

Optimalizace vlivu umístění vtoku a procesních podmínek na studené spoje při vstřikování pomocí software Moldflow

Bc. Erik Matúš

Diplomová práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Erik Matuš
Osobní číslo:	T23308
Studijní program:	N0788A270002 Výrobní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Optimalizace vlivu umístění vtoku a procesních podmínek na studené spoje při vstřikování pomocí software MoldFlow

Zásady pro vypracování

- Vypracovat literární studii pro dané téma.
- Provést 3D konstrukci modelu vstřikované součásti.
- Vytvořit simulace procesu vstřikování v software MoldFlow.
- Navrhnout optimalizace vstřikování a vyhodnocení jednotlivých variant.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

BEAUMONT, John P. Runner and gating design handbook: tools for successful injection molding. 2nd ed. Munich: Hanser Publishers, 2007. ISBN 978-1-56990-421-3
KERKSTRA, Randy a Steve BRAMMER. Injection molding advanced troubleshooting guide. Munich: Hanser Publishers, 2018. ISBN 978-1-56990-645-3.
WANG, Maw-Ling, Rong-Yeu CHANG a Chia-Hsiang HSU. Molding simulation: theory and practice. Cincinnati: Hanser Publications, 2018, 513 s. ISBN 978-1-56990-619-4.
YANG, Yi, Xi CHEN, Ningyun LU a Furong GAO. Injection molding process control, monitoring, and optimization. Munich: Hanser, 2016. Progress in polymer processing series. ISBN 978-1-56990-592-0.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Martin Ovsík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2025**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 3. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení diplomové práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Diplomová práce popisuje problematiku vstřikovacího procesu z hlediska tvorby a kvalitativních dopadů studených spojů na výstřiku s využitím simulačního softwaru Moldflow. Je uvažováno zejména vlivu umístění vtokového ústí a volby procesních podmínek vstřikovacího procesu. V teoretické části jsou uvedeny základní informace charakterizující používané materiály při vstřikování, základní informace o technologii vstřikování, problematika studených spojů a přiblížení softwaru Moldflow. V praktické části je obsažen 3D model výstřiku, konstrukce vstřikovací formy a simulační analýzy s vyhodnocením. Následně byly navrženy optimalizační varianty, které byly dále porovnávány s počátečním řešením a vyhodnocovány.

Klíčová slova: Moldflow analýza, optimalizace procesu, polymer, procesní podmínky, studené spoje, umístění vtokového ústí, vstřikování, vstřikovací forma, výstřik, vtokový systém, vtokové ústí

ABSTRACT

The diploma thesis describes the problematics of the injection molding process, with a primary focus on the formation and qualitative impact of weld lines on the injection-molded part while using the Moldflow simulation software. Exceptional attention is given to the influence of the gate location and the process parameters of the injection molding process. The theoretical part provides fundamentals of the injection molding technology, and the main part is dedicated to the weld lines problematics and the introduction of the Moldflow software. The practical part includes a 3D model of the injection-molded part, the design concept of the injection mold and Moldflow simulation analysis with thorough evaluations. Based on these simulation results, an optimization was proposed, subsequently implemented, and the results were compared with the original solution.

Keywords: gate, gate location, injection molding, injection mold, injection-molded part, Moldflow analysis, process optimization, polymer, process parameters, runner system, weld lines

Touto cestou bych rád vyjádřil své poděkování vedoucímu mé diplomové práce, doc. Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D., za jeho vstřícný přístup, cenné odborné rady a čas, který mi ochotně věnoval při během celého procesu jejího vypracování.

OBSAH

ÚVOD.....	13
I TEORETICKÁ ČÁST	14
1 POLYMERNÍ MATERIÁLY	15
1.1 NADMOLEKULÁRNÍ STRUKTURA	15
1.2 CHARAKTERISTICKÉ TEPLoty POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ	16
1.3 ROZDĚLENÍ POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ	17
1.4 TERMOPLASTY POUŽÍVANÉ K VÝROBĚ VÝSTŘÍKŮ.....	18
1.5 SMRŠTĚNÍ A DEGRADACE	19
1.6 TOK POLYMERNÍCH TAVENIN	21
1.6.1 Fontánový tok.....	22
2 VSTŘIKOVÁNÍ POLYMERŮ	23
2.1 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS	23
2.1.1 Plastikační fáze.....	24
2.1.2 Vstřikovací fáze	24
2.1.3 Dotlaková fáze	25
2.1.4 Fáze chlazení	25
2.2 PRŮBĚH TLAKU, MĚRNÉHO OBJEMU A TEPLoty BĚHEM VSTŘIKOVÁNÍ	26
2.3 VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	27
2.3.1 Vstřikovací jednotka	29
2.3.2 Uzavírací jednotka	32
2.3.3 Řídící a regulační jednotka.....	34
3 VADY VÝSTŘÍKŮ	36
3.1 STUDENÉ SPOJE	36
3.1.1 Způsob vzniku studených spojů	38
3.1.2 Typy studených spojů	38
3.1.3 Význam hodnocení kvality studených spojů.....	39
4 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ STUDENÉ SPOJE.....	41
4.1 KONSTRUKCE VÝSTŘÍKU	41
4.2 VSTŘIKOVANÝ MATERIÁL	41
4.3 PROCESNÍ PARAMETRY	42
4.3.1 Teplota vstřikovací formy	43
4.3.2 Teplota taveniny	43
4.3.3 Vstřikovací rychlost	44
4.3.4 Vstřikovací tlak	44
4.3.5 Doba dotlaku	44
4.3.6 Doba chlazení	44
4.4 VLIV SYSTÉMŮ VSTŘIKOVACÍ FORMY	44

4.4.1	Vtokový systém.....	44
4.4.2	Temparační systém.....	51
4.4.3	Odvzdušňovací systém.....	52
4.5	PARAMETRY VSTŘIKOVACÍHO STROJE	52
5	VYUŽITÍ CAE SOFTWARE.....	53
5.1	SIMULACE VSTŘIKOVÁNÍ POMOCÍ SOFTWARE MOLDFLOW	53
5.1.1	Typy analýz v softwaru Moldflow	53
5.1.2	Postup přípravy analýzy	54
II	PRAKTICKÁ ČÁST	57
6	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	58
7	POUŽITÝ SOFTWARE	59
7.1	CATIA V5R19	59
7.2	KATALOG NORMALIZOVANÝCH DÍLŮ	59
7.3	AUTODESK MOLDFLOW 2024.....	59
8	POPIS A SPECIFIKACE VÝSTŘIKU	60
8.1	VOLBA MATERIÁLU	60
9	NÁVRH VSTŘIKOVACÍ FORMY	61
9.1	TVAROVÉ ČÁSTI VSTŘIKOVACÍ FORMY	62
9.1.1	Tvárník a tvárnice.....	62
9.1.2	Boční odformování.....	63
9.2	VTOKOVÝ SYSTÉM.....	64
9.3	TEMPERAČNÍ SYSTÉM	66
9.4	VYHAZOVACÍ SYSTÉM	68
9.5	ODVZDUŠNĚNÍ.....	69
9.6	RÁM VSTŘIKOVACÍ FORMY	69
10	VOLBA VSTŘIKOVACÍHO STROJE.....	71
11	SIMULACE VSTŘIKOVÁNÍ	72
11.1	ANALÝZA UMÍSTĚNÍ VTOKOVÉHO ÚSTÍ.....	72
11.1.1	Import modelu a tvorba sítě.....	72
11.1.2	Nastavení parametrů analýzy umístění vtokového ústí.....	73
11.2	VÝSLEDKY ANALÝZY UMÍSTĚNÍ VTOKOVÉHO ÚSTÍ.....	74
11.2.1	Indikace odporu vůči toku taveniny (Flow resistance indicator)	74
11.2.2	Vhodnost umístění vtokového ústí (Gating suitability)	74
11.3	KOMPLETNÍ ANALÝZA VSTŘIKOVÁNÍ.....	75
11.3.1	Rozvržení modelů.....	75
11.3.2	Vtokový systém.....	75
11.3.3	Temparační systém.....	76
11.3.4	Blok vstřikovací formy.....	77

11.3.5	Nastavení parametrů kompletní analýzy	78
11.4	VÝSLEDKY ANALÝZY PLNĚNÍ A DOTLAKU	79
11.4.1	Doba plnění (Fill time).....	79
11.4.2	Teplota čela taveniny (Temperature at flow front)	80
11.4.3	Teplota taveniny (Bulk temperature)	81
11.4.4	Rychlost smykové deformace (Shear rate, bulk)	82
11.4.5	Průběh vstřikovacího tlaku v místě vtokového ústí (Pressure at injection location: XY Plot)	83
11.4.6	Průběh uzavírací síly (Clamp force: XY Plot)	84
11.4.7	Vzduchové kapsy (Air traps)	85
11.4.8	Studené spoje (Weld lines).....	86
11.4.9	Čas pro dosažení vyhazovací teploty (Time to reach ejection temperature)	87
11.5	VÝSLEDKY ANALÝZY CHLAZENÍ.....	88
11.5.1	Teplota média v temperačním okruhu (Circuit coolant temperature)	88
11.5.2	Reynoldsovo kritérium (Circuit Reynolds number).....	89
11.5.3	Efektivita odvodu tepla (Circuit heat removal efficiency).....	90
11.6	VÝSLEDKY ANALÝZY SMRŠTĚNÍ A DEFORMACE	91
11.6.1	Deformace vlivem všech efektů (Deflection, all effects: Deflection).....	91
11.6.2	Deformace vlivem chlazení (Deflection, differential cooling: Deflection).....	92
12	OPTIMALIZACE STUDENÝCH SPOJŮ	93
12.1	VLIV POLOHY VTOKOVÉHO ÚSTÍ.....	93
12.1.1	Varianta č. 1	94
12.1.2	Varianta č. 2	95
12.1.3	Varianta č. 3	96
12.1.4	Varianta č. 4	97
12.1.5	Dosažené výsledky – vliv polohy vtokového ústí.....	98
12.2	VLIV VELIKOSTI VTOKOVÉHO ÚSTÍ.....	99
12.2.1	Dosažené výsledky – vliv velikosti vtokového ústí	100
12.3	VLIV VOLBY MATERIÁLU VÝSTŘIKU	101
12.3.1	Materiál č. 1 (Posouzení vlivu ITT).....	101
12.3.2	Materiál č. 2 (Posouzení chemického složení).....	102
12.3.3	Materiál č. 3 (Posouzení vlivu plniva)	104
12.3.4	Dosažené výsledky – vliv volby materiálu výstřiku	105
12.4	VLIV PROCESNÍCH PODMÍNEK.....	106
12.4.1	Vyšší teplota taveniny	107
12.4.2	Vyšší teplota formy	108
12.4.3	Prodloužená doba chlazení.....	109
12.4.4	Prodloužená fáze dotlaku	110
12.4.5	Dřívější sepnutí na fázi dotlaku.....	111
12.4.6	Zvýšený tlak ve fázi dotlaku	112
12.4.7	Vyšší vstřikovací tlak.....	113
12.4.8	Vyšší vstřikovací rychlost.....	115

12.4.9 Rozdílné teplotní pole vstřikovací formy	116
12.4.10 Dosažené výsledky – vliv procesních podmínek	117
12.5 DISKUZE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ OPTIMALIZACE STUDENÝCH SPOJŮ.....	118
ZÁVĚR.....	120
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	121
SEZNAM OBRÁZKŮ	127
SEZNAM TABULEK.....	131
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	132
SEZNAM PŘÍLOH.....	134

ÚVOD

Specifické vlastnosti polymerních materiálů umožňují jejich využití jako náhradu konvenčních materiálů, přičemž současně rozšiřují aplikační možnosti v mnoha různých oblastech. Jejich využitelnost je širokospektrální napříč všemi odvětvími průmyslu. Vlastnosti polymerních materiálů lze účelnou změnou chemického složení v podstatě libovolně upravovat. Použitím těchto materiálů je tak vyhověno socioekonomickým potřebám a požadavkům na přiměřené a konkurenceschopné výrobní náklady.

Vstřikování představuje nejdynamičtější a nejuniverzálnější metodu zpracování polymerních materiálů, která umožňuje výrobu tvarově přesných dílů s vysokou kvalitou povrchu. Touto technologií se zpracovává přibližně třetina celkové materiálové produkce.

Vstřikování je opakující se cyklický proces, při kterém je polymerní materiál ve formě granulátu dopravován z násypky do plastikační jednotky vstřikovacího stroje. Zde dochází k jeho zplastikování, tedy zahřátí, tavení a homogenizaci, čímž vzniká tavenina. Ta je následně pod vysokým tlakem vstříknuta do tvarové dutiny uzavřené vstřikovací formy, která udává výsledný tvar výrobku. Po jejím zaplnění probíhá chlazení na vyhazovací teplotu, při níž je tvar výrobku již zafixován. Poté se vstřikovací forma otevře a hotový výrobek je vyhozen vyhazovacím systémem. Hotové výrobky se nazývají také jako výstříky.

Mezi přednosti vstřikování patří schopnost produkce tvarově složitých výstříků při vysoké efektivitě využití materiálu. Technologie umožňuje realizaci velkoobjemové průmyslové výroby s vysokou mírou opakovatelnosti, přesnosti a s minimálními časy výrobních cyklů. Významnou výhodou je rovněž široké spektrum zpracovatelných polymerních materiálů, jejichž volba se odvíjí od specifických požadavků na výsledné vlastnosti výstříku. Limitujícím faktorem technologie je přípustná velikost výstříku, která je dána kapacitou vstřikovacího stroje. Vysoké nároky na kvalitu a rozměrovou přesnost výstříku kladou důraz na precizní konstrukci vstřikovací formy. Pro každý výstřík se zpravidla vypracovává samostatný technologický projekt, což zvyšuje ekonomickou náročnost celého procesu.

K zajištění plynulého průběhu výroby a minimalizaci chybovosti se proto využívá simulační software, který umožňuje optimalizaci ve fázi návrhu. Simulační software na bázi numerických výpočetních modelů poskytuje velmi věrné predikce chování polymeru ve vstřikovací formě během vstřikování. Díky tomu je možné včas odhalit, odstranit nebo optimalizovat případné vady a nedostatky již v počáteční fázi technologického projektu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERNÍ MATERIÁLY

Všechny syntetické polymery se skládají z makromolekul. Ty vznikají postupným a opakovaným spojováním základní stavební jednotky (meru), která je odvozena od výchozí molekuly (monomeru), do dlouhých makromolekulárních řetězců. Při spojení dvou a více druhů polymerů vznikají kopolymery. [1]

Vlastnosti příslušného polymeru jsou dány druhem zastoupených atomů a způsobem spojení merů. Atomy polymerních makromolekul jsou spojeny kovalentními vazbami, přičemž v závislosti na typu těchto vazeb se liší jejich vazebná energie, která má pak zásadní vliv na mechanickou pevnost polymeru, jeho tepelnou stabilitu a v neposlední řadě i chemickou odolnost vůči působení chemikálií. Další vlastnosti vycházejí z celkového počtu merů v řetězci (počet merů v řetězci je obecně nazýván jako polymerační stupeň a hmotnost řetězce se vyjadřuje prostřednictvím molární hmotnosti). [1]

Vzhledem k tomu, že v polymeru jsou obsaženy řetězce rozmanitých délek, využívá se k jeho charakterizaci střední polymerační stupeň a střední molární hmotnost. Charakteristika polymeru je pak určena distribuční křivkou molekulárních hmotností. Mechanické vlastnosti polymeru a viskozita jeho taveniny (odpor vůči toku) při dané teplotě se zvyšují s rostoucí střední molární hmotností. Jinými slovy dochází ke zhoršení tekutosti, a tudíž i zpracovatelnosti. [1]

Řetězce makromolekul mohou, ale také nemusí být mezi sebou propojeny příčnými chemickými vazbami. Dle struktury řetězců mohou polymery nabývat lineárního, rozvětveného a síťovaného uspořádání. [1]

1.1 Nadmolekulární struktura

Polymery (především lineární a málo větvené) jsou schopny částečné krystalizace, což znamená, že tvoří do určité míry pravidelnou prostorovou strukturu. Prostorová struktura je tvořena destičkovými lamelami, které na sobě vyrůstají a tvoří větší, téměř kulový útvar (sferolit). Pokud polymery nedisponují schopností samovolného uspořádání se, při přechodu ze stavu taveniny do tuhého stavu jejich řetězce zůstávají nepravidelně uspořádány i v tuhém stavu (tvoří statistické klubko) a nazývají se amorfni. Polymery mohou tvořit částečně krystalickou (semikrystalickou) strukturu, která se vyznačuje přítomností jednak krystalické struktury, ale jednak také amorfni struktury. [1]

U amorfních i semikrystalických polymerů v pevném stavu jsou makromolekulární řetězce vzájemně vázány mezimolekulárními silami, jejichž intenzita ovlivňuje mechanické vlastnosti polymeru. Účinek jejich působení je nepřímo závislý na vzdálenosti molekul (krystalické polymery se na rozdíl od amorfních polymerů vyznačují menší závislostí mechanických vlastností na teplotě). Obsah krystalické fáze, velikost a rozložení sferolitů se odvíjí od chemické struktury polymeru, délky a typu větvení řetězců. Podíl krystalické fáze může dosahovat hodnot až 90 %. Krystalická fáze se vyznačuje neprůhledností, vyšší tepelnou odolností a také vyšší hustotou. Mezi základní vlastnosti amorfní fáze pak patří křehkost, tvrdost, vysoká pevnost a transparentnost. [1]

1.2 Charakteristické teploty polymerních materiálů

Částice polymerní hmoty konají rotačně-kmitavé pohyby, přičemž jejich intenzita a amplituda závisí na okamžité teplotě. Jedná se o mikrobrownův pohyb a pohybují se jím jednotlivé segmenty polymerních řetězců. S rostoucí teplotou se pohyby rozvolňují a dochází k výrazným změnám vlastností. Sklovité chování se mění na viskoelastické. K tomu dochází při dosažení teploty skelného přechodu (T_g). Důvodem je překonání mezimolekulárních sil vysokou intenzitou pohybu jednotlivých segmentů. [1]

Polymery vykazují sklovité chování pod teplotou T_g , kdy jsou velmi tvrdé a křehké. Makromolekuly tvoří tuhý celek. Dochází pouze k elastickým deformacím (platí zde lineární úměrnost mezi napětím a deformací). [1]

Oblast skelného přechodu je vymezena kolem teploty T_g . Ohřevem nastává pohyblivost celých makromolekulárních částí. V důsledku působícího napětí se makromolekulární řetězce rozplétají a roste schopnost jejich deformace. Materiál se stává měkkým a klesá jeho modul pružnosti. [1]

Nad teplotou T_g se polymery nachází v kaučukovitém stavu. Působením vnějšího mechanického namáhání se řetězce snadno rozplétají. Po uvolnění napětí se makromolekulární řetězce postupně vrací do původního, energeticky rovnovážného stavu. Jde o viskoelastickou deformaci (vratná deformace se zpožděním), která je pro polymery typická. V semikrystalických oblastech je však pevnost stále poměrně vysoká. Kaučukovitý stav se projeví pouze v amorfních oblastech. Postupným zvyšováním teploty je u semikrystalických polymerů dosaženo teploty tání (T_m) a u amorfních polymerů teploty tečení (T_n). Nad těmito teplotami se polymery nachází v plastickém stavu (semikrystalické polymery přechází prudce v taveninu, ale u amorfních polymerů se stále s teplotním

nárůstem mění viskozita až do doby, kdy nastane porušení vazeb a jejich rozklad). Plastický stav je využíván pro tváření polymerů (vratná deformace je minimální). [1]

U amorfních polymerů je možné pozorovat také teplotu viskózního toku (T_f). Nad touto teplotou se taveniny amorfních polymerů nacházejí ve viskózním stavu. S dalším nárůstem teploty dochází k rozpadu řetězců na fragmenty a posléze i degradaci. Hovoříme o teplotě rozkladu polymeru (T_c). [1]

1.3 Rozdělení polymerních materiálů

Polymery je možné klasifikovat dle různých hledisek. Z pohledu technologie vstřikování se nejčastěji rozdělují na základě svého chování během působení zvýšené teploty, a to do dvou základních skupin:

- Plasty – představují polymery, které vlivem působení vnějších sil podléhají trvalé deformaci. Za zvýšené teploty jsou plasty poddajné a snadno tvarovatelné. Po zafixování tvaru se chovají jako tuhá tělesa. [2]
- Elastomery – polymery, které se vyznačují svými viskoelastickými vlastnostmi. Jsou schopny vratné deformace při působení relativně nízkého mechanického zatížení za standardních podmínek. Vyznačují se převážně amorfní strukturou. Vybrané typy elastomerů mohou při působení zvýšené teploty a tlaku v přítomnosti vulkanizačních činidel vulkanizovat – podléhat chemické reakci, při níž dochází k tvorbě prostorově zesíťované struktury. Zvulkanizované elastomery se nazývají kaučuky a nacházejí široké uplatnění zejména při výrobě technické pryže. [2]

Plasty je možné rozdělit ještě do dvou následujících podskupin:

- Termoplasty – plasty tvarovatelné teplem, které lze navíc opakovaně tvarovat a fixovat, neboť během tepelného cyklu nedochází k chemickým změnám makromolekulární struktury. Po zahřátí do stavu taveniny a vytvarování následným ochlazením lze termoplasty opakovaně zpracovávat, aniž by chemicky degradovaly. Na základě uspořádání makromolekul mohou být amorfní a semikrystalické. [2]
- Reaktoplasty – při působení tepla a tlaku podléhají chemické reakci (proces vytvrzení) vedoucí k tvorbě prostorově zesíťované struktury. V průběhu této reakce přechází z lineárního či větveného stavu do stavu zesíťovaného, čímž dochází ke ztrátě termoplastických vlastností. Po vytvrzení se stávají nerozpustnými

a nezpracovatelnými. Při jejich opětovném tepelném ohřevu dochází k nevratné tepelné degradaci. [2]

Elastomery je též možné ještě rozdělit do dvou následujících podskupin:

- Termoplastické elastomery – tepelným působením je možné jejich opakované tvarování, protože vazby mezi makromolekulami jsou pouze fyzikálního charakteru, což umožňuje opakované tvarování. Jsou tvořeny blokovými kopolymery typu ABA, kdy střední blok B představuje pružný polymerní řetězec, zatímco krajní bloky A jsou složeny z tuhých, málo ohebných polymerních segmentů. Tento kopolymer vykazuje elastické vlastnosti při běžných teplotách, ale nad teplotou tání se chová jako termoplast, což umožňuje jeho právě opakované zpracování. [2]
- Kaučuky – představují skupinu tvarovatelných elastomerů, které po procesu vytvrzení přecházejí do prostorově zesíťovaného stavu, přičemž vznikají trvalé chemické vazby. V důsledku této prostorové struktury není jejich opakované tvarování tepelným působením možné. [2]

Pro vstřikování mají zcela zásadní význam plasty (konkrétně podskupina termoplastů), a proto bude další část práce věnována výhradně těmto materiálům. [3]

1.4 Termoplasty používané k výrobě výstřiků

V této kapitole budou popsány v současné době nejčastěji užívané termoplasty pro technologii vstřikování. Jedním z vůbec nejrozšířenějších termoplastů pro vstřikování je polypropylen (PP). Polypropylen patří mezi semikrystalické termoplasty. Vyznačuje se nízkou viskozitou taveniny, a proto je velmi dobře procesně zpracovatelný. Dále dobře odolává erozi, korozi a chemickému působení. Velkou výhodou je i jeho dobrá dostupnost a nízká cena. Pro vstřikování se často využívá ve směsích s jinými polymery, anebo se obohacuje přídatnými látkami. Volba vhodného druhu polypropylenu závisí na požadovaných vlastnostech výsledného produktu. [3]

Dalším velmi používaným materiálem je semikrystalický termoplast polyetylen (PE). Používá se ve třech modifikacích: nízkohustotní (LDPE), vysokohustotní (HDPE) a lineární nízkohustotní (LLDPE) polyetylen, přičemž jednotlivé modifikace se vzájemně odlišují střední molární hmotností a způsobem větvení makromolekulárních řetězců. Polyetylen je hojně využíván pro svoji snadnou zpracovatelnost, dobré mechanické vlastnosti, tepelnou a chemickou stabilitu a v neposlední řadě se jedná o velmi dobrý elektrický izolant. [3]

Velmi využívaným termoplastem je amorfní polystyren (PS). Používá se v různých formách (např. jako expandovaný polystyren nebo jako součást kopolymerů) a řadí se mezi velmi dobře zpracovatelné materiály. Díky své amorfní struktuře je transparentní a má lesklý povrch. Vyznačuje se velmi dobrou pevností a tvrdostí, ale také svou schopností být zvukovým, tepelným a elektrickým izolantem. Částečně odolává vlhkosti, některým chemickým látkám (např. slabým kyselinám), ale je poměrně hořlavý a má nízkou tepelnou odolnost. [3]

Kopolymer akrylonitril-butadien-styren (ABS) je široce rozšířeným amorfním termoplastem, který se vyznačuje velmi vysokou rázovou houževnatostí, pevností a tvrdostí. Vyrábí se polymerací styrenu a akrylonitrilu za přítomnosti butadienu. Přítomností podílů jednotlivých složek je možné upravovat jeho vlastnosti dle požadavků. Velmi dobré mechanické vlastnosti předurčují tento materiál pro výrobu různých krytů, u kterých hrozí riziko mechanického poškození. Pro své dobré izolační vlastnosti, rozměrovou stabilitu a odolnost vůči vlhkosti však nachází uplatnění pro široké spektrum aplikací, zejména pak v automobilovém průmyslu. [3]

Polyvinylchlorid (PVC) je semikrystalický termoplast, který je charakteristický pro svoji odolnost vůči korozi, dlouhou životnost a snadnou zpracovatelnost. Je typický i pro své velmi dobré těsnící a izolační vlastnosti. [3]

Dalším zástupcem amorfních termoplastů je polymethylmetakrylát (PMMA). Tento materiál je využíván pro aplikace, kde se vyžaduje transparentnost, vysoká odolnost vůči UV záření a mechanická pevnost. [3]

Jedním z nejvýznamnějších konstrukčních materiálů je semikrystalický termoplast polyamid. Polyamid je vhodný pro téměř veškeré konstrukční aplikace. Vyznačuje se vysokou mechanickou pevností, otěruvzdorností, tvrdostí a tepelnou stabilitou. Velmi často se používá polyamid vyztužený skelnými vlákny případně v kombinaci s jinými termoplasty (např. polyetylenem). [3]

1.5 Smrštění a degradace

Každý materiál se s rostoucí teplotou vlivem teplotní roztažnosti rozpíná. Po ochlazení na původní teplotu se však vrací zpět k původnímu objemu. U termoplastických materiálů, vlivem aplikace tlaku, dochází k jejich značnému stlačení, a tedy ke zmenšení objemu. Tento pokles objemu dosahuje až 2 % a závisí na velikosti aplikovaného tlaku. [4]

Smrštění lze pochopit jako objemovou změnu při tuhnutí taveniny polymerního materiálu, jejíž elementární příčinou je stlačitelnost a tepelná dilatace (u semikrystalických termoplastů). Tyto dvě příčiny si vzájemně odporují, protože během vstřikování je dávka materiálu jednak ve formě taveniny a rozpíná se, ale jednak je během vstřikování aplikován vysoký tlak, který objem dávky zmenšuje. Z tohoto důvodu je častokrát velmi obtížné predikovat skutečné hodnoty smrštění. [4]

Smrštění je ovlivněno mnoha faktory. Mezi ty nejdůležitější se řadí zejména:

- typ vstřikovaného materiálu,
- aditiva a plniva vstřikovaného materiálu,
- teplota taveniny a chlazení,
- vstřikovací tlak,
- vyhazovací teplota. [4]

Znalost hodnot smrštění je velmi důležitá pro optimální konstrukci vstřikovací formy, protože se na jejich základě zvětšuje tvarová dutina. Hodnoty smrštění jsou udávány výrobcem materiálu v určitém rozpětí (běžné 0 až 5 %). U krystalických termoplastů jsou hodnoty smrštění výrazně vyšší než u amorfních plastů. Plněné termoplasty pak vykazují mnohem nižší smrštění než jejich neplněné verze. Z hlediska vstřikovacího procesu dochází k vyhození při nejvyšší bezpečné (z hlediska rizika mechanického poškození) vyhazovací teplotě. Výstřik má tendenci smršťovat se i mimo vstřikovací formu. [4]

Důležitou roli hrají i další faktory, jako např. tvar výstřiku. Rozdílné tloušťky stěn mohou způsobit nerovnoměrné ochlazování výstřiku což může mít zásadní dopad na tvorbu zkroucenin, propadlin nebo dutin. Na smrštění má vliv také směr toku taveniny, přičemž ve směru toku je hodnota smrštění zpravidla vyšší. Smrštění lze snížit zvýšením dotlaku, prodloužením dotlakové fáze, nižší teplotou vstřikovací formy nebo zvýšením teploty polymerní taveniny. Z hlediska konstrukce vstřikovací formy je žádoucí využití simulačních softwarů pro predikci oblastí s vysokým potenciálem smrštění. Na základě těchto údajů lze pak různě modifikovat nástroj ještě před samotnou výrobou a zamezit tak vzniku vad a nepřesností (např. úpravou temperačního systému nebo tvaru výstřiku). [4]

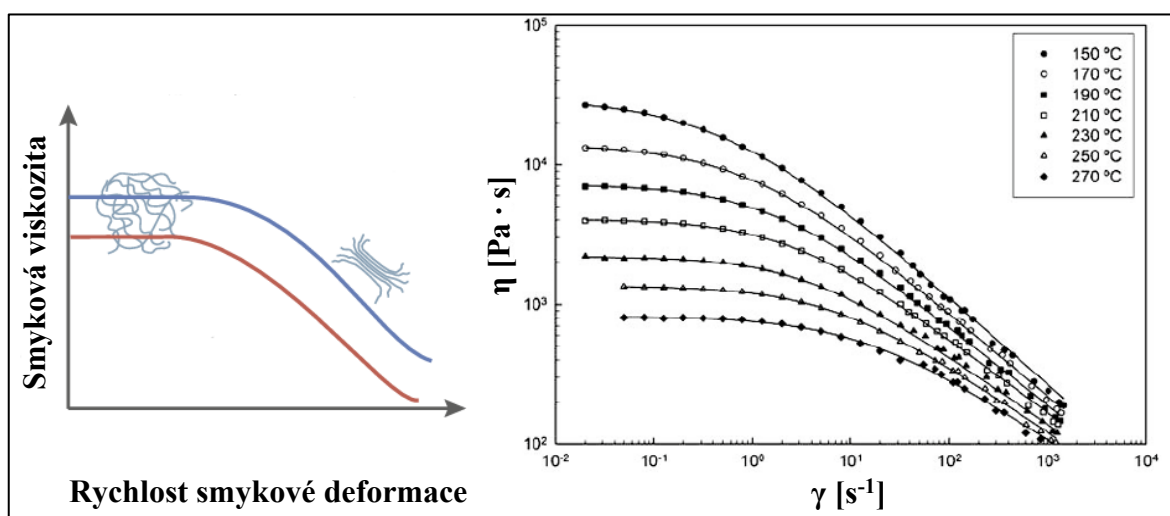
Degradací se rozumí proces, jehož důsledkem je snížení fyzikálních, chemických nebo tepelných vlastností zpracovávaného materiálu. Během vstřikování k tomu dochází obvykle v důsledku vlhkosti (při kontaktu materiálu s vodou), tepla, smykového namáhání nebo času.

Většina materiálů degraduje především tehdy, jsou-li vystaveny velkému smykovému namáhání, anebo teplotě vyšší, než je jejich teplota tání (případně velmi dlouhou dobu teplotě tání). V optimálním případě by měl být materiál ve formě taveniny co nejkratší možnou dobu. [4]

1.6 Tok polymerních tavenin

Pro pochopení toku polymerní taveniny vtokovým systémem nebo tvarovou dutinou vstřikovací formy je nutné porozumět viskóznímu chování polymerů. Polymerní taveniny spadají mezi neneutonské (pseudoplastické) látky, u kterých smyková viskozita klesá s rostoucí rychlostí smykové deformace. Jejich tok nejlépe popisuje mocninový zákon. [4]

Tokové vlastnosti polymeru se vyjadřují experimentálně pomocí měření na výtlačných reometrech normovanou zkouškou, která je označována jako ITT – index toku taveniny. Tato zkušební metoda udává množství taveniny v gramech (nebo cm^3), které lze protlačit skrze definovaný otvor při jasně definovaných podmínkách (velikost průřezu kapiláry, teplota a zatížení) za 10 minut. Výsledky se zobrazují do tokových křivek. Toková křivka popisuje závislost naměřených smykových viskozit na rychlosti smykové deformace, přičemž zásadní vliv má i teplota. ITT představuje právě jeden bod na tokové křivce. Rychlost smykové deformace je definována jako míra změny rychlosti polymerní taveniny vzhledem ke změně velikosti průřezu kanálu. Rychlost smykové deformace výrazně roste se zvyšujícím se objemovým průtokem a výrazněji pak při zmenšení průřezu kanálu (kritickým místem z pohledu konstrukce vstřikovacích forem bývá zejména oblast vtokového ústí). [4]

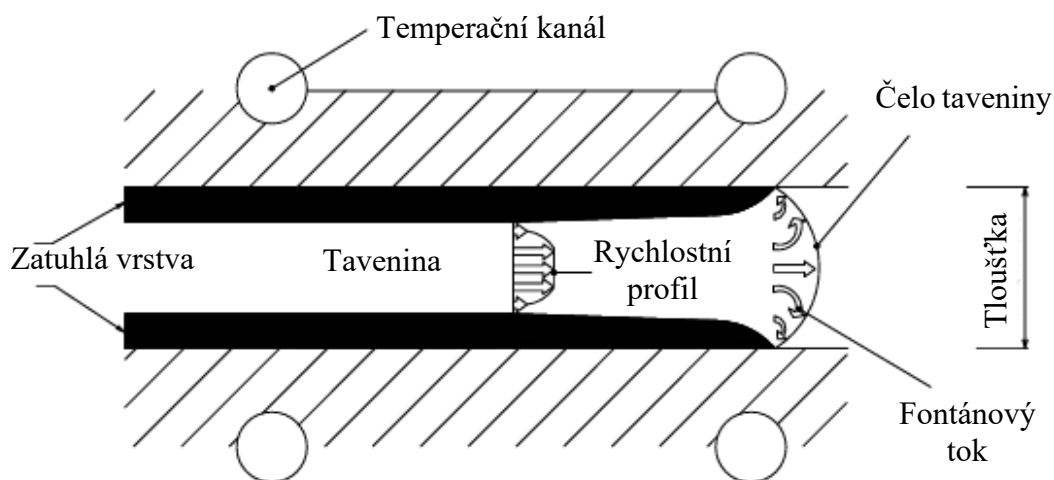


Obrázek 1 Příklad tokových křivek pro polymerní materiály [4]

modrá křivka – polymer s nižší teplotou, hnědá křivka – polymer s vyšší teplotou

1.6.1 Fontánový tok

Polymerní taveniny tečou v průběhu vstřikování fontánovým typem toku, což znamená, že rychlost taveniny uprostřed je vyšší než na stěně. Právě na stěně má materiál nejvyšší rychlost smykové deformace a působí zde nejvyšší smykové napětí, což má za následek výraznou změnu jeho viskozity. Značný dopad na proudění taveniny (z hlediska tvorby zatuhlých vrstev) má temperační systém (u studených vtokových systémů). Na obrázku 2 je znázorněn tento typ toku uvnitř vtokového systému. [4]



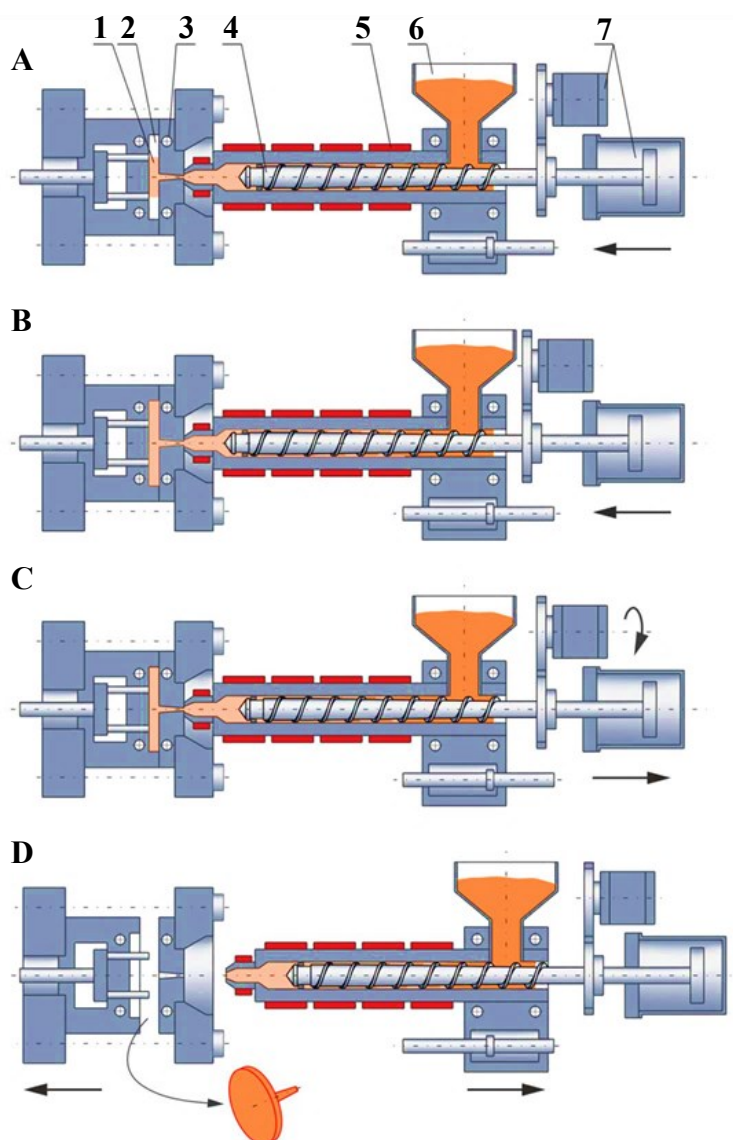
Obrázek 2 Fontánový tok [4]

Fontánový tok může způsobovat nerovnoměrné plnění (tvorbu preferenčních toků), a to zejména v rozvodných kanálech rozdílných velikostí průřezů nebo přímo v dutině vstřikovací formy. V místech s neregulární tloušťkou stěny má tavenina tendenci téct cestou nejmenšího odporu vůči tečení. S rostoucím počtem větví vtokového systému se nerovnoměrnost plnění umocňuje. [4]

2 VSTŘIKOVÁNÍ POLYMERŮ

Vstřikování je nejuniverzálnějším a nejpoužívanějším výrobním procesem pro výrobu výrobků z polymerních materiálů. Mezi výhody patří zejména možnost výroby výrobků komplexních tvarů, krátké výrobní cykly, vysoká kvalita a jakost výstřiků, vysoká opakovatelnost a minimální potřeba dokončovacích úprav. Nevýhodou je však poměrně vysoká cena a složitost vstřikovací formy. [5]

2.1 Vstřikovací cyklus



Obrázek 3 Vstřikovací cyklus [6]

A – vstřikování, B – dotlak, C – plastikace, D – otevření formy a vyhození výstřiku

1 – výstřik, 2 – dutina vstřikovací formy, 3 – temperační kanály, 4 – šnek,

5 – topné elementy, 6 – násypka, 7 – pohon šneku

Vstřikování je cyklický proces, při kterém jsou z polymerního materiálu vyráběny výstřiky. Principem je zplastikování polymerního materiálu (nejčastěji ve formě granulátu) v pracovním válci vstřikovacího stroje, homogenizace taveniny a její následné vstříknutí vysokým tlakem, jež je vyvozen axiálním pohybem šneku, do dutiny vstřikovací formy. Po jejím vyplnění následuje ochlazení na vyhazovací teplotu, otevření vstřikovací formy a vyhození výstřiku. Polymer je taven jednak působením topných systémů vstřikovacího stroje, ale jednak také vlivem disipace (přeměny mechanické energie na tření). [6]

Celý vstřikovací proces je popsán do čtyř hlavních fází, z nichž má každá zcela zásadní vliv na stav a kvalitu výstřiku. [6]

2.1.1 Plastikační fáze

Vstřikovací cyklus začíná uzavřením vstřikovací formy a plněním násypky vstřikovacího stroje polymerním materiálem ve formě granulátu, přičemž granule mají nejčastěji kulovitý, válcovitý nebo čočkovitý tvar. Z násypky je materiál přiváděn ke šneku vstřikovací jednotky. V této části šnek koná rotační pohyb a posouvá materiál v pevném stavu dopředu prostřednictvím závitování šneku uvnitř vyhřívaného válce. Během tohoto procesu je materiál plastikován, homogenizován a kompresován. Jakmile je roztavený materiál dopraven na špičku šneku před vstřikovací trysku, šnek koná zpětný axiální pohyb proti hydraulickému protitlaku, což umožňuje nashromáždit dávku odpovídajícího objemu pro zaplnění dutiny vstřikovací formy. Při dosažení požadované dávky přestane šnek rotovat, plastikační fáze je u konce a začíná vstřikovací fáze. [7]

2.1.2 Vstřikovací fáze

Po ukončení plastikační fáze se šnek začne axiálně posouvat vpřed řízenou rychlostí nebo tlakem a působí jako píst, který vytlačuje taveninu z plastikační jednotky. Během vstřikovací fáze je tavenina dopravována skrze trysku a vtokový systém do tvarové dutiny vstřikovací formy. Prvním krokem této fáze je plnění, které musí probíhat dostatečně rychle, aby nedocházelo k předčasnému ochlazení a zatuhnutí taveniny. Rychlost čela proudící taveniny musí být v průběhu celého průřezu rovnoměrná, čímž se zajistí homogenní zaplnění tvarové dutiny vstřikovací formy. Plnění trvá až do jejího úplného vyplnění. [7]

Ztuhlý polymer uvnitř dutiny vstřikovací formy má nižší specifický měrný objem než vstřikovaná tavenina, a proto je během plnění vysokým tlakem vstřikováno větší množství taveniny kompenzující materiálové smrštění (komprese). Po vstříknutí dostatečného

množství taveniny následuje ve většině případů dotlak (hodnota dotlaku je zpravidla menší, než je tlak uvnitř dutiny vstřikovací formy). [7]

