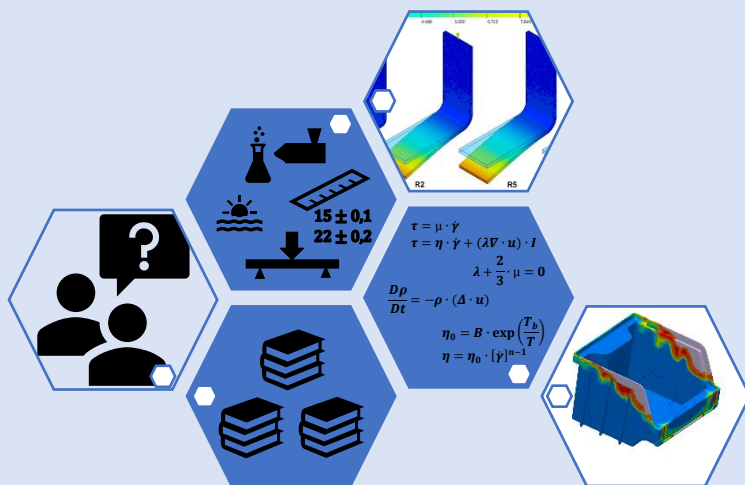


# KONSTRUKCE PLASTOVÝCH DÍLŮ S VYUŽITÍM MOLDFLOW ANALÝZ



# KONSTRUKCE PLASTOVÝCH DÍLŮ S VYUŽITÍM MOLDFLOW ANALÝZ

**Autor:** Ing. Pavel Brdlík, Ph.D.

**Recenzent:** Ing. Ondřej Kotera Ph.D., Fraunhofer-Institut für  
Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU

Ing. Jakub Zeman, UNIPLAST Pardubice, spol.s.r.o

**Editor:** Ing. Jan Novák

© Ing. Pavel Brdlík, Ph.D. (Technická univerzita v Liberci) - 2024

**ISBN 978-80-7494-699-8**

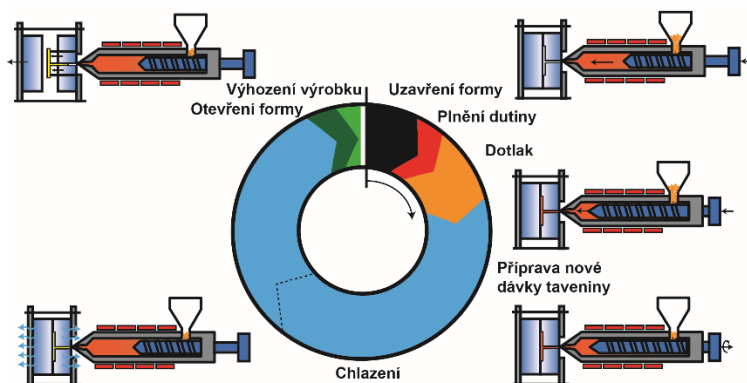
# PŘEDMLUVA

V současné době existuje řada cizojazyčných publikací zabývajících se konstrukcí plastových dílů, ve kterých je tato problematika velmi obsáhle rozebírána z různých úhlu pohledu (materiálové, pevnostní, technologické hledisko, aj.). Naproti tomu v českém jazyce existují pouze jednotky publikací či veřejně dostupných podkladů. Společným jmenovatelem všech výše uvedených děl je příliš velká obecnost. Pro čtenáře je velmi obtížné si dané informace vzájemně propojit či určit jejich význam. Proto je jejich využití mnohdy pro praxi velmi omezené. Cílem této publikace je vytvořit srozumitelný pohled na konstrukci plastových dílů technologie vstřikování, kde jsou jednotlivé aspekty podrobněji rozebrány a analyzovány s využitím „moldflow“ analýz. Tyto analýzy umožňují vizualizaci probíhajících kinetických, termo-dynamických a dalších dějů zpracovatelského procesu. Jedná se o efektivní nástroj nejen pro konstrukční optimalizaci výrobku, nýbrž i pro optimalizaci procesu či dimenzování částí formy. Předkládaná skripta počítají se znalostí problematiky plastů a jejich zpracování. Proto zde tato problematika není podrobněji rozebírána. Přesto, že vybrané základní pojmy technologie vstřikování plastů jsou vysvětleny v úvodní části publikace (základní pojmy), je nejprve doporučeno podrobnější studium vlivu problematiky polymerních materiálů, strojů, forem a technologických parametrů na kvalitu výroby.

Pavel Brdlík

# ZÁKLADNÍ POJMY

## Vstřikovací stroj a jeho funkce



Vstřikovací cyklus je sestaven ze sledu na sebe navazujících operací, při kterých postupně dochází k tavení vstupní suroviny (granulátu) otáčejícím se šnekem stroje, její homogenizaci, plnění taveniny do dutiny formy (pod vysokým tlakem), doplňování taveniny (dotlak) ve fázi odvodu tepelné energie (eliminaci smrštění a deformací) a odformování výrobku. V okamžiku zatuhnutí přívodního kanálu (vtoku), již není možné aplikovat dotlak. Proto je čas v průběhu solidifikace výrobku využit k přípravě nové dávky taveniny. Výhodou technologie vstřikování je oproti ostatním zpracovatelským technologiím plastů vysoká produktivita a reprodukovatelnost výroby.

Z hlediska výrobní kvality je u vstřikovacího stroje důležitých mnoho faktorů. Pravděpodobně mezi ty nejdůležitější patří přesnost řízení pohybu šneku (vstřikovací dávky). Mezi další důležité faktory patří schopnost stroje

reflektovat nastavené procesní parametry a jejich stabilita. Více informací o problematice technologie vstřikování naleznete například v:

- [1] BĚHÁLEK, Luboš; BRDLÍK, Pavel; BORŮVKA, Martin a LENFELDOVÁ, Irena. Úvod do technologií zpracování plastů. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2019. ISBN 978-80-7494-460-4.
- [2] LENFELD, Petr. Technologie vstřikování. Verze knihy: 18. [Online]: [Code Creator], 2015. ISBN 978-80-88058-72-4.
- [3] ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [4] ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů 2. Praha: Grada Publishing, 2021. ISBN 978-80-271-1294-4.

### Procesních parametry

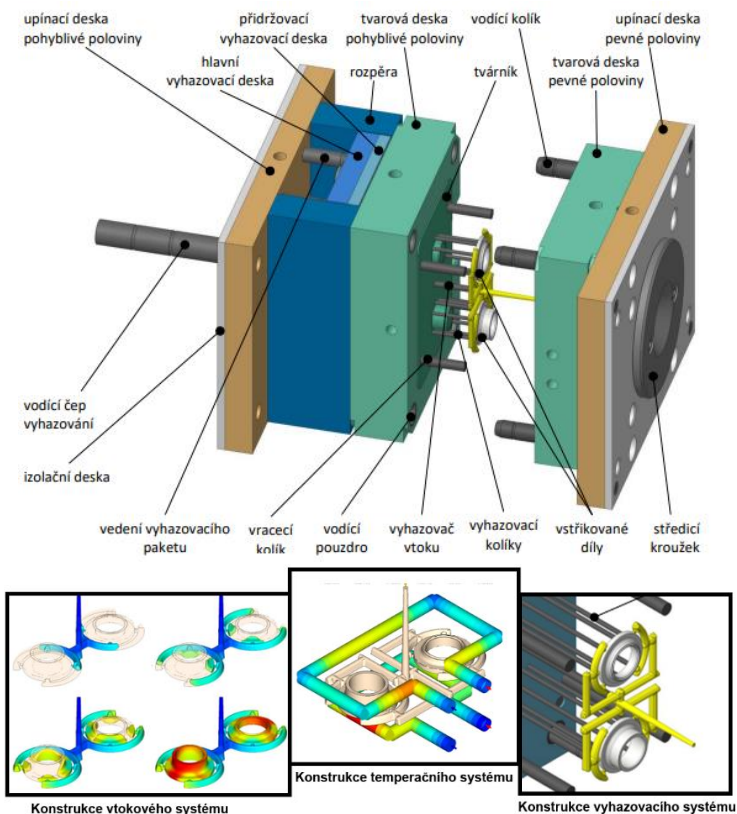
Mezi základní procesní parametry technologie vstřikování patří teplota taveniny, teplota formy, vstřikovací rychlost a tlak, čas a úroveň dotlaku, parametry dekomprese, čas cyklu a otevření formy (odformování). Teplota taveniny ovlivňuje zásadním způsobem její viskozitu. S rostoucí teplotou klesá viskozita taveniny, materiál teče do jednotlivých částí dutin formy snadněji. Na druhou stranu dochází k prodloužení potřebného výrobní času a vyššímu riziku degradace materiálu. Teplota formy významně ovlivňuje utvářenou strukturu plastů, jejich smrštění i optické vlastnosti (lesk). U semikrystalických plastů se snižující se teplotou formy dochází k snížení úrovně výrobního smrštění. Nízká teplota formy však může evokovat nárůst dodatečného smrštění (změna tvaru a rozměrů výrobků v pevném stavu) i navýšení úrovně vnitřního pnutí. Vstřikovací rychlost je mnohdy nesprávně opomíjený procesní parametr. Cílem je dosažení rovnoměrné rychlosti plnění ve všech částech formy, které je při konstantní rychlosti vstřikování

mnohdy nemožné dosáhnout. V takovýchto případech je vhodné rychlosti vstřikování optimalizovat tzv. profilováním. Z hlediska rychlosti a tlaku je doporučováno je aplikovat tak velké, jak je to jen možné. Tzn. takové, které zajišťují laminární plnění, nezpůsobují degradaci materiálu či problematiku uzavírání vzduchu a další vady. Dotlaková fáze a její nastavení má zásadní vliv na fixaci makromolekulárních řetězců ve směru toku, a tedy i na rovinnost dílu. Je pravdou, že prodloužením času i úrovně dotlaku bude dosaženo navýšení rovinnosti dílu i případného poklesu deformace. Bohužel však na úkor nárůstu vnitřního pnutí, které je z hlediska kvality dílu značně rizikovým faktorem. Rychlost dekomprese a otáček šneku ovlivňují požadovanou homogenitu taveniny. Všechny výše uvedené procesní parametry jsou ve vzájemné interakci.

#### Průvodní jevy při procesu vstřikování

- *Tlakové ztráty toku taveniny* – během svého toku dutinou formy je tavenina ochlazována, ztrácí svoji kinetickou energii, což zapříčiňuje rozdílnou rychlost distribuce do jednotlivých částí.
- *Orientace makromolekul a plniva* – makromolekuly jsou orientovány ve směru proudění taveniny, tlakové ztráty a rozdíly v termo-dynamických podmínkách v jednotlivých částech formy zapříčiňují, že orientace je v délce toku a v tloušťce dílu rozdílná.
- *Vnitřní pnutí* – vlivem tlakových ztrát, rozdílů v orientaci makromolekul či plniva, rozdílně utvářené struktury (vliv temperace formy), smrštění a dalších průvodních jevů technologie vstřikování je v dílech evokováno vnitřní pnutí, při překročení limitní úrovně může dojít k samovolnému poškození dílu.

## Vstřikovací forma a její funkce



Hlavní funkce vstřikovací formy je distribuce taveniny do jednotlivých tvarových dutin (tvar výrobku), zajištění odvodu tepelné energie (tuhnutí výrobku) a bezproblémového vyjmutí výrobku. Optimální funkce formy je podmíněna správnou konstrukcí všech prvků. Nicméně za kruciální lze považovat volbu a dimenzování vtokového systému, jelikož má zásadní vliv na všechny výše uvedené průvodní děje technologie

vstřikování. Více informací o problematice konstrukce vstřikovacích forem naleznete například v:

- [1] ROSATO, Dominick V.; ROSATO, Marlene G. Injection molding handbook. Springer Science & Business Media, 2012.
- [2] PRUNER, Harry; NESCH, Wolfgang. Understanding injection molds. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2020.
- [3] DANGEL, Rainer. Injection molds for beginners. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2023.

### *Materiály vhodné pro technologii vstřikování*

Jedním z určujících aspektů vhodnosti materiálů pro technologii vstřikování je jejich schopnost toku (viskozita). Jednotlivé polymery se, v závislosti na jejich vazebných silách, viskozitou vzájemně liší. Pro technologii vstřikování jsou vhodné zejména materiály s nízkou viskozitou. Vysoká viskozita zapříčiňuje problematické plnění jednotlivých částí dutin forem. Lze tedy očekávat vyšší vliv průvodních jevů technologie vstřikování na kvalitu výroby než u polymerů s viskozitou nižší. U některých materiálů, jako např. ultra vysoko hustotní polyetylen (PE-UHMW), je viskozita tak vysoká, že nejdou technologií vstřikování zpracovat vůbec.

Dalším, z hlediska zpracovatelnosti, důležitým parametrem je tzv. „procesní okno“. Jedná se o přípustné teplotní a kinetické zatížení taveniny, které současně zajišťuje dostatečnou tekutost taveniny a nevyvolá její degradaci. Pro možnosti optimalizace technologického nastavení je výhodné, když je toto „procesní okno“ co nejširší.



Z principu výroby polymerů v petrochemických závodech je zřejmé, že není možné vyrobit tuto surovinu v naprosto shodných délkách makromolekulárních řetězců. Plasty jsou tedy do výrobních závodů dodávány ve formě granulátu v tzv. šaržích. Ty se, jak svou tekutostí, tak mechanickými, fyzikálními či optickými vlastnostmi mohou lišit. Proto je kvalitu každé šarže na vstupu do výrobního procesu nutno adekvátně kontrolovat.

Jelikož materiálové hledisko bezesporu značně ovlivňuje kvalitu výroby technologie vstřikování, je výše uvedený rozbor problematiky materiálů pouze informativní ukázkou oblastí, jimž je vhodné z hlediska technologického věnovat speciální pozornost. Více informací o problematice materiálů naleznete například v:

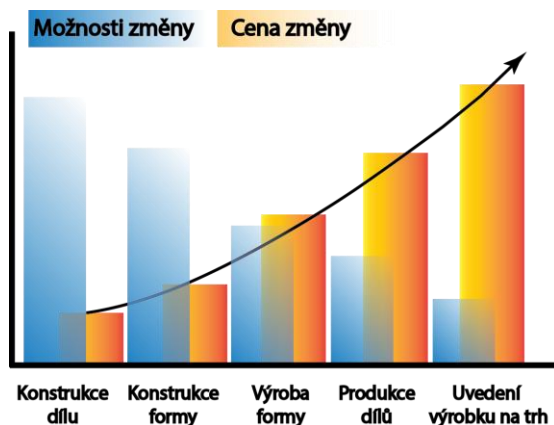
- [1] BĚHÁLEK, Luboš. Polymery. Verze knihy: 15. [Online]: [Code Creator], 2015. ISBN 978-80-88058-66-3.
- [2] BĚHÁLEK, Luboš a HABR, Jiří. Moderní plasty a vláknové kompozity. Díl I., Vstřikování plastů : materiály a technologie. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2019. ISBN 978-80-7494-458-1.
- [3] OLABISI, Olagoke; ADEWALE, Kolapo (ed.). Handbook of thermoplastics. CRC press, 2016.

# OBSAH

1.	ÚVOD DO PROBLEMATIKY KONSTRUKCE PLASTOVÝCH DÍLŮ .....	11
2.	MOLDFLOW ANALÝZA .....	13
3.	ZÁKLADNÍ KONSTRUKČNÍ ZÁSADY PRO KONSTRUKCI DÍLŮ TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ.....	17
	Umístění vtoku.....	17
	Volba dělicí roviny .....	40
	Tloušťka stěny.....	43
	Přechody tloušťky stěny .....	50
	Rádusy.....	56
	Úkoso a podkoso.....	59
	Žebra .....	62
	Prolamování.....	77
	Dosedací plochy.....	79
	Otvory a upevňovací výstupky.....	82
	Inzerty.....	88
	Západkové spoje.....	93
4.	PEVNOSTNÍ VÝPOČET/ DIMENZOVÁNÍ DÍLŮ .....	98
5.	VÝROBNÍ PŘESNOST PLASTOVÝCH DÍLŮ–TOLERANCE .	102
6.	MOŽNOSTI OPTIMALIZACE POMOCÍ MOLDFLOW ANALÝZ .....	112
7.	VADY .....	114

# 1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY KONSTRUKCE PLASTOVÝCH DÍLŮ

Správná konstrukce plastových dílů je prvním a bezesporu zásadním dílčím krokem k bezproblémové efektivní a ekonomicky rentabilní výrobě plastových výrobků. Po schválení konstrukčního návrhu dílu a výrobě formy je jakákoliv změna finančně velmi nákladná, nemluvě o nezbytném opětovném časově náročném schvalovacím a ověřovacím procesu.



Obr. 1 Význam problematiky konstrukce plastových dílů na kvalitu výroby

**Na konstrukci plastových dílů je nezbytné nahlížet zcela z jiného pohledu, než je tomu u kovových dílů.** Značný význam zde může zaujímat časová podmíněnost vlastností (kříp, relaxace napětí), dodatečná změna strukturních vlastností (dokrystalizace), vnitřní pnutí, atd.

Navíc životnost plastových dílů je významně ovlivněna interakcí s prostředím (UV záření, vzdušná vlhkost, teplota). V současné době existují tisíce materiálových kombinací (vlastnosti polymerů jsou modifikovány kopolymerací, mísením s jinými polymery, přidáním přísad atd.), což také komplikuje celou problematiku, a to nejen z pevnostního a funkčního hlediska, ale i z hlediska technologického či případné recyklovatelnosti výrobků. Právě otázka bezproblémové vyrobitelnosti je z hlediska konstrukce plastových dílů zásadním aspektem, který bývá mnohdy nesprávně opomíjen. Význam této problematiky je u technologie vstřikování díky tlakovým ztrátám toku taveniny, orientaci makromolekul a plniva, rozdílům v teplotní distribuci, rozdílům v uspořádání struktury (u semikrystalických materiálů) a tvorbě vnitřního pnutí ještě vyšší než u ostatních zpracovatelských technologií plastů. Kromě časově závislé funkčnosti výrobku a technickém aspektu je dále nutno uvažovat o budoucí výrobě formy (umístění vtoku, dělicí roviny, atd.) o požadavcích na vzhled, automatizaci, přesnost výroby, recyklovatelnost, ekonomické a legislativní aspekty a mnohé další. Jedině komplexní pohled na celou problematiku může vést k úspěšnému splnění zadaných cílů. Všechny výše uvedené skutečnosti kladou značné nároky na odbornost konstruktéra, který se navíc musí v souladu se současným trendem rozhodovat velice rychle. Jedním z užitečných nástrojů, jenž může usnadnit diskutovanou vývojovou fázi jsou „moldflow“ analýzy.

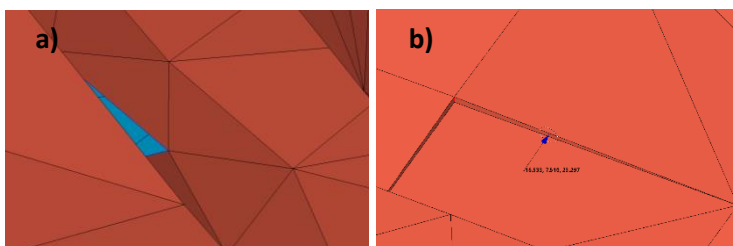
## 2. MOLDFLOW ANALÝZA

Pod zobecněným pojmem „moldflow“ analýza se skrývá CAE („computer-aided engineering“) diskretizační metoda simulující proces vstřikování plastů. Jedná se o matematickou metodu řešení konečných prvků (FEM), jež umožňuje predikovat chování polymerů během toku taveniny (modifikovaný Newtonův model viskozity, rovnice kontinuity toku), dotlakové fáze i procesu chladnutí (Fourierův zákon, PVT diagramy). Díky tomu je možné detekovat již v předvýrobní fázi potenciální problematická místa, oblasti výskytu vad či optimalizovat dimenzování jednotlivých částí dílů.

Přesto, že se jedná o časově ověřený nástroj (počátek sahá do 90. let) softwaru umožňující simulační analýzy stále nejsou standardním vybavením společností zabývajících se plastikářským odvětvím. Mnohem častěji jsou tyto analýzy zpracovávány externě. Důvodem je pravděpodobně relativně stále vysoká pořizovací cena. Dalším limitním důvodem pro širší uplatnění „moldflow“ analýz může být nedostatečná znalost problematiky (kvalifikovanost pracovníků) a s ní spojená interpretace a věrohodnost výsledků. Jak již bylo řečeno jedná se o matematickou analýzu, která v sobě může zahrnovat větší či menší míru zjednodušení. Ve spojitosti s nevhodným nastavením výpočtu a nerelevantními materiálovými daty, tak může dojít k významnému ovlivnění výsledků, které se následně mohou značně lišit od reálného stavu. Kvalifikovanost pracovníka provádějící jednotlivé analýzy, stejně tak jako znalost zpracovatelské problematiky plastů jsou tak těmi zásadními faktory pro správné využití tohoto optimalizačního nástroje.

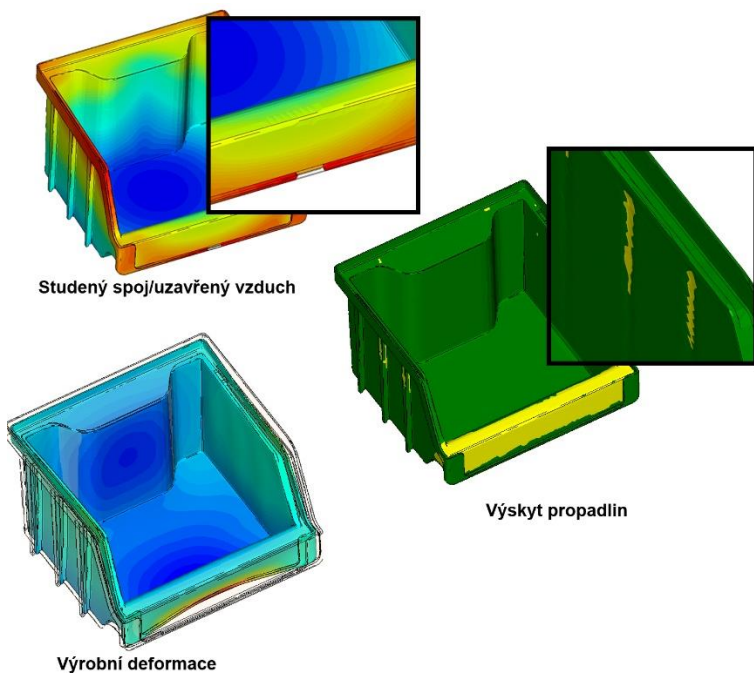
Pro správnou realizaci „moldflow“ analýzy je nutné ověřit následující otázky:

- Volba sítě
  - ✓ Je zvolená optimální velikost elementů?
  - ✓ Jaká je kvalita sítě?
  - ✓ Vyskytují se v síti chyby?
- Volba materiálu
  - ✓ Je materiálové složení shodné s námi zvoleným materiálem? (vliv barviva a dalších aditiv)
  - ✓ Odpovídají data materiálových charakteristik realitě?
  - ✓ Jsou data materiálových charakteristik aktuální?
- Procesní nastavení
  - ✓ Byla nastavená shodná procesní nastavení s reálnou výrobou?
  - ✓ Mají použité procesní parametry vliv na výsledky „moldflow“ analýzy? Neboli jsou výsledky odrazem procesního nastavení či konstrukce dílu?
- Vtokový systém, temperační okruhy, forma
  - ✓ Jaké výsledky od „moldflow“ analýzy požadují?
  - ✓ Zajímá mě absolutní hodnota deformace nebo pouze limitní místa?

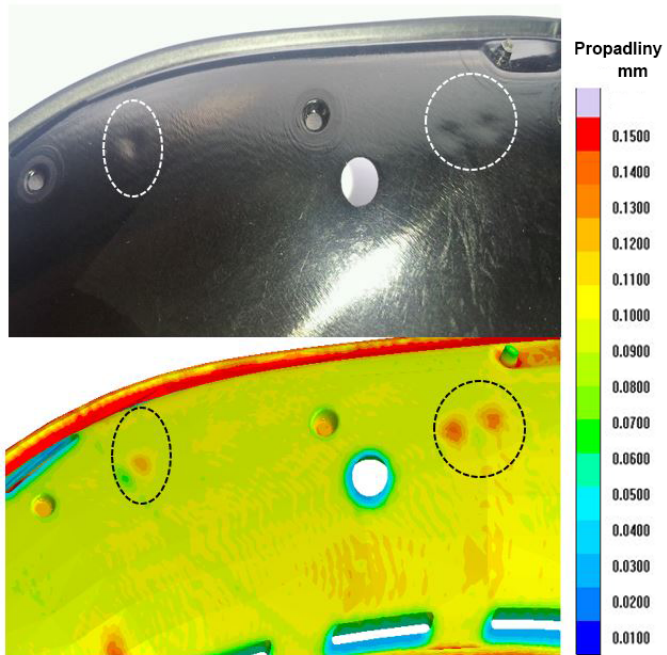


Obr. 2 Příklady chyby sítě  
a) chybějící element, b) nevhodné napojení elementů

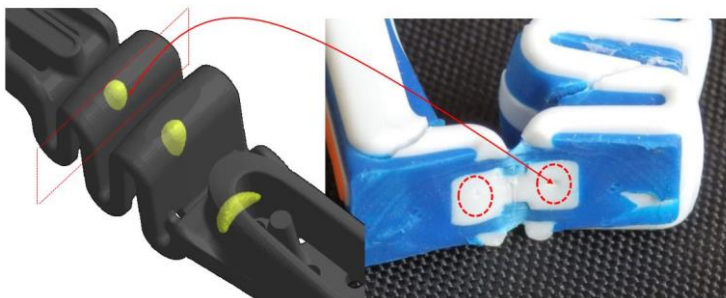
Všechny výše uvedené faktory mají jistý vliv na přesnost predikce „moldflow“ analýzy. Vzhledem k analytický i experimentálně ověřeným výsledkům „moldflow“ analýz lze konstatovat, že u etablovaných softwarů (MoldFlow, Cadmould, Moldex, Sigmasoft) je i přes mnohé zjednodušení dosahována vysoká míra shody predikce s realitou. Konstruktor, tak může získat cenné informace o distribuci toku taveniny, oblastech výskytu studených spojů, oblastech výskytu propadlin, staženin, orientaci makromolekul či skelných vláken, distribuci zamrzlé vrstvy v čase, aplikovatelnosti dotlakové fáze, stejně tak jako tendenci deformace a mnohé další.



*Obr. 3 Příklady výsledků „moldflow“ analýzy – Cadmould*



Obr. 4 Predikce propadlin programem Sigmasoft



Obr. 5 Predikce staženin programem Sigmasoft



### 3. ZÁKLADNÍ KONSTRUKČNÍ ZÁSADY PRO KONSTRUKCI DÍLŮ TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

Pro konstrukci plastových dílů jsou již poměrně dlouhou dobu ustanoveny obecné základní konstrukční zásady. Otázkou však je, do jaké míry nedodržení těchto zásad ovlivní finální kvalitu dílů? Cílem této kapitoly je provedení podrobnější rozboru, který by mohl více objasnit danou problematiku. Je také vhodné upozornit, že některé zásady mohou být ve vzájemném rozporu. Výsledek konstrukčního návrhu je tak kompromisem jednotlivých zásad, který musí být vždy uzpůsoben funkčnosti, technologii výroby, ekonomickým a dalším hlediskům.

#### Umístění vtoku

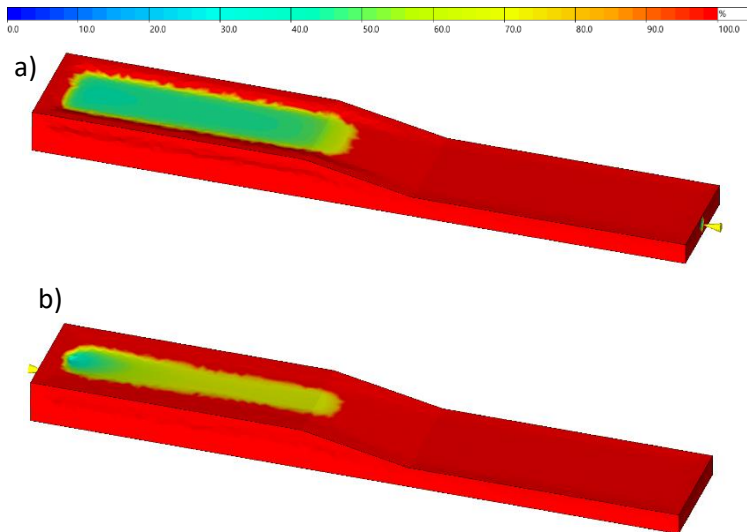
Umístění vtoku je z hlediska konstrukce plastových dílů bohužel velmi často opomíjené hledisko. Přitom umístění vtoku zásadně ovlivňuje úroveň tlakových a teplotních ztrát toku taveniny, ovlivňuje orientaci makromolekul a mnohé další vlastnosti, které mají značný vliv na výslednou deformaci dílu. **Konstruktor plastových dílů tak vždy musí dopředu uvažovat o potenciálním umístěním vtoku!**

Pro umístění vtoku by měly být dodrženy následující zásady:

- Umístění vtoku do místa největší tloušťky stěny
- Vtok by neměl být situován do otevřeného prostoru
- Vtok nesmí být umístován do míst vystavených vysokému namáhání

- Umístění vtoku do nepohledových částí dílu
- Umístění vtoku tak, aby bylo zajištěno rovnoměrného zaplnění všech částí dílů

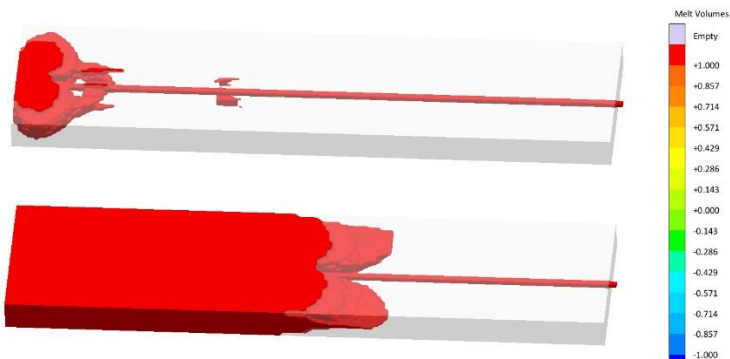
V případě, že není vtok umístěn do největší tloušťky stěny hrozí velké riziko příliš rychlého zatuhnutí taveniny v oblasti s menší tloušťkou stěny, což následně zapříčiní nemožnost toku do dalších částí dílu či nemožnost aplikovatelnosti dotlaku v oblasti s tloušťkou stěny větší, viz obr. 6. Výrobek se tak kromě neúplnosti, vyšší úrovně deformace může vyznačovat také tvorbou propadlin či staženin.



