametrů, byl při každém měření změněn vždy jen jeden parametr a sledoval se jeho vliv na podélné a příčné smrštění zkušebních tělísek.

Tab. 2. Rozsah parametrů použitý pro zkušební tělíska *Hostaform C 13021*

| Rozsah parametrů, při kterých byla sledována závislost smrštění vzorků |                |                   |
|------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------|
|                                                                        | Použitý rozsah | Používané hodnoty |
| Teplota formy (°C)                                                     | 55 – 85        | 65                |
| Teplota taveniny (°C)                                                  | 190 – 225      | 215               |
| Dotlak (MPa)                                                           | 40 - 80        | 75                |

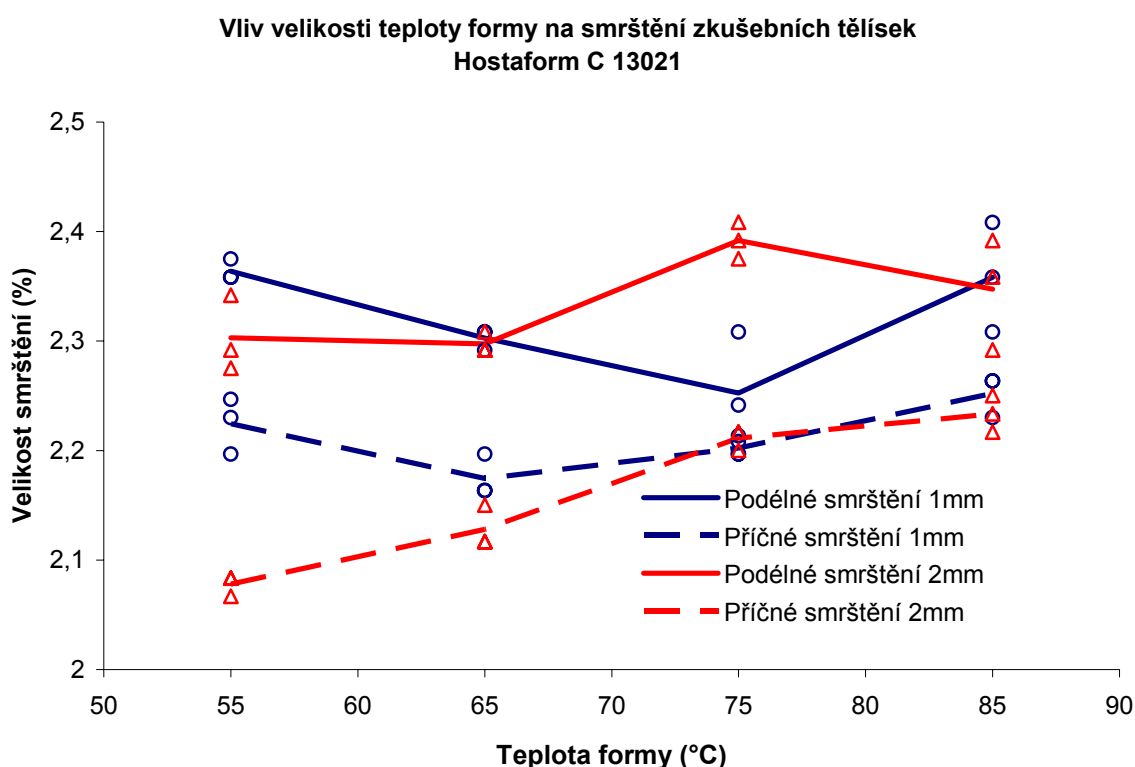
Na Obr. 35. je zachycen vliv velikosti dotlaku na smrštění zkušebních tělísek vyrobených z materiálu *Hostaform C 13021* a to za dotlaků od 40 do 80 MPa. Plná čára reprezentuje spojnice hodnot podélného smrštění tělísek obou tloušťek (1 a 2 mm) a čára přerušovaná se týká smrštění příčného. Tělíska tloušťky 1 a 2 mm jsou odlišena barevně (1 mm – modrá; 2 mm – červená).

Vliv velikosti dotlaku na smrštění zkušebních tělísek  
*Hostaform C 13021*



Obr. 35. Vliv velikosti dotlaku na smrštění zkušebních tělísek materiálu Hostaform C 13021

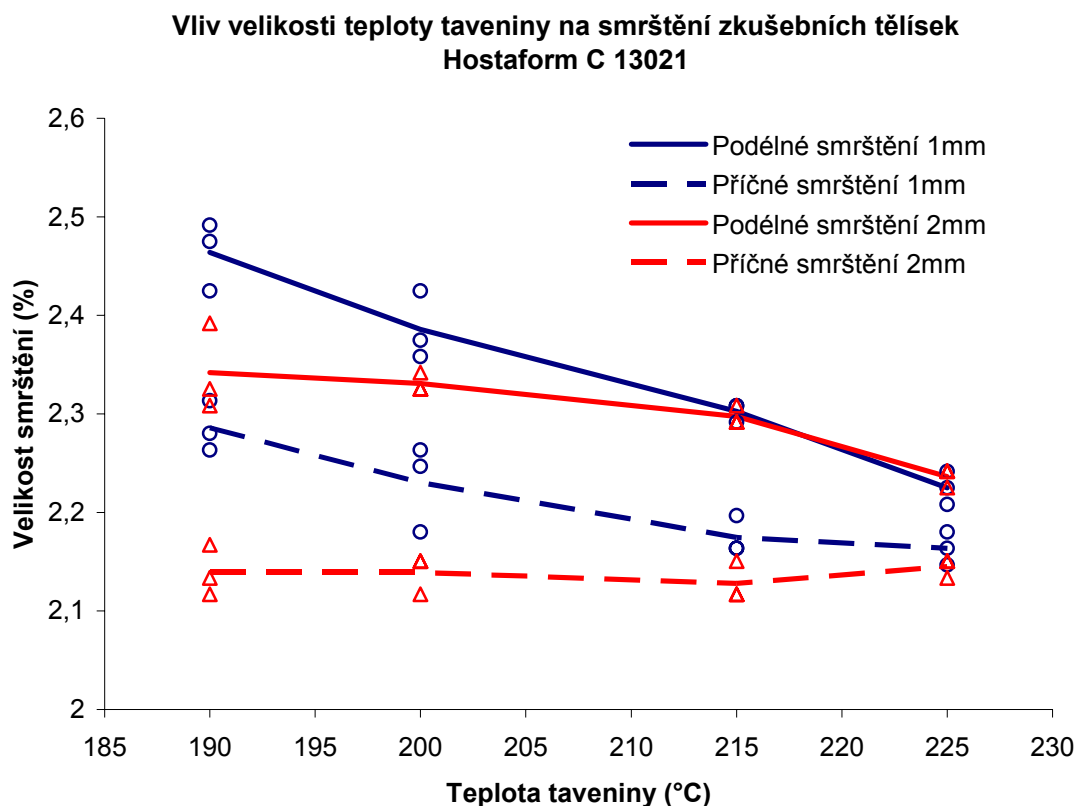
Z grafu je na první pohled patrné, že s rostoucím dotlakem klesá i velikost podélného a příčného smrštění, přičemž se k sobě postupně přibližují hodnoty tělísek s tloušťkou 1 a 2mm. Tělísko s tloušťkou 1mm dosahuje zpočátku výrazně většího smrštění. Při dotlaku 80 MPa jsou hodnoty smrštění u obou tělísek takřka totožné. Podélné smrštění tělíska tloušťky 1mm klesne, při zvýšení dotlaku ze 40 MPa na 80 MPa, z původní hodnoty 3 % na 2,2 %. Rozdíl mezi podélným a příčným smrštěním činí při dotlaku 40 MPa 0,3 % a poklesne na 0,1 % při zvýšení dotlaku na 80 MPa. Podélné smrštění tělíska tloušťky 2mm klesne, při zvýšení dotlaku ze 40 MPa na 80 MPa, z původní hodnoty 2,7 % na 2,2 %. Rozdíl mezi podélným a příčným smrštěním činí při dotlaku 40 MPa 0,1 % a se vzrůstajícím dotlakem se takřka nemění.



Obr. 36. Vliv velikosti teploty formy na smrštění zkušebních tělísek Hostaform C 13021

Na Obr. 36. je zachycen vliv velikosti teploty formy na smrštění zkušebních tělísek z materiálu Hostaform C 13021. Značení jednotlivých spojnic je totožné, jako v předchozím případě. Zatímco se vzrůstajícím dotlakem velikost smrštění klesala, u teploty formy je tomu spíše naopak. Celkový nárůst smrštění nepřekračuje, až na příčné smrštění 2mm tělíska, hodnotu 0,1mm. Je zde však nárůst v oblasti okolo teploty 75°C,

kdy vzorek o tloušťce 2 mm dosahuje maximálního naměřeného smrštění, zatímco vzorek s tloušťkou 1mm zaznamenává při této teplotě minimum smrštění.



Obr. 37. Vliv velikosti teploty taveniny na smrštění zkušebních tělísek Hostaform C 13021

Na Obr. 37. je zachycen vliv velikosti teploty taveniny na smrštění zkušebních tělísek z materiálu *Hostaform C 13021*. Značení jednotlivých spojnic je totožné, jako v předchozích případech. S teplotou taveniny velikost smrštění klesá a to z 2,45 % na 2,25 %, tedy o 0,2 % u podélného smrštění 1mm tělíska. Příčné smrštění je opět nižší a rozdíl mezi příčným a podélným smrštěním se vzrůstající teplotou klesá. U 1mm tělíska tento rozdíl poklesne z původních 0,2 % na 0,05 %. U 2mm tělíska nedochází k tak dramatické změně smrštění, související s teplotou taveniny. Podélné smrštění pozvolna klesá, příčné se v porovnání s 1mm tělískem takřka nemění. Rozdíl mezi podélným a příčným smrštěním činí u 2 mm tělíska 0,2 % a klesne na 0,1 %.

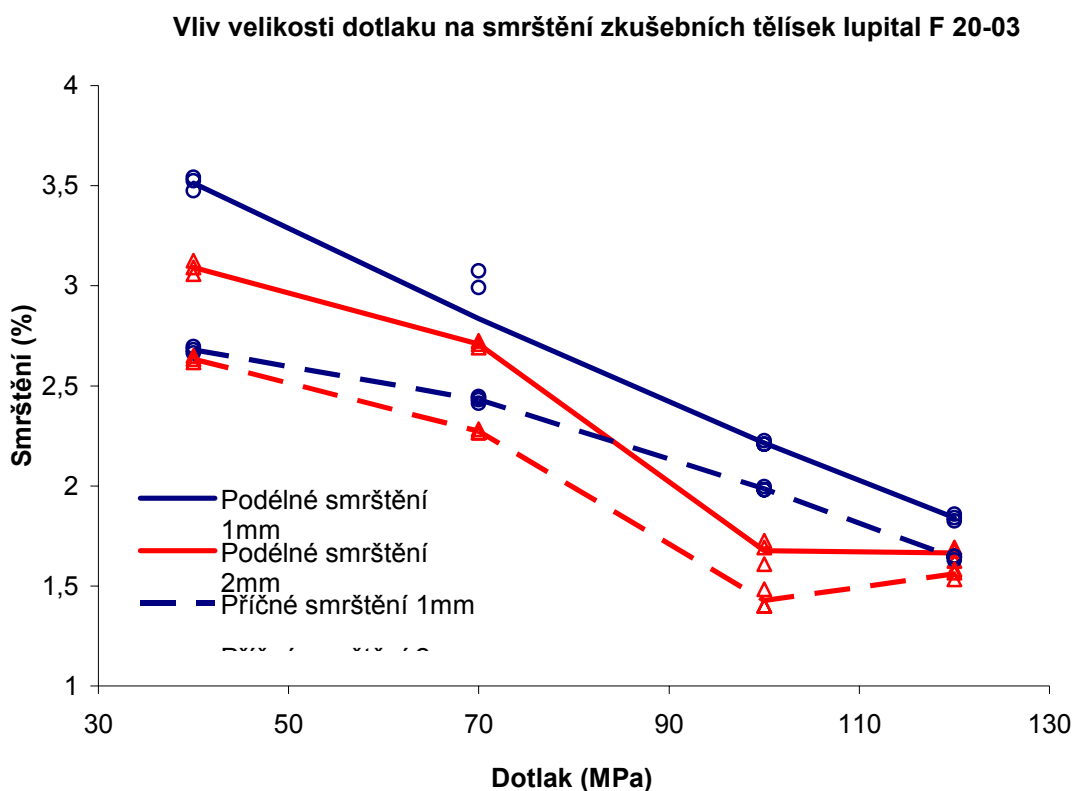
### 9.1.2 Smrštění zkušebních tělísek Iupital F 20-03

V Tab. 3.. je zaznamenán rozsah parametrů, použitých při vstřikování zkušebních tělísek z materiálu *Iupital F 20-03*. Aby bylo možné vyhodnotit vliv jednotlivých parametrů, byl při každém měření změněn vždy jen jeden parametr a sledoval se jeho vliv na podélné a příčné smrštění zkušebních tělísek.

Tab. 3. Rozsah parametrů použitý pro zkušební tělíska Iupital F 20-03

| Rozsah parametrů, při kterých byla sledována závislost smrštění vzorků |                |                   |
|------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------|
|                                                                        | Použitý rozsah | Používané hodnoty |
| Teplota formy (°C)                                                     | 55 – 95        | 80                |
| Teplota taveniny (°C)                                                  | 180 – 210      | 185               |
| Dotlak (MPa)                                                           | 40 - 120       | 100               |

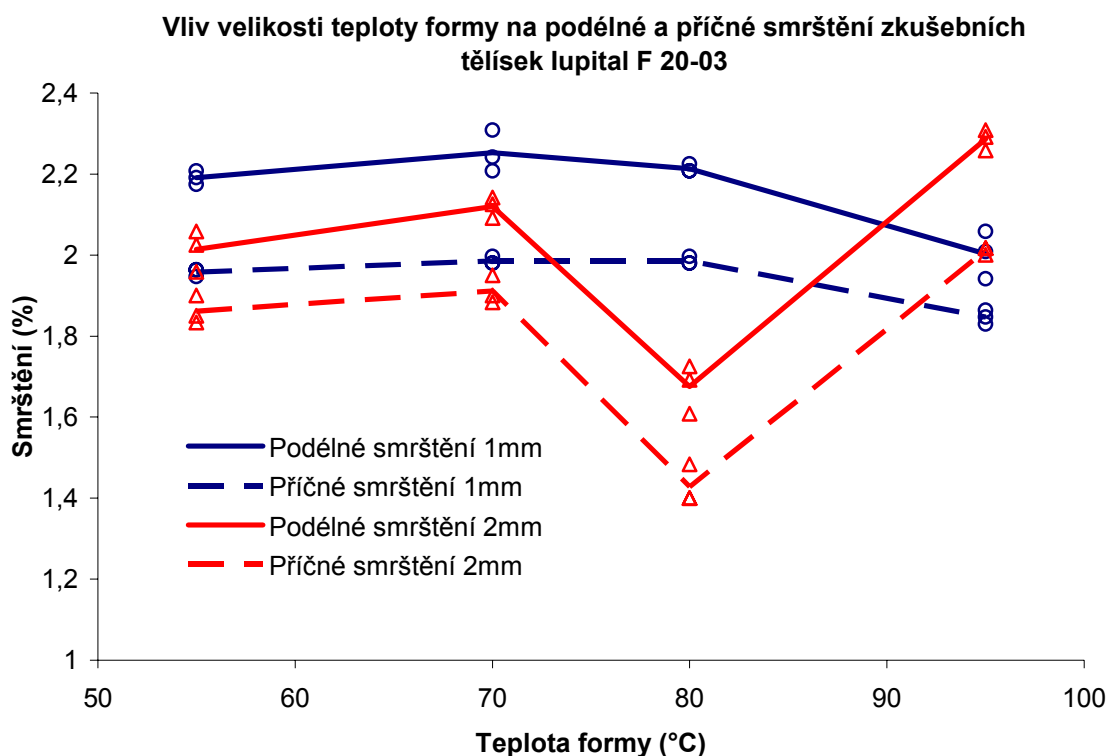
Na Obr. 38. je zachycen vliv velikosti dotlaku na smrštění zkušebních tělísek vyrobených z materiálu *Iupital F 20-03* a to za dotlaků od 40 do 120 MPa. Plná čára reprezentuje spojnice hodnot podélného smrštění tělísek obou tloušťek (1 a 2mm) a čára přerušovaná se týká smrštění příčného. Tělíska tloušťky 1 a 2mm jsou odlišena barevně (1mm – modrá; 2mm – červená).



Obr. 38. Vliv velikosti dotlaku na smrštění zkušebních tělísek Iupital F 20-03

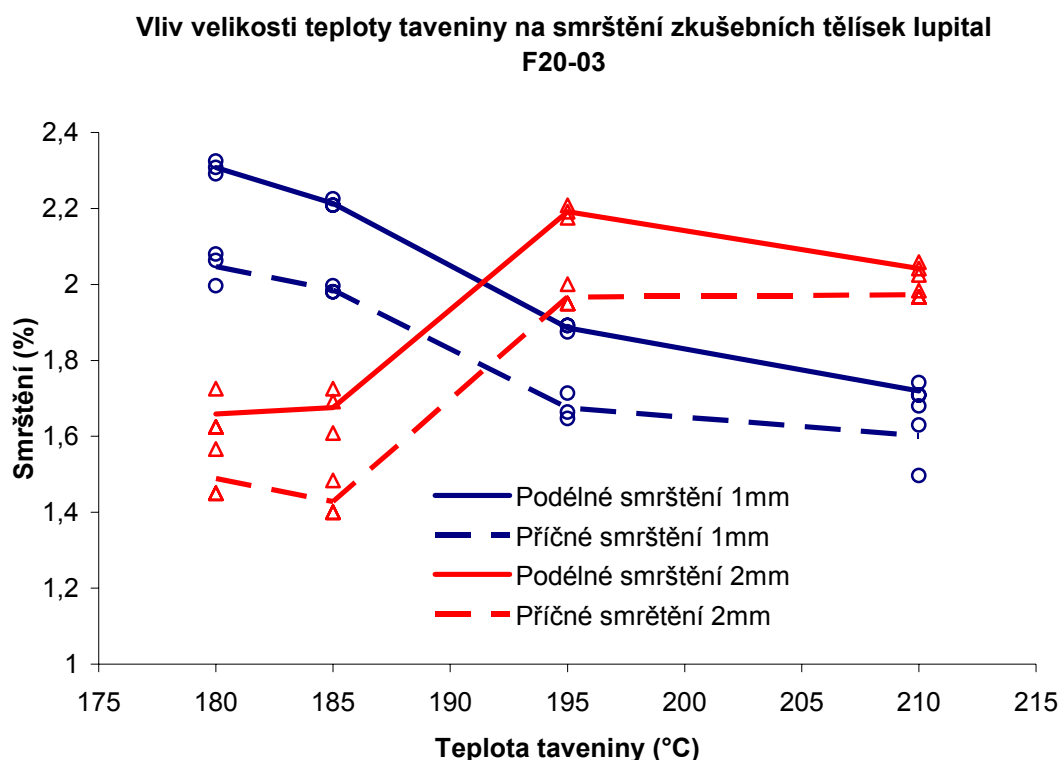
Z grafu Obr. 38. je patrné, že s rostoucím dotlakem klesá i velikost podélného a příčného smrštění, přičemž se k sobě postupně přibližují hodnoty tělísek s tloušťkou 1 a 2mm. Tělíska s tloušťkou 1mm dosahuje zpočátku výrazně většího smrštění. Při dotlaku 120 MPa jsou hodnoty smrštění u obou tělísek nejnižší a nejbližší u sebe. Podélné smrštění tělíska tloušťky 1mm klesne, při zvýšení dotlaku ze 40 MPa na 120 MPa, z původní

hodnoty 3,5 % na 2 %. Rozdíl mezi podélným a příčným smrštěním činí při dotlaku 40 MPa 0,8 % a poklesne na 0,2 % při zvýšení dotlaku na 120 MPa. Podélné smrštění tělíska tloušťky 2mm klesne, při zvýšení dotlaku ze 40 MPa na 120 MPa, z původní hodnoty 3,1 % na 1,6 %. Rozdíl mezi podélným a příčným smrštěním činí při dotlaku 40 MPa 0,7 % a se vzrůstajícím dotlakem klesne až na hodnotu 0,1 %.



Obr. 39. Vliv velikosti teploty formy na podélné a příčné smrštění zkušebních tělísek Iupital F 20-03

Na Obr. 39. je zachycen vliv velikosti teploty formy na smrštění zkušebních tělísek z materiálu Iupital F 20-03. Značení jednotlivých spojnic je totožné, jako v předchozích případech. Rozdíl mezi podélným a příčným smrštěním je se vzrůstající teplotou formy takřka neměnný, ovšem v oblasti teplot kolem 80°C dochází u 2mm tělíska k významnému poklesu smrštění a jeho opětovnému nárůstu. Tento pokles je natolik dramatický, že lze s největší pravděpodobností usuzovat na chybu při nastavení technologických podmínek na stroji, při výrobě vzorků v této sérii. Teoreticky by měla velikost smrštění se vzrůstající teplotou formy mírně vzrůstat. U tělísek o tloušťce 1mm dochází u podélného smrštění k mírnému poklesu a to z 2,2 % na 2 %. Tento trend následuje i příčné smrštění, které klesá z 1,9 % na 1,8 %. Pomineme-li tedy odchylku tělíska tloušťky 2mm, je možno konstatovat nárůst podélného smrštění z 2 % na 2,3 %, který je kopírován i smrštěním příčným, které narůstá z 1,8 % na 2 %.



Obr. 40. Vliv velikosti teploty taveniny na smrštění zkušebních tělísek Iupital F20-03

Na Obr. 40. je zachycen vliv velikosti teploty taveniny na smrštění zkušebních tělísek z materiálu *Iupital F 20-03*. Značení jednotlivých spojnic je totožné, jako v předchozích případech. S teplotou taveniny velikost smrštění tělíska o tloušťce 1mm klesá a to z 2,3 % na 1,75 %, tedy o 0,55 % u podélného smrštění a z 2 % na 1,6 % u příčného smrštění. Příčné smrštění je opět nižší a rozdíl mezi příčným a podélným smrštěním se vzrůstající teplotou klesá. Naopak, u tělíska o tloušťce 2mm dochází k zvětšení smrštění a to u smrštění podélného z 1,65 % na 2 %, s maximální hodnotou při teplotě 195 °C (2,2 %).

### 9.1.3 Smrštění zkušebních tělísek Zytel 70G35HSL RA4

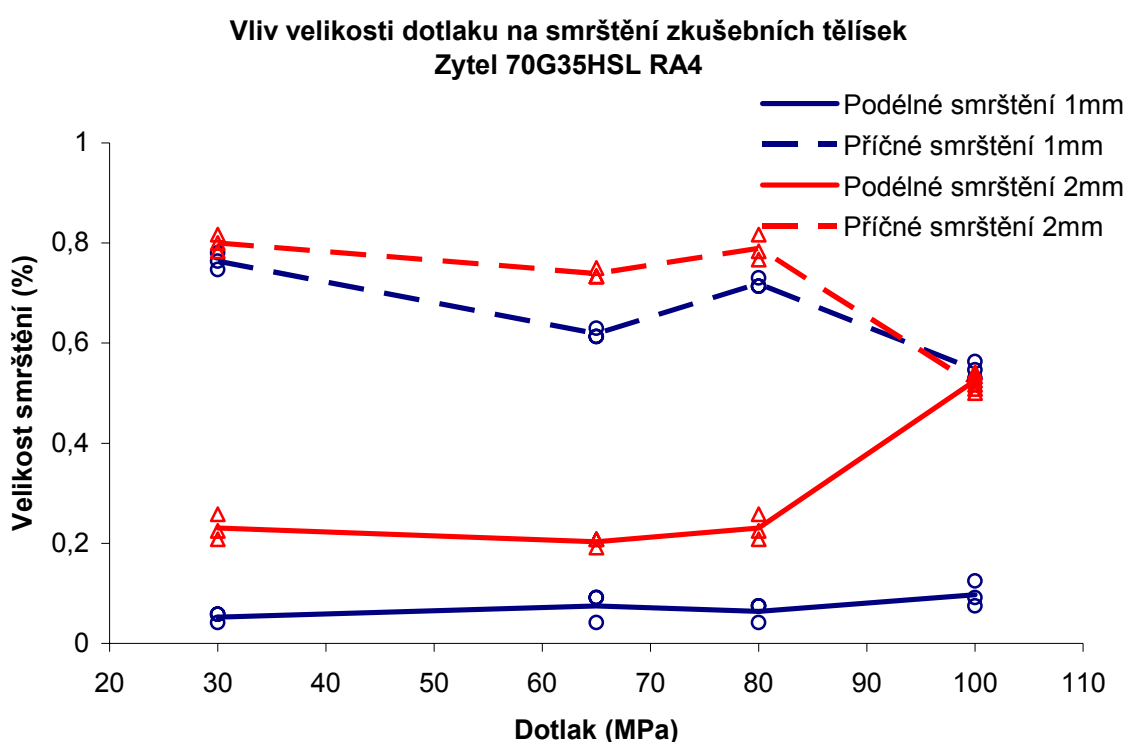
Oproti dvěma předcházejícím materiálům (neplněným POM ) se nyní jedná o skelným vláknem plněný PA66. V Tab. 4. je zaznamenán rozsah parametrů, použitých při vstřikování zkušebních tělísek z materiálu *Zytel 70G35HSL RA4*. Aby bylo možné vyhodnotit vliv jednotlivých parametrů, byl při každém měření změněn vždy jen jeden parametr a sledoval se jeho vliv na podélné a příčné smrštění zkušebních tělísek.

Na Obr. 41. je zachycen vliv velikosti dotlaku na smrštění zkušebních tělísek vyrobených z materiálu *Zytel 70G35HSL RA4* a to za dotlaků od 30 do 100 MPa. Plná čára reprezentuje spojnice hodnot podélného smrštění tělísek obou tloušťek (1 a 2mm) a čára přerušovaná se

týká smrštění příčného. Tělíska tloušťky 1 a 2mm jsou odlišena barevně (1 mm – modrá; 2 mm – červená).