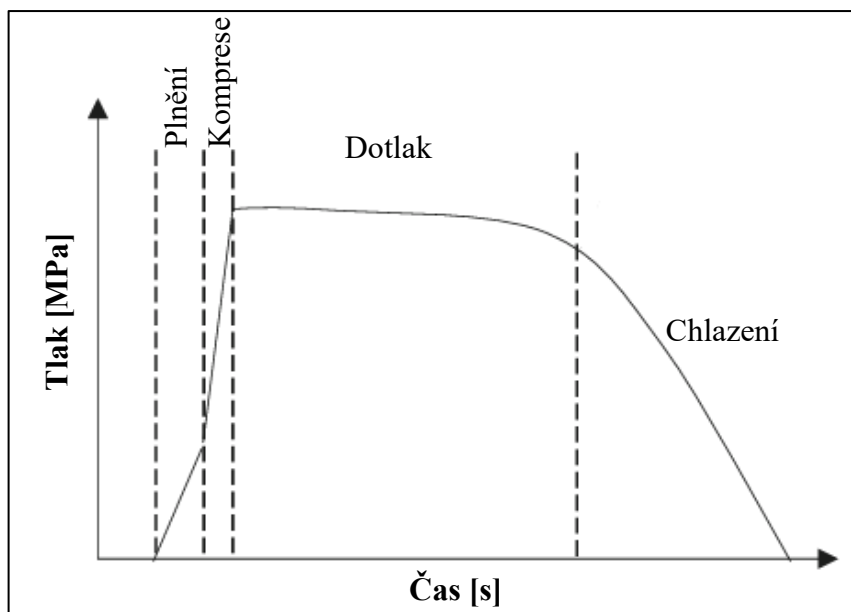
2.1.3 Dotlaková fáze

Během dotlakové fáze se tlak změní na 80–90 % hodnoty vstřikovacího tlaku a klesne i vstřikovací rychlost. Přepnutí na dotlak musí být plynulé, aby nedošlo k výrazným tlakovým změnám. Při zatuhnutí vtokového ústí dotlaková fáze končí a vstřikovací jednotka odjíždí od vstřikovací formy. V důsledku odjezdu vstřikovací jednotky nastává uvnitř dutiny vstřikovací formy pokles tlaku a zároveň klesá i teplota materiálu. [7]

2.1.4 Fáze chlazení

Následuje nejdelší část vstřikovacího procesu, která pokrývá až 60 % z celého vstřikovacího cyklu – chlazení. Ve skutečnosti ochlazování výstřiku začíná již během vstřikovací fáze a trvá až do vyhození výstřiku ze vstřikovací formy. Z hlediska chlazení je zásadní teplota povrchu vstřikovací formy a doba ochlazování. Doba ochlazování musí být bezpečně dlouhá, aby bylo zajištěno vyhození výstřiku bez poškození. Zbytečně dlouhá doba ochlazování má za důsledek zvýšení energetické náročnosti výroby. [7]

Fáze vstřikovacího cyklu lze charakterizovat závislostmi tlaku na čase v průběhu vstřikovacího cyklu v různých polohách (např. u vstřikovací trysky nebo v blízkosti vtokového ústí). Tyto závislosti se liší dle toho, zda se jedná o amorfnní nebo semikrystalický polymer. [8]



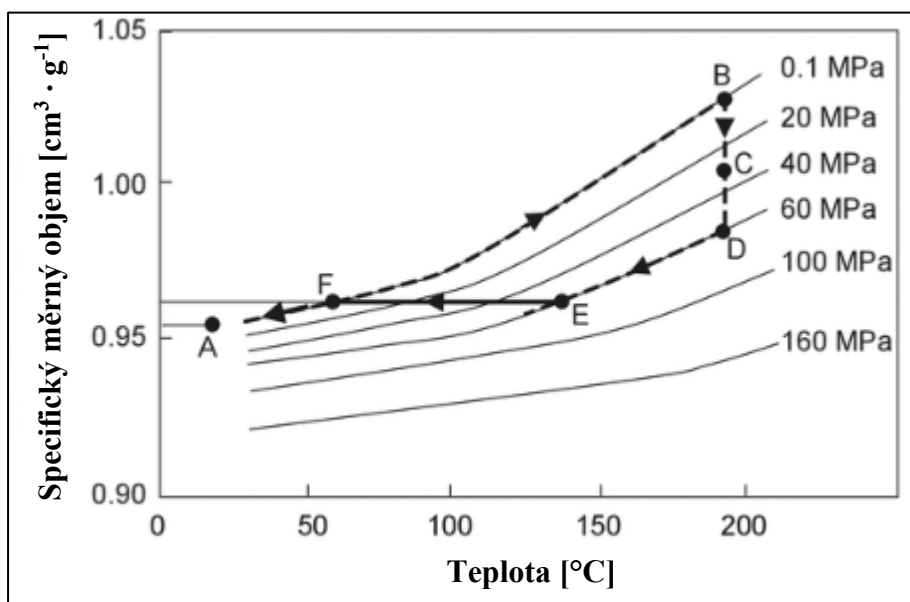
Obrázek 4 Průběh tlaku v dutině vstřikovací formy [8]

Na obrázku 4 je zobrazen typický průběh tlaku v závislosti na čase v dutině vstřikovací formy. Plnění trvá desetiny až několik sekund. Na šnek je přitom vyvíjen značný tlak. Následuje komprese taveniny v dutině vstřikovací formy, přičemž prudce roste tlak a tavenina homogenizuje. Tato fáze trvá přibližně desetinu sekundy. [8]

Během dotlaku je udržován konstantní tlak. Jeho délka závisí na tloušťce stěny výstřiku a délce chlazení (obvykle dotlak netrvá déle než 10 sekund). Po zatuhnutí materiálu v oblasti vtokového ústí začne tlak prudce klesat a začíná chlazení. Délka této fáze opět závisí na tloušťce výstřiku (většinou v řádu jednotek nebo několika desítek sekund). [8]

2.2 Průběh tlaku, měrného objemu a teploty během vstřikování

Průběh vstřikovacího procesu lze sledovat na křivkách v pvT diagramu. Tyto křivky zobrazují změnu specifického objemu (inverzní hodnoty hustoty) v závislosti na teplotě, a to pro různě aplikované tlaky. Je možné pozorovat jednak kompresibilitu (změnu objemu v závislosti na tlaku), ale jednak také tepelné chování (změnu objemu v závislosti na změně teploty). Na základě pvT diagramu lze určit smrštění a následně i deformace při simulačních výpočtech, a zvolit vhodné nastavení technologických podmínek pro vstřikování. Na obrázku 5 jsou zobrazeny typické křivky pro amorfnní polymer. [8]



Obrázek 5 pvT diagram vstřikování [8]

V pvT diagramu jsou jednotlivé fáze vstřikovacího cyklu popsány následovně:

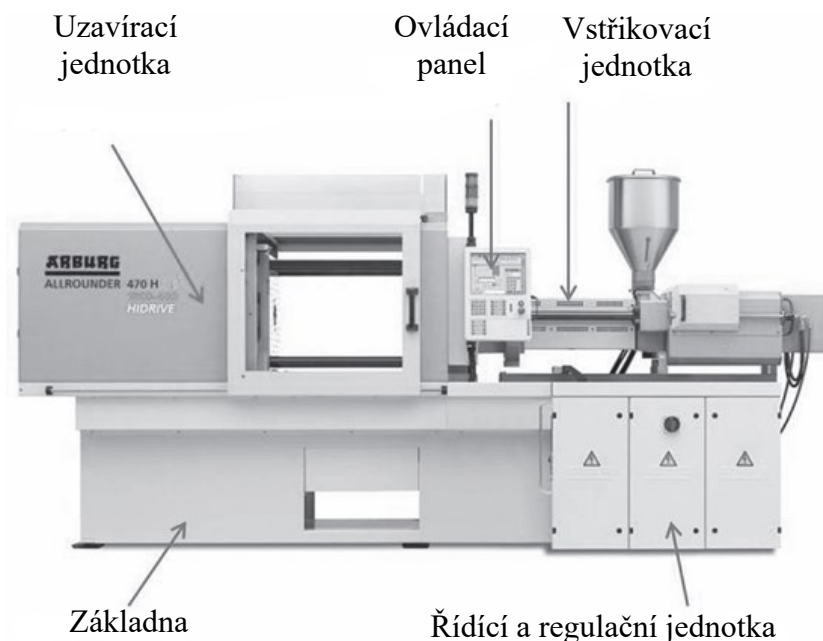
- Bod A-B (plastikace): příprava dávky pro vstřikovací cyklus při relativně nízkém tlaku (je předpokládán atmosférický tlak).

- Bod B: v tomto okamžiku je zhomogenizovaná tavenina stlačována šnekem.
- Bod B-C (plnění): dutina vstřikovací formy je objemově plněna taveninou.
- Bod C: dutina vstřikovací formy je kompletně zaplněna taveninou.
- Bod C-D (komprese): tavenina je stlačována do dutiny vstřikovací formy a začíná její ochlazování. Během komprese je dosažen maximální tlak.
- Bod D: přepnutí na dotlak.
- Bod D-E (dotlak): průběh při konstantním tlaku za účelem kompenzace materiálového smrštění.
- Bod E: vtokové ústí je zamrzlé. Dutina vstřikovací formy již nepojme další taveninu.
- Bod E-F (izochorické chlazení): výrazné snížení tlakového působení při konstantním objemu výstřiku. Předpokládá se kompletní vyplnění dutiny vstřikovací formy.
- Bod F: uvnitř vstřikovací formy je hodnota tlaku na úrovni atmosférického. Povrch výstřiku se odděluje od stěn dutiny vstřikovací formy. Výstřik je zatuhnutý v celém objemu jeho teplota je na úrovni vyhazovací teploty. Vyhození výstřiku ze vstřikovací formy.
- Bod F-A (ochlazení na teplotu okolí): mimo vstřikovací formu probíhá další chlazení výstřiku. Výstřik nabývá v podstatě finálního rozměrového i tvarového stavu (projevuje se celkové smrštění). [8]

2.3 Vstřikovací stroj

Vstřikovací stroj je výrobní zařízení pro zpracování polymerních materiálů prostřednictvím technologie vstřikování. Vstřikovací stroj se skládá ze tří hlavních částí:

- vstřikovací jednotky,
- uzavírací jednotky,
- řídicí a regulační jednotky. [9]



Obrázek 6 Vstřikovací stroj [9]

Vstřikovací stroj se vyrábí v horizontální, vertikální nebo hybridní konfiguraci. U horizontálního vstřikovacího stroje jsou vstřikovací i upínací jednotka uspořádány horizontálně. Běžně je uzavírací jednotka na levé straně vstřikovacího stroje. Horizontální konfigurace je výhodná pro snadnou automatizaci vyhazování výstřiků, nízkou výšku, snadnou montáž či demontáž vstřikovací formy, snadnou regulaci a údržbu topných pásem a vstřikovací trysky, vysokou produktivitu spojenou především s možností rychlého a plynulého otevírání vstřikovací formy. [7]



Obrázek 7 Vertikální vstřikovací stroj [7]

Na obrázku 7 je zobrazen vertikální vstřikovací stroj, který se vyznačuje vertikální konfigurací vstřikovací i upínací jednotky. Obvykle je upínací jednotka umístěna ve spodní části vstřikovacího stroje. Tyto zařízení se s oblibou používají pro stabilní a přesné vstřikování insertů, je-li vyžadována úspora místa a taky při použití větších vstřikovacích forem z důvodu jejich jednodušší montáže ve vertikálním směru. [7]

Hybridní konfigurace se používají za účelem kombinace výhodných vlastností, přičemž běžné složení stroje sestává z jedné upínací a vstřikovací jednotky. V určitých případech (vícekomponentní vstřikování) může být součástí více vstřikovacích jednotek. [7]

Dále je možné rozlišovat vstřikovací stroje na základě typu pohonu, který zajišťuje pohyb v hlavních osách, a to do následujících skupin:

- hydraulické stroje (výkon elektromotoru je přenášen nepřímo prostřednictvím hydraulického systému),
- elektrické stroje (využívají výkonu elektromotoru přímo k pohonu šneku, převodů a dalších systémů),
- hybridní stroje. [7]

U hydraulických strojů je výkon elektromotoru přenášen nepřímo prostřednictvím hydraulického systému. Elektrické stroje využívají výkonu elektromotoru přímo k pohonu šneku, převodů a dalších prvků. Nejběžnějším pohonem je hydraulický. Elektromotor pohání hydrogenerátor, který cirkuluje hydraulickou kapalinu v okruhu a ovládá regulační ventily tlaku a průtoku, kterými jsou ovládány veškeré prvky vstřikovacího stroje. [7]

Poslední dobou se trend přesouvá k elektricky poháněným strojům. Ty jsou výhodné především v malých nebo středních konfiguracích. Obsahují několik nezávislých servomotorů, které slouží k rychlému a přesnému ovládání všech systémů vstřikovacího stroje. Mezi výhody elektrických vstřikovacích strojů patří zejména nižší spotřeba energie, absence hydraulické kapaliny, ekologická nezávadnost, nižší hlučnost a rázovitost, vysoká rychlost a přesnost polohování. Nevýhodou je možnost přetížení vstřikovacího stroje při provozu na maximální výkon. [7]

2.3.1 Vstřikovací jednotka

Vstřikovací jednotka musí zajistit dokonalou plastikaci polymerního materiálu do stavu homogenní taveniny a její následné vysokotlaké vstříknutí do dutiny vstřikovací formy. [9]



Obrázek 8 Vstřikovací jednotka s násypkou [9]

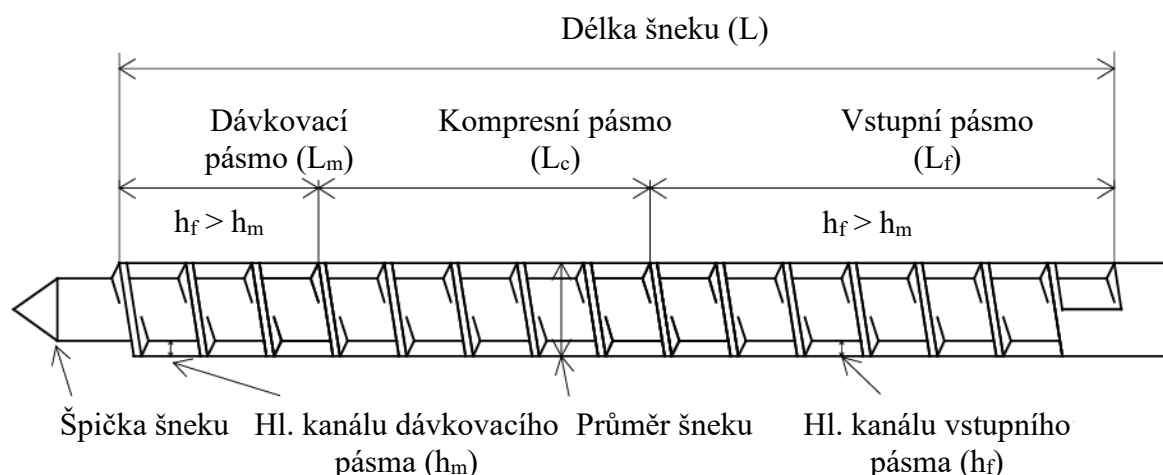
Vstřikovací jednotky se dle způsobu plastikace dělí do dvou skupin:

- vstřikovací jednotky bez předplastikace (plastikace probíhá přímo v pracovním válci vstřikovacího stroje),
- vstřikovací jednotky s předplastikací (plastikace probíhá odděleně v plastikační jednotce a homogenní tavenina je následně dopravována do pracovního válce vstřikovacího stroje). [7]

Dále lze vstřikovací jednotky dělit dle pracovního členu na:

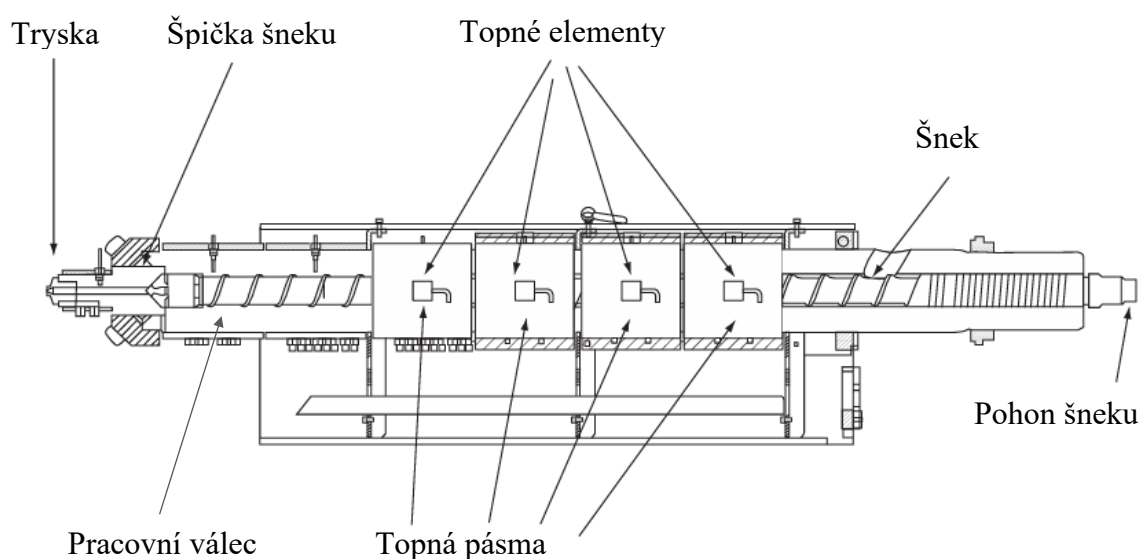
- pístové vstřikovací jednotky,
- šnekové vstřikovací jednotky. [7]

Nejpoužívanějším typem vstřikovací jednotky je šneková vstřikovací jednotka bez předplastikace. Šnek je uložen v ložiscích tak, aby mohl konat rotační i posuvný pohyb. Šnek umožňuje materiál současně plastikovat i dávkovat, přičemž nedochází ke stagnaci a úniku již připravené taveniny. Největší výhodou je schopnost vytvářet vysoce homogenní taveninu mícháním. Smykové působení šneku navíc značně snižuje materiálovou viskozitu a usnadňuje jeho zpracovatelnost. Mezi další výhody lze zařadit např. jednodušší čištění vstřikovací jednotky a menší náchylnost polymeru k degradaci. [7]



Obrázek 9 Šnek vstříkovací jednotky

Šnek se skládá ze vstupního, kompresního a dávkovacího pásma. Vstupní zóna slouží k předehřevu granulátu a jeho dopravě do kompresního pásma. Zde se granule začínají působením smykového namáhání šneku a tepla z topných elementů tavit. V dávkovacím pásmu je míchána homogenní tavenina. Ke kompresi dochází rozdílem hloubek kanálů v jednotlivých pásmech. U vstříkovacích šneků je kompresní poměr (poměr mezi výškou kanálu vstupního a dávkovacího pásma) běžně udáván v rozmezí 1,8 až 2,2. Poměr délky šneku vůči jeho průměru (L/D) se pak pohybuje v rozmezí 18 až 22. Obecně platí, že při vyšších poměrech (L/D) má šnek vyšší účinnost tavení a míchání. Základními požadavky na šnek jsou: vysoká plastikační schopnost, homogenizace a míchání taveniny, odplyňování pracovního válce a vysoká odolnost vůči opotřebení a korozi. [7; 9]



Obrázek 10 Schéma šnekové vstříkovací jednotky [9]

Materiál ve formě polymerního granulátu vstupuje do násypky vstřikovací jednotky. Násypka musí být navržena tak, aby nevznikaly mosty a umožňovala gravitační dopravu materiálu do pracovního válce. Doprava materiálu musí být rovnoměrná. V násypce mohou být obsaženy magnety, které slouží k zachytávání kovových nečistot. Násypka se častokrát doplňuje o síta, která zabraňují vniku velkých částic, jež by mohly způsobit ucpání. [7; 9]

Po průchodu násypkou pokračuje materiál do pracovního válce. Na obrázku 9 je zobrazeno jednoduché schéma šnekové vstřikovací jednotky. Pracovní válec je složen z několika samostatně řízených topných pásem. V pracovním válci je materiál šnekem plastikován, homogenizován a dopravován před špičku šneku. Teplo, které zajišťuje tavení materiálu, je generováno jednak topnými elementy, ale také disipací (mechanická energie smykového působení šneku na materiál se mění na tření). Šnek koná rotační pohyb a zároveň se axiálně posouvá směrem vzad, čímž vytváří prostor pro nahromadění taveniny. Následuje vstřikování taveniny skrze vstřikovací trysku do dutiny vstřikovací formy. U materiálů, jejichž viskozita není příliš vysoká hrozí, že se bude jejich tavenina vracet zpět do šnekového kanálu. Proto je čelo šneku opatřeno zpětným uzávěrem (ventilem). Ten jednak zajišťuje vyvození vysokých vstřikovacích tlaků, ale jednak dostatečně dlouhou dobu setrvání taveniny ve šnekovém kanálu. [7; 9]

Mezi základní zvažované parametry při výběru vstřikovací jednotky patří:

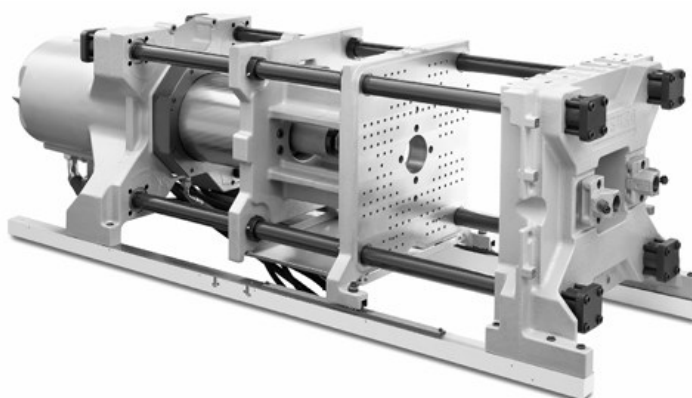
- průměr šneku a jeho poměr ku délce (L/D),
- objem vstřikované dávky (celkové množství objemu materiálu, které lze vstříknout do dutiny vstřikovací formy během jednoho vstřikovacího cyklu),
- rychlost plastikace,
- plastikační kapacita (maximální množství materiálu, které lze zplastikovat během jednoho vstřikovacího cyklu),
- tryska vstřikovací jednotky. [7; 9]

2.3.2 Uzavírací jednotka

Uzavírací jednotka slouží k upnutí a manipulaci vstřikovací formy a umožňuje zejména její přesné a plynulé otevírání či uzavírání. Toho je docíleno uzavíracím ústrojím. Klíčovým parametrem je velikost vyvozené uzavírací síly, tedy maximální síly, kterou vyvine uzavírací jednotka na vstřikovací formu, aby ji udržela uzavřenou během vstřikovacího cyklu. [9]

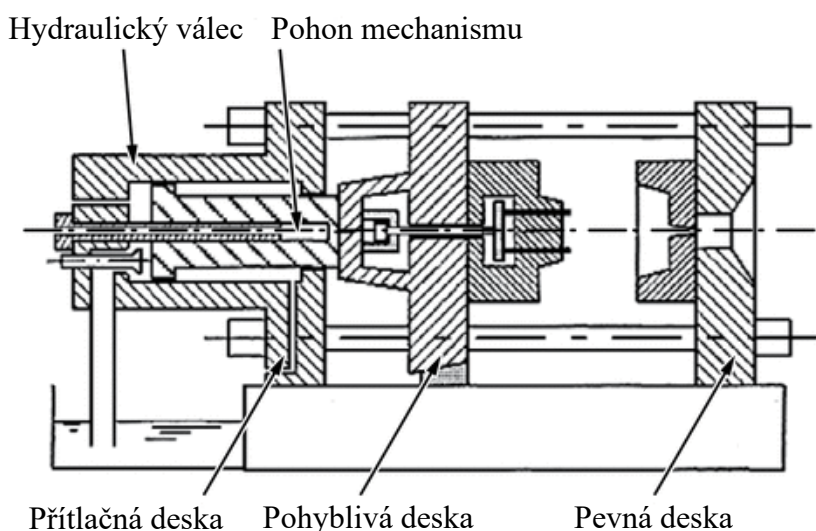
Úkolem uzavírací jednotky je taky ochrana vstřikovací formy před poškozením. Vedení vstřikovací formy musí být přesně osově středěné během jakéhokoliv pohybu. V případě špatného lícování obou polovin vstřikovací formy by mohlo dojít k nežádoucímu opotřebení až dokonce poškození dělicí roviny. [9]

Uzavírací jednotky se dělí dle druhu pohonu uzavíracího ústrojí na hydraulické, hydraulicko-mechanické a elektromechanické. Na obrázku 11 je zobrazena hydraulická uzavírací jednotka. Běžným konstrukčním konceptem je pevná deska, jež je připevněna ke vstřikovacímu stroji čtyřmi vodícími tyčemi, které ji spojují s pohyblivou deskou [9]



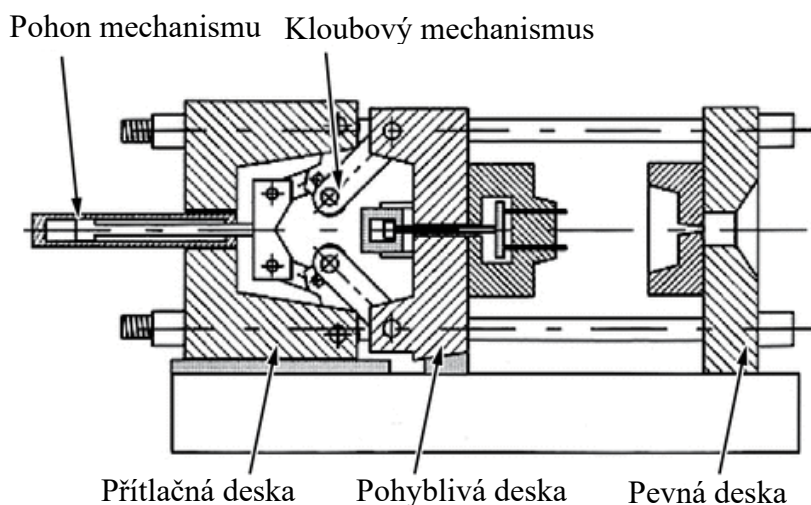
Obrázek 11 Uzavírací jednotka [9]

Na obrázku 12 je zobrazena přímá hydraulická uzavírací jednotka. Hydraulický válec posouvá pohyblivou desku, dokud nedosáhne zdvihem pevné desky. Toto uspořádání je výhodné pro svoji jednoduchost. Pro vyvození velkých uzavíracích sil je však potřeba velkých průměrů hydraulického válce. [9; 10]



Obrázek 12 Schéma hydraulické uzavírací jednotky [10]

Na obrázku 13 je zobrazena hydraulická uzavírací jednotka s kloubovým mechanismem. Jedná se o dvě kovové tyče spojené kloubem. Jeden konec je připevněn k pevné desce a druhý k pohyblivé desce. Při plném otevření vytváří „V“ konfiguraci, během uzavření jsou tyče napřímené. Pro vyvození velkých uzavíracích sil stačí menší hydraulický válec a také samosvornost při kompletním vysunutí. Nevýhodou je obtížnější regulace rychlosti uzavírání a uzavírací síly. Navíc je nutné nastavovat polohování kloubového mechanismu dle hloubky vstřikovací formy pro plné vysunutí. [9; 10]



Obrázek 13 Hydraulická uzavírací jednotka s kloubovým mechanismem [10]

V případě elektromechanické uzavírací jednotky je koncept obdobný hydraulické uzavírací jednotce s kloubovým mechanismem. Rotační pohyb je vyvozen elektrickým servomotorem a dále přenášen na kuličkový šroub prostřednictvím řemenových převodů a převáděn na lineární pohyb kloubového mechanismu. Mezi hlavní výhody patří konstrukční jednoduchost, vysoká uzavírací rychlost a snadná automatizace pracovního cyklu či nižší energetická náročnost. [9; 10]

Volba vhodné uzavírací jednotky je dána následujícími faktory:

- velikostí vstřikovací formy (rozměry, středění, vyhazovací systém, hmotnost),
- průmětem plochy výstřiku (semikrystalické materiály vyžadují větší uzavírací sílu),
- tloušťkou stěny a materiálem výstřiku. [9]

2.3.3 Řídící a regulační jednotka

Ovládání vstřikovacích strojů je dnes již elektronické s využitím mikroprocesorů. Z pohledu přímého ovládání vstřikovacího stroje je důležitý jeho ovládací panel. Jedná se o obrazovku,

na které obsluha může nastavovat procesní podmínky a také sledovat jejich aktuální hodnoty v průběhu celého procesu. [7; 10]

Regulační jednotka využívá řídicích a regulačních prvků, které zpracovávají všechny sledované parametry ze senzorů vstřikovacího stroje a umožňují jejich zpětnou regulaci pomocí regulátoru. Regulátor měří skutečnou hodnotu v systému a současně ji porovnává s hodnotou nastavenou obsluhou vstřikovacího stroje. Použití řídicích a regulačních systémů zvyšuje kvalitu celého procesu především pro tyto důvody:

- jednoduché a rychlé nastavení parametrů procesu,
- kontrola funkce stroje,
- řízení a optimalizace procesu,
- sledování a možnost vyhodnocování všech provozních dat. [7; 10]

3 VADY VÝSTŘÍKŮ

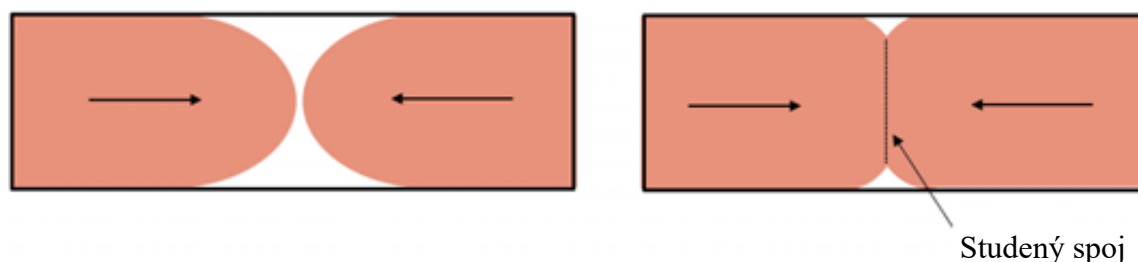
V průmyslové praxi se často vyskytuje významný podíl vadných výstřiků. Výskyt těchto vad nelze během vstřikovacího procesu zcela eliminovat. Za vadu se považuje jakákoli odchylka ve vzhledu, rozměrech či tvaru výstřiku od stanoveného standardu, který je definován výkresovou dokumentací, 3D modelem nebo referenčním vzorkem. Výrobní vady výstřiků lze obecně rozdělit do dvou základních skupin:

- Vady zjevné – jedná se o odchylky, které jsou vizuálně identifikovatelné. Mezi tyto vady spadají zejména deformace tvaru a povrchové defekty.
- Skryté vady – představují defekty, které nelze zjistit vizuální kontrolou, protože se nacházejí ve vnitřní struktuře materiálu. Výrazně zhoršují kvalitu výstřiku, zejména pak z hlediska jejich mechanické pevnosti, funkčnosti nebo životnosti. Jejich výskyt lze odhalit až vhodným zkušebním zařízením nebo laboratorními zkouškami. [1]

Jednou z příčin vzniku vad je vstřikovací proces a jeho parametry (z důvodu cyklického průběhu nelze zaručit dokonalou opakovatelnost). Dalším zdrojem vad může být např. volba materiálu, konstrukční řešení výstřiku (neodpovídající technologickým standardům), konstrukční řešení vstřikovací formy či zvolený vstřikovací stroj. [1] Většinu vad lze odstranit pouhou optimalizací vstřikovacího procesu, případně provedením konstrukčních úprav na výstřiku nebo vstřikovací formě. Mezi nejčastější vady patří stokové čáry, studené spoje, přetoky, neúplné výstřiky, stříbření, propadliny a spálená místa na výstřiku. [11]

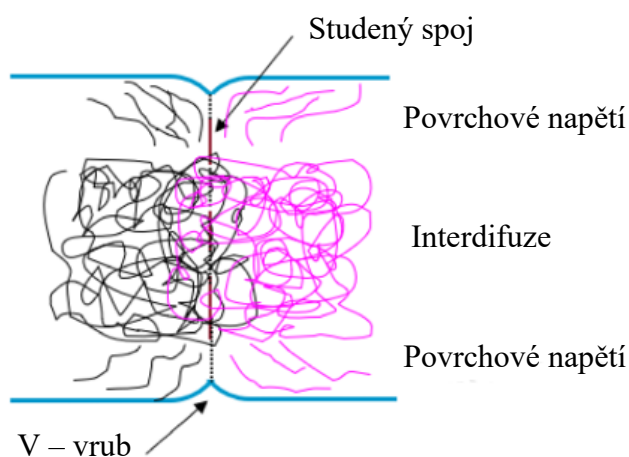
3.1 Studené spoje

Studené spoje vznikají během vstřikovací fáze při setkání dvou nebo více čel polymerní taveniny. Na obrázku 14 je zobrazen princip vzniku studeného spoje. Zaoblená čela proudů taveniny se dostanou do vzájemného kontaktu, zploští se a vytvoří studený spoj. V krajních oblastech vzniká V – vrub. Na povrchu výstřiku pak zůstane velmi jemná stopa. [12]



Obrázek 14 Vznik studeného spoje [12]

Při nárazu čel taveniny současně dochází k molekulární interdifuzi. Její vlastnosti závisí na viskozitě a rychlosti proudění taveniny, okamžité rychlosti při spojení taveniny, teplotě a tlaku taveniny. Během kolize se mění orientace molekul a vláken. [13; 14] U amorfních a semikrystalických polymerů je v oblasti vzniku studeného spoje lokálně zvýšena tuhost, ale zároveň snížena houževnatost. [15]



Obrázek 15 Oblast vzniku studeného spoje [12]

Vzniklé studené spoje mají za následek lokální zhoršení mechanických vlastností výstřiku v místě spojení. Rozdíly v těchto vlastnostech závisí na mnoha parametrech, mezi něž lze zařadit např. typ materiálu (případně jeho výztuže), materiálovou anizotropii, molekulární interdifuzi, procesní parametry a konstrukci výstřiku. [16; 17; 18]

Studené spoje zanechávají také vizuální defekt. Z hlediska počátečního návrhu je zcela zásadní znát místa, v nichž bude k tvorbě studených spojů docházet. Tato místa lze dobře predikovat s využitím simulačních softwarů. [19]



Obrázek 16 Studený spoj [19]

3.1.1 Způsob vzniku studených spojů

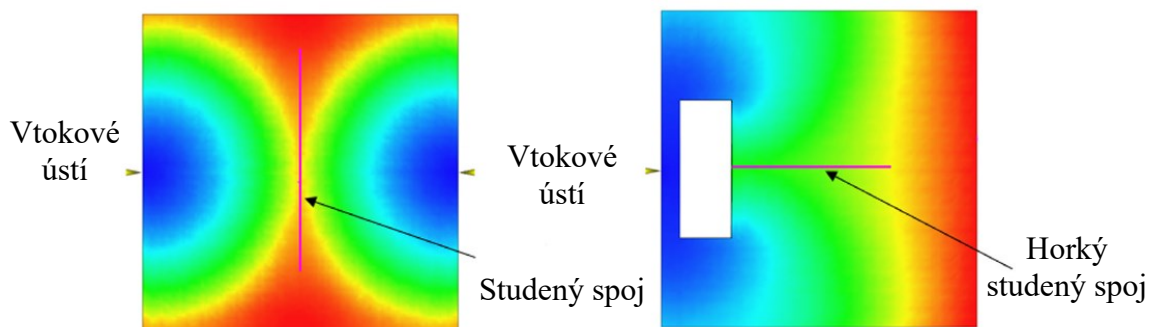
Studené spoje vznikají, když dochází k fontánovému toku taveniny. Studené spoje se na výstřicích mohou formovat v zásadě třemi způsoby, z nichž každý souvisí se způsobem toku polymerní taveniny tvarovou dutinou vstřikovací formy. [20]

- Prvním způsobem je vznik v důsledku obtékání překážky (jádra), kdy dochází k rozpojení souvislého taveninového proudu, jeho rozdělení na dva či více samostatných proudů a za překážkou k opětovnému spojení čel jednotlivých proudů a jejich ochlazení. Oblast spojení těchto čel se stává studeným spojem. [12; 21]
- Druhý způsob je velmi častý při nerovnoměrné tloušťce stěn výstřiku, kdy vznikají preferenční toky a plnění dutiny vstřikovací formy není rovnoměrné. Tavenina teče cestou nejmenšího odporu. Následně po spojení vzniká studený spoj. [21]
- Třetí způsob platí v případě, že je výstřik plněn více než jedním vtokovým ústím. Ve stykových místech jsou čela taveniny značně ochlazená a tvoří studený spoj. [21]

3.1.2 Typy studených spojů

Pokud je úhel proudění spojujících se čel taveniny menší než 135° , vzniká studený spoj. V opačném případě se jedná o horký studený spoj. [22; 23]

Studený spoj se obvykle vyskytuje u kruhových nebo tvarově složitých geometrií výstřiků a také u výstřiků, kde dochází k plnění více vtoky. Materiál po vzniku spoje přestává proudit. Vyznačuje se nižším stupněm makromolekulární orientace řetězců, náhodnou orientací vláken (u plněných materiálů) a vyšším povrchovým napětím. Z těchto důvodů je spoj velmi málo pevný a vizuálně velmi výrazný. [23; 24; 25] Horký studený spoj se vyznačuje tím, že i po setkání svou paralelních čel taveniny a vytvoření spoje tavenina pokračuje v toku dál. Vliv povrchového napětí je zde minimální. [24; 25]



Obrázek 17 Typy studených spojů [12]

Na obrázku 16 jsou zobrazeny typy studených spojů. Studený spoj má minimální úhel vprostřed jednotlivých čel taveniny. Směrem k povrchu se tento úhel zvětšuje. U horkého studeného spoje je minimální úhel bezprostředně za překážkou a s rostoucí vzdáleností od překážky se zvětšuje. [22; 26]

3.1.3 Význam hodnocení kvality studených spojů

Studené spoje patří mezi velmi významné vady, které není možné zcela odstranit, ale pouze minimalizovat. Je proto nezbytné hodnotit jejich kvalitu v závislosti na požadavcích konečného použití jednak z hlediska vizuálního, ale jednak také funkčního. [27; 28; 29]

U výstřiků, které nebyly primárně určeny pro konstrukční aplikace, studené spoje dříve představovaly především vizuální problém. Na základě povrchové úpravy a velikosti studeného spoje byly tyto výstřiky poté vyřazovány. Stopy studených spojů jsou výrazné zejména na výstřicích z transparentních materiálů. Na barevných materiálech se studené spoje projevují tmavším zabarvením. Častokrát jsou pak i přítomny stopy znázorňující proudění taveniny a orientace struktury vláken. [30]

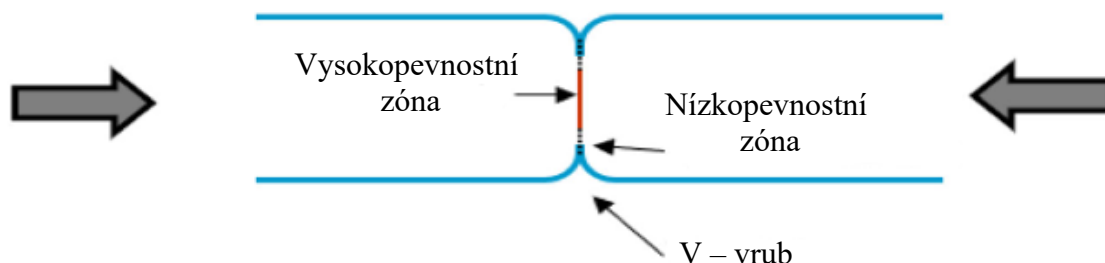
S ohledem na funkční hledisko výstřiku patří oblast studeného spoje mezi kritická místa, protože se zde mění mechanické vlastnosti materiálu. Tyto oblasti se pak vyznačují nízkou tuhostí, pevností a hrozí zde porušení. Horší mechanické vlastnosti v této oblasti jsou pak dány především těmito faktory:

- nedostatečnou molekulární interdifuzí,
- narušením orientace výztužných vláken,
- nevhodně zvolenou teplotou taveniny,
- neoptimalizovanou fází dotlaku,
- nízkou vstřikovací rychlostí. [31]



Obrázek 18 Mechanické selhání v oblasti studeného spoje [12]

Pod vlivem zatížení je iniciována v nízkopevnostní oblasti studeného spoje trhlinka a dochází k jejímu šíření. K poškození výstřiku dojde při překonání maximální pevnosti studeného spoje, která je výrazně nižší, než je pevnost základního materiálu. Z hlediska cyklického namáhání je studený spoj velmi nežádoucí. [12]



Obrázek 19 Rozložení pevnostních zón po délce studeného spoje [12]

Na obrázku 19 je zobrazeno rozložení pevnostních zón po délce studeného spoje, přičemž je jasné patrné, že se pevnost po délce výrazně mění. Středová zóna, ve které dochází ke střetu taveninových čel vykazuje relativně vysokou pevnost. V blízkosti okrajů vzniká v důsledku povrchových napětí V – vrub, který výrazně zhoršuje mechanické vlastnosti výstřiku. Trhlinka je iniciována od okraje a šíří se po délce studeného spoje. [12]

4 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ STUDENÉ SPOJE

V předchozí kapitole již bylo zmíněno, že vznik studených spojů závisí zejména na:

- volbě procesních parametrů,
- druhu vstřikovaného materiálu,
- konstrukci výstřiku,
- konstrukci vstřikovací formy,
- parametrech vstřikovacího stroje. [19]

4.1 Konstrukce výstřiku

Návrh různých otvorů, drážek, nálitků a žeber ovlivňuje vznik studených spojů. Otvory a drážky znamenají další jádro, které musí tavenina obtékat. Vhodnou alternativou je použití slepých otvorů, které usnadňují proudění taveniny. Další možností je navrhnout dodatečné přetokové kanály a silnější žebra pro zvýšení pevnosti v oblastech vzniku studených spojů. Úplné zamezení vzniku studených spojů u kruhových a zejména pak tvarově velmi složitých geometrií není možné. [32]