Obr. 6 Úroveň zamrzlé vrstvy v čase odpovídající 15 s chlazení – vliv umístění vtoku (žlutý kužel)

Červeně zabarvené oblasti deklarují zatužlou vrstvu taveniny. V obou případech umístění vtoku hrozí riziko tvorby propadlin v oblastech s největší tloušťkou stěny. U varianty b) však lze prodloužením doby dotlaku problematiku propadlin zcela eliminovat. U varianty a) za vzhledem k zatuhnutí taveniny není možné.

V případě, že je vtok umístěn do volného prostoru, viz obr. 7, může v určitém případě dojít k nelaminárnímu toku taveniny. Ve výrobku následně vzniká vada zvaná „Jetting“ neboli volný proud. K tomuto stavu však nedochází vždy, nýbrž při nevhodné kombinaci procesního nastavení (vysoká tekutost taveniny, vysoká vstřikovací rychlost, vysoký vstřikovací tlak, vysoká teplota formy, aj.) či při nevhodném konstrukčním řešení vtokového ústí (příliš malý průměr ústí, příliš ostré přechody - malé radiusy, aj.). Je tedy možné konstatovat, že tato konstrukční zásada v případě interakce s jinou, z hlediska kvality dílu, významnější zásadou nemusí být vždy dodržena. Problematika „Jettingu“ je u programů zajišťujících moldflow“ analýzy predikována pouze v programech, které umožňují simulovat 3D tokové vlastnosti ve všech diskretizačních časových intervalech.



Obr. 7 Moldflow analýza „Jetingu“ v programu SIGMASOFT

Důvod, proč není vhodné umísťovat vtok do později namáhaného místa je potenciální porušení dílů. Tavenina tuhne v této oblasti nejdéle, čímž jsou vytvářeny nerovnoměrné termo-dynamické podmínky. V jejich důsledků dochází k rozdílům ve strukturním uspořádání polymerů,

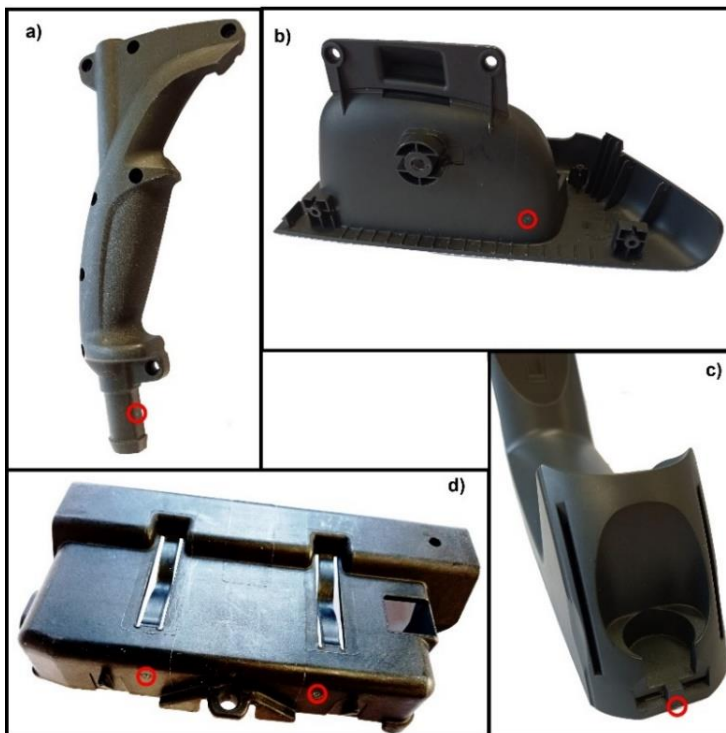
rozdílům v orientaci makromolekul i plniva, což vede k potenciálním rozdílům v mechanických vlastnostech. Všechny výše uvedené aspekty společně s neo-optimální dotlakovou fází navíc zapříčiňují narůstání úrovně vnitřního pnutí, které často bývá nejvyšší právě v blízkosti vtoku.



*Obr. 8 Porušení dílu v oblasti vtoku vlivem vnitřního pnutí*

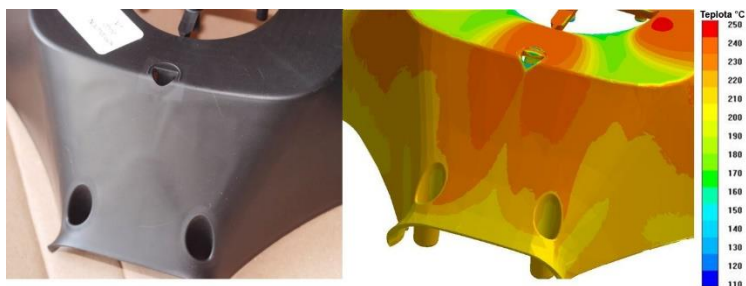
Pravidlo umísťovat vtok do nepohledových částí dílů je významné zejména pro díly s vysokými nároky na vzhled, tzv. pohledové díly. Oblast vtoku je totiž na dílech vždy více či méně viditelná. Kromě viditelnosti vtoku samotného zde hrozí i další rizika výskytu pohledových vad. Pravděpodobně mezi tu nejčastěji se vyskytující vadu patří rozdíl v lesku. Ty jsou způsobeny rozdílnými termo-dynamickými podmínkami tuhnutí (materiál zde tuhne nejdéle), rozdílnou orientací makromolekul (v porovnání s ostatními oblastmi dílu) i případnou rozdílnou tloušťkou stěny (pravidlo umísťování vtoku do největší tloušťky stěny). Problematiku lze optimalizovat vhodnou aplikací vtokového a temperačního systému (odvod tepla v oblasti vtoku), částečně i procesním nastavením vstřikovacího stroje (profilování plnění, nastavení temperačních okruhů), nicméně vždy se s ní musí dopředu počítat, a to zejména u dílů, jenž se mají vyznačovat vysokým leskem. „Moldflow“ analýzy dnes již deklarují možnost predikce lesku povrchu dílů. Jedná se například o výsledky dvojlomu světla. Nicméně tyto výsledky nejsou doposud

verifikovány do té míry, aby bylo jednoznačně možné potvrdit či vyvrátit jejich věrohodnost. Kromě výsledků dvojlomu světla je kvalitu povrchu možno nepřímo předpovídat teplotní distribucí (rovnoměrnost teplotního odvodu ve výrobní fázi chlazení) či orientací makromolekul a skelných vláken.



Obr. 9 Příkladů umístění vtoků

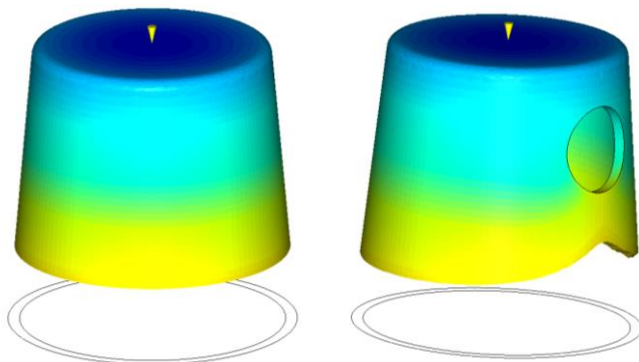
Červeně označená oblast deklaruje oblast umístění vtoku. Na obr. 9a je vtok umístěn na pohledovou stranu dílu, která však v sestavě nebude vidět, 9b umístění vtoku do nepohledové části dílu, 9c díl není pohledový, umístění vtoku do pohledové části dílu, 9d umístění vtoku do boční části dílu, málo viditelné



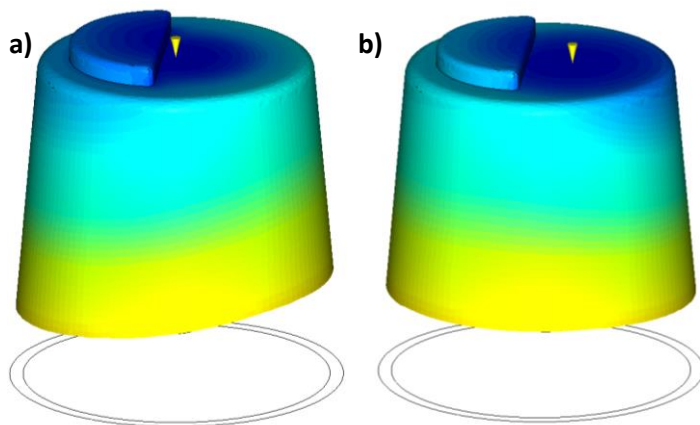
Obr. 10 Vliv teploty na povrchové vady (program Sigmasoft)

Další, pravděpodobně ještě významnější, zásadou je umístění vtoku, tak aby bylo dosaženo rovnoměrné zaplnění dílů ve všech jeho částech. Rozdílná distribuce taveniny (časy plnění) v jednotlivých částech dílu evokuje rozdílné termodynamické podmínky tuhnutí, rozdíly v orientaci makromolekul či skelných vláken, což zapříčiňuje nehomogenitu ve smršťení, deformace a nárůst vnitřního pnutí. Z hlediska deformací dílů jsou velmi často těmi nejproblematičtějšími místy oblasti nejdelšího toku taveniny (vliv tlakových a teplotních ztrát toku taveniny). Je proto velmi důležité dosažení stejného času plnění právě v těchto kritických místech. Nerovnoměrné plnění dílů taveninou navíc kromě nepatřičných deformací může zapříčinit i vyšší namáhání formy (nerovnoměrná tlaková distribuce), což je z hlediska životnosti formy nežádoucí. Vzhledem k výše uvedenému se vtoky velmi často umísťují do geometrického středu dílu. Umístění vtoků do geometrického středu dílů však lze aplikovat pouze pro symetricky konstruované díly. V případě jakékoliv asymetrie, způsobené lokálním zeslabením či zesílením tloušťky stěny, umístěním žeber, otvorů, nepravidelných výstupků či jiných konstrukčních prvků dojde ke změně tlakových poměrů, a tedy nerovnoměrnému plnění.

**Asymetričnost, tvarová složitost či funkční požadavky na díl (lokální zesílení tloušťky stěny, umístění inzertu, atd.) tak zapříčiňují značnou obtížnost predikce optimální polohy ústí vtoku. Bez využití „moldflow“ analýz, tak téměř není možné docílit žádaného stavu.**



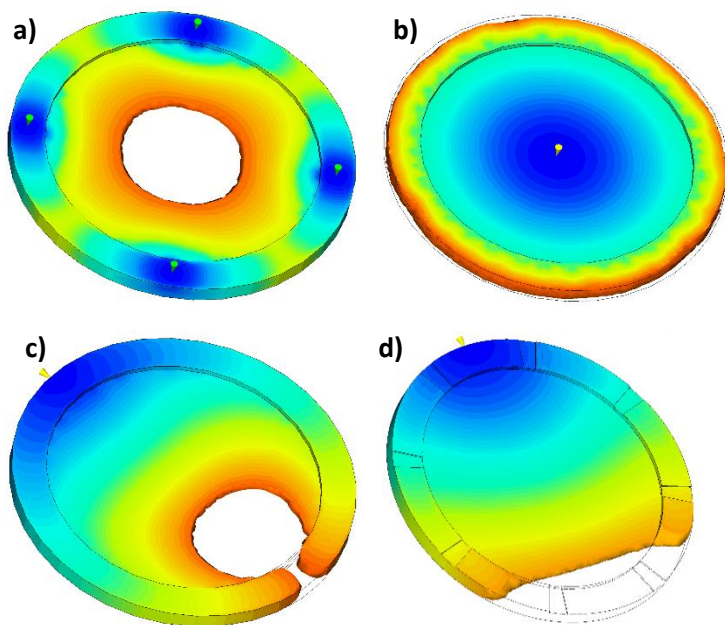
*Obr. 11 Umístění vtoku do geometrického středu dílu (vliv otvoru na tok taveniny)*



*Obr. 12 Vliv asymetrie konstrukce dílu na rovnoměrnost toku taveniny (zesílení tloušťky stěny)*

*Na obr. 12a vtok umístěn do geometrického středu, což zapříčiňuje nerovnoměrné plnění dílu taveninou, kde tavenina zatéká nejdříve díky výhodnějším tlakovým poměrům do oblasti s větší tloušťkou stěny, což následně ovlivňuje další průběh plnění celého dílu; 12b posunutí vtoku dále od oblasti s lokálně zvětšenou tloušťkou stěny zajistí změnu tlakových poměrů toku taveniny a umožňuje docílení rovnoměrné plnění celého dílu.*

Ani u symetricky konstruovaných dílů však nezaručuje umístění vtoku do geometrického středu bezproblémovou vyrobiteľnost. Do interakce zde totiž vstupuje distribuce tloušťky stěny, která bývá často z pevnostních důvodů lokálně zesilována. V tomto případě je nutné učinit prioritní rozhodnutí mezi rizikem tvorby propadlin, staženin a symetričností plnění.

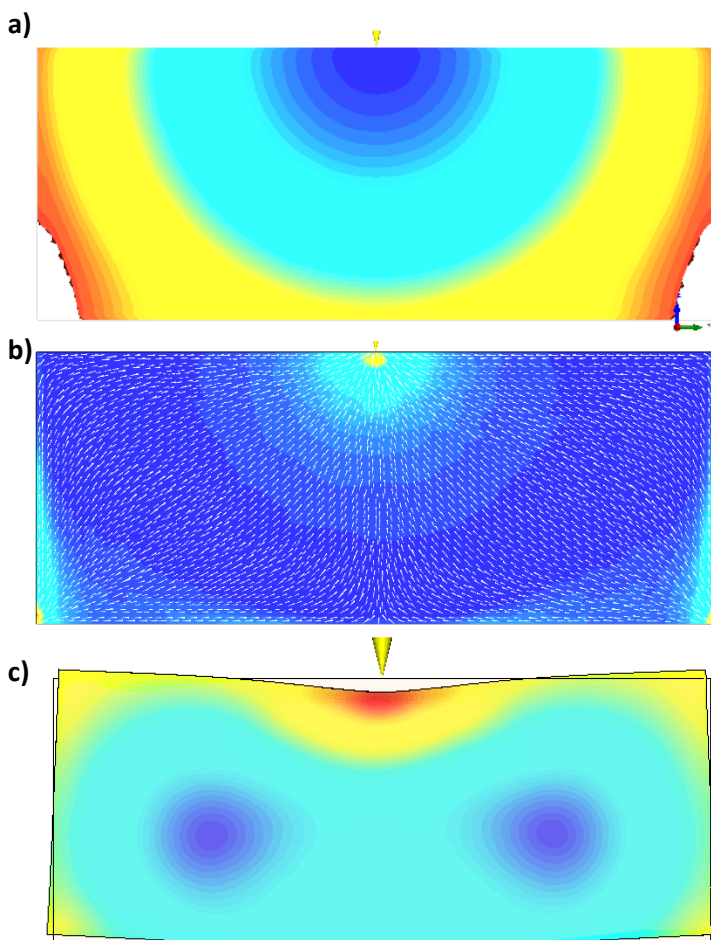


*Obr. 13 Vliv umístění vtoku na technologičnost procesu*



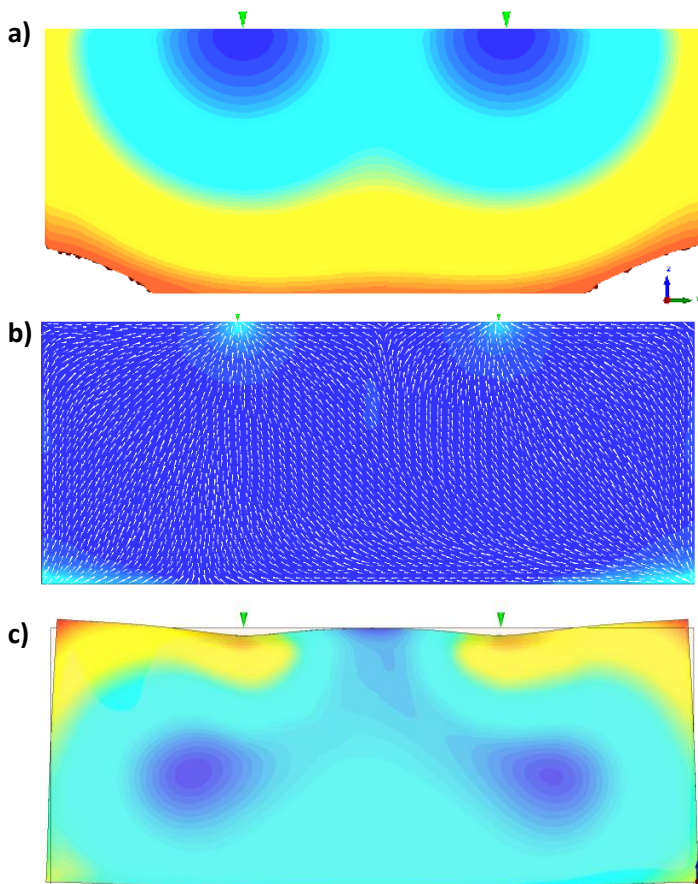
*Na obr. 13a je vtok umístěn do oblasti největší tloušťky stěny - vysoké nebezpečí uzavírání vzduchu ve středové části dílu, tvorba diesel efektu; 13b vtok umístěn do geometrického středu dílu – rovnoměrné plnění, nicméně velké riziko propadlin či staženin, 13c vtok umístěn nesymetricky do největší tloušťky stěny – nerovnoměrná distribuce taveniny, velké riziko uzavírání vzduchu, diesel efektu, tvorby studeného spoje, 13d vtok umístěn nesymetricky do největší tloušťky stěny, díl má po obvodu vytvořen velmi malé drážky, které výrazně snižují pevnostní požadavky, ale výrazně ovlivňují způsob natékání – díl plněn rovnoměrně bez velkého rizika uzavírání vzduchu, výskytu diesel efektu a tvorby propadlin či staženin.*

Během plnění dutiny formy jsou u technologie vstřikování makromolekuly orientovány ve směru tečení. Orientace makromolekul následně díky aplikaci dotlakové fáze zůstává do jisté míry zachována. Díky snaze makromolekul navrátit se do původního entropicky výhodného stavu dochází k vyššímu podílu smrštění ve směru toku taveniny v porovnání se směrem na něj kolmém (tloušťka stěny). Celou problematiku navíc umocňují nestejně podmínky plnění (tlakové ztráty toku taveniny) a nerovnoměrnost aplikovatelnosti dotlaku (rozdílné rychlosti tuhnutí v jednotlivých částech dílů). Umístění vtoků tak zásadním způsobem ovlivňuje smrštění dílu a tím i jeho deformaci. Problematika orientace makromolekul je důležitá zejména pro semikrystalické plasty, které se vyznačují vyšší úrovní smrštění. Význam problematiky umístění vtoků na výslednou výrobní deformaci dílu je zřejmý z níže provedeného rozboru (obr. 14 až 21). Geometrie analyzovaného dílu byla cíleně volená velmi jednoduchá (plošný díl), jelikož by jakýkoliv konstrukční prvek (změna tloušťky stěny, žebra, otvory, upevňovací výstupky, atd.) mohl zapříčinit změnu deformační charakteristiky.



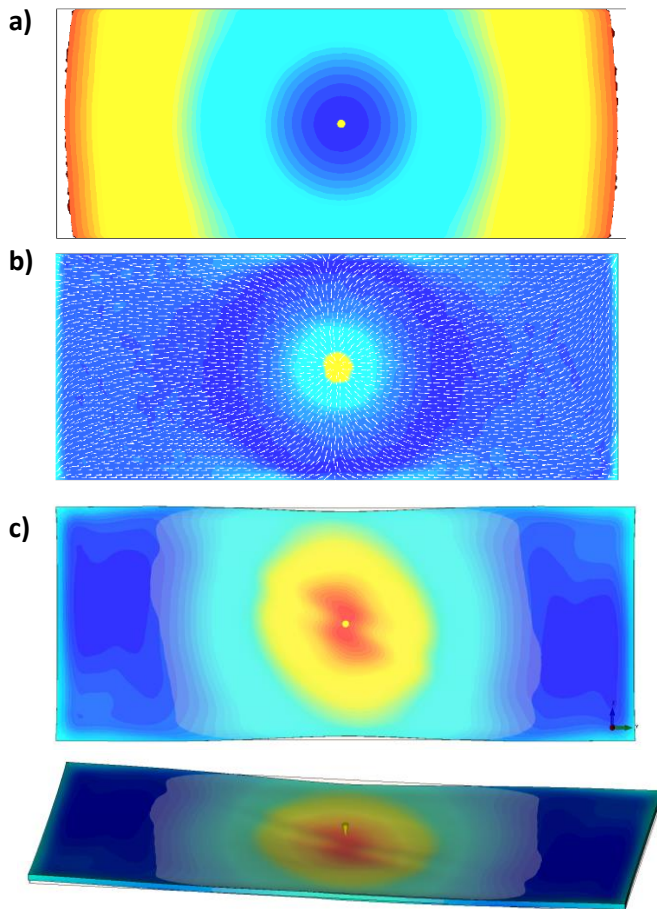
Obr. 14 Vliv umístění vtoků na deformaci desky o rozměrech 200 x 80 x 2 mm – vtok v obvodové stěně

Na obr. 14a průběh plnění dílu taveninou u vtoku umístěného do obvodové stěny. Výsledkem je nerovnoměrné plnění dílu, nesteromněná orientace makromolekul, viz obrázek 14b, které společně s termo-dynamickými podmínkami tuhnutí (tavenina nejdéle chladne v blízkosti vtoku) vyvolávají značnou deformaci dílu (průhyb směrem k vtoku), viz obr. 14c.



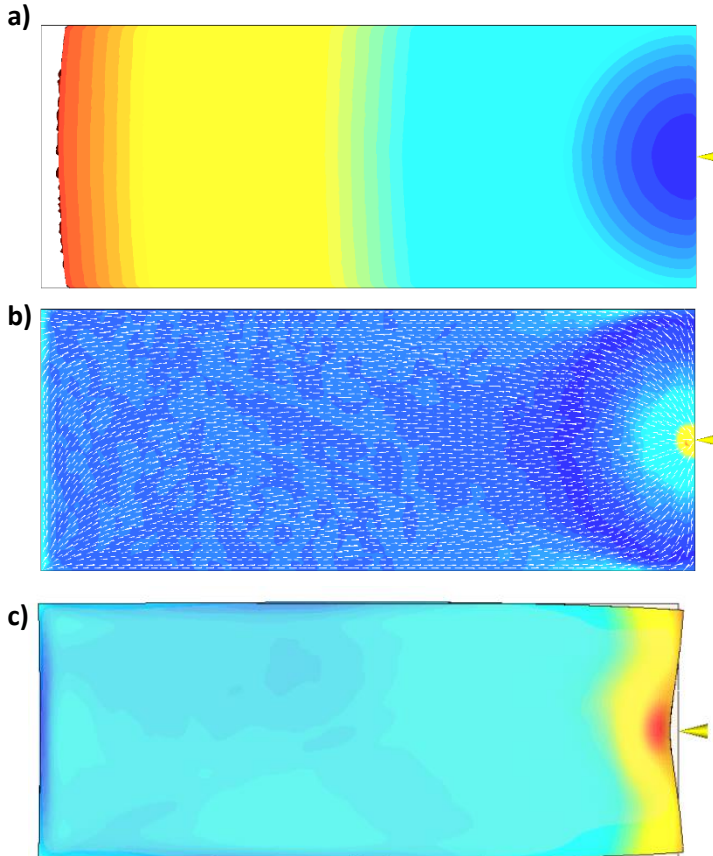
Obr. 15 Vliv aplikace více vtoků na deformaci desky o rozměrech 200 x 80 x 2 mm – vtok v obvodové stěně

Použitím dvou vtoků dojde k nepatrnému zlepšení rovnoměrnosti natékání dílu (obr. 15a). Rovněž distribuce orientace makromolekul je při použití dvou vtoků nepatrně výhodnější (obr. 15b). Proto i výsledná deformace (obr. 15c) se vyznačuje nižší úrovní. Lze tak potvrdit teoretický poznatek, že s vyšším počtem vtoků lze z hlediska deformace pozitivně ovlivnit kvalitu dílu – výrobní přesnost. Charakteristika deformace však zůstává stejná (dáno pozicí vtoku).



Obr. 16 Vliv umístění vtoku do geometrického středu dílu na deformaci desky o rozměrech 200 x 80 x 2 mm – nejkratší dráha toku taveniny

Umístění vtoku do geometrického středu dílu sice zaručuje nejkratší dráhu toku taveniny ze všech eventuálních variant poloh vtoku (obr. 16a) nicméně orientace makromolekul v blízkosti vtoku je zcela odlišná od koncových oblastí desky (obr. 16b). Rovněž termo-dynamické podmínky tuhnutí (vyšší teplota u vtoku) této varianty nepřispívají homogennímu smrštění a deformaci. Výsledkem je velmi špatná rovinnost desky, viz obr. 16c.

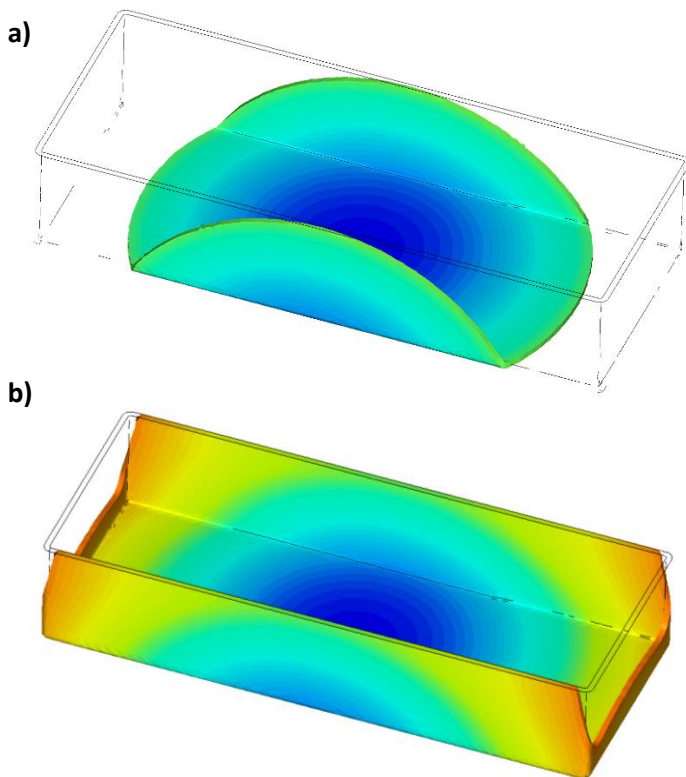


Obr. 17 Vliv umístění vtoku na deformaci desky o rozměrech 200 x 80 x 2 mm – nejdelší dráha toku taveniny

Je-li vtok umístěn do obvodové stěny ve směru plošné délky desky, dochází po krátké době k rovnoměrnému plnění (obr. 17a). Makromolekuly jsou tak v téměř v celém díle orientovány ve stejném směru (obr. 17b).

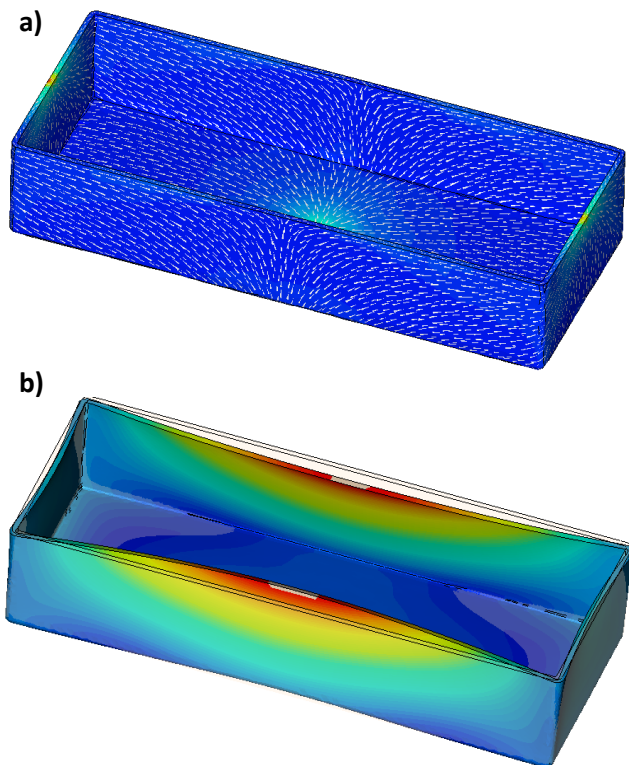
Tato charakteristika společně s efektivní dotlakovou fází umožní dosažení nejvyšší rovinnosti a nejnižší úrovně deformace z představených variant umístění vtoku (obr. 14 až 16), a to i přes skutečnost, že tavenina musela urazit nejdelší dráhu (nejvyšší tlakové ztráty toku).

Problematika toku taveniny a tedy i orientace makromolekul je u plošných dílů se stejnou tloušťkou stěny relativně snadno predikovatelná. U složitějších dílů to již tak jednoduché není, viz obr. 18 až 21.



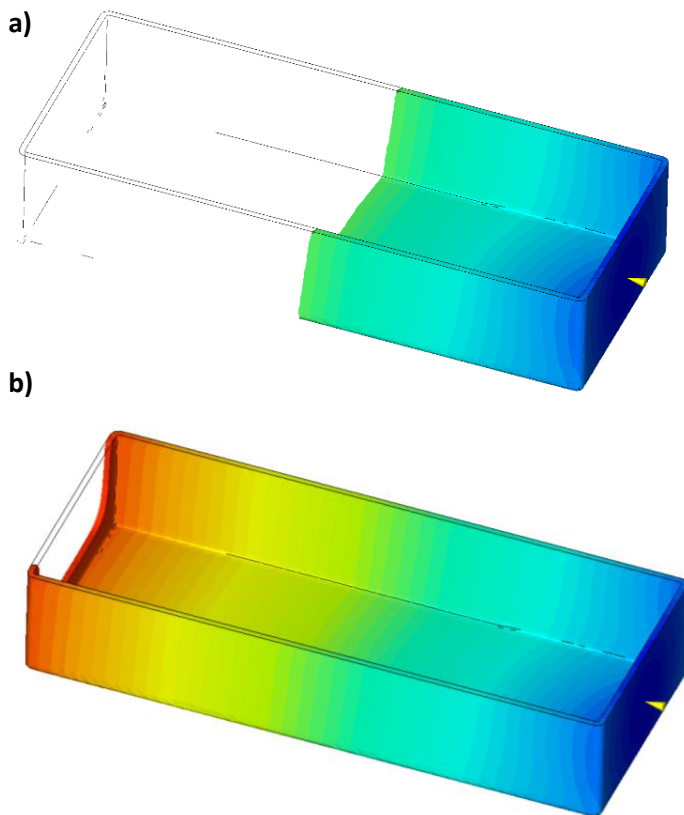
Obr. 18 Plnění krabičky (rozměry základny 200 x 80 x 2 mm, výška 40 mm) s vtokem umístěným do geometrického středu dílu.