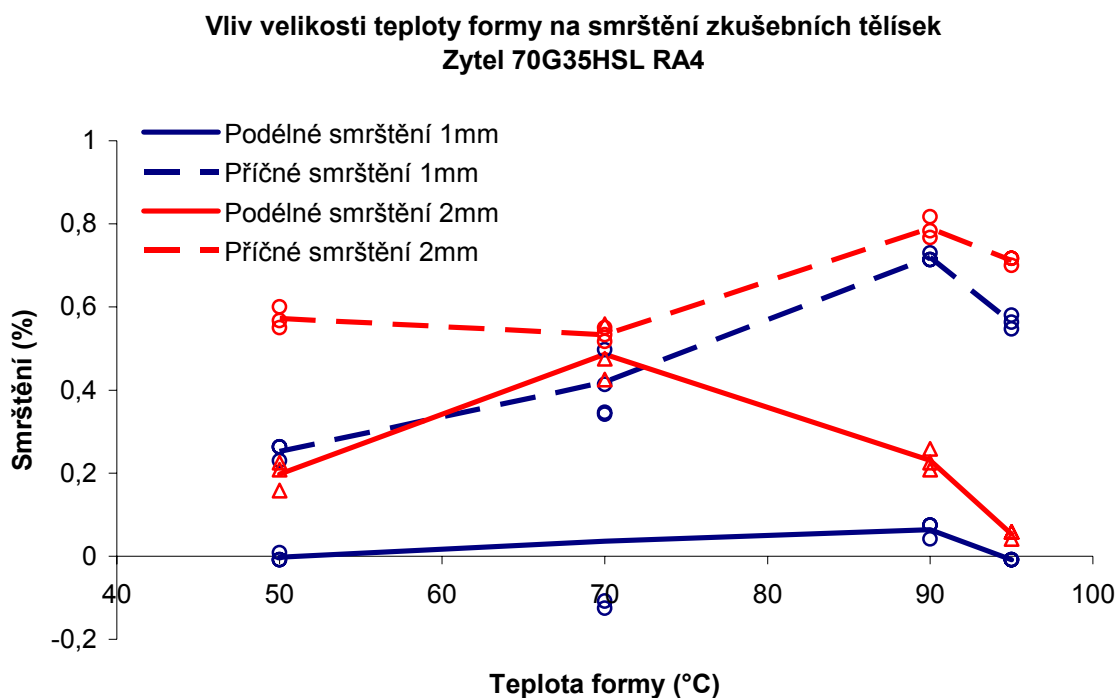
Tab. 4. Rozsah parametrů použitý pro zkušební tělíska Zytel 70G35HSL RA4

| Rozsah parametrů, při kterých byla sledována závislost smrštění vzorků |                |                   |
|------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------|
|                                                                        | Použitý rozsah | Používané hodnoty |
| Teplota formy (°C)                                                     | 50 – 95        | 90                |
| Teplota taveniny (°C)                                                  | 280 – 320      | 295               |
| Dotlak (MPa)                                                           | 30 - 100       | 80                |



Obr. 41. Vliv velikosti dotlaku na smrštění zkušebních tělísek Zytel 70G35HSL RA4

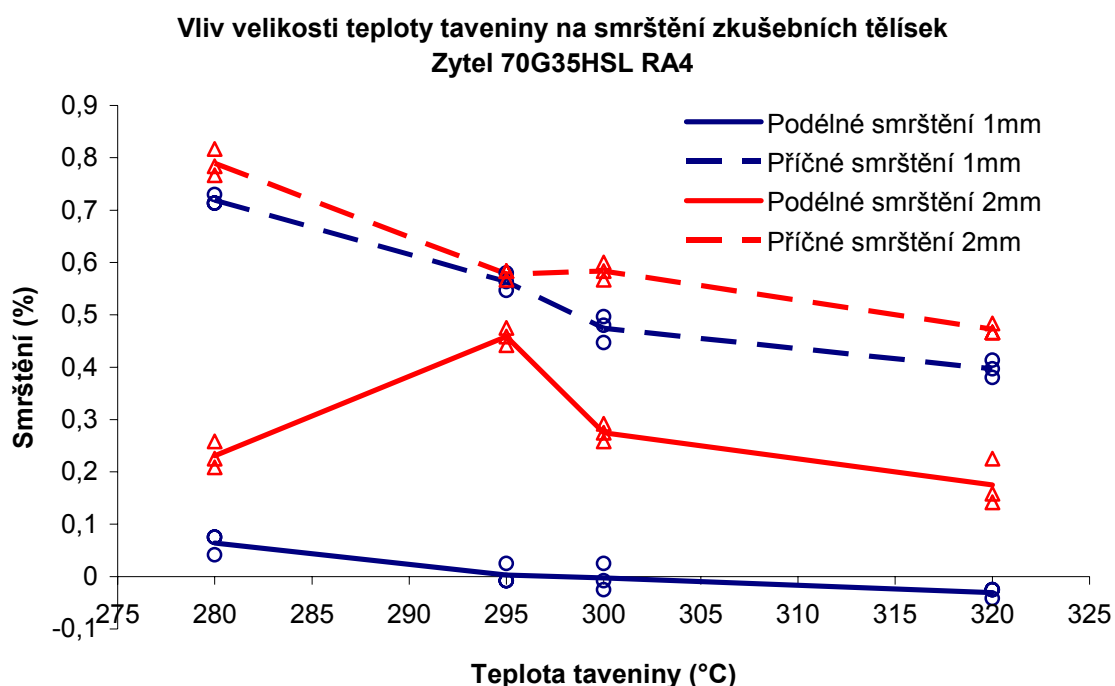
Na Obr. 41. je zaznamenáno naměřené smrštění zkušebních tělísek z materiálu Zytel 70G35HSL RA4 v závislosti na velikosti dotlaku. Již na první pohled je patrné, že smrštění tohoto plněného materiálu je výrazně nižší, než u předcházejících POM. Zásadním rozdílem je také to, že příčné smrštění nabývá vyšších hodnot, než podélné a to díky plnění krátkým skelným vláknem. Příčné smrštění tělísek obou tloušťek se vzrůstajícím dotlakem klesá a to z hodnoty 0,8 % na 0,5 %. Podélné smrštění tělíska o tloušťce 1 mm mírně narůstá z hodnoty 0,05 % na hodnotu 0,09 % a tělíska o tloušťce 2mm narůstá z hodnoty 0,22 % na 0,5 %. U tohoto materiálu je tedy zaznamenáno větší podélné i příčné smrštění u 2mm tělíska, než u 1mm tělíska.



Obr. 42. Vliv velikosti teploty formy na smrštění zkušebních tělísek Zytel 70G35HSL RA4

Na Obr. 42. je zachycen průběh smrštění tělísek z materiálu Zytel 70G35HSL RA4 v závislosti na teplotě formy. Zatímco příčné smrštění tělísek obou tloušťek roste společně s teplotou formy, podélné smrštění 2mm tělíska nabývá vrcholu při teplotě formy 70°C a pak klesá takřka až na nulovou hodnotu. Podélné smrštění 1mm tělíska je výrazně menší a při teplotě formy 95°C dosahuje dokonce 0 hodnoty, stejně jako při teplotě 50°C. Všechny průběhy mají společné to, že od teploty formy 90°C klesají, respektive klesá hodnota smrštění všech tělísek. Všechny hodnoty smrštění se pohybují pod hranicí 0,8 %.

Na Obr. 43. jsou zaznamenány průběhy velikosti smrštění zkušebních tělísek z materiálu Zytel 70G35HSL RA4 v závislosti na teplotě taveniny. Z grafu je zřejmé, že s rostoucí teplotou taveniny klesá velikost smrštění všech tělísek. Podélné smrštění je opět větší, než smrštění příčné a klesá z hodnot kolem 0,75 % k 0,45 %, přičemž větší smrštění zaznamenává tělísko o tloušťce 2mm. Podélné smrštění 2mm tělíska nabývá maxima při teplotě taveniny 295°C (0,46 %) a klesá až na 0,8 % při teplotě 320°C. Při vyhodnocování podélného smrštění tělíska o tloušťce 1mm již nelze hovořit o smrštění, ale nárůstu. Smrštění totiž při teplotě 320°C dosahuje záporné hodnoty (-0,02 %).



Obr. 43. Vliv velikosti teploty taveniny na smrštění zkušebních tělísek  
Zytel 70G35HSL RA4

#### 9.1.4 Smrštění zkušebních tělísek o tloušťce 1 mm

Aby byl vzájemný poměr mezi jednotlivými vzorky lépe patrný, je na Obr. 44. zaznamenán vliv velikosti dotlaku na všechna zkušební tělíska o tloušťce 1 mm. Již při prvním pohledu je zřejmý rozdíl mezi vzorky z POM (červené a modré spojnice bodů) a vzorku z PA66 (černé spojnice bodů). Pokles smrštění je způsoben zvýšením objemu polymeru v dutině formy, vlivem vyššího dotlaku.

Skelným vláknem plněný *PA66 Zytel 70G35HSL RA4* má oproti oběma POM výrazně nižší hodnoty podélného i příčného smrštění a i velikost dotlaku má na tyto hodnoty výrazně menší vliv. Rozdíl je i v poměru podélného a příčného smrštění. Zatímco u POM nabývá podélné smrštění vyšších hodnot, než smrštění příčné, u plněného PA66 je tomu naopak. Anizotropní smrštění, vláknem vyztužených polymerů, je způsobeno orientací vláken, během plnění dutiny formy. Na rozdíl od molekul polymeru, nemají vlákna tendenci reorientovat se při chladnutí, tedy relaxovat. Pokud materiál obsahuje krátká skelná vlákna, nebo další vyztužující vlákna, jejich orientace bude předurčena tokovým profilem. Blízko povrchu jsou vlákna orientována dominantně ve směru toku, zatímco

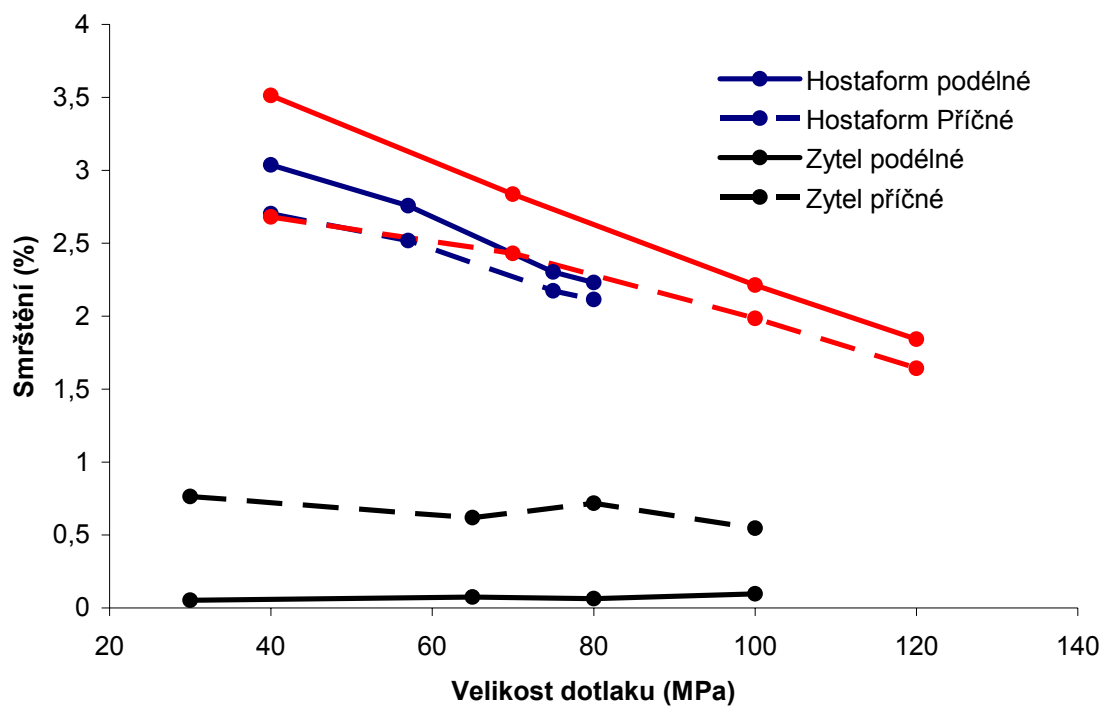
uprostřed stěny je orientace náhodná. Orientace, jaká je vláknům přidělena během plnění, zůstává stejná i po ochlazení výstřiku, vlákna v matrici takzvaně „zamrznou“. Čím větší je orientace těchto vláken, tím větší je rozdíl mezi smrštěním v podélném a příčném směru.

Rozdíl mezi podélným a příčným smrštěním u POM je způsoben tím, že jak tavenina ve formě teče, statistická klubka do kterých jsou jednotlivé řetězce zformovány, mění postupně svůj tvar ze sférického na eliptický. Tento výsledný elipsoid může mít mnohonásobně větší délku, oproti výšce, což má za následek téměř totální narovnání molekulových řetězců. Takto narovnané řetězce mají pak tendenci se zkracovat, čímž vzniká následné větší podélné smrštění. Vzorek *Iupital F 20-03* dosahuje v intervalu velikosti dotlaku 40 – 80 MPa vyšších hodnot smrštění, než materiál *Hostaform C13021*.

Na Obr. 45. je zachycen vliv velikosti teploty formy na zkušební tělíska tloušťky 1mm a i zde je na první pohled zřejmý rozdíl mezi vzorky z POM (červené a modré spojnice bodů) a vzorku z PA66 (černé spojnice bodů). Skelným vláknem plněný *PA66 Zytel 70G35HSL RA4* má, stejně jako v předchozím případě, oproti oběma POM výrazně nižší hodnoty podélného i příčného smrštění. Se vzrůstající teplotou formy by dle teoretických předpokladů mělo smrštění mírně vzrůstat, což se v případě materiálu *Zytel 70G35HSL RA4* také děje, resp. děje se tak do teploty formy 90°C. U materiálu *Iupital F 20-03* dochází se vzrůstající teplotou formy, jak u podélného, tak příčného smrštění k jeho poklesu.

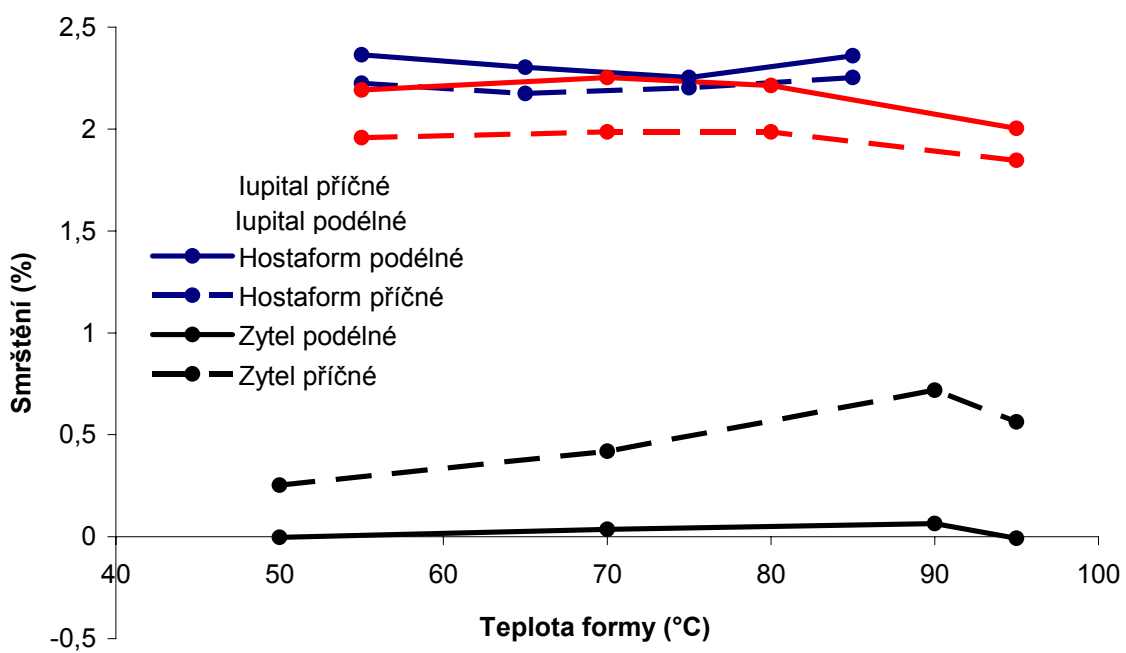
Na Obr. 46. je zachycen vliv velikosti teploty taveniny na smrštění zkušebních tělísek o tloušťce 1mm. U všech použitých materiálů se v měřeném intervalu, smrštění se vzrůstající teplotou taveniny snižuje. Čím menší je rozsah teplot, mezi roztaveným plastem vstupujícím do formy a pokojovou teplotou, tím menší je teplotní kontrakce a tím méně času je pro krystalizaci.

### Vliv velikosti dotlaku na smrštění zkušebních tělísek 1mm



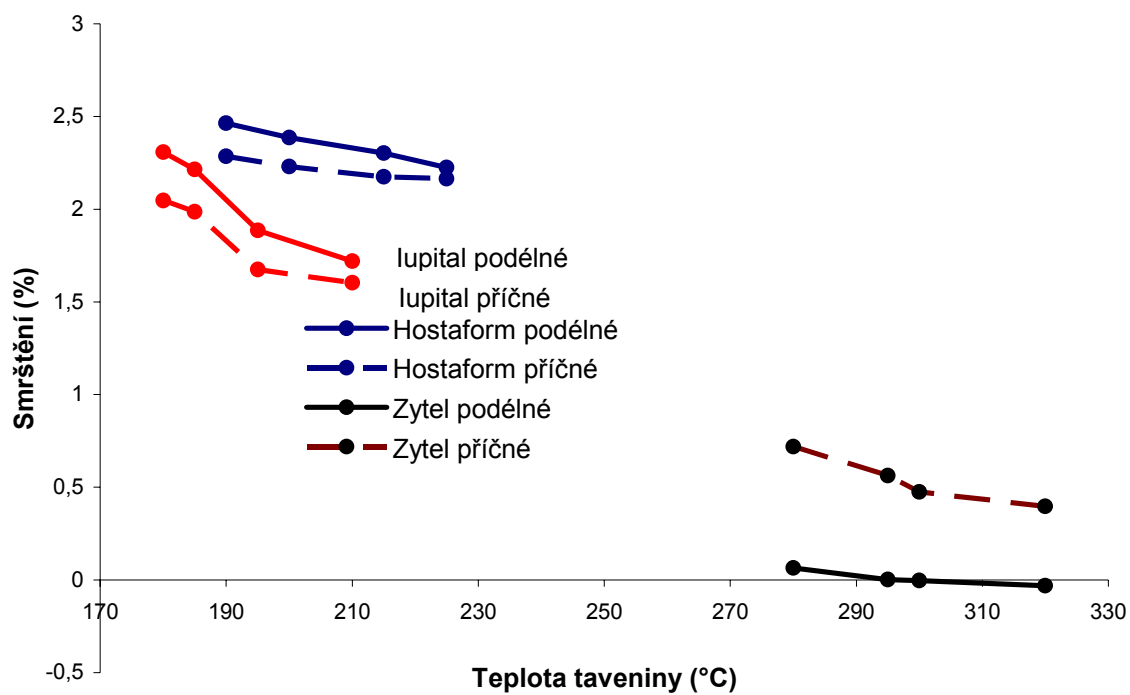
Obr. 44. Vliv velikosti dotlaku na smrštění zkušebních tělísek 1 mm

### Vliv velikosti teploty formy na smrštění zkušebních tělísek 1mm



Obr. 45. Vliv velikosti teploty formy na smrštění zkušebních tělísek 1mm

## Vliv velikosti teploty taveniny na smrštění zkušebních tělísek 1mm



Obr. 46. Vliv velikosti teploty taveniny na smrštění zkušebních tělísek 1 mm

## 10 Výrobky

### 10.1 Výrobek A

Bylo vyrobeno 10 sérií po 10 ks vzorků *A* (Obr. 47), celkem tedy 100 ks výrobku *A*. Vzorky byly vyrobeny na stroji *ENGEL ES 750/150 HL*, jehož technické parametry jsou uvedeny v Tab. 5.. K výrobě vzorku *A* bylo použito materiálu *Hostaform C 13021*, jehož vlastnosti jsou uvedeny v kapitole „Vlastnosti materiálu POM“.



Obr. 47. 3D model výrobku *A*

Tab. 5. Technická data stroje *ENGEL VICTORY 750/150*

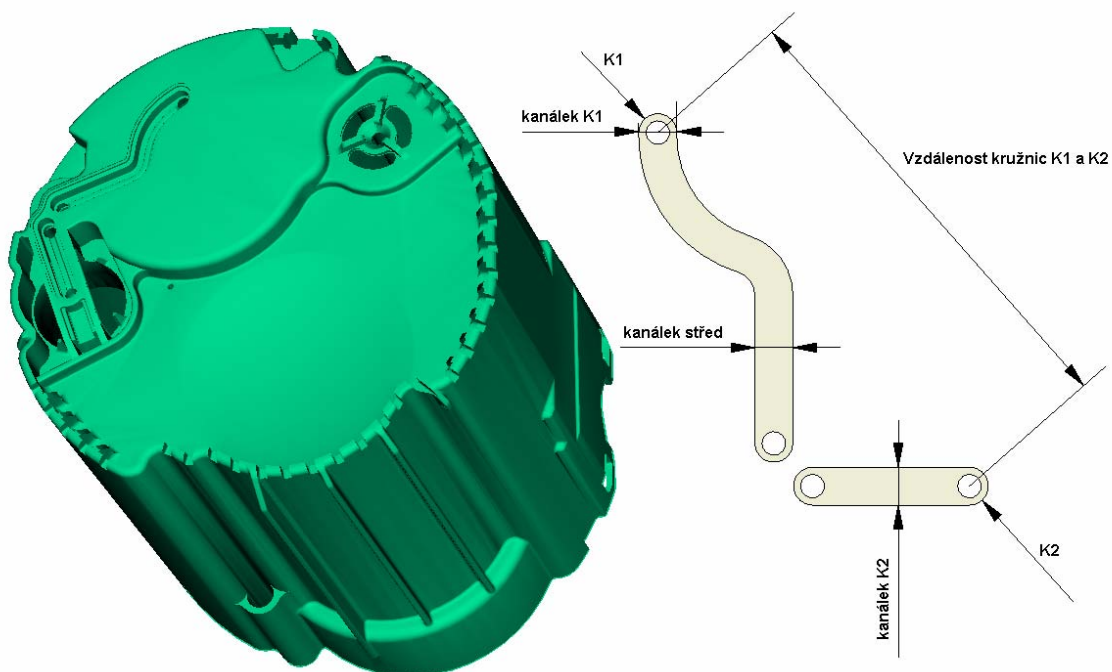
| Mezinárodní označení velikosti                      | 1500 – 750         |      |          |      |
|-----------------------------------------------------|--------------------|------|----------|------|
| Vstřikovací jednotka                                |                    |      |          |      |
| Průměr šneku                                        | mm                 | 45   | 50       | 55   |
| Délka šneku                                         | L/D                |      | 24       |      |
| Maximální objem zdvihu                              | cm <sup>3</sup>    | 318  | 392      | 475  |
| Max. hmotnost výlisku, vztaženo na PS (Euromap 19)  | g                  | 292  | 360      | 437  |
| Zdvih dávkování                                     | mm                 |      | 200      |      |
| Otáčky šneku max.                                   | min <sup>-1</sup>  |      | 230      |      |
| Plastifikační proud měřeno pro PS podle norem ENGEL | g/s                | 24   | 33       | 43   |
| Vstřikované množství teoretické hodnoty             | cm <sup>3</sup> /s | 230  | 284      | 343  |
| Specifický vstřikovací tlak                         | bar                | 1760 | 1430     | 1180 |
| Zvýšený specifický vstřikovací tlak                 | bar                | 2360 | 1910     | 1580 |
| Zdvih agregátu × přídržná síla trysky               | mm × kN            |      | 350 × 67 |      |
| Instalovaný příkon topení plastifikačního válce     | kW                 | 13,3 | 15,3     | 16,3 |
| Počet topných pásů                                  |                    |      | 5        |      |
| Uzavírací jednotka                                  |                    |      |          |      |
| Uzavírací síla                                      | kN                 |      | 1500     |      |
| Dráha otevření lisovacího nástroje                  | mm                 |      | 600      |      |

Tab. 6. Proměnné technologické podmínky vzorku A

| Rozsah parametrů, při kterých byla sledována závislost smrštění vzorků |                |                   |
|------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------|
|                                                                        | Použitý rozsah | Používané hodnoty |
| Teplota formy (°C)                                                     | 55 – 85        | 65                |
| Teplota taveniny (°C)                                                  | 190 – 225      | 215               |
| Dotlak (MPa)                                                           | 40 - 80        | 75                |

Protože nebylo možné provést měření reálných rozměrů dutiny formy, není v závislostech uváděno procentuelní smrštění výstřiku, ale všechny naměřené rozměry jsou vztahovány k rozměrům výstřiku vyrobeného za standardních podmínek, které při jeho výrobě používá firma Robert BOSCH v Českých Budějovicích. Tedy, o kolik se daný rozměr změnil, při určité změně technologických podmínek.

Celý experiment je zaměřen na problematickou lokalitu kanálku, který je v operaci následující po vstřikování, vysokofrekvenčně zavařen s protikusem a je od něj vyžadována těsnost.



Obr. 48. Měřené rozměry kanálku A



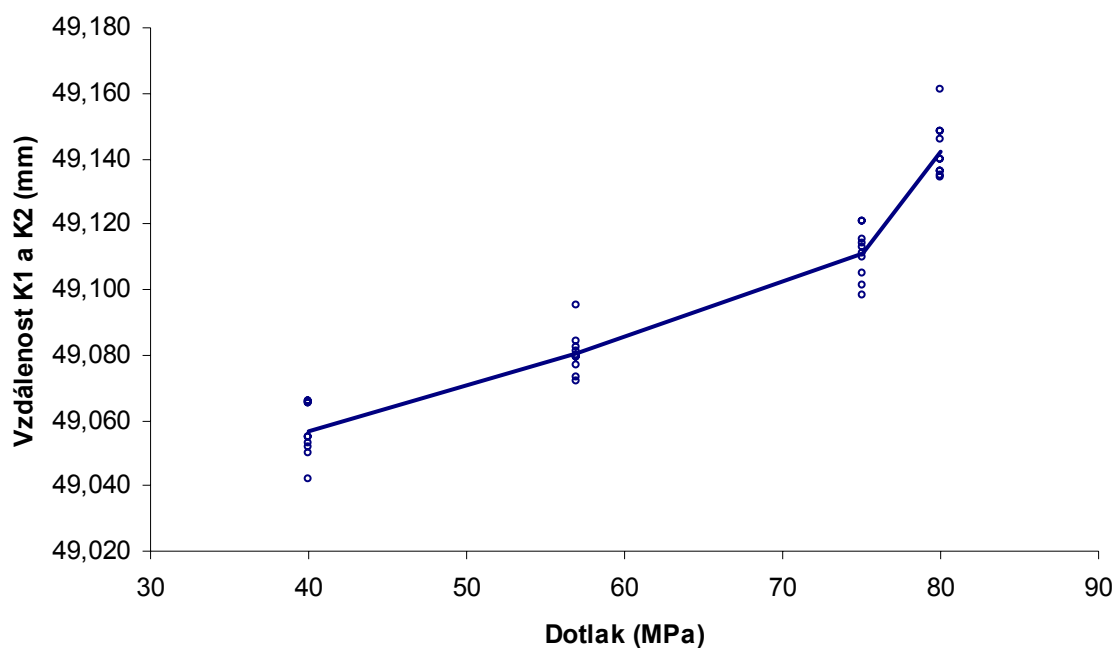
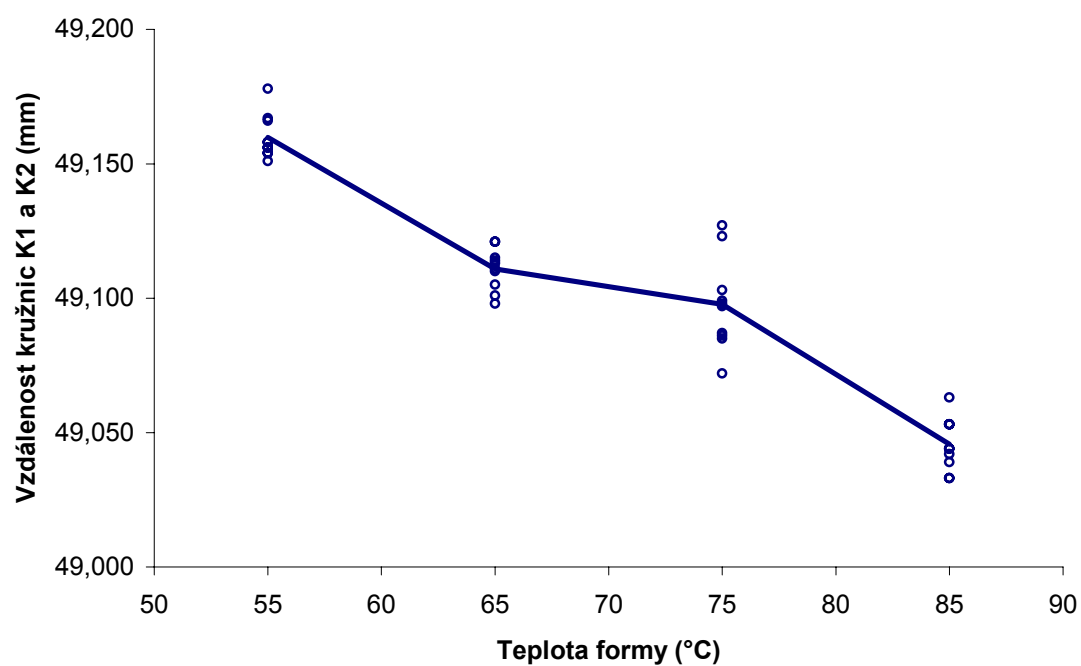
Obr. 49. Měřicí přístroj MAHR VISION MS 222

Dle naměřených hodnot byly vytvořeny grafy závislosti velikosti smrštění definovaných bodů na kanálcích tělesa modulu. K měření bylo použito optického přístroje *MAHR VISION MS 222* (Obr. 49). Výroba vzorků proběhl dne 3.9.2004, první měření proběhlo 5.9.2004. Z těchto změřených vzorků bylo uchováno po jednom kusu z každé série (poslední kus v sérii) pro ověření dlouhodobé rozměrové stability. Toto poslední měření bylo provedeno po 6 měsících. Po každém měření rozměrů bylo provedeno i vážení vzorků.