Tloušťka stěn výstřiku by měla být ve všech místech stejná, aby bylo zajištěno rovnoměrné plnění dutiny vstřikovací formy. V případě rozdílných tlouštěk stěn poteče tavenina cestou nejmenšího odporu a v některých místech mohou vznikat preferenční toky a proudy taveniny se potkají při různých rychlostech a teplotách proudění. [21]

4.2 Vstřikovaný materiál

Polymerní tavenina s nižší viskozitou lépe vyplňuje tvarovou dutinu vstřikovací formy, a zároveň lépe přenáší tlak. Méně viskózní materiály tvoří méně viditelné studené spoje s vyšší pevností. Obecně je však důležité brát v úvahu, že méně viskózní materiály mají zpravidla horší fyzikálně-mechanické vlastnosti. Vliv na viskozitu má i obsah vlhkosti před zpracovatelským procesem. [21]

Problém nastává u vstřikování plněných materiálů. Při vstřikování kompozitů s částicovým nebo vláknitým plnivem dochází k tvorbě studeného spoje v polymerním materiálu. Plnivo přes studený spoj neprochází a celkově má v blízkém okolí menší koncentraci. Vzniklý spoj je pak vzhledově více nápadný oproti materiálu bez plniva. Je-li studený spoj poblíž okrajů, možným řešením je nasměrování toku do pomocné přetokové

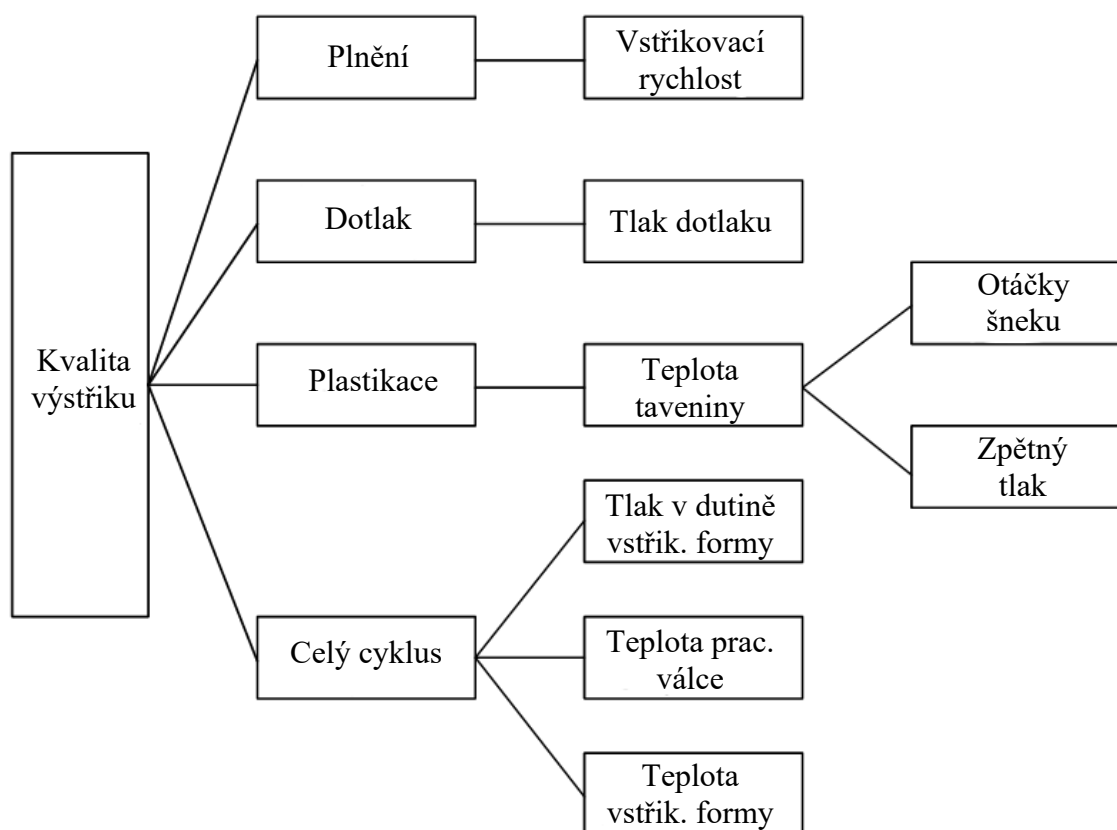
dutiny. Pevnost v daném místě se tak výrazně nesníží, ale nevýhodou je nutnost odstranění přetoku a následně i vzniklá viditelná stopa. [21]

4.3 Procesní parametry

Volba procesních parametrů přímo ovlivňuje kvalitu povrchu výstřiků. Obecně platí, že vady povrchu vznikají převážně v důsledku nesprávné volby těchto parametrů. [20]

Procesní parametry lze kategorizovat do dvou základních skupin:

- parametry závislé na konkrétní fázi vstřikovacího cyklu,
- parametry nezávislé na konkrétní fázi vstřikovacího cyklu. [33]



Obrázek 20 Klíčové parametry procesu vstřikování [33]

Během vstřikovací fáze má charakter toku polymerní taveniny zcela zásadní vliv na kvalitu výstřiku, a to zejména z hlediska jeho mechanických vlastností, ale taky teplotní odolnosti a rozměrové stability. Optimální nastavení a kontrola vstřikovací rychlosti je proto nezbytná pro optimální průběh vstřikování. Vstřikovací rychlost lze určit na základě otáček šneku. Pro dotlakovou fázi je klíčovým parametrem nastavený tlak, který má hlavní dopad na množství materiálu dopraveného do dutiny vstřikovací formy. V průběhu plastikace

dochází k tavení polymerního granulátu z velké části vlivem smykového namáhání šneku, které vzniká jeho rotací a zpětným tlakem. Rychlost otáček šneku a zpětný tlak jsou proto klíčovými parametry této fáze. [33]

V průběhu celého vstřikovacího procesu je pak potřeba kontinuálně kontrolovat výhradně tyto procesní parametry:

- teplota pracovního válce,
- tlak v dutině vstřikovací formy,
- teplota vstřikovací formy. [33]

Pracovní válec obsahuje na vnějším povrchu topná tělesa. Ohřev válce je rozdělen do zón, aby byla zajištěna optimální teplotní distribuce v průběhu vstřikovacího procesu. Před zahájením vstřikovacího cyklu je válec vyhříván na provozní teplotu. Vzhledem k tomu, že zhruba třetina celkového tepla potřebná k plastifikaci polymerního materiálu pochází z topných pásů je nezbytné, aby byla uzavřena regulace teploty pracovní válce. [33]

Nejlepším ukazatelem stavu taveniny v dutině vstřikovací formy je tlak v tomto místě, protože na jeho základě je možné určit stav mikrostruktury a kvality výstřiku. [33]

Z hlediska vzniku a optimalizace studených spojů jsou teplotní parametry procesu ty nejdůležitější. [20]

4.3.1 Teplota vstřikovací formy

Teplota vstřikovací formy má vliv na pohyblivost makromolekulárních polymerních řetězců a dobu jejich aktivity. S rostoucí teplotou klesá rychlost ochlazování. V důsledku pomalejšího ochlazování makromolekulárních řetězců se prodlužuje doba relaxace napětí a pevnost i kvalita studených spojů je vyšší. Vyšší teplota vstřikovací formy výrazně redukuje tloušťku zamrzlé vrstvy, která vzniká při kontaktu taveniny s tvarovou dutinou vstřikovací formy. [32]

4.3.2 Teplota taveniny

S rostoucí teplotou polymerní taveniny klesá její viskozita a zvyšuje se pohyblivost makromolekulárních řetězců, což způsobuje lepší orientaci makromolekulárních řetězců a prodlužuje dobu tuhnutí. Příliš vysoká teplota taveniny však může vést k degradaci. [32]

4.3.3 Vstřikovací rychlost

Zvýšení vstřikovací rychlosti zkracuje dobu proudění separovaných čel taveniny a zároveň snižuje míru teplotní disipace. Vyšší vstřikovací rychlostí během plnění vstřikovací formy taveninou lze docílit intenzivnějšího smykového namáhání, což má za následek zvýšení teploty taveniny a také vyšší pevnost vzniklých studených spojů. [32]

4.3.4 Vstřikovací tlak

Hodnota vstřikovacího tlaku musí umožnit překonat odpor taveniny v pracovním válci vstřikovacího stroje, vstřikovací trysce i dutině vstřikovací formy. Zároveň musí být zajištěna dostatečně vysoká rychlost plnění. Zvýšením vstřikovacího tlaku vznikají studené spoje s lepšími mechanickými vlastnostmi, protože se tlak přenáší na čela taveniny a ke vzniku spoje dochází za vyššího tlaku. [32]

4.3.5 Doba dotlaku

Během plnění dochází ke spojování čel taveniny. Tlakovým působením na místo spoje během dotlakové fáze dochází ke zvýšení jeho pevnosti. Pevnějšího spoje lze dosáhnout i zvýšením rychlosti dotlaku. [21]

4.3.6 Doba chlazení

Příliš krátká doba chlazení může mít negativní dopad na vyhození výstřiku ze vstřikovací formy kvůli nedostatečnému zatuhnutí jednotlivých vrstev. V okolí studeného spoje se pak nacházejí místa obzvláště náchylná k poškození. Doba chlazení je potřeba optimalizovat, protože naopak příliš dlouhá doba chlazení značně snižuje efektivitu výroby a zvyšuje energetické nároky procesu. [32]

4.4 Vliv systémů vstřikovací formy

Optimalizace studených spojů souvisí zejména s návrhem a vhodným umístěním vtokového ústí, rovnoměrnou temperací a funkčním odvzdušňovacím systémem vstřikovací formy. [32]

4.4.1 Vtokový systém

Vtokový systém je soustava rozvodných kanálů a vtokového ústí. Úkolem vtokového systému je rozvádět polymerní taveninu ze vstřikovací jednotky do dutiny vstřikovací formy. Navržená konfigurace a rozměry do velké míry ovlivňují jednak tok polymerní taveniny, ale jednak také následnou jakost a kvalitu výstřiku. Z hlediska ekonomické efektivity by měl

být vtokový systém navržen tak, aby umožňoval co nejkratší vstřikovací cykly při maximálním využití zpracovávaného materiálu. Jeho konstrukce by zároveň měla umožnit snadné oddělení nebo automatické vyhození vtokového zbytku od výstřiku. V případě vícenásobných vstřikovacích je nutné zajistit rovnoměrné plnění všech tvarových dutin při minimalizaci tlakových a teplotních ztrát v průběhu vstřikování. [34]

Ve většině případů je uspořádání rozvodných kanálů a umístění vtokového ústí určeno konstrukčním řešením vstřikovací formy, ačkoli by optimální návrh měl primárně vycházet z požadavků kladených na samotný výstřik. [34]

Vtokové ústí je velmi malý otvor, kterým je polymerní tavenina vstřikována do tvarové dutiny vstřikovací formy. Jeho umístění se volí zpravidla v nejtlustší části výstřiku, ve směru orientace žeber. Z konstrukčního hlediska by vtokové ústí mělo mít co nejmenší délku a průřez, aby zůstaly pouze nepatrné stopy a jeho oddělení od výstřiku bylo snadné. Krátké vtokové ústí zamezuje velkým tlakovým ztrátám a umožňuje kvalitnější dotlak. Tvar vtokového ústí musí umožnit rychlé a rovnoměrné plnění dutiny formy fontánovým tokem taveniny. Vtokové ústí nesmí být příčinou nedokonalého odvzdušnění. [34]

Ve vtokových ústí malých průřezů proudí polymerní tavenina vyšší vstřikovací rychlostí, což způsobuje jetting neboli volný proud taveniny. Tavenina je velmi rychle vytlačena z vtokového ústí a naráží na protější stěnu tvarové dutiny vstřikovací formy, kde dochází ke změně jejího směru. Tento efekt výrazně oslabuje spojení čel tavenin proudících z více směrů. Řešením jettingu je např. použití tunelového vtoku nebo posunutí vtokového ústí do jiné roviny vzhledem k rozvodným kanálům a dutině vstřikovací formy. Dalším rizikem u vtokových ústí malých průřezů je vysoká rychlost smykové deformace v daném místě a s tím spojená možnost degradace materiálu. [32]

Pozice a počet vtokových ústí má značný dopad na vznik a výsledné vlastnosti studených spojů. Jsou-li přítomny minimálně dvě vtokové ústí, studené spoje budou vznikat právě mezi nimi. Pevnost studených spojů klesá s rostoucí vzdáleností mezi vtokovými ústí. S rostoucím počtem vtokových ústí klesá kvalita výstřiku, protože nedochází k optimálnímu objemovému spojení. U výstřiku plněného z více míst je účelné osadit formu kaskádovým horkým rozvodným systémem s uzavíracími jehlami v horkých tryskách. [21; 34]

V některých případech je možné navrhnout pozici vtokového ústí tak, aby se studené spoje tvořily zpravidla na nekritických oblastech. Nekritickými oblastmi lze rozumět taková místa, která nejsou význačně mechanicky zatížena a nehrozí selhání celého výstřiku. [34]

Dle průběhu viskozity polymerní taveniny při průchodu vtokovým systémem se dělí vtokové systémy do dvou základních kategorií:

- studené vtokové systémy (pro malosériovou výrobu jednoduchých výstříků),
- horké vtokové systémy (pro velkosériovou výrobu složitých výstříků). [34]

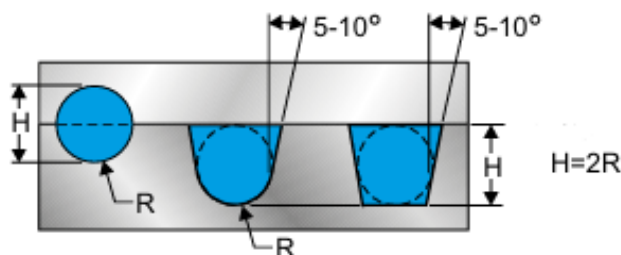
Studený vtokový systém:

Skládá se z hlavního vtokového kanálu, soustavy rozvodných kanálů a minimálně jednoho vtokového ústí. Polymerní tavenina se při toku studeným vtokovým systémem ochlazuje a tuhne na stěnách, její viskozita s rostoucí vzdáleností stoupá. [34]

V současné době disponuje studeným vtokovým systémem asi 70 % vstřikovacích forem, a to zejména pro jejich jednodušší a levnější konstrukci, ale taky kvůli nižším požadavkům na jejich provoz a údržbu. Nutností je však vyhození vtokového zbytku společně s výstříkem na konci každého vstřikovacího cyklu. [34]

Hlavní vtokový kanál slouží k dopravě taveniny z trysky vstřikovací jednotky do tvarové dutiny (u vstřikovacích forem s jednou tvarovou dutinou), nebo do soustavy rozvodných kanálů (u vícenásobných vstřikovacích forem). Je tvořen vtokovou vložkou, na kterou dosedá tryska vstřikovací jednotky. Hlavní vtokový kanál je zhotoven s úkosem a leštěn pro snadné vyhození vtokového zbytku. K přichycení vtokového zbytku na levé straně vstřikovací formy slouží přídržovač vtoku. [34]

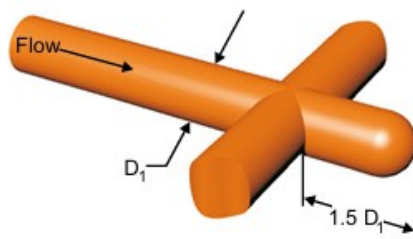
Pro rozvodné kanály je doporučován kruhový průřez, který vykazuje optimální faktor tvaru (poměr obvodu ku ploše průřezu). Při frézování obou polovin kanálů do rozdílných polovin vstřikovací formy jsou kladeny vysoké nároky na přesnost geometrie. Pro správnou funkci se předpokládá dokonalá sousost obou polovin vstřikovací formy. Z toho důvodu se upřednostňují např. lichoběžníkové, parabolické či půlkruhové průřezy. Tato řešení jsou sice výrobně jednodušší, ale na úkor efektivity z důvodu tlakových ztrát. [34]



Obrázek 21 Doporučené průřezy rozvodných kanálů [34]

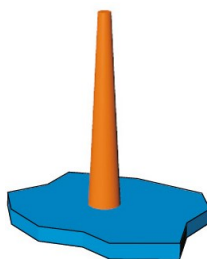
vlevo – kruhový, uprostřed – parabolický, vpravo – lichoběžníkový

Studené vtoky se doplňují jímkami, které představují prodloužení rozvodných kanálů za jejich bod větvení. Jímky zachytávají studená čela – materiál, který po kontaktu s tryskou a chladným povrchem vstřikovací formy částečně nebo zcela ztuhl a jeho teplota je pod efektivní vstřikovací teplotou. Takto ztuhlý materiál je následně unášen taveninou během vstřikování, což může vést k ucpání rozvodného kanálu a následnému nerovnoměrnému plnění tvarových dutin. [34]



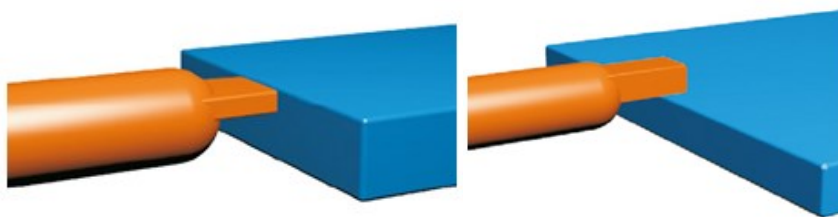
Obrázek 22 Jímka [34]

U jednonásobných vstřikovacích forem se používá plný kuželový vtok do středu tvarové dutiny. Jedná se o nejvhodnější řešení pro válcové a podobně symetrické výstřiky. Tento typ vtokového ústí vždy zanechá stopu na výstřiku a jeho odstranění je poměrně pracné. Pro vyrovnání deformací během plnění se proti vtoku zhotovuje čočkovité zahloubení. [34]



Obrázek 23 Plný kuželový vtok [34]

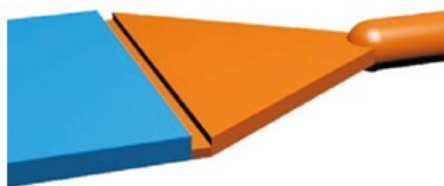
Štěrbínový vtok se provádí ve třech variantách, a to buď napřímo, „naplocho“, anebo jako lichoběžníkový. Přímý štěrbínový vtok se vyznačuje obdélníkovým průřezem a do výstřiku vstupuje z jeho boční strany v dělicí rovině. Hlavní nevýhodou je nutnost jeho manuálního oddělení od výstřiku. Lichoběžníkový štěrbínový vtok se od přímé varianty příliš neodlišuje, ale jeho výhodou je jednodušší oddělení od výstřiku (lze jej zautomatizovat), protože lichoběžníkový úkos umožňuje snadný odlom. Vlivem překryvu u varianty „naplocho“ hrozí menší riziko jettingu. Proud taveniny naráží na protilehlou stěnu výstřiku, přičemž vzniká odpor, který jejímu volnému toku brání. Po oddělení zůstává výrazná stopa na výstřiku, a proto je následně nutné vykonat její povýrobní začištění. [34]



Obrázek 24 Štěrbínové vtokové ústí [34]

vlevo – přímé, vpravo – „naplocho“

Vějířový vtok je široko štěrbinový vtok, který se směrem k tvarové dutině vstřikovací formy rozevívá do podoby vějíře a vstupuje do výstřiku z dělicí roviny svoji nejdelší částí. Důsledkem je pomalejší proudění čela toku taveniny, které má vyšší homogenitu a dokonalejší orientaci polymerních molekul. Riziko jettingu je podstatně menší. Smykové namáhání v místě vtoku dosahuje výrazně nižších hodnot. Využívá se u širokých výstřiků s požadavkem na vysokou rozměrovou stabilitu. Nevýhodou je nutnost jeho manuálního odstranění od výstřiku a následného povýrobního začištění. [34]



Obrázek 25 Vějířový vtok [34]

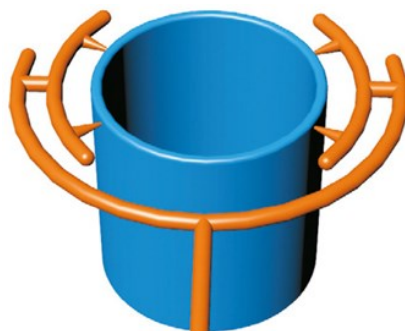
Filmový vtok je alternativou široko štěrbinového vtoku. Má stejné výhody, ale při mnohem nižších nárocích na prostor a materiál. Nevýhodou je menší předvídatelnost proudění taveniny vtokovým ústím a stagnace taveniny v místě jejího vstupu z rozvodného kanálu do spojovací štěrbině. Je vhodný pro vstřikování vysokou vstřikovací rychlostí. [34]



Obrázek 26 Filmový vtok [34]

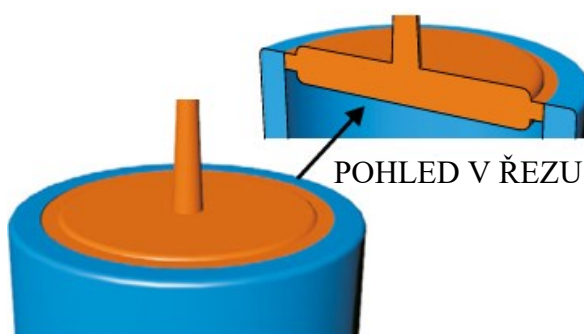
Prstencový vtok je variantou filmového vtoku, pro kterou je charakteristické, že rozvodný kanál kopíruje po obvodu tvarovou dutinu vstřikovací formy. Tento typ vtoku je vhodný pro vstřikování výstřiků válcovitého tvaru. Výhodou jsou jednotné tokové podmínky

a eliminace studených spojů. Velkou nevýhodou je však obtížné oddělení vtoku od výstřiku a značná nepředvídatelnost toku. [34]



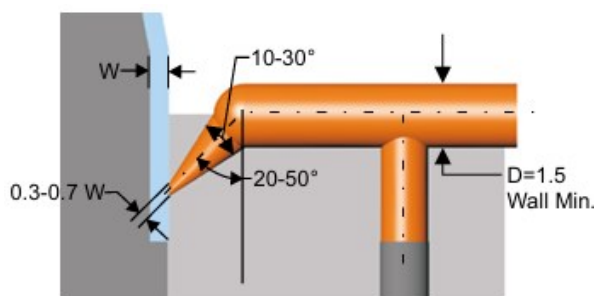
Obrázek 27 Prstencový vtok [34]

Pro výrobu oboustranně otevřených válcovitých výstřiků slouží diskový vtok. Tento typ vtoku splňuje maximální nároky na soustřednost výstřiku. Mezi hlavní výhody patří eliminace studených spojů a minimální riziko vychýlení jádra. Diskový vtok zajišťuje optimální proudění taveniny a zabráňuje tak nežádoucím deformacím, které by mohly plynout z nerovnoměrného smrštění. Nevýhodou je jeho pracné odstranění od výstřiku. [34]



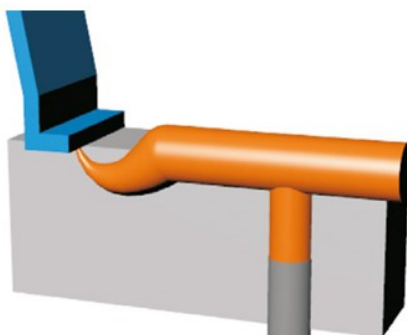
Obrázek 28 Diskový vtok [34]

Tunelový vtok představuje zvláštní případ bodového vtoku. Má tvar kuželu, přičemž jeho užší konec ústí do výstřiku. Uplatňuje se u klasických dvoudeskových vstřikovacích forem s požadavkem na automatické oddělení vtoku od výstřiku při jejich otevírání. [34]



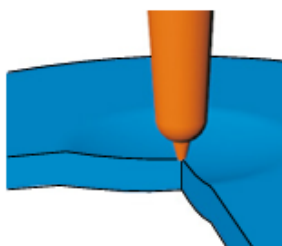
Obrázek 29 Tunelový vtok [34]

Speciálním typem tunelového vtoku je banánový vtok. Ten se používá tam, kde není možná realizace tunelového vtoku. Použití banánového vtoku je podmíněno dostatečnou houževnatostí vstřikovaného polymeru, protože během vyhazování dochází ke značné deformaci ohybem. Vzhledem ke složité geometrii se do vstřikovacích forem vkládá ve formě vložek od specializovaných výrobců. [34]



Obrázek 30 Banánový vtok [34]

Bodový vtok je využíván u třídeskových vstřikovacích forem. Jde o velmi malé vtokové ústí kuželového tvaru, přičemž vtokový systém se nachází v pomocné dělicí rovině a tvarová dutina v hlavní dělicí rovině. Vtokové ústí musí mít takovou velikost, aby bylo umožněno jeho snadné odlomení od výstřiku. [34]



Obrázek 31 Bodový vtok [34]

Horký vtokový systém:

Horký vtokový systém se skládá z hlavního vtokové vložky, rozvodného bloku (u vícenásobných vstřikovacích forem) a elektricky vyhřívané trysky. Teplota polymerní taveniny je během toku horkým vtokovým systémem udržována na konstantní hodnotě od vstřikovací trysky až po tvarovou dutinu vstřikovací formy, a proto je zaručena neměnná viskozita během toku po celé dráze jejího tečení. Bodové ústí trysky je zpravidla zavedeno přímo do dutiny vstřikovací formy. [34]

V současnosti se počet vstřikovacích forem, které jsou vyráběny s horkým vtokovým systémem, výrazně zvyšuje. Jedná se o technicky složitou záležitost, a proto se horké vtoky

zpravidla pořizují ve formě normalizovaných prvků od specializovaných výrobců (ve formě jednotlivých komponent či kompletních sestav). [34]

Mezi výhody patří absence vtokového zbytku, kratší doba vstřikovacího cyklu, nižší spotřeba materiálu, nižší uzavírací síla a vyšší míra automatizace. Nevýhody souvisí s vysokou konstrukční náročností, vyššími pořizovacími i provozními náklady, zvýšenými nároky na obsluhu, obtížnější temperací a v neposlední řadě vstřikovaným materiálem. Některé teplotně citlivé materiály totiž nelze horkým vtokem vstřikovat. [34]

4.4.2 Temperační systém

Temperační systém udržuje rovnoměrné teplotní pole vstřikovací formy a zajišťuje konstantní podmínky pro každý vstřikovací cyklus. Má velký význam z hlediska průběhu plnění tvarové dutiny vstřikovací formy a efektivity odvodu tepla. Dále má zcela zásadní vliv na celkovou dobu fáze chlazení. [32]

Návrh temperačního systému je podmíněn jednak měrnou tepelnou kapacitou vstřikovaného materiálu a jeho strukturou, ale jednak také teplotními vlastnostmi materiálu vstřikovací formy. Kritickými oblastmi jsou hlavně oblasti tvarové dutiny vstřikovací formy a místa s rizikem zvýšené koncentrace tepla. Stěna tvarové dutiny vstřikovací formy by měla mít optimálně stále stejnou provozní teplotu. [35]

Temperace se obvykle provádí prouděním temperačního média soustavou vrtaných kanálů kruhového průřezu. Velikost průměru se pohybuje v rozmezí 6 až 15 mm a závisí na tloušťce stěny výstřiku a na vstřikovaném materiálu. Temperační kanály průměrem menším než 6 mm se z důvodu obtížné vyrobitelnosti a zvýšeného rizika ucpání nedoporučují. Efektivnější temperace lze docílit upřednostněním většího počtu temperačních kanálů s menší velikostí průměru. Délka temperačních kanálů nesmí zapříčiňovat tlakové ztráty v temperačním okruhu. Další možností je využití chladicí spirály, přepážek, tepelných trubic, anebo konformního chlazení. [35]

Temperační okruhy se navrhují jako sériové nebo paralelní. Z hlediska efektivity odvodu tepla hraje roli vzájemná osová vzdálenost sousedních temperačních kanálů a také vzdálenost osy temperačního kanálu od dutiny vstřikovací formy. Při návrhu temperačních okruhů je nezbytné brát v potaz celkovou tuhost vstřikovací formy a riziko vzniku rozdílného teplotního gradientu. Teplotní spád na vstupu a výstupu by neměl být v případě amorfních materiálů vyšší než $2 \div 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a v případě semikrystalických pak $4 \div 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$. [35]

Nejpoužívanější chladicí kapalinou je voda. Použitím vody vzniká riziko hromadění vodního kamene a řas v temperačních kanálech. Proto se k vodě přidává v určitém poměru olej. Při požadavku na velmi krátké vstřikovací cykly se jako temperační médium používá kombinace vody a nemrznoucí směsi. [35]

Dopad studených spojů lze minimalizovat navržením temperačního systému s proměnlivou teplotou v jednotlivých úsecích, kdy během vstřikovacího cyklu dochází k rychlému ohřevu a ochlazení. Lokální ovlivnění teploty vstřikovací formy má pak dále dopad zejména na rozměrovou a tvarovou přesnost výstřiku. [32]

4.4.3 Odvzdušňovací systém

Před začátkem vstřikování je tvarová dutina vstřikovací formy vyplněna vzduchem. Odvzdušňovací systém umožňuje odvod vzduchu a těkavých podílů z tvarové dutiny vstřikovací formy během jejího plnění polymerní taveninou. V případě nedokonalého odvzdušnění se plyny zachytí uvnitř tvarové dutiny vstřikovací formy. S ohledem na studené spoje je zcela zásadní odvádět vzduch z míst, kde hrozí jejich možný výskyt, protože nedokonalé odvzdušnění je jednou z hlavních příčin vzniku studených spojů s velmi malou pevností. [21]

Odvzdušnění se běžné provádí zhotovením kanálků o velmi malé tloušťce (v závislosti na vstřikovaném materiálu), aby nedocházelo k nežádoucímu zatékání taveniny. Délka by měla umožňovat nejrychlejší možnou expanzi a ochlazení vzduchu. Poloha jejich umístění se volí s ohledem na směr proudění taveniny. [19]

4.5 Parametry vstřikovacího stroje

Nejdůležitějším parametrem vstřikovacího stroje je jeho uzavírací síla, která úzce souvisí s odvzdušněním tvarové dutiny vstřikovací formy. Při velmi vysokých měrných tlacích v dělicích rovinách mohou být odvzdušňovací kanálky deformovány, což zabraňuje odvodu vzduchu. Uzavírací sílu lze zjistit z výsledků simulačních výpočtů nebo experimentálně (změnou a sledováním přímo na vstřikovacím stroji). [21]

5 VYUŽITÍ CAE SOFTWARE

V oblasti vstřikování plastů CAE softwary umožňují lépe zvládat aspekty vstřikovacího procesu prostřednictvím vhodných analýz, s čímž se pojí značné množství výhod, mezi něž lze zařadit především vyšší produktivitu procesu, kvalitu zhotovených výstřiků a nižší procesní náklady. [36; 37]

Výsledky z provedených CAE analýz poskytují užitečné poznatky při návrhu konstrukce výstřiku, vstřikovací formy i samotného procesu vstřikování. Bez těchto analýz je spoléháno především na předchozí zkušenosti, prototypování a testování. Některá důležitá konstrukční data jako např. rozložení tlaku, teploty, rychlosti smykové deformace, smykového napětí nebo rychlosti proudění je pak velmi obtížné získat. [36; 37]

5.1 Simulace vstřikování pomocí softwaru Moldflow

5.1.1 Typy analýz v softwaru Moldflow

Pro vstřikování termoplastů jsou užívány čtyři základní typy analýz, přičemž jejich volba je podmíněna zkoumanou fází vstřikovacího procesu. Jejich kombinací je možné získat mnohem komplexnější a ucelenější informace o jeho celkovém průběhu. [38]

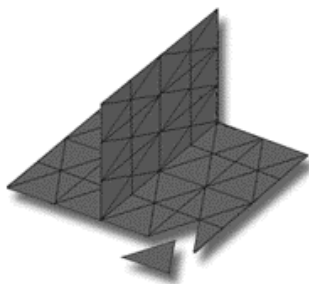
- Analýza vhodnosti umístění vtokového ústí (Gate location) znázorňuje místo na výstřiku (případně více míst), kam je vhodné vtokové ústí umístit. Mezi základní zobrazované výsledky patří indikace odporu vůči toku taveniny a vhodnost umístění vtokového ústí. [38]
- Analýza plnění a dotlaku (Fill + Pack) se skládá ze dvou sekvencí. Analýza plnění poskytuje předpověď o toku polymerní taveniny uvnitř vstřikovací formy v průběhu plnění fáze. Výpočet predikuje průběh čela polymerní taveniny, které proudí modelem výstřiku od místa vstřiku, a to až po dosažení bodu, kde dochází k přepnutí na dotlak. Analýza dotlaku pak poskytuje předpověď o toku polymerní taveniny modelem výstřiku v průběhu dotlakové fáze. Výpočet predikuje průběh čela polymerní taveniny z místa, ve kterém došlo k přepnutí na dotlak a pokračuje až do kompletního zaplnění objemu výstřiku. Zásadní informací této sekvence je tedy to, zda dojde ke kompletnímu zaplnění výstřiku polymerní taveninou. Mezi základní zobrazované výsledky patří doba plnění, rychlosti plnění, teplotní průběh polymerní taveniny, maximální vstřikovací tlak a uzavírací síla, anebo výskyt studených spojů či jiných vad. [38]

- Analýza chlazení (Cool) popisuje tepelné procesy uvnitř vstřikovací formy. Základní zobrazované výsledky souvisí s prouděním temperačního média a průběhem jeho teploty a tlaku, efektivitou odvodu tepla temperačním systémem nebo dobou, která je potřebná pro dosažení vyhazovací teploty během vstřikovacího cyklu. [38]
- Analýza smrštění a deformace (Warp) slouží k diagnostice příčin deformace a následnému doporučení nápravných opatření (např. změnou umístění vtokového ústí, úpravy konstrukce, tloušťkou stěny výstřiku a podobně). Základní zobrazované výsledky poskytují informaci o celkové deformaci výstřiku způsobené všemi efekty, anebo pouze jednotlivými složkami (vlivem chlazení, smrštění, orientace či rohových efektů). [38]

5.1.2 Postup přípravy analýzy

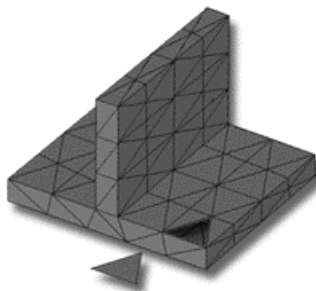
Prvním krokem je příprava modelu výstřiku. Ten nemusí zcela odpovídat skutečnosti, ale je možné jeho částečné zjednodušení (např. odstraněním prvků malých rozměrů, které by mohly negativně ovlivnit přesnost výpočtu). Proudění taveniny v navrženém modelu musí ale vždy odpovídat proudění taveniny v reálném výstřiku. Proudění je ovlivněno zejména tloušťkou stěny výstřiku, celkovou délkou tečení a objemem výstřiku. Následujícím krokem je vysítování modelu výstřiku, přičemž jsou voleny základní parametry sítě, mezi které patří typ sítě a velikost hrany elementu (pro přesnější výpočet je doporučeno vytvoření husté sítě s menší velikostí hrany elementu). Moldflow umožňuje použít tři základní typy sítě:

- Midplane (2D) – nejjednodušší typ sítě, která se skládá z trojuzlových trojúhelníkových prvků, které vytváří jednorozměrné zobrazení tvaru výstřiku proložením jeho střednice. Parametr tloušťky poskytuje informaci o tloušťce výstřiku a je přiřazen jednotlivým prvkům sítě. Tato síť je vhodná pro tvarově jednodušší, symetrické a tenkostěnné výstřiky. [38]



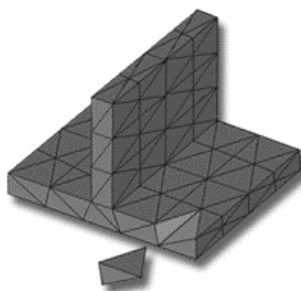
Obrázek 32 Midplane (2D) síť [38]

- Dual Domain (2,5D) – typ povrchové sítě, která pokrývá povrch výstřiku trojuzlovými trojúhelníkovými prvky zarovnanými s prvky na protilehlých plochách. Tloušťka výstřiku je dána vzdáleností mezi protilehlými plochami. Tato síť je vhodná pro tvarově složitější výstřiky s pravidelnou, ale i rozdílnou tloušťkou stěny. [38]



Obrázek 33 Dual Domain (2,5D) síť [38]

- Tetrahedral (3D) – typ prostorové sítě, která vyplňuje tloušťky stěn modelu výstřiku čtyřhrannými prostorovými elementy. Vyplněn je celý objem modelu výstřiku. Tento typ sítě nachází uplatnění pro tlustostěnné výstřiky s mnoha složitými detaily. [38]



Obrázek 34 Tetrahedral (3D) síť [38]

Po vygenerování sítě je nutné posoudit její kvalitu. Tu lze zhodnotit porovnáním následujících parametrů:

- Aspect ratio – udává poměr mezi šířkou a výškou elementu sítě a hodnota by neměla být vyšší než 20.
- Match percentage – vyčísluje shodné prvky na protější straně modelu. Hodnota by neměla přesáhnout 85 %.
- Reciprocal percentage – udává procento prvků zpětně shodných se stejným prvkem, přičemž hodnota by neměla přesáhnout 85 %. [38]

Některé parametry sítě se musí rovnat nule, jinak by byla vyžadována úprava geometrie modelu. Mezi tyto parametry patří:

- Free edges (volné hrany),
- Non-manifold edges (nepropojené hrany),
- Elements not oriented (neorientované elementy),
- Elements intersections (vzájemně protínající se elementy),
- Fully overlapping elements (překrývající se elementy v rovině). [38]

Sítě vtokového systému, temperačního systému, odvzdušňovacího systému nebo bloku vstřikovací formy jsou reprezentovány speciálním typem sítě:

- Beam – typ sítě, která je složena ze dvouuzlových prvků. Uzly představují střednici osy prvku a zadáním rozměrů je definována velikost jeho průřezu. [38]

Po kontrole vygenerované sítě následuje rozmístění modelů výstřiku dle skutečného rozložení a násobnosti vstřikovací formy. [38]

Vtokový a temperační systém lze vykreslit pomocí křivkových geometrií přímo v prostředí Moldflow, anebo importováním z jiného CAD softwaru. Křivkám se následně přiřadí požadované vlastnosti, průřezové charakteristiky a vygeneruje se síť. Dále je nutné definovat místa vtoku polymerní taveniny a vstupy temperačního média. [38]

Následujícím krokem je nastavení bloku vstřikovací formy (včetně definice materiálu) a vygenerování jeho sítě. [38]

Před spuštěním výpočetního procesu dále zbývá nadefinovat materiál výstřiku, zvolit vstřikovací stroj a nastavit procesní podmínky jednotlivých fází vstřikovacího procesu. [38]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Zadáním diplomové práce byly určeny tyto cíle:

1. Vypracovat literární studii pro dané téma.
2. Vyhotovit 3D konstrukci modelu vstřikované součásti.
3. Vytvořit simulace procesu vstřikování v software Moldflow.
4. Navrhnout optimalizace vstřikování a vyhodnocení jednotlivých variant.

Literární studie byla vypracována za účelem získání potřebných informací o technologii vstřikování, především pak o problematice studených spojů z hlediska vlivu umístění vtokového ústí a nastavení procesních podmínek na jejich výslednou kvalitu. Tyto informace pak vhodně aplikovat při řešení praktické části. Cílem praktické části bylo zhotovení 3D konstrukce modelu výstřiku, navržení vstřikovací formy, vytvoření vhodných simulací vstřikovacího procesu, navržení vhodných optimalizací a vyhodnocení jednotlivých optimalizačních variant.

7 POUŽITÝ SOFTWARE

7.1 Catia V5R19

Catia je velmi pokročilý počítačový software, nabízející širokou škálu CAD, CAM a CAE modulů, které lze uplatnit v mnoha různých průmyslových odvětvích při vývoji i výrobě velmi různorodých produktů, přičemž zcela zásadní je právě integrace a vzájemná provázanost jednotlivých modulů.

7.2 Katalog normalizovaných dílů

Při návrhu konstrukce vstřikovací formy byly využity normalizované díly od rakouského výrobce Meusburger, které se vyznačují vysokou kvalitou a precizním zpracováním. Tyto díly jsou přehledně orientovány a tříděny v jejich digitálním katalogu. Pro každý díl je zpracována základní tabulka, informační list se základními parametry a jeho 3D modelové zobrazení.

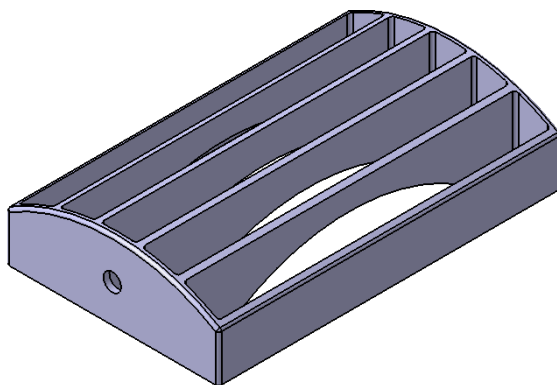
7.3 Autodesk Moldflow 2024

Moldflow je špičkový počítačový software sloužící k analýze a řešení problémů během vstřikovacího procesu polymerních materiálů. Je uživatelsky intuitivní a obsahuje pokročilé nástroje umožňující řešení ve skrze všech možných problémů během vstřikování, a to formou jejich identifikace a eliminace. Velkou výhodou je přítomnost kvalitně zpracovaných databází polymerních materiálů a vstřikovacích strojů, které obsahují všechny důležité parametry.

8 POPIS A SPECIFIKACE VÝSTŘIKU

Výstřikem je mřížka ventilátoru určená pro interiér osobního automobilu. Vzhledem ke tvarové geometrii je výskyt studených spojů velmi pravděpodobný. Pro snadnější vyhození ze vstřikovací formy jsou vnitřní žebra opatřena technologickými úkosi.

- Základní rozměry: 142 x 52 x 230 x 4 mm (šířka x výška x délka x tloušťka stěny)



Obrázek 35 3D model výstřiku

Tabulka 1 Základní parametry výstřiku

Parametr výstřiku	Hodnota	Jednotka
Hmotnost	235	g
Objem	225	cm ³
Povrch	123	cm ²

8.1 Volba materiálu

Pro své vhodné mechanické i zpracovatelské vlastnosti byl zvolen termoplast ABS.