Z průběhů plnění krabičky je zřejmé, že tavenina zatéká po délce obvodové stěny nerovnoměrně (tvar prstence obr. 18a). Lze tedy předpokládat, že rovněž orientace makromolekul a termo-dynamické podmínky tuhnutí budou v této stěně značně rozdílné, což ovlivní i dosahovanou úroveň deformace. V obvodové stěně v šířce krabičky (obr. 18b) je plnění rovnoměrnější.



Obr. 19 Orientace makromolekul a deformace krabičky (rozměry základny 200 x 80 x 2 mm, výška 40 mm) s vtokem umístěným do geometrickém středu dílu

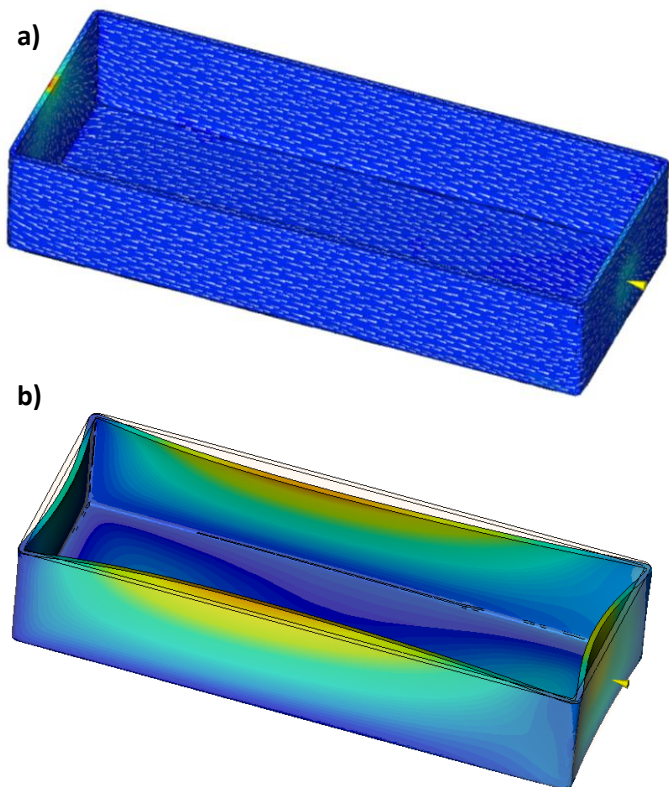
Orientace makromolekul (obr. 19a), která je odrazem výše diskutovaného toku taveniny způsobuje, že nejvyšší úroveň deformace (obr. 19b) se nenachází v oblasti s nejdelším tokem taveniny, nýbrž v místech s neoptimální distribucí makromolekul. Je však nutno podotknout, že problematika deformace v této oblasti je navíc umocněna konstrukcí krabičky. Rádusy tvoří vyztužující prvek, kolem kterého je deformace minimální. Se zvyšující se délkou obvodové stěny se snižuje vliv tohoto vyztužujícího prvku a deformace roste.



*Obr. 20 Plnění krabičky (rozměry základny 200 x 80 x 2 mm, výška 40 mm) s vtokem umístěným do obvodové stěny*

*Je-li vtok umístěn ve směru délky krabičky (obr. 20a) je plnění obvodových stěn rovnoměrné, což by mělo evokovat výhodnější distribuci makromolekul a nižší deformace. Výjimku tvoří protilehlá stěna (obr. 20b). Proto lze v tomto místě očekávat vyšší úroveň deformace.*





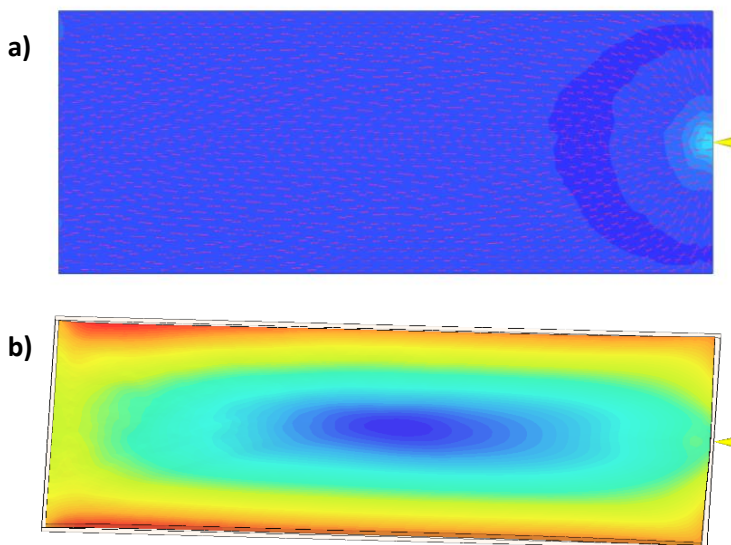
Obr. 21 Orientace makromolekul a deformace krabičky (rozměry základny 200 x 80 x 2 mm, výška 40 mm) s vtokem umístěným do obvodové stěny

Orientace makromolekul je v délce dílu dle předpokladu rovnoměrná. Naopak u vtoku a v protilehlé stěně jsou evidovány značné rozdíly v distribuci makromolekul (obr. 21a). Tyto rozdíly společně s termo-dynamickými podmínkami chladnutí zapříčiňují, že v porovnání s variantou vtoku umístěného do geometrického středu je v těchto místech deformace dílu nepatrně vyšší. Nicméně maximální deformace, která se nachází v délce obvodové stěny krabičky (obr. 21b), je díky výhodnější distribuci orientace makromolekul této varianty umístění vtoku mnohem nižší.

Vliv umístění vtoku na deformaci dílu je ještě mnohem složitěji předpovědatelný v případě použití vlákny plněného polymeru. Vlákenné plnivo (nejčastěji aplikovaná skleněná či uhlíková vlákna), zajišťuje značné navýšení modulu pružnosti, a tedy i tuhosti dílu, při současném zvýšení teplotní odolnosti dílu. V současnosti se jedná o čím dál tím více využívanou konstrukční variantu, a to nejen v běžně používané kombinaci s PA, PP, PBT či PPS. Pro zajištění požadovaných vlastností je standardně používáno 10 až 40 hm. % výztuže. Z hlediska aplikace těchto materiálových kombinací je nezbytné si uvědomit, že kromě zvýšených nároků na opotřebení formy, šneku a problematiky čištění horkých trysek, také vláknité plnivo zapříčiňuje horší tok taveniny (vyšší viskozita). Tavenina se tak zpravidla vyznačuje vyšší úrovní tlakových ztrát. Pro konstrukci plastových dílů je dále zásadní, že díky orientaci skelných vláken dochází oproti neplněným dílům k zcela rozdílnému smrštění a výrobní deformaci.

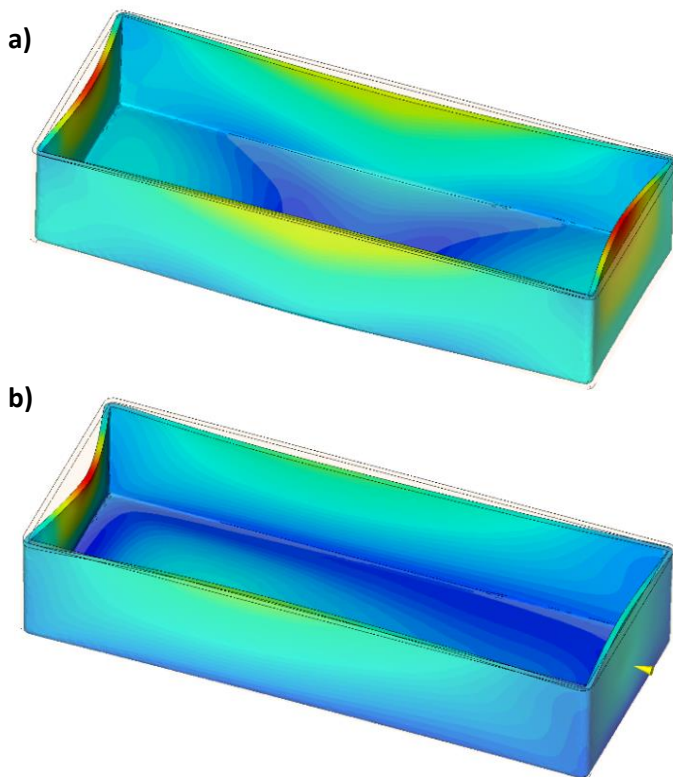
Stejně jako u makromolekul jsou vyztužující vlákna orientována v největší míře ve směru toku taveniny, což následně zapříčiňuje pokles smrštění dílu v tomto směru. Smrštění ve směru kolmém na orientaci makromolekul je naopak vyšší. Problematika je v důsledku rozdílných podmínek toku v tloušťce stěny mnohem složitější. Zjednodušeně si lze přestavit, že vlákenné výztuže jsou orientovány v blízkosti povrchu dílu (v blízkosti zatuhlé vrstvy), díky značnému smykovému namáhání, ve směru toku. Ve středové oblasti dílu, kde je nižší smykové namáhání, pak ve směru kolmém. Takováto orientace je z hlediska deformace výhodná (eliminace smrštění v obou směrech). Nicméně podmínky toku u vstřikovaných dílů nejsou vždy v rámci délky i

tloušťky stěny dílu stejné. Proto se v díle objevují oblasti s rozdílnou orientací vláknenné výztuže. Celou problematiku navíc ztěžuje výše zmiňovaná nižší tekutost, která zvyšuje úroveň tlakových ztrát, a tedy i rozdíly orientaci. S rostoucí viskozitou taveniny, rostoucím podílem vláknenné výztuže a délkou vláken roste význam této problematiky. Vliv skelných vláken na změnu charakteristiky deformace je analyzován v obr. 22 a 23.



Obr. 22 Vliv orientace skelných vláken na deformaci desky (deska o rozměrech 200 x 80 x 2 mm) s vtokem umístěným do obvodové stěny

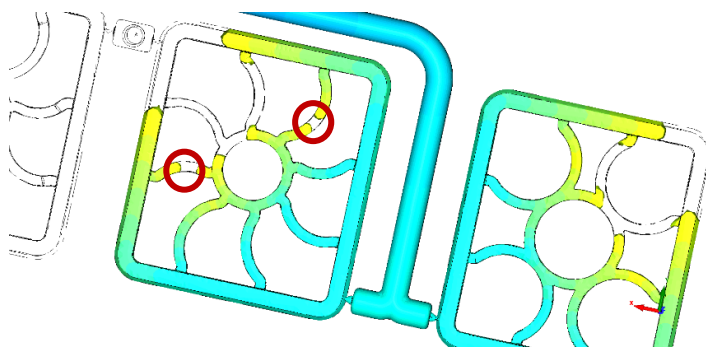
Na obr. 22a je orientace skelných vláken zobrazena ve středové a povrchové vrstvě. Tvoří-li jejich průmět kříž, je deformace eliminována jak ve směru toku, tak ve směru na něj kolmém. Právě takovéto distribuce skelných vláken je dosaženo ve středové oblasti desky, což zapříčiňuje nízkou úroveň deformace této oblasti (obr. 22b). Naopak po krajích desky jsou skelná vlákna orientována v obou vrstvách ve směru toku. Výsledkem je vyšší deformace v tloušťce stěny a horší rovinnost dílu.



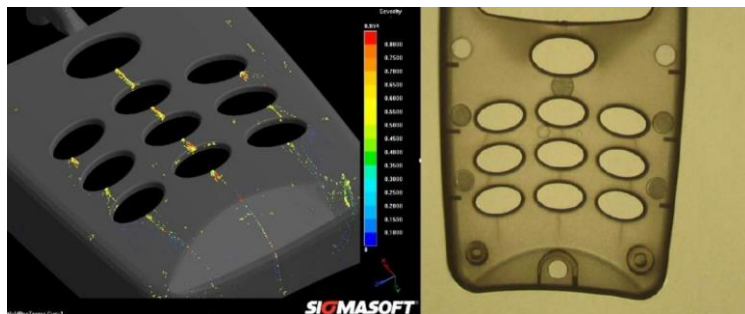
Obr. 23 Vliv skelných vláken na deformaci krabičky (rozměry základny 200 x 80 x 2 mm, výška 40 mm)

Na obr. 23 je zobrazena deformace krabičky s 30hm. % podílem skelných vláken: 23a vtok umístěný do geometrického středu dílu, 21b vtok umístěný do obvodové stěny ve směru délky dílu. V obou případech je v porovnání s aplikací stejného materiálu (PP) bez skelných vláken (obr. 19 a 21) dosaženo markantní změny charakteristiky deformace!!! Vyšší úroveň deformace se vyznačuje boční obvodová stěna. Dále je rovněž patrná vyšší deformace (nižší rovinnost) dna krabičky. Z výsledků je také zřejmé, že stejně jako v předcházejícím případě, vliv umístění vtoku je i při aplikaci materiálu se skelnými vlákny určujícím faktorem budoucí deformační charakteristiky.

Umístění vtoku má rovněž značný vliv na problematiku uzavírání vzduchu a tvorbu studeného spoje. Obě tyto vady lze věrohodně analyzovat pomocí „moldflow“ analýz. Nicméně, jak u vizualizace míst výskytu uzavírání vzduchu, tak u vizualizace studených spojů je nutno zkontrolovat kvalitu sítě. Příliš hrubá síť totiž velmi často zapříčiňuje predikci nereálných lokací. Je proto vhodné místa výskytu těchto vad ověřit vizualizací toku taveniny, viz obr. 24.



Obr. 24 Příklad vizualizace míst výskytu studených spojů a potenciálního uzavírání vzduchu pomocí toku taveniny - Cadmould



Obr. 25 Příklad predikce místa výskytu studeného spoje - Sigmasoft

Při posuzování studeného spoje, je nutné si uvědomit, že studený spoj je běžně vyskytující se jev (spojení dvou čel tavenin), kterému nelze v rámci tvarové složitosti dílu (obtékání otvorů, žeber, aj.) zabránit. Nicméně je nutné si také uvědomit, že nemusí být vždy problémem. Kvalitu studeného spoje určuje především místo výskytu, termo-dynamické podmínky a úhel setkání čel taveniny. „Kvalitní“ studený spoj, tedy takový kde nehrozí významné riziko jeho prasknutí, je spoj, ve kterém dochází k bezproblémovému propojení makromolekul. K tomu může dojít pouze v případě, že oba proudy taveniny mají dostatečnou tekutost a dostatečnou kinetickou energii (rychlost toku). Pro konstrukci plastových dílů to znamená, že riziko tvorby nekvalitního studeného spoje roste s délkou toku taveniny (tlakové ztráty, nárůst viskozity taveniny) a lze tedy předpokládat, že se kritická místa budou nacházet na konci dráhy toku taveniny. Nezáleží však pouze na délce dráhy toku taveniny, nýbrž i na úhlu setkání čel taveniny. Potká-li se čelo taveniny pod úhlem  $0^\circ$  až  $90^\circ$  je riziko neoptimálního propojení makromolekul největší. Naopak potkají-li se čela tavenin pod úhlem vyšším než  $120^\circ$  je riziko minimální. Do úvahy je tedy nutno brát i tento aspekt. Problematika studeného spoje značně závisí na použitém materiálu. Pro materiály s vysokou tekutostí (PA, PP, aj.), je riziko tvorby nekvalitního studeného spoje menší, než pro materiály vyznačující se nižší tekutostí (PC). Ještě vyšší obezřetnost musí být brána v potaz při použití materiálů s vláknými výztužemi (vliv orientace výztuže). Neoptimální propojení makromolekul a případný vznik mikro vrubu na povrchu dílů (nízká teplota na povrchu formy, vysoká viskozita taveniny) zapříčiňují, že studený spoj je z hlediska pevnosti velmi často kritickým místem dílu. Studené spoje by se tedy

neměly vyskytovat v namáhaných místech dílu. Dalším faktorem je tloušťka stěny. Vyskytuje-li se studený spoj v oblasti s malým průřezem (tloušťka/šířka) je riziko případného porušení velké. Naopak je-li průřez v oblasti výskytu studeného spoje velký, je riziko případného porušení menší. Proto je někdy výhodné v případě, že není možnost pozici studeného spoje měnit, lokálně zvýšit tloušťku stěny v této oblasti. Nutností je rovněž docílení dostatečného odvodu vzduchu v místě výskytu studeného spoje.

## Volba dělicí roviny

Dělicí rovina je místo na výrobku, kde na sebe dosedají tvarové části formy. Jejím hlavním úkolem je zajistit snadné odformování výrobku. Rovněž pro volbu dělicí roviny platí obecná pravidla:

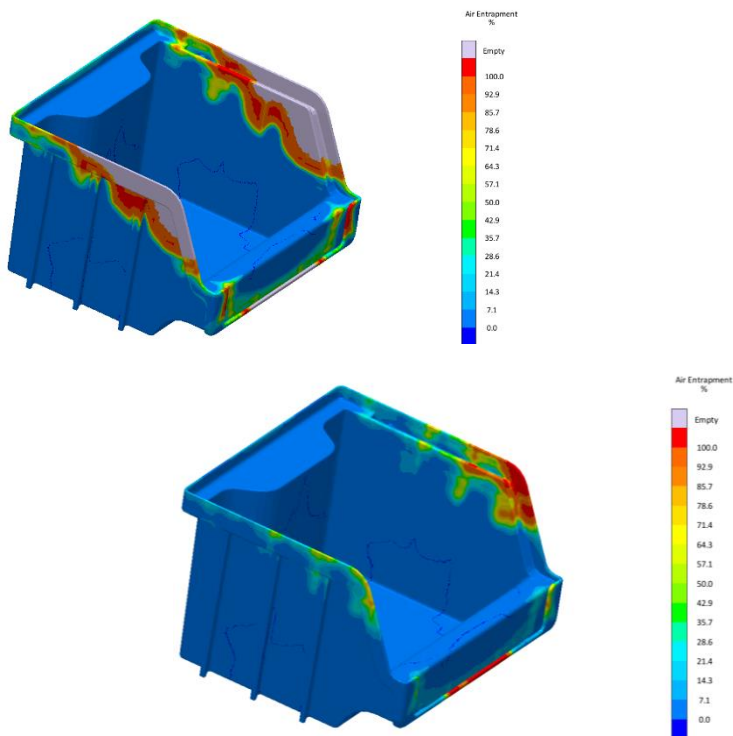
- měla by být co nejjednodušší, ideálně kolmá na směr vstřikování
- umísťovat ji do nepohledových částí dílu
- volit ji tak, aby negativně neovlivňovala proces vstřikování (vady výroby)
- zohlednit volbu úkosů

Slícování dělicí roviny dvou či více částí formy vyžaduje přesné obrábění. Proto jakákoliv tvarová složitost navyšuje cenu formy, a tedy i celkovou cenu výrobku. Dále je nutné si uvědomit, že vlivem opakovaného dosedání tvarových částí forem (miliónové série) dochází k opotřebení. Následná oprava bude v případě tvarově složitých částí komplikovanější a především dražší. K opotřebení či poškození může dojít samozřejmě i v případě, že jsou použity vedlejší dělicí roviny (otvírání částí forem ve směru rozdílném s hlavním směrem otvírání formy).

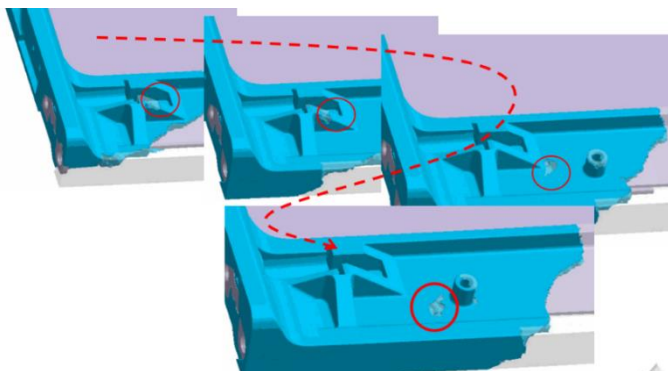
Při volbě dělicí roviny je rovněž nutné si uvědomit, že vlivem výrobních nepřesností toto místo bude vždy na výrobku více či méně vidět. Jedná se o potenciální místo vzniku přetoku a jiných vad. Proto by mě měla být umísťována do nepohledových částí dílu. Dělicí rovina neslouží pouze k snadnému odformování dílu (jsou k ní vtaženy úkosy), nýbrž zajišťuje také odvodu vzduchu formy. Při nevhodné volbě tak hrozí



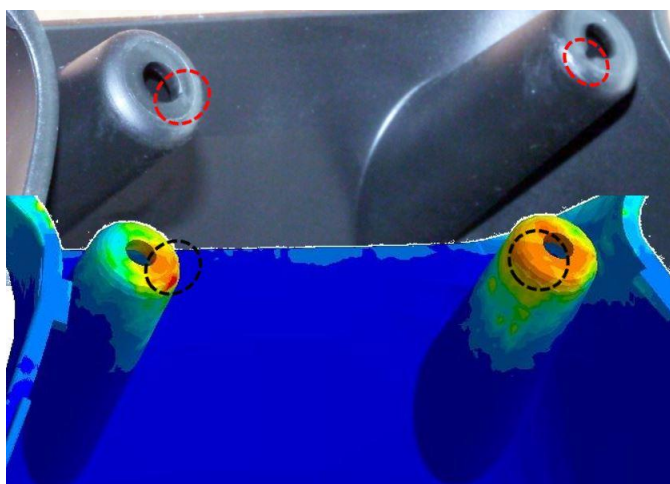
značné riziko uzavírání vzduchu, tzv. „diesel“ efektu a dalších vad. Je tak z hlediska konstrukce plastových dílů mnohem více důležitá, než by se na první pohled zdála. Pomocí simulačních programů lze predikovat potenciální místa uzavírání vzduchu, tlaková a teplotní maxima, což do velké míry napomáhá tuto problematiku eliminovat. Nicméně matematické modely a aplikované diskretizace neumožňují reflektovat aktuální drsnost povrchu formy. Proto nemůžou konkrétně predikovat, zda při daných podmínkách bude vždy vzduch zcela a bezpečně odveden tímto prostorem.



Obr. 26 Příklad predikce uzavření vzduchu v programu - Cadmould



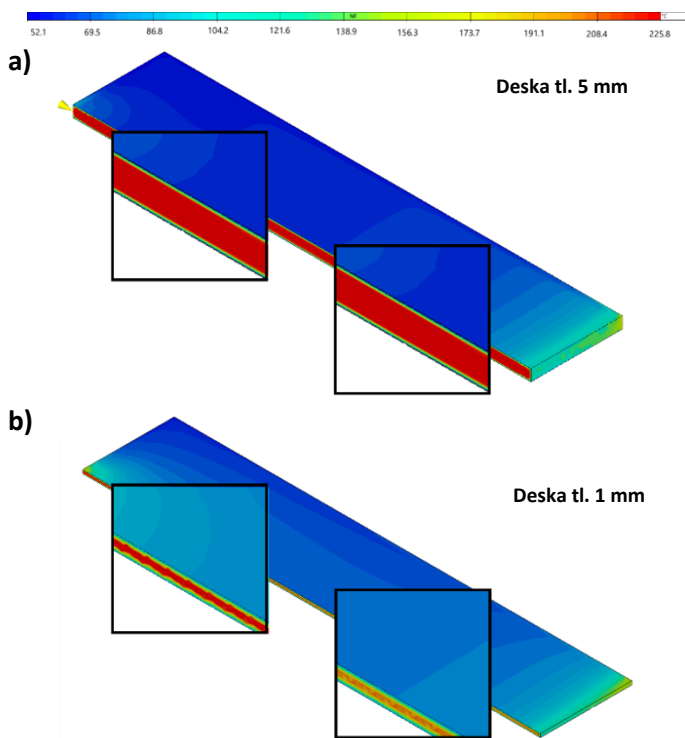
Obr. 27 Příklad predikce uzavírání vzduchu v programu Sigmasoft– vznik a pohyb vzduchové „bubliny“



Obr. 28 Příklad predikce míst uzavírání vzduchu - Sigmasoft

## Tloušťka stěny

Při volbě tloušťky stěny musí být bráno na zřetel nejen pevnostní, funkční či ekonomické hledisko, ale i vliv na technologičnost procesu. Z hlediska pevnosti by bylo vhodné dimenzovat tloušťku stěny co největší. Na druhou stranu z hlediska ekonomického je výhodné (požadavek maximální úspory materiálu) použít tloušťku stěny co nejmenší. Jaký je, ale požadavek technologie? Pro odpověď na tuto otázku je nezbytné si uvědomit, jak tloušťka stěny ovlivňuje proces vstřikování.



Obr. 29 Vliv tloušťky stěny dílu na teplotní distribuci

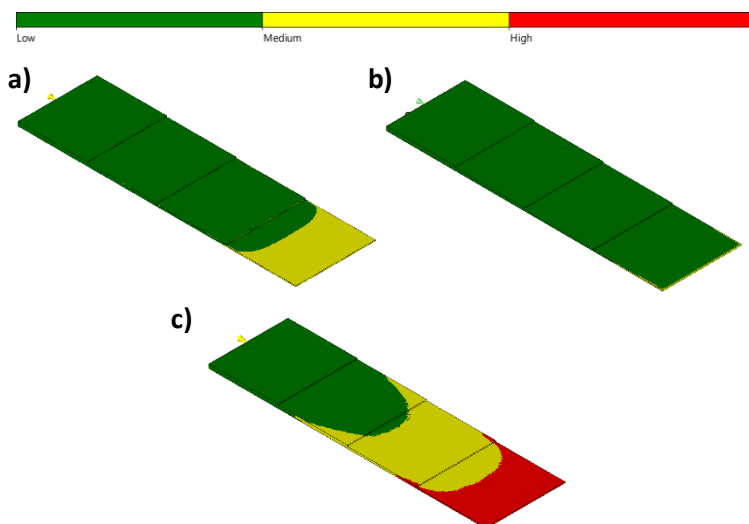
Při kontaktu taveniny s temperovanou stěnou formy dochází k okamžitému tuhnutí taveniny (zamrzlá vrstva). Jádro však zůstává stále ve viskózním stavu umožňující tok taveniny. Právě tloušťka stěny je zásadním faktorem ovlivňující poměr těchto vrstev. Pro konstrukci plastových dílů by bylo nejvýhodnější, kdyby podíl tloušťky zamrzlé vrstvy byl co nejmenší. Znamenalo by to, že tavenina je snadno distribuována do dalších částí dílu s minimálními termodynamickými rozdíly (viz obr 29a, což by evokovalo minimální rozdíly v orientaci makromolekul i utvářené nadmolekulární struktury. V takovémto případě lze očekávat nízkou úroveň vnitřního pnutí a malé riziko změny tvaru dílů. V případě, že je aplikována malá tloušťka stěny je poměr zamrzlé vrstvy ku tekutému jádru méně výhodný (viz obr 29b). To evokuje vyšší strukturní rozdíly v tloušťce stěny, vyšší rozdíly v podmínkách plnění (vtok – konec dílu), což následně zapříčiní vyšší úroveň vnitřního pnutí i případné nežádoucí změny tvaru. Je také dobré si uvědomit, že pro vstřikování dílů malých tlouštěk stěn budou zapotřebí velké vstřikovací tlaky (problematika volby stroje a reprodukovatelnost nastavených hodnot). Na druhou stranu aplikace velké tloušťky stěny sebou přináší i velké riziko tvorby propadlin či staženin, což z hlediska kvality výroby také není žádoucí. S rostoucí tloušťkou stěny kromě spotřebovaného materiálu, délky výrobního času roste i úroveň smrštění (otázka výrobní přesnosti). **Optimální tloušťka stěny tak musí být kompromisem všech výše uvedených aspektů, a v žádném případě nesmí být technologická otázka vynechána!**

Tab. 1 Doporučené tloušťky stěny pro plastové díly dle materiálu

PP	0,6-7,6 mm	POM	0,4-3,2 mm
LDPE	0,5-6,4 mm	PPS	0,5-4,6 mm
HPDE	0,9-6,4 mm	EVA	0,5-3,2 mm
PS	0,8-6,4 mm	PPO	0,8-9,5 mm
ABS	0,8-4,3 mm	PPS	0,4-4,6 mm
PA	0,3-3,2 mm	PES	0,6-3,2 mm
PC	1,0-9,5 mm	Plasty s dlouhými GF	1,9-25 mm

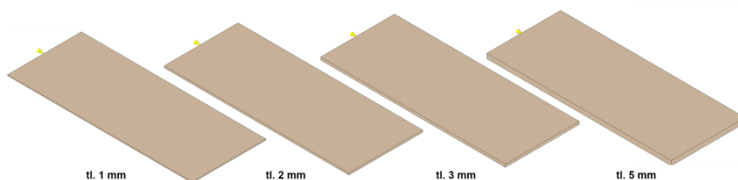
U vstřikovaných dílů jsou standardně voleny tloušťky stěny od 0,3 mm do 10 mm. Konkrétní volba rozměrů vždy závisí zejména na délce toku, použitém materiálu či tvarové složitosti dílu. S rostoucí délkou toku a složitostí dráhy toku se zvětšují i rozdíly v distribuci zamrzlé vrstvy, rozdíly v orientaci makromolekul, případně plniva, strukturní rozdíly, aj. Proto je u velkých dílů nutno volit tloušťku stěny větší než u dílů menších. Volba materiálu, zejména jeho tekutost je dalším určujícím faktorem. Pro materiály vyznačující se vysokou tekutostí (jako například PA) mohou být aplikovány menší tloušťky stěny. Je-li materiál charakteristický nízkou tekutostí (PC) je nutno volit tloušťku stěny pro srovnatelnou dráhu toku větší. Příklad doporučených hodnot tlouštěk stěn pro vybranou skupinu materiálů je uveden v tabulce 1. Jelikož v dnešní době existuje enormní množství variací materiálových kombinací (kopolymery, polymerní směsi, přísady) nelze brát tyto hodnoty za fixní. **Pro volbu optimální tloušťky stěny je vždy nutné vycházet z konkrétního specifického materiálu s danou tekutostí**, viz obr. 30. Je také vhodné upozornit, že v materiálových listech je tekutost hodnocena pomocí

objemového či hmotnostního toku taveniny (MVR, MFR), což nemusí vždy reflektovat tekutost taveniny reálného zpracovatelského procesu. Je proto dobré nespoléhat se pouze na tyto hodnoty, ale provést testování materiálu v reálných podmínkách (zkoušky zabíhavosti, apod.)