#### 10.1.1 Vzdálenost kružnic K1 a K2

Dominantním rozměrem celého kanálku je vzdálenost mezi virtuálními kružnicemi K1 a K2. Na Obr. 50. je zobrazena závislost velikosti dotlaku na vzdálenost kružnic K1 a K2. Se vzrůstajícím dotlakem vzrůstá i tato vzdálenost a to ze 49,05 mm při dotlaku 40 MPa na 49,14 mm při dotlaku 80 MPa, tedy celkem o 0,09 mm. Dochází tedy ke snížení smrštění, tak jak předpokládá teorie.

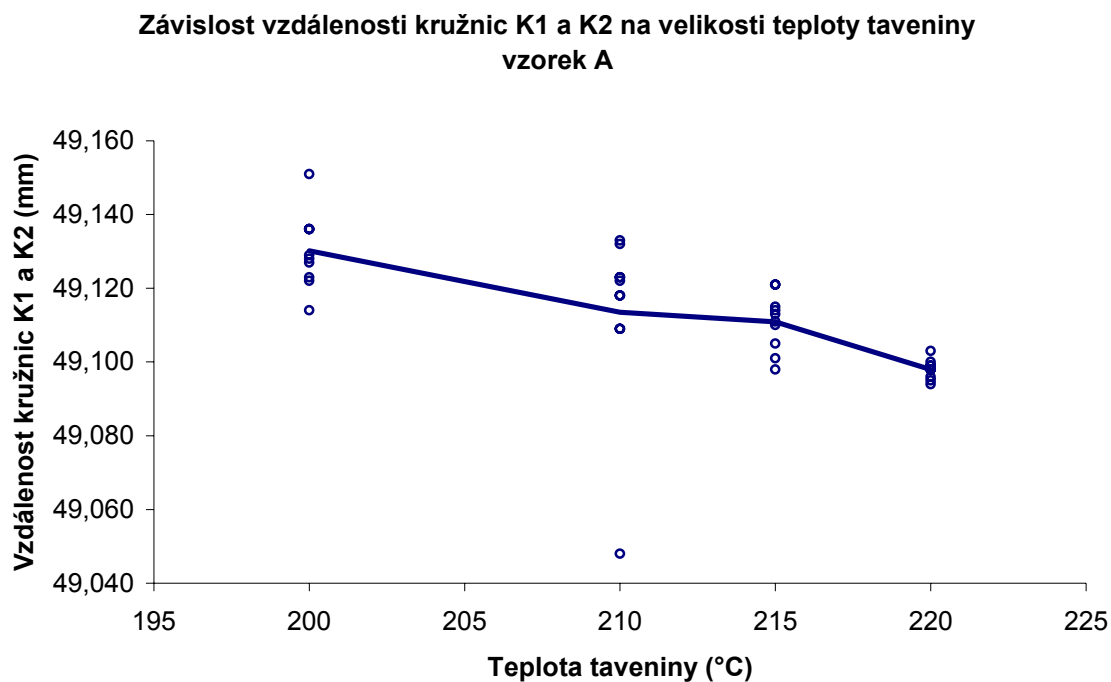
Na Obr. 51. je zaznamenána závislost změny vzdálenosti kružnic K1 a K2 na teplotě formy, která se pohybuje od 55°C do 85°C. Tato vzdálenost se vzrůstající teplotou formy klesá a to z hodnoty 49,16 mm na 49,04 mm, tedy smrštění naroste o 0,1 mm. I tento průběh odpovídá teoretickým předpokladům.

**Závislost vzdálenosti kružnic K1 a K2 na velikosti dotlaku - vzorek A***Obr. 50. Závislost vzdálenosti kružnic K1 a K2 na velikosti dotlaku u vzorku A***Závislost vzdálenosti kružnic K1 a K2 na velikosti teploty formy vzorek A***Obr. 51. Závislost vzdálenosti kružnic K1 a K2 na velikosti teploty formy u vzorku A*

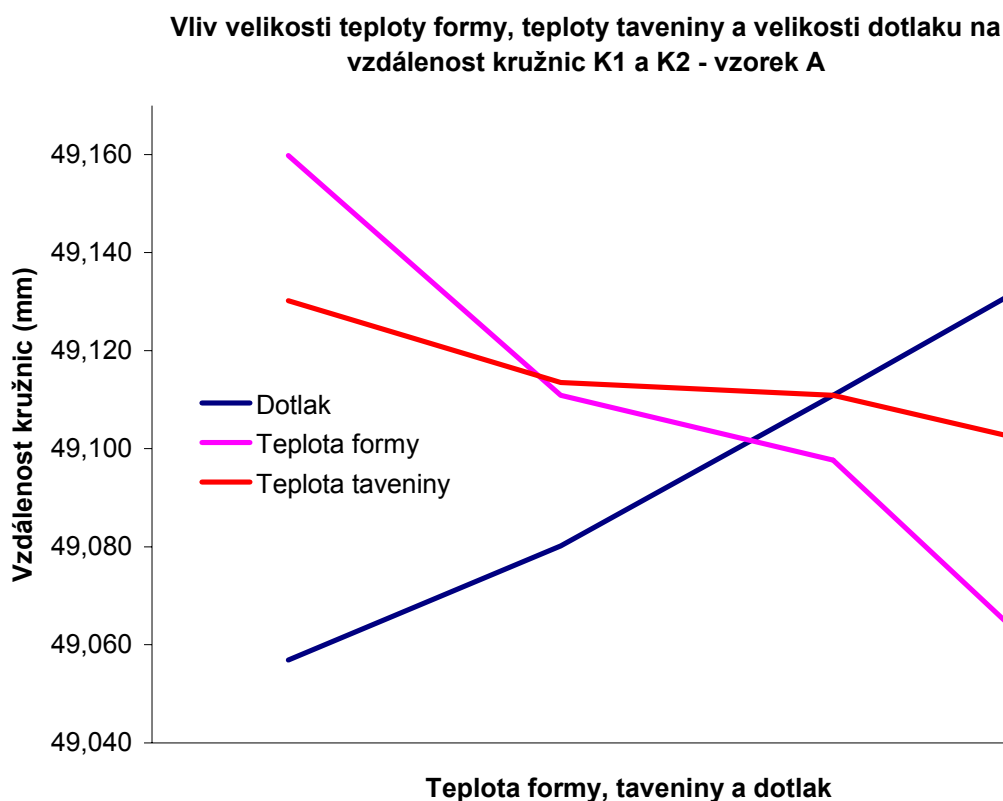
Na Obr. 52. je zaznamenán vliv velikosti teploty taveniny, na vzdálenost kružnic K1 a K2. S teplotou taveniny tato vzdálenost klesá a to z hodnoty 49,13 mm na 49,1 mm. Smrštění tedy vzroste o 0,03 mm.

Na Obr. 53. jsou shrnuty výše uvedené grafy vlivu velikosti teploty formy, teploty taveniny a velikosti dotlaku na vzdálenost kružnic K1 a K2 u vzorku A.

Z naměřených hodnot vyplývá, že největší podíl na velikosti smrštění má teplota formy a velikost dotlaku. S rostoucí teplotou formy i materiálu dochází ke zmenšení vzdálenosti středů kružnic K1 a K2, s rostoucí hodnotou dotlaku tato vzdálenost naopak vzrůstá. Maximální rozdíl rozměrů, tedy vzdálenosti středů obou kružnic, činí při změně teploty formy z 55 na 85 °C až 0,1mm.



Obr. 52. Závislost vzdálenosti kružnic K1 a K2 na velikosti teploty formy u vzorku A



Obr. 53. Vliv velikosti teploty formy, teploty taveniny a velikosti dotlaku, na vzdálenost kružnic K1 a K2 u vzorku A

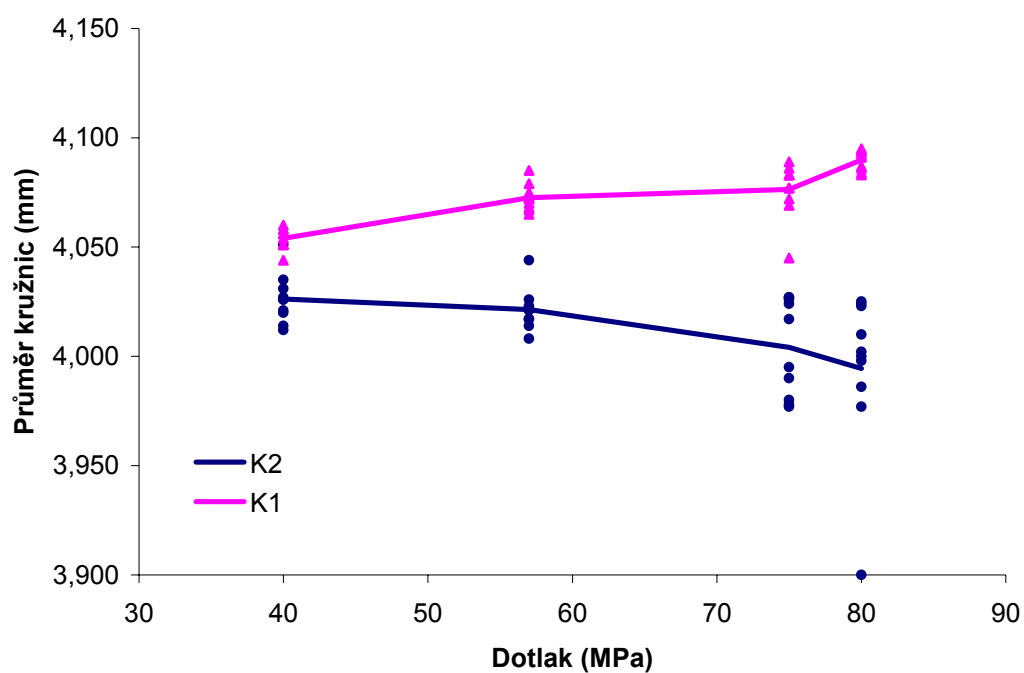
### 10.1.2 Průměry kružnic K1 a K2

Na Obr. 54. je zobrazen průběh závislosti změny průměru kružnic K1 a K2 na velikosti dotlaku, u vzorku A. Kružnice K1 se chová tak jak předpokládá teorie, tedy její smrštění se s rostoucím dotlakem snižuje a to z hodnoty 4,05 mm při dotlaku 40 MPa na 4,09 mm při dotlaku 80 MPa. Kružnice K2 se ale chová naprosto opačně a její smrštění se vzrůstajícím tlakem také roste.

Na Obr. 55. je zachycena závislost velikosti průměru kružnic K1 a K2 na teplotě formy. Zatímco průměr kružnice K1 se s teplotou formy takřka nemění, průměr kružnice K2 s rostoucí teplotou mírně klesá, tedy její smrštění se zvětšuje.

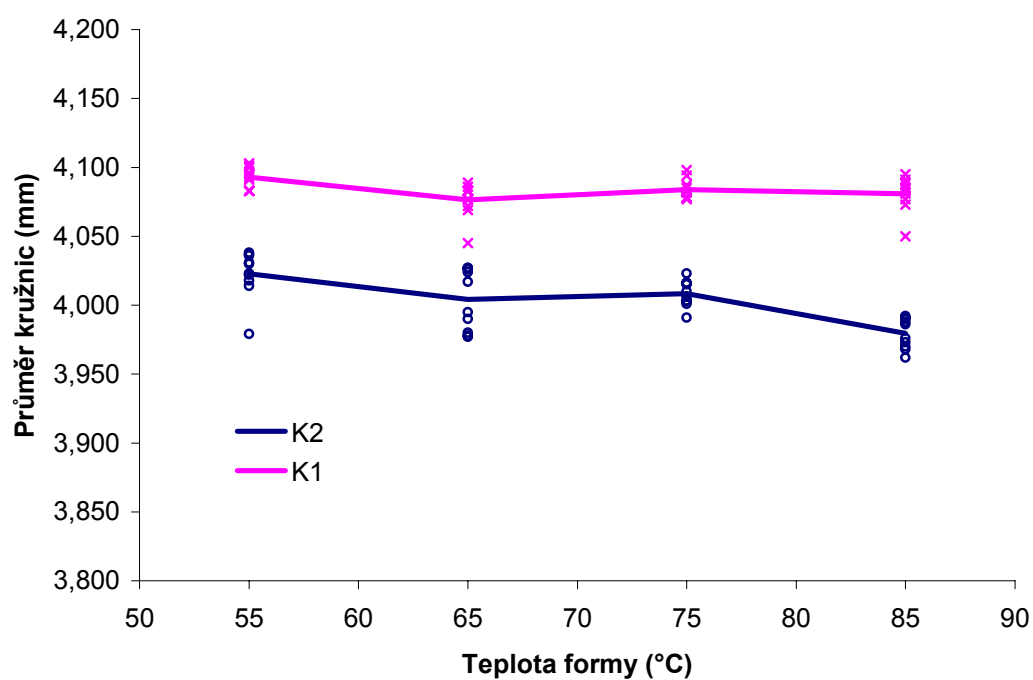
Na Obr. 56. je zachycena závislost průměru kružnic K1 a K2 na teplotě taveniny. Oba průměry se s teplotou mění jen nepatrně.

Závislost průměru kružnic K1 a K2 na velikosti dotlaku - vzorek A



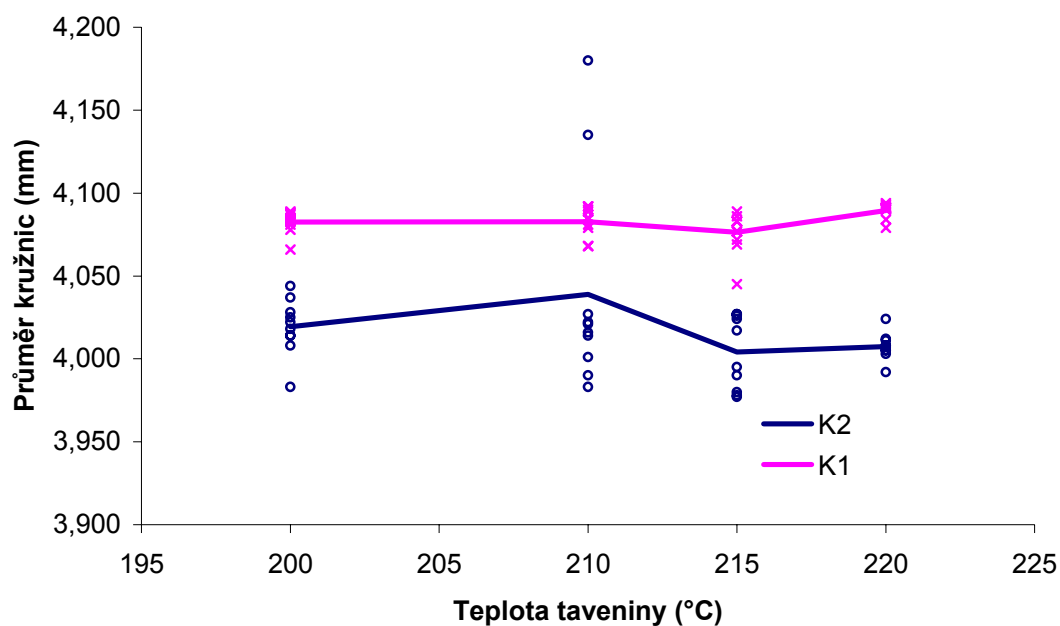
Obr. 54. Závislost průměru kružnic K1 a K2 na velikosti dotlaku u vzorku A

Závislost průměru kružnic K1 a K2 na teplotě formy - vzorek A



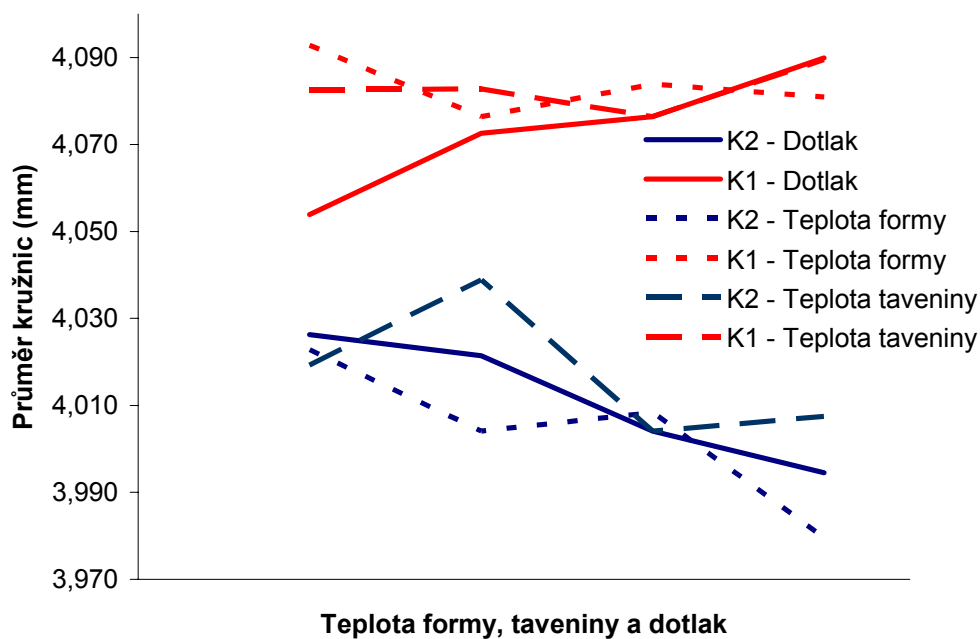
Obr. 55. Závislost průměru kružnic K1 a K2 na teplotě formy u vzorku A

**Závislost průměru kružnic K1 a K2 na velikosti teploty taveniny - vzorek A**



Obr. 56. Závislost průměru kružnic K1 a K2 na velikosti teploty taveniny u vzorku A

**Vliv velikosti teploty formy, teploty taveniny a velikosti dotlaku na průměr kružnic K1 a K2 - vzorek A**



Obr. 57. Vliv velikosti teploty formy, teploty taveniny a velikosti dotlaku, na průměr kružnic K1 a K2 u vzorku A

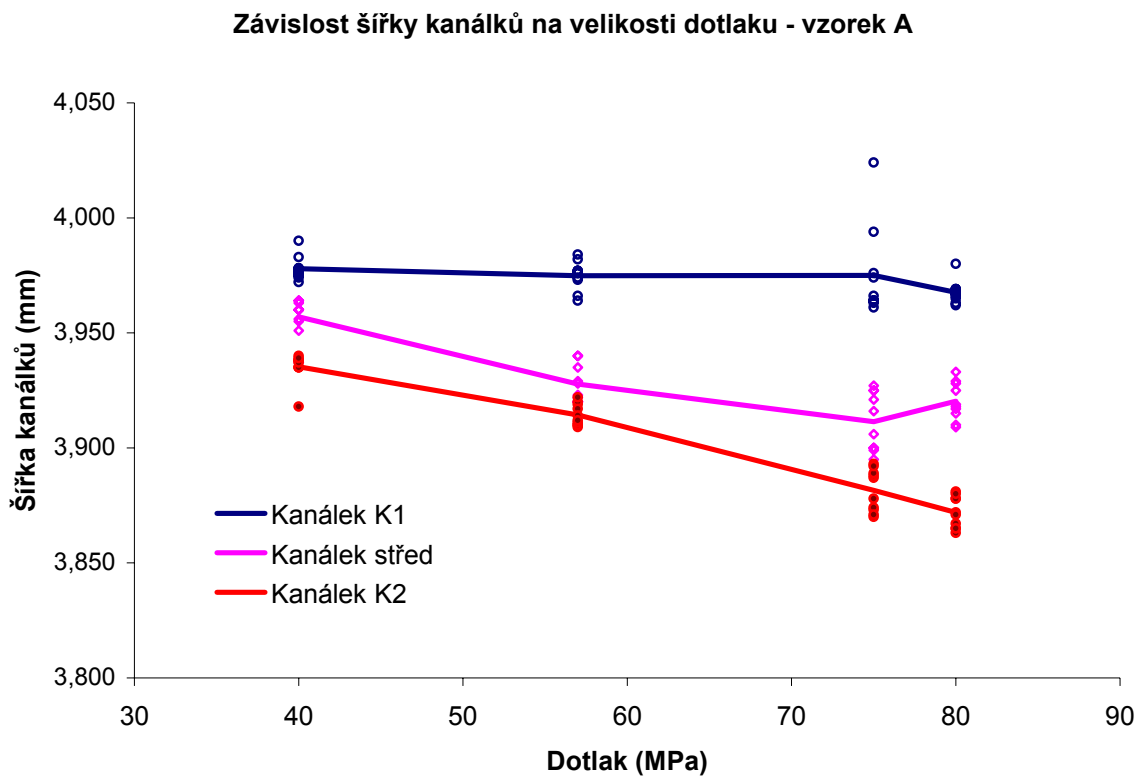
Na Obr. 57. je shrnut vliv velikosti teploty taveniny, teploty formy a velikosti dotlaku na průměr kružnic *K1* a *K2*.

### 10.1.3 Šířky kanálků

Na Obr. 58. je zachycena závislost šířky kanálků na velikosti dotlaku. Šířky všech kanálků se vzrůstajícím dotlakem klesají. Vliv dotlaku se nejvíce projeví na šířku *kanálku K2* a *Kanálku střed*.

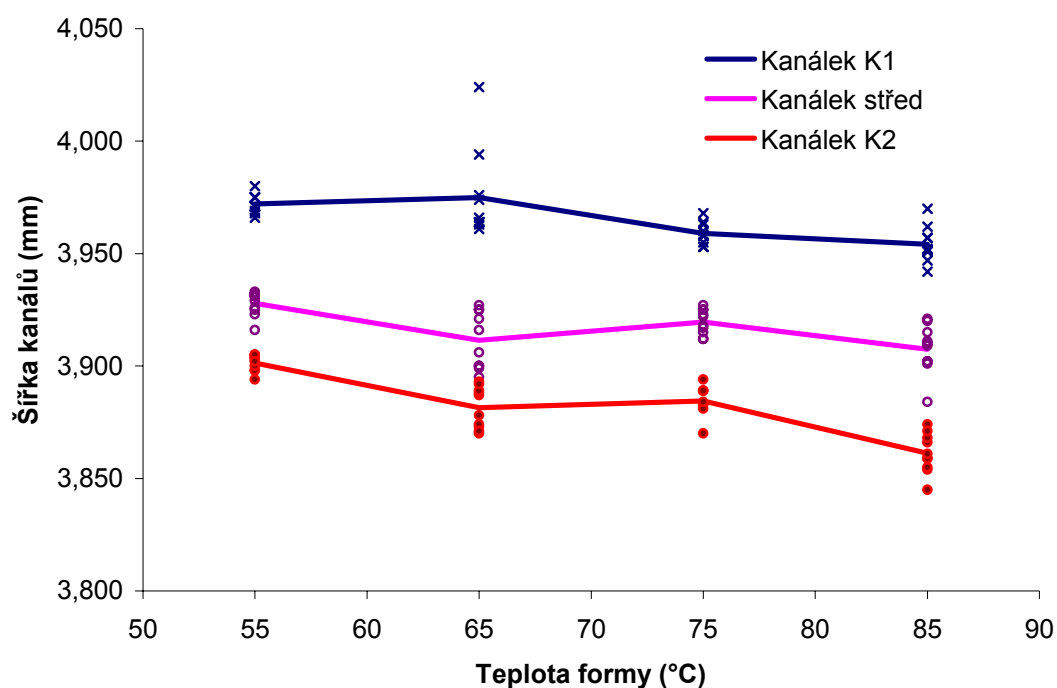
Na Obr. 59. je zachycen vliv velikosti teploty formy na šířku jednotlivých kanálků. Šířka všech kanálků s rostoucí teplotou formy klesá, tedy jejich smrštění narůstá.

Na Obr. 60. je zachycen vliv velikosti teploty taveniny na šířky kanálků vzorku *A*. Dá se říci, že změna velikosti teploty taveniny má ze všech měněných technologických parametrů na rozměry kanálku nejmenší vliv.



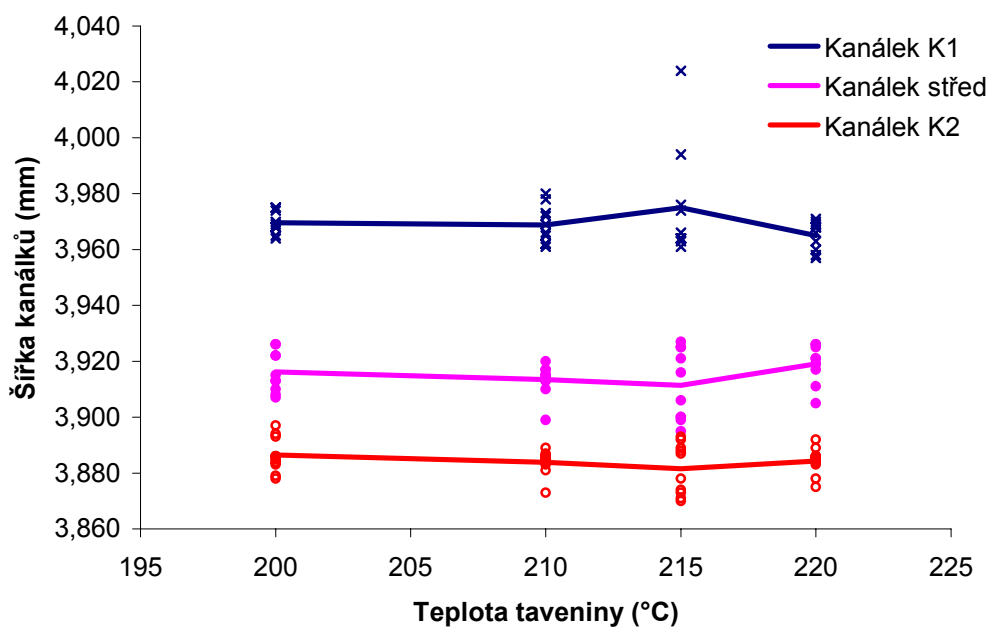
Obr. 58. Závislost šířky kanálků na velikosti dotlaku u vzorku A

Závislost šířky kanálků na velikosti teploty formy - vzorek A)



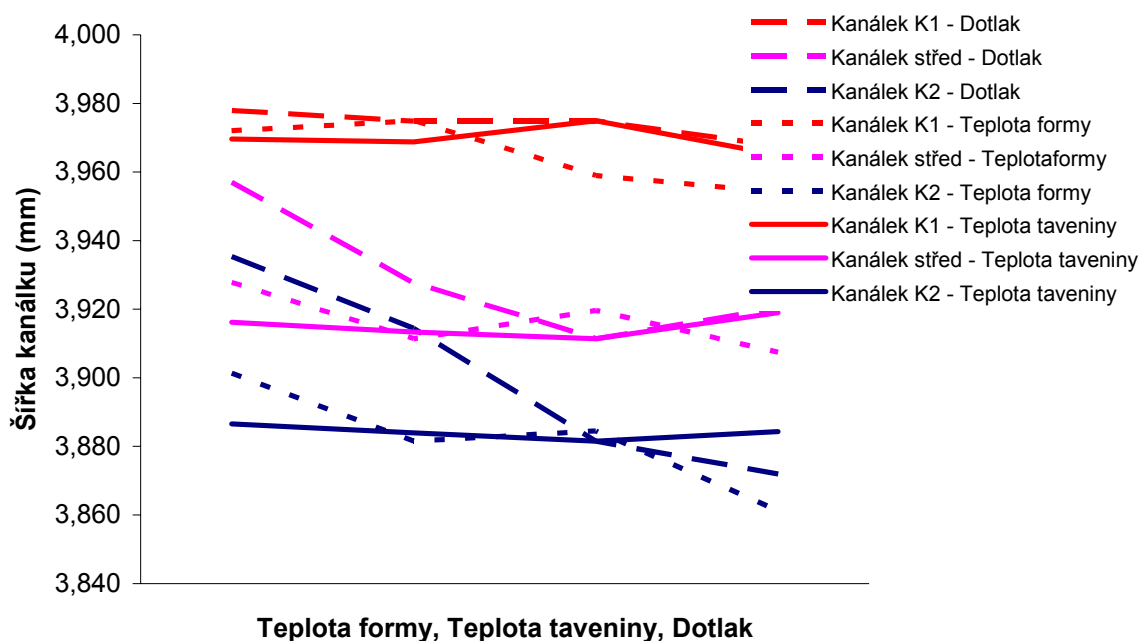
Obr. 59. Závislost šířky kanálků na velikosti teploty formy u vzorku A

Závislost šířky kanálků na velikosti teploty taveniny - vzorek A



Obr. 60. Závislost šířky kanálků na velikosti teploty taveniny u vzorku A

**Vliv teploty formy, teploty taveniny a velikosti dotlaku na šířku kanálů - vzorek A**



*Obr. 61. Vliv teploty formy, teploty taveniny a velikosti dotlaku na šířku kanálků u vzorku A*

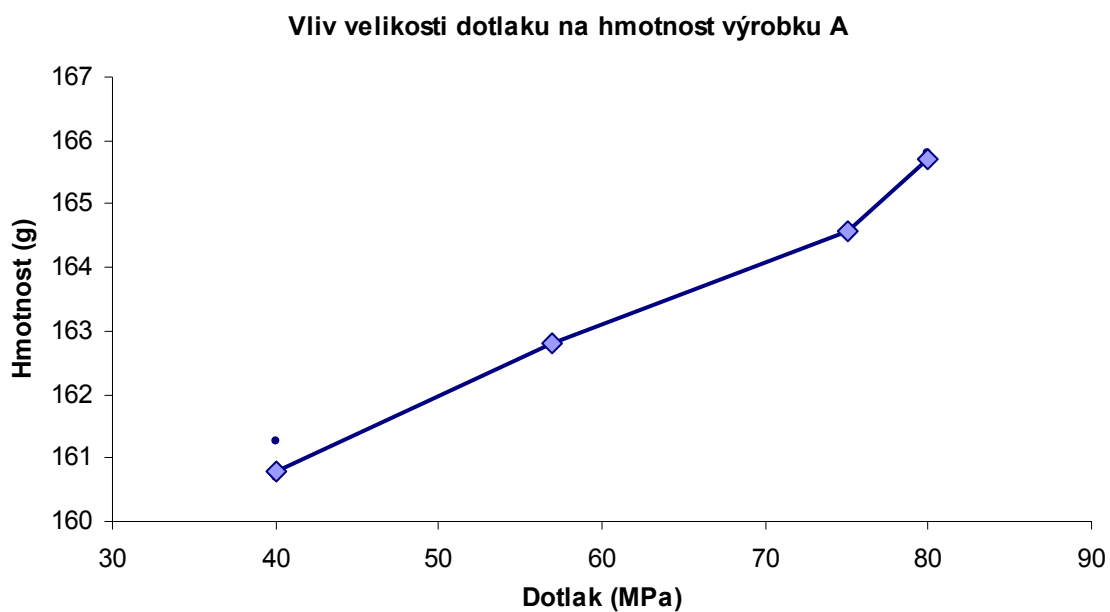
Na Obr. 61. je zobrazen vliv velikosti teploty taveniny, teploty formy a velikosti dotlaku na smrštění kanálků vzorku A. Jedná se o shrnutí výše uvedených závislostí.