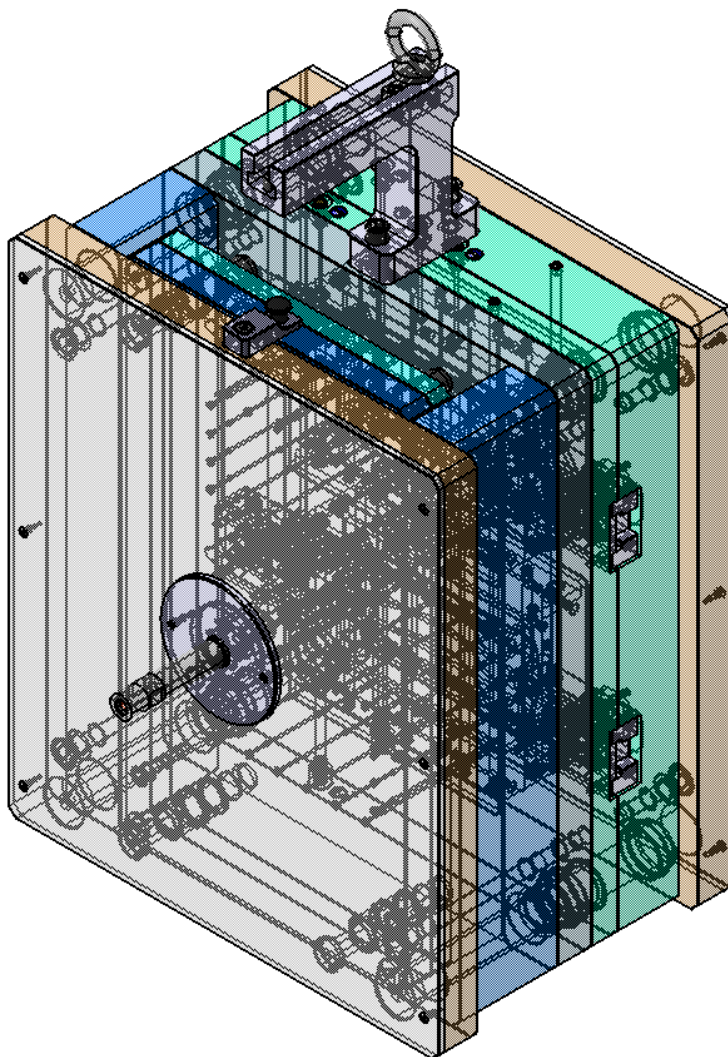
- Výrobce a označení: **SABIC, Cycolac BDT6500**

Tabulka 2 Zpracovatelské parametry materiálu Cycolac BDT6500 [39]

Zpracovatelský parametr	Hodnota	Jednotka
Doporučené rozpětí teploty formy	50 ÷ 80	°C
Doporučený rozpětí teploty taveniny	230 ÷ 275	°C
Degradační teplota taveniny	310	°C
Vyhazovací teplota	92	°C
Maximální smykové napětí	0,28	MPa
Maximální rychlost smykové deformace	50 000	s ⁻¹
Index toku taveniny (230 °C / 3,8 kg)	3,3	g/10 min
Objemové smrštění	0,5 ÷ 0,8	%

9 NÁVRH VSTŘIKOVACÍ FORMY

Vstřikovací forma byla navržena jako dvojnásobná, s dvěma formovacími deskami, posuvnými čelistmi pro odformování ve vedlejších dělicích rovinách a studeným vtokovým systémem. Vstřikovací forma se skládá z levé (nepohyblivé) a pravé (pohyblivé) části.



Obrázek 36 Vstřikovací forma

Tabulka 3 Základní parametry vstřikovací formy

Parametr vstřikovací formy	Hodnota	Jednotka
Rozměry (šířka x výška)	596 x 696	mm
Délka	428	mm
Rozměr středících kroužků	Ø160H7	mm
Hmotnost	1 106	kg
Závit čepu vyhazovačů	M16 x 1,5	mm
Dosedací rádius trysky	R40	mm

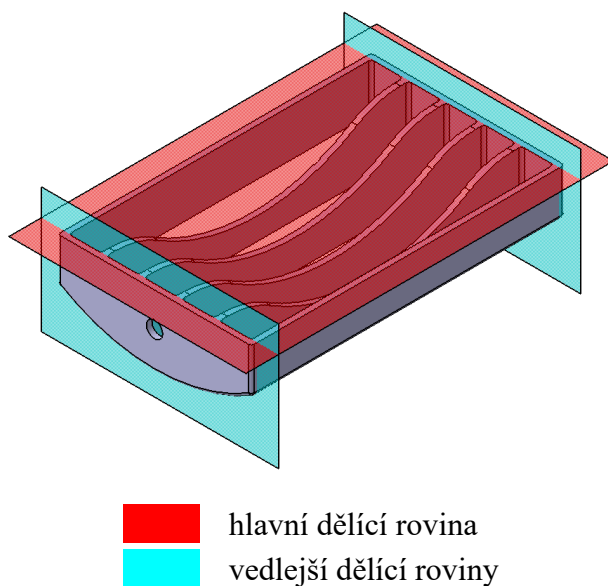
9.1 Tvarové části vstřikovací formy

Tvarové části určují geometrii tvarové dutiny vstřikovací formy. Jejich konstrukce závisí na správném určení dělicích rovin, které hrají klíčovou roli při bezproblémovém odformování výstřiku. Vhodně zvolené dělicí roviny pomáhají jednak předcházet poškození výstřiku při jeho vyhození, ale také umožňují zachovat požadovanou tvarovou i rozměrovou přesnost.

Hlavní dělicí rovina rozděljuje výstřik na části odformované tvárníkem a tvárnici. Vedlejší dělicí roviny vymezují oblasti, které vyžadují boční odformování. Tvarové části přesně lícují, aby nedocházelo k úniku taveniny mimo prostor tvarové dutiny.

Při návrhu tvarových částí bylo zohledněno smrštění materiálu, mechanické vlastnosti i požadovaná kvalita povrchu výstřiku. Tvarová dutina vstřikovací formy byla ve všech směrech zvětšena o hodnotu smrštění, která byla volena dle materiálového listu jako 0,5 %.

Pro výrobu tvarových částí byla zvolena nástrojová ocel 1.2343, kterou lze tepelně zpracovat až na tvrdost 53 HRC kombinací žíhání ke snížení vnitřního pnutí, nepřetržitého martenzitického kalení a nízkoteplotního popouštění.

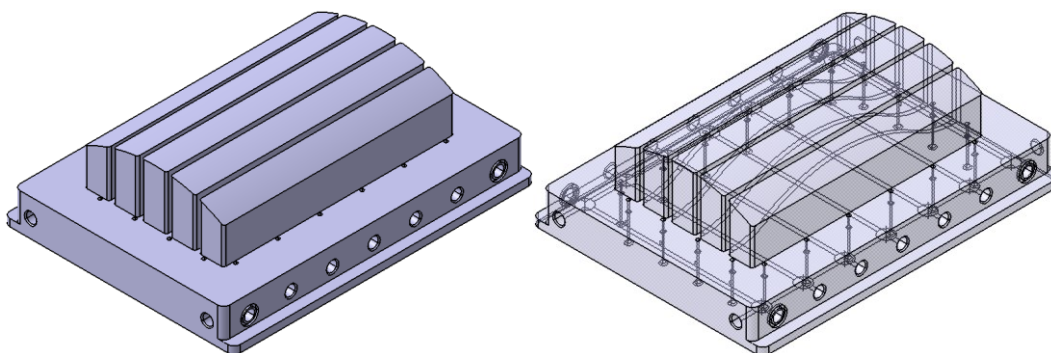


Obrázek 37 Volba dělicích rovin na součásti

9.1.1 Tvárník a tvárnice

Tvárník je tvarová vložka uložená v levé části vstřikovací formy. Z výrobních důvodů jsou rohové hrany zaobleny. Poloha tvárníku je zafixována mezideskou. Součástí jsou tolerované vrtané kruhové otvory pro vedení vyhazovacích kolíků. Vyhazovací kolíky jsou uloženy s vůlí (H7 / g6).

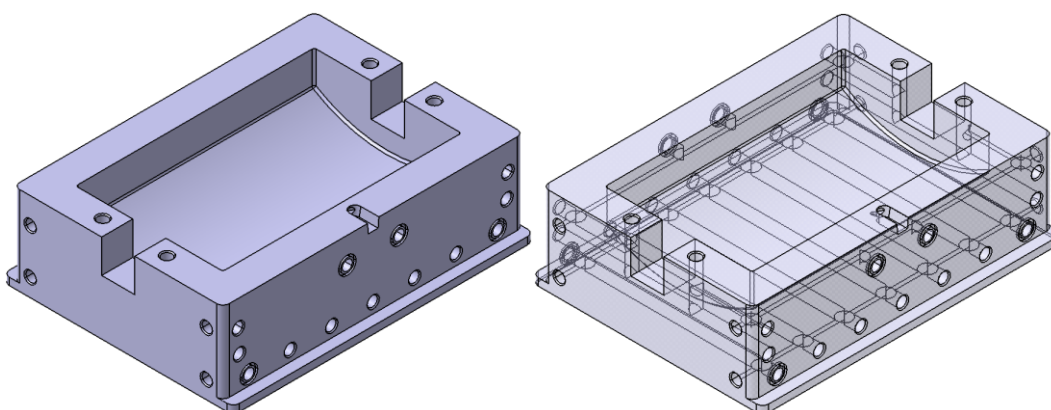
- Základní rozměry: 222 x 88 x 290 mm (šířka x výška x délka)



Obrázek 38 Tvárník

Tvárnice je tvarová vložka uložená v pravé části vstřikovací formy. Konstrukce je obdobná tvárníku. Poloha tvárnice je zafixována upínací deskou. Součástí jsou frézované rozvodné kanály vtokového systému s tunelovým vtokem.

- Základní rozměry: 222 x 88 x 290 mm (šířka x výška x délka)



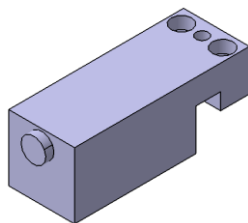
Obrázek 39 Tvárnice

Temperace obou tvarových částí je řešena soustavou vrtaných temperačních kanálů s kruhovým průřezem. V přechodových místech temperačního média do tvarové desky jsou frézovány drážky pro těsnicí O-kroužky.

9.1.2 Boční odformování

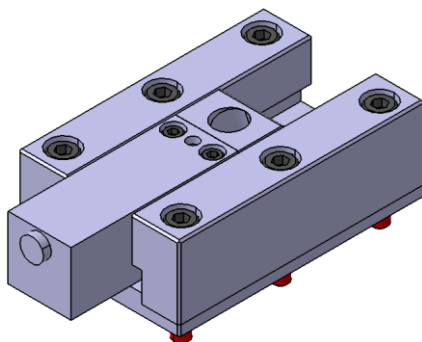
Boční tvárník tvoří tvarovou část mechanismu bočního odformování a zajišťuje odformování ve vedlejších dělicích rovinách. Je uchycen pomocí dvou šroubů a zajištěn pojistným kolíkem k posuvnému dílu. Vzhledem k jeho rozměrům není temperace nutná.

- Základní rozměry: 32 x 32 x 89 mm (šířka x výška x délka)

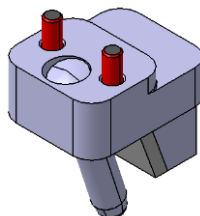


Obrázek 40 Boční tvárník

Boční tvárník je ovládán standardizovanou mechanickou posuvnou jednotkou, která je uložena v levé části vstřikovací formy a umožňuje maximální zdvih až 30 mm. Posuvný díl je veden ve vodících lištách. Pohyb je zajištěn šikmým kolíkem s kónickým nákrůžkem a úhlem sklonu 18° , uloženým v pravé části vstřikovací formy. Posuvný díl je na konci zkosen pod úhlem 20° pro zapření o uzavírací klín, který brání nežádoucímu posunu tvárníku během vstřikování. Vodící lišty mají nitridovaný povrch s nízkým koeficientem tření a vysokou otěruvzdorností. Otevřená poloha je zajištěna kuličkovou aretací s pružinkou, která zapadne do spodní drážky posuvného dílu a je uložena v kluzných deskách posuvné jednotky.



Obrázek 41 Posuvná jednotka

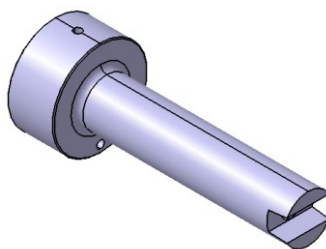


Obrázek 42 Uzavírací klín s uchycením šikmého kolíku

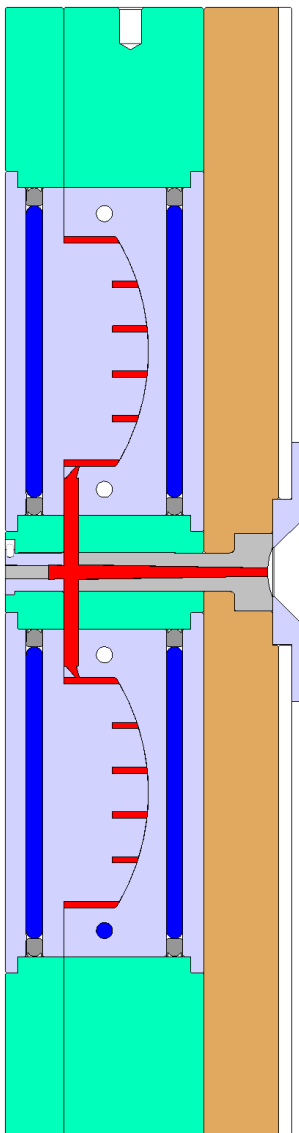
9.2 Vtokový systém

Základní prvkem studeného vtokového systému je vtoková vložka s kuželovým profilem hlavního vtokového kanálu, jehož průměr na vstupu činí 5 mm a na výstupu 9 mm. Vtoková vložka je pevně uložena v upínací desce pravé části vstřikovací formy a proti pootočení

zajištěna pojistnými kolíky. Rozvodné kanály jsou tvaru lichoběžníku o horní šířce 11 mm, spodní šířce 9,5 mm a výšce 9 mm. Tunelové vtokové ústí má kuželovitý tvar, jehož průměr na vstupu činí 6,5 mm a na výstupu 2,3 mm s úhlem sklonu 30°. Pro zajištění vtokového zbytku na levé straně vstřikovací formy slouží přidržovač vtoku kuželovitého profilu, jehož průměr na vstupu činí 9 mm a na výstupu 8 mm.



Obrázek 43 Vtoková vložka



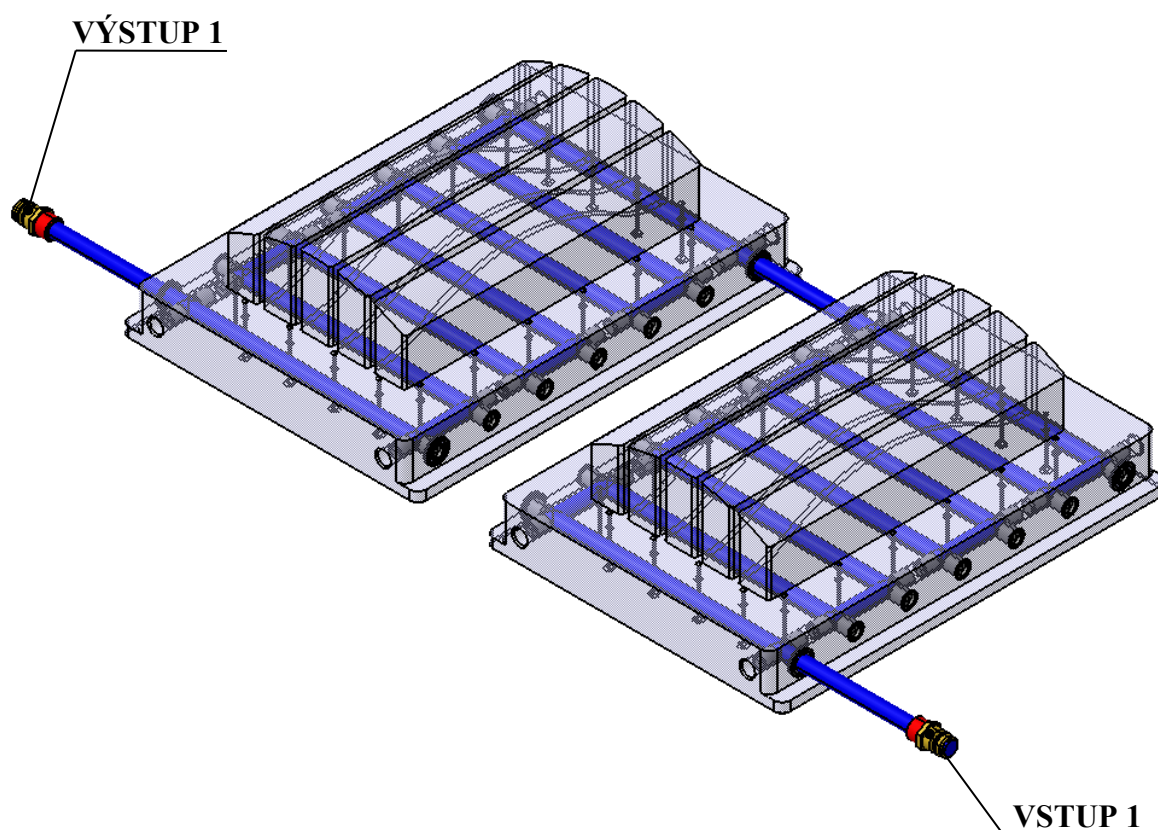
Obrázek 44 Řez tvarovou dutinou vstřikovací formy

9.3 Temperační systém

S přihlédnutím k tloušťce výstřiku byly navrženy vrtané temperační kanály s kruhovým průřezem o velikosti průměru 10 mm.

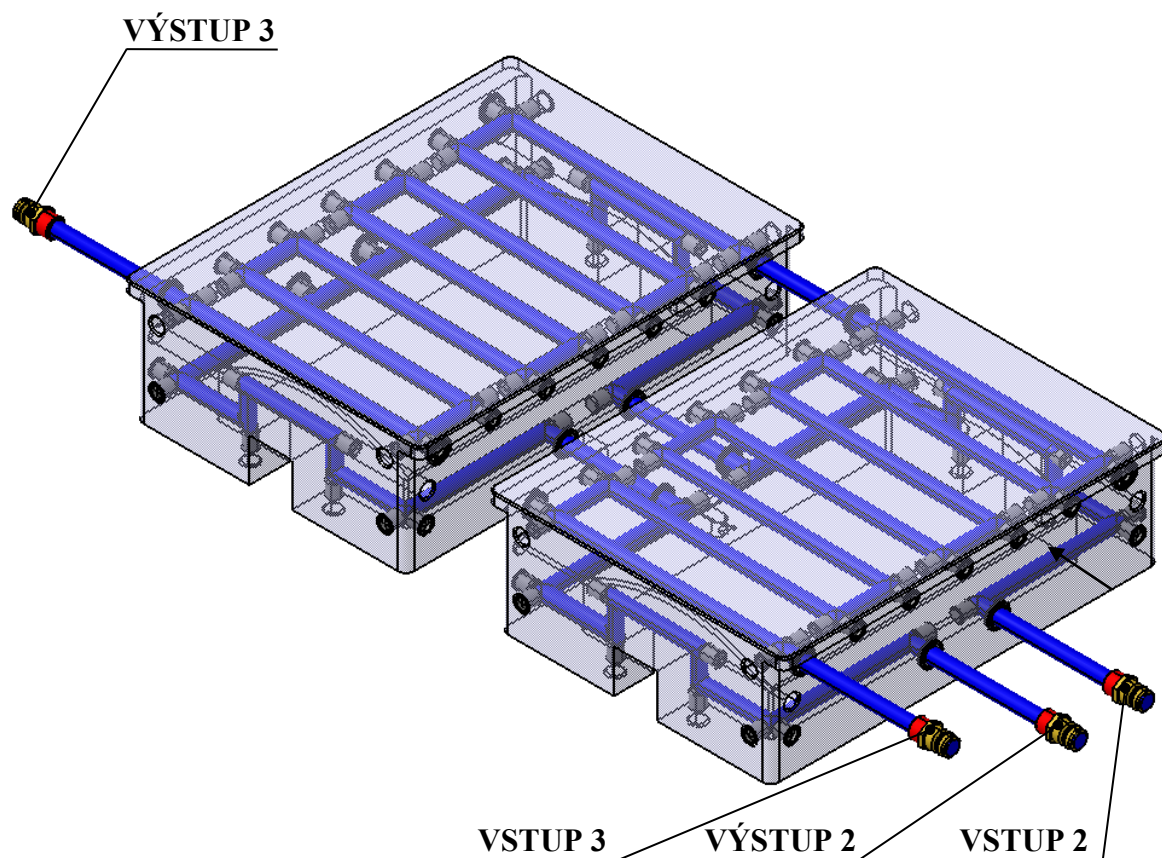
Jako temperační médium byla zvolena směs ethylenglykolu a vody v poměru 80:20. Požadovaná teplota média na vstupu do temperačního okruhu činí 35 °C. Průtok je směřován pomocí záslepek, které zabraňují proudění média do nežádoucích oblastí. Vstupní a výstupní otvory temperačních kanálů jsou označeny na tvarových deskách v oblasti přípojek.

Temperace tvárníku je realizována prostřednictvím jednoho temperačního okruhu. Osově vzdálenosti temperačních kanálů od tvarové dutiny a rozteče mezi sousedními kanály byly navrženy s ohledem na konfiguraci vyhazovacího systému a dostupné konstrukční možnosti.

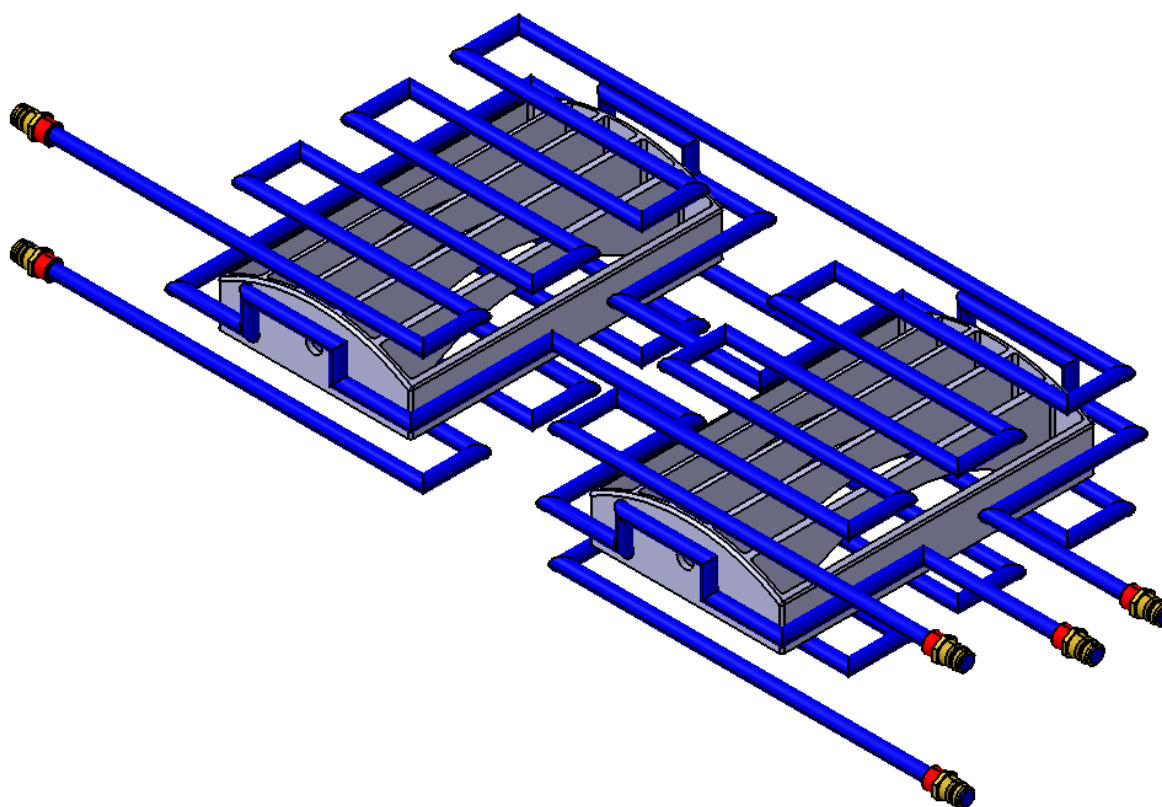


Obrázek 45 Pohled na temperační okruh tvárníku

Temperace tvárnice je realizována prostřednictvím dvou sériových temperačních okruhů. Osově vzdálenosti temperačních kanálů od tvarové dutiny a rozteče mezi sousedními kanály byly navrženy s ohledem na konfiguraci vtokového systému a dostupné konstrukční možnosti.



Obrázek 46 Pohled na temperační okruhy tvárnice



Obrázek 47 Pohled na kompletní temperační systém

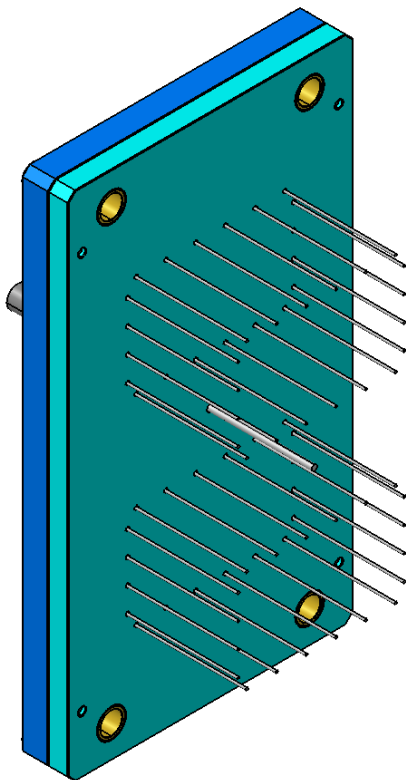
9.4 Vyhazovací systém

K bezpečnému vyhození výstřiku slouží mechanický vyhazovací paket, který je součástí levé části vstřikovací formy a umožňuje maximální zdvih až 69 mm. Skládá se ze dvou desek, kotevní a opěrné, které jsou vzájemně spojeny šrouby. V kotevní desce jsou vsazeny dva typy válcových vyhazovacích kolíků. Ty se odlišují velikostí průměru a svojí délkou. Jejich axiálnímu posunutí zamezuje opěrná deska. Počet vyhazovacích kolíků byl volen s ohledem na velikost výstřiku.

Tabulka 4 Použité typy vyhazovacích kolíků

Typ vyhazovacího kolíku (průměr x délka) [mm]	Počet kusů
Válcový vyhazovací kolík Ø3,5 x 178	40
Válcový vyhazovací kolík Ø8 x 168,5	1

K vymezení vzdálenosti během uzavírání formy slouží dorazové podložky. Vedení vyhazovacího paketu je realizováno použitím vodících pouzder, které umožňují snadný pohyb po vodících sloupcích v levé části vstřikovací formy. Ovládání je možné prostřednictvím vodícího čepu, který je spojen s vyhazovacím paketem šroubem s tvarovou hlavou. Tvarová hlava šroubu zabráňuje protočení kolem vlastní osy.



Obrázek 48 Vyhazovací paket



Obrázek 49 Místa působení vyhazovacích kolíků na výstřiku

9.5 Odvzdušnění

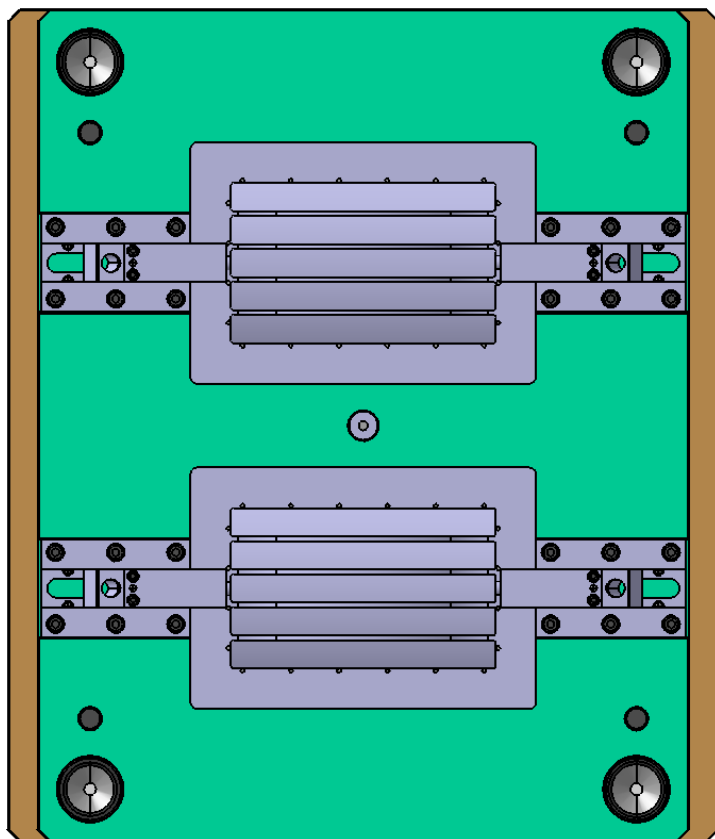
Odvzdušnění je zajištěno vůlemi mezi vyhazovacími prvky a tvarovými částmi v oblastech dělicích rovin. Dodatečné odvzdušnění je možné realizovat po odzkoušení a zaběhnutí vstřikovací formy, a to přebroušením dělicích rovin či výbrusem odvzdušňovacích kanálů.

9.6 Rám vstřikovací formy

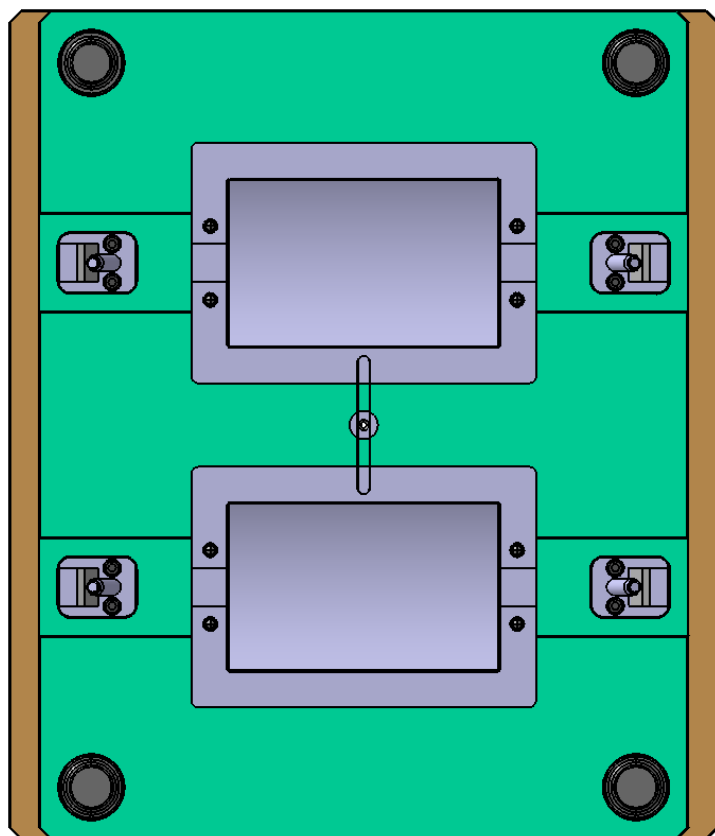
Rám vstřikovací formy byl koncipován jako sestava vzájemně propojených desek s vodícími a středícími prvky, které společně tvoří nosnou strukturu tvarových dutin a vtokového systému. Návrh byl realizován s ohledem na standardizaci komponent, rozvržení, velikost a počet tvarových dutin.

Rozměry rámových desek byly voleny v souladu s katalogovými standardy a vyhovují veškerým nárokům na kompaktnost i tuhost. Na jejich základě byly voleny další rámové prvky, jako např. spojovací šrouby, vodící čepy, vodící pouzdra nebo centrovací pouzdra. Rozměry středících kroužků jsou kompatibilní se zvoleným vstřikovacím strojem.

Pro usnadnění manipulace je vstřikovací forma doplněna vybavena transportním ramenem, které fixně spojuje levou i pravou část vstřikovací formy a nehrozí tak její otevíření. Osovému posunutí vyhazovacího paketu brání snadno a rychle odklopný zámek.



Obrázek 50 Pohled do levé části vstřikovací formy



Obrázek 51 Pohled do pravé části vstřikovací formy

10 VOLBA VSTŘIKOVACÍHO STROJE

Při volbě vstřikovacího stroje byly zohledněny parametry navržené vstřikovací formy a parametry výstřiku.

Technické údaje vstřikovacího stroje:

- Výrobce a označení: **Arburg Allrounder 820 S**
- Konfigurace vstřikovací jednotky (dle EUROMAP): 2100 / 70
- Typ pohonu vstřikovacího stroje: Hydraulický

Tabulka 5 Vybrané parametry vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 820 S [40]

Parametr vstřikovacího stroje	Hodnota	Jednotka
Maximální uzavírací síla	4 000	kN
Maximální délka formy	850	mm
Vzdálenost mezi vodícími sloupky	820 x 820	mm
Maximální hmotnost formy	5 000	kg
Průměr šneku	70	mm
Maximální zdvih šneku	280	mm
Zdvihový objem	1 078	cm ³
Dávka taveniny na zdvih šneku	984	g PS
Maximální vstřikovací tlak	2 000	bar
Rozměr středících kroužků	Ø160 H7	mm



Obrázek 52 Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 820 S [40]

11 SIMULACE VSTŘIKOVÁNÍ

V této kapitole byly postupně provedeny dvě analýzy:

- analýza umístění vtokového ústí,
- kompletní analýza vstřikování, zahrnující analýzy plnění a dotlaku, chlazení, smrštění a deformací.

11.1 Analýza umístění vtokového ústí

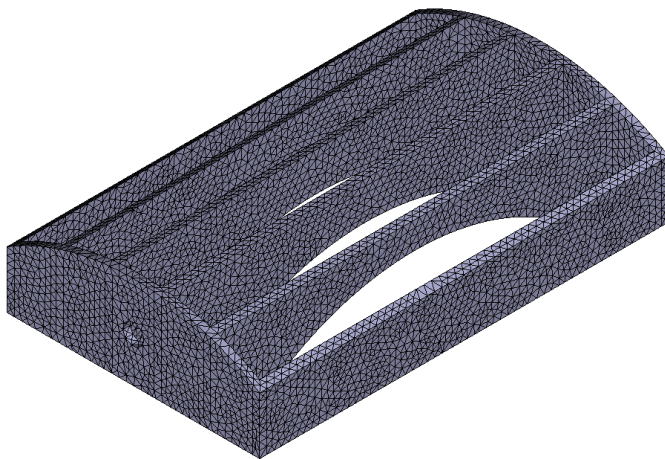
Analýza vtokového ústí byla provedena za účelem určení optimálního místa na výstřiku pro umístění vtokového ústí, zejména z hlediska průběhu plnění.

11.1.1 Import modelu a tvorba sítě

Importovaný model výstřiku byl zbaven všech malých rádiusů (s rozměrem pod 2 mm), které by mohly negativně ovlivnit kvalitu sítě a posléze i samotného výpočetního procesu.

Nastavení parametrů sítě:

- Typ sítě: Dual Domain (2,5D)
- Velikost hrany trojúhelníku: 4 mm



Obrázek 53 Model výstřiku s vygenerovanou sítí

Na obrázku 54 jsou uvedeny parametry vygenerované sítě. Na základě vyčíslených hodnot těchto parametrů lze vygenerovanou síť jednoznačně posoudit jako vhodnou pro provedení simulačních výpočtů.

```

Triangles
-----
Entity counts:
  Triangles          21280
  Connected nodes    10628
  Connectivity regions 1

  Invisible triangles          0

Area:
(Mold blocks and cooling channels are not included)
  Surface Area:      1244.6 cm^2

Volume by element types:
  Triangle:         224.381 cm^3

Aspect Ratio:
  Maximum   Average   Minimum
    5.77      1.59      1.16

Edge details:
  Free edges          0
  Manifold edges      31920
  Non-manifold edges  0

Orientation details:
  Elements not oriented  0

Intersection details:
  Element intersections  0
  Fully overlapping elements  0

Match percentage:
  Match percentage      97.6%
  Reciprocal percentage  98.4%

Suitable for Dual Domain analysis.

```

Obrázek 54 Parametry vygenerované sítě

11.1.2 Nastavení parametrů analýzy umístění vtokového ústí

Nastavení materiálu:

- SABIC, Cycolac BDT6500

Nastavení vstřikovacího stroje:

- Arburg Allrounder 820 S 445 tons 45.4 oz (70 mm)

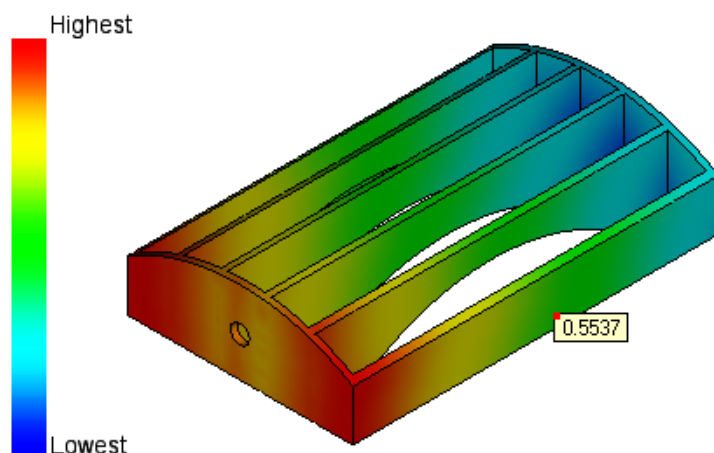
Nastavení procesních podmínek analýzy umístění vtokového ústí:

- Teplota povrchu formy: 65 °C
- Teplota taveniny: 253 °C
- Počet vtokových ústí: 1

11.2 Výsledky analýzy umístění vtokového ústí

11.2.1 Indikace odporu vůči toku taveniny (Flow resistance indicator)

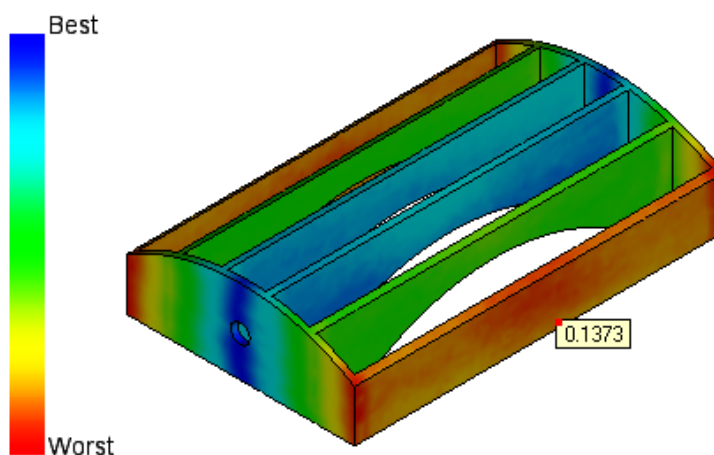
Oblasti s největším odporem vůči toku čela taveniny jsou rozlišeny červenou barvou, naopak oblasti s nejmenším odporem barvou modrou. Na obrázku 55 je zobrazen výsledek 0,5537 (přibližně 55 %) v místě vtokového ústí. V daném místě je odpor vůči toku taveniny 55 %.



Obrázek 55 Indikace odporu vůči toku taveniny (Flow resistance indicator)

11.2.2 Vhodnost umístění vtokového ústí (Gating suitability)

Optimální možností je umístit vtokové ústí do modré oblasti na výstřiku. Tyto oblasti jsou z hlediska průběhu a rychlosti plnění dutiny vstřikovací formy taveninou velmi vhodné, ačkoliv nemusí nutně představovat ideální řešení např. z hlediska konstrukce formy (násobnost, volba vtokového systému a podobně) či kvality výstřiku. Na obrázku 56 je zobrazen výsledek 0,1373 (přibližně 14 %) v místě vtokového ústí a poskytuje informaci, že vtokové ústí je zde umístěno s vhodností 14 %.



Obrázek 56 Vhodnost umístění vtokového ústí (Gating suitability)

11.3 Kompletní analýza vstřikování

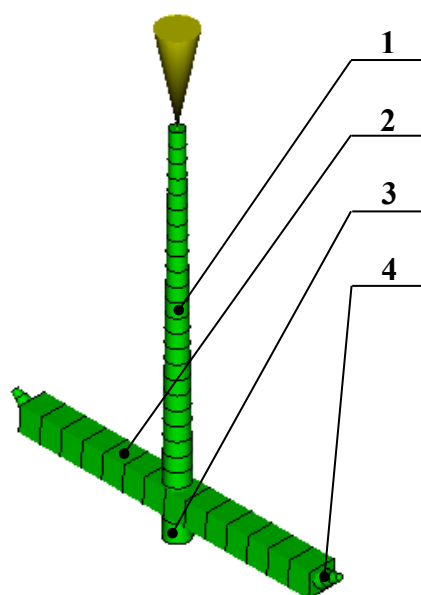
Kompletní analýza vstřikování byla provedena za účelem získání všech klíčových informací a výsledků týkajících se jeho celkového průběhu.

11.3.1 Rozvržení modelů

Vysíťované modely výstřiku byly rozmístěny podle návrhu vstřikovací formy, přičemž parametry vygenerované sítě odpovídaly hodnotám uvedeným v předchozí analýze.

11.3.2 Vtokový systém

Žlutý kužel označuje místo vstupu taveniny do vtokového systému.