Obr. 30 Moldflow analýza problematiky „zabíhavosti“ pro PP materiály s rozdílnou tekutostí

V obrázku je zobrazena predikce problematiky „zabíhavosti“ pro PP a) ADSTIF EA 6485 s MVR  $25 \text{ cm}^3 / 10 \text{ min}$ , b) Moplen EP648V, který má MVR  $134 \text{ cm}^3 / 10 \text{ min}$  a AKROLEN GR 30 s MVR  $8 \text{ cm}^3 / 10 \text{ min}$ , jenž obsahuje 30 hm. % skelných vláken. Zelená barva znamená nízké riziko nedotečení, žlutá střední riziko a červená velké riziko nedotečení taveniny.

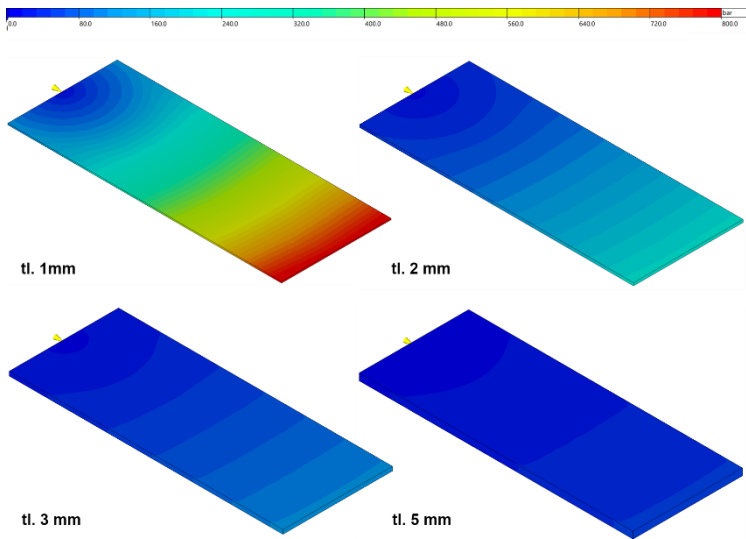


Obr. 31 Analýza vlivu tloušťky stěny na technologičnost procesu

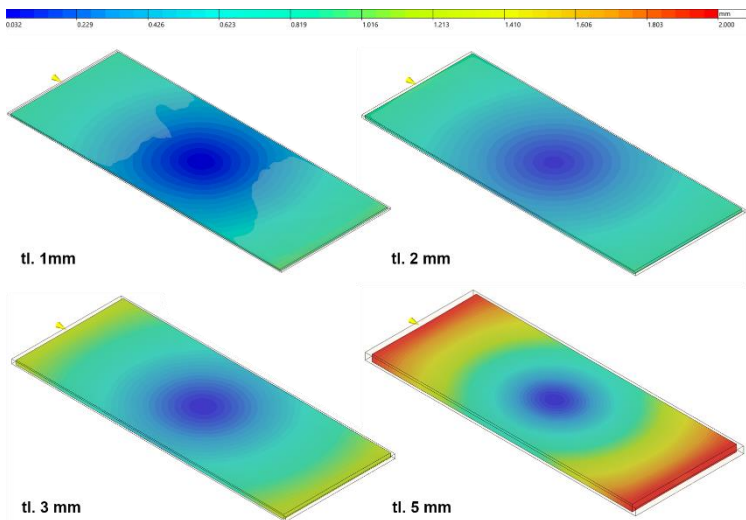
Pro objasnění míry vlivu tloušťky stěny na výrobní přesnost byla provedena „moldflow“ analýza problematiky. Analyzovaným dílem byla stejně jako v předcházejících případech (problematika umístění vtoku) deska z PP o rozměrech 200 x 80 mm (minimalizace vlivu konstrukčních prvků) s tím rozdílem, že byly postupně měněny tloušťky stěny (1 mm, 2 mm, 3 mm a 5 mm). Lze předpokládat, že u geometricky složitějších dílů by byly dosaženy ještě výraznější rozdíly. Vtok byl umístěn z hlediska orientace makromolekul do nejhodnějšího místa (rovnoměrná distribuce). V technické praxi jsou, kromě vizuálního aspektu, těmi nejdůležitějšími výsledky rozměry dílu (výrobní přesnost). Proto byl vliv tloušťky stěny vztažen na deformaci dílu. Je však nutné upozornit, že výsledek volby optimální tloušťky stěny nelze brát obecně, odpovídá vždy použitému materiálu a aplikovaným technologickým parametrům (viz tab. 2). Pro jiné konstrukční varianty, materiály a výrobní procesy se samozřejmě bude lišit. Příklad slouží pouze jako **ilustrativní znázornění míry vlivu tloušťky stěny na výrobní přesnost**.

Tab. 2 Použitý materiál a technologické nastavení procesu vstřikování

Použitý materiál	ADSTIF EA648
Teplota taveniny	225 °C
Teplota formy	45 °C
Rychlost vstřikování	32 cm <sup>3</sup> /s
Doba dotlaku	5 s
Úroveň dotlaku	400 barů
Doba cyklu	30 s



Obr. 32 Vliv tloušťky stěny na tlakové ztráty



Obr. 33 Vliv tloušťky stěny na výrobní deformaci dílů



Výsledky „moldflow“ analýzy jsou představeny v obr. 32 a 33 a tab. 3, kde jsou kromě maximální výrobní deformace, která v sobě zahrnuje jak výrobní smrštění, tak změnu tvaru, rovněž prezentovány výsledné hodnoty rovinnosti plochy a tlakové ztráty. Tlakové ztráty reprezentují úroveň termodynamických podmínek ochlazování taveniny, které následně, jak již bylo vysvětleno, přímo ovlivňují dosažení požadovaného tvaru.

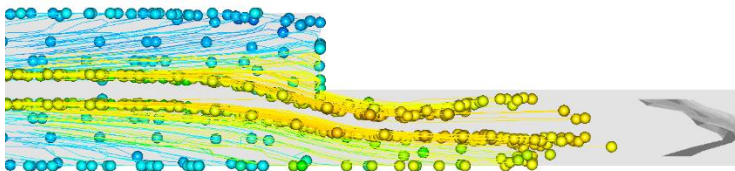
Tab. 3 Výsledky analýzy vlivu tloušťky stěny na technologičnost procesu

	Tl. stěny 1 mm	Tl. stěny 2 mm	Tl. stěny 3 mm	Tl. stěny 5 mm
Tlakové ztráty	796 barů	228 barů	114 barů	50 barů
Deformace dílu (výrobní)	0,99 mm	0,92 mm	1,25 mm	2,02 mm
Rovinnost	0,284 mm	0,100 mm	0,125 mm	0,191 mm

Z vyhodnocených výsledků je evidentní, že nejvyšší úroveň tlakových ztrát dosahovala deska o tloušťce stěny 1 mm (problematika ochlazování toku taveniny). Naopak minimální tlakové ztráty byly evidovány u 5 mm tloušťky stěny. Dále je možno pozorovat, že v případě 2 mm tloušťky stěny došlo v porovnání s 1 mm deskou k výraznému poklesu tlakových ztrát. Deska o tloušťce 1 mm se vyznačovala velmi nízkou úrovní výrobní deformace (rozdíl oproti rozměru formy). Deformace desky s tloušťkou stěny 5 mm byla více jak dvojnásobná. Neznamená to však, že díl byl při 1 mm tloušťce stěny vyroben přesněji. Znamená to, že úroveň smrštění 1 mm desky je mnohem menší než u 5 mm desky. Naopak díky vysoké úrovni tlakových ztrát byla 1 mm deska, dle vyhodnocených výsledků rovinnosti, značně tvarově deformovaná. Vysoká úroveň změny tvaru byla rovněž evidována u 5 mm desky. Znamená to tedy, že jak příliš malá, tak příliš velká tloušťka stěny není z technologického hlediska vhodná. Jsou-li brány v úvahu všechny hodnocené výsledky (tlakové ztráty, deformace, smrštění, rovinnost), je pro daný díl z hlediska výrobní přesnosti nejvhodnější tloušťka stěny 2 mm.

## Přechody tloušťky stěny

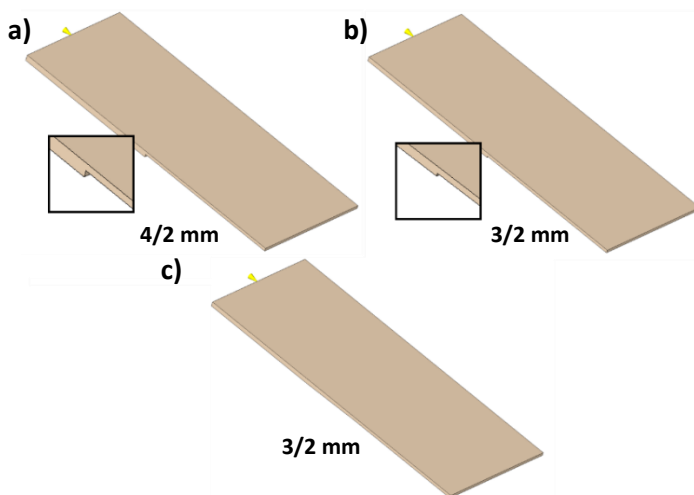
Z důvodu lokálního zvýšení pevnosti, odlehčení dílu (úspory hmotnosti), aj., nebývá tloušťka stěny výrobku v jeho délce stejná a v díle vznikají tzv. přechody. Volba přechodů tlouštěk stěn má vliv jak na proces plnění taveniny, tak i na tuhnutí výrobku. Při použití nevhodných přechodů tlouštěk stěn může dojít v místech ostrých přechodů k víření taveniny (obr. 34) či uzavírání vzduchu. Díky přechodům v tloušťkách stěny tavenina ztrácí svoji kinetickou energii a zvyšuje se úroveň tlakových ztrát, stejně tak jako rozdíly v rychlostech proudění taveniny, a tedy podmínky orientace makromolekul i plniva, které jak již bylo prokázáno mají vliv na deformaci dílu. Konstrukce přechodů rovněž ovlivňuje pevnostní a optické vlastnosti dílu (rozdíly v barevnosti či lesku).



*Obr. 34 Vliv ostrého přechodu tlouštěk stěn na proudění taveniny*

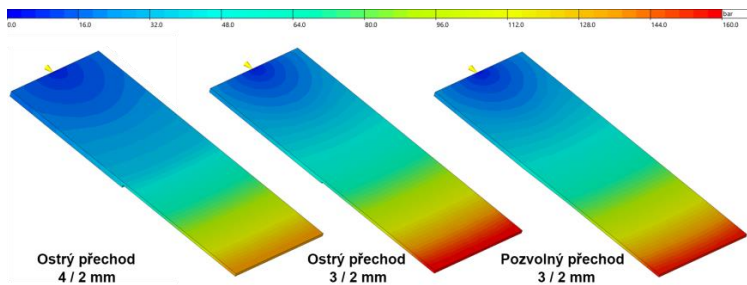
Další důležitý aspekt je smrštění, větší tloušťky stěny se vyznačují vyšší úrovní smrštění než tloušťky stěny menší. Vzhledem k výše uvedenému je nutné konstruovat přechody v tloušťkách stěn v určitém poměru, tak aby byl vliv na výslednou deformaci (především rovinnost) minimální. Vhodný poměr v přechodech tlouštěk stěn závisí zejména na délce toku (tvarová složitost dílu), tokových vlastnostech použitého materiálu a na jeho smrštění. Pro semikrystalické materiály (PP, PE, PA, PBT, POM, aj.), které se běžně vyznačují

cca 1,5% úrovní smrštění je doporučovaný rozdíl mezi tloušťkami stěn pouze 15 %. U amorfních materiálů (PS, ABS, ASA, PC, aj.), díky nižší úrovni smrštění (cca 0,5 %) může být aplikován i vyšší rozdíl a to 25 %. Jsou-li použita plniva (vyztužující i nevyztužující) v dostatečném podílu (10 % a více) je výsledné smrštění ještě nižší. Proto je pro takovéto díly možno použít i přechody v tloušťkách stěn 50 %. Jak z hlediska pevnostního (koncentrace napětí), tak z hlediska technologického, není vhodné, aby přechody byly řešeny ostrými hranami. Kromě aplikace rádiusů je doporučováno konstruovat přechody pozvolné.

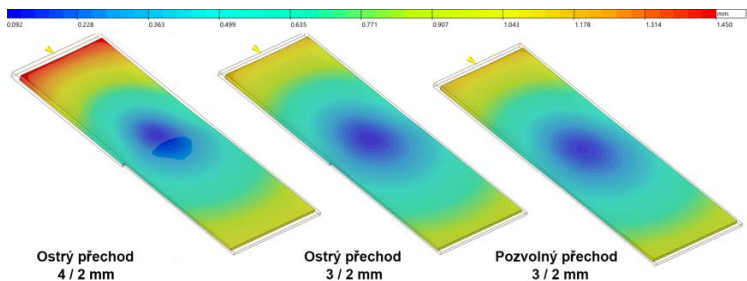


Obr. 35 Analýza vlivu přechodů tlouštěk stěn na technologičnost procesu

Pro ověření míry vlivu přechodů tloušťky stěny na výrobní přesnost byla opět provedena „moldflow“ analýza PP desky o rozměrech 200 x 80 mm (minimalizace vlivu konstrukčních prvků), kde byl použit ostrý přechod z 4 na 2 mm (obr. 35a), ostrý přechod z 3 na 2 mm (obr. 35b) a pozvolný (plynulý) přechod z 3 na 2 mm (obr. 35c). Procesní parametry byly nastaveny shodné jako v případě analyzování vlivu tloušťky stěny (tabulka 2).



Obr. 36 Vliv tloušťky stěny na tlakové ztráty



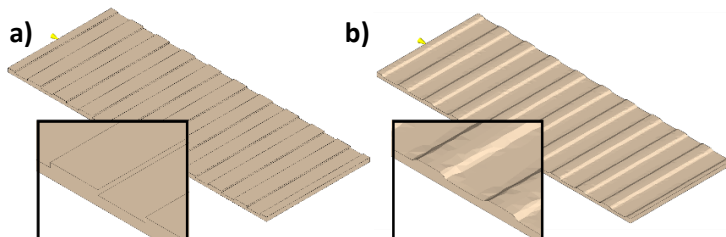
Obr. 37 Vliv tloušťky stěny na výrobní deformaci

Tab. 4 Výsledky analýzy vlivu přechodů tl. stěny na technologičnost procesu

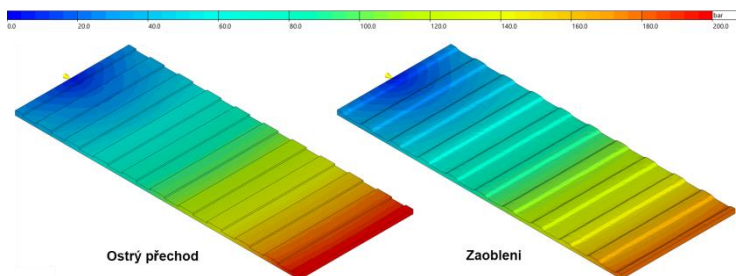
	Přechod 4/2 mm	Přechod 3/2 mm	Pozvolný přechod 3/2 mm
Tlakové ztráty	137 barů	158 barů	155 barů
Deformace dílu (výrobní)	1,45 mm	1,17 mm	1,18 mm
Rovinnost	0,24 mm	0,16 mm	0,16 mm

Vyhodnocené výsledky tlakových ztrát, výrobní deformace a rovinnosti jednoznačně dokazují, že v případě aplikace velkých rozdílů v tloušťkách stěn dochází k výraznému nárůstu výrobní deformace a změně tvaru dílu. Z výsledků je rovněž evidentní, že u provedené „moldflow“ analýzy neovlivní aplikace pozvolného přechodu výslednou rozměrovou přesností dílu (na rozdíl

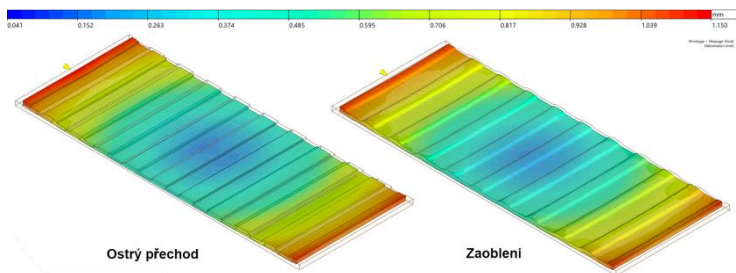
od změn v tloušťkách stěn). Je však nutné si uvědomit, že tavenina musí překonat pouze jednu konstrukční překážku (jeden přechod) a neztratí tak mnoho kinetické energie. Je otázkou, jaké by byly rozdíly v případě, že tavenina musí překonat více překážek. Proto byla provedena další analýza, kde byl analyzován vliv vícenásobných změn přechodů tlouštěk stěn.



Obr. 38 Analýza vlivu násobnosti přechodů tlouštěk stěn na technologičnost  
a) ostrý přechod z 3 na 2 mm, b) pozvolný přechod (zaoblění) z 3 na 2 mm



Obr. 39 Vliv násobnosti přechodů tlouštěk stěn na tlakové ztráty

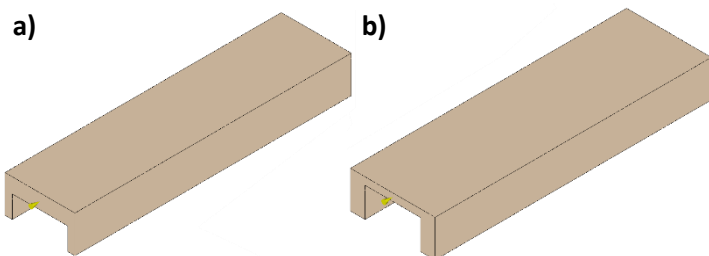


Obr. 40 Vliv násobnosti přechodů tlouštěk stěn na výrobní deformaci

Při aplikaci vícenásobných přechodů tlouštěk stěn dochází k narůstání tlakových ztrát (oproti variantě s jedním přechodem) a znatelnému zhoršení rovinnosti. Rozdíl mezi ostrým a pozvolným přechodem je nyní rovněž markantní, viz tabulka 5. Znamená to tedy, že pakliže je díl jednoduchý bez složitých geometrických změn a obsahuje malý počet přechodů v tloušťkách stěn je problematika volby pozvolného přechodu minoritní. Se složitostí a počtem přechodů v tloušťkách stěn význam problematiky roste, stejně tak jako se se snižující se tekutostí použitých materiálů.

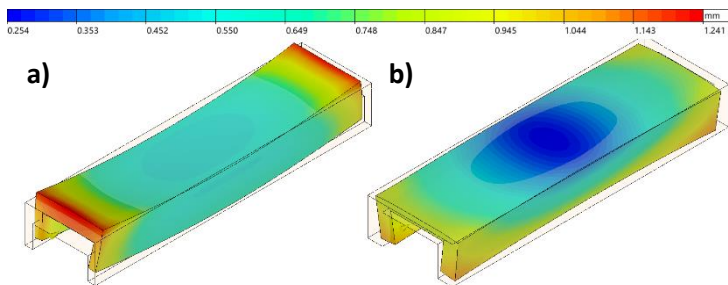
Tab. 5 Výsledky analýzy vlivu vícenásobných přechodů tloušťky stěny na technologičnost procesu

	Vícenásobný přechod 3/2 mm	Pozvolný vícenásobný přechod 3/2 mm
Tlakové ztráty	198 barů	180 barů
Deformace dílu (výrobní)	1,15 mm	1,07 mm
Rovinnost	0,45 mm	0,33 mm



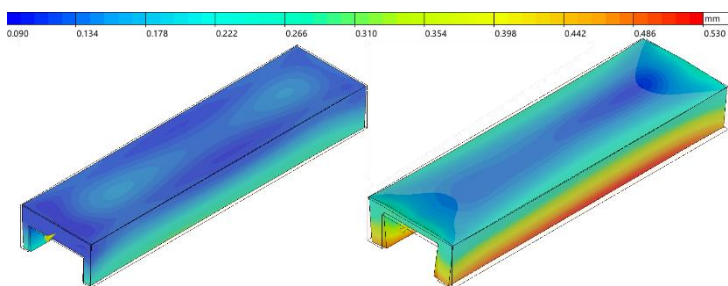
Obr. 41 Analýza vlivu přechodů tlouštěk stěn mezi obvodovými stěnami na výrobní deformaci dílu

Pro dokázání vlivu přechodů tlouštěk stěny na výrobní přesnost, potažmo výrobní deformaci, byla provedena další analýza, ve které byl cíleně zvolen značný rozdíl v tloušťkách obvodových stěn (poměr 2:1 obr. 41a, poměr 1:2 obr. 41b).



Obr. 42 Vliv přechodů v tloušťkách obvodových stěn na výrobní deformaci dílů

U obou představených variant se vyskytuje deformace bočních stěn směrem dovnitř dílu (dáno tvarem dílu – otevřený profil C). Rozdíly v poměru tloušťek stěn však zapříčiňují zcela odlišnou deformaci rovinné části dílu (základny). V případě, že se větší tloušťka vyskytuje v rovinné části základny dochází k největší změně tvaru právě v této oblasti (obr. 42a). Zcela opačnou deformační charakteristiku je možné pozorovat je-li větší tloušťka stěny v boční části dílu (obr 42b). Aplikace skelných vláken snižší úroveň deformace, ale také změni její charakteristiku, viz obr. 43.

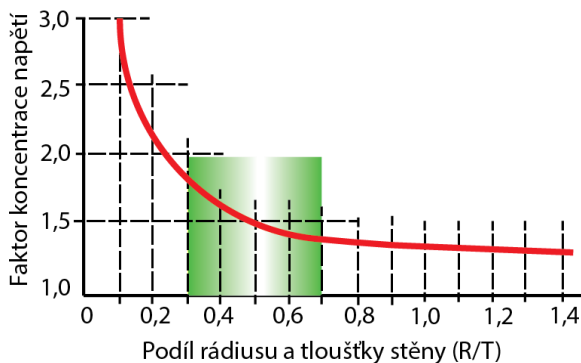


Obr. 43 Vliv přechodů v tloušťkách stěny na výrobní deformaci PP dílů s 30% obsahem skelných vláken

Uvedené příklady dokazují, že tloušťka stěny a její přechody společně s volbou materiálu můžou zásadním způsobem změnit výslednou deformaci dílu!

## Rádusy

Nezbytnou součástí plastových dílů jsou rádiusy, které plní současně hned několik funkcí. Při správné volbě tvoří vyztužující konstrukční prvek dílu (eliminace deformací, dosažení vyšších pevností či tuhostí dílu). Určujícím faktorem je koncentrace napětí, viz obr. 44. V případě, že není použit rádius žádný, je koncentrace napětí vysoká a hrozí tedy velké riziko snadného poškození působením vnější síly. Na druhou stranu je-li použit rádius příliš velký je koncentrace napětí nízká, ale stejně tak nízký je i vyztužující efekt. Proto z hlediska pevnostního je doporučováno volit rádiusy v poměru 0,3 až 0,75 násobku tloušťky stěny.

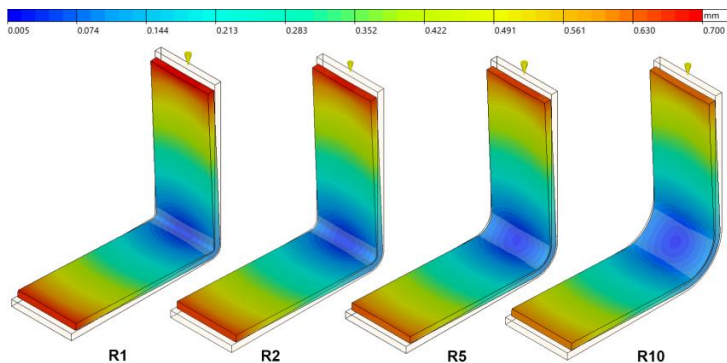


Obr. 44 Vliv rádiusu na koncentraci napětí

Rádusy z hlediska technologického ovlivňují proces toku taveniny i výrobní deformace dílu. Jsou-li správně zvoleny usnadňují proces odformování dílu. Proto jediné místo, kde na díle nemusí být konstruovány rádiusy je dělicí rovina. Z hlediska toku taveniny by bylo výhodné aplikovat rádiusy co největší, což by zajistilo minimalizaci tlakových ztrát toku taveniny. Nicméně, jak již bylo řečeno, velký poloměr rádiusů

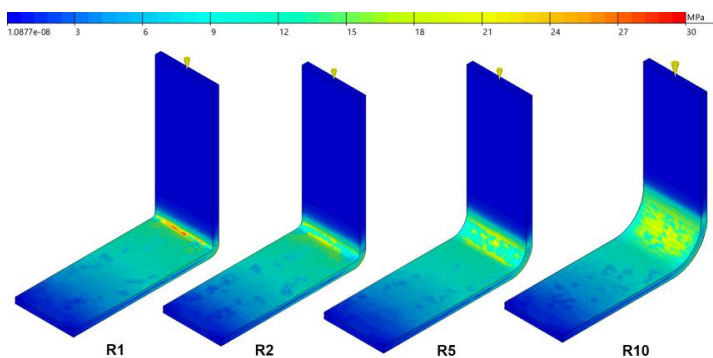


má malý vyztužující efekt. Výsledkem je pak pokles rovinnosti dílu. Ještě větší vliv na deformaci tvaru má kumulace materiálu v případě použití nevhodného poměru vnějšího a vnitřního rádiusu. Vnitřní rádius by měl být zvětšen o tloušťku stěny.

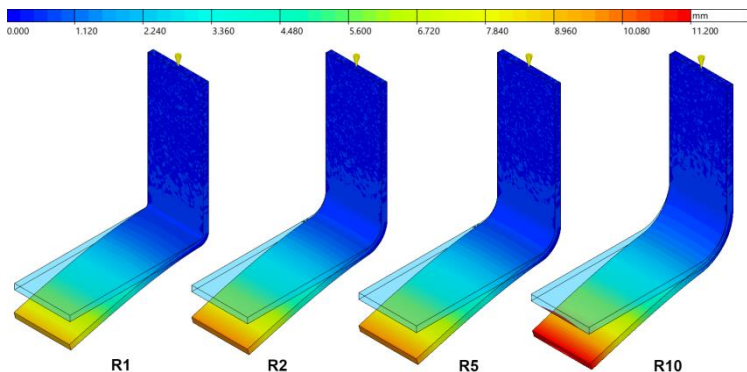


Obr. 45 Analýza vlivu rádiusu na výrobní deformaci (tloušťka 2 mm)

Z důvodu nejmenšího ovlivnění toku taveniny (tlakových ztrát) se vyznačuje analyzovaný díl s největším rádiusem (R10) nejmenší výrobní deformací. Je však nutno podotknout, že rozdíly mezi jednotlivými variantami jsou relativně malé. Nicméně u tvarově složitějších dílů, dílů s menší tloušťkou stěny, dílů s četnými přechody tlouštěk stěn a dalšími konstrukčními prvky lze předpokládat vyšší význam vlivu poloměru rádiusu na výrobní deformaci.



Obr. 46 Vlivu rádiusu na distribuci koncentrace napětí (Stress von Mises)



Obr. 47 Vliv rádiusu na distribuci deformace dílu (vnější zatížení)

V obrázku 46 je zobrazena distribuce napětí při aplikaci jednoosého tíhového zatížení 5 N v místě konce dílu. Toto zatížení vyvolá největší napětí u rádiusu s poloměrem 1 mm. Z hlediska pevnostního a ani z hlediska technologického proto není vhodné použití takto malých rádiusů. S narůstajícím poměrem R/T klesá úroveň evokovaného napětí. Nejedná se však o lineární závislost, což je v souladu s výše provedeným teoretickým rozbořem (obr. 44). Dále je evidentní navýšení deformace se zvyšujícím se poloměrem. Proto je možné konstatovat, že se zvyšujícím se poloměrem dochází k snížení vyztužujícího efektu.

Tab. 6 Výsledky analýzy vlivu poloměru rádiusu na výrobní deformaci a pevnostní charakteristiky

	Rádus 1 mm	Rádus 2 mm	Rádus 5 mm	Rádus 10 mm
Tlakové ztráty	82,3MPa	81,6 MPa	80,4 MPa	79,1 MPa
Výrobní deformace	0,70mm	0,68 mm	0,65 mm	0,60 mm
Napětí (stress von Mises)	29,9MPa	25,4 MPa	23,7 MPa	22,6 MPa
Deformace dílu po zatížení	8,8 mm	9,2 mm	9,8 mm	11,3 mm

## Úkosy a podkosy

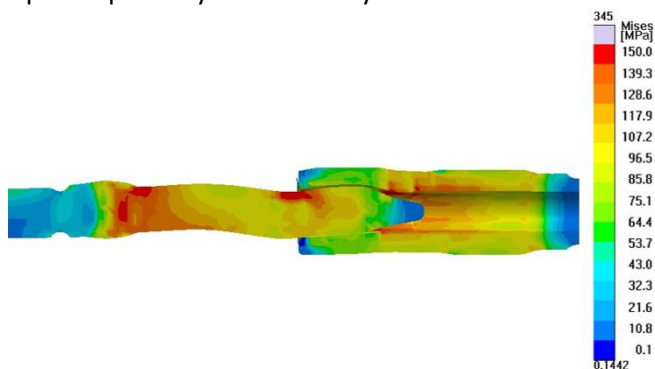
Hlavním úkolem úkosů je docílení snadného odformování dílů. K volbě úkosů je nutno přistupovat individuálně. Záleží vždy na interakci všech aplikovaných konstrukčních aspektů (umístění vtoků, orientace makromolekul a plniva, distribuce tloušťky stěny, volba rádiusů, aj.), které ovlivňují míru deformací a potřebnou vyhazovací sílu. Zjednodušeně řečeno tedy platí, že čím je odformovací plocha a hloubka větší, tím musí být použit i větší úkos.