*Při výrobě byly zjištěny tyto skutečnosti:*

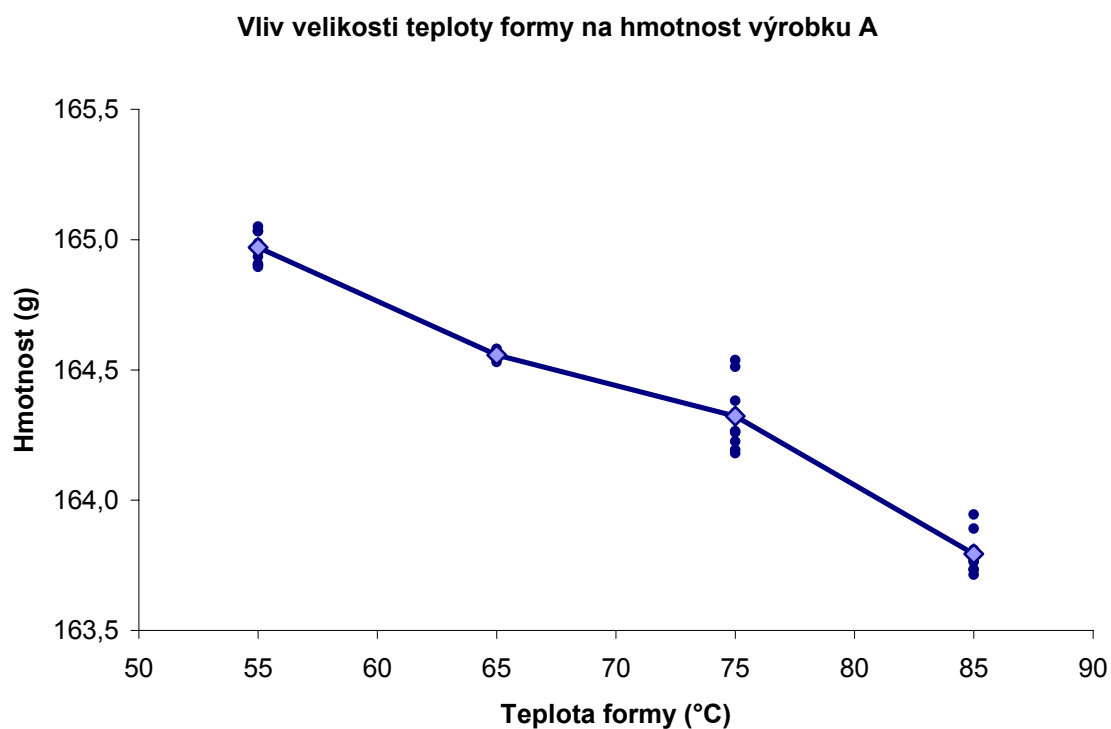
- Formu nelze v cyklu uchladiť na méně než 49 °C
- Při vstřikování za dotlaku vyššího, než 80 MPa dochází k zastříknutí výrobku a utržení části dílu na uzavírací části formy. Odformování by zlepšilo přeleštění vložky.

#### 10.1.4 Hmotnost dílů A

Po měření rozměrů na vzorcích A bylo provedeno i jejich vážení. Na Obr. 62. je zachycen vliv velikosti dotlaku na hmotnost výrobku A. S rostoucím dotlakem roste i hmotnost výstřiku, jelikož je do dutiny formy, vlivem vyššího tlaku, dopraveno více taveniny.



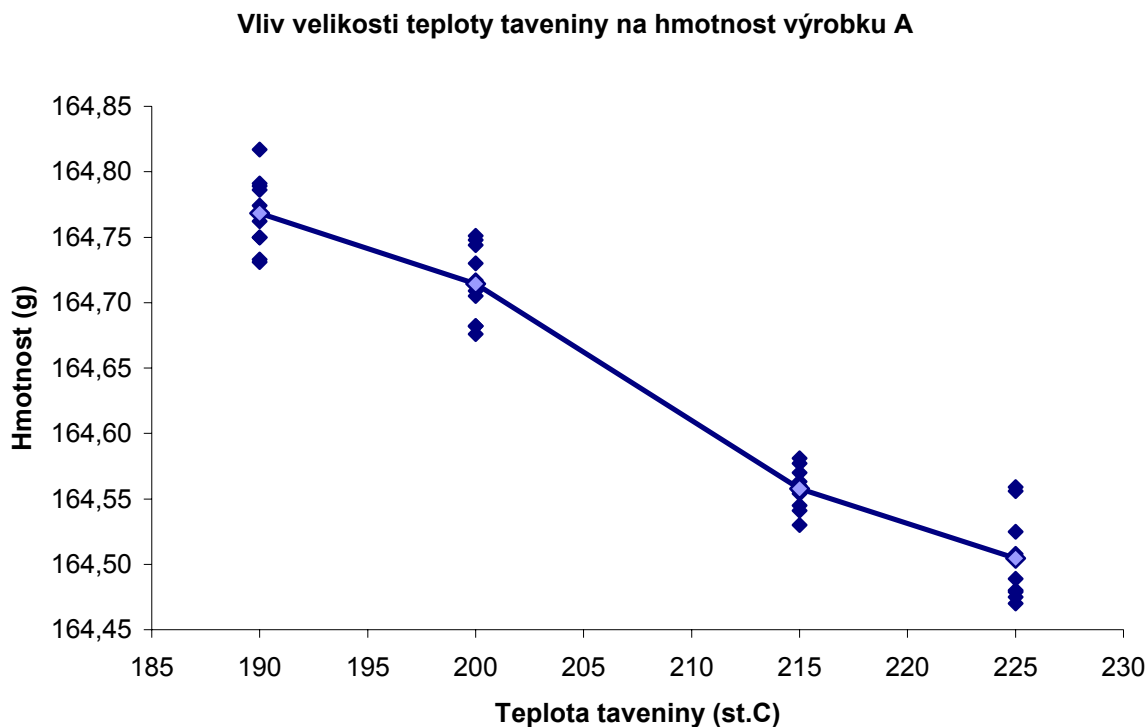
Obr. 62. Vliv velikosti dotlaku na hmotnost výrobku A



Obr. 63. Vliv velikosti teploty formy na hmotnost výrobku A

Na Obr. 63. je zobrazen vliv velikosti teploty formy na hmotnost výrobku A. Hmotnost výstřiku s rostoucí teplotou formy klesá. Toto je způsobeno tepelnou dilatací a větším volným objemem teplejšího polymeru.

Na Obr. 64. je zachycen vliv velikosti teploty taveniny na hmotnost výrobku *A*. S rostoucí teplotou taveniny klesá hmotnost výstřiku. Toto je způsobeno větším volným objemem teplejší taveniny.

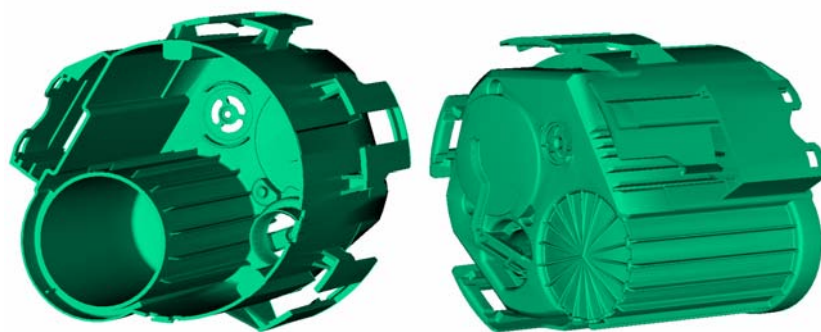


Obr. 64. Vliv velikosti teploty taveniny na hmotnost výrobku *A*

Nejvýznamnějším, z výše uvedených faktorů ovlivňujícím hmotnost výstřiku, je dotlak. Se zvýšením dotlaku ze 40 na 80 MPa vzroste hmotnost výrobku *A* až o 6g.

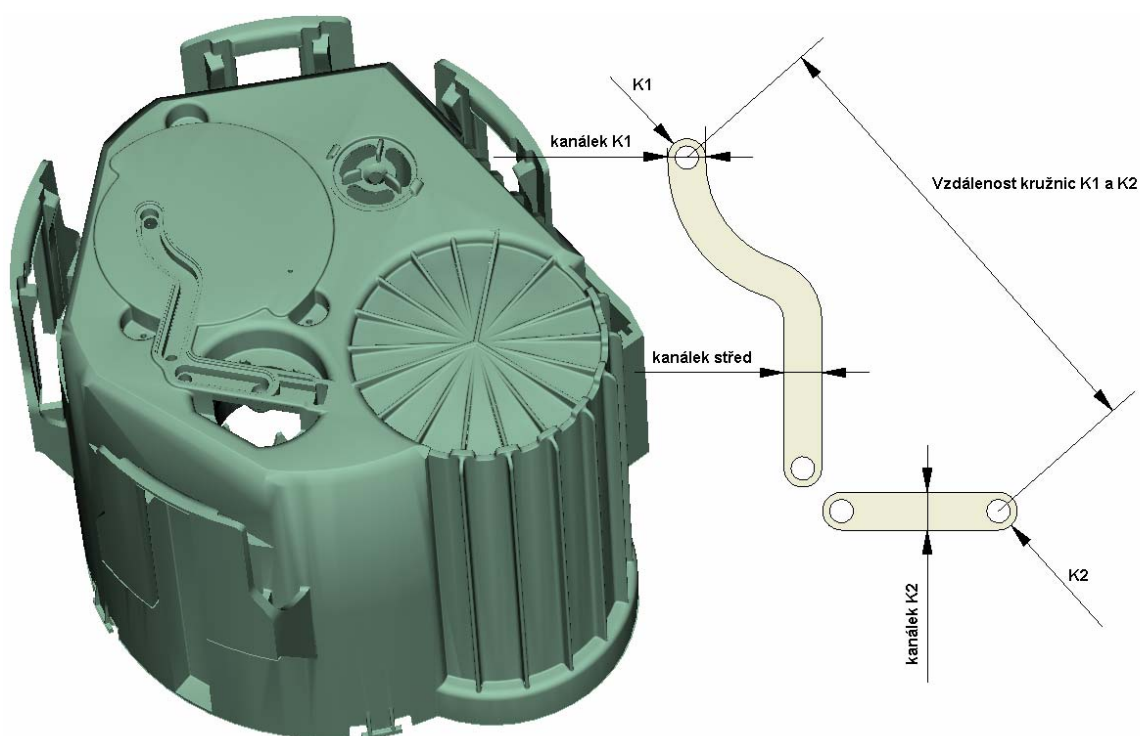
## 10.2 Výrobek B

Bylo vyrobeno 10 sérií po 10 ks vzorků *B* (Obr. 47), celkem tedy 100 ks výrobku *A*. Vzorky byly vyrobeny na stroji ENGEL ES 1350 / 400 HL, jehož technické parametry jsou uvedeny v Tab.7. K výrobě vzorku *B* bylo použito materiálu *Iupital F20-03*, jehož vlastnosti jsou uvedeny v kapitole „Vlastnosti materiálu POM“.



Obr. 65. Výrobek B

Protože nebylo možné provést měření reálných rozměrů dutiny formy, není v závislostech uváděno procentuelní smrštění výstřiku, ale všechny naměřené rozměry jsou vztahovány k rozměrům výstřiku vyrobeného za standardních podmínek, které při jeho výrobě používá firma Robert BOSCH v Českých Budějovicích. Tedy, o kolik se daný rozměr změnil, při určité změně technologických podmínek.



Obr. 66. Měřené rozměry kanálku B

Celý experiment je stejně jako u předchozího výrobku zaměřen na problematickou lokalitu kanálku, který je v operaci následující po vstřikování, vysokofrekvenčně zavařen s protikusem a je od něj vyžadována těsnost.

Dle naměřených hodnot byly vytvořeny grafy závislosti velikosti smrštění definovaných bodů na kanálcích tělesa modulu. K měření bylo použito optického přístroje *MAHR VISION MS 222* (Obr. 49). Po každém měření rozměrů bylo provedeno i vážení vzorků.

Tab. 7. Technická data stroje ENGEL ES 1350 / 400 HL

| Mezinárodní označení velikosti                      | 4000 - 1350        |      |           |      |
|-----------------------------------------------------|--------------------|------|-----------|------|
| Vstřikovací jednotka                                |                    |      |           |      |
| Průměr šneku                                        | mm                 | 55   | 60        | 70   |
| Délka šneku                                         | L/D                |      | 20        |      |
| Maximální objem zdvihu                              | cm <sup>3</sup>    | 617  | 735       | 1000 |
| Max. hmotnost výlisku vztaženo na PS (Euromap 19)   | g                  | 570  | 675       | 920  |
| Zdvih dávkování                                     | mm                 |      | 260       |      |
| Otáčky šneku max.                                   | min <sup>-1</sup>  |      | 226       |      |
| Plastifikační výkon měřeno pro PS podle norem ENGEL | g/s                | 41   | 53        | 80   |
| Vstřikované množství - teoretické hodnoty           | cm <sup>3</sup> /s | 295  | 351       | 478  |
| Specifický vstřikovací tlak                         | bar                | 1760 | 1480      | 1090 |
| Zvýšený specifický vstřikovací tlak                 | bar                | 2180 | 1830      | 1350 |
| Zdvih agregátu × přídržná síla trysky               | mm × kN            |      | 500 × 110 |      |
| Instalovaný příkon topení plastifikačního válce     | kW                 | 19.8 | 21.3      | 24.3 |
| Počet topných pásů                                  |                    |      | 5         |      |
| Uzavírací jednotka                                  |                    |      |           |      |
| Uzavírací síla                                      | kN                 |      | 4000      |      |
| Dráha otevření lisovacího nástroje                  | mm                 |      | 1000      |      |

Tab. 8. Proměnné technologické podmínky vzorku B

| Rozsah parametrů, při kterých byla sledována závislost smrštění vzorků |                |                   |
|------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------|
|                                                                        | Použitý rozsah | Používané hodnoty |
| Teplota formy (°C)                                                     | 55 - 95        | 80                |
| Teplota taveniny (°C)                                                  | 180 – 210      | 185               |
| Dotlak (MPa)                                                           | 40 - 120       | 100               |

### 10.2.1 Vzdálenost kružnic K1 a K2

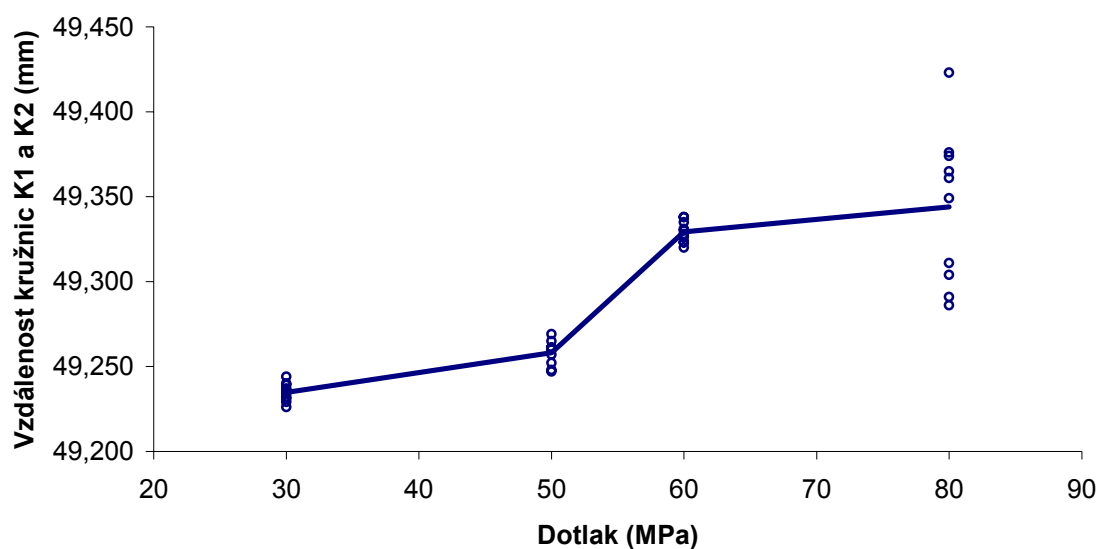
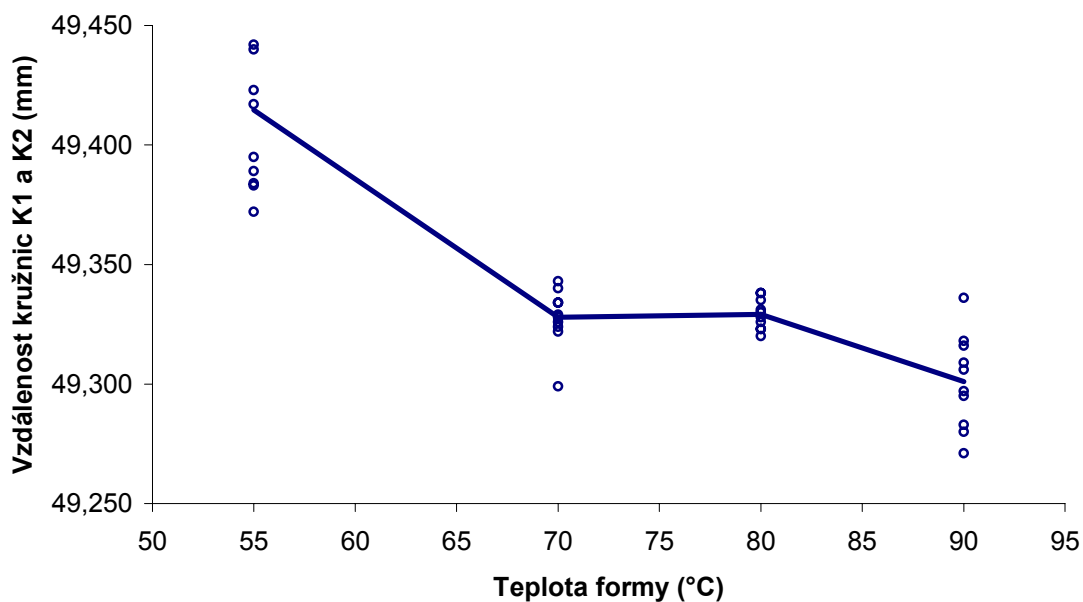
Tento rozměr byl vybrán jako dominantní a je na něm také nejlépe vidět reakce na jednotlivé změny technologických podmínek při vstřikování. Střed rádiusů je vypočten optickým měřicím přístrojem.

Na Obr. 67. je zachycen vliv velikosti dotlaku na změnu vzdálenosti kružnic K1 a K2. Dle teoretických předpokladů by se smrštění se vzrůstajícím dotlakem mělo snižovat, což se v případě vzdálenosti obou kružnic také děje. Při změně dotlaku z 30 na 80 MPa došlo ke zvětšení vzdálenosti kružnic o 0,11 mm. Je však třeba dodat, že při měření výrobků vyrobených při maximálním dotlaku, došlo k většímu rozptylu hodnot, vlivem narušení stability procesu extrémními podmínkami. Tento rozptyl je z grafu jasně patrný, když směrodatná odchylka hodnot při 80 MPa je rovna  $\pm 0,042$ .

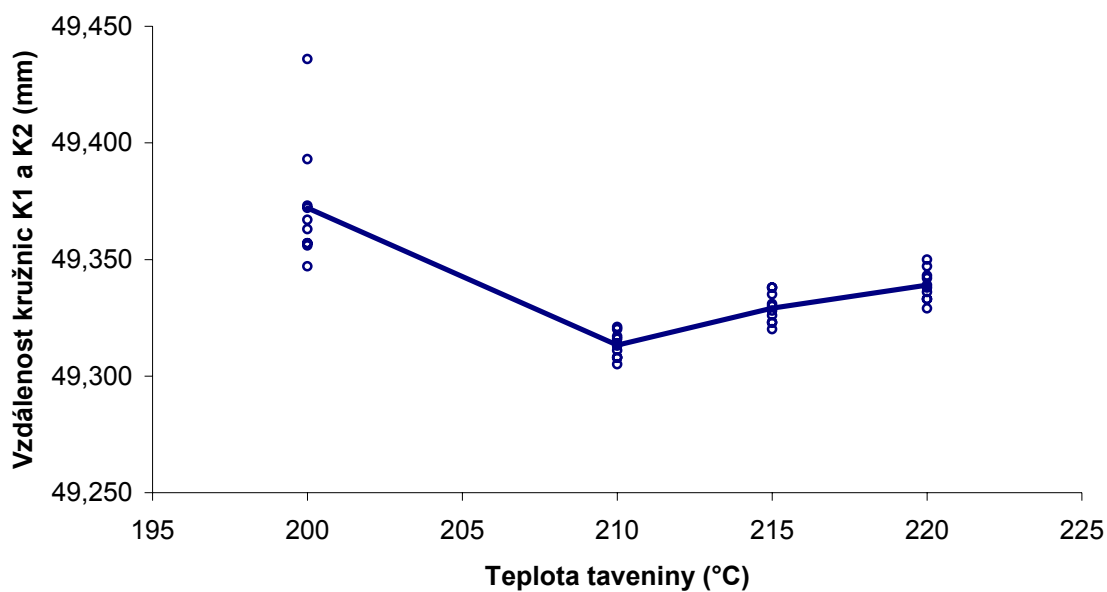
Na Obr. 68. je zobrazen vliv velikosti teploty formy na vzdálenost kružnic K1 a K2. Křivka opět potvrzuje teoretické předpoklady, když se vzrůstající teplotou formy, vzrůstá také velikost smrštění (vzdálenost obou kružnic se snižuje). Při ohřevu formy z 55 na 90°C, se vzdálenost mezi kružnicemi snížila o 0,11 mm, což je totožná hodnota, jako při změně dotlaku. Při obou extrémních podmínkách (55°C a 90°C) dochází k menšímu rozptylu naměřených hodnot. Není ovšem tak významný, jako rozptyl při změně dotlaku.

Na Obr. 69. je zachycen vliv velikosti teploty taveniny na vzdálenost kružnic K1 a K2. Maximální rozdíl hodnot na křivce v extrémních podmínkách, je 0,06 mm. Ze závislosti plyne, že k nejvyššímu smrštění dochází při teplotě taveniny 210°C. Při teplotě 200°C dochází opět k rozptylu naměřených hodnot, zřejmě vlivem nestabilizovaného procesu při této teplotě taveniny.

Na Obr. 70. je přehledně zobrazen vliv jednotlivých technologických podmínek na rozměr mezi oběma kružnicemi. Z obrázku plyne, že změnou technologických podmínek se podařilo, změnit vzdálenost kružnic až o 0,18 mm.

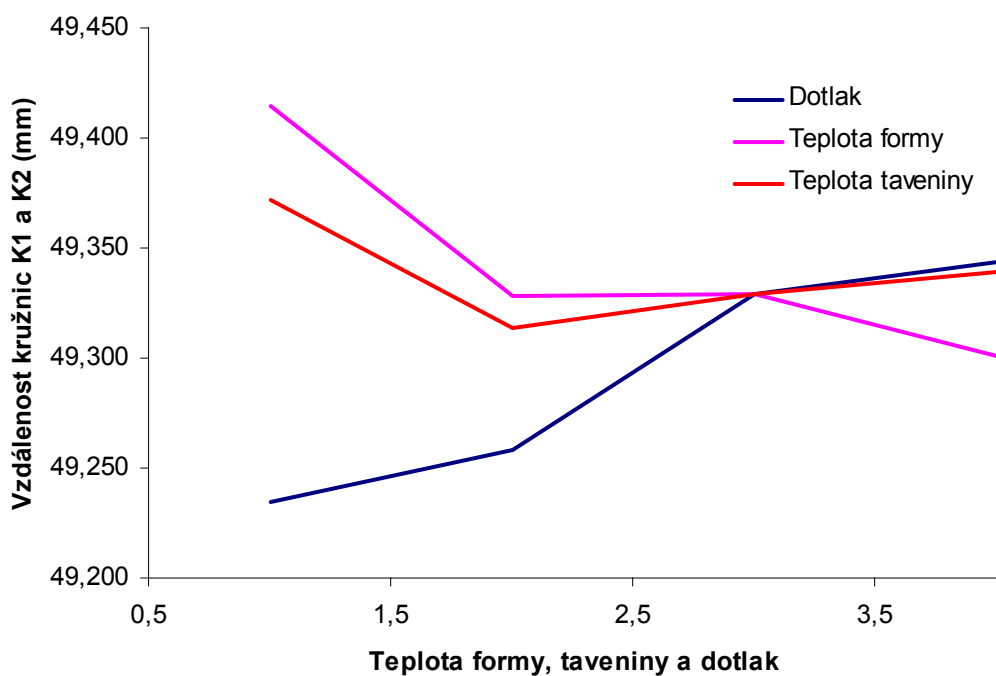
**Závislost vzdálenosti kružnic K1 a K2 na velikosti dotlaku - vzorek B***Obr. 67. Vliv velikosti dotlaku na vzdálenost kružnic K1 a K2 výrobku B***Závislost vzdálenosti kružnic K1 a K2 na velikosti teploty formy - vzorek B***Obr. 68. Vliv velikosti teploty formy na vzdálenost kružnic K1 a K2 výrobku B*

**Závislost vzdálenosti kružnic K1 a K2 na velikosti teploty taveniny - vzorek B**



*Obr. 69. Vliv velikosti teploty taveniny na vzdálenost kružnic K1 a K2 výrobku B*

**Vliv velikosti teploty formy, teploty taveniny a velikosti dotlaku na vzdálenost kružnic K1 a K2 - vzorek B**



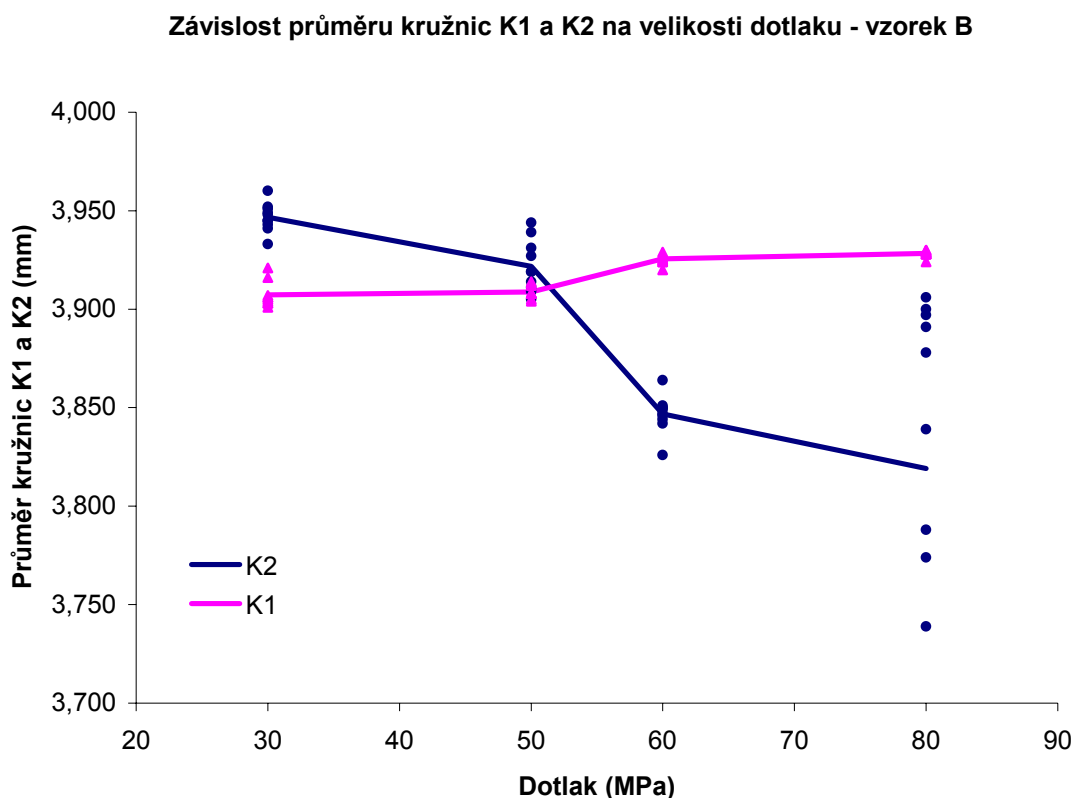
*Obr. 70. Znáznornění vlivu jednotlivých technologických podmínek na vzdálenost kružnic K1 a K2*

### 10.2.2 Rozměry kružnic K1 a K2

Na Obr. 71. je zachycen vliv velikosti dotlaku na rozměry kružnic K1 a K2. Je pozoruhodné, jak nepatrné odchylky rozměrů má kružnice K1, oproti kružnici K2 a to zejména při extrémním dotlaku 80 MPa. Kružnice K2 je změnou dotlaku mnohem více ovlivněna. Zatímco kružnice K1 se při změně dotlaku z 30 na 80 MPa zvětší o 0,021 mm, kružnice K2 se zmenší o 0,13 mm.