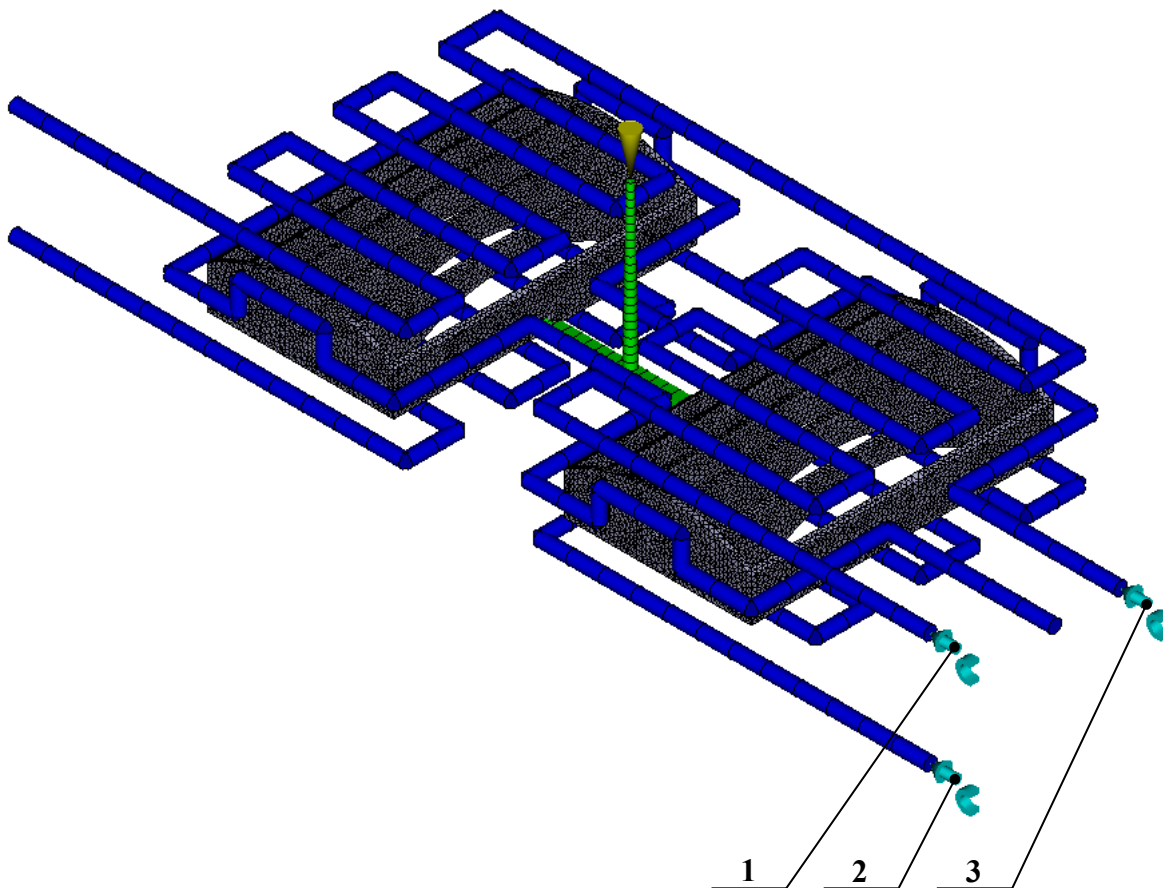
Obrázek 57 Vysíťovaný vtokový systém

Tabulka 6 Nastavené vlastnosti jednotlivých úseků vtokového systému

Úsek	Název	Typ	Parametr
1	Studená vtoková vložka (Cold sprue)	Kuželový	$d_{\text{start}} = 5 \text{ mm}$ $d_{\text{end}} = 9 \text{ mm}$
2	Studený rozvodný kanál (Cold runner)	Lichoběžníkový	$TW = 11 \text{ mm}$ $BW = 9,5 \text{ mm}$ $H = 9 \text{ mm}$
3	Přidržovač vtoku (Cold runner)	Kuželový	$d_{\text{start}} = 9 \text{ mm}$ $d_{\text{end}} = 8 \text{ mm}$
4	Vtokové ústí (Cold gate)	Kuželový	$d_{\text{start}} = 2,3 \text{ mm}$ $d_{\text{end}} = 6,5 \text{ mm}$

11.3.3 Temperační systém

Modré šipky označují místa vstupu temperačního média do jednotlivých temperačních kanálů.



Obrázek 58 Vysíťovaný temperační systém

Tabulka 7 Nastavené vlastnosti jednotlivých temperačních kanálů

Značení	Název	Typ	Parametr
1	Temperační kanál (Channel)	Kruhový	d = 10 mm
2			
3			

Nastavení parametrů temperace:

- Temperační médium: Směs ethylenglykolu (20 %) a vody (80 %)
- Tlak temperačního média na vstupu: 5 bar (0,5 MPa)
- Teplota temperačního média na vstupu: 35 °C

11.3.4 Blok vstřikovací formy

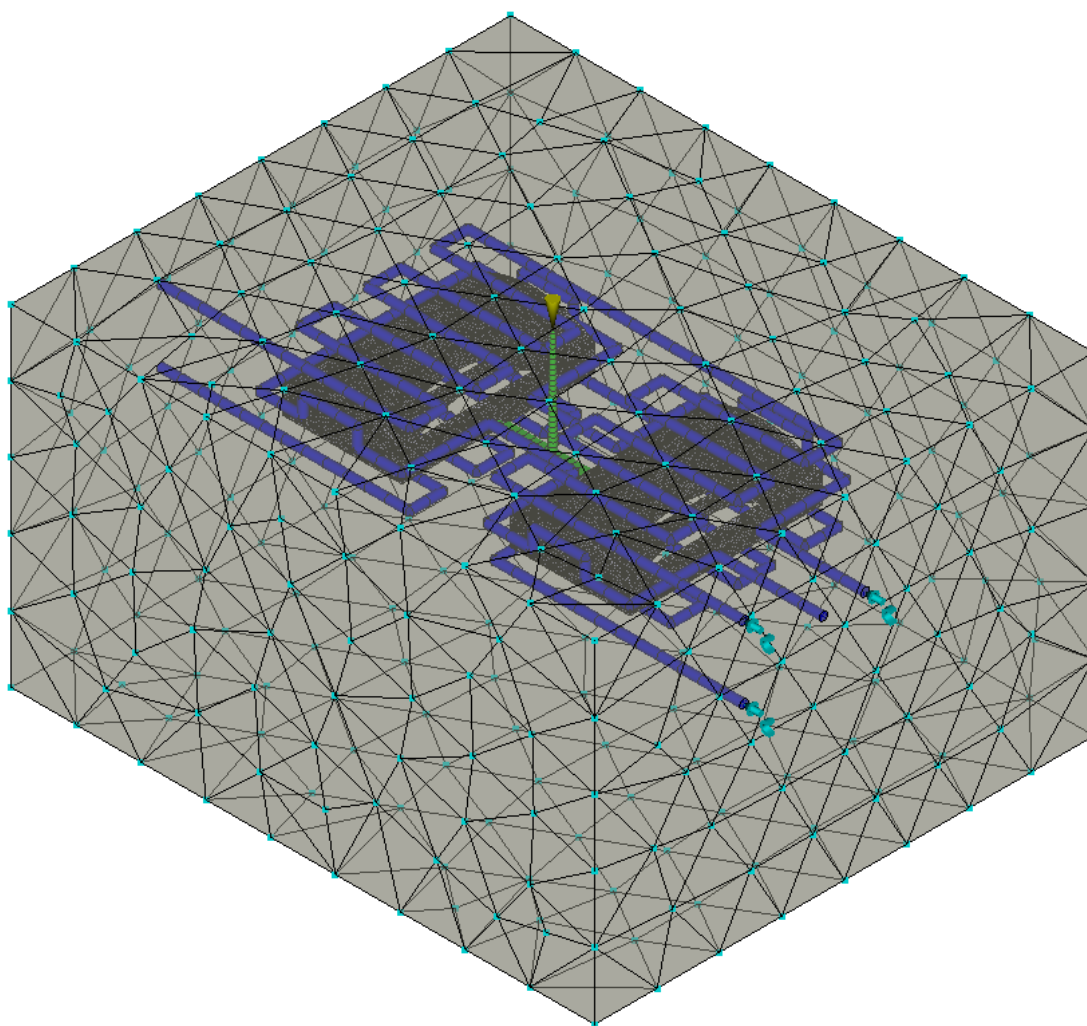
Zvolené rozměry vstřikovací formy odpovídají skutečnému návrhu. Délka formy byla uvažována jako vzdálenost mezi upínacími deskami. Vycentrování bylo provedeno s ohledem na polohu tvarové dutiny, vtokového a temperačního systému.

Nastavení parametrů bloku vstřikovací formy:

- Materiál bloku vstřikovací formy: Konstrukční ocel P-20

Tabulka 8 Nastavené parametry bloku vstřikovací formy

Osa	Vzdálenost vycentrování [mm]	Rozměr bloku [mm]
X	0	696
Y	0	596
Z	-62	396



Obrázek 59 Vysíťovaný blok vstřikovací formy

11.3.5 Nastavení parametrů kompletní analýzy

Nastavení materiálu:

- SABIC, Cycolac BDT6500

Nastavení vstřikovacího stroje:

- Arburg Allrounder 820 S 445 tons 45.4 oz (70 mm)

Nastavení procesních podmínek analýzy chlazení:

- Teplota taveniny: 253 °C
- Doba otevření vstřikovací formy: 4 s
- Doba vstřikování, plnění a chlazení: Automaticky
- Teplota povrchu formy: 65 °C
- Vyhazovací teplota: 92 °C
- Minimální procento zamrznutých vrstev při vyhazování: 90 %

Nastavení procesních podmínek analýzy plnění a dotlaku:

- Způsob řízení fáze plnění: Automaticky
- Přepnutí na dotlak dle objemového zaplnění (při zaplnění objemu z 98 %)
- Řízení fáze dotlaku dle relativního plnicího tlaku v závislosti na čase (0 sekund = 90 %; 8 sekund = 90 %)
- Vstřikování, plnění a chlazení: Automaticky
- Analýza orientace vláken: Ne
- Analýza krystalizace: Ne

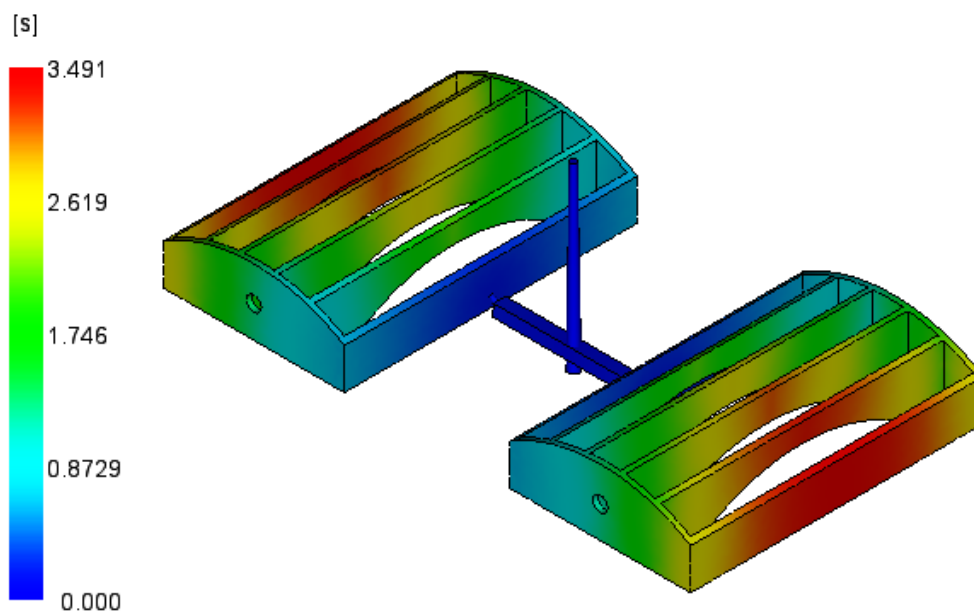
Nastavení procesních podmínek analýzy deformace:

- Zahrnout teplotní roztažnost vstřikovací formy: Ano
- Izolovat příčiny deformace: Ano
- Zahrnout rohové efekty: Ano
- Výpočtová matice: Automaticky

11.4 Výsledky analýzy plnění a dotlaku

11.4.1 Doba plnění (Fill time)

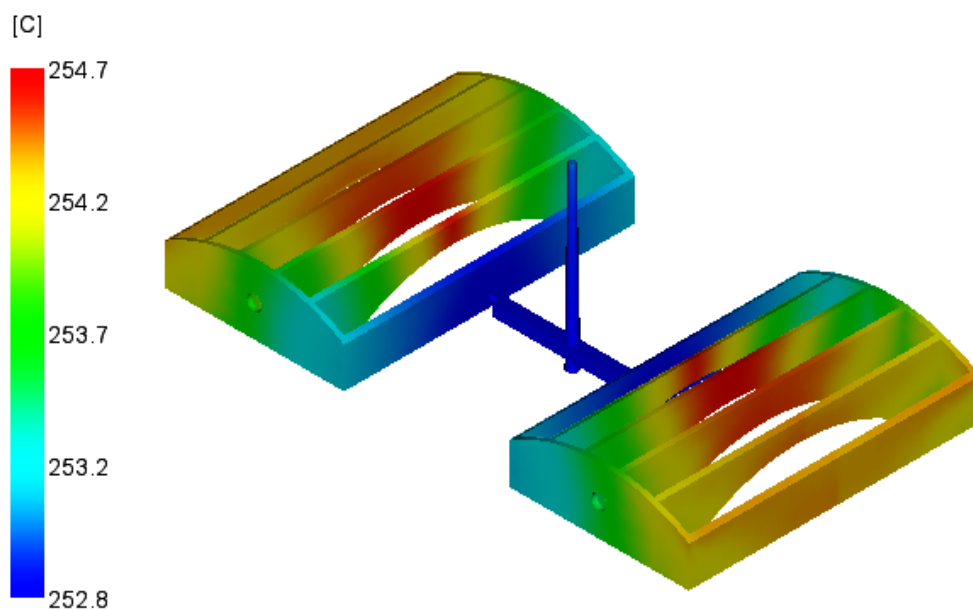
Na obrázku 60 je zobrazen průběh plnění tvarové dutiny vstřikovací formy taveninou. Její objem byl zcela zaplněn, a to za přibližně 3,49 sekundy. Průběh plnění byl pomalý, ale relativně rovnoměrný.



Obrázek 60 Doba plnění (Fill time)

11.4.2 Teplota čela taveniny (Temperature at flow front)

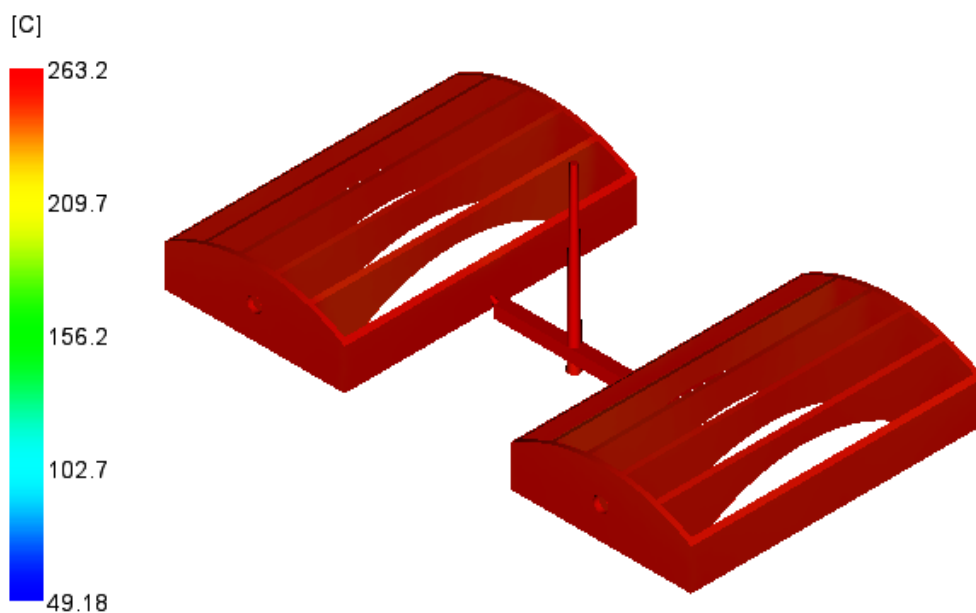
Na obrázku 61 je zobrazen průběh teploty čela proudící taveniny během jejího toku tvarovou dutinou vstřikovací formy. Teplota čela taveniny by v žádném okamžiku plnění fáze neměla klesnout o více než 2 až 5 °C, jinak hrozí prodleva v plnění nebo nedokonalé zaplnění tvarové dutiny vstřikovací formy. V oblastech, kde teplota čela taveniny stoupá, může docházet k degradaci materiálu.



Obrázek 61 Teplota čela taveniny (Temperature at flow front)

11.4.3 Teplota taveniny (Bulk temperature)

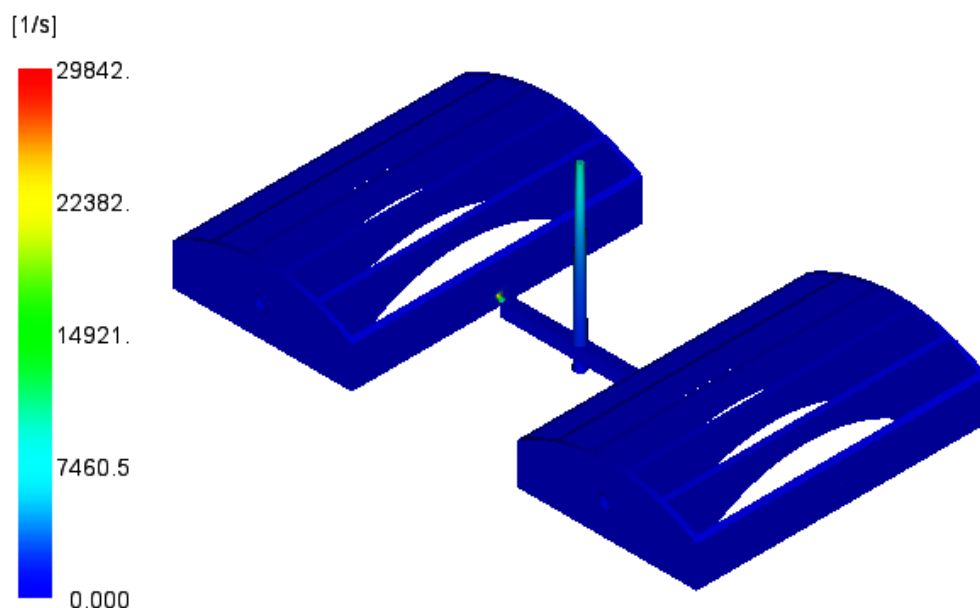
Maximální teplota taveniny během plnění tvarové dutiny vstřikovací formy dosáhla přibližně 263 °C, což je o 10 °C více než její nastavená hodnota. Tento rozdíl je způsoben disipací, tedy přeměnou mechanické energie (třením) na teplo. K překročení degradační teploty taveniny však nedošlo v žádném okamžiku. Na obrázku 62 je zobrazena teplota taveniny v okamžiku úplného zaplnění tvarové dutiny vstřikovací formy (čas 3,49 sekundy).



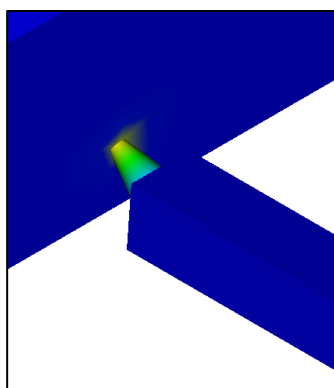
Obrázek 62 Teplota taveniny (Bulk temperature)

11.4.4 Rychlost smykové deformace (Shear rate, bulk)

Na obrázku 63 jsou zobrazeny hodnoty rychlosti smykové deformace v různých oblastech výstřiku. Při překročení limitní hodnoty hrozí riziko degradace materiálu (pro zvolený materiál je limitní hodnota $50\,000\text{ s}^{-1}$). Nejvyšší rychlosti smykové deformace se obvykle vyskytují v oblasti vtokového ústí. Z výsledků je patrné, že k degradaci materiálu nedochází, neboť maximální hodnoty zaznamenané v oblasti vtokového ústí dosahovaly pouze $29\,842\text{ s}^{-1}$. Při překročení limitní hodnoty rychlosti smykové deformace je možné její snížení zvětšením průřezu vtokového ústí nebo zmenšením průtoku taveniny (např. nastavením její nižší teploty).



Obrázek 63 Rychlost smykové deformace (Shear rate, bulk)

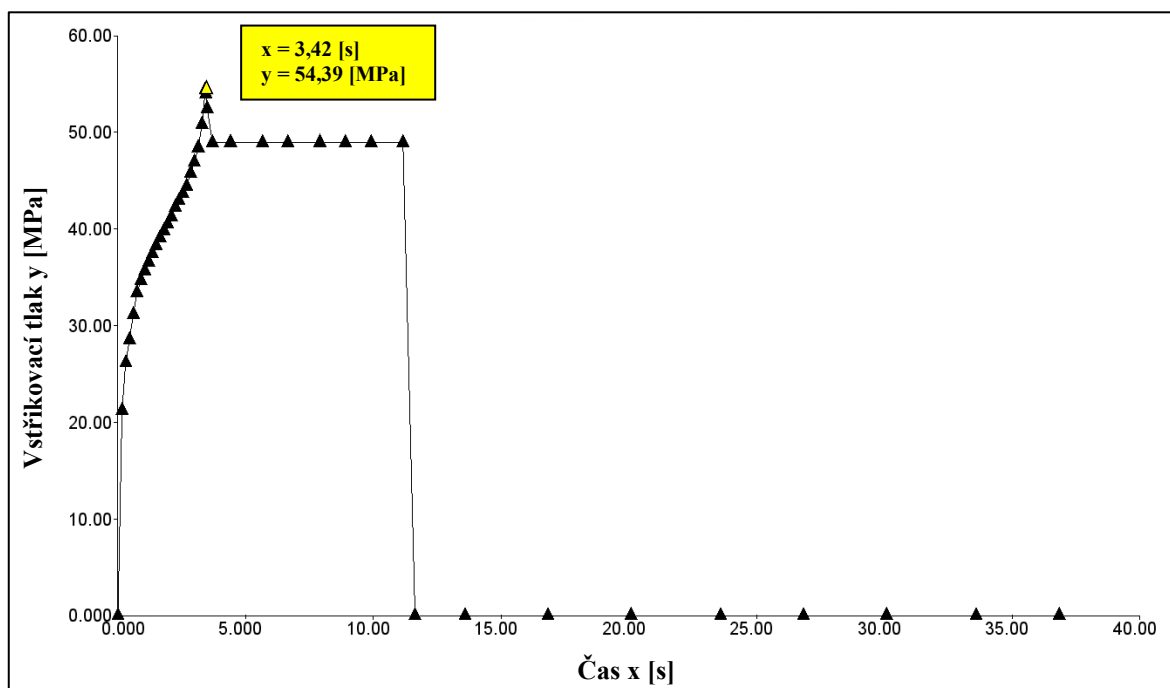


Obrázek 64 Detail vtokového ústí

11.4.5 Průběh vstřikovacího tlaku v místě vtokového ústí (Pressure at injection location: XY Plot)

Diagram na obrázku 65 znázorňuje závislost vstřikovacího tlaku na čase v místě vtokového ústí. Vstřikovací tlak dosahuje své maximální hodnoty 54,39 MPa v čase 3,42 sekundy. V tomto okamžiku dochází k přepnutí na dotlak, jehož hodnota zůstává po celou dobu fáze dotlaku konstantní a činí 48,90 MPa. Následně vstřikovací tlak klesá až na nulovou hodnotu.

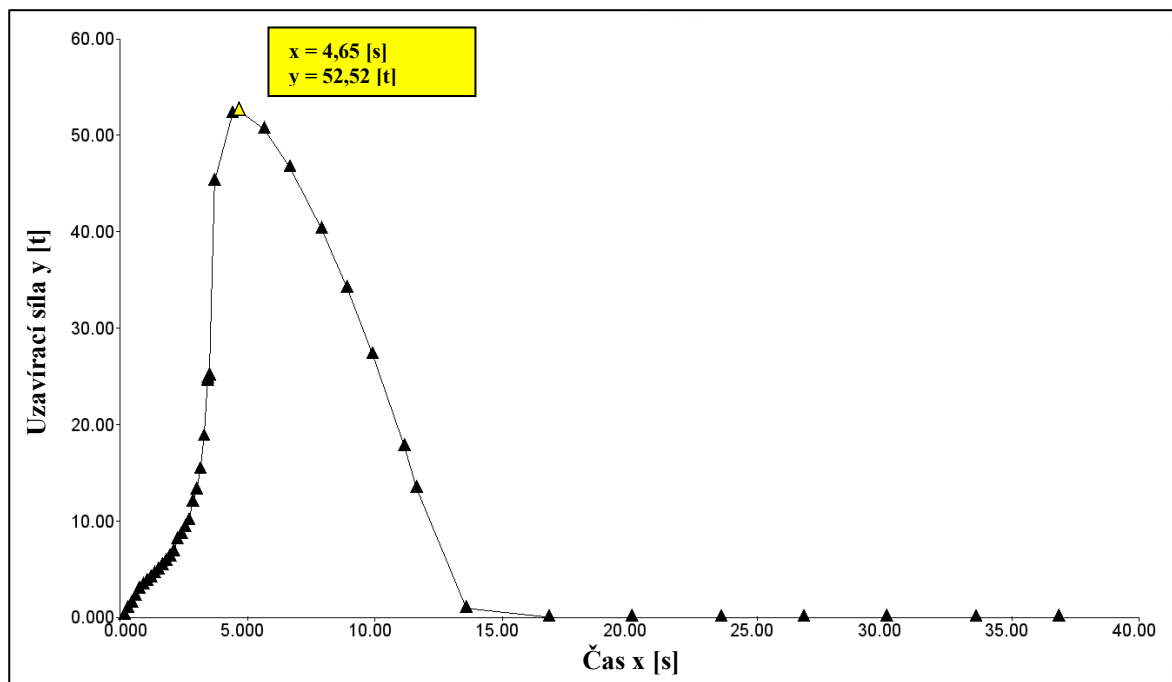
Vstřikovací stroj musí být schopen během cyklu vyvinout vstřikovací tlak, který odpovídá maximální hodnotě vstřikovacího tlaku povýšeného o bezpečnostní rezervu 10 %. Tato požadovaná hodnota činí 59,83 MPa. Zvolený vstřikovací stroj je ve zvoleném sestavení schopen vyvinout vstřikovací tlak až 180 MPa. Tento požadavek byl splněn s dostatečnou rezervou.



Obrázek 65 Průběh vstřikovacího tlaku v závislosti na čase v místě vtokového ústí v XY diagramu (Pressure at injection location: XY Plot)

11.4.6 Průběh uzavírací síly (Clamp force: XY Plot)

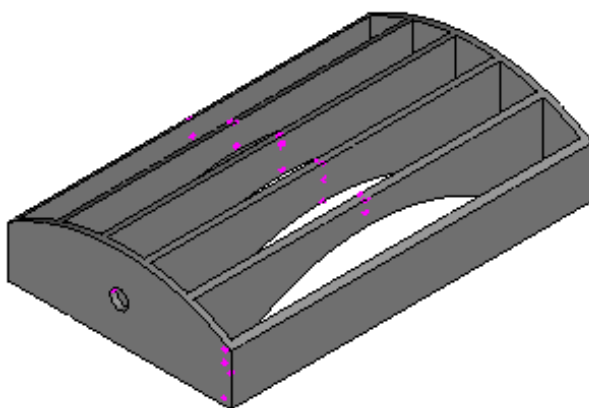
Diagram na obrázku 66 znázorňuje závislost uzavírací síly na čase. Uzavírací síla je uvedena v tunách (1 tuna je přibližně 9,81 kN). V čase 4,65 sekundy je potřeba maximální uzavírací síla, jejíž hodnota je 523,31 kN (52,52 t). Uzavírací síla by neměla překročit více než 80 % maximální uzavírací síly vstřikovacího stroje. Tato podmínka byla splněna, protože 523,31 kN (52,52 t) představuje pouze 13 % z maximální uzavírací síly vstřikovacího stroje.



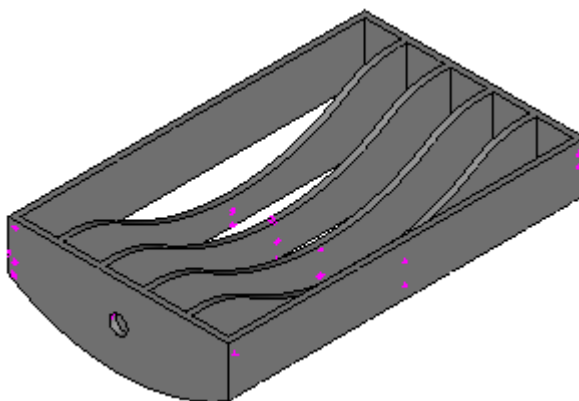
Obrázek 66 Průběh uzavírací síly v závislosti na čase v XY diagramu
(Clamp force: XY Plot)

11.4.7 Vzduchové kapsy (Air traps)

Na obrázcích 67 a 68 jsou pomocí růžových bodů znázorněna místa, kde hrozí tvorba vzduchových kapes a s tím spojené riziko uzavírání vzduchu. Jedná se o hrany výstřiku a oblasti výskytu studených spojů. Uzavřením vzduchu vzniká možnost jeho prudkého stlačení, které je doprovázeno výrazným nárůstem teploty. V důsledku zvýšené teploty hrozí v lokálních oblastech vznik spálených míst na výstřiku. Vzduchové kapsy mohou také způsobit tvorbu bublin na povrchu nebo uvnitř výstřiku.



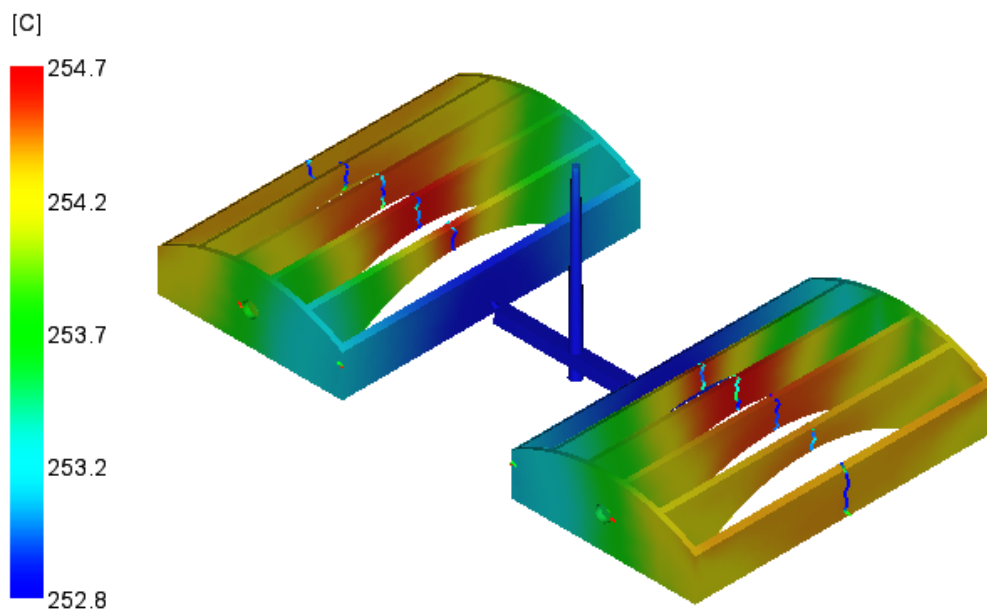
Obrázek 67 Vzduchové kapsy (Air traps)



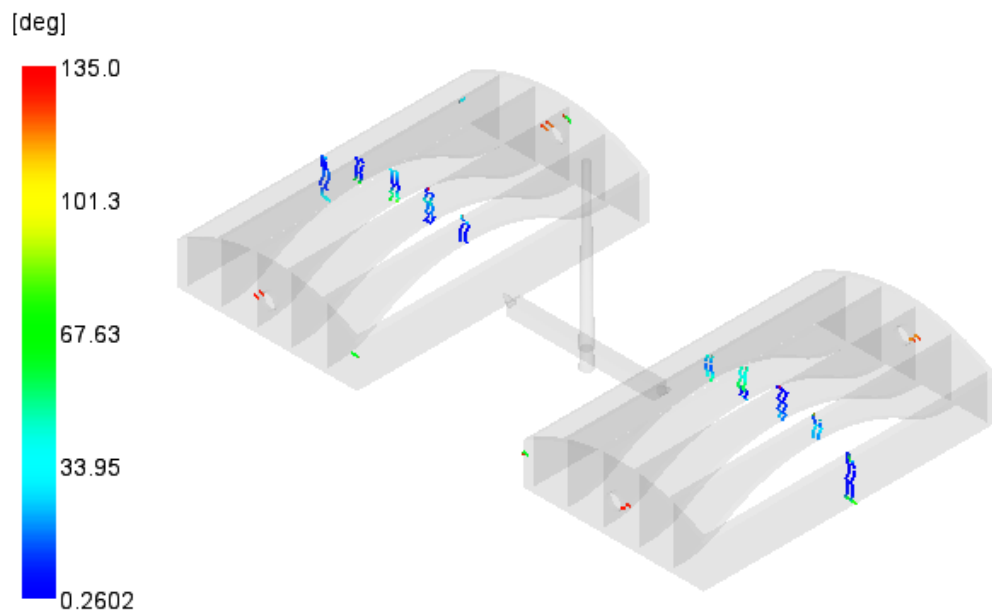
Obrázek 68 Vzduchové kapsy (pohled ze strany vyhazovačů)

11.4.8 Studené spoje (Weld lines)

Z obrázků 69 a 70 je na první pohled patrné, že studené spoje vznikají uprostřed vnitřních žebér výstřiku v místech nejmenšího průřezu. V další kapitole diplomové práce bude optimalizace studených spojů podrobněji rozebrána. Cílem bude přesunout studené spoje do mechanicky méně namáhaných oblastí a zároveň dosáhnout jejich nejvyšší kvality.



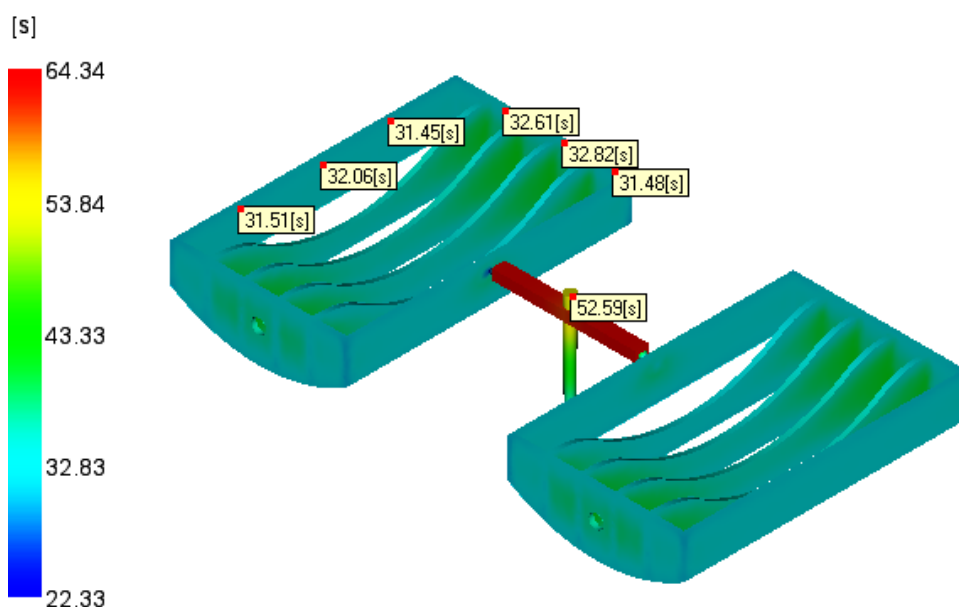
Obrázek 69 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů



Obrázek 70 Studené spoje (Weld lines)

11.4.9 Čas pro dosažení vyhazovací teploty (Time to reach ejection temperature)

Na obrázku 71 jsou zobrazeny časy, které jsou potřebné pro dosažení vyhazovací teploty, a to v různých místech na výstřiku. Bezpečné vyhození výstřiku není podmíněno dosažením vyhazovací teploty ve všech místech, ale z hlediska tuhosti jsou klíčová místa, ve kterých působí vyhazovače. Problémovou oblastí je vtokový systém, protože pro bezpečné ochlazení v okolí přidržovače vtoku je potřeba téměř 53 sekund, což výrazně prodlouží vstřikovací cyklus.

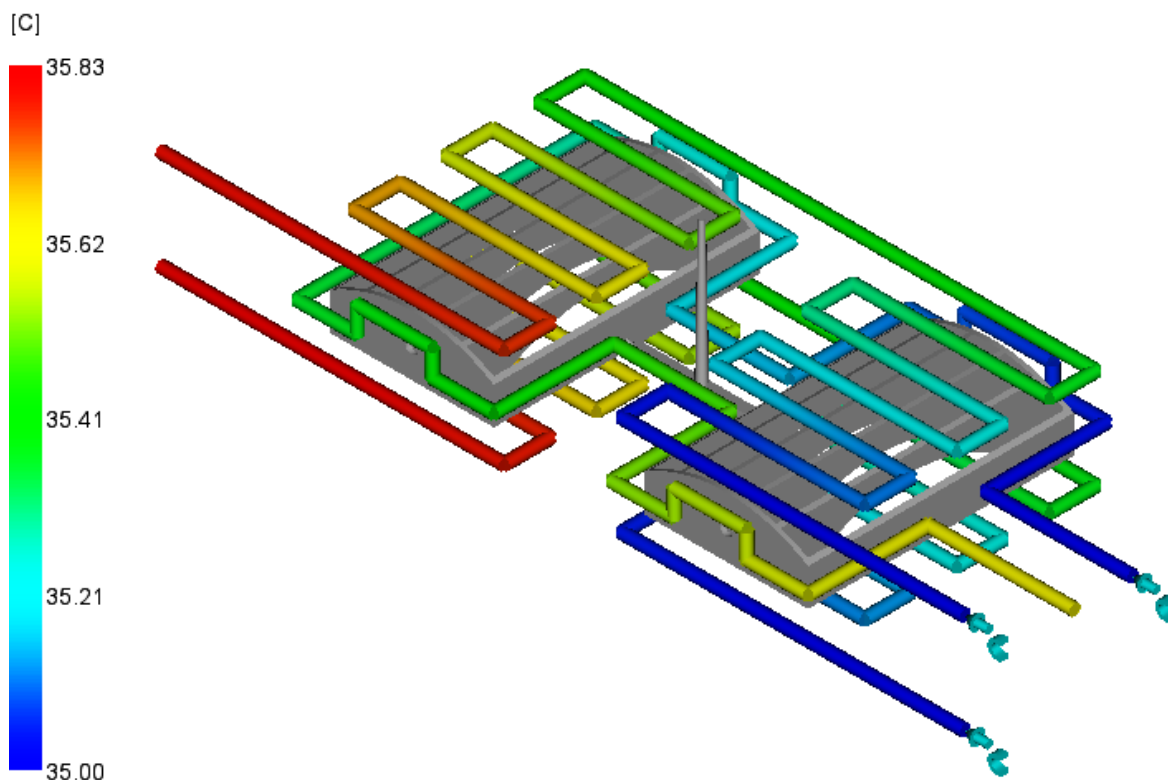


Obrázek 71 Čas pro dosažení vyhazovací teploty (Time to reach ejection temperature)

11.5 Výsledky analýzy chlazení

11.5.1 Teplota média v temperačním okruhu (Circuit coolant temperature)

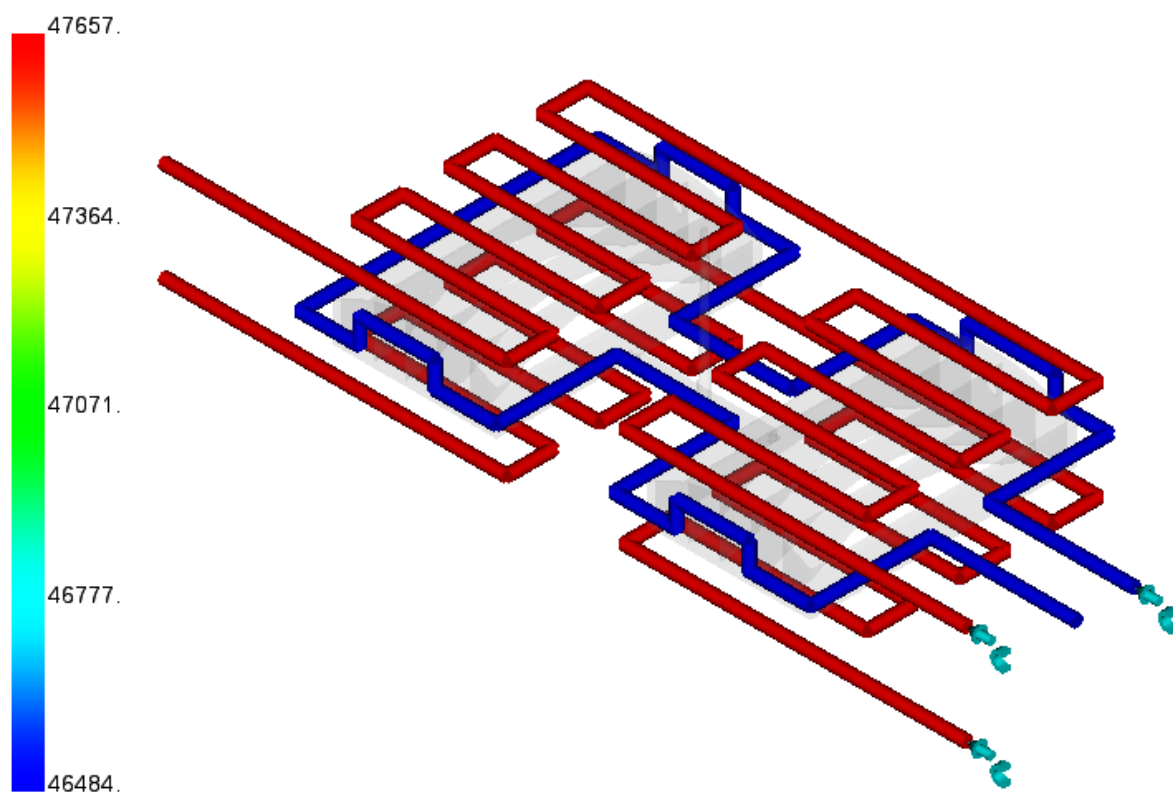
Rozdíl teplot temperačního média na vstupu a na výstupu by neměl přesahovat hodnotu 3 °C. V opačném případě je žádoucí zajistit větší průtok temperačního média nebo upravit geometrii temperačního systému. Na obrázku 72 je zobrazen průběh teploty temperačního média v temperačním okruhu. Rozdíl teplot temperačního média na vstupu a výstupu činí 0,83 °C, takže podmínka byla splněna.