Tab. 7 Doporučené úkosy pro vybranou skupinu materiálů

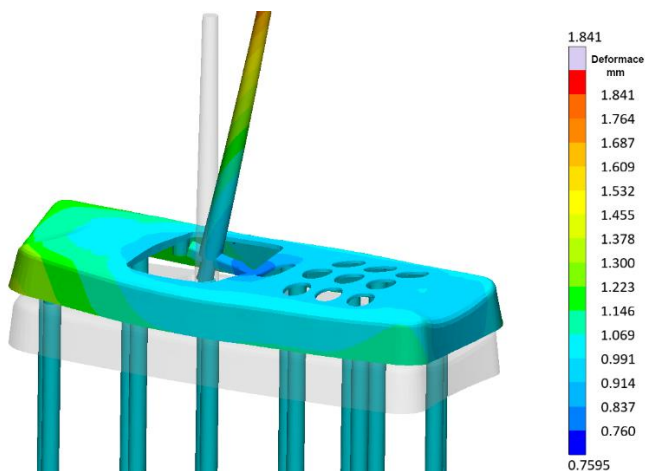
<i>PA, POM, HDPE, ABS, PP</i>	<i>0,5 °</i>
<i>PBT, SB</i>	<i>1 °</i>
<i>PS, SAN, PC</i>	<i>1,5 °</i>
<i>Pískové zdrsnění povrchu PC, imitace kůže ABS</i>	<i>2 °</i>
<i>Imitace kůže měkčené PVC</i>	<i>4 °</i>

Kromě rovinných ploch musí být úkosy aplikovány i u dalších konstrukčních prvků, jako jsou žebra, otvory, aj. Ačkoli amorfní materiály se vyznačují menší úrovní smrštění, jsou pro tyto materiály doporučovány úkosy větší než u materiálů semikrystalických, viz tabulka 7. Důvod je standardně vyšší houževnost semikrystalických materiálů, které jsou schopny i částečné deformace bez značného rizika jejich poškození. Aplikace ještě vyšších úkosů je vyžadována při použití povrchového reliéfu, dezénu, apod. Přesto že se skutečná úroveň vyhazovací síly může vlivem zanedbání faktoru finální úpravy povrchu formy (vliv směrovosti a typu povrchové úpravy – elektrojiskrové obrábění, leštění do zrcadlového či technického lesku) může mírně lišit od numerické predikce, lze

problematiku odformování/úkosů efektivně optimalizovat tímto nástrojem. Důležité nejsou absolutní hodnoty potřebné odformovací síly, nýbrž kritická místa, jež by měla být následně konstrukčně optimalizována, a to i případnou změnou úkosů. Není-li takováto optimalizace konstrukčně možná, musí tato místa alespoň umožnit dostatečný prostor pro aplikaci prvků vyhazovacího systému.

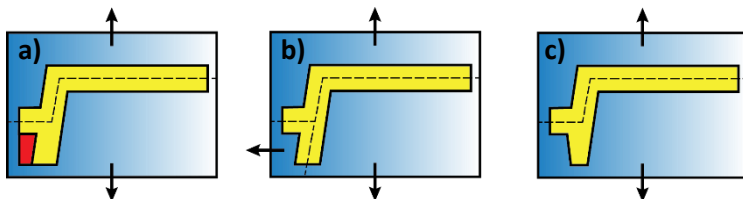


Obr. 48 Deformace a napěťový stav jádra ve fázi odformování - Sigmasoft



Obr. 49. Vliv umístění vyhazovacích kolíků na deformaci dílu při odformování - Sigmasoft

Je-li to možné, tak při konstrukci plastových dílů je vhodné vyvarovat se vnějším i vnitřním podkosům, tedy místům, které brání odformování dílů. Nicméně při dodržení vhodné geometrie podkosů lze i tak výrobky ze semikrystalických i amorfních materiálů či vlákny vyztužených polymerů odformovat. Musíme si totiž uvědomit, že jsou odformovávány při vyšších teplotách, při kterých jsou schopny vyšších elastických deformací než při teplotě okolí. I v tomto případě však nesmí být překonána hranice 70 % meze kluzu použitého materiálu a deformace musí být pouze elastická. Příklady doporučených rozměrů podkosů jsou uvedeny v tab. 8.



Obr. 50 Vliv tvaru podkosů na odformování dílů

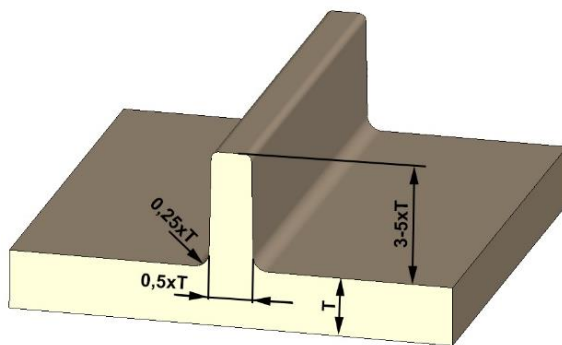
Na obrázku a) podkos může být aplikován jen za dodržení určité geometrie (tab. 8), b) podkos může být zachován na úkor složitosti odformování, c) konstrukční řešení bez podkosu

Tab. 8 Doporučená maximální výška podkosů

Materiál	Max. výška podkosu	Materiál	Max. výška podkosu
ABS	1,8 mm	PP	1,5 mm
PA	1,5 mm	PS	1 mm
PC	1 mm	PSU	1 mm
PE	2 mm	PVC	2,5 mm

## Žebra

Plasty se v porovnání s jinými konstrukčními materiály (kovy i nekovy) vyznačují výrazně (několika násobně) nižší tuhostí. Proto je vhodná, a v některých případech i nezbytná, aplikace konstrukčně vyztužujících prvků. Mezi nejčastěji aplikované vyztužující prvky patří bezesporu žebra. Aplikace žeber však kromě vyztužujícího efektu rovněž zásadním způsobem ovlivňuje distribuci taveniny, smrštění a deformaci dílu. Jejich správné dimenzování je tak pro dosažení požadované kvality dílu enormně důležité. Z hlediska technologického bychom se při konstrukci žeber měli vyvarovat jakémukoliv hromadění materiálu, které by evokovalo tvorbu propadlin či staženin. Z tohoto důvodu je doporučováno aplikovat tloušťku žeber kolem 50 % tloušťky obvodové stěny (obr. 51).



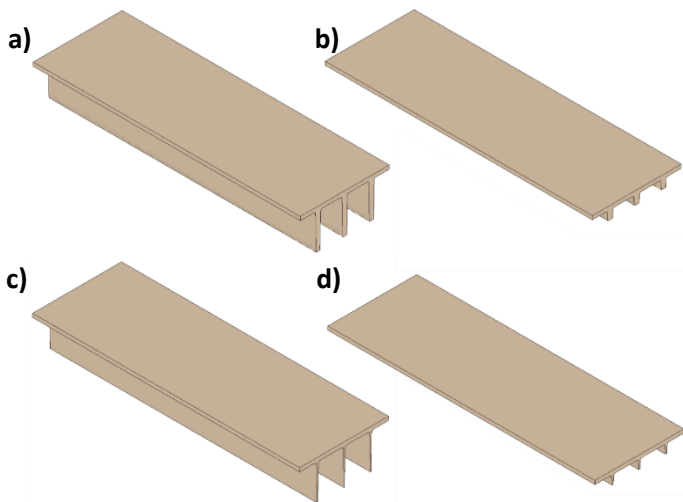
Obr. 51 Obecně doporučené rozměry žeber

Konkrétní hodnota podílu tloušťek stěn žebra k obvodové stěně (stejně jako u přechodů v tloušťkách stěn) záleží na volbě materiálu a délce toku. Je-li aplikován materiál s vysokou tekutostí a malým smrštěním je riziko vzniku propadlin či staženin menší než v opačném případě. Příklady doporučených poměrů tloušťek stěn vzhledem k míře rizika vzniku propadlin jsou uvedeny v tabulce 9.

Tab. 9 Doporučený podíl tloušťek stěn žebra a obvodové stěny

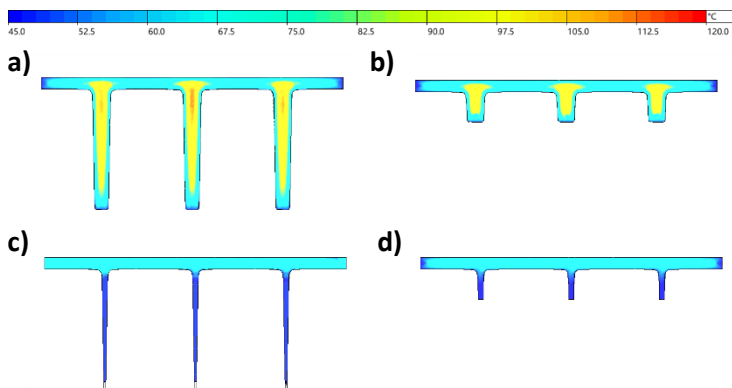
<i>Materiál/ podíl tloušťek stěn</i>	<i>Minimální riziko propadlin</i>	<i>Malé riziko propadlin</i>
<i>ABS</i>	<i>40 %</i>	<i>60 %</i>
<i>PA</i>	<i>50 %</i>	<i>66 %</i>
<i>PC</i>	<i>30 %</i>	<i>40 %</i>
<i>PE</i>	<i>33 %</i>	<i>50 %</i>
<i>PP</i>	<i>30 %</i>	<i>40 %</i>
<i>PS</i>	<i>33 %</i>	<i>50 %</i>

Při dimenzování tloušťky žeber je dále kromě problematiky hromadění materiálu nutno brát v úvahu jejich výšku. Z hlediska tuhosti dílu platí, že čím je výška žebra vyšší tím vyššího vyztužujícího efektu bude dosaženo. Nicméně z hlediska technologického to znamená (vzhledem k nutnosti aplikace úkosů) vyšší riziko nedotečení taveniny, uzavírání vzduchu, vyšší nebezpečí poškození výrobku při odformování a jiná technologická rizika. Výsledný konstrukční návrh tedy opět musí být kompromisem (volba prioritních aspektů) celé problematiky. Výška žebra by se standardně měla pohybovat v rozmezí 3 až 5násobku tloušťky stěny.



Obr. 52 Analýza vlivu výšky a tloušťky tlouštěk žebra na deformaci dílu

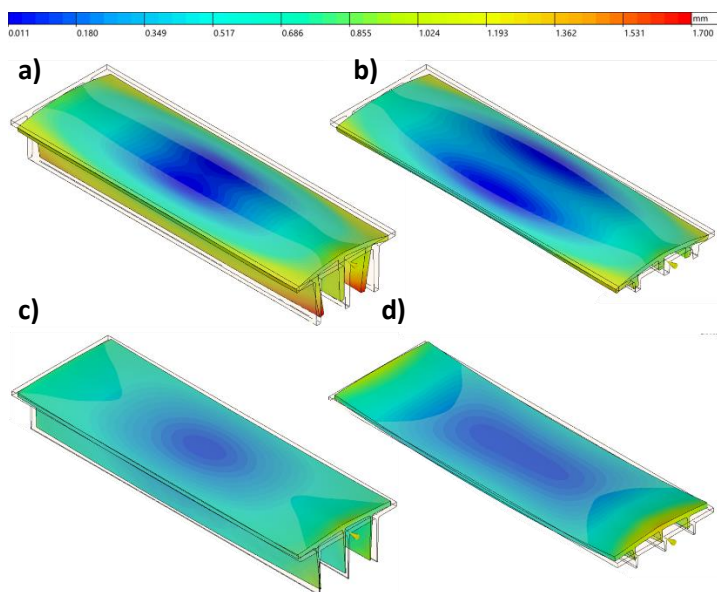
Na obrázku a) tloušťka žebra odpovídá 100 % tloušťky obvodové stěny, výška 10násobku tloušťky stěny; b) tloušťka žebra odpovídá 100 % tloušťky obvodové stěny, výška 3násobku tloušťky stěny; c) tloušťka žebra 50 % tloušťky obvodové stěny, výška 10násobek tloušťky stěny, d) tloušťka žebra 50 % tloušťky obvodové stěny, výška 3násobek tloušťky stěny.



Obr. 53 Vliv tloušťky stěny a výšky žebra na teplotní distribuci

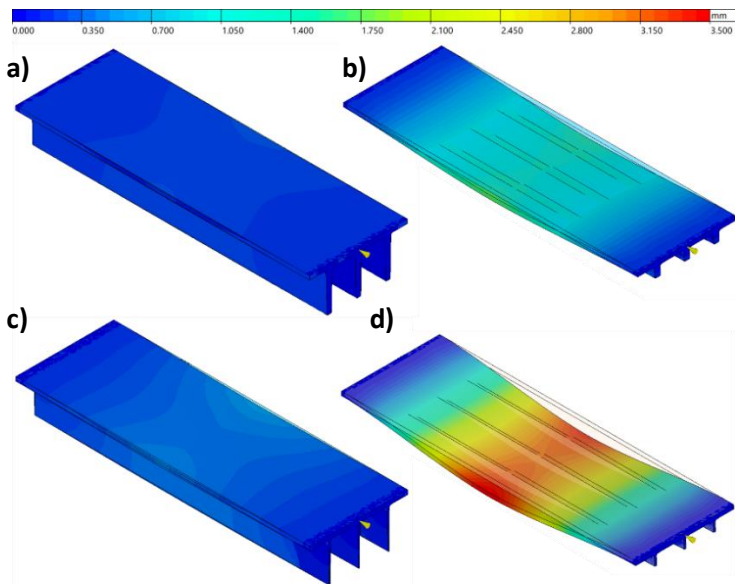


Ze zobrazených teplotních distribucí v čase odpovídající konci výrobního cyklu jsou u velkých tloušťek žeber, obr. 53a, 53b, zjevné teplotní uzly v oblasti napojení žeber na obvodovou tloušťku stěny. Tato místa prodlužují výrobní čas a jsou potenciálním důvodem vzniku propadlin či staženin. Naopak u tenkých žeber, obr. 53c, 53d, je riziko tvorby propadlin a staženin vzhledem k teplotní distribuci minimální. Díky rychlému chladnutí v oblasti žeber však zejména u dlouhých žeber hrozí velké riziko nedotečení taveniny a degradace materiálu vlivem vyšší úrovně smykového namáhání taveniny.



Obr. 54 Vliv tloušťky stěny a výšky žebra výrobní deformace

Ze zobrazených výsledků výrobní deformace je evidentní vliv jak tloušťky žebra, tak jeho výšky. Výše prokázaná kumulace tepla při aplikaci velkých tloušťek stěn žeber způsobuje značnou deformaci povrchu (obr. 54a, 54b), a tedy ztrátu rovinnosti. S rostoucí délkou těchto žeber roste úroveň deformace. V tomto případě je charakteristický jev tzv. „vytahování“ žeber. U tenkých žeber je charakteristická deformace zcela jiná. Dochází zde k tzv. „prolamování“ stěny směrem k žebřům (obr. 54c, 54d). Toto prolamování se se snižující výškou žeber zvětšuje. Klesá tedy vyztužující efekt žeber. Nízká žebra již nemají dostatečné parametry pro udržení rovinnosti obvodové stěny.



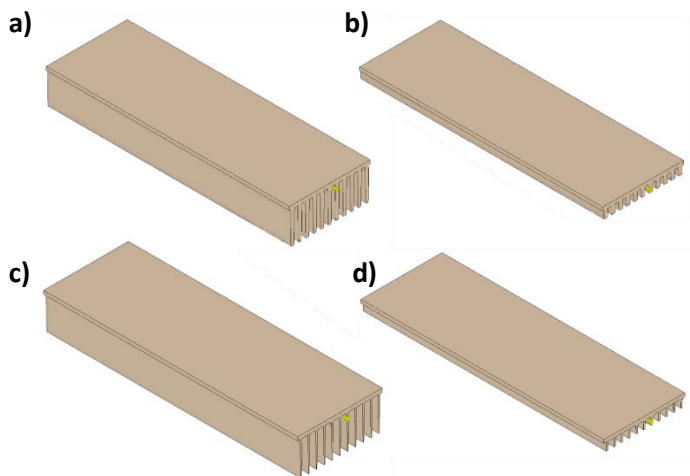
Obr. 55 Vliv tloušťky stěny a výšky žebra na deformaci dílu

Pro detekci vlivu konstrukce žeber na pevnostní charakteristiky byla rovněž v tomto případě provedena pevnostní FEM analýza. Díl s žebry byl v obou koncích zafixován. Vyvozená síla (50 N) byla aplikovaná v jeho středu. Výsledky deformace jednoznačně deklarují, že z hlediska pevnostního je určujícím faktorem výška žebra. Porovnání hodnot (maxim) všech dosažených výsledků je představeno v tabulce 10.

Tab. 10 Výsledky analýzy vlivu tloušťky a výšky žebra

	Varianta a	Varianta b	Varianta c	Varianta d
Tlakové ztráty	98 barů	95 barů	206 barů	142 barů
Výrobní deformace	1,72 mm	1,34 mm	0,96 mm	1,35 mm
Rovinnost	1,31 mm	1,35 mm	0,69 mm	1,43 mm
Deformace po zatížení	0,19 mm	1,73 mm	0,54 mm	3,51 mm

Dalším důležitým parametrem je vzdálenost žeber od sebe. Ta by se měla dle doporučení pohybovat mezi 5 až 10násobkem tloušťky stěny.



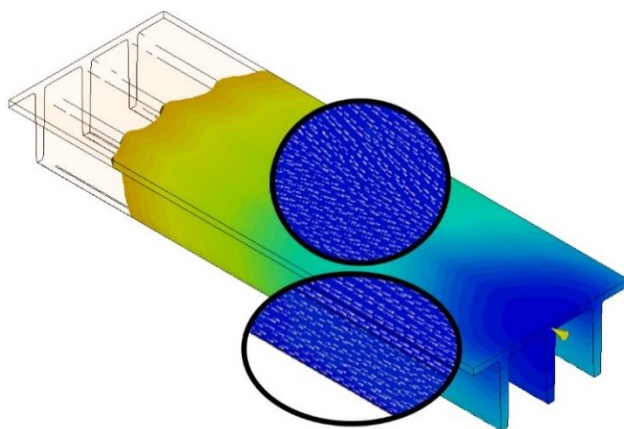
Obr. 56 Analýza vlivu vzdálenosti žeber na deformaci

Pro porovnání vlivu vzájemné vzdálenosti žeber na výrobní přesnost dílu a deformaci byla provedena obdobná analýza jako v předcházejícím případě. Pouze vzdálenost žeber byla změněna z 10násobku na 3násobek tloušťky stěny. Na obrázku a) tloušťka žebra odpovídá 100 % tloušťky obvodové stěny, výška 10násobku tloušťky stěny; b) tloušťka žebra odpovídá 100 % tloušťky obvodové stěny, výška 3násobku tloušťky stěny, c) tloušťka žebra odpovídá 50 % tloušťky obvodové stěny, výška 10násobku tloušťky stěny, d) tloušťka žebra odpovídá 50 % tloušťky obvodové stěny, výška 3násobku tloušťky stěny. Charakteristiky deformací zůstávají nezměněné, proto jsou výsledky prezentovány pouze ve formě souhrnu hodnot (maxim), tabulka 11. Z dosažených výsledků je možno konstatovat závěr, že se zmenšující se vzdáleností žeber došlo k navýšení výrobní deformace, která je zapříčiněná zejména teplotní nehomogenitou (větším počtem teplotních uzlů). Význam tohoto tvrzení se zvětšuje se zvětšující se tloušťkou stěny žebra. U tenkých žeber docházelo k zřetelně menšímu nárůstu výrobní deformace. Navýšení počtu žeber dle předpokladu způsobuje navýšení tuhosti dílu. Nicméně výška žebra z hlediska pevnostního stále zůstává tím nejzásadnějším faktorem.

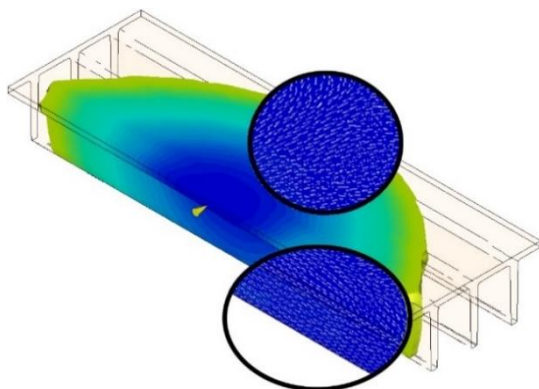
Tab. 11 Výsledky analýzy vlivu vzdálenosti, tloušťky a výšky žeber

	Varianta a	Varianta b	Varianta c	Varianta d
Tlakové ztráty	117 barů	108 barů	232 barů	158 barů
Výrobní deformace	6,86 mm	2,72 mm	1,58 mm	1,46 mm
Rovinnost	3,98 mm	3,92 mm	1,04 mm	1,78 mm
Deformace po zatížení	0,04 mm	0,70 mm	0,51mm	1,45 mm

Z hlediska technologického je nesmírně důležitý aspekt způsobu plnění dílu. Pro minimalizaci tlakových a teplotních ztrát je vhodné, aby žebra byla umístěna ve směru toku taveniny. Význam problematiky umístění vtoku také v tomto případě bude záviset na konkrétní geometrii žebra, tokových vlastnostech materiálu a překážkách, které tavenina musí urazit. Lze tedy předpokládat, že největšího významu bude nabývat u tenkých vysokých žeber aplikovaných ve velkém počtu.

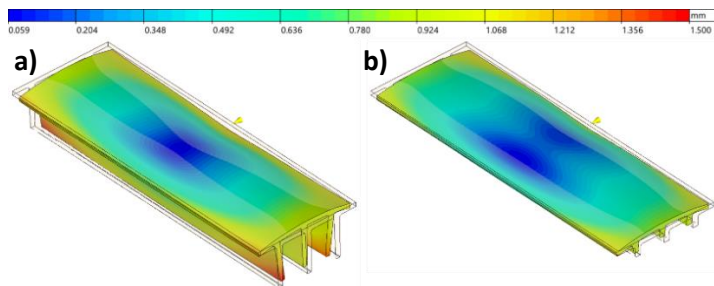


Obr. 57 Vliv umístění vtoku na orientaci makromolekul – tok ve směru žeber velké tloušťky stěny



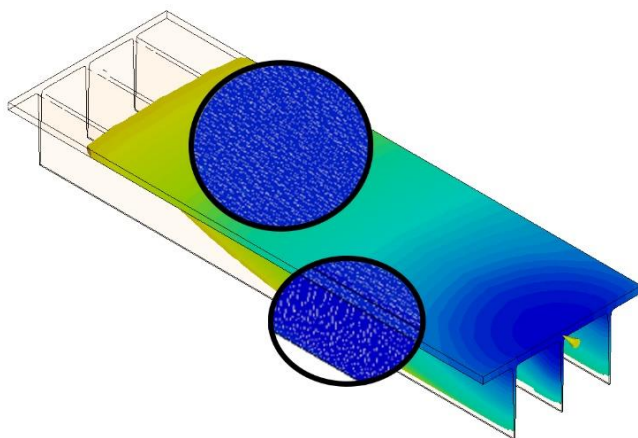
Obr. 58 Vliv umístění vtoku na orientaci makromolekul – tok ve směru kolmém na žebra velké tloušťky

Při umístění vtoku ve směru orientace žebor (obr. 57) dochází při použití velké tloušťky stěny k rovnoměrnému plnění obvodové stěny i žebor. Výsledkem je shodná orientace makromolekul v obou oblastech. Je-li vtok umístěn ve směru kolmém na orientaci žebor (obr. 58) dochází v prvotní fázi plnění ke změně natékání a tedy i orientace plniva. Vlivem teplotních a tlakových ztrát toku taveniny však po chvíli opět dojde k plnění žebor ve směru jejich délky. Proto ani charakter výrobní deformace se v obou případech nemění (obr. 54a, 59a). Stejnou závislost a deformační charakteristiku vykazují i žebra nižší (obr. 54b a 59b).

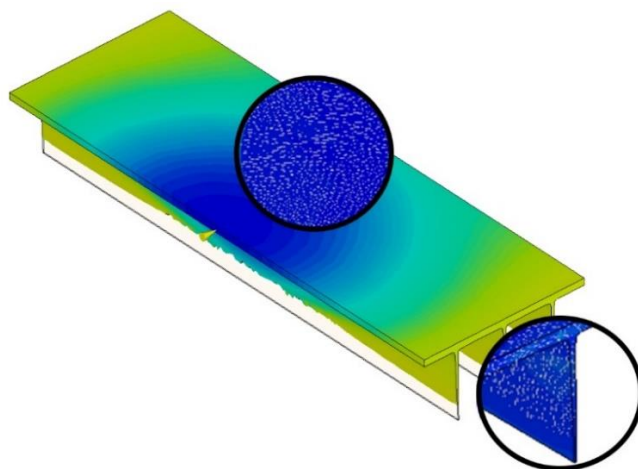


Obr. 59 Vliv umístění vtoku na výrobní deformaci – tok ve směru kolmém na žebra velké tloušťky

Na obrázku a) výška žebra odpovídající 10násobku tloušťky stěny, b) výška žebra odpovídající 3násobku tloušťky stěny

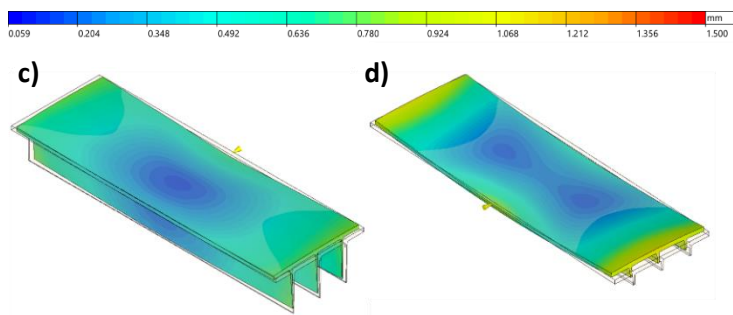


*Obr. 60 Vliv umístění vtoku na orientaci makromolekul – tok ve směru žeber malé tloušťky stěny*



*Obr. 61 Vliv umístění vtoku na orientaci makromolekul – tok ve směru kolmém na žebra malé tloušťky stěny*

Jsou-li použita tenká žebra dochází k nerovnoměrnému plnění, a to v obou případech umístění vtoku, viz obr. 60 a obr. 61. Nejdříve je zaplněna rovinná obvodová stěna (orientace ve směru proudění) a následně tavenina zatéká do oblastí s vyšším tlakovým odporem – tenká žebra, což vyvolá orientaci makromolekul v tomto směru a zapříčiňuje v porovnání s aplikací silných tloušťek žebor změnu deformační charakteristiky. Je-li porovnán vliv umístění vtoku na výrobní přesnost (tabulka 11 a 12) s vlivem tloušťky stěny žebra, je zřejmý vyšší vliv právě tloušťky stěny. Vliv umístění vtoku je v tomto případě méně významný. To však neznamená, že umístění vtoku nemá vliv na výrobní přesnost. U tvarově složitějších dílů, při použití materiálů s vyšší viskozitou lze předpokládat navýšení významu této problematiky, stejně tak jako u materiálů vyztužených skelnými či jinými vlákny.



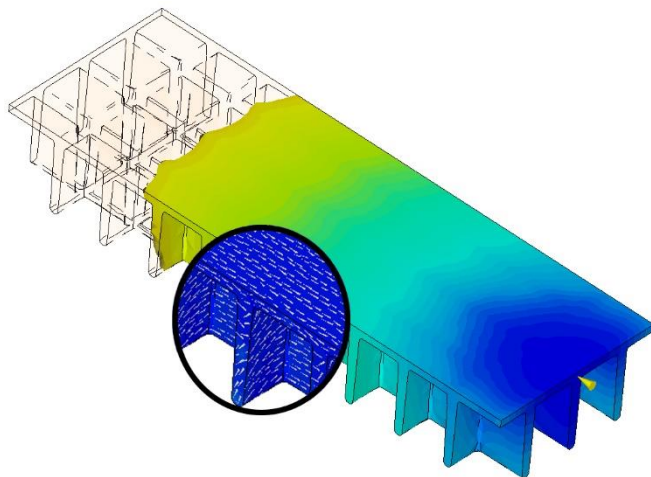
Obr. 62 Vliv umístění vtoku na výrobní deformaci – tok ve směru kolmém na žebra malé tloušťky

Na obrázku c) výška žebra odpovídající 10násobku tloušťky stěny, d) výška žebra odpovídající 3násobku tloušťky stěny

Tab. 12 Výsledky analýzy umístění vtoku, tloušťky a výšky žebor – vtok kolmý na směr toku

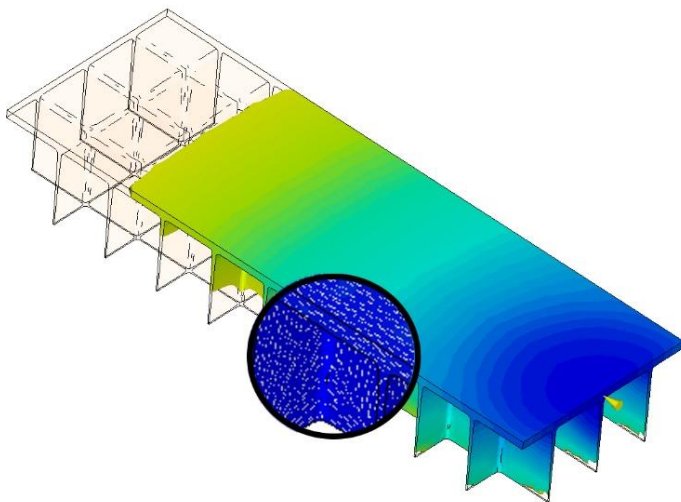
	Varianta a	Varianta b	Varianta c	Varianta d
Tlakové ztráty	68 barů	63 barů	225 barů	74 barů
Výrobní deformace	1,5 mm	1,2 mm	0,62 mm	1,2 mm
Rovinnost	1,25 mm	1,05 mm	0,82 mm	1,6 mm

Z hlediska vyztužujícího efektu je kromě rozměrů žeber důležité také jejich uspořádání. Žebra mohou být dle uspořádání základně rozdělena na podélná (výztuha v jednom směru), křížová a diagonální. Výhodou křížových žeber je současné vyztužení dílu ve více směrech, relativně snadná výroba, aj. Dochází zde však k navýšení kumulace materiálu, což evokuje tvorbu teplotních uzlů, které prodlužují výrobní čas a negativně ovlivňují kvalitu výrobku (propadliny, staženiny, deformace). S rostoucí tloušťkou stěny žeber a délkou toku se význam problematiky samozřejmě zvětšuje. Na druhou stranu u malých dílů, kde je použita tenká stěna žeber je tato problematika minoritní. Při vhodném dimenzování mohou křížová či diagonální žebra i napomoci poklesu výrobní deformace a navýšení rovinnosti dílu.