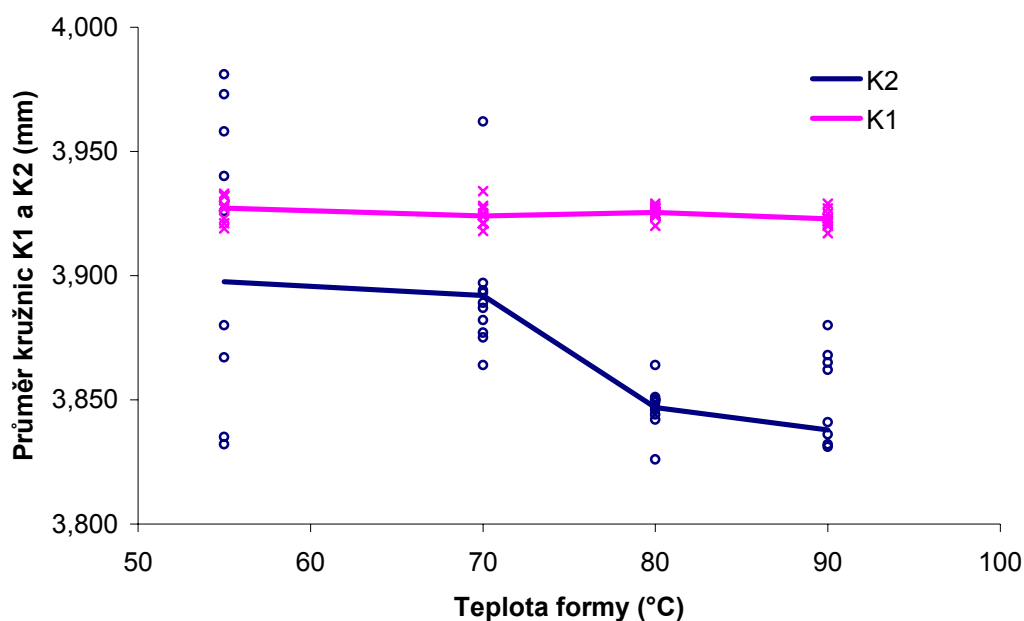
Na Obr. 72. je zachycen vliv velikosti teploty formy na rozměry obou kružnic. Rozptyl a změna rozměrů kružnice K1 je nepatrný. Kružnice K2 zaznamenává mnohem výraznější rozptyl v obou extrémních hodnotách teploty formy a se zvyšující teplotou formy se rozměr kružnice zmenšuje.

Vliv velikosti teploty taveniny na rozměry kružnic K1 a K2 je zobrazen na Obr. 73. Změna rozměru i rozptyl naměřených hodnot kružnice K1 je opět nepatrná, s mírnou tendencí snížení smrštění se vzrůstající teplotou taveniny. Křivka kružnice K2 klesá s rozdílem rozměrů 0,03 mm.



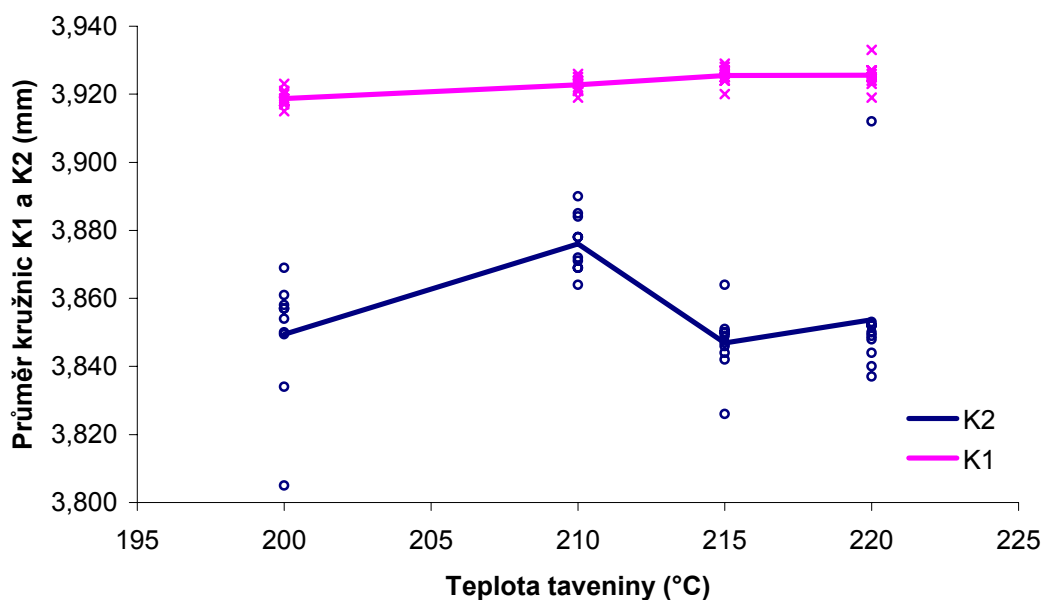
Obr. 71. Vliv velikosti dotlaku na rozměry kružnic K1 a K2 výrobku B

Závislost průměru kružnic K1 a K2 na teplotě formy - vzorek B



Obr. 72. Vliv velikosti teploty formy na rozměry kružnic K1 a K2 výrobku B

Závislost průměru kružnic K1 a K2 na teplotě taveniny - vzorek B



Obr. 73. Vliv velikosti teploty taveniny na rozměry kružnic K1 a K2 výrobku B

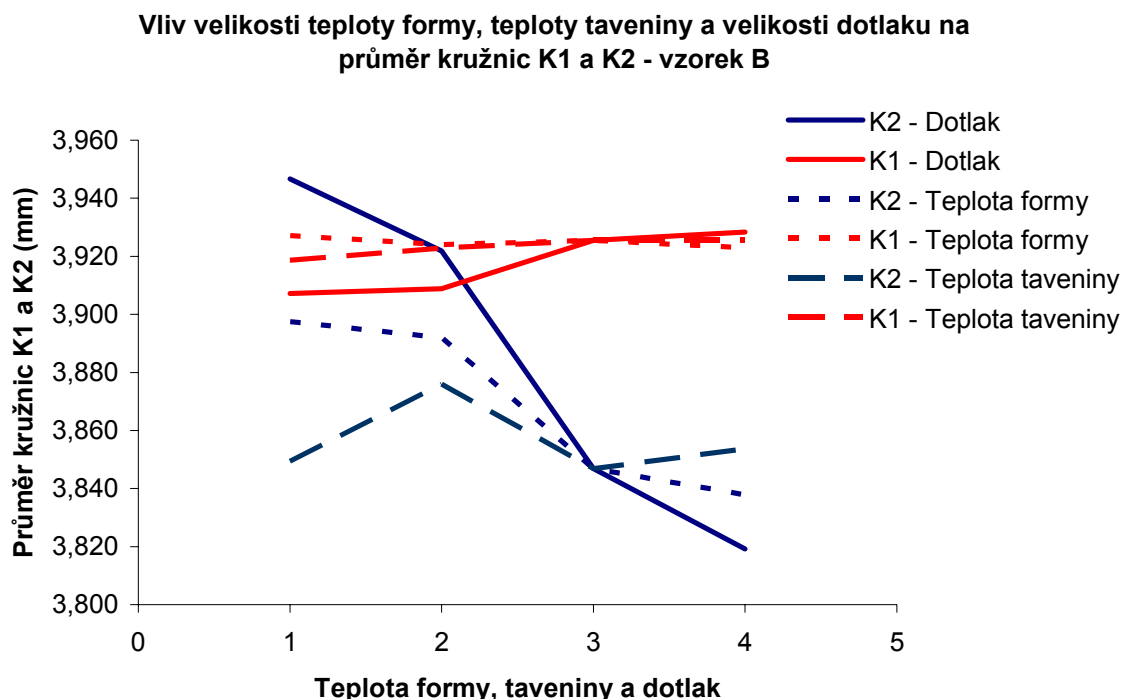
Na Obr. 74. je zaznamenán vliv jednotlivých technologických podmínek na rozměry kružnic K1 a K2. Dá se říci, že na rozměry kružnice K1 má změna vybraných technologických podmínek takřka nepatrný vliv a jak při zvyšování dotlaku, tak při

vzrůstání teploty taveniny vykazuje kružnice K1 snížení smrštění. Kružnice K2 je změnou parametrů na vstřikovacím stroji výrazně více ovlivněna. Její průměr se při změně dotlaku, který se na výsledném rozměru nejvíce projevil, změnil až o 0,13 mm. Ze zvyšující se teplotou formy a dotlakem dochází ke snižování smrštění kružnice K2.

### 10.2.3 Kanálek

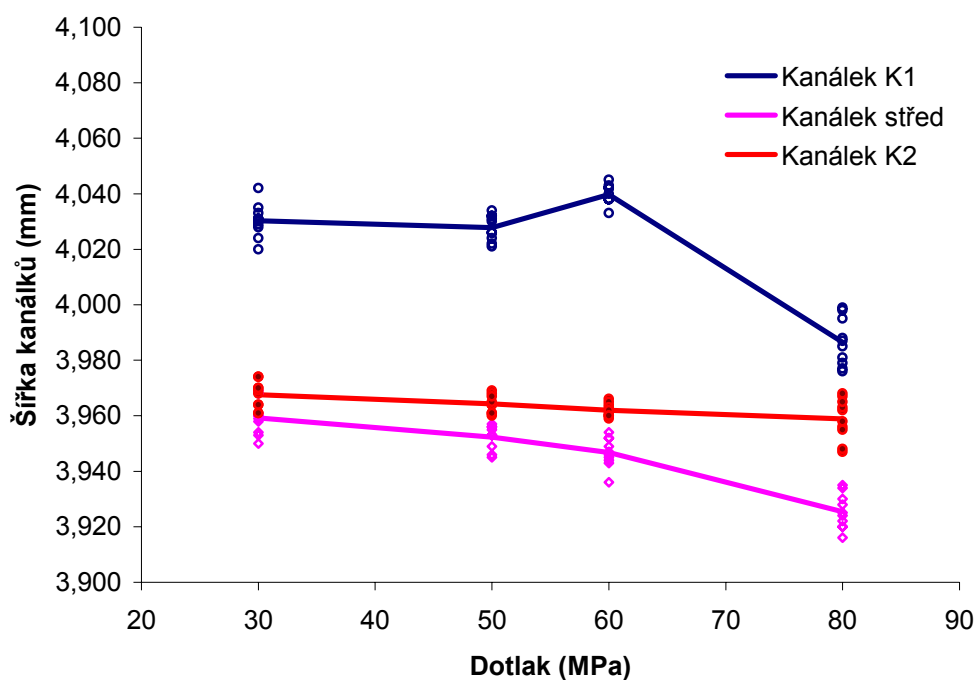
Na Obr. 75. je zaznamenán vliv velikosti dotlaku na rozměry kanálků v definovaných bodech. Kromě rozměru *Kanálek K1*, kde byl naměřen jistý překmit, dochází u všech dalších, k postupnému zmenšení smrštění se vzrůstajícím tlakem. U *kanálku K1* je tato změna, při vzrůstu dotlaku z 30 MPa na 80 MPa, 0,05 mm.

Na Obr. 76. je zachycen vliv teploty formy na šířku kanálků. Nejvýrazněji se opět projevuje rozměr *kanálku K1* s výrazným překmitem, ale i rozptylem naměřených hodnot. Jeho průměrná změna rozměru je 0,1 mm, při změně teploty formy z 55 na 90°C.



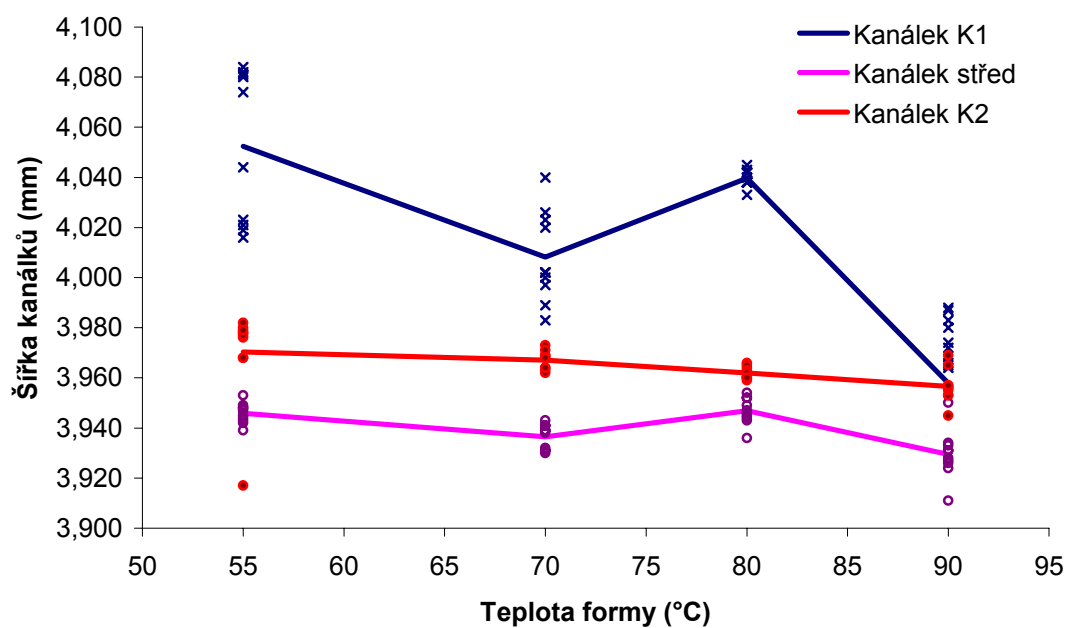
Obr. 74. Znáznornění vlivu jednotlivých technologických podmínek na rozměry kružnic K1 a K2

Závislost šířky kanálků na velikosti dotlaku - vzorek B



Obr. 75. Vliv velikosti dotlaku na rozměry kanálků výrobku B

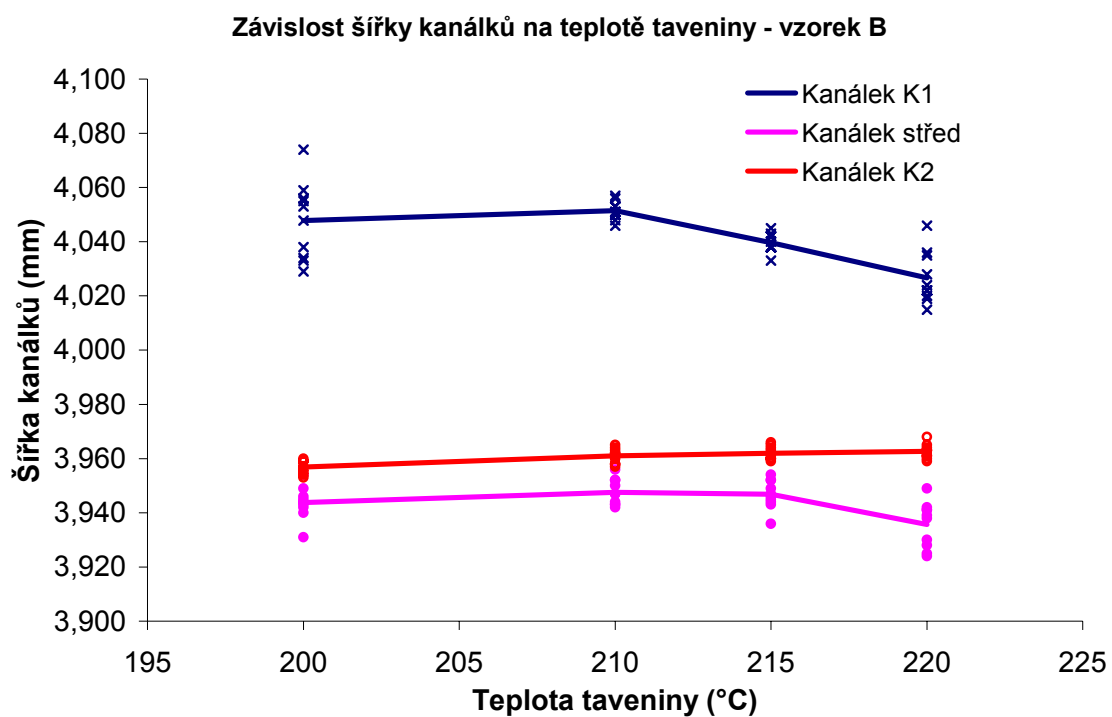
Závislost šířky kanálků na teplotě formy - vzorek B



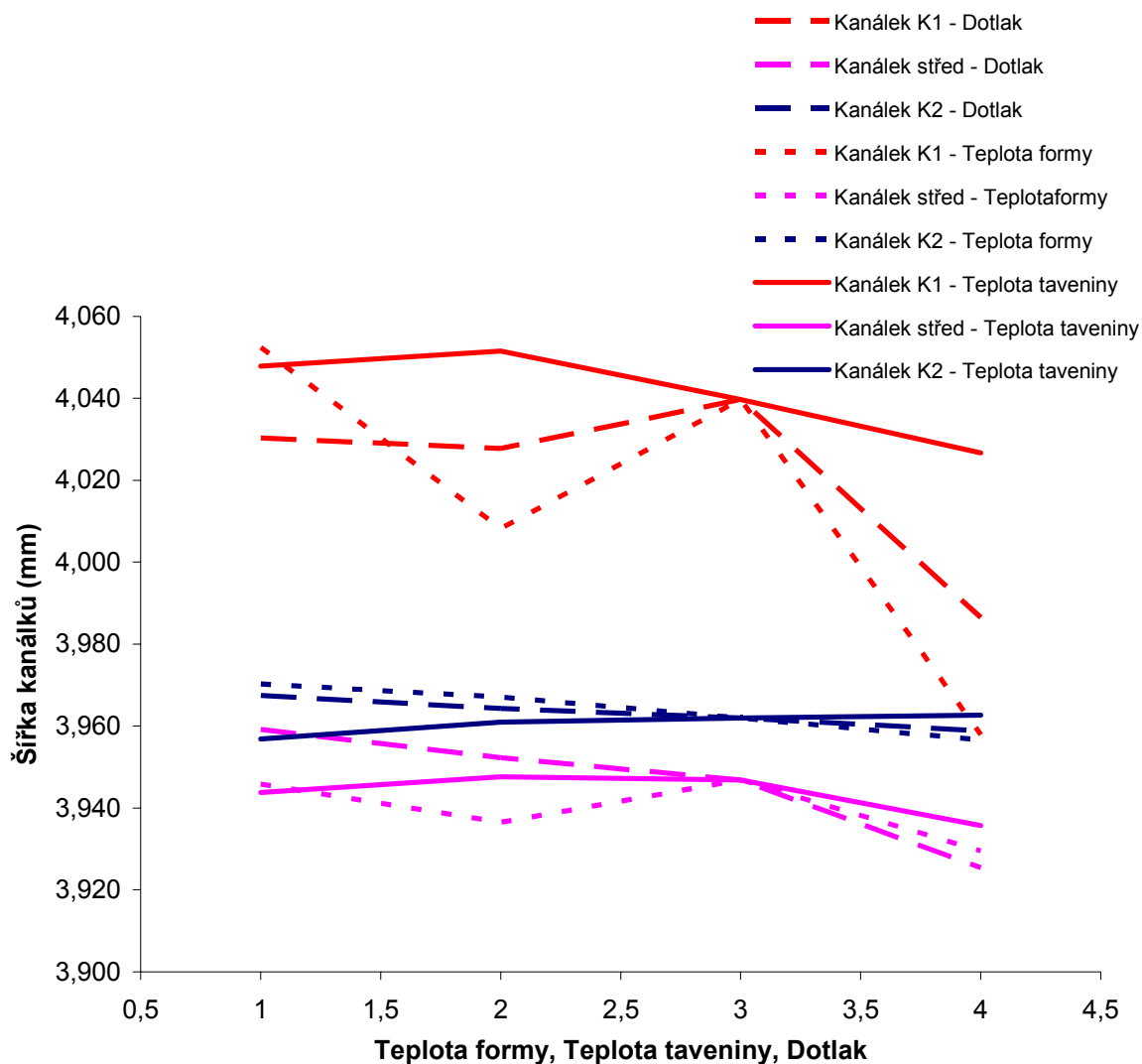
Obr. 76. Vliv velikosti teploty formy na rozměry kanálků výrobku B

Méně významný překmit zaznamenává i rozměr *kanálek střed* a to při těžce teplotě formy, jako *kanálek K1*, tedy při 80°C. Šířka všech kanálků se tedy se vzrůstající teplotou formy

snižuje. Na Obr. 77. je zaznamenán průběh změny šíře kanálků v závislosti na teplotě taveniny u vzorku B.



Obr. 77. Vliv velikosti teploty taveniny na rozměry kanálků výrobku B

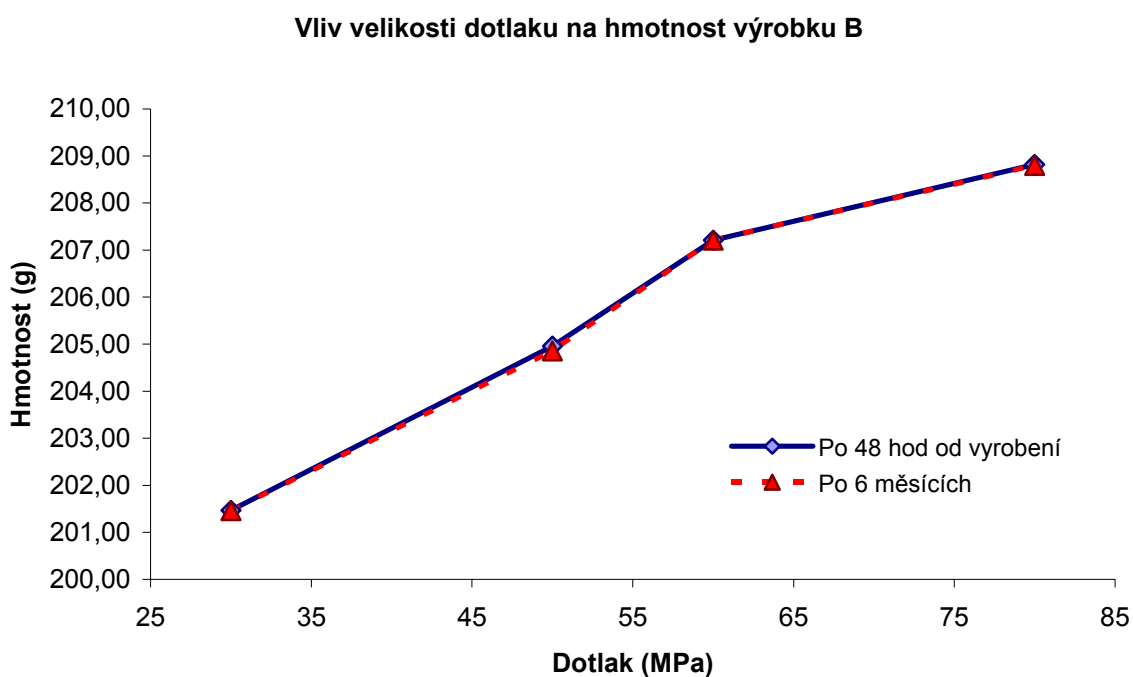


Obr. 78. Znázornění vlivu jednotlivých technologických podmínek na rozměry kanálků u výrobku B

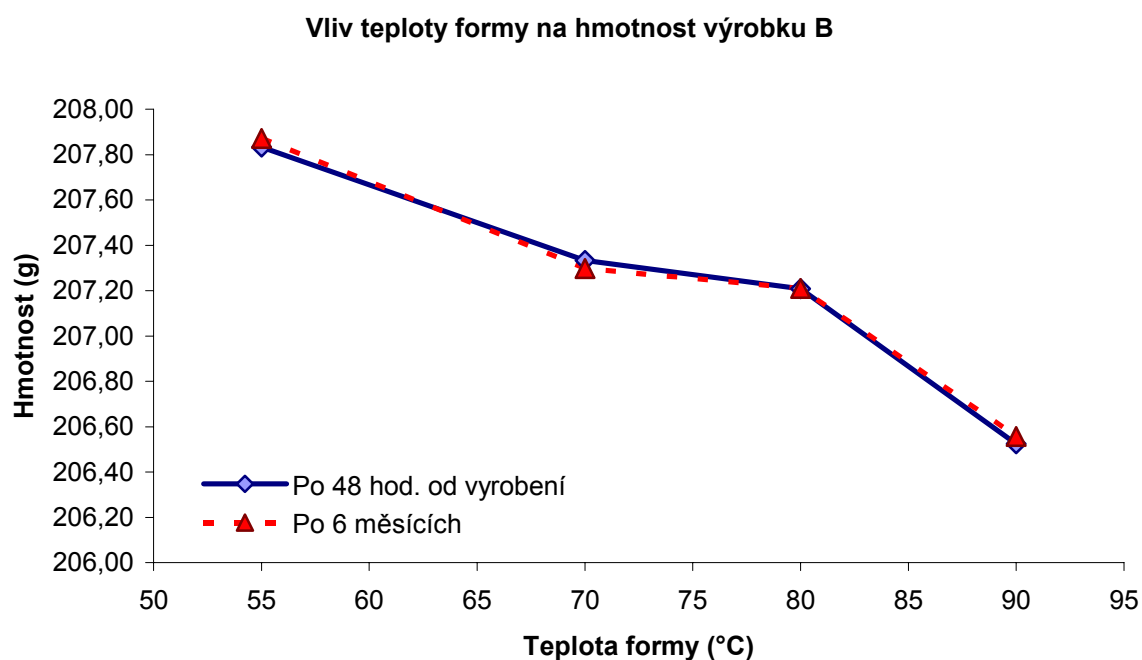
#### 10.2.4 Hmotnost dílů B

Po měření rozměrů na vzorcích B bylo provedeno i jejich vážení. Na Obr. 79. je zachycen vliv velikosti dotlaku na hmotnost výrobku B. S rostoucím dotlakem roste i hmotnost výstřiku, jelikož je do dutiny formy, vlivem vyššího tlaku, dopraveno více taveniny.