Obrázek 72 Teplota média v temperačním okruhu (Circuit coolant temperature)

11.5.2 Reynoldsovo kritérium (Circuit Reynolds number)

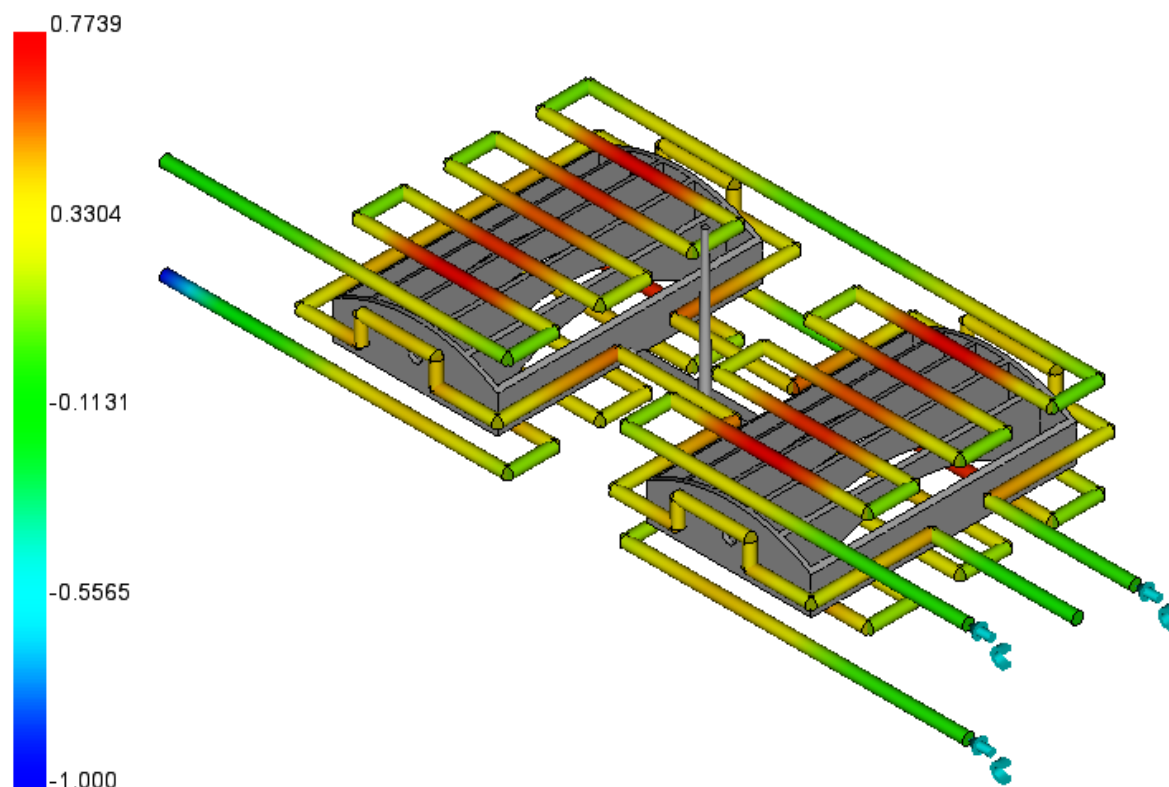
Turbulentní typ proudění temperačního média má zásadní vliv na efektivní odvod tepla během vstřikovacího procesu. Turbulentnímu proudění odpovídá hodnota Reynoldsova čísla vyšší než 10 000. Z obrázku 73 vyplývá, že tato podmínka je splněna a proudění je ve všech oblastech temperačního systému turbulentní, neboť minimální hodnota Reynoldsova čísla je 46 484.



Obrázek 73 Reynoldsovo kritérium (Circuit Reynolds number)

11.5.3 Efektivita odvodu tepla (Circuit heat removal efficiency)

Na obrázku 74 je zobrazena efektivita odvodu tepla v jednotlivých oblastech temperačního systému pomocí barevné škály. V oblastech s kladnými hodnotami dochází ke chlazení, v zápornými hodnotami k přívodu tepla. K přívodu tepla může docházet např. tehdy, má-li temperační médium na vstupu vyšší teplotu, než je požadovaná teplota povrchu vstřikovací formy.

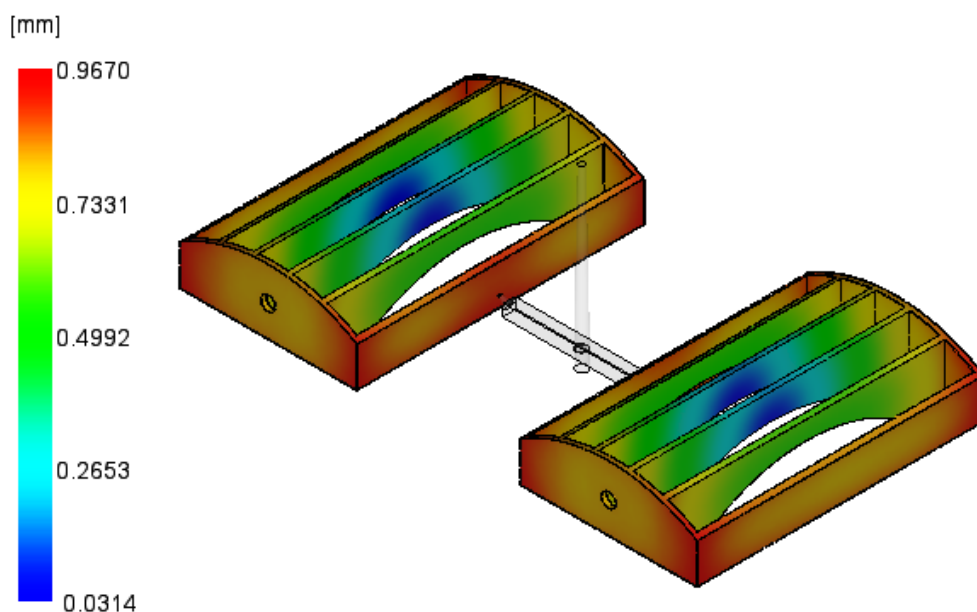


Obrázek 74 Efektivita odvodu tepla (Circuit heat removal efficiency)

11.6 Výsledky analýzy smrštění a deformace

11.6.1 Deformace vlivem všech efektů (Deflection, all effects: Deflection)

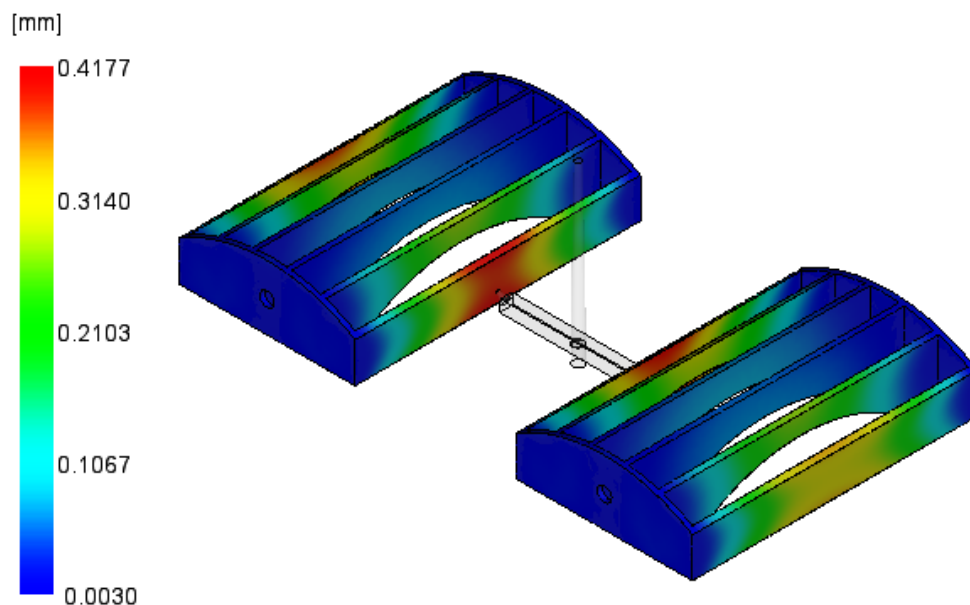
Výsledek zobrazuje celkovou deformaci výstřiku (odchylku od jeho referenčního tvaru), která vzniká vlivem působení všech efektů (smrštění, chlazení i orientace vláken). Na obrázku 75 jsou tyto deformace znázorněny pomocí barevné škály. V oblastech označených červenou barvou vznikají největší deformace (maximální hodnota deformace je přibližně 0,97 mm), zatímco v modře značených oblastech jsou deformace prakticky minimální.



Obrázek 75 Deformace vlivem všech efektů (Deflection, all effects: Deflection)

11.6.2 Deformace vlivem chlazení (Deflection, differential cooling: Deflection)

Výsledek zobrazuje celkovou deformaci výstřiku (odchylku od jeho referenčního tvaru), která je způsobena pouze vlivem chlazení. Na obrázku 76 jsou tyto deformace znázorněny pomocí barevné škály. V oblastech označených červenou barvou vznikají největší deformace (maximální hodnota deformace je přibližně 0,42 mm), zatímco v modře značených oblastech jsou deformace prakticky minimální.



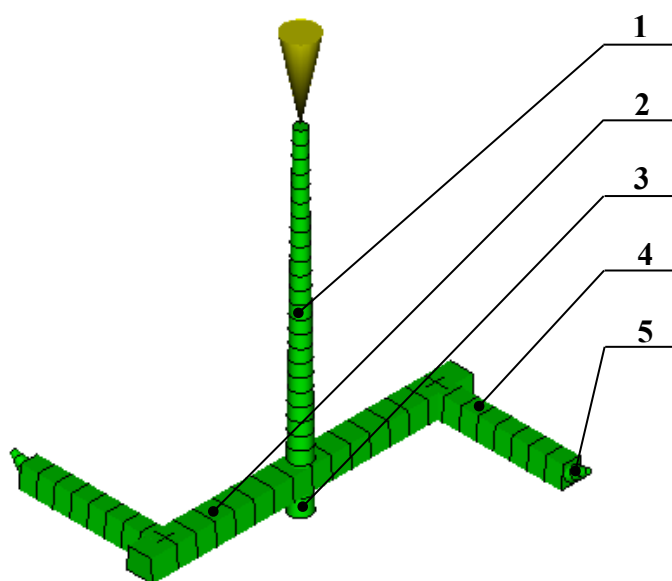
Obrázek 76 Deformace vlivem chlazení (Deflection, differential cooling: Deflection)

12 OPTIMALIZACE STUDENÝCH SPOJŮ

V rámci optimalizace studených spojů byly postupně zkoumány vlivy polohy vtokového ústí, velikosti vtokového ústí, volby materiálu a procesních podmínek.

12.1 Vliv polohy vtokového ústí

Byly navrženy a postupně simulovány čtyři různé varianty umístění vtokového ústí, přičemž cílem byl přesun studených spojů do mechanicky méně namáhaných oblastí. Vtokový systém byl doplněn o odstupňované větve rozvodných kanálů lichoběžníkového průřezu.



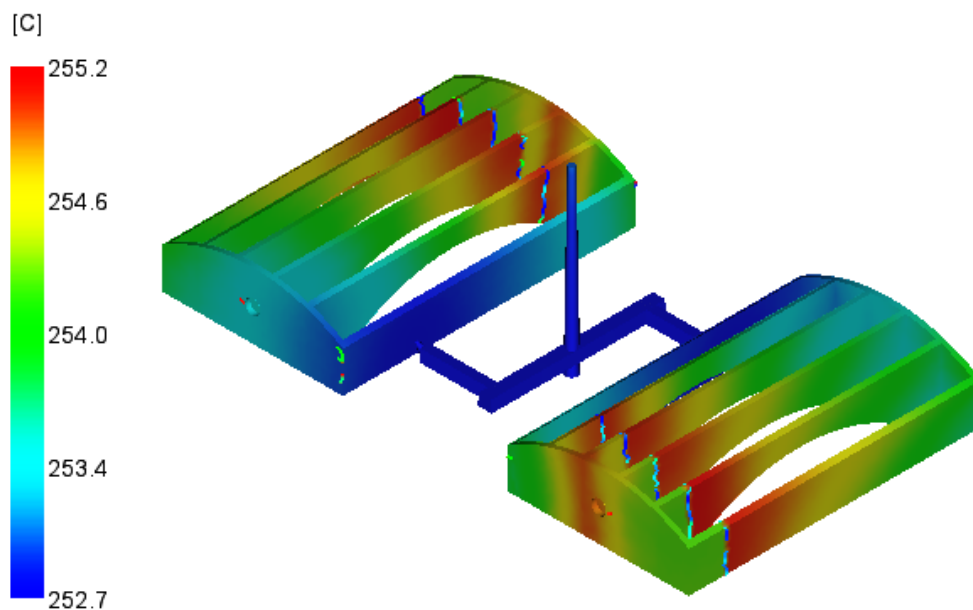
Obrázek 77 Vysíťovaný vtokový systém (varianta č. 1)

Tabulka 9 Rozměrové parametry jednotlivých úseků vtokového systému

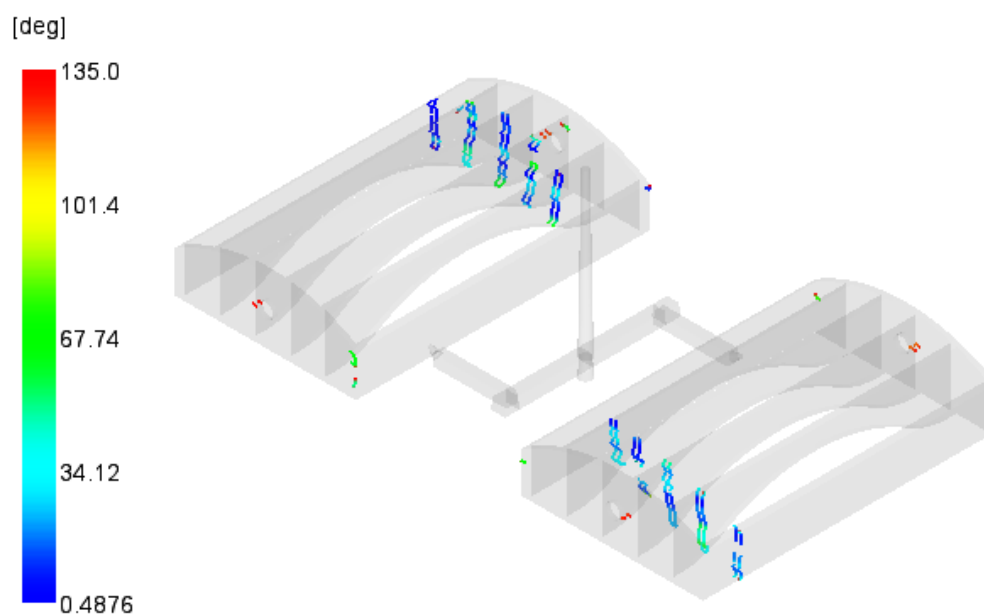
Úsek	Název	Typ	Parametr
1	Studená vtoková vložka (Cold sprue)	Kuželový	$d_{\text{start}} = 5 \text{ mm}$ $d_{\text{end}} = 9 \text{ mm}$
2	Studený rozvodný kanál (Cold runner)	Lichoběžníkový	$TW = 11 \text{ mm}$ $BW = 9,5 \text{ mm}$ $H = 9 \text{ mm}$
3	Přidržovač vtoku (Cold runner)	Kuželový	$d_{\text{start}} = 9 \text{ mm}$ $d_{\text{end}} = 8 \text{ mm}$
4	Studený rozvodný kanál (Cold runner)	Lichoběžníkový	$TW = 9 \text{ mm}$ $BW = 9 \text{ mm}$ $H = 7 \text{ mm}$
5	Vtokové ústí (Cold gate)	Kuželový	$d_{\text{start}} = 2,3 \text{ mm}$ $d_{\text{end}} = 6,5 \text{ mm}$

12.1.1 Varianta č. 1

Posunutím vtokového ústí dále od středu došlo k výraznému odklonu studených spojů ze středu vnitřních žebér výstřiku směrem k jeho boční stěně. Studené spoje jsou nyní výrazně delší (přesunuly se do oblasti vnitřních žebér s většími rozměry). Rozdíl v jejich orientaci je však minimální. Z hlediska teploty dochází ke styku čel taveniny při průměrně vyšších teplotách, rozdíl je však zanedbatelný, neboť činí pouze 0,5 °C.



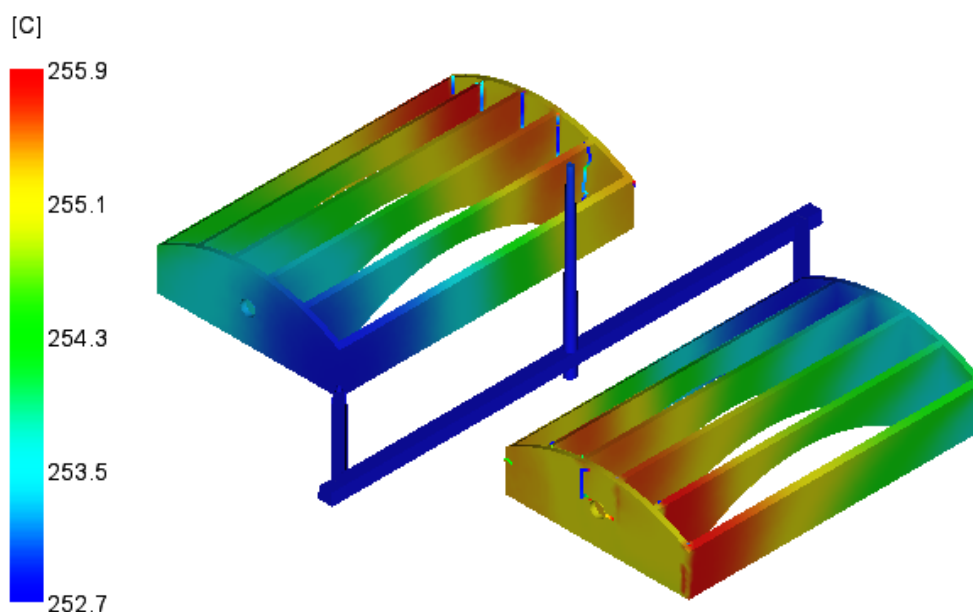
Obrázek 78 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (varianta č. 1)



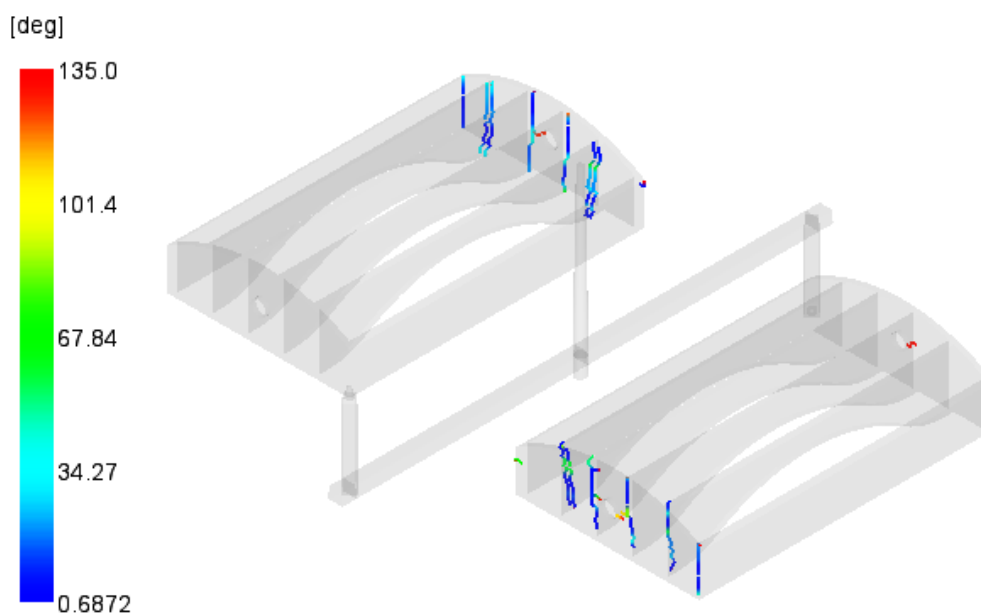
Obrázek 79 Studené spoje (varianta č. 1)

12.1.2 Varianta č. 2

Vtokové ústí umístěné v rohu způsobilo téměř úplný přesun studených spojů do oblasti boční stěny. Na první pohled vzniká méně studených spojů, avšak v některých místech se nadále částečně vytvářejí i na vnitřních žebrech a pod úhlem. Studené spoje jsou delší, ale jejich průběh je více příčný. Lokálně lze pozorovat, že ke styku čel taveniny dochází pod mírně příznivějšími úhly a při vyšších teplotách, přičemž teplotní rozdíl je opět zanedbatelný, neboť činí pouze 1,2 °C.



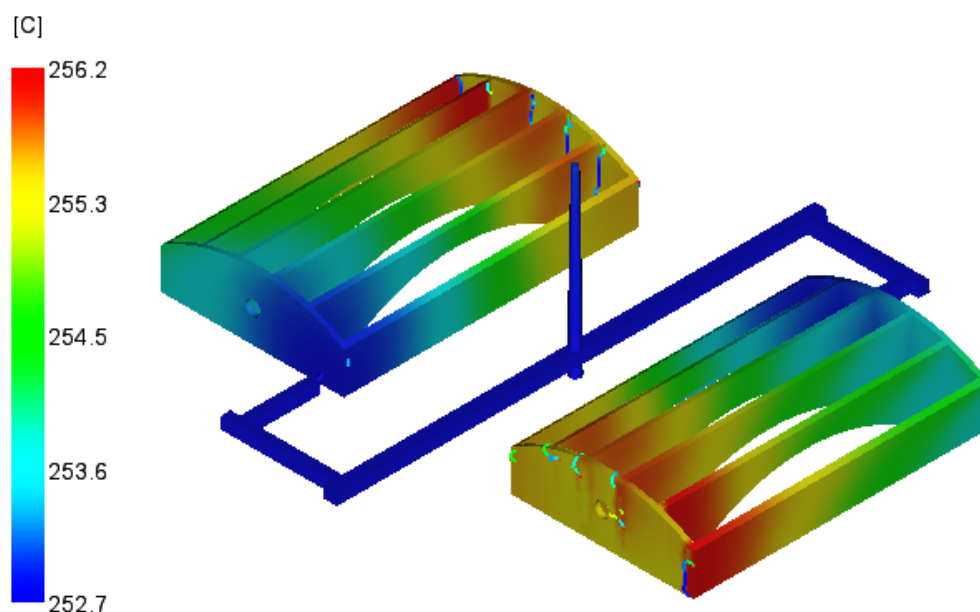
Obrázek 80 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (varianta č. 2)



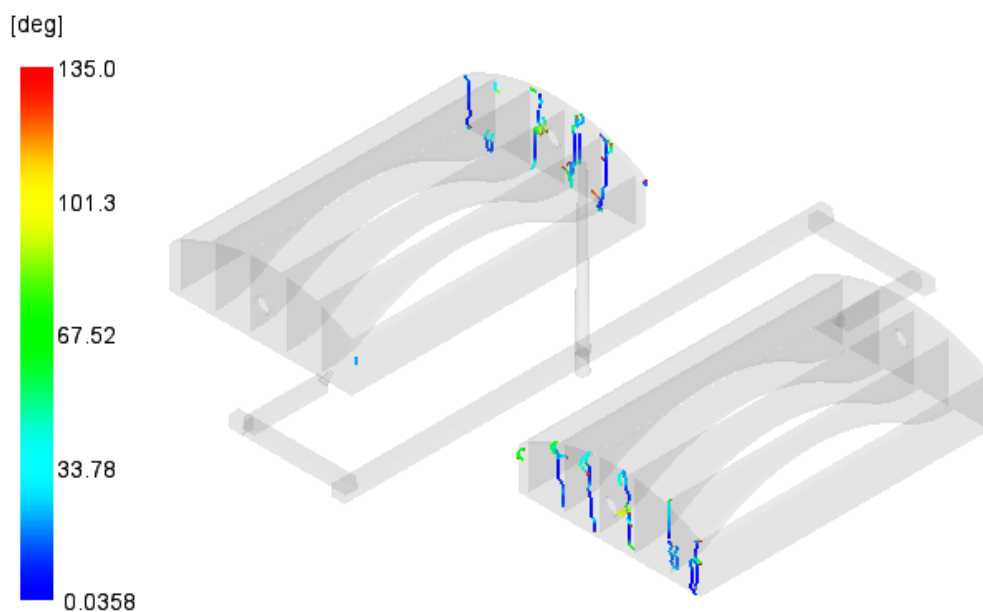
Obrázek 81 Studené spoje (varianta č. 2)

12.1.3 Varianta č. 3

Posunutím vtokového ústí do boční stěny výstřiku došlo, stejně jako u předchozí varianty, k téměř úplnému přesunu studených spojů do oblasti protilehlé stěny a blíže k otvoru kruhového průřezu. Na první pohled opět vzniká méně studených spojů, avšak v některých místech se nadále částečně tvoří i na vnitřních žebrech a pod úhlem. Vzniklé studené spoje jsou navíc výrazně delší. Ke styku čel taveniny lokálně dochází při vyšších teplotách, přičemž teplotní rozdíl činí 1,5 °C.



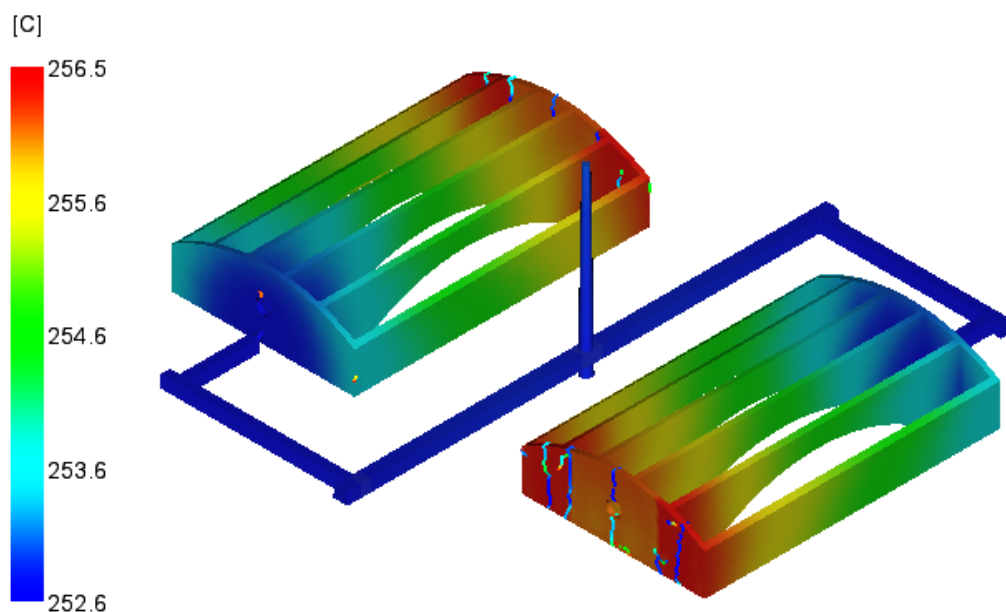
Obrázek 82 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (varianta č. 3)



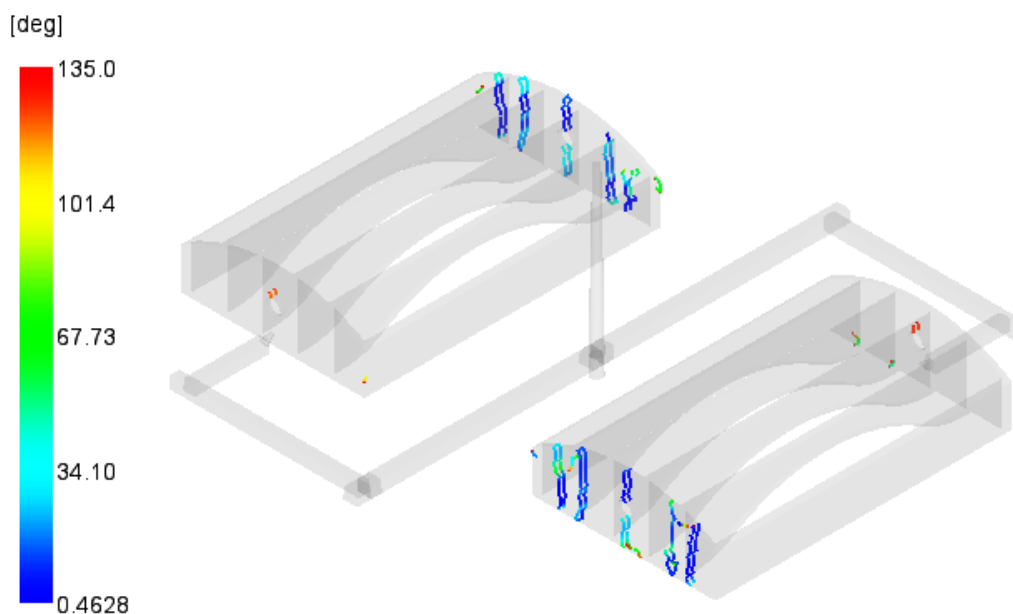
Obrázek 83 Studené spoje (varianta č. 3)

12.1.4 Varianta č. 4

Posunutím vtokového ústí do boční stěny výstřiku došlo k přesunu studených spojů do oblasti protilehlé stěny. Ty se formují relativně příčně po celé její výšce, přičemž se tvoří i uprostřed stěny v oblasti kruhového otvoru. Ke styku čel taveniny dochází místy pod mírně příznivějšími úhly a při mírně vyšších teplotách (rozdíl činí 2 °C). Tato varianta si vyžaduje výrazné konstrukční úpravy vstřikovací formy (nahrazení bočního odformování pružnou vyhazovací jednotkou, úprava temperačního i vyhazovacího systému). S ohledem na polohu vzniku studených spojů se však jedná o nejprůběžnější variantu.



Obrázek 84 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (varianta č. 4)



Obrázek 85 Studené spoje (varianta č. 4)

12.1.5 Dosažené výsledky – vliv polohy vtokového ústí

V tabulce 10 jsou uvedeny základní výsledky provedených simulací pro všechny navržené konfigurace vtokového systému.

Tabulka 10 Souhrn základních výsledků – vliv polohy vtokového ústí

	Doba plnění [s]	Teplota taveniny [°C]	Smyková deformace [s⁻¹]	Celková deformace [mm]
Původní návrh	3,49	263,2	29 842	0,97
Varianta č. 1	3,43	263,7	30 794	0,97
Varianta č. 2	3,71	264,5	29 829	0,95
Varianta č. 3	3,76	265,3	29 943	0,94
Varianta č. 4	3,42	266,4	35 185	0,94

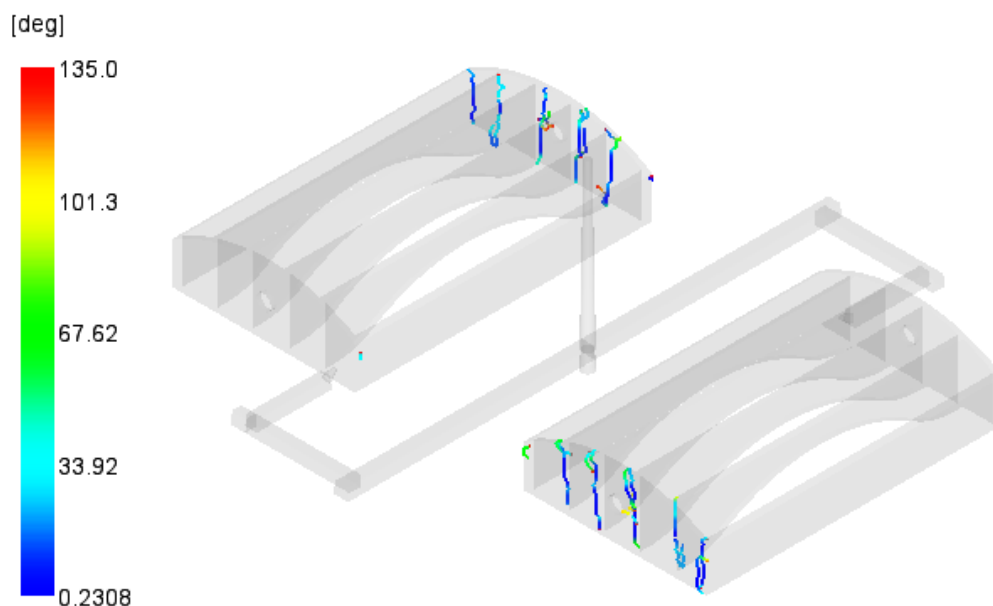
Odkloněním vtokového ústí od původní polohy došlo k přesunu studených spojů blíže k boční stěně výstřiku, případně k jejich úplnému přesunu do této oblasti. Studené spoje jsou zpravidla výrazně delší. Varianty č.1 a č. 2 představují zajímavé optimalizační řešení ve srovnání s původní variantou, nicméně varianty č. 3 a č. 4, které se vyznačují umístěním vtokového ústí do boční stěny výstřiku, vykazovaly lepší výsledky.

Za vhodné řešení lze považovat variantu č. 3. Tato varianta nabízí příznivý průběh plnění i rozložení studených spojů s vhodností umístění vtokového ústí přibližně 32 %. Plnění probíhá ve směru vnitřních žebor. Navíc není nutné provádět nikterak složité konstrukční úpravy vstřikovací formy.

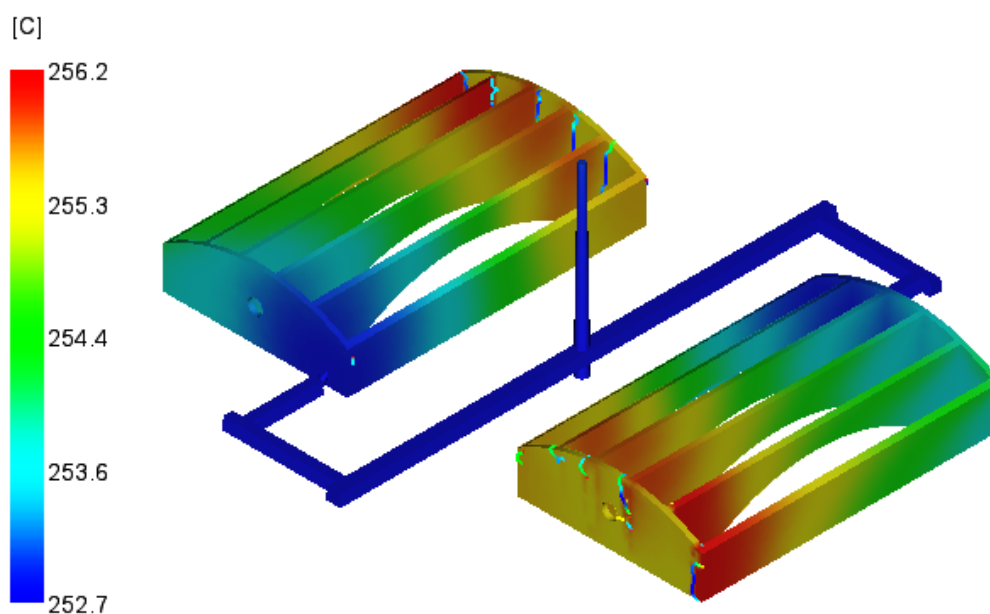
Z hlediska polohy studených spojů se však jako nejvhodnější jeví optimalizační varianta č. 4, kdy studené spoje vznikají pouze v oblasti boční stěny výstřiku, nikoliv ve vnitřních žebrech. Vhodnost umístění vtokového ústí dosahuje dle analýz přibližně 97 %. Celkové deformace jsou nepatrně nižší, doba plnění nejkratší a probíhá rovněž ve směru vnitřních žebor. Nevýhodou je zvýšená rychlost smykové deformace v místě vtoku a nutnost rozsáhlých konstrukčních úprav vstřikovací formy.

12.2 Vliv velikosti vtokového ústí

Průměr kuželového konce vtokového ústí byl zvětšen na 2,7 mm (původně 2,3 mm), přičemž simulace byla provedena pro optimalizovaný vtokový systém (poloha vtokového ústí – varianta č. 3).



Obrázek 86 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (vliv velikosti vtokového ústí)



Obrázek 87 Studené spoje (vliv velikosti vtokového ústí)

Změna velikosti vtokového ústí nevedla k žádným zásadním změnám. Byly zaznamenány pouze nepatrné lokální odchylky v orientaci setkání taveninových čel.

12.2.1 Dosažené výsledky – vliv velikosti vtokového ústí

V tabulce 11 jsou uvedeny základní výsledky simulací zaměřených na posouzení vlivu velikosti vtokového ústí.

Tabulka 11 Souhrn základních výsledků – vliv velikosti vtokového ústí

	Doba plnění [s]	Teplota taveniny [°C]	Smyková deformace [s⁻¹]	Celková deformace [mm]
Původní vtokové ústí	3,76	265,3	29 943	0,97
Zvětšené vtokové ústí	3,77	265,1	21 817	0,94

Z hlediska vzniku studených spojů neměla změna velikosti vtokového ústí prakticky žádný vliv. Byly zaznamenány pouze nepatrné lokální odchylky v orientaci setkání taveninových čel. Větší velikost vtokového ústí však měla výrazný vliv na snížení rychlosti smykové deformace v jeho místě. Nevýhodou může být výraznější stopa po vtoku či jeho obtížnější oddělení od výstřiku.

12.3 Vliv volby materiálu výstřiku

Postupně byl posuzován vliv ITT materiálu, jeho chemického složení a přítomnosti plniva ve struktuře na vznik studených spojů. Zpracovatelské podmínky byly pro každý materiál voleny individuálně na základě doporučení softwaru Moldflow. Všechny simulace byly provedeny s optimalizovaným vtokovým systémem (poloha vtokového ústí – varianta č. 3).

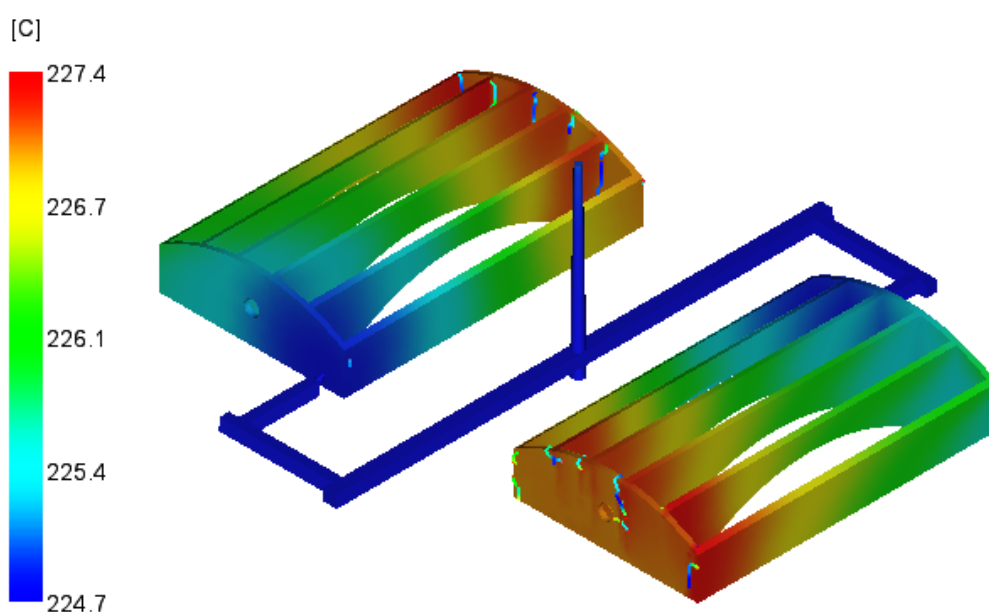
12.3.1 Materiál č. 1 (Posouzení vlivu ITT)

Hodnota ITT posuzovaného materiálu (70 g/10 min) byla výrazně vyšší než u původního materiálu (3,3 g/10 min). V obou případech se jedná o termoplast typu ABS.

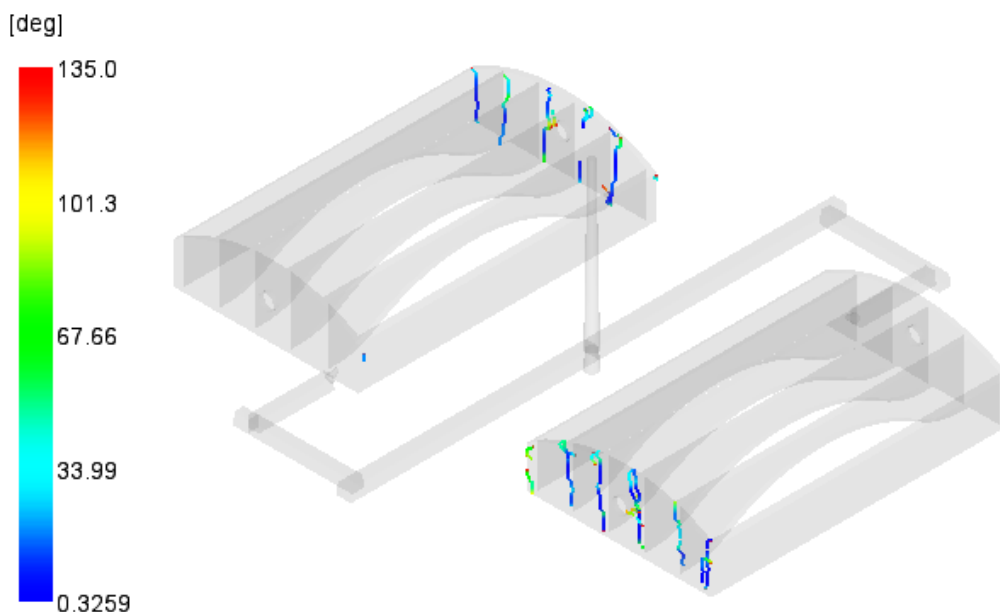
- Výrobce a označení: **LG Chem, AF365F-L**

Tabulka 12 Zpracovatelské parametry materiálu AF365F-L [41]

Zpracovatelský parametr	Hodnota	Jednotka
Doporučené rozpětí teploty formy	40 ÷ 80	°C
Doporučený rozpětí teploty taveniny	200 ÷ 250	°C
Degradační teplota taveniny	300	°C
Vyhazovací teplota	89	°C
Maximální smykové napětí	0,3	MPa
Maximální rychlost smykové deformace	50 000	s ⁻¹
Index toku taveniny (230 °C / 3,8 kg)	70	g/10 min
Objemové smrštění	0,4 ÷ 0,7	%



Obrázek 88 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (materiál č.1)



Obrázek 89 Studené spoje (materiál č.1)

Vliv vyššího ITT na vznik studených spojů je zřetelný. U materiálu s vyšším ITT se studené spoje tvoří blíže boční stěně výstřiku a čela taveniny se ve většině případů setkávají pod příznivějšími úhly. Na první pohled mají vzniklé studené spoje rovnější průběh a jsou místy kratší.