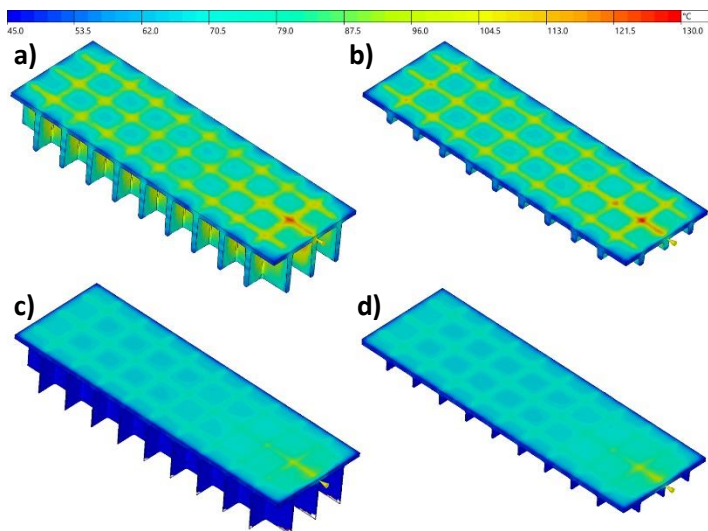


*Obr. 63 Analýza vlivu křížových žeber na změnu toku – velká tloušťka žeber*



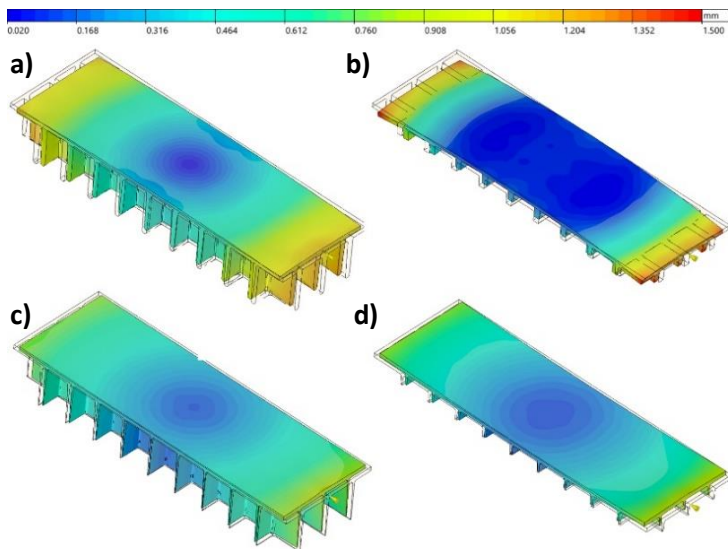


Obr. 64 Analýza vlivu křížových žeber na změnu toku – malá tloušťka žeber



Obr. 65 Vliv rozměru křížových žeber na teplotní distribuci (čas chlazení 10 s)

Na obrázku a) výška žebra odpovídající 10násobku tloušťky stěny, tloušťka žebra 100 % tl. obvodové stěny, b) výška žebra odpovídající 3násobku tloušťky stěny, tloušťka žebra 100 % tl. obvodové stěny, c) výška žebra odpovídající 10násobku tloušťky stěny, tloušťka žebra 50 % tl. obvodové stěny, d) výška žebra odpovídající 3násobku tloušťky stěny, tloušťka žebra 50 % tl. obvodové stěny



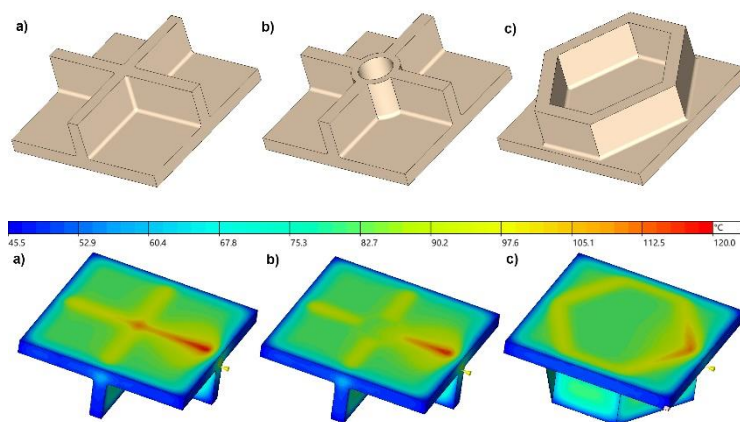
Obr. 66 Vliv diametru křížových žeber na výrobní deformaci

Použití křížových žeber o velké tloušťce nezměnilo způsob plnění rovinné obvodové stěny dílu. V oblasti obou směrů žeber jsou pozorovány pouze nepatrné rozdíly v orientaci makromolekul (obr. 63). Rovněž u tenkých křížových žeber nedošlo k zásadní změně způsobu plnění ani orientace makromolekul (obr. 64). Opět tedy může být řečeno, že určujícím prvkem je poměr tloušťky obvodové stěny a žebra. Nicméně z výsledků je patrné, že křížová žebra v porovnání s žebry rovinnými napomohla k významnému snížení úrovně výrobní deformace a zvýšení rovinnosti (obr. 66, tab. 13). Výjimku tvoří pouze křížová žebra s velkou tloušťkou a malou výškou (obr. 66d), kde vzájemná interakce kumulace materiálu (vyšší než u rovinných žeber, obr. 65) společně s nízkým vyztužujícím efektem byly příčiny tohoto jevu.

Tab. 13 Výsledky analýzy vlivu křížových žeber na výrobní přesnost

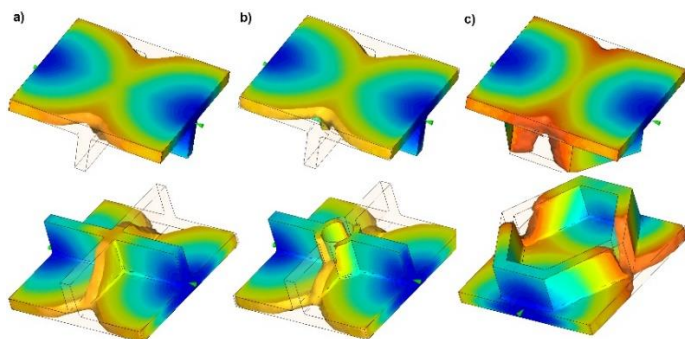
	Varianta a	Varianta b	Varianta c	Varianta d
Tlakové ztráty	99 barů	97 barů	210 barů	146 barů
Výrobní deformace	1,29 mm	1,5 mm	0,89 mm	0,97 mm
Rovinnost	0,65 mm	1,65 mm	0,22 mm	0,52 mm

Problematikou potenciálního hromadění materiálu křížových žeber, obr. 67a, které evokuje delší výrobní čas, a především tvorbu propadlin či staženin, je možné eliminovat vetknutím žeber do tzv. „komínkového prstence“ obr. 67b. Další možné konstrukční řešení je použití uspořádání žeber do tvaru „včelí plástve“, obr. 67c. Výhodnou tohoto konstrukčního řešení je kromě eliminace kumulace materiálu, také nižší riziko výskytu studeného spoje a to díky výhodnějšímu směru proudění taveniny. Naopak při aplikaci vetknutí žeber do „komínkového prstence“ je nebezpečí tvorby studeného spoje vysoké.



Obr. 67 Vliv typu uspořádání žeber na kumulaci tepla

Jsou-li porovnány teplotní distribuce jednotlivých konstrukčních variant v čase odpovídající 10s chlazení, je zřejmé, že jak varianta vetknutí žeber do „komínkového prstence“ (obr. 67b), tak varianta tzv. „včelích pláství“ (obr. 67c) se vyznačují rovnoměrnější teplotní distribucí v oblasti napojení žeber, než žebra křížová (nižší maximální teplota až o 30 °C). Oblasti vyšších teplot v blízkosti vtoku nelze brát v úvahu, jelikož se zde tavenina vždy vyznačuje vyššími teplotami a v případě aplikace vyššího počtu žeber již nebude mít význam.

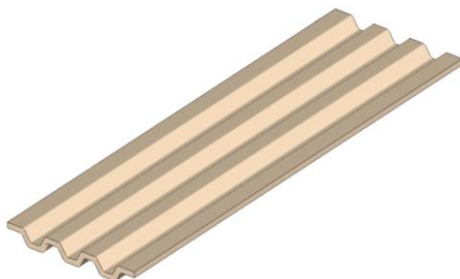


Obr. 68 Vliv typu uspořádání žeber na tok taveniny a tvorby studených spojů

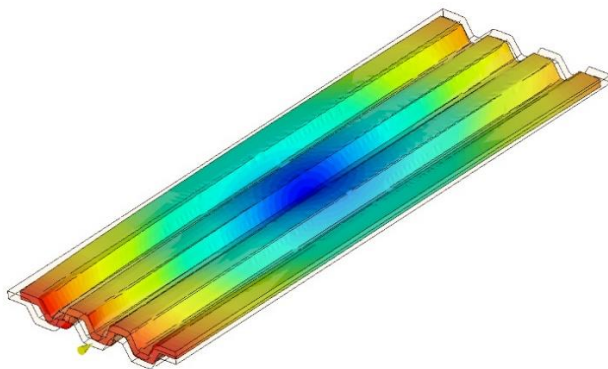
Pro detekci problematiky studených spojů byl analyzován nejhorší možný případ toku taveniny, kdy tavenina teče přímo proti sobě (tzv. spojení na „tupo“). Jak již bylo vysvětleno, tok taveniny je značně ovlivněn zvoleným poměrem tloušťky obvodové stěny a tloušťky stěny žebra. V případě použití velkého poměru obou prvků (tenkých žeber) je tavenina distribuována nejdříve obvodovou stěnou a teprve poté jsou plněny jednotlivé části žeber (dáno tlakovými poměry). Jsou-li použity obdobné tloušťky stěn, tavenina teče v obou částech souběžně a potenciální riziko tvorby studeného spoje či uzavírání vzduchu v oblastech žeber je tak vyšší. Z provedené analýzy (obdobná tloušťka stěny) je zřejmé, že u všech konstrukčních variant žeber v rovinné části obvodové stěny dojde k tvorbě potenciálního studeného spoje. Dále je možné pozorovat, že u varianty vetknutí žeber do „komínkového prstence“ hrozí v oblasti komínku další riziko výskytu studeného spoje eventuálně i riziko uzavírání vzduchu. Riziko tvorby nekvalitního studeného spoje je ve stěnách žeber uspořádaných do tvaru „včelí plástve“ díky napojení stěn pod úhlem 120°, které zajistí dostatečné promísení makromolekul, minimální.

## Prolamování

Alternativou vyztužení dílu obvodové stěny žebry je její prolamování. Výhodou této metody je eliminace problematiky kumulace materiálu, potenciální úspora materiálu a možnost dosažení vyšší produktivity výroby (rovnoměrná tloušťka stěny – eliminace teplotních uzlů – kratší čas chlazení). Na druhou stranu prolomení stěny vyztuží díl pouze v jednom směru, což značně limituje možnosti použití této konstrukční varianty. Rovněž vyztužující efekt prolomení nebude dosahovat stejné úrovně jako v případě vysokých žeber. Technologický aspekt prolamování není jednoznačný. Tavenina sice musí díky tvarové složitosti urazit delší dráhu, čímž může dojít ke zvýšení úrovně tlakových ztrát, nicméně orientace makromolekul může být výhodněji uspořádaná než u žeber. Rovněž riziko tvorby studeného spoje je u prolamování minimální. V současnosti je prolamování stěny využíváno zejména u dílů, které nejsou vystaveny vysokému zatížení, jako například kryty, víka, apod. Velmi často je prolamování rovněž využíváno jako designový prvek dílu, který současně danou oblast vyztuží. Tuto variantu pak lze s výhodou použít i v kombinaci s dalšími konstrukčními prvky (přechody tlouštěk stěn, žebry, aj.)

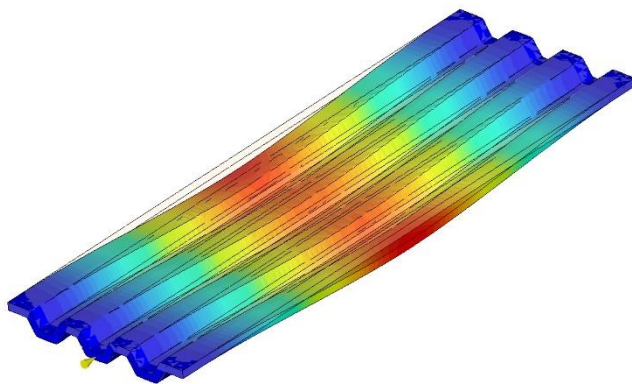


*Obr. 69 Analyzovaný díl pro stanovení vlivu prolamování na výrobní přesnost a deformaci*



Obr. 70 Vliv prolamování na výrobní deformaci

V porovnání s podélnými žebry (obr. 54) se díky eliminaci kumulace materiálu vyznačuje deska vyztužená prolamováním vyšší rovinností a nižší úrovní výrobní deformace.

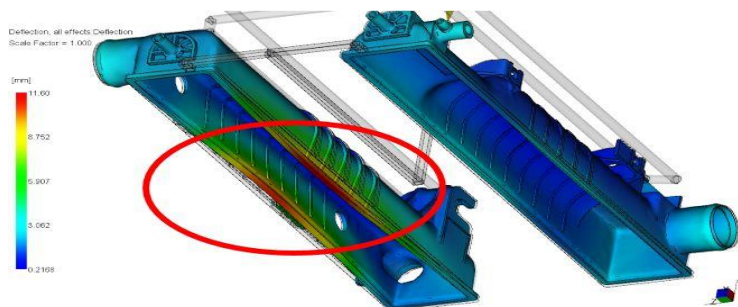


Obr. 71 Vliv prolamování na deformaci

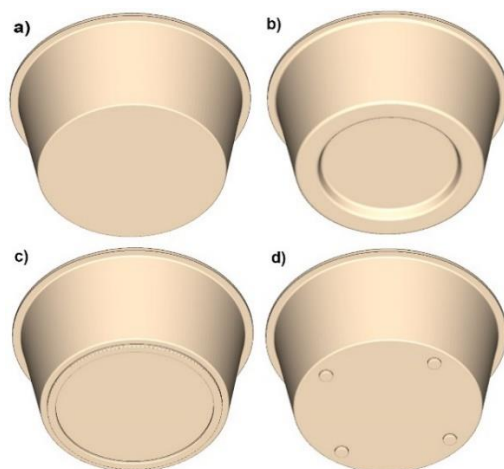
Z mechanické analýzy, kde bylo aplikováno stejné zatížení a okrajové podmínky jako u analýzy podélných žebry (obr. 55) je evidentní značný vyztužující efekt prolomení. Vyztužení je na obdobné úrovni jako při aplikaci podélných žebry o stejné výšce a tloušťce. Při aplikaci vyššího prolomení lze očekávat zjevnější rozdíly mezi objemy konstrukčními variantami.

## Dosedací plochy

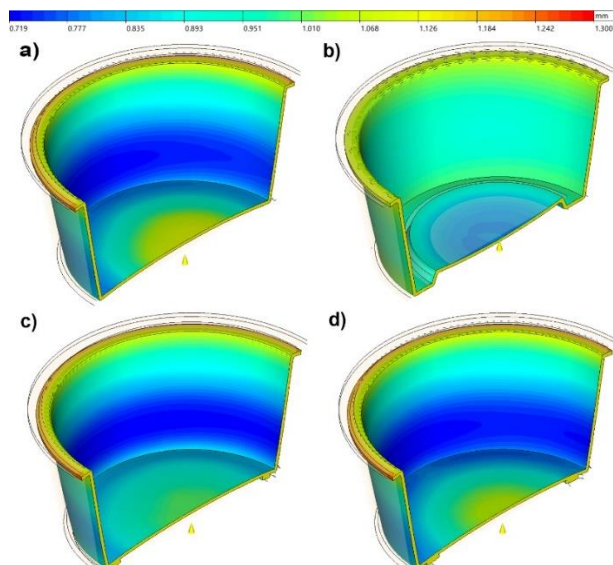
Výroba rovinných dílů je vzhledem k problematice orientace makromolekul a plniva, rozdílnému smrštění v jednotlivých částech dílů značně obtížná. Proto, pakliže je to možné, je vhodné dosedací plochu co nejvíce minimalizovat. Velmi častou konstrukční variantou jsou výstupky, čocky a podobné útvary. Při aplikaci těchto prvků (stejně jako u ostatních konstrukčních prvků) je nutné se vyvarovat přílišnému hromadění materiálů. Další možností je prodloužení obvodové stěny či dříve diskutované prolamování dna. Pakliže je rovinná dosedací plocha součástí funkčnosti dílu je nutné věnovat správnosti konstrukčního návrhu dílu i formy ještě vyšší pozornost, a to obzvláště v případě, že byla zvolena materiálová varianta obsahující značný podíl vyztužujícího vláknenného plniva. Příkladem takovýchto dílů jsou například víka motoru a dalších funkčních celků.



Obr. 72 Příklad výrobní deformace dílu s vysokými požadavky na rovinnost

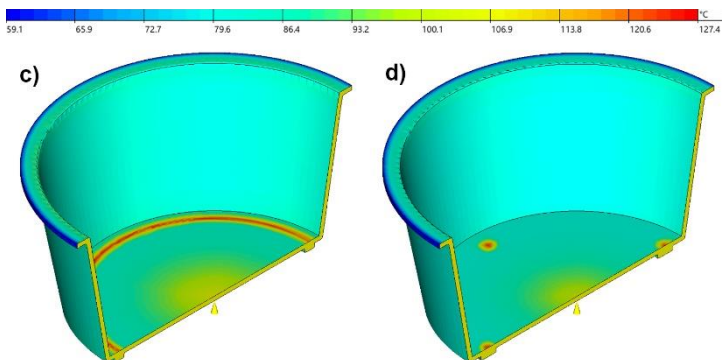


Obr. 73 Příklady konstrukčního řešení dosedacích ploch  
 Na obrázku a) rovinná plocha, b) prolomení dna, c) prstenec, d) výstupky



Obr. 74 Analýza vlivu konstrukčního řešení dosedacích ploch na deformaci





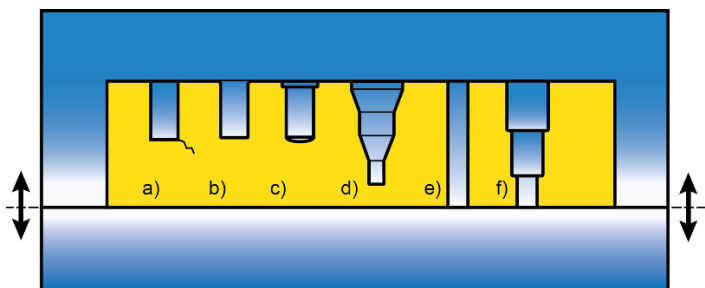
Obr. 75 Vliv konstrukčního řešení dosedacích ploch na kumulaci tepla

Vlivem rozdílných termo-dynamických podmínek (vyšší teploty v oblasti vtoku) došlo k zjevné deformaci v oblasti dosedací plochy, a to u všech konstrukčních variant. Nejvyšší úroveň deformace se nachází v blízkosti vtoku. Díky symetričnosti deformace (dáno symetrií dílu a umístěním vtoku), lze předpokládat, že všechny aplikované konstrukční prvky (prstenec, výstupky, prolomení) budou zastávat požadovanou funkci ustavení dílu na rovné ploše. Z výsledků lze usuzovat, že problematika ustavení dílů bude obzvláště významná pro nesymetricky konstruované díly či díly nerovnoměrně plněné taveninou (vliv orientace makromolekul a plniv).

## Otvory a upevňovací výstupky

Otvory mohou mít v plastových dílech hned několik funkcí, a to upevňovací, spojovací, ale i funkci odlehčovací či estetickou. Z hlediska technologického zapříčiňují zhoršení podmínek tečení (tlakové ztráty), rozdělení proudu taveniny a s ní spojenou tvorbu studených spojů. Materiál je v oblasti otvoru smršťován na trn jádra formy. Proto je nutné zde volit o 1° větší úkos než v dutině tvárnice.

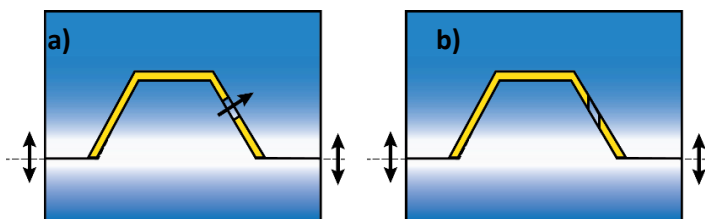
Velikost smršťení a namáhání jádra formy během procesu vstřikování jsou limitujícími faktory pro volbu diametru otvoru. U neprůchozích otvorů malého průřezu se, díky malé upínací ploše a značnému namáhání jádra vlivem proudění taveniny a vytahování jádra během odformování, vyskytuje značné riziko deformace či poškození jádra. Z těchto důvodů by neprůchozí kruhové otvory neměly mít vyšší délku, než je 3 až 4násobek průměru otvoru. Díky fixaci jádra na obou koncích je riziko poškození jádra u průchozích otvorů znatelně menší. Pro průchozí otvor je tedy možné aplikovat i menší průřezy, než u otvorů neprůchozích (délka může být 6 až 8násobek průměru otvoru). Jistou možností, jak konstrukčně optimalizovat tuto problematiku, je odstupňování otvoru, tj. použití většího průřezu v upínací části a menšího průřezu v části funkční. Z hlediska koncentrace napětí i z důvodů proudění taveniny je u odstupňovaných otvorů vhodné volit pozvolné přechody, hrany otvorů zaoblit minimálním poloměrem 1 mm. Rovněž v napojení otvorů na obvodovou stěnu dílu je nezbytné vyvarovat se koncentraci napětí (ostré hrany). Kromě rádiusů může být řešením i osazení.



Obr. 76 Příkladů konstrukčního řešení otvorů

Na obrázku a) nevhodné řešení – ostré hrany, b) eliminace koncentrace napětí aplikací radiusů – vhodnější řešení, c) osazení se zaoblením ještě více eliminuje problematiku koncentrace napětí, d) odstupňování otvorů – vyšší upínací plochy jádra – menší diametry či větší hloubky, e) průchozí otvor – na rozdíl od neprůchozího může mít menší diametr, f) odstupňování průchozího otvoru – výhodnější řešení z hlediska namáhání jádra.

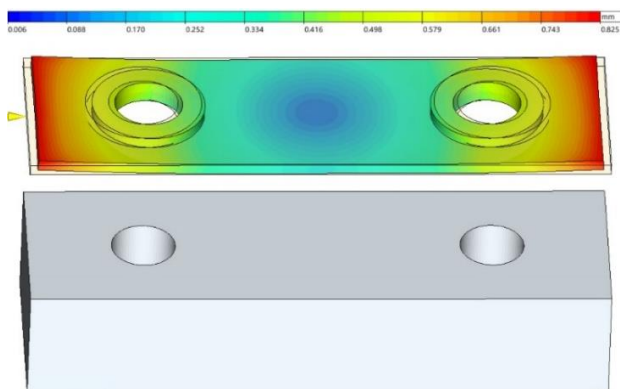
Dalším důležitým faktorem je směr umístění otvorů. Pakliže je to možné, měly by být otvory umísťovány ve směru otvírání hlavní dělicí roviny. Otvory orientované v jiném směru je možné realizovat pomocí bočních pohyblivých jader. Tato varianta však prodražuje cenu formy a je i potenciálním rizikem z hlediska opotřebení pohyblivých částí (jader). Opotřebení následně ovlivní i dosahovanou výrobní přesnost dílu, nemluvně o vyšších požadavcích na údržbu formy.



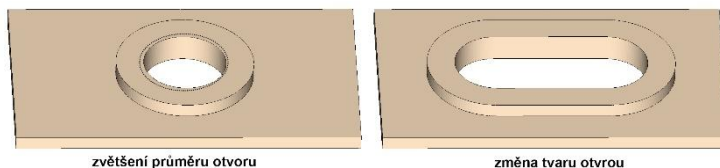
Obr. 77 Vliv umístění otvorů na odformování

Na obrázku a) otvor není orientován ve směru hlavní dělicí roviny – nutnost šikmých bočních jader, b) otvor ve směru otvírání formy – výhodnější řešení

Nejčastěji volený tvar otvorů v běžné konstrukční praxi je kruhový. Tento tvar však vzhledem k principu technologie vstřikování (tlakové a teplotní ztráty toku taveniny) a vzniklým průvodní jevům (orientace makromolekul a plniva) není nejvýhodnější. Ve směru toku a směru tloušťky dílu se totiž velmi často smršťování značně liší. To vyvolává deformaci kruhovitěho tvaru, a tedy potenciální funkční problém. V takovémto případě je nutné zvětšit průměr otvoru či zvolit oválný tvar otvoru, který má dostatečnou rozměrovou rezervu pro fixaci dílu v požadované poloze. Z předchozího rozboru je zřejmé, že tato problematika bude mít význam zejména pro neplněné plasty s vysokou úrovní smršťování. Mezi takovéto materiály patří PP, PE, termoplastické materiály, aj.



Obr. 78 Vliv výrobní deformace dílu na změnu tvaru otvoru

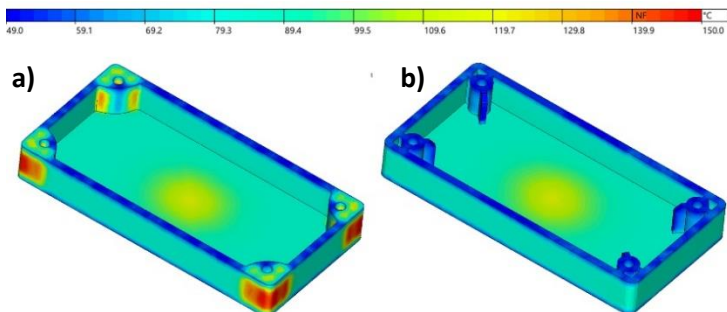


Obr. 79 Optimalizace tvaru otvoru pro eliminaci výrobní deformace

Pakliže má otvor zajišťovat upevňovací funkci, je nutné, aby se daná přiléhající oblast vyznačovala také odpovídající pevnostní charakteristikou. Jak z hlediska ekonomického, tak i z hlediska technologického není vhodné používat velké tloušťky stěny, které by zaručily požadovaný pevnostní stav. Proto je nutné provést konstrukční optimalizace těchto oblastí. Na zvýšení tuhosti dílu má zásadní vliv především výška elementu (stěny, žebra, aj.). Proto je vhodným řešením tvorba tzv. upevňovacích výstupků. Konstrukce upevňovacích výstupků samozřejmě ovlivní i technologičnost výroby dílu. Je tedy nezbytné dodržení dříve diskutovaných pravidel:

- eliminace kumulace materiálu,
- eliminace tvorby studených spojů a uzavírání vzduchu,
- zajištění snadného odformování,
- eliminace koncentrace napětí.

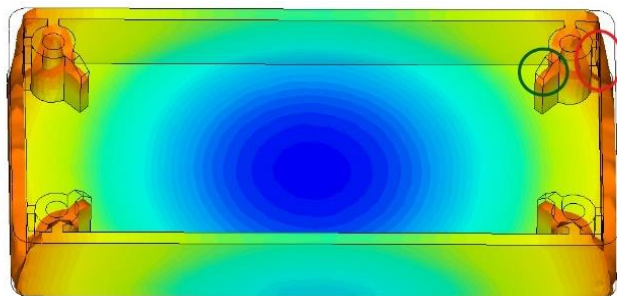
V místě upevňovacího výstupku nesmí docházet ke kumulaci materiálu. Tento problém může nastat zejména v případě, že bude upevňovací otvor (výstupek) umístěn v blízkosti obvodové stěny dílu. Řešením je vzájemné oddělení obou funkčních částí dílu. Pro zajištění dostatečné pevnostní charakteristiky je však nezbytné vyztužení upevňovacího výstupku žebry. Počet aplikovaných žeborů se dle pevnostních požadavků může lišit. Je však vhodné počítat s potenciálním porušením těchto prvků. Proto v případě, že je použito pouze jedno žebro, je riziko ztráty funkčnosti celku značné. Jsou-li použity žebra dvě či tři, je i po porušení žebra funkčnost prvků zachována. V případě, že je upevňovací výstupek umístěn v prostoru dílu, a není tedy možné jeho propojení s obvodovou stěnou, je vhodné konstruovat čtyři a více symetricky rozmístěná žebra.



Obr. 80 Vliv kumulace materiálu na teplotní distribuci dílu

Na obrázku a) kumulace materiálu, která prodlužuje výrobní čas a evokuje vznik propadlin, staženin a vyšší úroveň deformace, b) konstrukční varianta oddělení upevňovacího výstupku pomocí tří žeber – rovnoměrná distribuce teplotního pole.

Obecnou problematikou otvorů je tvorba studených spojů. Kvalita, a tedy i nebezpečí studeného spoje závisí na mnoho faktorech. Při jeho hodnocení je proto nutné analyzovat více aspektů. Je vhodné, aby se studené spoje nevyskytovaly v problematických místech, kterými jsou především místa vyvození nejvyšších upínacích sil. V oblasti výskytu studeného spoje je potřebné mít dostatečný průřez (tenká stěna – značné riziko praskání). Jistou optimalizační možností je například umístění tzv. technologického žebra, jehož primárním účelem není vyztužující efekt, nýbrž právě minimalizace rizika tvorby problematického studeného spoje. Vzhledem k charakteru proudění taveniny hrozí riziko nebezpečí uzavírání vzduchu zejména v oblastech upevňovacích výstupků umístěných v ploše dílu. U této konstrukční varianty je proto vhodné, aby žebra byla odstupňovaná či profilována. Toto konstrukční řešení sníží riziko uzavření vzduchu a významně neovlivní pevnost prvku.