Na Obr. 80. je zobrazen vliv velikosti teploty formy na hmotnost výrobku B. Hmotnost výstřiku s rostoucí teplotou formy klesá. Toto je způsobeno tepelnou dilatací a větším volným objemem teplejšího polymeru.

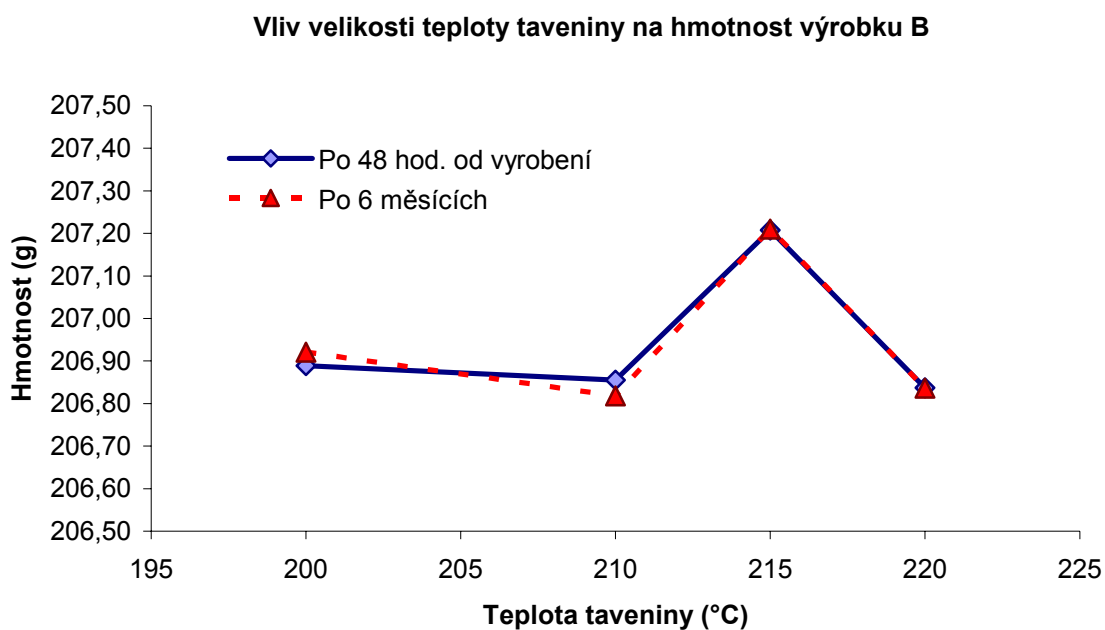


Obr. 79. Vliv velikosti dotlaku na hmotnost výrobku B



Obr. 80. Vliv teploty formy na hmotnost výrobku B

Na Obr. 81. je zachycen vliv velikosti teploty taveniny na hmotnost výrobku B. S rostoucí teplotou taveniny klesá hmotnost výstřiku až do teploty 210°C. Při teplotě 215°C dochází k nárůstu hmotnosti o 0,4g a opětovnému následovnému poklesu hmotnosti.



*Obr. 81. Vliv velikosti teploty taveniny na hmotnost výrobku B*

Nejvýznamnějším, z výše uvedených faktorů ovlivňujícím hmotnost výstřiku, je dotlak. Se zvýšením dotlaku z 30 na 80 MPa vzroste hmotnost výrobku B až o 7,4g. Při dlouhodobých měřeních nebyla zjištěna významnější změna hmotnosti od původně naměřených hodnot.

## 11 Moldflow analýza

### 11.1 Moldflow analýza zkušebních tělísek

Pro vytvoření Moldflow analýzy zkušebních tělísek byly vytvořeny dva 3D modely v programu *Autodesk Inventor 6*. Tyto modely byly převedeny do formátu „*stl*“, aby mohla být provedena jejich analýza v programu *Moldflow Plastics Insight 5.1*.

Oba modely zkušebních tělísek byly vysítovány sítí typu *Fusion* s triagonálními elementy. A byly provedeny jejich analýzy a měření rozměrů v definovaných bodech, stejně tak, jako u reálných zkušebních tělísek.

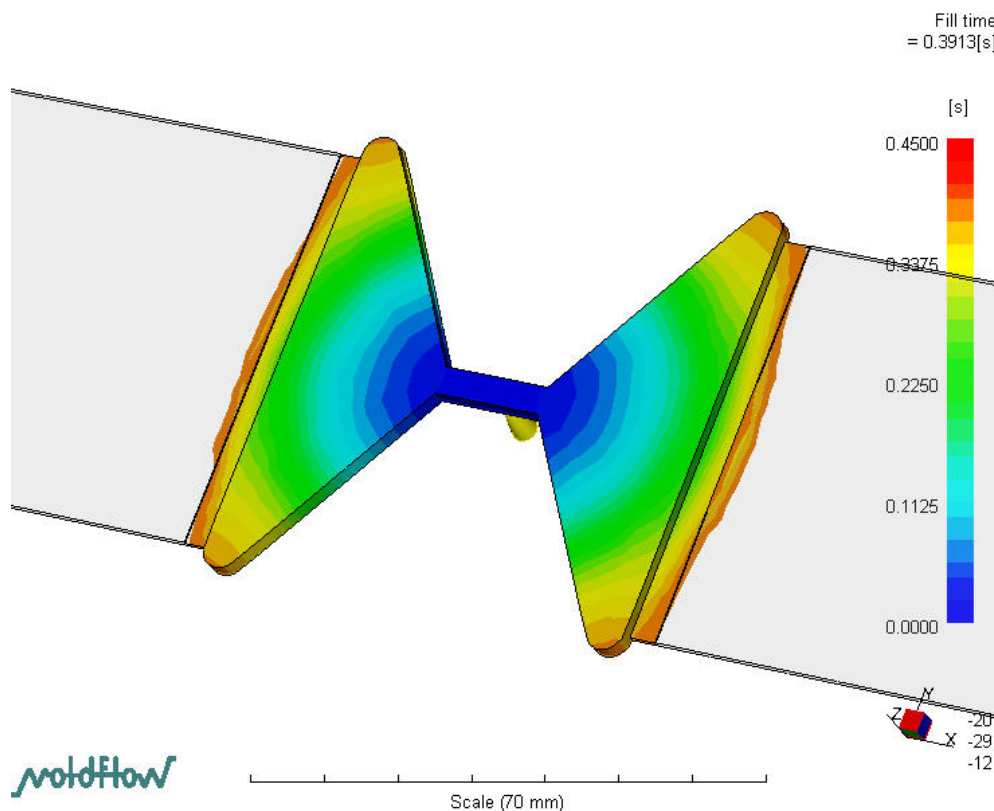
#### Parametry sítě tělíska o tloušťce 1mm:

|                                         |      |
|-----------------------------------------|------|
| Počet uzlů                              | 2762 |
| Počet elementů                          | 5520 |
| Průměrný poměr výšky ku šířce elementu  | 1,8  |
| Maximální poměr výšky ku šířce elementu | 12   |
| Přizpůsobení sítě tvaru modelu          | 99%  |

#### Parametry sítě tělíska o tloušťce 2mm:

|                                         |      |
|-----------------------------------------|------|
| Počet uzlů                              | 2774 |
| Počet elementů                          | 5544 |
| Průměrný poměr výšky ku šířce elementu  | 1,7  |
| Maximální poměr výšky ku šířce elementu | 6,2  |
| Přizpůsobení sítě tvaru modelu          | 99%  |

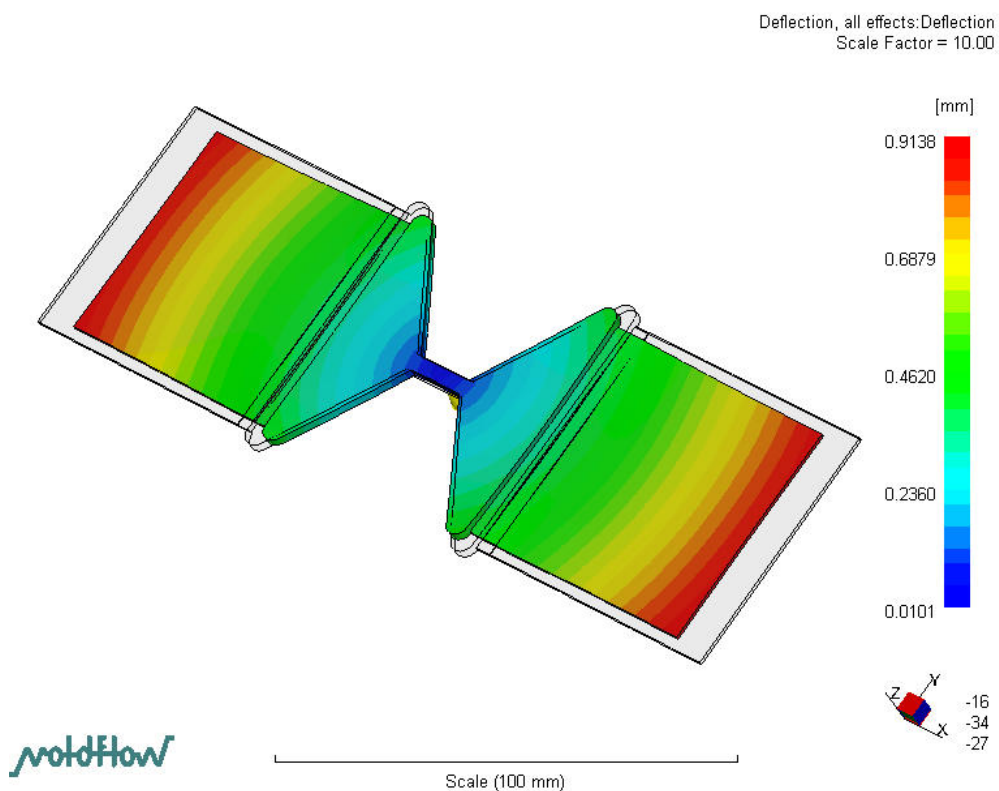
Na Obr. 82. je zachyceno plnění modelu zkušebního tělíska o tloušťce 1mm materiálem *Iupital F 02-03*. Respektive, je zachycena počáteční fáze plnění. Objem tělíska v místech, kde bude prováděno měření jeho podélného a příčného smrštění, je třeba plnit rovnoměrně, což se dle vytvořené studie také děje.



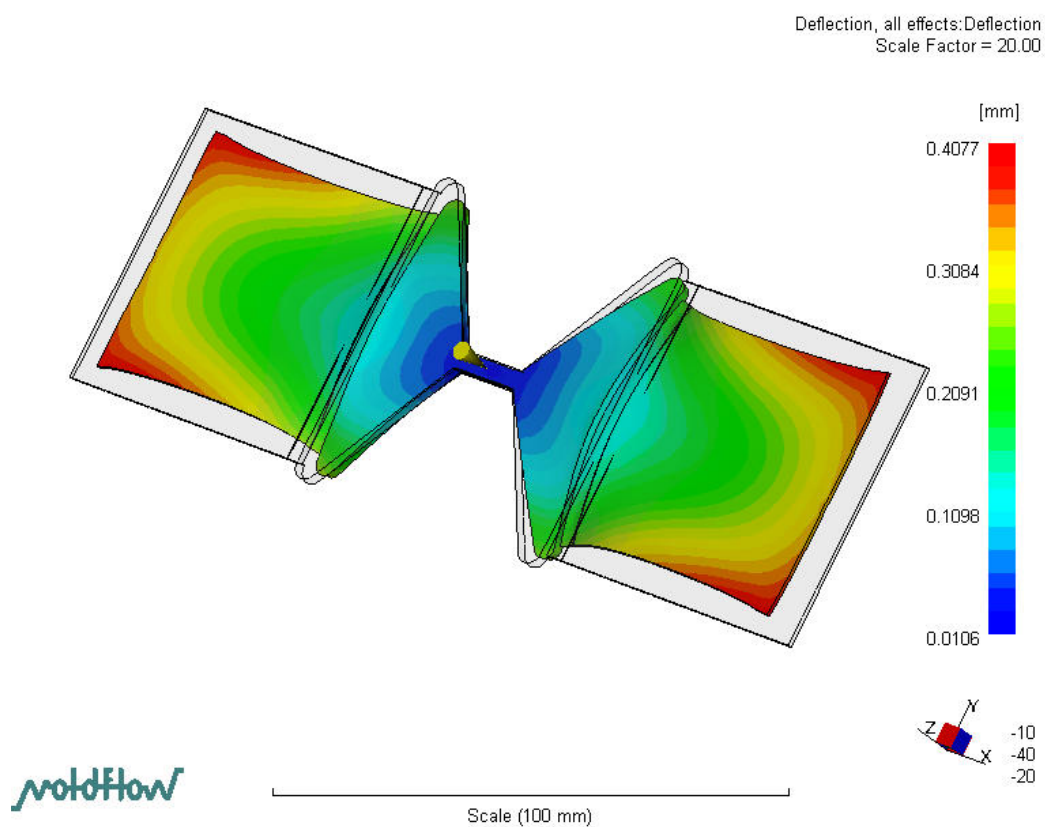
Obr. 82. Plnění modelu zkušebního tělíska o tloušťce 1mm

Na Obr. 83. je zobrazena deformace modelu zkušebního tělíska o tloušťce 1mm, při použití materiálu *Iupital F 20-03*. Deformace je pro větší názornost 10x zvětšena. Jak je vidět, velikost deformace roste takřka rovnoměrně se vzdáleností od vtoku. Zatímco u POM *Iupital F 20-03* nedochází k výraznému kroucení lopatky, kde je měřeno podélné a příčné smrštění, u PA 66 *Zytel 70G35HSL RA4* dochází ke zkroucení do vrtule, jak je zobrazeno na Obr. 84. Deformace materiálu *Zytel 70G35HSL RA4* je ale ve skutečnosti cca 2x menší.

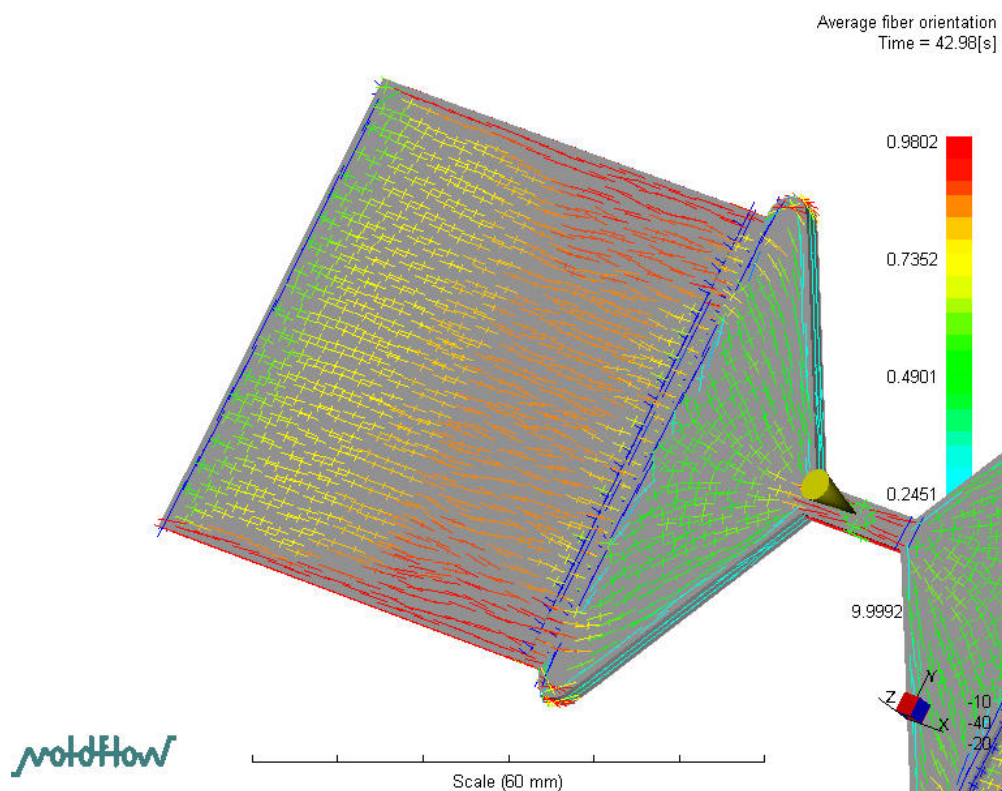
Na Obr. 85. Je zobrazena orientace skelných vláken v modelu zkušebního tělíska o tloušťce 1mm při plnění materiálem *Zytel 70G35HSL RA4*. Materiál je plněn krátkým skelným vláknem, které se v blízkosti stěny orientuje ve směru toku. Ve středu průřezu materiálu pak zaujímá nahodilé uspořádání. Orientace vláken při stěně má však velký vliv na anizotropii vlastností výstřiku v podélném a příčném směru.



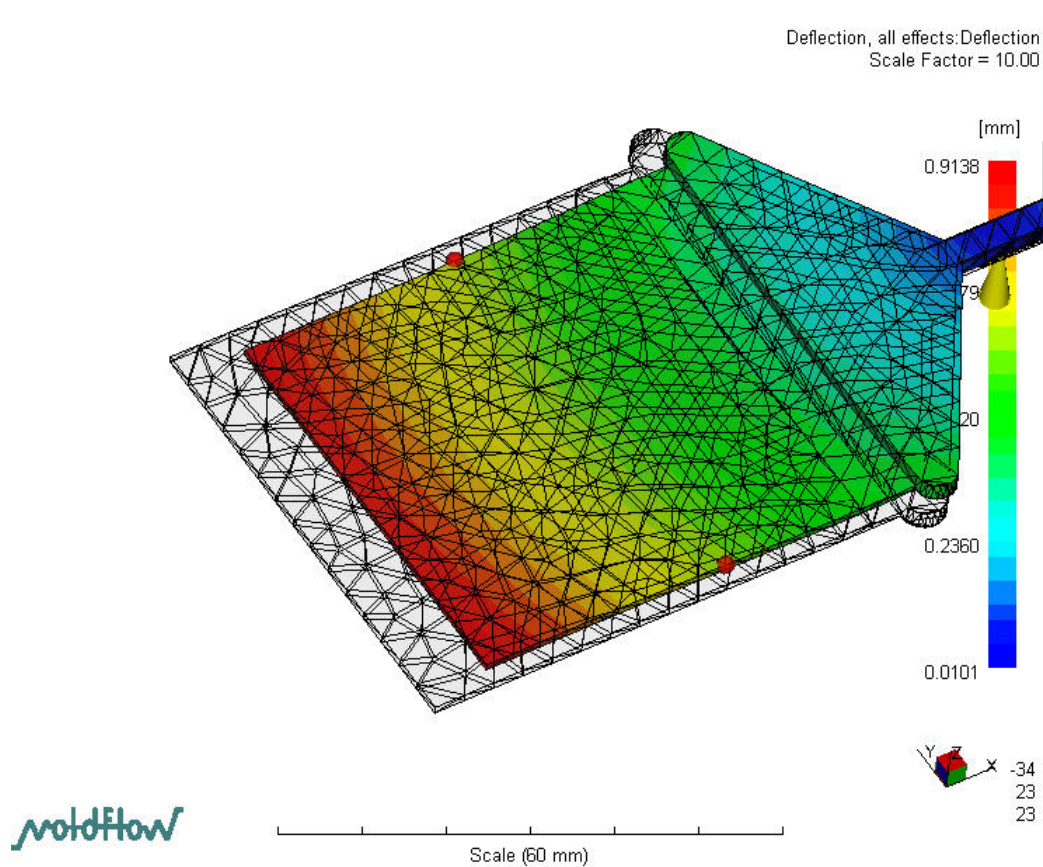
Obr. 83. Deformace modelu zkušebního tělíska o tloušťce 1mm, při použití materiálu Iupital F 20-03; 10x zvětšeno



Obr. 84. Deformace modelu zkušebního tělíska o tloušťce 1mm, při použití materiálu Zytel 70G35HSL RA4; 20x zvětšeno



Obr. 85. Orientace skelných vláken v modelu zkušebního tělíska o tloušťce 1mm při plnění materiálem Zytel 70G35HSL RA4



Obr. 86. Měření výsledných rozměrů modelu zkušebního tělíska o tloušťce 1mm z materiálu Iupital F 20-03

Na Obr. 86. je zobrazen způsob měření výsledných rozměrů modelu zkušebního tělíska o tloušťce 1mm z materiálu *Iupital F 20-03*. Červené tečky jsou body, ve kterých byly odečteny hodnoty souřadnice y, ze kterých bylo určeno příčné smrštění.

Aby bylo možno vyhodnotit chování modelů, bylo třeba provést 42 analýz. Jejich výsledky jsou znázorněny v následujících grafech.

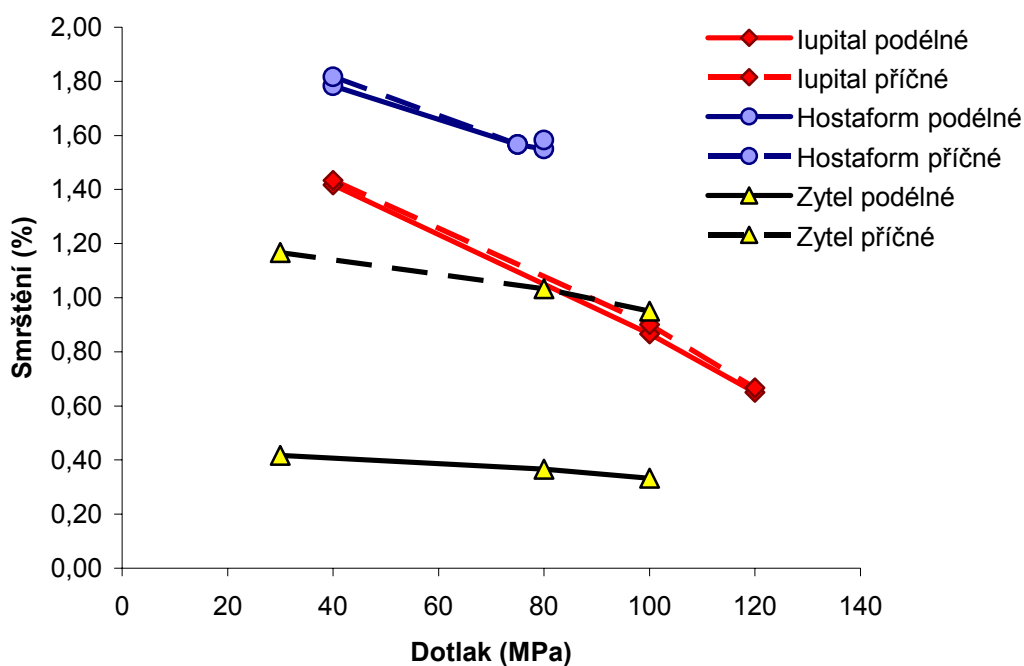
Na Obr. 87. je zachycen Vliv velikosti dotlaku na smrštění modelu zkušebního tělíska o tloušťce 1mm. Všechny materiály vykazují pokles jak podélného, tak příčného smrštění v závislosti na vzrůstající velikosti aplikovaného dotlaku. Největší smrštění vykazuje materiál *Hostaform C 13021* a nejnižší materiál *Zytel 70G35HSL RA4*. Oba materiály POM nemají v materiálovém listu v programu *Moldflow Plastics Insight 5.1* zadány hodnoty pro podélné a příčné smrštění a jejich smrštění je tedy určováno z pvT diagramu. Z tohoto důvodu u nich prakticky nebyl naměřen rozdíl mezi podélným a příčným smrštěním. Případné malé rozdíly jsou způsobeny kvalitou vysíťování modelu. Materiál *Zytel 70G35HSL RA4* oproti tomu vykazuje vyšší říčné smrštění oproti podélnému, což je způsobeno orientací skelných vláken.

Na Obr. 88. je zachycen vliv velikosti dotlaku na smrštění modelu zkušebního tělíska o tloušťce 2mm. Průběh spojnic naměřených smrštění je velmi podobný předcházejícímu, avšak materiál *Hostaform C 13021* vykazuje rozdíl mezi příčným s podélným smrštěním, a navíc se pohybuje v naprosto odlišných hodnotách, než jaké byly naměřeny u reálných vzorků. Zřejmě tedy došlo k výpočtové chybě.

Materiál *Iupital F 20-03* má oproti tenčímu tělísku prudší pokles velikosti smrštění v závislosti na velikosti dotlaku a i jeho hodnoty smrštění jsou nižší. U materiálu *Zytel 70G35HSL RA4* je menší rozdíl, mezi podélným a příčným smrštěním u tělíska tloušťky 2mm oproti 1mm tělísku.

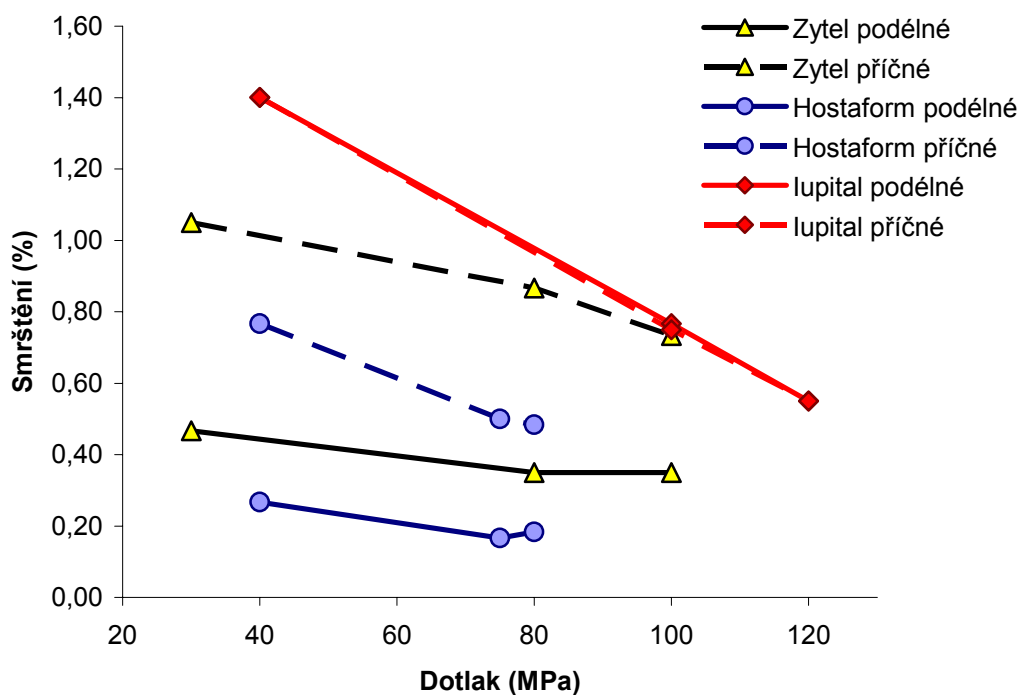
Tělíska o tloušťce 2mm mají tedy podle provedených analýz nižší procentuelní hodnoty smrštění, než tělíska o tloušťce 1mm.