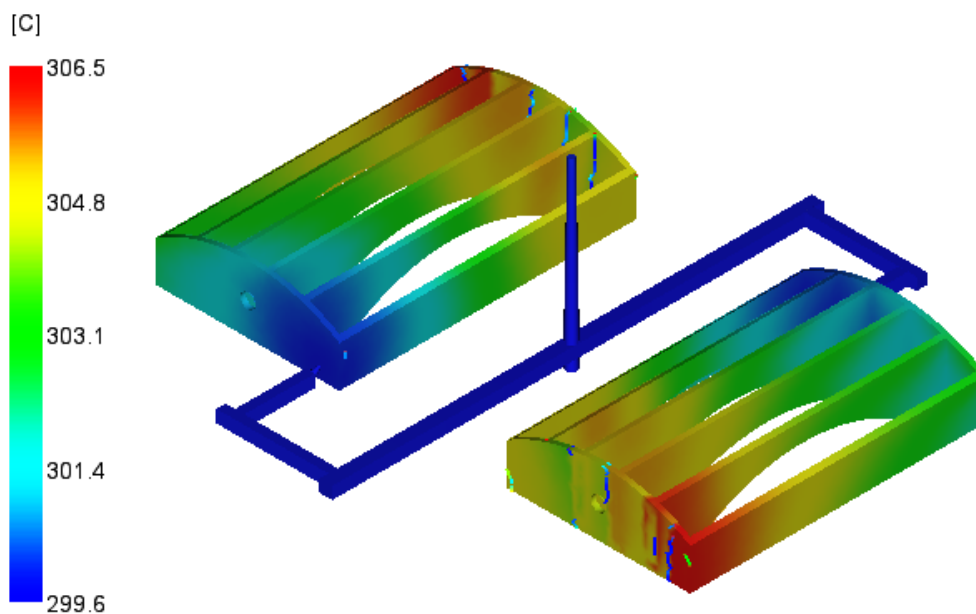
12.3.2 Materiál č. 2 (Posouzení chemického složení)

Vliv rozdílného chemického složení materiálu byl zkoumán na materiálu s podobnou hodnotou ITT jako u původního materiálu, avšak jednalo se o termoplast typu PC.

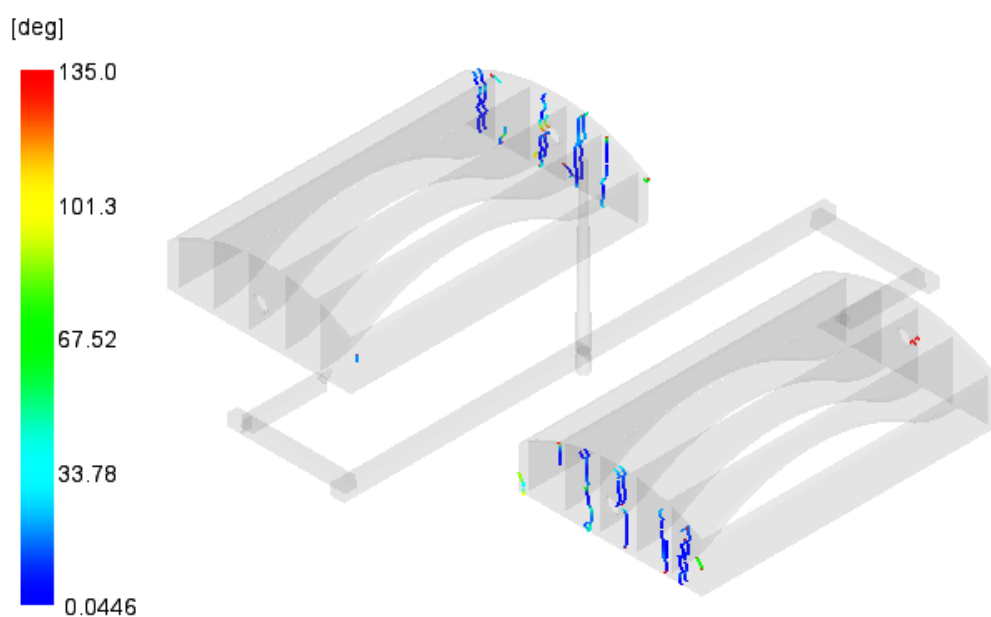
- Výrobce a označení: **Covestro, Makrolon 6717**

Tabulka 13 Zpracovatelské parametry materiálu Makrolon 6717 [42]

Zpracovatelský parametr	Hodnota	Jednotka
Doporučené rozpětí teploty formy	80 ÷ 120	°C
Doporučený rozpětí teploty taveniny	280 ÷ 320	°C
Degradační teplota taveniny	360	°C
Vyhazovací teplota	130	°C
Maximální smykové napětí	0,5	MPa
Maximální rychlost smykové deformace	40 000	s ⁻¹
Index toku taveniny (230 °C / 3,8 kg)	3	g/10 min
Objemové smrštění	0,8	%



Obrázek 90 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (materiál č. 2)



Obrázek 91 Studené spoje (materiál č. 2)

Lépe tekoucí materiál (PC) napomáhá výraznému přesunu studených spojů do oblasti boční stěny. Na první pohled mají vzniklé studené spoje mírně souvislejší průběh.

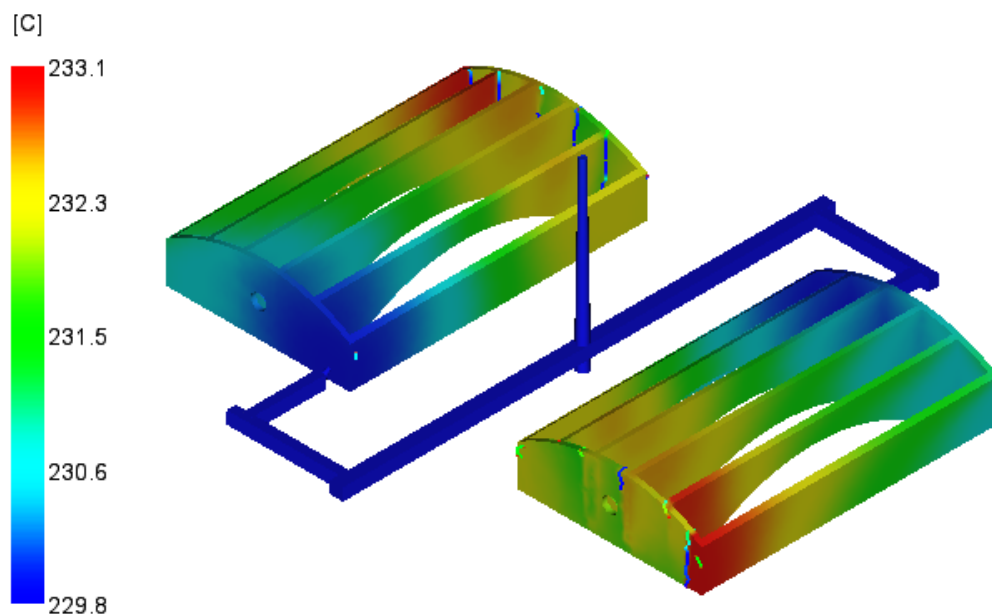
12.3.3 Materiál č. 3 (Posouzení vlivu plniva)

Vliv plniva byl zkoumán na stejném typu materiálu jako v původním případě (ABS), avšak plněném ze 30 % skelným vláknem.

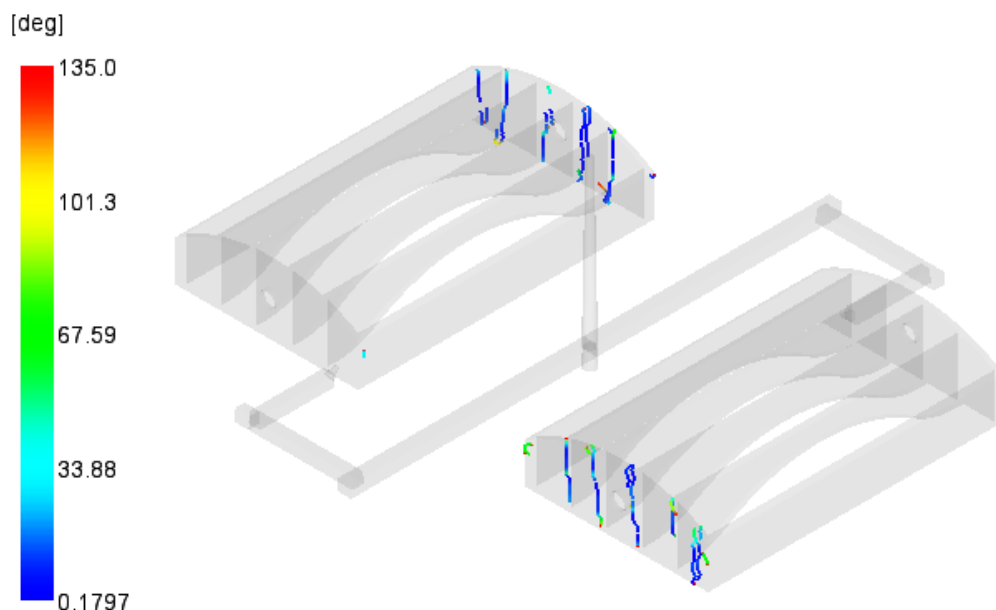
- Výrobce a označení: **LG Chem, LUPOS GP-2300**

Tabulka 14 Zpracovatelské parametry materiálu LUPOS GP-2300 [43]

Zpracovatelský parametr	Hodnota	Jednotka
Doporučené rozpětí teploty formy	25 ÷ 80	°C
Doporučený rozpětí teploty taveniny	200 ÷ 280	°C
Degradační teplota taveniny	320	°C
Vyhazovací teplota	88	°C
Maximální smykové napětí	0,28	MPa
Maximální rychlost smykové deformace	12 000	s ⁻¹
Index toku taveniny (230 °C / 3,8 kg)	1,5	g/10 min
Objemové smrštění	0,1 ÷ 0,3	%



Obrázek 92 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (materiál č. 3)



Obrázek 93 Studené spoje (materiál č. 3)

U plněného materiálu došlo k mírné změně polohy vzniku studených spojů, které se přesunuly blíže k oblasti boční stěny a jsou více příčné. Lokálně lze pozorovat lepší orientaci setkávání čel taveniny.

12.3.4 Dosažené výsledky – vliv volby materiálu výstřiku

V tabulce 15 jsou uvedeny základní výsledky provedených simulací pro všechny porovnávané materiály.

Tabulka 15 Souhrn základních výsledků – vliv volby materiálu výstřiku

	Doba plnění [s]	Teplota taveniny [°C]	Smyková deformace [s ⁻¹]	Čas pro vyhození [s]
Původní materiál	3,76	265,3	29 943	65,21
Materiál č. 1 (vliv ITT)	4,53	237,4	24 902	76,20
Materiál č. 2 (PC)	5,83	321,1	21 002	64,05
Materiál č. 3 (vliv plniva)	5,74	240,5	19 328	88,11

Vyšší ITT umožňuje vznik studených spojů v příznivějších oblastech výstřiku. Čela taveniny se při vzniku studených spojů setkávají pod výhodnějším úhlem, což přispívá jejich kvalitnějšímu spojení. Na první pohled mají vzniklé studené spoje rovnější průběh a jsou místy kratší. Nevýhodou může být vyšší čas pro dosažení vyhazovací teploty výstřiku.

Lépe tekoucí materiály (např. použitý PC) vyplňují tvarovou dutinu formy rovnoměrněji, lépe přenášejí tlak a podporují vznik studených spojů na výhodnějších místech. Vzniklé studené spoje mají mírně souvislejší průběh. Tyto materiály však obvykle vykazují horší fyzikálně-mechanické vlastnosti. Zároveň je nutné počítat s vyšší ekonomickou náročností zpracování kvůli vyšší zpracovatelské teplotě u těchto typů termoplastů.

Při volbě materiálu je důležité zohlednit i obsah zbytkové vlhkosti, která může před zpracováním výrazně ovlivnit reologické chování polymerní taveniny a s tím spojenou tvorbu studených spojů.

U plněného materiálu byly pozorovány mírné změny v poloze vzniku studených spojů, přičemž na první pohled tyto spoje vykazovaly rovnější průběh. Při vstřikování plněných materiálu dochází k tomu, že plnivo studený spoj nepřekračuje, což vede ke snížení jeho lokální koncentrace. Výsledný spoj je pak vizuálně výraznější a mechanicky méně odolný ve srovnání s neplněným materiálem. Nevýhodou je také vysoká rychlost smykové deformace v místě vtokového ústí a s tím spojené riziko degradace polymerní taveniny a delší čas pro vyhození výstřiku.

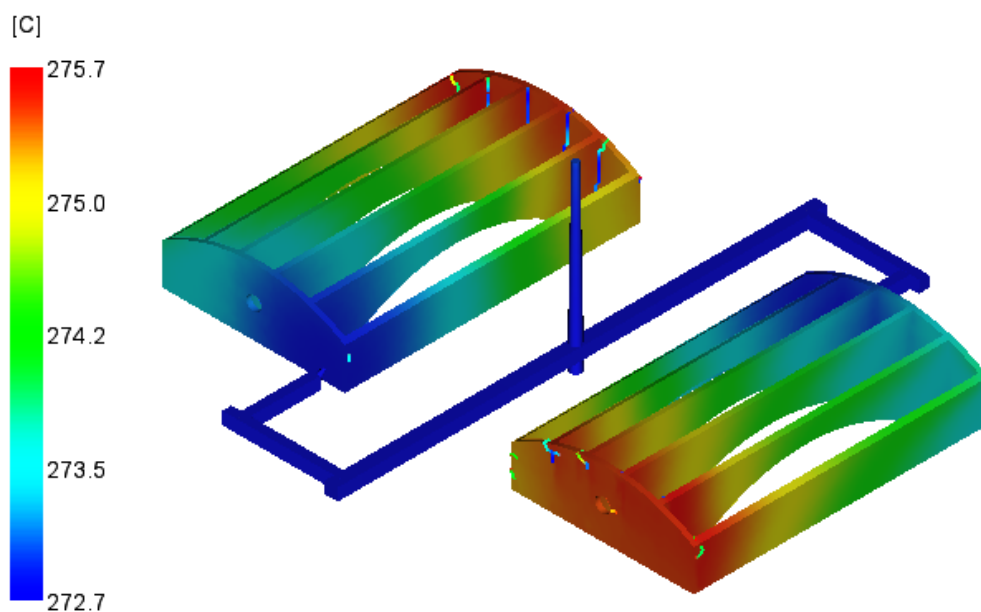
Přestože posuzované materiály vykazovaly v rámci optimalizačních analýz lepší výsledky z hlediska polohy vzniku studených spojů i příznivější orientaci setkávání čel taveniny, jejich použití se nejeví jako nikterak výhodnější. Ze všech posuzovaných materiálů se jako nejvhodnější varianta jeví PC. Vyplnění tvarové dutiny bylo rovnoměrné a doba potřebná pro dosažení vyhazovací teploty byla nižší než u původního materiálu. Nevýhodou však zůstává vyšší ekonomická náročnost procesu v důsledku vyšší zpracovatelské teploty. Všechny posuzované materiály pak vykazovaly výrazně delší dobu plnění ve srovnání s původním materiálem.

12.4 Vliv procesních podmínek

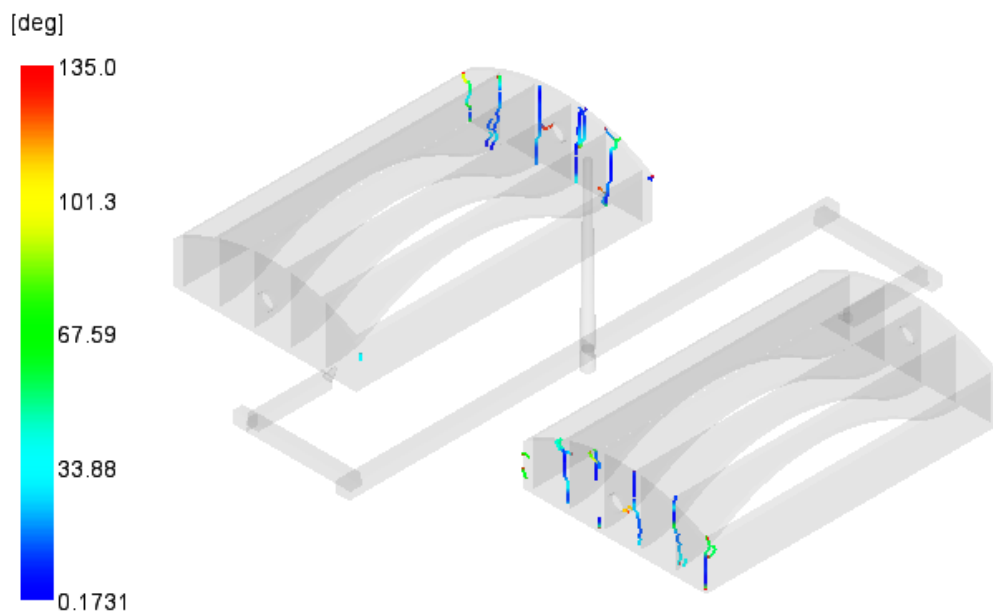
V rámci optimalizace studených spojů byl postupně posuzován vliv následujících procesních podmínek: vyšší teploty taveniny, vyšší teploty formy, prodloužené doby chlazení, prodloužené fáze dotlaku, dřívějšího sepnutí na fázi dotlaku, zvýšeného tlaku během fáze dotlaku, vyššího vstřikovacího tlaku a vstřikovací rychlosti, a dále také rozdílného teplotního pole vstřikovací formy. Všechny simulace byly provedeny s optimalizovaným vtokovým systémem (poloha vtokového ústí – varianta č. 3).

12.4.1 Vyšší teplota taveniny

Teplota taveniny byla zvýšena na 273 °C (původně 253 °C).



Obrázek 94 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (vyšší teplota taveniny)

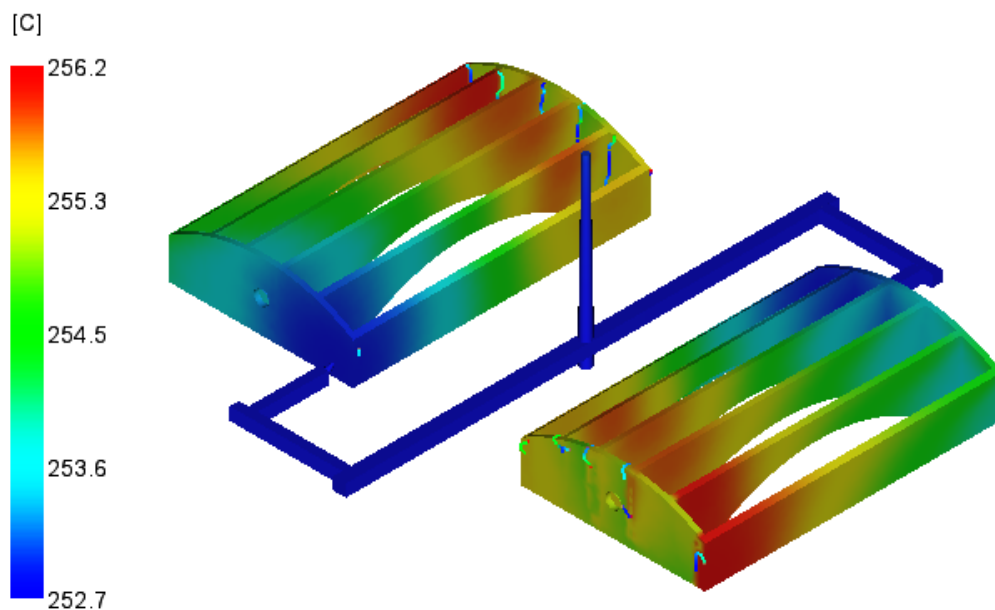


Obrázek 95 Studené spoje (vyšší teplota taveniny)

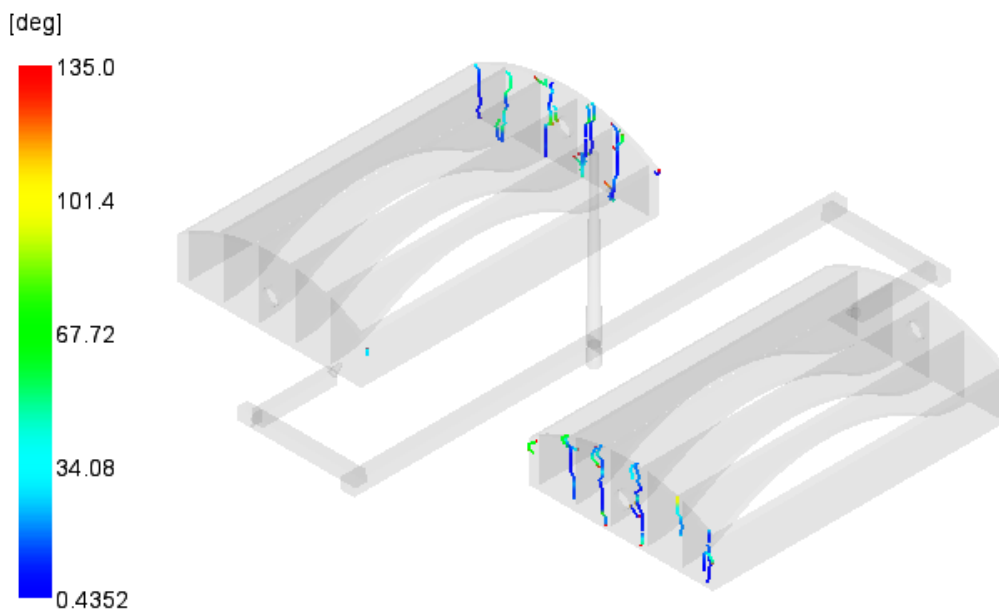
Zvýšení teploty taveniny vedlo k úbytku studených spojů, které navíc vykazovaly příznivější orientaci. Čela taveniny se setkávala při vyšší teplotě a pod mírně příznivějšími úhly, což mělo pozitivní dopad na výslednou kvalitu studených spojů.

12.4.2 Vyšší teplota formy

Teplota vstřikovací formy byla zvýšena na 82 °C (původně 65 °C).



Obrázek 96 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (vyšší teplota formy)

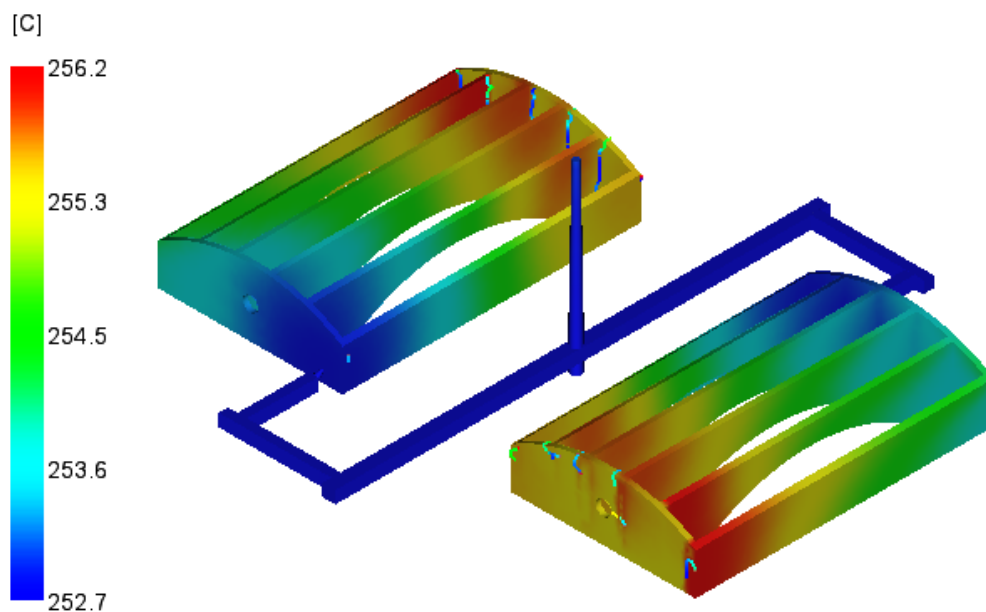


Obrázek 97 Studené spoje (vyšší teplota formy)

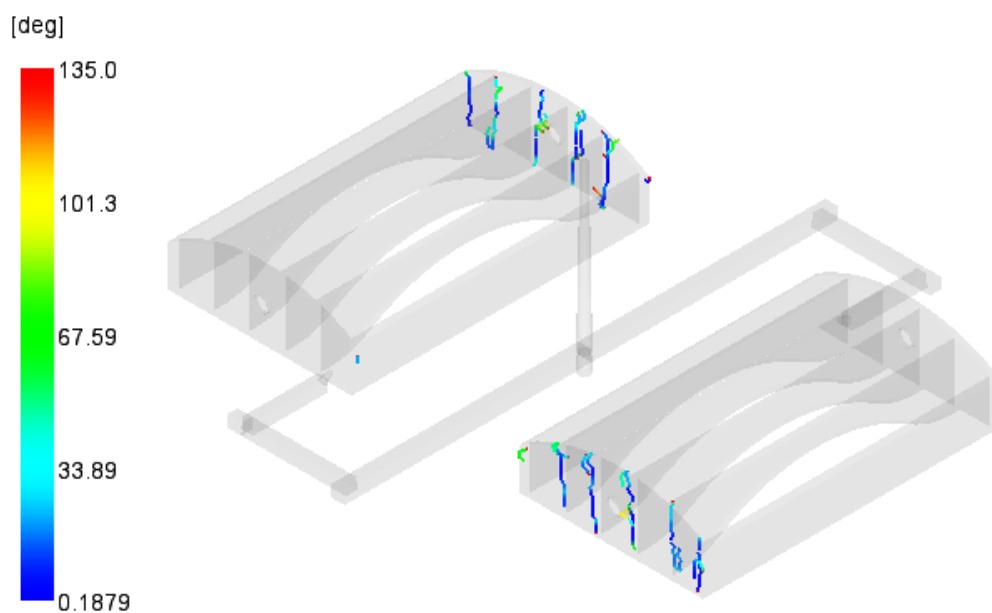
Zvýšení teploty formy vedlo v určitých místech k mírnému zlepšení úhlu setkání taveninových čel, což se projevilo nepatrným zvýšením kvality studených spojů.

12.4.3 Prodloužená doba chlazení

Minimální procento zatuhlých bylo navrženo na 100 % (původně 90 %).



Obrázek 98 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (prodloužená doba chlazení)

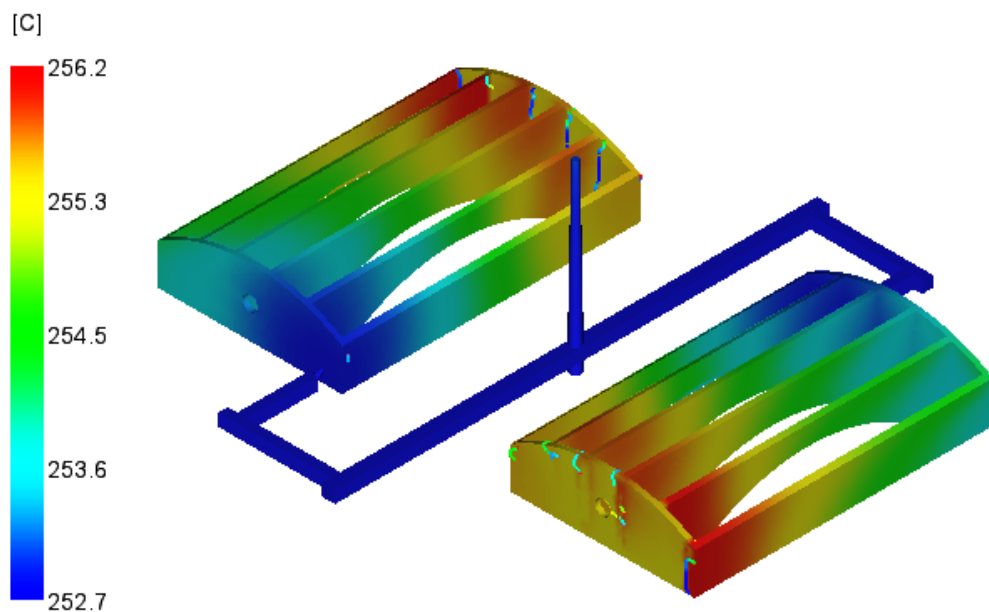


Obrázek 99 Studené spoje (prodloužená doba chlazení)

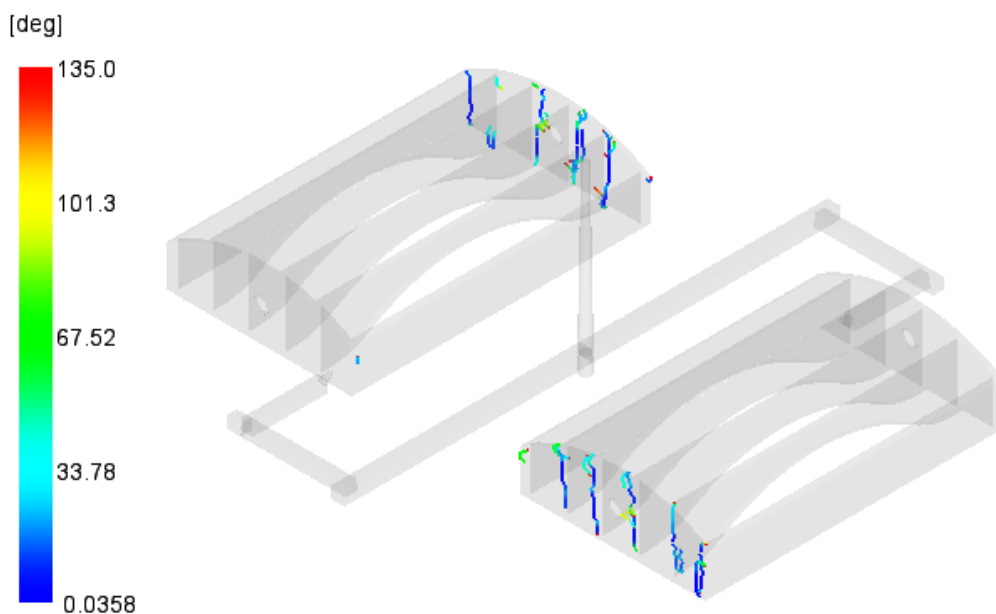
Prodloužením doby chlazení nebyly zaznamenány žádné výrazný dopady na kvalitu studených spojů. Pouze ojediněle bylo možné pozorovat mírné zlepšení úhlu setkání taveninových čel, které vedlo k nepatrnému zvýšení kvality spojů.

12.4.4 Prodloužená fáze dotlaku

Fáze dotlaku byla prodloužena na 12 sekund (původně 8 sekund).



Obrázek 100 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (prodloužená fáze dotlaku)

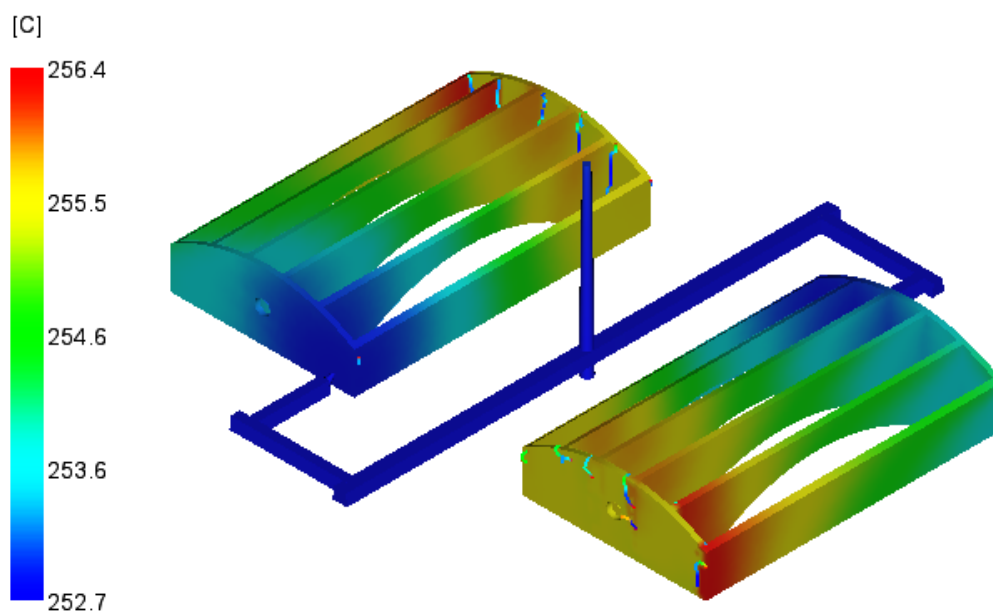


Obrázek 101 Studené spoje (prodloužená fáze dotlaku)

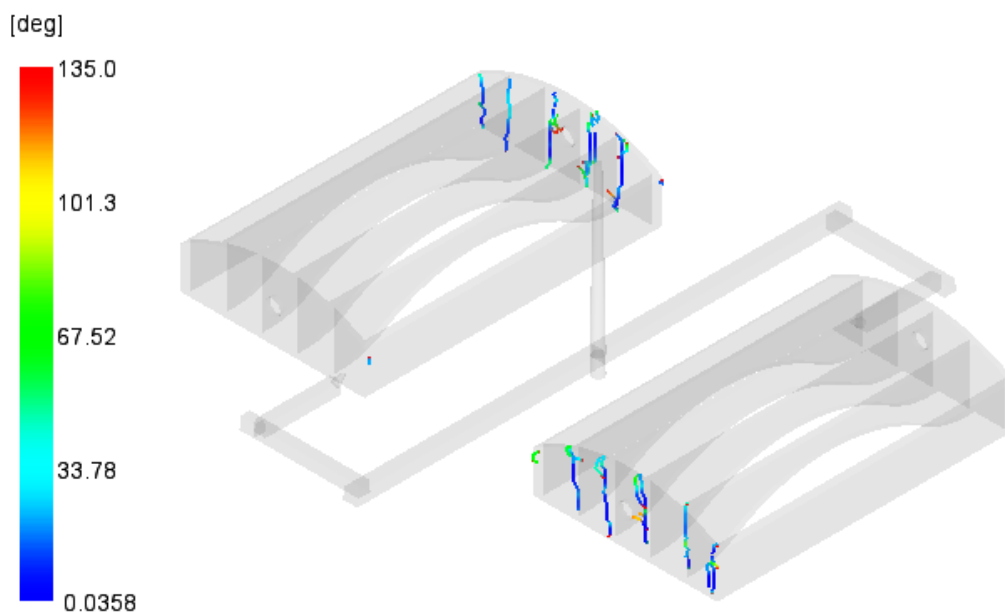
Prodloužení fáze dotlaku nemělo žádný vliv na kvalitu studených spojů, protože původní fáze dotlaku byla již dostatečně dlouhá. Výsledky byly velmi podobné s výsledky při původním nastavení procesních podmínek.

12.4.5 Dřívější sepnutí na fázi dotlaku

K sepnutí na dotlak došlo při zaplnění dutiny vstřikovací formy z 90 % (původně 98 %).



Obrázek 102 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (dřívější sepnutí na fázi dotlaku)

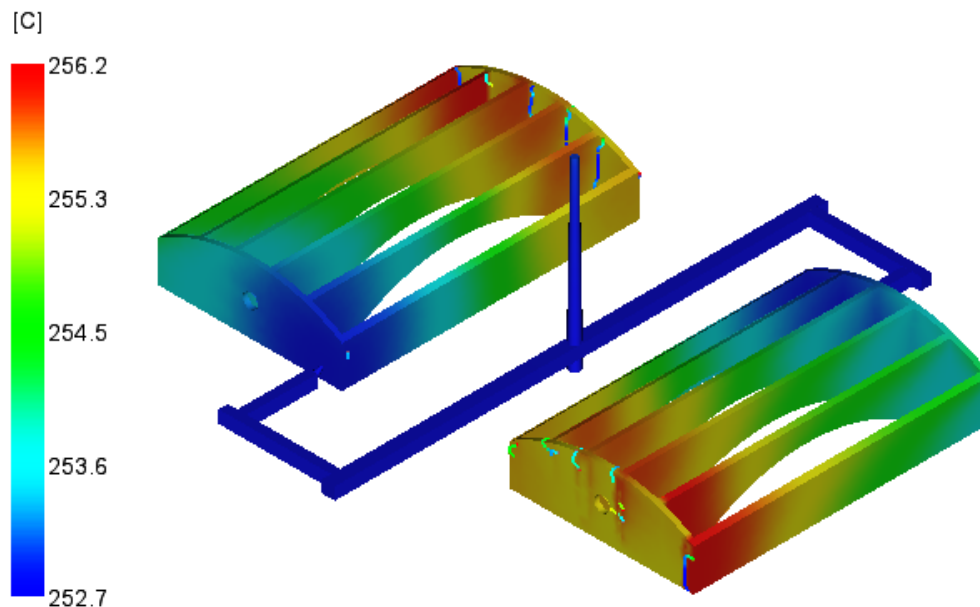


Obrázek 103 Studené spoje (dřívější sepnutí na fázi dotlaku)

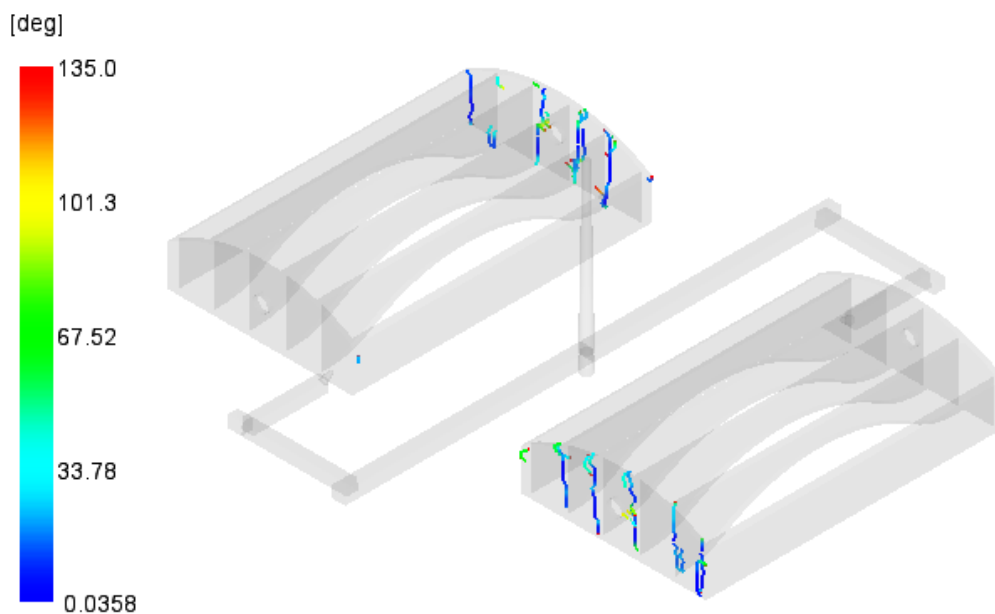
Dřívější sepnutí na fázi dotlaku mělo vliv pouze v oblastech, kde docházelo k plnění nejpозději. V těchto místech vznikaly nepatrně lépe orientované studené spoje. Celkově však byly výsledky velmi podobné těm z původního nastavení procesních podmínek.

12.4.6 Zvýšený tlak ve fázi dotlaku

Během fáze dotlaku byl nastaven vyšší tlak – hodnota dotlaku byla nastavena na úroveň vstřikovacího tlaku (původně 90 % vstřikovacího tlaku).



Obrázek 104 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (zvýšený tlak ve fázi dotlaku)



Obrázek 105 Studené spoje (zvýšený tlak ve fázi dotlaku)

Navýšení tlaku na úroveň vstřikovacího tlaku během fáze dotlaku nemělo žádný výraznější vliv na kvalitu studených spojů. Výsledky byly prakticky totožné s výsledky při původním nastavení procesních podmínek.

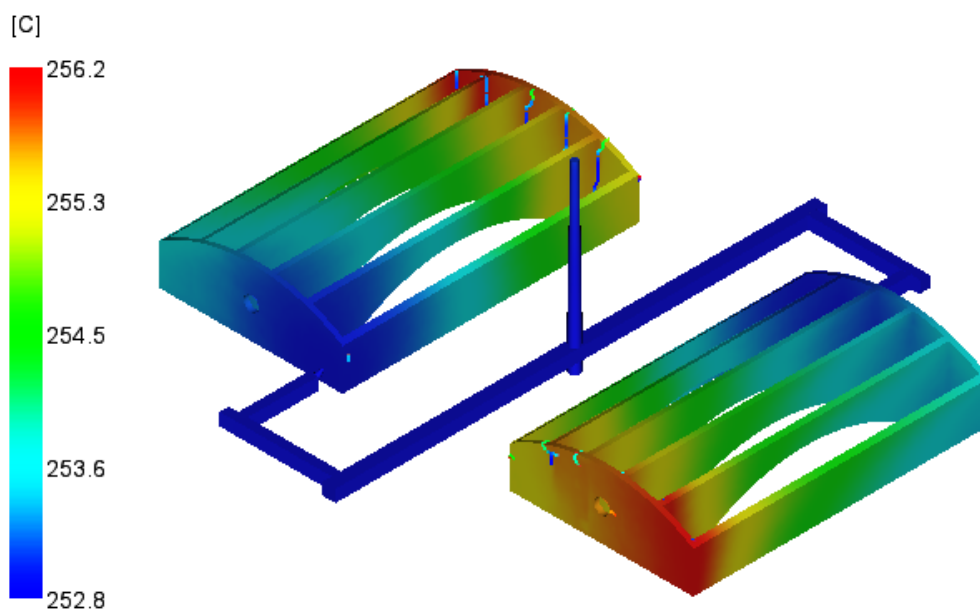
12.4.7 Vyšší vstřikovací tlak

Fáze plnění byla řízena pomocí relativní rychlosti šneku v závislosti na relativním zdvihu šneku (původně byla fáze plnění řízena automaticky). V tabulce 16 je uveden nastavený relativní rychlostní profil šneku.