Obr. 81 Příklad problematických míst upevňovacích výstupků z hlediska uzavírání vzduchu a studených spojů

Na obrázku červeně označené – potenciální místo výskytu studeného spoje v oblasti žebra, zeleně označené – potenciální místo uzavírání vzduchu

V případě, že je konstruovaný otvor malý, upevňovací výstupek je umístěn dostatečně blízko obvodové stěny a použitý plast se vyznačuje nízkou úrovní smršťení, tak může být tento otvor součástí obvodové stěny bez nutnosti jeho oddělení či vyztužení žebry. Aplikace těchto prvků by v tomto případě mohla naopak evokovat problematické odformování (malý prostor pro jádra v oblasti žebry). Pro zajištění snadného odformování samozřejmě musí být upevňovací výstupky, otvory i vyztužující prvky (žebra) opatřeny úkosy a rádiusy. Z hlediska namáhání, a tedy i koncentrace napětí, jsou problematickými místy upevňovacích výstupků zejména oblasti ústí otvorů. Proto je vhodné tato místa opatřit rádiusy či osazením. Rovněž vyztužující prvky (žebra) upevňovacích výstupků by z těchto důvodů (i z důvodů rovinnosti) neměly být vedeny až do výšky obvodové stěny dílu.

## Inzerty

Pro zvýšení pevnostních charakteristik, zvýšení odolnosti proti opotřebení či zajištění dalších funkčních požadavků jsou do plastových dílů implementovány inzerty. Inzerty mohou být do vyrobených plastových dílů nalisovány, navařeny (ultrazvukově) i pouze vloženy (rozpínací inzerty, samořezné inzerty). Při volbě jednotlivých typů inzerťů je rozhodující požadovaná pevnostní interakce inzerťu s plastem.



*Obr. 82 Příklad používaných inzerťů*

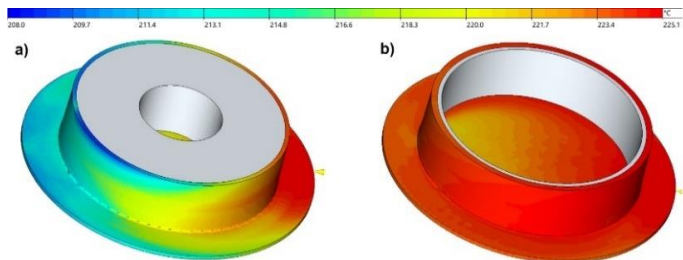
Pro dosažení maximální efektivity výroby je u velkých výrobních sérií jakákoliv dodatečná operace nežádoucí. Proto je v tomto případě výhodné, aby inzerty byly již součástí vyrobených dílů (zakládání inzerťů do formy). U technologie vstřikování je nutné si uvědomit, že v případě aplikace ocelových, hliníkových či mosazných inzerťů může jejich přítomnost ve formě ovlivnit tok taveniny. Důvodem je vyšší tepelná vodivost těchto materiálů, která způsobí ochlazení taveniny (zvýšení viskozity taveniny). Problematická proto může být zejména kvalita vzniklých studených spojů. Kromě toku taveniny kovové inzerty negativně ovlivňují i homogenitu teplotního pole, evokují rozdíly ve smršťení a tvorbu vnitřního prnutí.



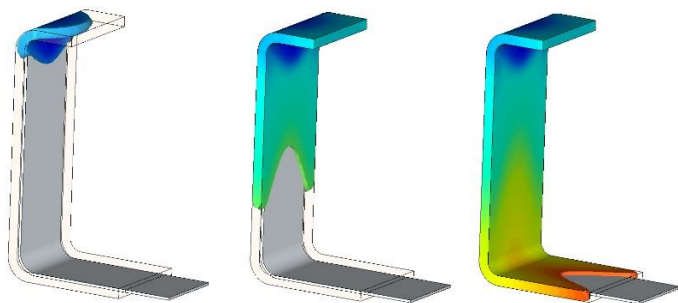
Pro bezproblémovou aplikaci těchto prvků je nutno dodržet některé zásady:

- volba vhodného poměru tloušťek stěn inzertru s plastem,
- volba vhodného tvaru inzertru,
- volba umístění inzertru.

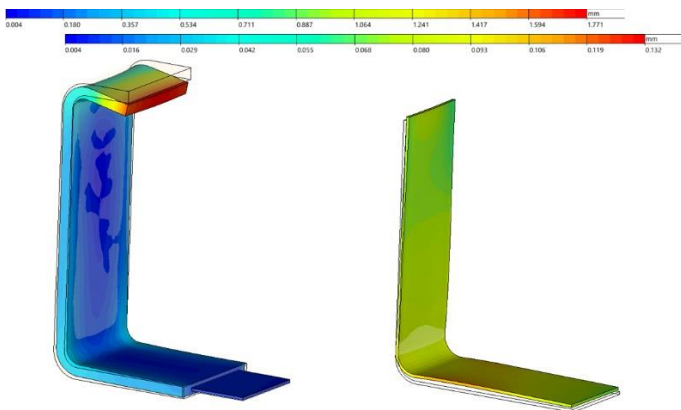
Pravděpodobně tou nejdůležitější zásadou je volba optimálního poměru tloušťky stěny plastového dílu ku tloušťce stěny inzertru. V případě, že je použit inzertr velké tloušťky stěny je riziko ochlazování toku taveniny velké. Inzertry by tedy měly z hlediska technologického mít tloušťky stěny co nejmenší. Naopak je-li tloušťka stěny plastu v dané oblasti malá, může dojít snáze k výraznému ovlivnění toku taveniny než v případě tloušťky stěny větší (viz problematika zamrzlé vrstvy a tlakových ztrát). Rovněž v důsledku menšího smrštění stěny plastu bude síla evokující fixaci inzertru nižší. Riziko samovolného uvolnění i potenciálního porušení dílu v této oblasti vlivem vysoké úrovně vnitřního pnutí a nízké kvality vzniklého studeného spoje je tedy vysoké. Tloušťka stěny plastu v oblasti inzertru by proto měla být dostatečně velká, aby nedocházelo k významnému ovlivnění toku a současně byla vyvozená dostatečně veliká fixační síla. Na druhou stranu s rostoucí tloušťkou stěny dochází k prodloužení výrobního času, či eventuálně zvýšení výrobních deformací i úrovně vnitřního pnutí. Rovněž v tomto případě je výsledná volba kompromisem všech diskutovaných aspektů, které mohou být efektivně analyzovány pomocí „moldflow“ analýz. Tyto analýzy v současné době nejenže dokáží velmi přesně predikovat teplotně-tokové stavy procesu vstřikování, nýbrž i umožňují stejně jako u částí formy (jádra) deklarovat deformace inzertrů zapříčiněné tokem taveniny či procesem tuhnutí dílu.



Obr. 83 Vliv insertu na ochlazování taveniny při plnění dílu  
 Na obrázku a) insert o tloušťce stěny 30 mm – značný vliv na ochlazování taveniny během plnění dílu b) insert o tloušťce stěny 2 mm – minimální vliv na ochlazování taveniny během plnění dílu.



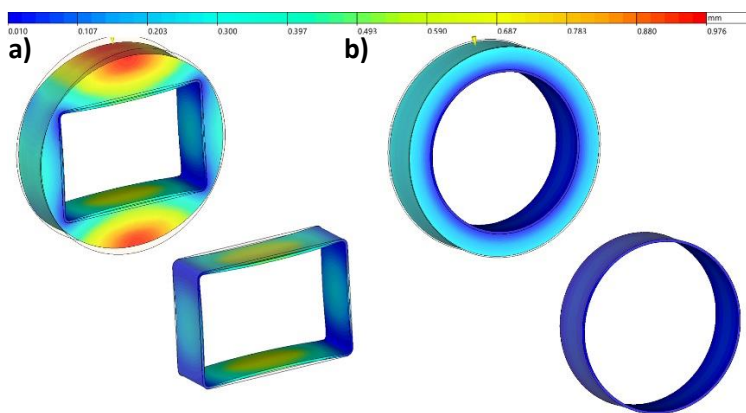
Obr. 84 Vliv insertu na tok taveniny



Obr. 85 Deformaci insertu vlivem procesu vstřikování

V obrázku 84 je zjevný vliv inzertu na tok taveniny. Inzert díky ochlazení toku taveniny (navýšení viskozity) zapříčinuje její pomalejší tok ve středové oblasti dílu. Tato termo-dynamická nehomogenita se následně projevuje i v charakteru deformace inzertu, viz obr. 85.

Pro minimalizaci potenciálního rizika deformací inzertu zapříčiněných smrštěním plastového dílu i minimalizaci úrovně vnitřního pnutí je vhodné, aby inzerty měly jednoduchý symetrický tvar. Plastová část by měla tvar inzertu kopírovat, což u složitých tvarů není jednoduché. Velmi častou variantou jsou kruhové inzerty umísťované do upevňovacích výstupků. U závitových vložek a podobných aplikací však fixační síla nemusí být dostatečná, proto jsou inzerty opatřovány drážkami, výstupky apod.



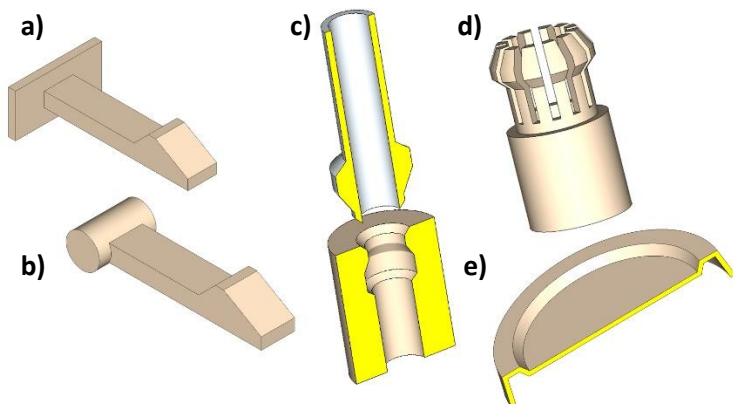
Obr. 86 Vliv tvaru inzertu na výrobní deformaci

Na obrázku 86a má inzert odlišný tvar od tvaru plastového dílu, což vyvolá jeho značné deformace. Naopak, je-li dodržena konstrukční zásada shodnosti tvaru obou prvků je deformace zapříčiněná tokem taveniny a smrštěním minimální, viz obr. 86b.

Pozice inzerťů je většinou daná funkčností dílu. Nicméně v případě, že to funkčnost dílu dovolí, je vhodné aby stejně jako pozice vtoků byly inzerty díky potenciálnímu riziku vnitřního pnutí umísťovány do méně namáhaných částí dílu. V případě že jsou inzerty umísťovány dále od vtoku je jejich riziko ovlivnění toku taveniny malé. Díky vyšší úrovni tlakových ztrát toku taveniny však roste riziko tvorby nekvalitního studeného spoje, nezatečení taveniny apod. Volba vhodného poměru tloušťek stěn inzerťů s přiléhající plastovou částí je v tomto případě mnohem významnější než u inzerťů umístěných v blízkosti vtoku.

## Západkové spoje

Spojení plastových dílů v sestavě může být dle požadavků realizováno rozebíratelně i nerozebíratelně. Z důvodu rychlosti spojení i ekonomických důvodů (odpadá potřeba dalšího zařízení, kratší výrobní čas, aj.) jsou velmi často využívány tzv. integrované západkové spoje. Ty je možno dále dělit na rozebíratelné, nerozebíratelné, či otevřené a uzavřené, kde jednotlivé prvky tvoří torzní flexibilní prvky, anulární prvky, segmentové flexibilní prvky či membránové prvky.

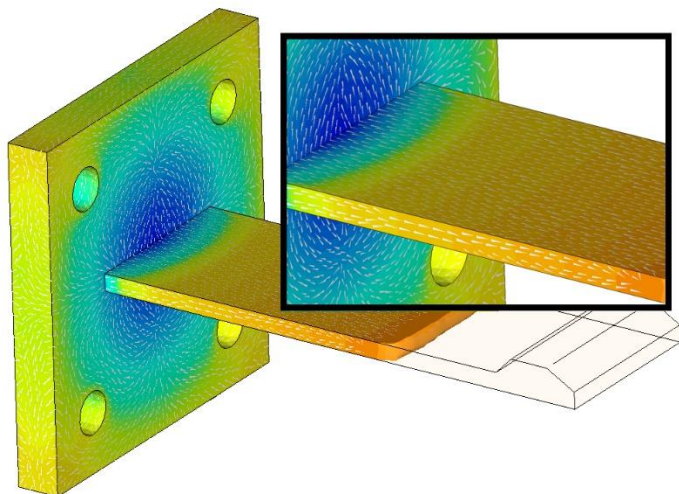


*Obr. 87 Základní typy integrovaných spojů*

*Na obrázku a) flexibilní prvky, b) torzní flexibilní prvky, c) anulární prvky, d) segmentové flexibilní prvky, e) membránové flexibilní prvky*

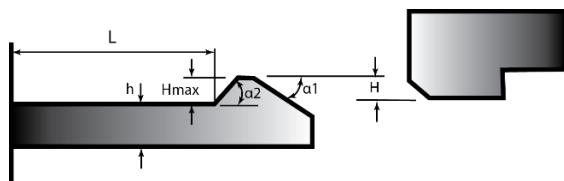
Obecnou nevýhodou západkových spojů je nebezpečí snížení přesnosti výsledného spoje, deformace členů ohybem a nebezpečí samovolného uvolnění. Dimenzování západkových spojů je vzhledem k problematice krípu a únavovým charakteristikám plastů značně obtížné. Pro západkové spoje je proto vhodné aplikovat materiály, které dobře odolávají

únavovému zatížení. Těmito materiály jsou semikrystalické plasty s dlouhými řetězci makromolekul, vysokým stupněm krystalinity a vysokou rázovou houževnatostí. Vzhledem ke krátkému působení montážních sil jsou přípustná vyšší napětí (nižší bezpečnostní faktor).



Obr. 88 Orientace makromolekul v oblasti západkového spoje

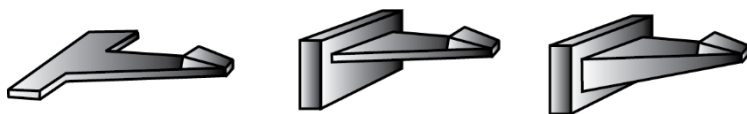
Díky plošnému tvaru jsou makromolekuly v oblasti nosné části západky orientovány shodně ve směru toku, což je z hlediska namáhání retenčního prvku výhodné.



Obr. 89 Geometrie západkového spoje

Na obrázku  $L$  – délka nosné části,  $h$  – tloušťka nosné části prvku,  $H_{max}$  – výška retenčního prvku,  $H$  – výška, která musí být překonána při zástavbě,  $\alpha_1$  – náběhový úhel,  $\alpha_2$  – uvolňovací úhel

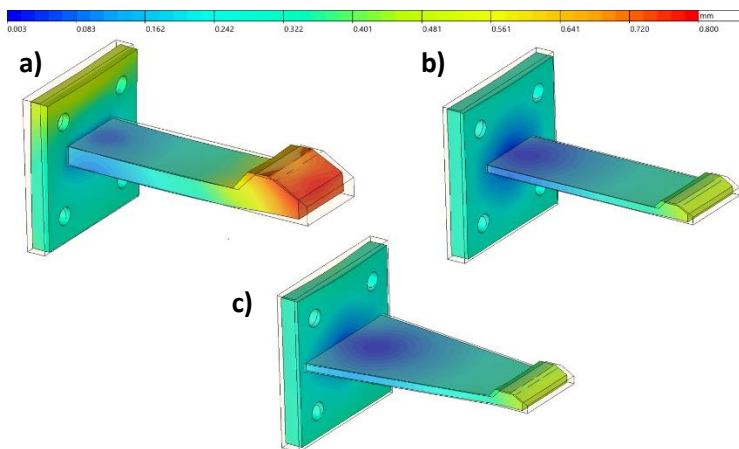
Konvenční západkový spoj se skládá z nosné části (místo vetknutí, nosník) a retenčního profilu, viz obr. 89. Pevnost spoje závisí na typu mechanické vazby a velikosti třecích sil. Pravděpodobně největší vliv na pevnost a funkčnost spoje má délka nosné části. S rostoucí délkou roste i namáhání prvku a riziko nežádoucí deformace či jeho porušení. Rovněž význam problematiky nerovnoměrného plnění dílu (tlakové ztráty, ochlazování čela taveniny, orientace makromolekul) roste se zvyšující se délkou nosné části. Na druhou stranu, kratší délka nosné části může zapříčinit značné deformace obvodové stěny. Proto by se délka nosné části měla pohybovat mezi 5 až 10násobkem tloušťky stěny. Další parametr, který má vliv na pevnost spoje a deformaci západkového spoje je šířka a tloušťka nosné části. S rostoucí šířkou i tloušťkou roste pevnost prvku. Roste však i potřebná montážní i demontážní síla. Z hlediska koncentrace napětí v oblasti vetknutí je výhodné (je-li to konstrukčně možné) použití kónického tvaru (optimální poměr tloušťky stěny 1:0,8 až 0,4). Tloušťka stěny nosné části by se obecně měla pohybovat mezi 50 až 60 % tloušťky obvodové stěny. Pokud je nosník prodloužením obvodové stěny, měla by být volena tloušťka stěny stejná.



*Obr. 90 Konstrukční řešení kónického tvaru západkových spojů*

*Na obrázku a) nosník je prodloužením obvodové stěny, b) stejná tloušťka stěny kónického prvku, c) rozdílná tloušťka stěny kónického prvku – vyšší výztuha*

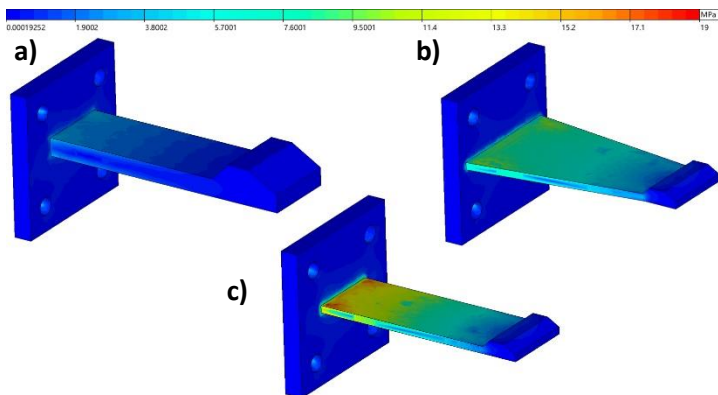
Hlavním úkolem retenčního prvku je zajištění bezproblémové zástavby, pevnosti daného spojení či případné demontáže. Při poměru délky a tloušťky stěny nosníku 5:1 by měla být aplikována výška retenčního prvku menší, než je tloušťka stěny v místě vetknutí. Při poměru délky a tloušťky stěny nosníku 10:1 by měla být (z důvodu vyššího průhybu nosné části) rovna tloušťce stěny v oblasti vetknutí. Pro dosažení snadné montáže by se náběhový úhel měl pohybovat mezi 25 až 30°. Uvolňovací úhel dle požadavků na rozebíratelnost pak v rozmezí 35 až 80°.



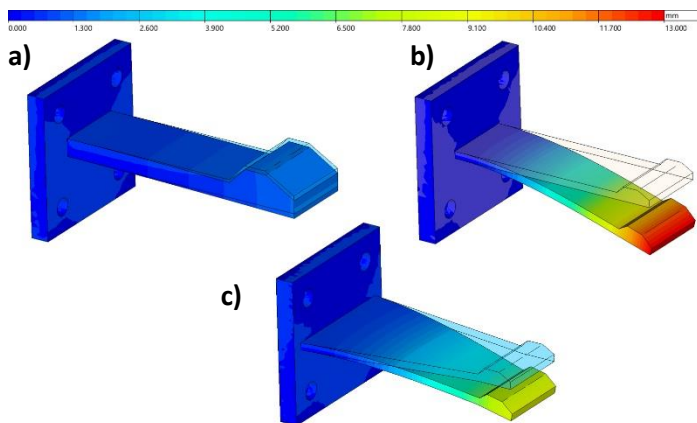
Obr. 91 Vliv rozměrů nosné části západky na výrobní deformaci

Na obrázku a) je analyzována výrobní deformace západky s tloušťkou nosné části 5 mm, délkou západky 50 mm, b) je tloušťka nosné části západky 2 mm, délka 50 mm, c) západka kónického tvaru o stejné délce a tloušťce (2 mm). Všechny ostatní rozměry jsou voleny dle výše uvedených konstrukčních zásad. Díky nejvyšší tloušťce stěny a kumulaci materiálu v oblasti retenčního prvku vykazuje největší úroveň výrobní deformace západka tloušťky 5 mm. Dle předpokladů vliv kónického tvaru západky na výrobní deformaci je minimální.





Obr. 92 Vliv rozměrů nosné části západky na distribuci napětí



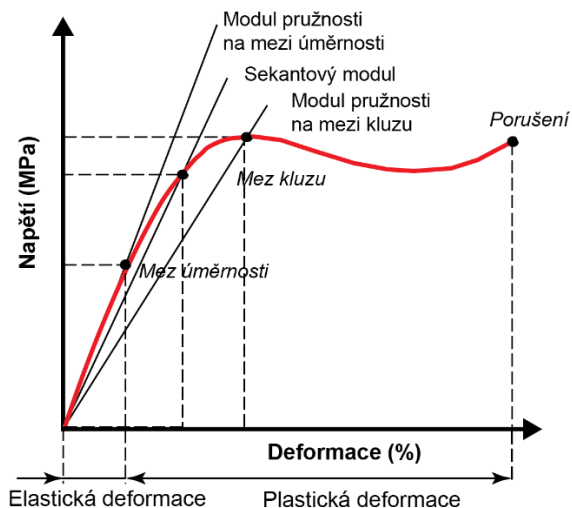
Obr. 93 Vliv rozměrů nosné části západky deformaci prvku

Na obrázku je zobrazeno napětí (Stress von Mises) a deformace vyvolané 5N zatížením západek v oblasti retenčního prvku: a) 5 mm tloušťka stěny západkového spoje evokuje velmi malou úroveň deformace i napětí, b) se zmenšením tloušťky nosné části dochází k výraznému navýšení deformace i úrovně napětí, která je kritická v oblasti vetknutí, c) kónický tvar retenčního prvku nepatrně sníží úroveň napětí v oblasti vetknutí i dosahovanou úroveň deformace.

## 4. PEVNOSTNÍ VÝPOČET/ DIMENZOVÁNÍ DÍLŮ

Pro konstrukci dílů je jak z hlediska funkčního, tak z hlediska ekonomického (úspora materiálu) velmi důležitou částí pevnostní výpočet. Stejně jako u kovových materiálů jsou v současné době pro tento účel využívány FEM analýzy. Pomocí programů ANSYS, ABAQUS, MSC Nastran, LS-Dyna, aj., tak lze definovat kritická místa jež je vhodné konstrukčně optimalizovat, tak i místa s možností potenciální úspory materiálu. Pro dosažení maximální efektivity dimenzování dílů je nezbytná znalost limitní úrovně deformace či napětí. Tato limitní úroveň může vycházet z pevnostní či tuhostní charakteristiky. U konstrukce s ohledem na pevnost je limitní úroveň napětí či deformace vyvolaná silou těsně před porušením (prvotní náznak prasklin či celý kolaps). Za limitní hranicí je považována mez pevnosti či deformace na mezi pevnosti. U konstrukce s ohledem na tuhost dílu je limitní napětí či deformace, jež jsou vymezené oblastmi elastických deformací. Tuhost plastů je základně vyjádřena Youngovým modulem pružnosti. Jsou-li porovnány obě konstrukční strategie například s kovy, pokles Youngova modulu pružnosti je u plastových dílů mnohem výraznější (pokles o dva řády), než pokles pevnostních charakteristik (pokles o řád). Konstrukce s ohledem na tuhost dílu je tedy bezesporu kritičtějším faktorem. Proto právě tato konstrukční strategie je tou častěji aplikovanou. Tuhost dílu definovaná Youngovým modulem pružnosti na mezi kluzu reflektuje poměrně přesně oblasti elastických deformací u amorfních plastů, vyztužených plastů a kompozitních materiálů. Pro houževnaté plasty

(některé semikrystalické polymery jako např. PP, PE aj.) není Youngův modul na mezi kluzu příliš vypovídající. Daleko relevantnější je tzv. „Sekantový“ modul.



Obr. 94 Příklady stanovení modulu pružnost z tahové zkoušky

Youngův modul pružnosti na mezi kluzu i „Sekantový“ modul jsou nejčastěji získávány z krátkodobé statické zkoušky tahem či ohybem. Jejich úroveň tak neodpovídá limitním hodnotám dlouhodobě namáhaných dílů a dílů vystavených víceosému či cyklickému namáhání. Při dlouhodobém namáhání dílů se totiž může více či méně projevit viskoelastické chování plastů. U takovýchto aplikací je vhodné použít tzv. kríповý modul. Bohužel ne vždy jsou výsledky dlouhodobých zkoušek (kríповé moduly), stejně tak jako výsledky víceosého či cyklického namáhání jednotlivých materiálových variant, dostupné. Proto se často vychází z běžně dostupných materiálových informací, kterými jsou

právě uvedené výsledky krátkodobých statických zkoušek. Limitní úroveň napětí či deformace (mez kluzu či pevnosti) je pak poměrově ponížena dle typu namáhání. Pro dlouhodobé statické namáhání plastů s vysokým modulem pružnosti (amorfní či vyztužené plasty) odpovídá limitní napětí cca 20 % meze kluzu. Při cyklickém ohybovém namáhání do 10 cyklů se jedná o 50 % deformace meze pevnosti a u více cyklového namáhání o 30 % deformace meze pevnosti. Toto zjednodušení samozřejmě vnáší do výpočtu značnou chybovost. Navíc při zatížení plastových dílů je rovněž nutno počítat s jevy jako kríp či relaxace napětí. Díly vystaveny povětrnostním podmínkám mohou vykazovat změny vlastností v důsledku absorpce vlhkosti (problematika navlhavých polymerů), degradace vlivem UV záření, erozi povrchu, atd. Všechny tyto aspekty značně ztěžují problematiku pevnostního výpočtu a dimenzování dílů. **V ideálním případě by každá materiálová varianta měla být ověřována pro specifické aplikační podmínky, což je mnohdy značně finančně náročné.**

Rovněž pro plastové díly je velmi často stanovován tzv. konstrukční bezpečnostní faktor, viz.

$$k \geq \frac{\sigma_{dovolené}}{\sigma_{maximální}}$$

U technologie vstřikování dochází během zpracování k orientaci makromolekul a plniva, rozdílům v uspořádanosti struktury v jednotlivých částech dílů, tvorbě vnitřního pnutí a dalším jevům, které zapříčiňují anizotropii vlastností dílu. Nicméně u prováděných FEM analýz jsou velmi často aplikovány pouze izotropní materiálové modely. Toto zjednodušení je dalším významným aspektem vedoucím

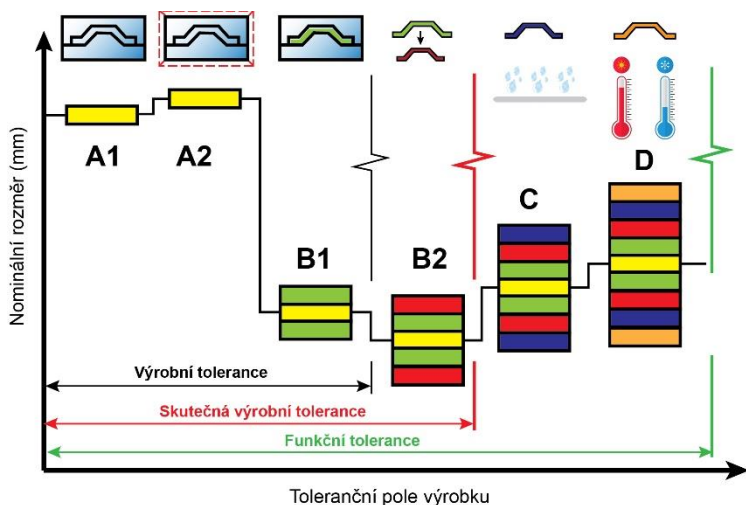
k odlišnostem mezi výpočtem a skutečným stavem, a to zejména u polymerních materiálů s dlouhými makromolekulárními řetězci a vlákny plněnými plasty. Pro dosažení maximální relevantnosti výsledků je tedy u těchto materiálů nezbytné zahrnout do výpočtu technologický aspekt. Export provedených „moldflow“ analýz pro následné FEM výpočty je u současných renomovaných softwarů (MoldFlow, Cadmould, Moldex, Sigmasoft) běžnou funkcí. Vzhledem k složitosti problematiky neexistuje při volbě aplikovatelného bezpečnostního faktoru plastových dílů jednoznačně předepsaná hodnota. Vždy jsou pro jednotlivé případy uváděna pouze doporučení, která musí být uzpůsobena konkrétním specifickým aplikačním požadavkům dílu.

## 5. VÝROBNÍ PŘESNOST PLASTOVÝCH DÍLŮ – TOLERANCE

Dosahovaná přesnost výroby technologie vstřikování plastů závisí na mnoha faktorech. Mezi ty nejvýznamnější patří především:

- volba materiálu,
- konstrukce dílu,
- konstrukce formy,
- volba stroje,
- nastavení procesních parametrů.

Molekulární struktura plastů (vazebné síly) je příčinou vyšší úrovně smrštění těchto materiálů v porovnání s kovy. Rovněž rozdíly v dodávaných šaržích (délka makromolekulárních řetězců, množství a kvalita přísad), použití recyklátu či regranulátu, které mají vliv na termo-dynamické podmínky tuhnutí výrobku, nepřispívají k zvýšení přesnosti výroby. Navíc vlastnosti i rozměry plastových dílů jsou značně časově závislé na klimatických podmínkách (teplota, vlhkost, UV záření, aj.). **Dosahovaná přesnost plastových dílů se tedy již z principu nemůže rovnat úrovni přesnosti dílů z kovů!!!** Obecné schéma rozměrových změn a skladby tolerancí plastových dílů jsou uvedeny na obr. 95.