Vliv velikosti dotlaku na smrštění modelu 1mm tělíska



Obr. 87. Vliv velikosti dotlaku na smrštění modelu zkušebního tělíska o tloušťce 1mm

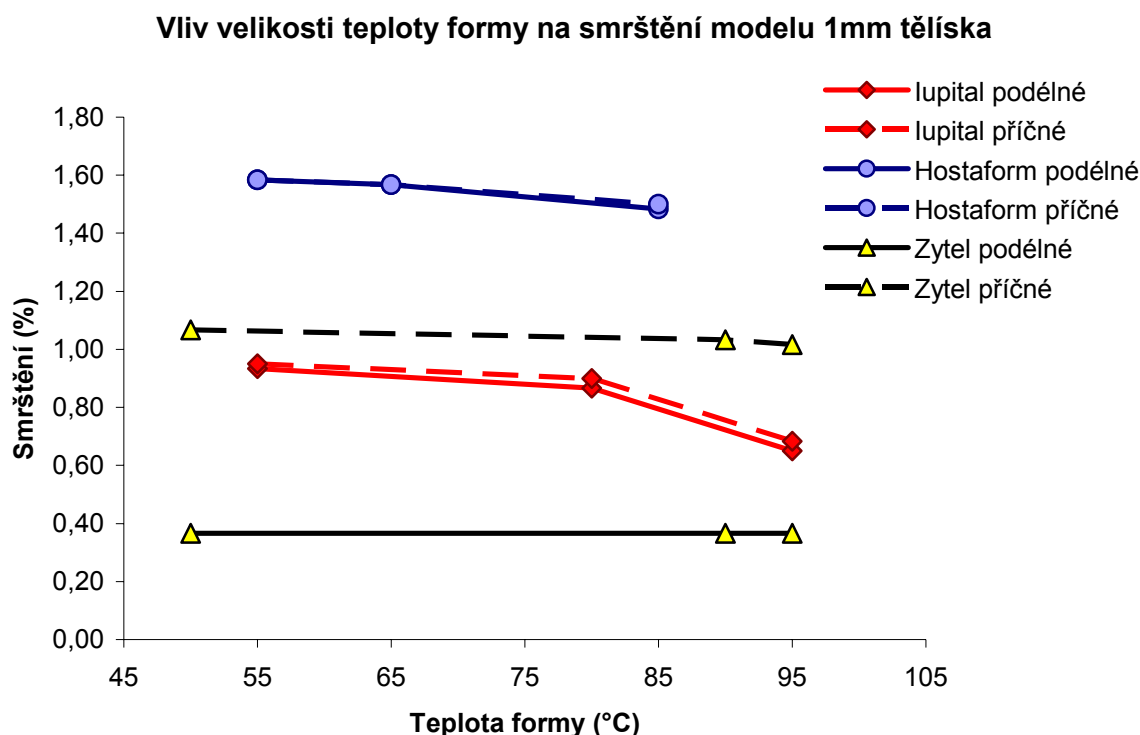
Vliv velikosti dotlaku na smrštění modelu zkušebního tělíska 2mm



Obr. 88. Vliv velikosti dotlaku na smrštění modelu zkušebního tělíska o tloušťce 2mm

Na Obr. 89. je zachycen vliv velikosti teploty formy na smrštění modelu tělíska o tloušťce 2mm. Všechny použité materiály reagují na zvyšující se teplotu formy poklesem jejich

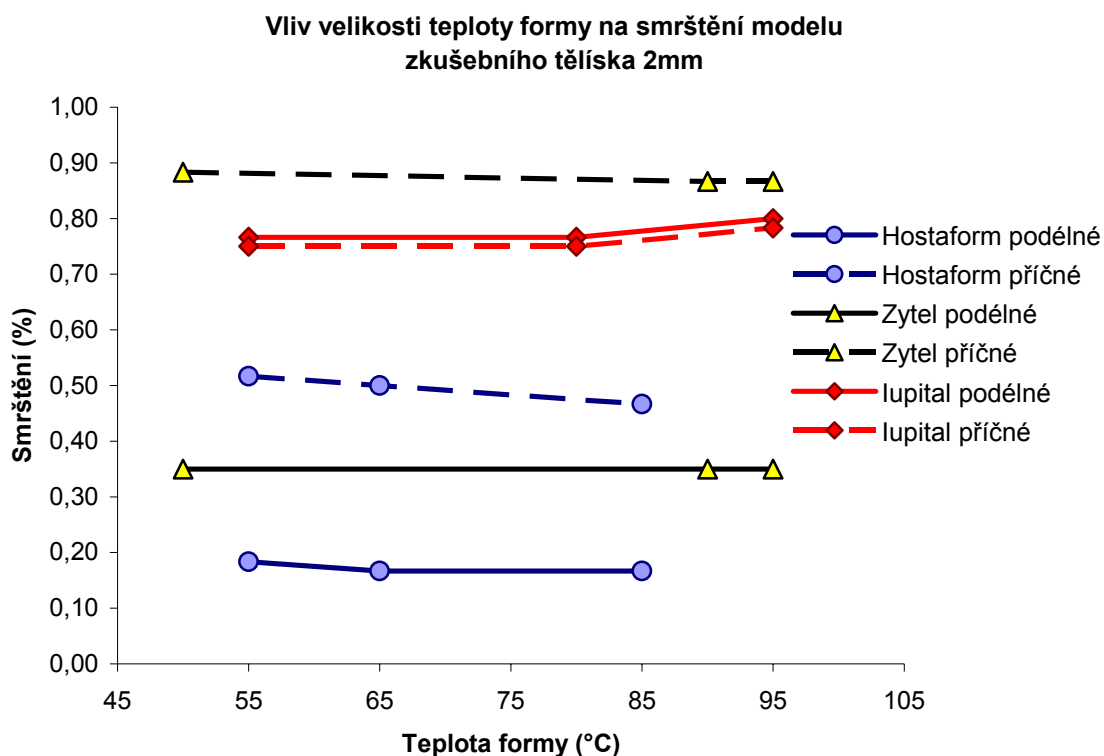
smrštění. Nejvyšší hodnoty smrštění vykazuje materiál *Hostaform C 13021* a nejnižší hodnoty podélného smrštění materiál *Zytel 70G35HSL RA4*, díky svému vyztužení skelným vláknem. U obou POM jsou opět jen nepatrné rozdíly podélného a příčného smrštění, z již výše uvedeného důvodu.



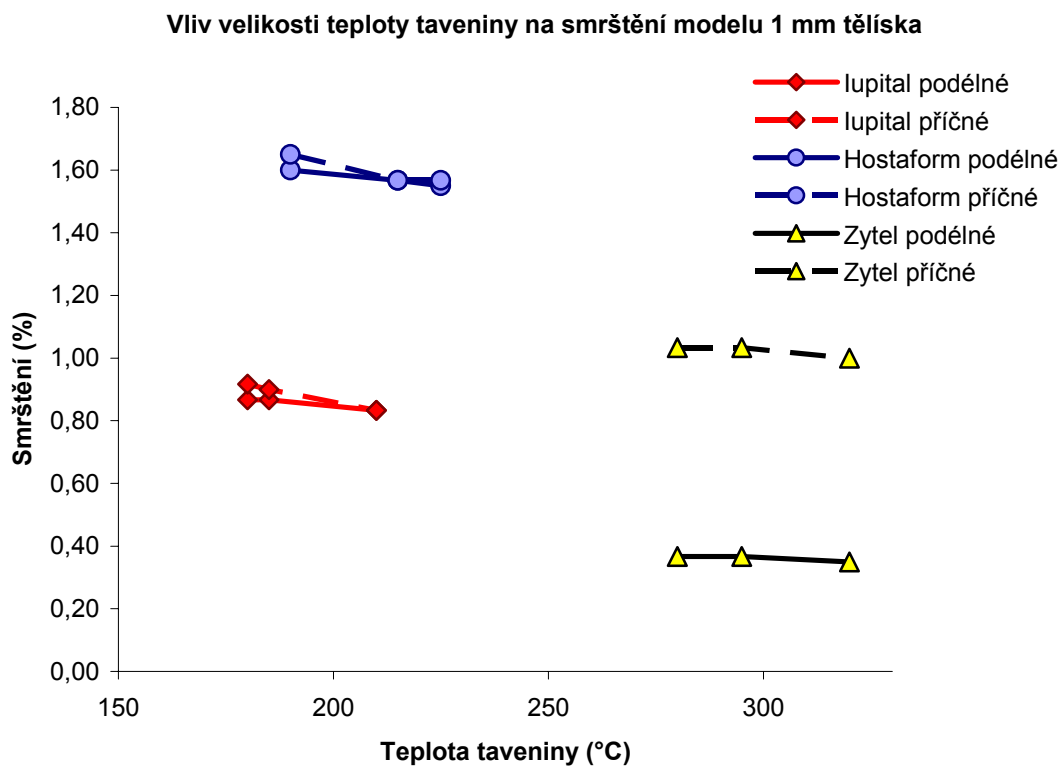
Obr. 89. Vliv velikosti teploty formy na smrštění modelu tělíska o tloušťce 2 mm

Na Obr. 91. je zobrazen vliv velikosti teploty formy na smrštění modelu zkušebního tělíska 2mm. Zde se materiál *Lupital F 20-03* chová opačně, než u tělíska o tloušťce 1mm a jeho smrštění se vzrůstající teplotou formy taktéž mírně roste. Materiál *Zytel 70G35HSL RA4* reaguje svým smrštěním na změnu teploty formy jen nepatrně a to mírným poklesem příčného smrštění, které je opět vyšší, než smrštění podélné. Materiál *Hostaform C 13021* je opět vlivem zřejmě špatného výpočtu naprosto mimo očekávané hodnoty. Hodnoty smrštění 2mm modelů jsou výrazně nižší, oproti modelům o tloušťce 1mm.

Na Obr. 91. je zachycen vliv velikosti teploty taveniny na smrštění modelu 1mm tělíska. Smrštění všech materiálů s rostoucí teplotou taveniny klesá. Nejvyššího smrštění dosahuje opět materiál *Hostaform C 13021* (kolem 1,6 %). Nejnižšího podélného, pak materiál *Zytel 70G35HSL RA4*.

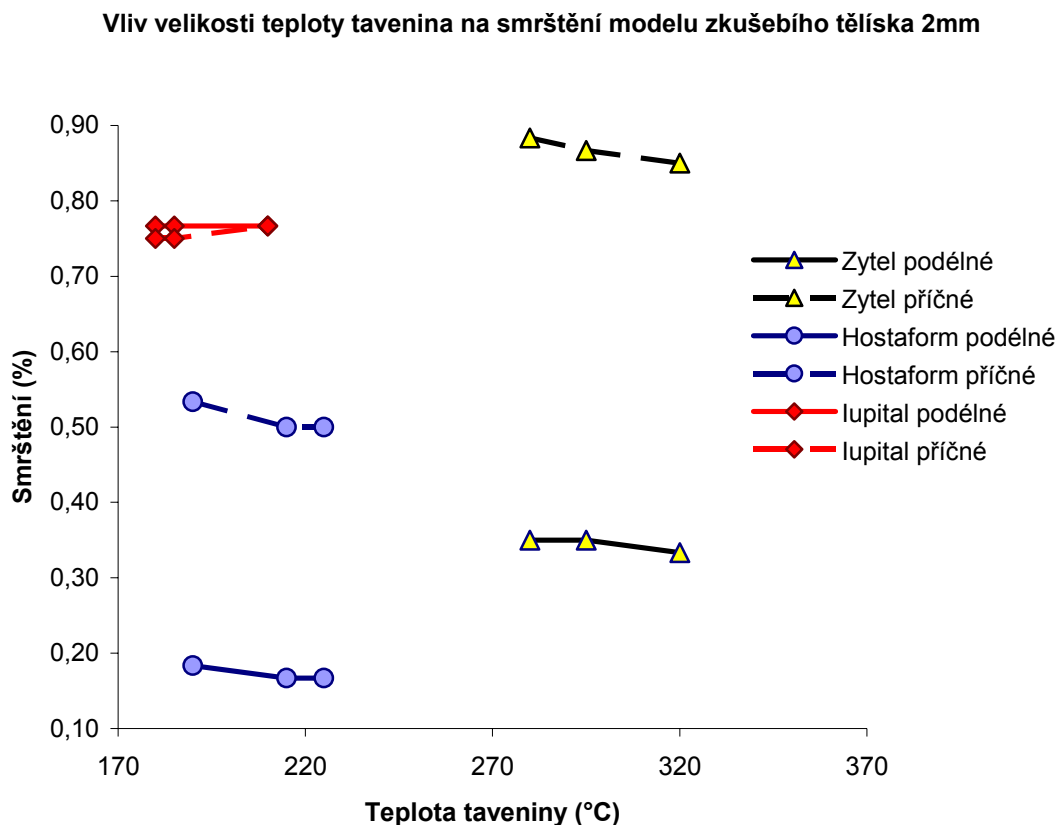


Obr. 90. Vliv velikosti teploty formy na smrštění modelu zkušebního tělíska 2mm



Obr. 91. Vliv velikosti teploty taveniny na smrštění modelu 1 mm tělíska

Na Obr. 92. je zachycen vliv velikosti teploty taveniny na smrštění modelu zkušebního tělíska 2mm. Hodnoty smrštění všech modelů jsou opět nižší, oproti 1mm modelu a materiál *Hostaform C 13021* je opět mimo předpokládané hodnoty.



Obr. 92. Vliv velikosti teploty taveniny na smrštění modelu zkušebního tělíska 2mm

Při analýze modelů zkušebních tělísek, bylo zjištěno, že modely (kromě modelu, kde byl použit materiál *Hostaform C 13021*, jehož analýza je zřejmě nevhodně provedena) o tloušťce 2mm, vykazují menší hodnoty smrštění, než modely o tloušťce 1mm a to u všech provedených analýz.

## 11.2 Moldflow analýza výrobků

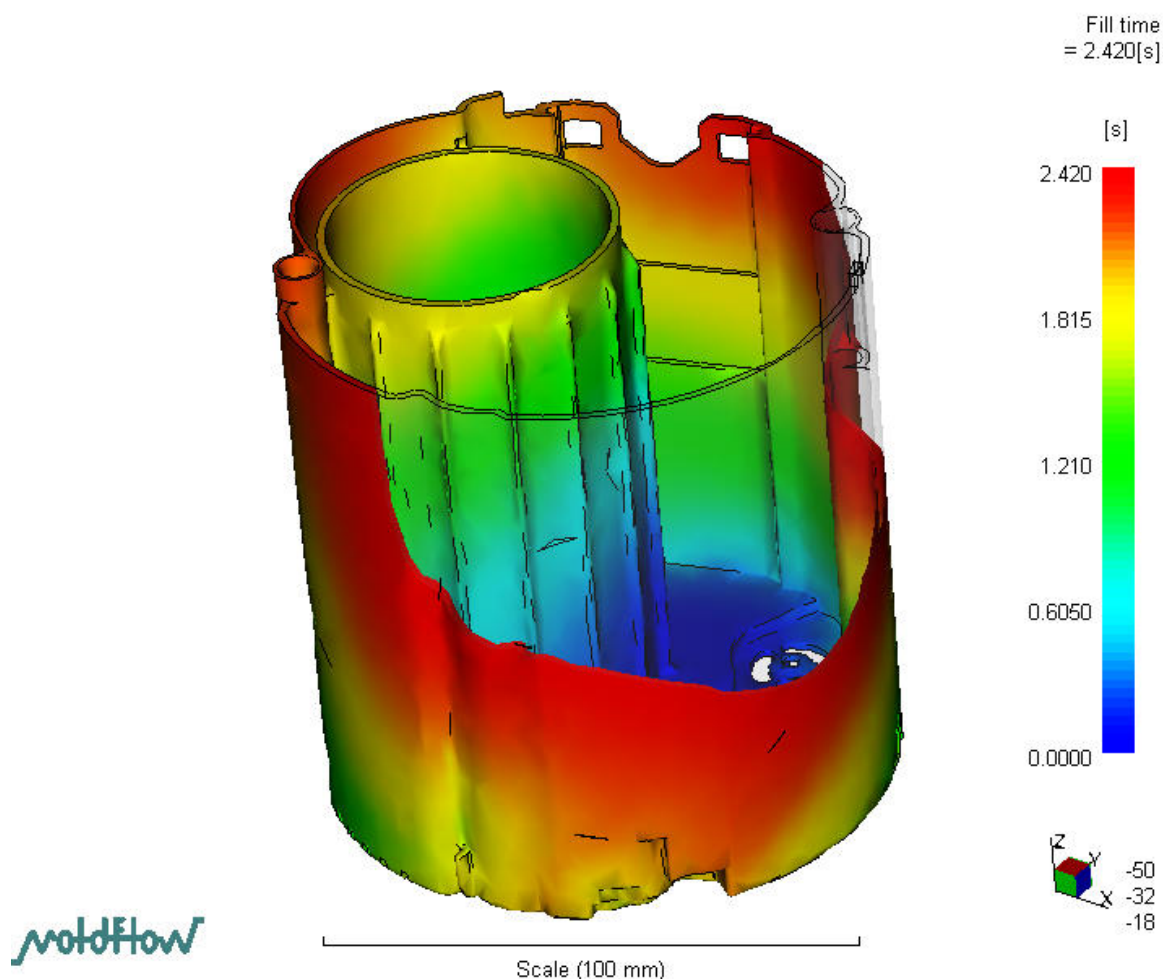
Pro Moldflow analýzu výrobků, byly použity 3D modely, získané od firmy Robert BOSCH v Českých Budějovicích. Jelikož se ale jedná o tvarově velmi komplikované součásti, vyskytly se problémy s jejich kvalitním vysítováním. Velké problémy činí například malé rádiusy. Tyto problematické oblasti se bohužel nepodařilo odstranit a tak byla síť upravována do značné míry „ručně“. Jednalo se zejména o velké rozdíly mezi výškou a šířkou použitých tetragonálních elementů.

## Výrobek A

### Parametry sítě výrobku A

|                                         |       |
|-----------------------------------------|-------|
| Počet uzlů                              | 19240 |
| Počet elementů                          | 38532 |
| Průměrný poměr výšky ku šířce elementu  | 4     |
| Maximální poměr výšky ku šířce elementu | 74    |
| Přizpůsobení sítě tvaru modelu          | 75%   |

Na Obr. 93. je zobrazena fáze plnění výrobku A. Jelikož byla při výrobě pořízena fotografie ne zcela naplněného výrobku (Obr. 94), je možné porovnat počítačovou studii plnění s reálným dějem. Počítačová studie pochopitelně nemůže postihnout různé nehomogenity materiálu a také je velmi závislá na kvalitě sítě a použitých reologických datech, z tohoto důvodu se do jisté míry vždy odlišuje od reality.



Obr. 93. Fáze plnění studie výrobku A

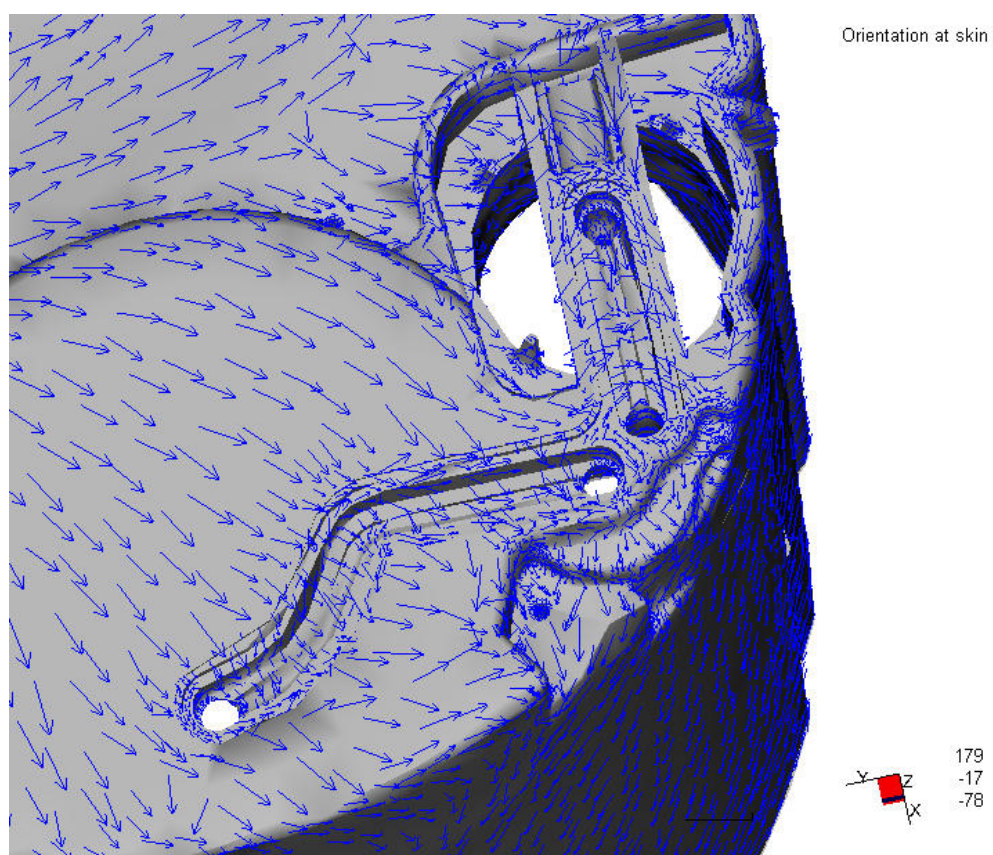


*Obr. 94. Reálné plnění výrobku A*

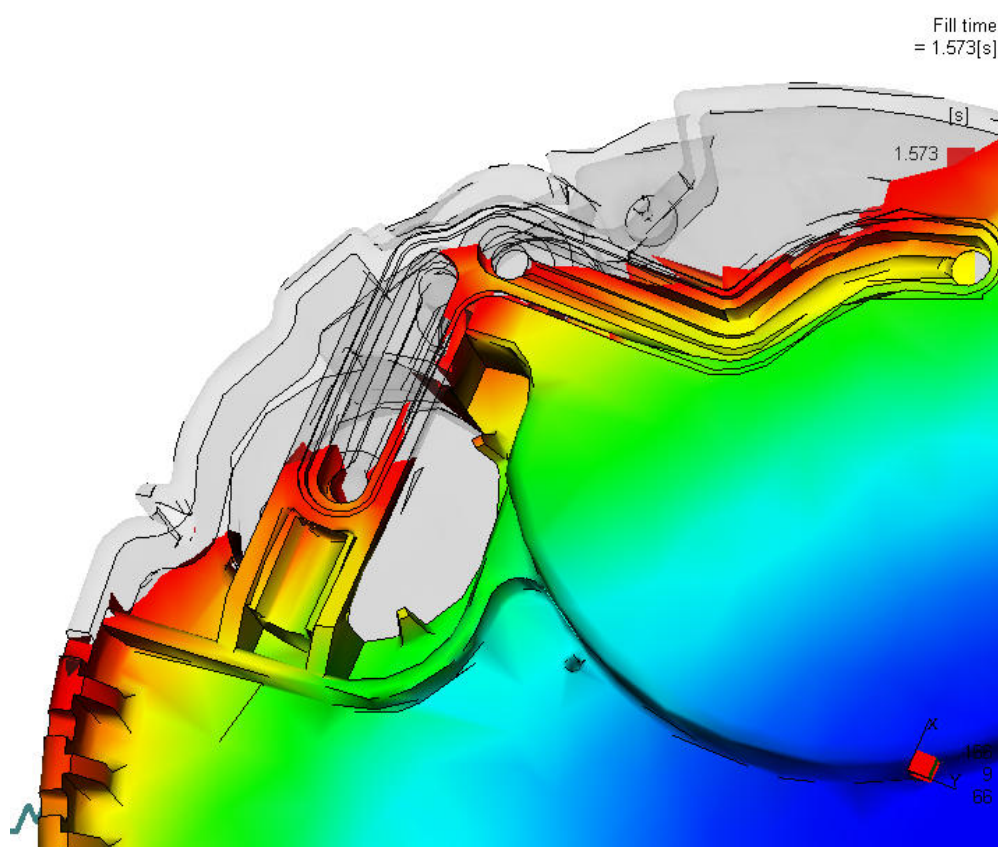
Na Obr. 95. je využito možnosti zobrazení orientace směru toku polymerní taveniny v dutině formy a orientace na povrchu formy. Obrázek je zaměřen na oblast kanálku, kde byla prováděna měření podélného a příčného smrštění.

Na Obr. 96. je detailně zobrazeno plnění oblasti kanálku, kde dle počítačové studie dochází ke vzniku studeného spoje.

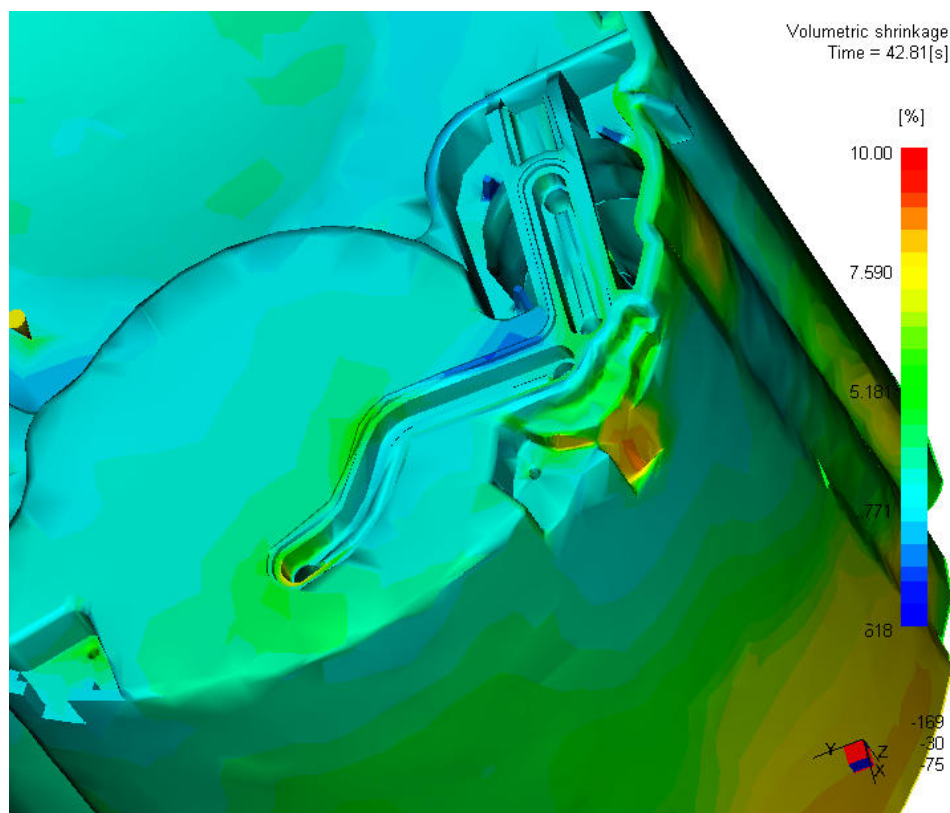
Poslední z obrázků, který se věnuje výrobku A je Obr. 97. na kterém je zobrazeno objemové smrštění výrobku A, taktéž v oblasti kanálku.