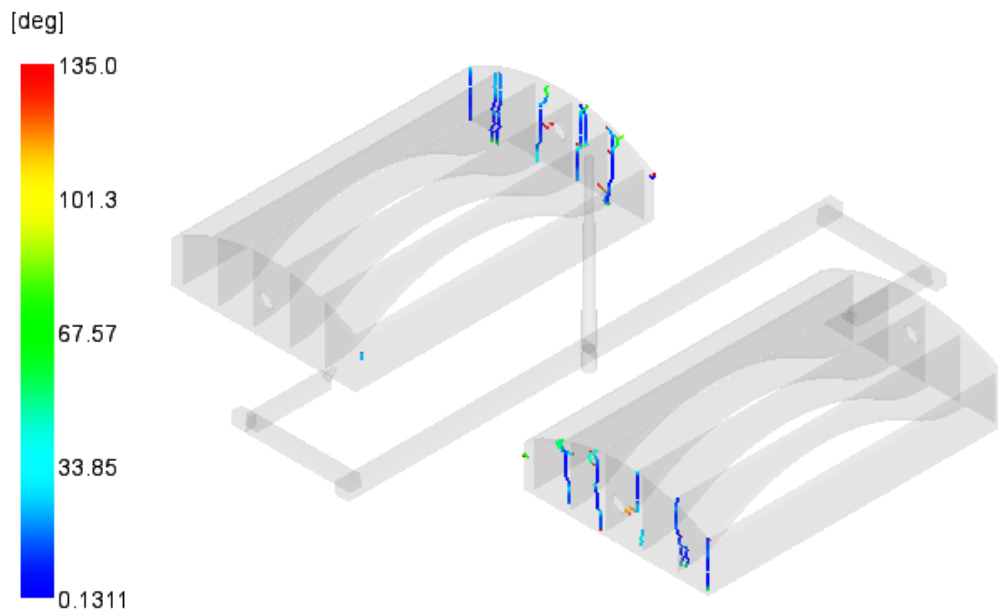
Tabulka 16 Relativní rychlostní profil šneku

Úsek	Relativní zdvih šneku [%]	Relativní rychlost šneku [%]
1	100	20
2	95	60
3	80	100
4	20	100
5	10	70
6	0	30

Tento profil umožňuje zpočátku pomalé a rovnoměrné plnění s minimálním rizikem vzniku vzduchových kapes. Následuje prudké zrychlení šneku, při kterém výrazně vzrůstá vstřikovací tlak. Vstřikovací tlak je následně udržován téměř konstantní po většinu fáze plnění. Ke konci plnění se rychlost šneku plynule snižuje, což umožňuje pozvolný a stabilní přechod na fázi dotlaku.



Obrázek 106 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (vyšší vstřikovací tlak)

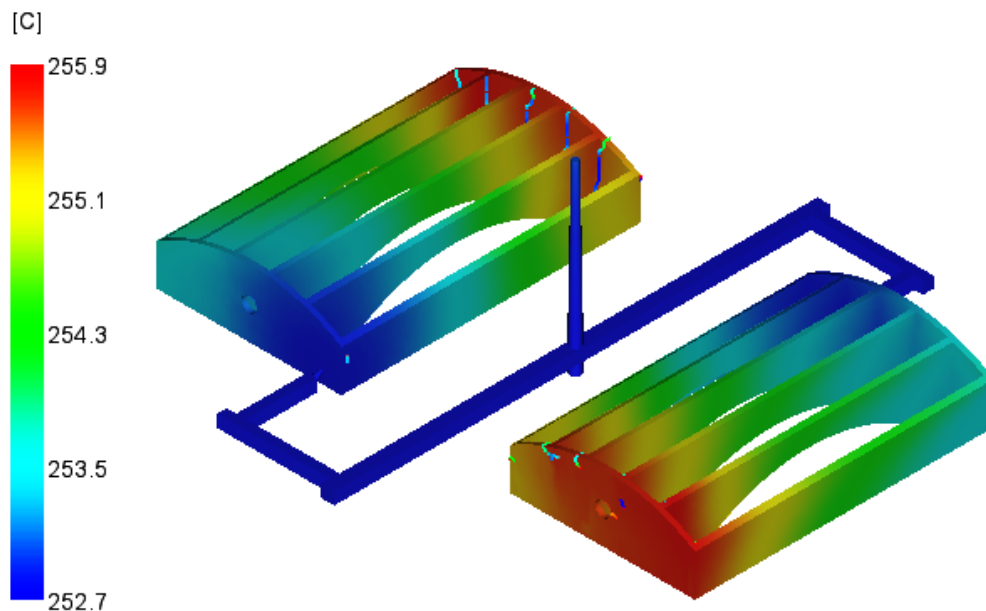


Obrázek 107 Studené spoje (vyšší vstřikovací tlak)

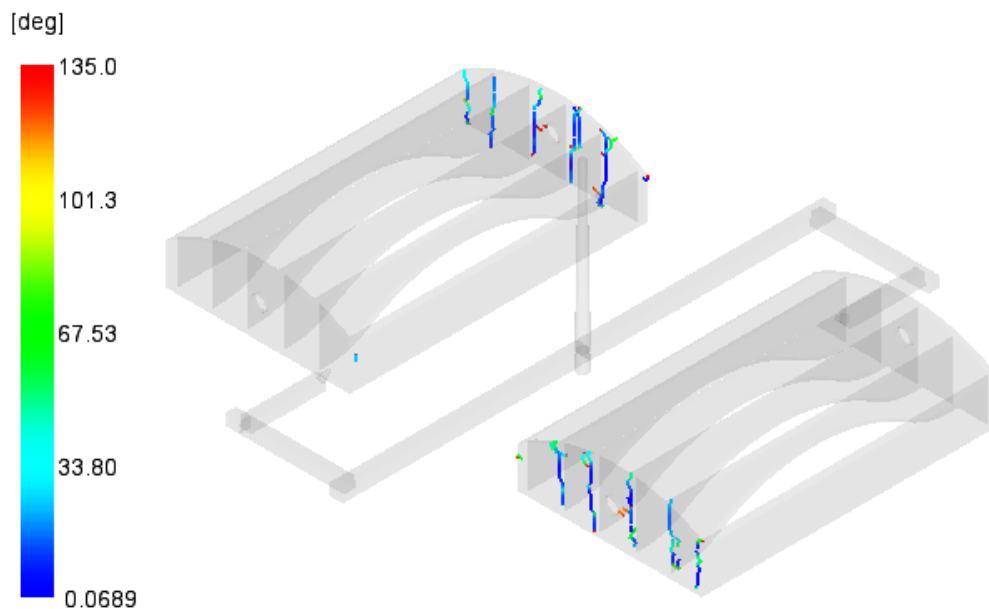
Vyšší vstřikovací tlak vedl ke zkrácení studených spojů v některých oblastech. Celkově měly studené spoje souvislý průběh a vykazovaly mírně příznivější orientaci. Lokálně však došlo k posunu některých spojů zpět do oblasti vnitřních žeber.

12.4.8 Vyšší vstřikovací rychlost

Fáze plnění byla řízena pomocí vstřikovací rychlosti o hodnotě $210 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (původně byla průměrná vstřikovací rychlost přibližně $160 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).



Obrázek 108 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (vyšší vstřikovací rychlost)

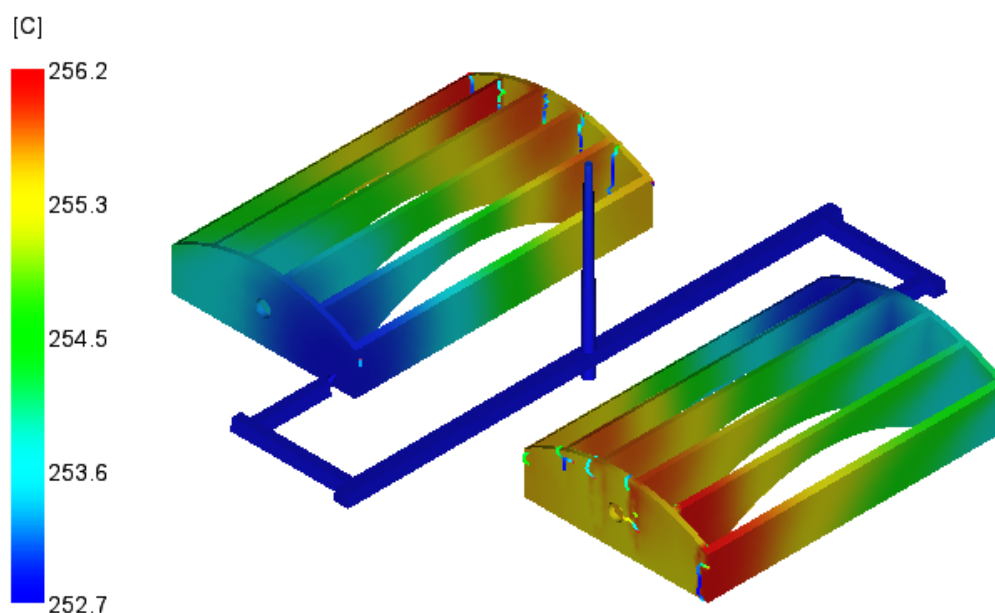


Obrázek 109 Studené spoje (vyšší vstřikovací rychlost)

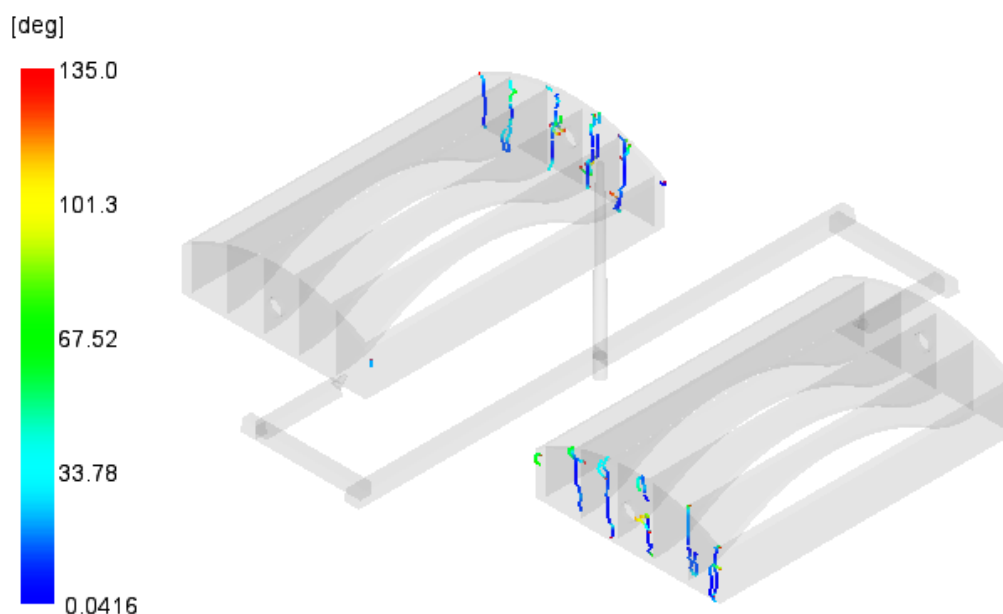
Zvýšení vstřikovací rychlosti vedlo k mírnému zkrácení studených spojů v některých oblastech a k jejich příznivější orientaci. Lokálně však došlo k posunu některých spojů zpět do oblasti vnitřních žebër.

12.4.9 Rozdílné teplotní pole vstřikovací formy

Teplota na straně tvárníku byla nastavena na 65 °C a na straně tvárnice na hodnotu 82 °C (původní teplota ve všech místech byla 65 °C). Vstupní teplota temperačního média byla na straně tvárníku nastavena na 35 °C a na straně tvárnice na 52 °C (původní teplota ve všech místech byla 35 °C).



Obrázek 110 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (rozdílné teplotní pole vstřikovací formy)



Obrázek 111 Studené spoje (rozdílné teplotní pole vstřikovací formy)

Rozdílné teplotní pole vstřikovací formy nemělo žádný významný pozitivní vliv na výslednou kvalitu studených spojů.

12.4.10 Dosažené výsledky – vliv procesních podmínek

V tabulce 17 jsou uvedeny základní výsledky provedených simulací pro všechny porovnávané materiály.

Tabulka 17 Souhrn základních výsledků – vliv procesních podmínek

	Doba plnění [s]	Teplota taveniny [°C]	Smyková deformace [s⁻¹]	Celková deformace [mm]
Původní podmínky	3,76	265,3	29 943	0,97
Vyšší teplota taveniny	2,85	284,5	39 429	0,95
Vyšší teplota formy	4,15	265,0	27 109	0,95
Prodloužená doba chlazení	3,76	265,3	29 943	0,94
Prodloužená fáze dotlaku	3,76	265,3	29 943	0,94
Dřívější fáze dotlaku	4,00	264,8	29 943	0,95
Zvýšený tlak ve fázi dotlaku	3,76	265,3	29 943	0,96
Vyšší vstřikovací tlak	3,37	265,5	41 289	0,96
Vyšší vstřikovací rychlost	2,84	266,0	39 622	0,95
Rozdílné teplotní pole	3,76	265,3	29 942	0,94

Z výsledků simulací vyplynulo, že na kvalitu studených spojů má nejvýraznější vliv teplota taveniny, vstřikovací tlak a vstřikovací rychlost. Jejich úprava (zvýšení) vedla k úbytku či zkrácení studených spojů a jejich mírně příznivější orientaci, což se pozitivně projeví na výsledných mechanických vlastnostech výstřiku. Naproti tomu zvýšení teploty formy, prodloužení doby chlazení, prodloužení fáze dotlaku a úpravy parametrů fáze dotlaku měly pouze minimální vliv, často i bez výrazněji pozorovatelných změn.

Z hlediska kvality studených spojů se jako nejúčinnější jeví optimalizace teploty taveniny, jelikož optimalizace vstřikovacího tlaku a řízení vstřikovací rychlosti může být v praxi značně obtížná. Zmíněné optimalizační možnosti se zároveň ukazují jako nejvhodnější i z pohledu doby plnění. Ve všech třech případech je však nutné zohlednit riziko zvýšeného smykového namáhání v oblasti vtokového ústí, které může vést k degradaci polymerní taveniny.

12.5 Diskuze dosažených výsledků optimalizace studených spojů

Postupně byl posuzován a vyhodnocován vliv umístění vtokového ústí, velikosti vtokového ústí, volby materiálu a procesních podmínek na studené spoje, přičemž byly zjištěny tyto závěry:

- **Vliv umístění vtokového ústí** – pozice vtokového ústí má zásadní vliv na vznik a rozložení studených spojů. Posunutím a natočením vtoku ve směru žeber (v případě řešeného výstřiku do oblasti boční stěny) dochází k výraznému omezení výskytu studených spojů v oblasti vnitřních žeber. Jako vhodný kompromis mezi kvalitou výstřiku a technickou proveditelností byla vyhodnocena varianta č. 3, která zajišťuje rovnoměrné plnění, příznivé rozložení studených spojů a zároveň nevyžaduje žádné zásadní konstrukční úpravy vstřikovací formy. Z hlediska polohy studených spojů se však jeví jako optimální varianta č. 4.
- **Vliv velikosti vtokového ústí** – změna velikosti vtokového ústí neměla prakticky žádný vliv na vznik studených spojů, neboť rozdíl mezi původní a optimalizovanou velikostí vtokového ústí nijak nenapomohl zlepšení průběhu plnění. Došlo pouze k nepatrným lokálním odchylkám v orientaci setkání čel taveniny. Výhodou je výrazné snížení rychlosti smykové deformace v místě vtokového ústí, avšak na úkor výraznější stopy po vtoku a jeho obtížnějšího oddělení od výstřiku.
- **Vliv materiálu** – výběr materiálu, zejména jeho ITT, zásadně ovlivňuje kvalitu studených spojů. Vyšší ITT napomáhá přesunu studených spojů do výhodnějších oblastí a umožňuje setkávání taveninových čel pod příznivějšími úhly, což vede ke vzniku kratších a vizuálně méně nápadných spojů. Lépe tekoucí materiály (např. použitý PC) rovnoměrněji vyplňují tvarovou dutinu, efektivněji přenášejí tlak a celkově přispívají k vyšší kvalitě spojů. Nevýhodou jsou častokrát horší mechanické vlastnosti a vyšší zpracovatelská náročnost. U plněných materiálů dochází ke změně polohy vzniku studených spojů a vlivem nižší koncentrace plniva v místě spojení jsou spoje obvykle vizuálně výraznější a mechanicky méně odolné. Zároveň se zvyšuje riziko degradace taveniny v důsledku vyšší rychlosti smykové deformace a prodlužuje se doba chlazení. Přestože simulované materiály vykazovaly v rámci optimalizačních analýz mírně lepší výsledky z hlediska polohy vzniku studených spojů setkávání čel taveniny, jejich použití se nejeví jako nikterak výhodnější. Jako nejvhodnější z nich se jeví PC, který vykazoval rovnoměrné plnění

tvarové dutiny, poměrně kvalitní studené spoje a kratší dobu potřebnou k ochlazení výstřiku na vyhazovací teplotu. Jeho nevýhodou je však vyšší ekonomická náročnost procesu v důsledku vyšší zpracovatelské teploty. Všechny tyto materiály navíc vykazovaly výrazně delší dobu plnění oproti původnímu materiálu.

- **Vliv procesních podmínek** – z hlediska kvality studených spojů se na základě dosažených výsledků jako nejefektivnější možnost jeví optimalizace teploty taveniny. Alternativním, ale v praxi obtížnějším řešením je optimalizace vstřikovacího tlaku a vstřikovací rychlosti. Ve všech třech případech je však nezbytné zohlednit i možná rizika, zejména zvýšené smykové namáhání v oblasti vtokového ústí, které může vést až k degradaci polymerní taveniny.

ZÁVĚR

Zadání diplomové práce stanovilo čtyři základní cíle, přičemž prvním z nich bylo zpracování literární studie zaměřené na technologii vstřikování, konkrétně na problematiku studených spojů a vlivu umístění vtokového ústí a nastavení procesních podmínek na jejich kvalitu. Tento cíl byl naplněn prostřednictvím teoretické části diplomové práce, která byla strukturována do pěti kapitol. První kapitola shrnovala základní poznatky o polymerních materiálech, druhá se věnovala principům technologie vstřikování. Třetí kapitola se zaměřovala na vady výstřiků, s důrazem na vznik studených spojů, zatímco čtvrtá kapitola představila klíčové faktory ovlivňující jejich kvalitu. Pátá a závěrečná kapitola teoretické části pak popisovala využití CAE softwaru a postup přípravy a nastavení simulační analýzy s využitím Moldflow. Vyhotovení teoretické části poskytlo nezbytný základ pro realizaci praktické části práce a naplnění dalších stanovených cílů.

V praktické části byl nejprve zvolen výstřik. Výstřikem byla mřížka ventilátoru pro osobní automobil, jejíž tvarová geometrie předurčovala vznik studených spojů. Dalším cílem bylo vytvoření 3D modelu výstřiku, na jehož základě byl navržen koncept vstřikovací formy. V návaznosti na navržený koncept byly provedeny simulační analýzy zaměřené na vhodnost umístění vtokového ústí a celkový průběh vstřikovacího procesu. Původní řešení se z hlediska průběhu plnění, a zejména studených spojů, neukázalo jako optimální. Studené spoje vznikaly především ve střední části vnitřních žeber. Za účelem zvýšení kvality těchto spojů a jejich přemístění do mechanicky méně namáhaných oblastí byly provedeny a vyhodnoceny optimalizační analýzy, které zároveň představovaly poslední cíl diplomové práce. Součástí diplomové práce byla také výkresová dokumentace, zahrnující výkres výstřiku a výkresy vstřikovací formy včetně kusovníku.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: teorie a praxe. Praha: Grada Publishing, [2018]. ISBN 978-80-271-0614-1.
- [2] DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití. 2. vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, [2006]. ISBN 80-7080-617-6.
- [3] CZEPIEL, Mateusz; BAŃKOSZ, Magdalena a SOBCZAK-KUPIEC, Agnieszka. Advanced Injection Molding Methods: Review: Review. Materials. [2023], roč. 16, č. 17. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma16175802>.
- [4] CATOEN, Bruce a REES, Herbert. Injection Mold Design Handbook. Munich: Hanser Publishers, [2021]. ISBN 978-1-56990-815-0.
- [5] NATHAN, D. Kamala a PRABHU, K. Narayan. Thermal Resistance at the Polymer/Mold Interface in Injection Molding. Transactions of the Indian Institute of Metals. [2022], roč. 75, č. 2, s. 307-326. ISSN 0975-1645. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02420-5>.
- [6] WILCZYŃSKI, Krzysztof a BUZIAK, Kamila. Modeling and Experimental Studies on Polymer Melting and Flow in Injection Molding. Polymers. [2022], roč. 14, č. 10, s. 2106. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym14102106>.
- [7] KAMAL, Musa R.; ISAYEV, Avraam I. a LIU, Shih-Jung. Injection Molding: Technology and Fundamentals: technology and fundamentals. Progress in polymer processing. Munich: Hanser Publishers, [2009]. ISBN 978-1-56990-434-3.
- [8] AGASSANT, Jean-Francois; AVENAS, Pierre; VINCENT, Michel; VERGNES, Bruno a CARREAU, Pierre J. Polymer Processing: principles and modeling. 3rd edition. Munich: Hanser Publishers, [2017]. ISBN 978-1-56990-605-7.
- [9] GOODSHIP, Vannessa. Practical Guide to Injection Moulding. 2nd edition. Shawbury: Smithers Information Limited, [2017]. ISBN 978-1-91024-294-0.
- [10] JAROSCHEK, Christoph. Injection Molding for Practitioners. 2024. Munich: Hanser Publishers, [2024]. ISBN 978-1-56990-178-6.

- [11] SELVARAJ, Senthil Kumaran; RAJ, Aditya; RISHIKESH, Mahadevan; R., CHADHA, Utkarsh a PARMASIVAM, Vemurugan. A Review on Machine Learning Models in Injection Molding Machines. *Advances in Materials Science and Engineering*. [2022], č. 1949061, s. 28. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2022/1949061>.
- [12] JADHAV, Ganesh; GAVAL, Vivek; SOLANKE, Sachin; DIVEKAR, Mahesh; DARADE, Nandkishor et al. Weld-lines and its strength evaluation in injection molded parts: A review: A review. *Polymer Engineering & Science*. [2023], roč. 63, č. 11, s. 3523-3536. ISSN 0032-3888. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pen.26470>.
- [13] HOLMSTRÖM, Petter Henrik; HOPPERSTAD, Odd Sture a CLAUSEN, Arild Holm. Anisotropic tensile behaviour of short glass-fibre reinforced polyamide-6. *Composites Part C: Open Access*. [2020], roč. 2, s. 100019. ISSN 2666-6820. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcomec.2020.100019>.
- [14] HARNNARONGCHAI, Wanlop a PATCHARAPHUN, Somjate. Prediction of weldline strength for injection molded short-glass-fiber composites. *Materials Today: Proceedings*. [2023], roč. 77, s. 1122-1126. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.202>.
- [15] JADHAV, Ganesh a GAVAL, Vivek. Comparative study of weld-line strength for unfilled and glass-filled thermoplastic polyamide-6 materials. *Polymer Engineering & Science*. [2023], roč. 63. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/pen.26268>.
- [16] JADHAV, Ganesh; GAVAL, Vivek a DIVEKAR, Mahesh. Effect of weld-line on tensile properties for thermoplastic glass filled material. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. [2022], roč. 36, č. 9, s. 3791-3808. ISSN 0892-7057. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/08927057221124480>.
- [17] FERESHTEH-SANIEE, Nessa; REYNOLDS, Neil; NORMAN, Danielle; QIAN, Connie; ARMSTRONG, David J. et al. Quality Analysis of Weld-Line Defects in Carbon Fibre Reinforced Sheet Moulding Compounds by Automated Eddy Current Scanning. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. [2022], roč. 6, č. 6. ISSN 2504-4494. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/jmmp6060151>.

- [18] DONHAUSER, Tobias; KENF, Andreas; SCHMEER, Sebastian a HAUSMANN, Joachim. Calculation of highly stressed components made of carbonfiber-reinforced polyamide-6. *Composite Structures*. [2022], roč. 280, s. 114830. ISSN 0263-8223. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114830>.
- [19] KERKSTRA, Randy a BRAMMER, Steve. *Injection molding advanced troubleshooting guide*. 2nd edition. Munich: Hanser publishers, [2021]. ISBN 978-1-56990-834-1.
- [20] LI, Xi-jue; ZUO, Ze-mian; MI, Hao-yang; DONG, Bin-bin; ANTWI-AFARI, Maxwell-Fordjour et al. A review of research progress on the minimization of weld lines in injection molding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. [2024], roč. 132, č. 11, s. 5179-5210. ISSN 1433-3015. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13607-7>.
- [21] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: simulace, analýzy, odstraňování vad, 3D tisk – teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, [2021]. ISBN 978-80-271-1294-4.
- [22] PURGLEITNER, Bianca; VILJOEN, David; KÜHNERT, Ines a BURGSTALLER, Christoph. Influence of injection molding parameters, melt flow rate, and reinforcing material on the weld-line characteristics of polypropylene. *Polymer Engineering & Science*. [2023], roč. 63, č. 5, s. 1551-1566. ISSN 0032-3888. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pen.26305>.
- [23] JADHAV, Ganesh; GAVAL, Vivek; DIVEKAR, Mahesh a DARADE, Nandkishor. Effect of packing pressure on stagnation weld-line strength for thermoplastic semicrystalline glass fiber reinforced material. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. [2022], roč. 36, č. 10, s. 3874-3890. ISSN 0892-7057. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/08927057221142244>.
- [24] BARADI, Mohamed B.; CRUZ, Camilo; RIEDEL, Thomas a RÉGNIER, Gilles. Frontal weld lines in injection-molded short fiber-reinforced PBT: Extensive microstructure characterization for mechanical performance evaluation: Extensive microstructure characterization for mechanical performance evaluation. *Polymer Composites*. [2019], roč. 40, č. 12, s. 4547-4558. ISSN 0272-8397. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pc.25310>.

- [25] BARADI, Mohamed Beshar; CRUZ, Camilo; RIEDEL, Thomas a RÉGNIER, Gilles. Mechanical and microstructural characterization of flowing weld lines in injection-molded short fiber-reinforced PBT. *Polymer Testing*. [2019], roč. 74, s. 152-162. ISSN 0142-9418. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.12.017>.
- [26] DO, Thanh T.; NGUYEN, Van-Thuc; SONG TOAN, Huynh D.; MINH, Pham S.; UYEN, Tran M. et al. Influences of TPU Content on the Weld Line Characteristics of PP and ABS Blends. *Polymers*. [2023], roč. 15, č. 10. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym15102321>.
- [27] DIVEKAR, Mahesh; GAVAL, Vivek R a WONISCH, Andreas. Improvement of warpage prediction through integrative simulation approach for thermoplastic material. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. [2020], roč. 35, č. 9, s. 1231-1248. ISSN 0892-7057. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0892705720930746>.
- [28] SUN, Qingping; ZHOU, Guowei; MENG, Zhaoxu; JAIN, Mukesh a SU, Xuming. An integrated computational materials engineering framework to analyze the failure behaviors of carbon fiber reinforced polymer composites for lightweight vehicle applications. *Composites Science and Technology*. [2021], roč. 202, s. 108560. ISSN 0266-3538. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108560>.
- [29] KITAYAMA, Satoshi; HASHIMOTO, Sara; TAKANO, Masahiro; YAMAZAKI, Yusuke; KUBO, Yoshikazu et al. Multi-objective optimization for minimizing weldline and cycle time using variable injection velocity and variable pressure profile in plastic injection molding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. [2020], roč. 107, s. 1-11. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05235-8>.
- [30] PATURI, Uma Maheshwera Reddy; KOLLURU, Sai Krishna Prashanth a KALVAKOLANU, S.D.S. Abhiram. Prediction of weld-line width and sink-mark depth of plastic injection moulded parts using neural networks. *Materials Today: Proceedings*. [2023]. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.295>.

- [31] SCANTAMBURLO, Andrea; ZANINI, Filippo; LUCCHETTA, Giovanni a SORGATO, Marco. Improving the weld lines mechanical properties by combining alternate dynamic packing and rapid heat cycle moulding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. [2022], roč. 163, s. 107239. ISSN 1359-835X. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.107239>.
- [32] BOCIĄGA, Elżbieta a SKONECZNY, Władysław. Characteristics of injection molded parts with the areas of weld lines. *Polimery*. [2020], roč. 65, č. 5, s. 337-345. Dostupné z: <https://doi.org/10.14314/polimery.2020.5.1>.
- [33] YANG, Yi; CHEN, Xi; LU, Ningyun a GAO, Furong. Injection molding process control, monitoring, and optimization. *Progress in polymer processing series*. Munich: Hanser, [2016]. ISBN 978-1-56990-592-0.
- [34] BEAUMONT, John P. Runner and gating design handbook: tools for successful injection molding. 3rd edition. Munich: Hanser Publishers, [2019]. ISBN 978-1-56990-590-6.
- [35] JONES, Peter. The Mould Design Guide. Smithers Rapra, [2008]. ISBN 978-1-84735-088-6.
- [36] SHOEMAKER, Jay (ed.). Moldflow Design Guide: A Resource for Plastics Engineers. Cincinnati: Hanser Publishers, [2006]. ISBN 978-3-446-40640-7.
- [37] WANG, Maw-Ling; CHANG, Rong-Yeu a HSU, Chia-Hsiang. Molding simulation: theory and practice. 2nd Edition. Munich: Hanser publishers, [2022]. ISBN 978-1-56990-884-6.
- [38] Autodesk Moldflow Insight 2024. Online. [2024]. Dostupné z: <https://help.autodesk.com/view/MFIA/2024/ENU/>. [cit. 2025-04-13].
- [39] CYCOLAC™ Resin BDT6500. Online. [2024]. Dostupné z: https://www.sabic.com/en/products/documents/cycolac-resin_bdt6500_americas_technical_data_sheet/en. [cit. 2025-04-12].

- [40] ALLROUNDER 820 S. Online. [2024]. Dostupné z: https://www.arburg.com/media/daten/publications/technical_data/hydraulic_machines/allrounder_s/ARBURG_ALLROUNDER_820S_TD_525003_en_GB.pdf. [cit. 2025-04-12].
- [41] AF365F-L. Online. [2021]. Dostupné z: <https://www.lgchemon.com/sfc/servlet.shepherd/document/download/0692x000006YOK7AAO>. [cit. 2025-04-12].
- [42] Makrolon® 6717. Online. [2018]. Dostupné z: https://mediahub.covestro.com/m/7d0272130a2599c6/original/Makrolon_6717_ISO.pdf. [cit. 2025-04-12].
- [43] LUPOS-GP2300. Online. [2025]. Dostupné z: <https://www.lgchemon.com/sfc/servlet.shepherd/document/download/0692x00000DHAAdjAAH>. [cit. 2025-04-12].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Příklad tokových křivek pro polymerní materiály [4].....	21
Obrázek 2 Fontánový tok [4]	22
Obrázek 3 Vstřikovací cyklus [6]	23
Obrázek 4 Průběh tlaku v dutině vstřikovací formy [8]	25
Obrázek 5 pvT diagram vstřikování [8].....	26
Obrázek 6 Vstřikovací stroj [9]	28
Obrázek 7 Vertikální vstřikovací stroj [7]	28
Obrázek 8 Vstřikovací jednotka s násypkou [9]	30
Obrázek 9 Šnek vstřikovací jednotky	31
Obrázek 10 Schéma šnekové vstřikovací jednotky [9].....	31
Obrázek 11 Uzavírací jednotka [9]	33
Obrázek 12 Schéma hydraulické uzavírací jednotky [10]	33
Obrázek 13 Hydraulická uzavírací jednotka s kloubovým mechanismem [10]	34
Obrázek 14 Vznik studeného spoje [12]	36
Obrázek 15 Oblast vzniku studeného spoje [12]	37
Obrázek 16 Studený spoj [19]	37
Obrázek 17 Typy studených spojů [12].....	38
Obrázek 18 Mechanické selhání v oblasti studeného spoje [12]	39
Obrázek 19 Rozložení pevnostních zón po délce studeného spoje [12]	40
Obrázek 20 Klíčové parametry procesu vstřikování [33]	42
Obrázek 21 Doporučené průřezy rozvodných kanálů [34]	46
Obrázek 22 Jímka [34].....	47
Obrázek 23 Plný kuželový vtok [34]	47
Obrázek 24 Štěrbínové vtokové ústí [34]	48
Obrázek 25 Vějířový vtok [34]	48
Obrázek 26 Filmový vtok [34].....	48
Obrázek 27 Prstencový vtok [34]	49
Obrázek 28 Diskový vtok [34].....	49
Obrázek 29 Tunelový vtok [34].....	49
Obrázek 30 Banánový vtok [34]	50
Obrázek 31 Bodový vtok [34]	50
Obrázek 32 Midplane (2D) síť [38]	54
Obrázek 33 Dual Domain (2,5D) síť [38].....	55
Obrázek 34 Tetrahedral (3D) síť [38]	55

Obrázek 35 3D model výstřiku	60
Obrázek 36 Vstřikovací forma.....	61
Obrázek 37 Volba dělicích rovin na součásti.....	62
Obrázek 38 Tvárník	63
Obrázek 39 Tvárnice.....	63
Obrázek 40 Boční tvárník	64
Obrázek 41 Posuvná jednotka.....	64
Obrázek 42 Uzavírací klín s uchycením šikmého kolíku	64
Obrázek 43 Vtoková vložka.....	65
Obrázek 44 Řez tvarovou dutinou vstřikovací formy	65
Obrázek 45 Pohled na temperační okruh tvárníku.....	66
Obrázek 46 Pohled na temperační okruhy tvárnice	67
Obrázek 47 Pohled na kompletní temperační systém	67
Obrázek 48 Vyhazovací paket	68
Obrázek 49 Místa působení vyhazovacích kolíků na výstřiku	69
Obrázek 50 Pohled do levé části vstřikovací formy	70
Obrázek 51 Pohled do pravé části vstřikovací formy	70
Obrázek 52 Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 820 S [40]	71
Obrázek 53 Model výstřiku s vygenerovanou sítí	72
Obrázek 54 Parametry vygenerované sítě.....	73
Obrázek 55 Indikace odporu vůči toku taveniny (Flow resistance indicator)	74
Obrázek 56 Vhodnost umístění vtokového ústí (Gating suitability).....	74
Obrázek 57 Vysíťovaný vtokový systém.....	75
Obrázek 58 Vysíťovaný temperační systém	76
Obrázek 59 Vysíťovaný blok vstřikovací formy	77
Obrázek 60 Doba plnění (Fill time)	79
Obrázek 61 Teplota čela taveniny (Temperature at flow front).....	80
Obrázek 62 Teplota taveniny (Bulk temperature).....	81
Obrázek 63 Rychlost smykové deformace (Shear rate, bulk).....	82
Obrázek 64 Detail vtokového ústí.....	82
Obrázek 65 Průběh vstřikovacího tlaku v závislosti na čase v místě vtokového ústí v XY diagramu (Pressure at injection location: XY Plot)	83
Obrázek 66 Průběh uzavírací síly v závislosti na čase v XY diagramu (Clamp force: XY Plot).....	84
Obrázek 67 Vzduchové kapsy (Air traps).....	85
Obrázek 68 Vzduchové kapsy (pohled ze strany vyhazovačů).....	85

Obrázek 69 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů	86
Obrázek 70 Studené spoje (Weld lines).....	86
Obrázek 71 Čas pro dosažení vyhazovací teploty (Time to reach ejection temperature)....	87
Obrázek 72 Teplota média v temperačním okruhu (Circuit coolant temperature)	88
Obrázek 73 Reynoldsovo kritérium (Circuit Reynolds number).....	89
Obrázek 74 Efektivita odvodu tepla (Circuit heat removal efficiency).....	90
Obrázek 75 Deformace vlivem všech efektů (Deflection, all effects: Deflection).....	91
Obrázek 76 Deformace vlivem chlazení (Deflection, differential cooling: Deflection)	92
Obrázek 77 Vysíťovaný vtokový systém (varianta č. 1)	93
Obrázek 78 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (varianta č. 1)	94
Obrázek 79 Studené spoje (varianta č. 1)	94
Obrázek 80 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (varianta č. 2)	95
Obrázek 81 Studené spoje (varianta č. 2)	95
Obrázek 82 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (varianta č. 3)	96
Obrázek 83 Studené spoje (varianta č. 3)	96
Obrázek 84 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (varianta č. 4)	97
Obrázek 85 Studené spoje (varianta č. 4)	97
Obrázek 86 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (vliv velikosti vtokového ústí)	99
Obrázek 87 Studené spoje (vliv velikosti vtokového ústí)	99
Obrázek 88 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (materiál č.1).....	101
Obrázek 89 Studené spoje (materiál č.1)	102
Obrázek 90 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (materiál č. 2).....	103
Obrázek 91 Studené spoje (materiál č. 2)	103
Obrázek 92 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (materiál č. 3).....	104
Obrázek 93 Studené spoje (materiál č. 3)	105
Obrázek 94 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (vyšší teplota taveniny)	107
Obrázek 95 Studené spoje (vyšší teplota taveniny)	107
Obrázek 96 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (vyšší teplota formy)	108
Obrázek 97 Studené spoje (vyšší teplota formy)	108
Obrázek 98 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (prodloužená doba chlazení).....	109
Obrázek 99 Studené spoje (prodloužená doba chlazení)	109
Obrázek 100 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (prodloužená fáze dotlaku)	110

Obrázek 101 Studené spoje (prodloužená fáze dotlaku).....	110
Obrázek 102 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (dřívější sepnutí na fázi dotlaku)	111
Obrázek 103 Studené spoje (dřívější sepnutí na fázi dotlaku).....	111
Obrázek 104 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (zvýšený tlak ve fázi dotlaku)	112
Obrázek 105 Studené spoje (zvýšený tlak ve fázi dotlaku)	112
Obrázek 106 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (vyšší vstřikovací tlak)	113
Obrázek 107 Studené spoje (vyšší vstřikovací tlak).....	114
Obrázek 108 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (vyšší vstřikovací rychlost)	115
Obrázek 109 Studené spoje (vyšší vstřikovací rychlost)	115
Obrázek 110 Průběh teploty čela taveniny – vznik studených spojů (rozdílné teplotní pole vstřikovací formy).....	116
Obrázek 111 Studené spoje (rozdílné teplotní pole vstřikovací formy)	116

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Základní parametry výstřiku.....	60
Tabulka 2 Zpracovatelské parametry materiálu Cypolac BDT6500 [39].....	60
Tabulka 3 Základní parametry vstřikovací formy	61
Tabulka 4 Použité typy vyhazovacích kolíků	68
Tabulka 5 Vybrané parametry vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 820 S [40].....	71
Tabulka 6 Nastavené vlastnosti jednotlivých úseků vtokového systému	75
Tabulka 7 Nastavené vlastnosti jednotlivých temperačních kanálů	76
Tabulka 8 Nastavené parametry bloku vstřikovací formy.....	77
Tabulka 9 Rozměrové parametry jednotlivých úseků vtokového systému	93
Tabulka 10 Souhrn základních výsledků – vliv polohy vtokového ústí.....	98
Tabulka 11 Souhrn základních výsledků – vliv velikosti vtokového ústí	100
Tabulka 12 Zpracovatelské parametry materiálu AF365F-L [41].....	101
Tabulka 13 Zpracovatelské parametry materiálu Makrolon 6717 [42]	102
Tabulka 14 Zpracovatelské parametry materiálu LUPOS GP-2300 [43].....	104
Tabulka 15 Souhrn základních výsledků – vliv volby materiálu výstřiku	105
Tabulka 16 Relativní rychlostní profil šneku	113
Tabulka 17 Souhrn základních výsledků – vliv procesních podmínek	117

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ABS	Akrylonitril-butadien-styren
BW	Šířka spodní základny lichoběžníku
bar	Bar
CAD	Počítačem podporované navrhování
CAE	Počítačem podporované inženýrství
CAM	Počítačem podporované obrábění
cm ²	Čtverečný centimetr
cm ³	Krychlový centimetr
deg	Stupeň
d _{end}	Koncový průměr
d _{start}	Počáteční průměr
g	Gram
H	Výška lichoběžníku
HDPE	Vysokohustotní polyetylen
ITT	Index toku taveniny
kg	Kilogram
kN	Kilonewton
LDPE	Nízkohustotní polyetylen
LLDPE	Lineární nízkohustotní polyetylen
M	Metrický závit
min	Minuta
min.	Minimum
max.	Maximum
MPa	Megapascal
např.	Například

Pa	Pascal
PE	Polyetylen
PMMA	Polymethylmetakrylát
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
PVC	Polyvinylchlorid
R	Poloměr
s	Sekunda
s ⁻¹	Reciproká sekunda
t	Čas
t	Tuna
T	Teplota
T _c	Teplota rozkladu polymeru
T _f	Teplota viskózního toku
T _g	Teplota skelného přechodu
T _m	Teplota tání semikrystalického polymeru
T _n	Teplota tečení amorfního polymeru
TW	Šířka horní základny lichoběžníku
°C	Stupeň Celsia
η	Smyková viskozita
γ	Rychlost smykové deformace
%	Procento
Ø	Průměr

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I Výkresová dokumentace zahrnující:

- Výkres výstříku
- Pohledy do dělicích rovin vstřikovací formy
- Sestava vstřikovací formy včetně kusovníku

Příloha P II CD obsahující:

- Diplomovou práci v textovém formátu
- Parametry vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 820 S
- Materiálový list Cypolac BDT6500
- Materiálový list AF365F
- Materiálový list Makrolon 6717
- Materiálový list LUPOS GP-2300
- 3D model výstříku
- 3D model vstřikovací formy
- Výkresovou dokumentaci
- Data ze simulací provedených v softwaru Moldflow