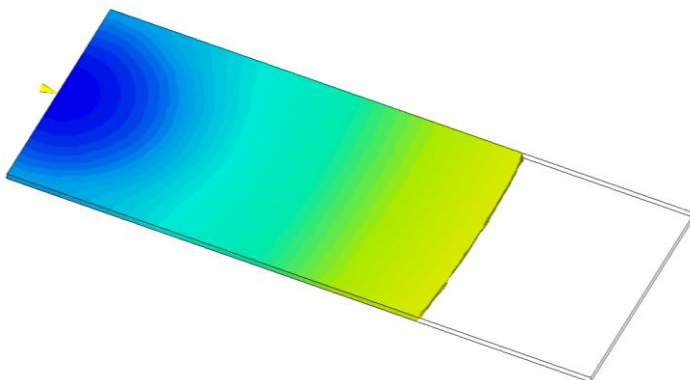


Obr. 95 Obecné schéma rozměrových změn a skladby tolerancí plastových dílů

Na obrázku 95: A1 - rozměr formy, nepřesnost výroby formy, A2 – rozměr formy se zvětší o teplotní roztažnost formy (temperace formy), B1 – rozměr dílu je menší než rozměr formy vlivem smrštění, výrobní tolerance, B2 – dodatečné změny rozměrů, C – změna rozměrů vlivem absorpce vlhkosti, navýšení tolerančního pole, D – změna rozměrů vlivem teplotní roztažnosti, další navýšení tolerančního pole.

Dosažitelná výrobní přesnost se u jednotlivých plastů liší. Mezi určující faktory patří zejména zmiňované vazebné síly, které ovlivňují jak tokové chování polymerů, tak i jejich smrštění. Amorfny plasty se standardně vyznačují nižší úrovní smrštění než polymery semikrystalické. Proto je u nich dosažitelná vyšší výrobní přesnost a mohou jim být přidělovány užší tolerance. Je-li do polymerních materiálů přidáváno minerální částicové plnivo v hmotnostním poměru větším než

10 %, dochází v důsledků poklesu podílu polymeru také k poklesu úrovně smrštění. Při aplikaci vláknenného plniva dochází k obdobnému jevu. Vlivem orientace plniva se zde však výrazněji projevuje anizotropie vlastností evokující tvorbu rozdílů smrštění v jednotlivých směrech. Tento průvodní jev technologie vstřikování je nutno zohlednit při požadavcích na výrobní přesnost, což je u soudobých komplexních dílů bez použití „moldflow“ analýz prakticky nemožné. Proto **je vhodné volit adekvátní toleranční pole s přihlédnutím k výsledkům provedených „moldflow“ analýz!!!**



*Obr. 96 Analyzovaný díl pro stanovení míry vlivu materiálu na výrobní přesnost*

*Na obrázku 86 je zobrazen analyzovaný díl (fáze plnění) pomocí něhož byl posuzován vlivu materiálu na výrobní přesnost. Stejně jako při analýze vlivu tloušťky stěny na výrobní přesnost byl z důvodu eliminace vlivu konstrukčních prvků zvolen jednoduchý plošný tvar (deska 200 x 80 mm) o tloušťce stěny 2 mm. Procesní parametry byly kromě doporučené teploty taveniny a formy (materiálový list) stejné pro všechny materiálové kombinace. Výsledky provedené analýzy jsou představeny v tabulce 14.*



Tab. 14 Výsledky analýzy vlivu materiálu na výrobní přesnost

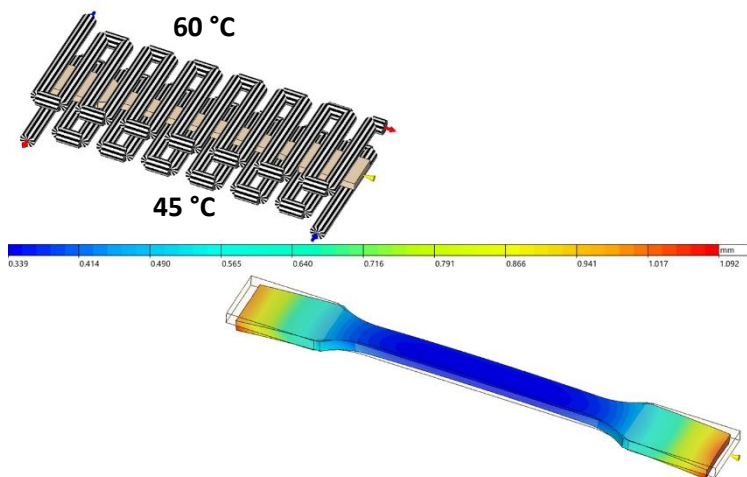
Materiál/ Procesní parametry	PP	PP+30 hm. % skelných vláken	PP+30 hm. % skel. vláken + 25 hm. % minerálu	PC	TPE-S
Tlakové ztráty (bar)	228	409	350	982	216
Výrobní deformace dílu (mm)	0,99	0,71	0,32	0,35	1,71
Smrštění (%)	1,3	0,9	0,4	0,4	1,83
Rovinnost (mm)	0,10	0,10	0,08	0,02	0,10

Z analyzovaných materiálů se PC (ALCOM PC 1000) i přes vysoký odpor proti toku (viz úroveň tlakových ztrát) vyznačuje nejnižší úrovní výrobní deformace, smrštění a nejvyšší rovinností. Naopak u materiálu TPE-S (DRYFLEX 810190) byla i přes nízký odpor proti toku zaznamenána vysoká úroveň výrobní deformace, smrštění a nízká rovinnost. Pro tento materiál tedy nemohou být předepsány stejné tolerance jako pro přesněji vyrobitelný PC či jiné amorfni materiály (PS, SAN, ABS). Vlivem vyšší úrovně smrštění, charakteristické pro semikrystalické materiály, se vyznačuje PP (ADSTIF EA648P) i vyšší úrovní výrobní deformace a nižší rovinností (v porovnání s amorfni materiály). Přidání skelných vláken do PP (AKROMID B3 GF30) evokuje pokles výrobní deformace i smrštění. Nicméně vlivem anizotropie orientace vláken nedochází ke zlepšení rovinnosti. Je-li do PP přidáno kromě skelného vlákna také minerální plnivo (AKROLEN PP GFM 21/15) je pokles výrobní deformace, smrštění a navýšení rovinnost výraznější.

Konstrukce formy má bezesporu také vliv na výrobní přesnost. Zásadní je zejména tvorba vtokových a temperačních systémů. Jak již bylo vysvětleno s rostoucí dráhou toku rostou

také tlakové ztráty, rozdíly v orientaci makromolekul a plniva. Pro dosažení maximální výrobní přesnosti by tedy byla vhodná jednonásobná forma, jelikož s rostoucím počtem kavit roste i dráha toku taveniny. Tato varianta je však u velkých výrobních sérií neekonomická. Aplikace horkých vtokových systémů umožňuje částečnou eliminaci této problematiky. V souvislosti s dráhou toku, orientací makromolekul a plniva, aplikovatelností dotlaku musí být při stanovení dosažitelné výrobní přesnosti a předepisování výrobních tolerancí brána na zřetel i vzdálenost od vtoku. Nejvyšší výrobní přesnosti může být dosaženo v blízkosti vtoku (aplikovatelnost dotlaku). I volba samotného vtokového ústí má značný vliv na výrobní přesnost. Při použití studených vtokových systémů kuželového, filmového, deštníkového tvaru, nedochází vlivem jejich geometrie k tak velkému ovlivnění toku jako v případě bodového či banánového ústí. Výsledkem je vyšší dosažitelná přesnost výroby. Nicméně limitujícím faktorem těchto variant je nutnost dodatečného odstranění vtoků (vícepráce). To je hlavní důvod proč druhé zmiňované varianty vtokového ústí, jež jsou automaticky odnímatelné (pomocí tří deskové formy, přidržovače vtoku či aplikací jiných prvků) jsou u velkosériové výroby i za cenu vyšších tlakových ztrát aplikovány mnohem častěji.

Temperační okruh zajišťuje odvod tepelné energie během tuhnutí výrobku. Rovnoměrnost tepelného odvodu tedy také ovlivňuje utvářenou strukturu, úroveň smršťení a deformace v jednotlivých částech dílu. Proto by již při konstrukci plastových dílů měl být brán zřetel na aplikovatelnost temperačních okruhů.



*Obr. 97 Vliv rozdílného tepelného odvodu obou částí formy na výrobní deformaci*

*Vlivem rozdílného tepelného odvodu obou částí formy dochází k nesymetrické deformaci výrobku.*

Dalším aspektem, který ovlivňuje přesnost výroby je použitý vstřikovací stroj a aplikované technologické parametry. Volba vstřikovacího stroje je odvislá od konstrukce formy, kde by se vstřikovaná dávka měla pohybovat mezi 1 až 4násobkem průměru šneku. Nedodržení těchto poměrů může vést k přílišnému tepelnému namáhání polymeru, či naopak nehomogenitám taveniny a může ovlivnit i přesnost vstřikované dávky. Reálné vstřikovací podmínky nemusí zejména u starších vstřikovacích strojů při vysokých smykových rychlostech odpovídat nastaveným hodnotám. Dosahovaná přesnost reprodukovatelnosti vstřikovací dávky se u vstřikovacích strojů může dle způsobu ovládání (řízeno dráhou šneku, tlakem v dutině formy, aj.) lišit. Elektrické vstřikovací stroje, jež mají pohyby řízené servo-pohony se obecně

vyznačují vyšší přesností vstřikování než hydraulické stroje, kde jsou pohyby iniciovány tlakem hydrauliky. Rozdíly mezi oběma typy strojů jsou významné zejména u vstřikování malých dílů.

Nastavení procesních parametrů je velmi důležitou výrobní částí, která má významný vliv na přesnost výroby. U plastových dílů se však nelze zaměřit pouze na výrobní přesnost definovanou mírou smrštění a změnou tvaru dílu, které jsou často kontrolovány do 24 hodin po výrobě (výrobní smrštění). V důsledku dodatečných strukturních změn (dokrystalizace), vnitřního pnutí a dalších jevů může v dílech v průběhu času dojít k významným rozměrovým změnám či dokonce k jeho porušení, což vede k velmi nákladným reklamačním vícenákladům. Nastavení procesních parametrů musí být voleno takové, aby byla výše uvedená skrytá rizika co nejvíce eliminována. **Vzhledem k originalitě každého výrobního procesu (konstrukce dílu, formy, použitý stroj) je nutno volit individuální přístup k řešení celé problematiky. Bohužel neexistuje univerzální doporučení, které by bylo aplikovatelné ve všech případech!!!**

*Pro objasnění významu jednotlivých procesních parametrů na kvalitu výroby je tato problematika podrobněji analyzována. Pro porovnatelnost jednotlivých výsledků byl opět analyzován plošný díl (deska 200 x 80 x 2 mm), viz obr. 86. Jelikož se jedná o jednoduchý díl bez přechodů tlouštěk stěn a jiných konstrukčních prvků, kde umístění vtoku zajišťuje rovnoměrné plnění, lze předpokládat, že změna rychlosti plnění nebude mít významný vliv na výrobní přesnost. Proto byla zvolena rychlost plnění jako konstanta a proměnnými procesními parametry byly teplota taveniny, teplota formy, čas chlazení, velikost a úroveň dotlaku. Za referenční stav lze považovat doporučené procesní parametry dle materiálové listu - PP ADSTIF EA648P, viz tabulka 2 (strana 37). Výsledky jednotlivých analýz jsou sumarizovány v tabulce 15.*

Tab. 15 Výsledky analýzy vlivu procesních parametrů na výrobní rozměry

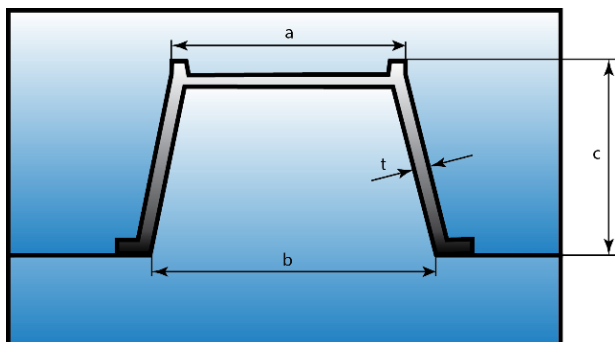
	Doporučené nastavení dle mat. listu	Navýšení teploty taveniny	Snížení teploty formy	Zvýšení úrovně a doby dotlaku	Zkrácení výrobního času
Změna parametru	Ref.	z 225 na 250 °C	z 45 na 20 °C	z 400 na 800 barů, z5 s na 8s	z 30s na 10s
Výrobní deformace dílu (mm)	0,92	0,97	0,57	0,72	1,4
Rovinnost (mm)	0,10	0,10	0,11	0,03	0,11

Z vyhodnocených výsledků lze vyvodit závěr, že navýšení teploty taveniny mělo minimální vliv na změnu výrobních rozměrů. Tato skutečnost je dána především konstrukcí dílu, kde tavenina nemusí překonat složitou dráhu toku. U konstrukčně komplikovanějších dílu by již mohl být ve spojitosti se změnou viskozity taveniny vliv parametru teploty taveniny významnější. Naopak vliv teploty formy je zjevný. Snížení teploty formy evokuje snížení výrobní deformace. Rovinnost však zůstává beze změny. Proto lze usuzovat, že došlo pouze ke snížení výrobního smrštění. U tohoto výsledku je nutné brát na zřetel, že semikrystalické materiály se díky tzv. dokrystalizaci vyznačují v průběhu času dodatečným smrštěním, které zapřičiňuje navýšení vnitřního pnutí a především změnu rozměrům, což je z hlediska kvality nežádoucí (rozdíl mezi výrobními rozměry a rozměry, které ověřuje zákazník). Navýšení úrovně dotlaku a jeho časové prodloužení zapřičiňilo enormní zlepšení rovinnosti dílu. I zde je nutné varovat před nebezpečím, které v sobě skrývá změna tohoto parametru. Zvýšení doby i úrovně dotlakové fáze totiž má velký vliv na úroveň vnitřního pnutí. Je-li v díle příliš vysoká úroveň vnitřního pnutí, kterou nelze explicitně kvantifikovat, hrozí zároveň značné riziko jeho porušení (reklamační řízení). Zkrácení výrobního času přineslo navýšení výrobní deformace i nepatrné zhoršení rovinnosti dílu.

Stejně jako u kovových dílů mohou být pro plastové výrobky předepisovány tolerance výrobní a i funkční. Předepisování funkčních tolerancí je vzhledem k množství aspektům, které je ovlivňují velmi obtížné. Je tedy aplikováno pouze v případech, kde to daná aplikace vyžaduje. Naopak definice výrobních tolerancí je nezbytnou podmínkou pro kontrolu výrobní kvality. Výrobní tolerance lze rozdělit na tolerance rozměru a tolerance tvaru neboli geometrické tolerance. Tolerance rozměru jsou přidělovány tzv. funkčním rozměrům, tedy rozměrům, jež jsou důležité pro správnou funkčnost výrobku. Přidělování výrobních tolerancí by mělo být aplikováno v souladu s aktuální normou DIN 16 742 (2013). Tato norma rozděluje materiály do šesti skupin z hlediska dosažitelné výrobní přesnosti. Jednotlivé toleranční oblasti jsou závislé na funkčním rozměru (tolerance se zvětšuje s délkou) a na skutečnosti, zda se jedná o rozměr vázaný či nevázaný. Rozměry vázané jsou rozměry přímo související s jednotlivými konturami a tvary vstřikovací formy. Rozměry nevázané jsou rozměry související nepřímo s rozměry vstřikovací formy. Například rozměry vzniklé dosednutím obou částí vstřikovací formy či rozměry vzniklé pohybem dalších částí formy (jádra – vedlejší dělicí roviny). V takových to případech může v průběhu výroby dojít k jejich opotřebením. Proto nemohou být tolerance v těchto oblastech tak nízké jako u rozměru vázaných.

Oproti předchozí normě DIN 16 901 (1982) zohledňuje norma DIN 16 742 vliv technologického procesu. Toleranční skupiny jsou rozděleny do čtyř tříd dle dosažitelné výrobní přesnosti na: standardní výrobu, přesnou výrobu, precizní výrobu a speciální výrobu. Norma zavádí symetrické toleranční

pole okolo jmenovité hodnoty, přidává tabulku tolerančních polí pro průměr děr. Je kompatibilní se základní normou ISO 286-1 a lze tedy pracovat v obou soustavách.



Obr. 98 Příklad rozměrů vázaných a nevázaných

Na obrázku „a, b“ jsou rozměry vázané, „c, t“ jsou rozměry nevázané (opotřebení v dělicí rovině)

Kromě funkčních rozměrů jsou na výkrese předepisovány i rozměry nefunkční a informativní (jmenovitý rozměr v kulatých závorkách). Přesto že u nefunkčních rozměrů nejsou uvedeny tolerance, je nutné si uvědomit, že pro ně platí všeobecné mezní toleranční požadavky (ČSN 01 4240, ISO 2768-1). V současné době je evidován čím dál větší požadavek na aplikaci geometrických tolerancí. Geometrické tolerance umožňují vymezení přímosti, rovnoběžnosti, kolmosti, sklonu, rovinnosti, kruhovitosti, válcovitosti, aj. Pro jejich správné posouzení je klíčovým aspektem jednoznačná definice základny. V souvislosti s aplikací geometrických tolerancí je v důsledku diskutovaných průvodních jevů technologie vstřikování velmi obtížné dosažení přesného tvaru. Proto volba geometrických tolerancí musí být volena ještě obezřetněji než v případě rozměrových tolerancí.

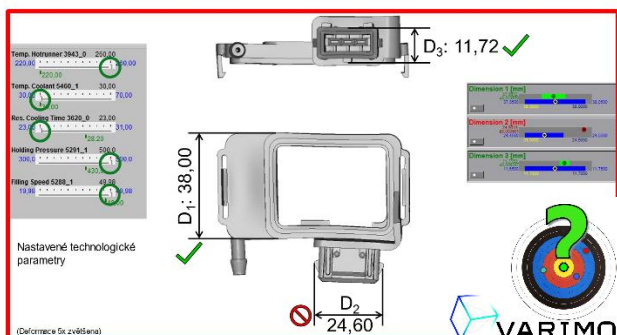
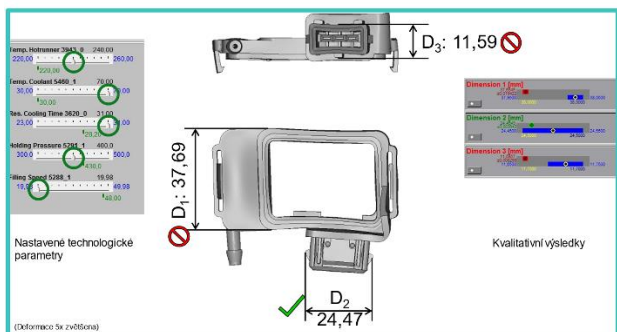
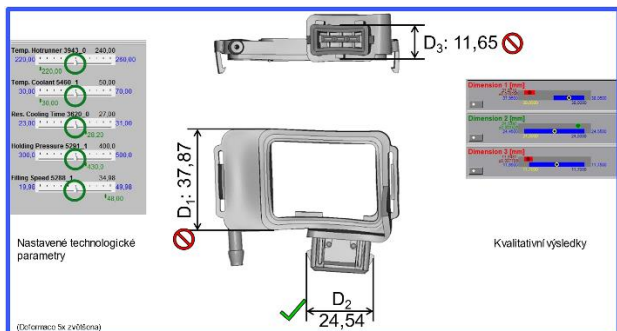
## 6. MOŽNOSTI OPTIMALIZACE POMOCÍ MOLDFLOW ANALÝZ

Velmi zajímavou možností moldflow analýz je možnost automatické optimalizace pomocí zařazení tzv. zpětnovazebních DOE („Design of Experiments“) modulů. Jedná se analytickou matematicko-statistickou metodou, která na základně definovaných požadavků a stanovených proměnných efektivně redukuje počet výpočtových úloh (moldflow analýz). V souvislosti se složitostí problematiky konstrukce plastových dílů, forem i technologie vstřikování je právě počet proměnných, a tedy počet výpočtových úloh, které je potřeba provést pro dosažení žádaného cíle značně časově i odbornostně zatěžující faktor. Využití moldflow analýz společně s DOE moduly tak umožní výrazné zefektivnění optimalizačních aktivit. Zároveň umožní vzájemné porovnání míry vlivu jednotlivých proměnných na požadovaný výsledek. V konstrukci plastových dílů tak může být v závislosti na požadavcích na výrobní tolerance rozměru i tvaru efektivně optimalizována pozice vtoku, volba tloušťky stěny, přechodů v tloušťkách stěny a další konstrukční prvky.

V současnosti umožňuje výše představené automatické optimalizace například společnost Sigmasoft Virtual Molding a Simcon. DOE podpůrné moduly nejsou standardní součástí softwarového vybavení. Je nutno je k stávajícím moldflow analýzám dokoupit (Sigmasoft + Autonomous Optimization, Cadmould + Varimos). Širšímu využití v plastikářském odvětví brání jejich vysoká cena. Proto se v současnosti jejich využití nenachází v předvýrobní konstrukční optimalizaci dílů, ale



v řešení existujících výrobních problémů specializovanými pracovišti (firmy zabývající se poradenstvím v oblasti optimalizace výroby).




Obr. 99 Využití DOE automatické optimalizace (program Varimos)

## 7. VADY

Problematika vad a jejich odstranění je pravděpodobně nejčastěji diskutované téma v plastikářském odvětví. Jelikož je u technologie vstřikování velké množství činitelů, které mohou vady způsobit, je bez znalosti konkrétního výrobního procesu dané společnosti a všech proměnných do něj vstupujících velmi obtížné najít jejich příčinu. Navíc, **každý výrobek je originál**, a to nejen z hlediska konstrukce dílu, nýbrž i z hlediska konstrukce formy (vtokový, temperační, vyhazovací systém, materiál formy atd.). Proto je **při odstraňování vad ke každému výrobku nutno volit individuální přístup**. Je vhodné **postupovat vylučovacím způsobem** od kontroly kvality vstupní suroviny, kontroly přípravných, výrobních, dokončovacích operací, až po skladování či transport výrobku. Vzhledem k závažnosti problematiky by bylo vhodné tomuto tématu věnovat samostatnou publikaci. Cílem této kapitoly není provést kompletní rozbor s doporučením, jak vady eliminovat, nýbrž pouze poukázat na vliv konstrukce plastových dílů. Při optimální konstrukci by ke vzniku těchto vad docházet nemělo, případně by vady měly být snadno procesně eliminovány.

Tab. 16 Příklady vad plastových dílů

 <p data-bbox="296 1321 414 1348"><i>Propadliny</i></p>	<p data-bbox="593 1082 856 1141">Vada rovinnosti, lokální „propadnutí“ povrchu.</p> <p data-bbox="543 1145 907 1364">Konstrukční příčinou je kumulace materiálu. Velmi často se vyskytuje pod žebry, výstupcích, aj. Není-li možná konstrukční změna je pro její eliminaci nutné v daných místech redukovat smršťení.</p>
--	---

 <p data-bbox="303 539 407 564"><i>Staženiny</i></p>	<p data-bbox="538 197 916 579">Vada objemu, vznik vakuového útvaru (dutiny) ve stěně dílu. Vznik tohoto jevu může být rovněž spojen s kumulací materiálů. Na vznik staženin však mají zásadní vliv termo-dynamické podmínky zpracovatelského procesu. Při optimalizaci procesních parametrů je tedy možné, že mohou být částečně či zcela eliminovány i to, že se budou vyskytovat v jiném místě dílu.</p>
 <p data-bbox="314 869 396 895"><i>Bubliny</i></p>	<p data-bbox="538 616 916 871">Staženiny mohou být zaměňovány s bublinami, které nejčastěji vznikají v důsledku vlhkosti v tavenině, degradace materiálových složek či znečištění formy separátory. Tyto vady tedy většinou nejsou konstrukčním problémem nýbrž technologickým.</p>
 <p data-bbox="309 1204 402 1230"><i>Šmouhy</i></p>	<p data-bbox="538 919 916 1273">Konstrukce dílu může evokovat problematický odvod vzduchu v jednotlivých částech dílů a vznik šmouh. Konstrukční vliv je u této vady mnohdy opomíjený, ale je také velmi důležitý. Zejména vlivem neoptimální volby tloušťek stěn či jejich přechodů se na výrobku mohou vyskytovat také šmouhy zapříčiněné orientací vyztužujícího plniva.</p>

 <p><i>Uzavřený vzduch</i></p>	<p>Nevhodná konstrukce dílů může zapříčinit v oblastech tvarových změn (výstupky, písma, žebra, aj.) přelití a uzavření transponovaného vzduchu. Tato vada se rovněž velmi často vyskytuje při aplikaci vysokých rychlostí vstřikování a nedostatečně efektivním odvodu vzduchu z dutin formy.</p>
 <p><i>Diesel efekt</i></p>	<p>Uzavření vzduchu může při překročení určité hranice tlaku zapříčinit jeho vznícení. Charakteristickým prvkem těchto oblastí je neúplnost zaplnění dílu a spálená místa.</p>
 <p><i>Neúplný výrobek</i></p>	<p>Konstrukční příčinou neúplnosti zaplnění dílu je použití příliš malých tlouštěk stěn, nevhodných přechodů tlouštěk stěn, tvarová složitost či použití materiálů s příliš vysokou viskozitou.</p>
 <p><i>Přetoky</i></p>	<p>Použití příliš malých tlouštěk stěn, nevhodných přechodů v tloušťkách stěn, tvarová složitost či použití materiálů s příliš vysokou viskozitou vyžaduje aplikaci vysokých vstřikovacích rychlostí a tlaků. Ty následně mohou zapříčinit vznik přetoků – tenké filmové okraje v oblasti dělicí roviny.</p>

 <p style="text-align: center;">Jetting</p>	<p>Aplikace vysokých vstřikovacích rychlostí v důsledku příliš malých tlouštěk stěn může způsobit vznik vady „Jetting“ neboli volného proudu taveniny. Mnohem častěji za tuto vadu může například volba materiálu (jeho viskozita), konstrukce vtokového ústí a použité procesní parametry.</p>
 <p style="text-align: center;"><i>Studené spoje</i></p>	<p>Vizuální i pevnostní vada, spojení dvou proudů taveniny, které při nevhodných termo-dynamických podmínkách neumožní dostatečné promísení makromolekul. Se vznikem studených spojů je u konstrukčních prvků nutno počítat a lokalizovat je tak, aby nebyly problémem pro požadavky na kvalitu dílu.</p>
 <p style="text-align: center;"><i>Delaminace</i></p>	<p>V důsledku překročení hranice zpracovatelnosti materiálu může dojít během procesu vstřikování k delaminaci materiálu. Použití příliš malých tlouštěk stěn evokuje vyšší smykové namáhání taveniny, které může zapříčinit výše uvedený děj. Delaminace však bývá častěji způsobena kontaminací materiálu, aplikací nevhodných parametrů, vlhkostí, aj.</p>

 <p><i>Deformace</i></p>	<p>Vliv konstrukce dílu na deformaci výrobků je zásadní. Deformace dílu primárně vzniká během solidifikační fáze. Nicméně nerovnoměrné smrštění může zapříčinit i problematické odformování a následnou deformaci či poškození výrobku.</p>
 <p><i>Rozdíly v lesku</i></p>	<p>Rovněž vliv konstrukce dílu na rozdíly v lesku je značný. Výsledný lesk výrobku je totiž definován refrakcí světla od jeho povrchu. Rozdílné tloušťky stěny, její přechody, kumulace materiálu, rozdílná orientace makromolekul i plniva, stejně tak jako termodynamické podmínky utvářené struktury následně evokují i rozdílnou refrakci světla v jednotlivých částech výrobku.</p>
 <p><i>Stopy po vyhazovačích</i></p>	<p>Ve spojitosti s nerovnoměrným smrštěním či nevhodně aplikovanými vyhazovacími prvky formy (počet, velikost) se na výrobcích mohou vyskytovat stopy po vyhazovačích. Řešením je konstrukční optimalizace dílu či vyhazovacího systému formy. Použité procesní parametry samozřejmě mají také svůj vliv na tuto vadu a je nutné se zaměřit i na optimalizaci této části.</p>



*Vnitřní pnutí*

Vnitřní pnutí je nejproblematičtější vadou, jelikož je ve výrobcích skryto a u většiny materiálových kombinací ho nelze nedestruktivně kvantifikovat. Na úroveň vnitřního pnutí se podílejí všechny činitele výrobního procesu do něho vstupující. Nevhodná konstrukce plastových dílů může evokovat potřebu aplikace kritických procesních parametrů pro daný materiál, které navýší vnitřní pnutí v dílech. Po čase dojde k uvolnění tohoto kumulovaného pnutí a porušení dílu.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] KENNEDY, Peter a Rong ZHENG. *Flow analysis of injection molds*. B.m.: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2013. ISBN 1-56990-522-3.
- [2] ZHOU, Huamin. *Computer modeling for injection molding. Simulation, Optimization and Control*. 2013.
- [3] ROSATO, Dominick V. *Plastics engineered product design*. B.m.: Elsevier, 2003. ISBN 0-08-051407-3.
- [4] CAMPO, E. Alfredo. *Complete Part Design Handbook*. B.m.: Hanser Munich, Germany, 2006.
- [5] MALLOY, Robert A. *Plastic part design for injection molding: an introduction*. B.m.: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2012. ISBN 3-446-43374-0.
- [6] LEVY, Sidney. *Plastics product design engineering handbook*. Springer Science & Business Media, 2012
- [7] MACLEAN-BLEVINS, Mark T. *Designing Successful Products with Plastics: Fundamentals of Plastic Part Design*. B.m.: William Andrew, 2017. ISBN 0-323-44648-5.
- [8] BELOFSKY, HBAUOA. *Plastics: product design and process engineering. Hanser, Carl, Verlag, Plastics: Product Design and Process Engineering(Germany), 1995.*. 1995, 647.
- [9] RAO, Natti S.; SCHUMACHER, Günter. *Design formulas for plastics engineers*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2014.
- [10] TRES, Paul A. *Designing plastic parts for assembly*. B.m.: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2021. ISBN 1-56990-821-4.
- [11] ROSATO, Dominick V. a Marlene G. ROSATO. *Injection molding handbook*. B.m.: Springer Science & Business Media, 2012. ISBN 1-4615-4597-8.
- [12] REES, Herbert. *Injection Mold Design*. B.m.: Munich: Hanser Publishers, 2001.



**Název**                    **Konstrukce plastových dílů s využitím  
moldflow analýz**

**Autor**                    **Ing. Pavel Brdlík, Ph.D.**

**Určeno pro**            **studenty Fakulty strojní TU v Liberci**

**Vydavatel**            **Technická univerzita v Liberci  
Studentská 1402/2, CZ-Liberec**

**Schváleno**            **Rektorátem TUL dne 26.3.2024, čj. RE 22/24**

**Vyšlo**                    **2024**

**Počet stran**           **120**

**Vydání**                **první**

**Číslo publikace**    **55-022-24**

**Tato publikace neprošla jazykovou úpravou.**

**ISBN 978-80-7494-699-8**