Obr. 95. Orientace ve směru toku taveniny



Obr. 96. Plnění v oblasti kanálku u výrobku A



Obr. 97. Objemové smrštění výrobku A

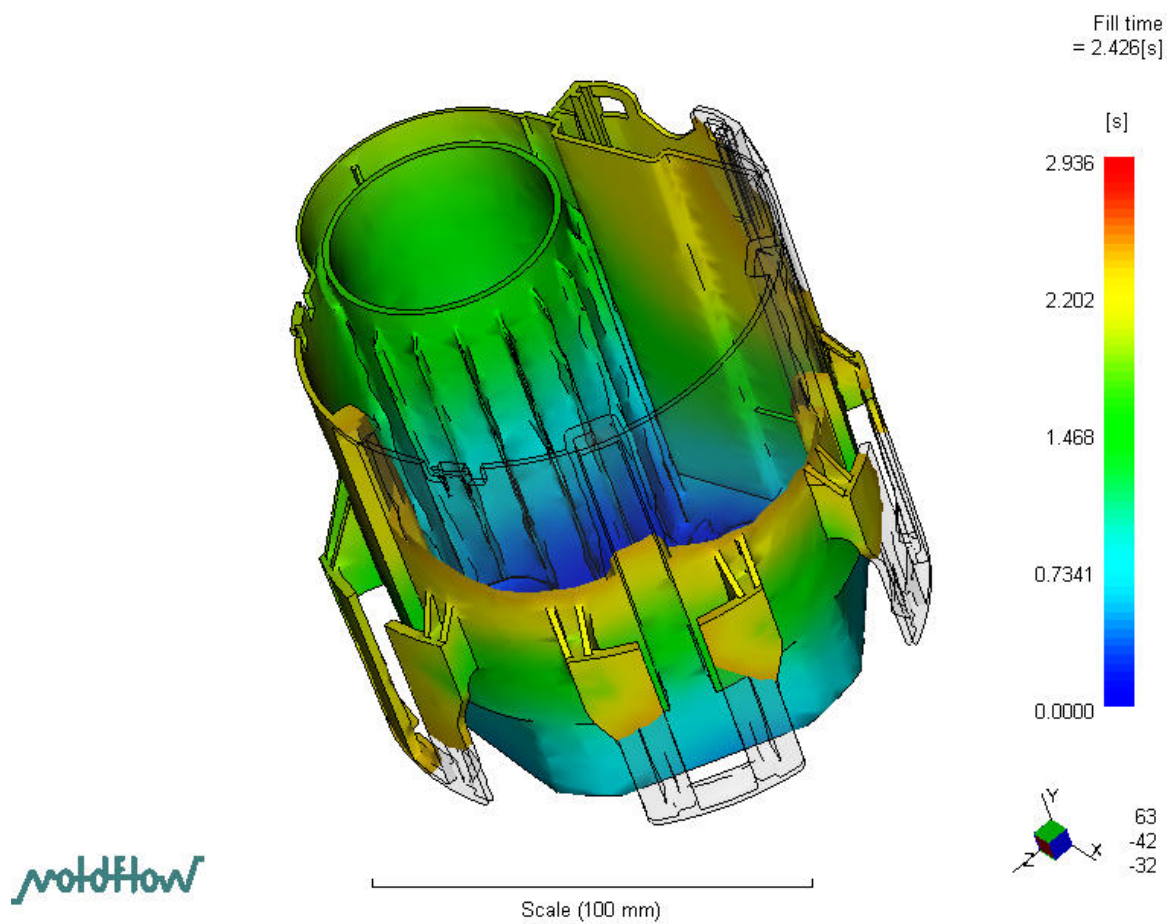
## Výrobek B

### Parametry sítě výrobku B

|                                         |       |
|-----------------------------------------|-------|
| Počet uzlů                              | 24110 |
| Počet elementů                          | 48280 |
| Průměrný poměr výšky ku šířce elementu  | 4     |
| Maximální poměr výšky ku šířce elementu | 49    |
| Přizpůsobení sítě tvaru modelu          | 77%   |

Na Obr. 98. je zachycena fáze plnění výrobku B. Jelikož byla při výrobě i tohoto výrobku pořízena fotografie ne zcela naplněného výrobku (Obr. 99), je možné porovnat počítačovou studii plnění s reálným dějem. Počítačová studie pochopitelně nemůže postihnout různé nehomogenity materiálu a také je velmi závislá na kvalitě sítě a použitých reologických datech, z tohoto důvodu se do jisté míry vždy odlišuje od reality.

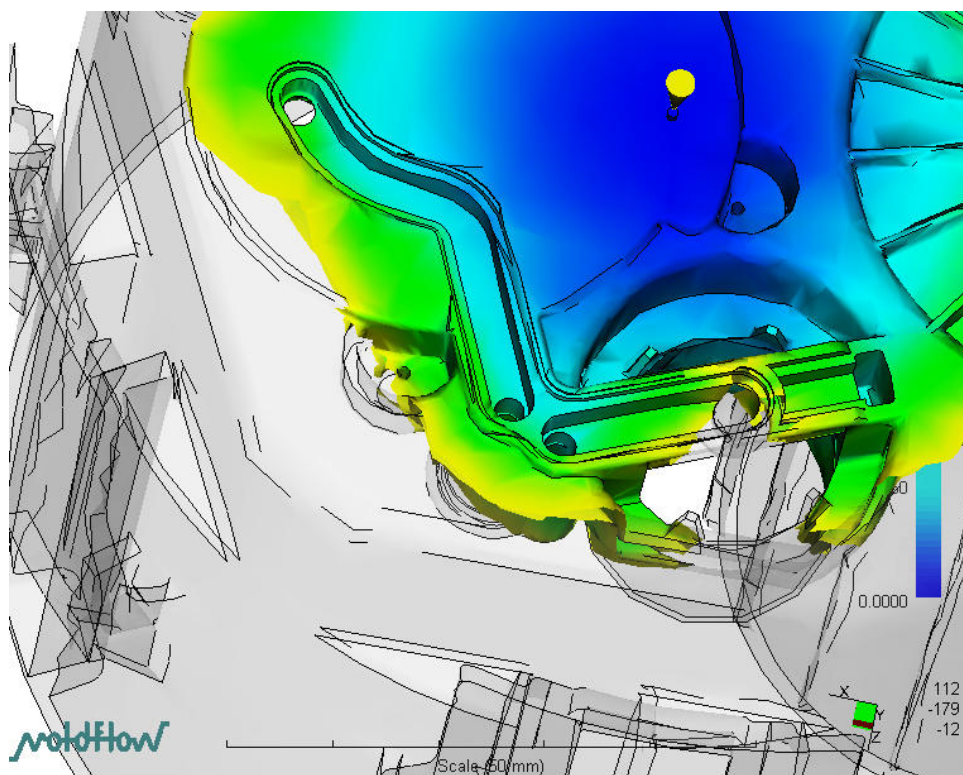
Na Obr. 100. je detailně zobrazeno plnění oblasti kanálku, kde dle počítačové studie dochází opět ke vzniku studeného spoje, tak jako tomu bylo u výrobku A.



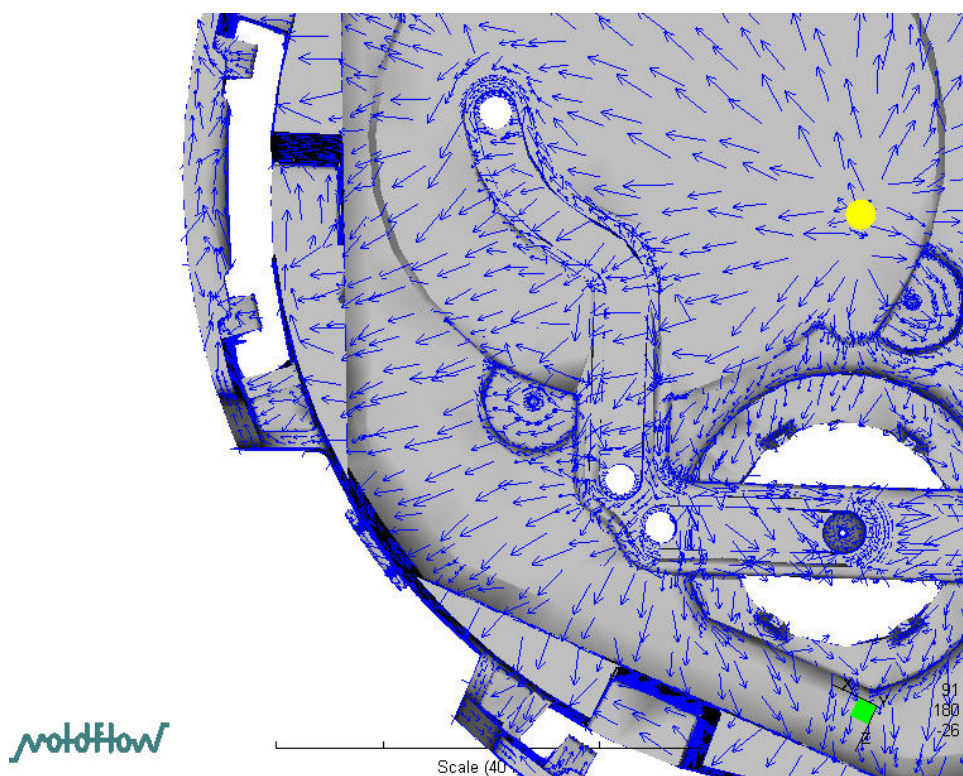
Obr. 98. Plnění výrobku B



Obr. 99. Skutečné plnění výrobku B



Obr. 100. Plnění oblasti kanálku výrobku B



Obr. 101. Orientace v oblasti kanálku výrobku B

Na Obr. 101. je opět využito možnosti zobrazení orientace směru toku polymerní taveniny v dutině formy a orientace na povrchu formy. Obrázek je taktéž zaměřen na oblast kanálku, kde byla prováděna měření podélného a příčného smrštění.

## ZÁVĚR

Na základě literární studie problematiky smršťování vstřikovaných dílů, byly připraveny a provedeny experimenty směřující k analýze vlivu technologických podmínek (teploty taveniny, teploty formy a velikosti dotlaku), na velikost jejich smrštění.

Za tímto účelem byla v první fázi vyrobena speciální zkušební tělíska pro určení podélného a příčného smrštění, o tloušťce stěn 1 a 2mm, a to ze tří materiálů (POM - *Hostaform C 13021*, *Iupital F 20-03* a PA66 - *Zytel 70G35HSL RA4*). Tato tělíska byla vyrobena při různých hodnotách výše uvedených technologických podmínek a bylo provedeno měření velikosti jejich podélného a příčného smrštění. Analýzou výsledků bylo zjištěno, že u materiálů POM dosahují větších hodnot smrštění tělíska o nižší tloušťce stěny. Zároveň je u těchto materiálů vyšší příčné smrštění, oproti podélnému. Tento rozdíl se snižuje při zvyšování velikosti dotlaku, teploty formy i teploty taveniny. Velikost podélného i příčného smrštění obou POM klesá se vzrůstajícím dotlakem, s teplotou taveniny taktéž klesá, jen u zkušebních tělísek o tloušťce 2mm, vyrobených z materiálu *Iupital F 20-03*, smrštění narůstá. Vliv velikosti teploty formy je komplikovaný a souvisí převážně s krystalizací a uspořádáním vnitřní struktury vstříknutého materiálu. Převážně byla zaznamenána tendence k nárůstu velikosti smrštění, se vzrůstající teplotou formy.

Skelným vláknem plněný PA66 *Zytel 70G35HSL RA4* vykazuje výrazně nižší hodnoty velikosti smrštění, než oba předchozí POM. Zároveň je hodnota jeho podélného smrštění, oproti příčnému nižší a to zejména díky orientaci skelných vláken ve směru toku taveniny při plnění dutiny formy. Lze konstatovat, že nejvýznamnější vliv na velikost smrštění všech použitých materiálů a tělísek, má velikost použitého dotlaku, nejmenší pak velikost teploty taveniny.

Ve druhé fázi byly vyrobeny reálné díly a to z obou výše uvedených materiálů POM. Tyto díly byly označeny jako *A* a *B* a měření jejich smrštění bylo zaměřeno na tvarově komplikovanou oblast kanálku. Dominantním rozměrem je vzdálenost středů definovaných kružnic K1 a K2, která se zvyšujícím se dotlakem u obou dílů narůstá a s vyšší teplotou formy klesá. U dílu *A* tato vzdálenost s teplotou taveniny taktéž klesá, ovšem u dílu *B* byl zaznamenán zvrát poklesu, při teplotě taveniny 210°C, kdy od této teploty nastává opět nárůst vzdálenosti, tedy pokles velikosti smrštění. Bylo provedeno též měření dalších

rozměrů, jejichž vztah k nastaveným technologickým podmínkám je značně komplikovaný. Nejvýznamnější vliv na změnu rozměrů kanálku má opět velikost použitého dotlaku, nejmenší pak teplota taveniny.

Bylo provedeno též vážení všech výrobků a lze konstatovat, že se zvyšující se teplotou formy i taveniny hmotnost všech výrobků klesá, se zvyšujícím se dotlakem naopak roste. Dominantním vlivem je opět dotlak, při jehož změně bylo dosaženo rozdílu až 7,4g u dílu *B*. Toto chování souvisí s volným objemem polymeru v tavenině a lze je též odvodit z pvT diagramů.

Na závěr byly vytvořeny počítačové simulace chování 3D modelů zkušebních tělísek i obou dílů v programu *Moldflow Plastics Insight 5.1*. Smrštění modelů zkušebních tělísek bylo určeno z deformovaných modelů přímo v programu *Moldflow* a posléze bylo vyneseno do grafických závislostí, z nichž byly zjištěny tyto skutečnosti: Modely (kromě modelu, kde byl použit materiál *Hostaform C 13021*, jehož analýza je zřejmě nevhodně provedena) o tloušťce 2mm, vykazují menší hodnoty smrštění, než modely o tloušťce 1mm a to u všech provedených analýz. Tato skutečnost byla zjištěna i u reálných výstřiků. Všechny modely vykazovaly výrazně nižší hodnoty smrštění, než tomu bylo u reálných zkušebních tělísek. Oba materiály POM nemají v materiálovém listu v programu *Moldflow Plastics Insight 5.1* zadány hodnoty pro podélné a příčné smrštění a jejich smrštění je tedy určováno z pvT diagramu. Z tohoto důvodu u nich prakticky nebyl naměřen rozdíl mezi podélným a příčným smrštěním.

Moldflow simulace 3D modelů dílů *A* a *B* byla, vzhledem k problémům vzniklým při vytvoření sítě, provedena spíše orientačně a je možné z ní usuzovat například na způsob plnění jednotlivých dílů, orientaci molekul polymeru a lokaci studených spojů.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- 1) ROSATO, Dominic V.; ROSATO, Donald V.; ROSATO, Marlene G.: *Injection Molding Handbook 3 th. ed.* Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2000. 1457 s. ISBN 0-7923-8619-1.
- 2) FISCHER, Jerry M. *Handbook of Molded Part Shrinkage and Warpage* 1 st. ed. Norwich: Plastics Design Library, 2003. 266 s. ISBN 1-884207-72-3.
- 3) MLEZIVA, Josef. *Polymery - Výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 1. vyd. Brno : Sobotáles, 1993. 528 s. ISBN 80-85920-72-7.
- 4) BOBČÍK, Ladislav. *Formy pro zpracování plastů : I. díl - Vstřikování termoplastů*. 2. upr. vyd. Brno : UNIPLAST BRNO, 1999. 134 s.
- 5) MCCRUM, N., BUCKLEY, C., BUCKNALL, C. Principles of Polymer Engineering. *Journal of Polymers and the Environment*. 2001, vol. 9, no. 2, s. 49-55.
- 6) ZÖLNER, Olaf. Process Variables as Production Cost Factors in the Injection Moulding of Thermoplastics : Melt, Mould, pvT Diagrams. *Application Technology Information : Bayer*. 1994, ATI 916e, s. 1-15.
- 7) ROSATO, Dominic V. *Rosato's Plastics Encyclopedia and Dictionary*. 1st edition. Massachusetts : Hanser Gardner Publications, 1993. 884 s. ISBN 1-56990-088-4.
- 8) MALLOY, Robert A. *Plastics Part Design for Injection Molding*. 1st edition. München : Die Deutsche Bibliothek, 1994. 668 s. ISBN 1-56990-129-8.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

Seznam:

|                   |                                    |
|-------------------|------------------------------------|
| PA                | Polyamid                           |
| POM               | Polyoxometylen                     |
| T <sub>g</sub>    | Teplota skelného přechodu polymeru |
| T <sub>f</sub>    | Teplota tečení polymeru            |
| T <sub>m</sub>    | Teplota tání polymeru              |
| V <sub>mold</sub> | Objem dutiny formy                 |
| V <sub>part</sub> | Objem ochlazeného výstřiku         |
| S <sub>v</sub>    | Objem dutiny formy                 |
| ρ <sub>m</sub>    | Hustota taveniny                   |
| ρ <sub>m</sub>    | Hustota tuhé fáze                  |
| ν                 | Poissonova konstanta               |
| E                 | Youngův modul pružnosti v tahu     |
| G                 | Modul pružnosti ve smyku           |

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 1. Nákres vstřikovacího stroje <sup>[1]</sup> .....                                                                                                  | 9  |
| Obr. 2. Schéma šnekového vstřikovacího stroje s formou a popisem základních částí <sup>[1]</sup> ..                                                       | 10 |
| Obr. 3. Vstřikovací cyklus – plastikace <sup>[1]</sup> .....                                                                                              | 10 |
| Obr. 4. Fáze plnění, doplňování a chlazení <sup>[1]</sup> .....                                                                                           | 10 |
| Obr. 5. Vyhození výstřiku <sup>[1]</sup> .....                                                                                                            | 11 |
| Obr. 6. Teplotní profil taveniny v dutině formy při vstřikování <sup>[5]</sup> .....                                                                      | 12 |
| Obr. 7. Graf závislosti objemu na teplotě amorfního a semikrystalického materiálu <sup>[6]</sup> .....                                                    | 14 |
| Obr. 8. Teplotní profil v průřezu stěny výstřiku, v různém čase, při plnění formy <sup>[6]</sup> .....                                                    | 16 |
| Obr. 9. Molekulová orientace u stěny dutiny formy při plnění taveninou <sup>[5]</sup> .....                                                               | 18 |
| Obr. 10. Průřez stěnou výstřiku skelným vláknem plněného polypropylenu <sup>[5]</sup> .....                                                               | 21 |
| Obr. 11. Podélné a příčné smrštění <sup>[8]</sup> .....                                                                                                   | 25 |
| Obr. 12. Podélné a příčné smrštění ve formě, v závislosti na tloušťce stěny – PBT (30% plnění skelným vláknem) <sup>[2]</sup> .....                       | 27 |
| Obr. 13. Závislost velikosti smrštění na koncentraci plnění skelným vláknem a následná možná deformace jednoduchého výstřiku – disku <sup>[8]</sup> ..... | 27 |
| Obr. 14. Příklad hybridního kompozitu <sup>[7]</sup> .....                                                                                                | 28 |
| Obr. 15. Zjednodušený pvT diagram polykarbonátu <sup>[2]</sup> .....                                                                                      | 29 |
| Obr. 16. pvT diagram neplněného amorfního polykarbonátu, .....                                                                                            | 30 |
| Obr. 17. pvT diagram polykarbonátu, zobrazující závislost .....                                                                                           | 31 |
| Obr. 18. Typický pvT diagram semikrystalického polymeru, .....                                                                                            | 32 |
| Obr. 19. pvT křivka ohřevu a chlazení semikrystalického polymeru <sup>[2]</sup> .....                                                                     | 32 |
| Obr. 20. Průběh tlaku v dutině formy během <sup>[8]</sup> .....                                                                                           | 33 |
| Obr. 21. Jednoduchý model průběhu tlaku v dutině formy, během cyklu <sup>[8]</sup> .....                                                                  | 33 |
| Obr. 22. Rozfázovaný pvT diagram. <sup>[2]</sup> .....                                                                                                    | 34 |
| Obr. 23. Jednotlivé fáze vstřikovacího procesu, korespondující s obr. 28. a 29. ....                                                                      | 35 |
| Obr. 24. Efekt velikosti dotlaku na smrštění <sup>[2]</sup> .....                                                                                         | 35 |
| Obr. 25. Vliv technologických podmínek nastavených na vstřikovacím stroji, na vlastnosti termoplastu <sup>[2]</sup> .....                                 | 38 |
| Obr. 26. Zpracovatelské okno dané teplotou taveniny <sup>[2]</sup> .....                                                                                  | 41 |
| Obr. 27. Trojrozměrné zpracovatelské okno <sup>[2]</sup> .....                                                                                            | 41 |
| Obr. 28. Závislost velikosti smrštění na teplotě taveniny <sup>[2]</sup> .....                                                                            | 42 |
| Obr. 29. pvT diagram materiálu Hostaform C 13021, uváděný výrobcem .....                                                                                  | 47 |

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 30. pvT diagram materiálu Iupital F 20-03, uváděný výrobcem .....                                                      | 48 |
| Obr. 31. pvT diagram materiálu Zytel 70G35HSL RA4, uváděný výrobcem.....                                                    | 50 |
| Obr. 32. Zkušební tělísko pro určení smrštění.....                                                                          | 51 |
| Obr. 33. Rozměry zkušebního tělíska tl. 1mm, pro určení smrštění.....                                                       | 52 |
| Obr. 34. Rozměry zkušebního tělíska tl. 2 mm, pro určení smrštění.....                                                      | 52 |
| Obr. 35. Vliv velikosti dotlaku na smrštění zkušebních tělísek materiálu Hostaform C 13021 .....                            | 54 |
| Obr. 36. Vliv velikosti teploty formy na smrštění zkušebních tělísek Hostaform C 13021                                      | 54 |
| Obr. 37. Vliv velikosti teploty taveniny na smrštění zkušebních tělísek Hostaform C 13021 .....                             | 55 |
| Obr. 38. Vliv velikosti dotlaku na smrštění zkušebních tělísek Iupital F 20-03.....                                         | 56 |
| Obr. 39. Vliv velikosti teploty formy na podélné a příčné smrštění zkušebních tělísek Iupital F 20-03 .....                 | 57 |
| Obr. 40. Vliv velikosti teploty taveniny na smrštění zkušebních tělísek Iupital F20-03.....                                 | 58 |
| Obr. 41. Vliv velikosti dotlaku na smrštění zkušebních tělísek Zytel 70G35HSL RA4 .....                                     | 59 |
| Obr. 42. Vliv velikosti teploty formy na smrštění zkušebních tělísek Zytel 70G35HSL RA4 .....                               | 60 |
| Obr. 43. Vliv velikosti teploty taveniny na smrštění zkušebních tělísek Zytel 70G35HSL RA4.....                             | 61 |
| Obr. 44. Vliv velikosti dotlaku na smrštění zkušebních tělísek 1 mm .....                                                   | 63 |
| Obr. 45. Vliv velikosti teploty formy na smrštění zkušebních tělísek 1mm .....                                              | 63 |
| Obr. 46. Vliv velikosti teploty taveniny na smrštění zkušebních tělísek 1 mm .....                                          | 64 |
| Obr. 47. 3D model výrobku A .....                                                                                           | 65 |
| Obr. 48. Měřené rozměry kanálku A .....                                                                                     | 66 |
| Obr. 49. Měřicí přístroj MAHR VISION MS 222.....                                                                            | 67 |
| Obr. 50. Závislost vzdálenosti kružnic K1 a K2 na velikosti dotlaku u vzorku A .....                                        | 68 |
| Obr. 51. Závislost vzdálenosti kružnic K1 a K2 na velikosti teploty formy u vzorku A ....                                   | 68 |
| Obr. 52. Závislost vzdálenosti kružnic K1 a K2 na velikosti teploty formy u vzorku A ....                                   | 69 |
| Obr. 53. Vliv velikosti teploty formy, teploty taveniny a velikosti dotlaku, na vzdálenost kružnic K1 a K2 u vzorku A ..... | 70 |
| Obr. 54. Závislost průměru kružnic K1 a K2 na velikosti dotlaku u vzorku A.....                                             | 71 |
| Obr. 55. Závislost průměru kružnic K1 a K2 na teplotě formy u vzorku A.....                                                 | 71 |
| Obr. 56. Závislost průměru kružnic K1 a K2 na velikosti teploty taveniny u vzorku A .....                                   | 72 |

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 57. Vliv velikosti teploty formy, teploty taveniny a velikosti dotlaku, na průměr kružnic K1 a K2 u vzorku A ..... | 72 |
| Obr. 58. Závislost šířky kanálků na velikosti dotlaku u vzorku A .....                                                  | 73 |
| Obr. 59. Závislost šířky kanálků na velikosti teploty formy u vzorku A .....                                            | 74 |
| Obr. 60. Závislost šířky kanálků na velikosti teploty taveniny u vzorku A .....                                         | 74 |
| Obr. 61. Vliv teploty formy, teploty taveniny a velikosti dotlaku na šířku kanálků u vzorku A.....                      | 75 |
| Obr. 62. Vliv velikosti dotlaku na hmotnost výrobku A .....                                                             | 76 |
| Obr. 63. Vliv velikosti teploty formy na hmotnost výrobku A.....                                                        | 76 |
| Obr. 64. Vliv velikosti teploty taveniny na hmotnost výrobku A.....                                                     | 77 |
| Obr. 65. Výrobek B.....                                                                                                 | 78 |
| Obr. 66. Měřené rozměry kanálku B .....                                                                                 | 78 |
| Obr. 67. Vliv velikosti dotlaku na vzdálenost kružnic K1 a K2 výrobku B.....                                            | 81 |
| Obr. 68. Vliv velikosti teploty formy na vzdálenost kružnic K1 a K2 výrobku B.....                                      | 81 |
| Obr. 69. Vliv velikosti teploty taveniny na vzdálenost kružnic K1 a K2 výrobku B .....                                  | 82 |
| Obr. 70. Znázornění vlivu jednotlivých technologických podmínek na vzdálenost kružnic K1 a K2.....                      | 82 |
| Obr. 71. Vliv velikosti dotlaku na rozměry kružnic K1 a K2 výrobku B.....                                               | 83 |
| Obr. 72. Vliv velikosti teploty formy na rozměry kružnic K1 a K2 výrobku B.....                                         | 84 |
| Obr. 73. Vliv velikosti teploty taveniny na rozměry kružnic K1 a K2 výrobku B.....                                      | 84 |
| Obr. 74. Znázornění vlivu jednotlivých technologických podmínek na rozměry kružnic K1 a K2.....                         | 85 |
| Obr. 75. Vliv velikosti dotlaku na rozměry kanálků výrobku B.....                                                       | 86 |
| Obr. 76. Vliv velikosti teploty formy na rozměry kanálků výrobku B.....                                                 | 86 |
| Obr. 77. Vliv velikosti teploty taveniny na rozměry kanálků výrobku B.....                                              | 87 |
| Obr. 78. Znázornění vlivu jednotlivých technologických podmínek na rozměry kanálků u výrobku B .....                    | 88 |
| Obr. 79. Vliv velikosti dotlaku na hmotnost výrobku B.....                                                              | 89 |
| Obr. 80. Vliv teploty formy na hmotnost výrobku B.....                                                                  | 89 |
| Obr. 81. Vliv velikosti teploty taveniny na hmotnost výrobku B.....                                                     | 90 |
| Obr. 82. Plnění modelu zkušebního tělíska o tloušťce 1mm .....                                                          | 92 |
| Obr. 83. Deformace modelu zkušebního tělíska o tloušťce 1mm, při použití materiálu Iupital F 20-03; 10x zvětšeno .....  | 93 |

|                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Obr. 84. Deformace modelu zkušebního tělíska o tloušťce 1mm, při použití materiálu Zytel 70G35HSL RA4; 20x zvětšeno .....    | 93  |
| Obr. 85. Orientace skelných vláken v modelu zkušebního tělíska o tloušťce 1mm při plnění materiálem Zytel 70G35HSL RA4 ..... | 94  |
| Obr. 86. Měření výsledných rozměrů modelu zkušebního tělíska o tloušťce 1mm z materiálu Iupital F 20-03 .....                | 94  |
| Obr. 87. Vliv velikosti dotlaku na smrštění modelu zkušebního tělíska o tloušťce 1mm ...                                     | 96  |
| Obr. 88. Vliv velikosti dotlaku na smrštění modelu zkušebního tělíska o tloušťce 2mm ...                                     | 96  |
| Obr. 89. Vliv velikosti teploty formy na smrštění modelu tělíska o tloušťce 2 mm .....                                       | 97  |
| Obr. 90. Vliv velikosti teploty formy na smrštění modelu zkušebního tělíska 2mm .....                                        | 98  |
| Obr. 91. Vliv velikosti teploty taveniny na smrštění modelu 1 mm tělíska .....                                               | 98  |
| Obr. 92. Vliv velikosti teploty taveniny na smrštění modelu zkušebního tělíska 2mm .....                                     | 99  |
| Obr. 93. Fáze plnicí studie výrobku A .....                                                                                  | 100 |
| Obr. 94. Reálné plnění výrobku A .....                                                                                       | 101 |
| Obr. 95. Orientace ve směru toku taveniny .....                                                                              | 102 |
| Obr. 96. Plnění v oblasti kanálku u výrobku A .....                                                                          | 102 |
| Obr. 97. Objemové smrštění výrobku A .....                                                                                   | 103 |
| Obr. 98. Plnění výrobku B .....                                                                                              | 104 |
| Obr. 99. Skutečné plnění výrobku B .....                                                                                     | 104 |
| Obr. 100. Plnění oblasti kanálku výrobku B .....                                                                             | 105 |
| Obr. 101. Orientace v oblasti kanálku výrobku B .....                                                                        | 105 |

**SEZNAM TABULEK**

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tab. 1. Vliv technologických podmínek na smrštění výstřiku .....              | 19 |
| Tab. 2. Rozsah parametrů použitý pro zkušební tělíska Hostaform C 13021 ..... | 53 |
| Tab. 3. Rozsah parametrů použitý pro zkušební tělíska Iupital F 20-03 .....   | 56 |
| Tab. 4. Rozsah parametrů použitý pro zkušební tělíska Zytel 70G35HSL RA4..... | 59 |
| Tab. 5. Technická data stroje ENGEL VICTORY 750/150 .....                     | 65 |
| Tab. 6. Proměnné technologické podmínky vzorku A .....                        | 66 |
| Tab. 7. Technická data stroje ENGEL ES 1350 / 400 HL.....                     | 79 |
| Tab. 8. Proměnné technologické podmínky vzorku B.....                         | 79 |