

Návrh vícenásobného vstřikovacího nástroje s využitím analýzy pro vyvážení vtokového systému

Bc. Andrea Šuláková

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. Andrea Šuláková
Osobní číslo:	T23295
Studijní program:	N0788A270002 Výrobní inženýrství
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Návrh vícenásobného vstřikovacího nástroje s využitím analýzy pro vyvážení vtokového systému

Zásady pro vypracování

- Vypracujte literární rešerši zaměřenou na danou problematiku.
- Vytvořte trojrozměrný model zadaného plastového dílu.
- Proveďte a vyhodnoťte tokovou analýzu.
- Navrhněte sestavu formy pro výrobu daného dílu.
- Nakreslete řez sestavou formy včetně patřičných pohledů a kusovníku.

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

Seznam doporučené literatury:

BEAUMONT, John P. Návrh a řešení vtokových soustav: příručka pro úspěšné vstřikování plastů. Brno: Jan Svoboda, 2022. ISBN 978-80-11-01188-8.

KAZMER, David O. Injection Mold Design Engineering. 3rd Edition. Munich: Hanser Publishers, 2022. ISBN 978-1-56990-891-4.

VALERO, José R. Plastics Injection Molding – Scientific Molding, Recommendations, and Best Practices. Munich: Hanser Publishers, 2020. ISBN 978-1-56990-689-7.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Vaněk, 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

Tato diplomová práce se věnuje návrhu šestnáctinásobné vstřikovací formy pro sekundární západku konektoru s důrazem na optimalizaci vtokového systému pomocí tokových analýz. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část.

V teoretické části jsou zpracovány poznatky o polymerních materiálech a jejich reologickém chování ve formě, technologii vstřikování plastů se zaměřením na navrhování vtokových systémů a významu CAE simulací při odhalování technologických vad.

Praktická část se zaměřuje na konstrukci zadaného plastového dílu, volbu a optimalizaci vtokového systému s využitím nástrojů CAE, s cílem dosáhnout rovnoměrného plnění dutin formy a analyzovat možné příčiny jeho nerovnoměrnosti. Na základě výsledků analýz je navržena finální konstrukce formy, která je ověřena kompletní simulací. Výstupem je také výkres sestavy včetně kusovníku.

Klíčová slova: vstřikování plastů, vstřikovací forma, nerovnoměrné plnění, toková analýza, vtokový systém

ABSTRACT

This diploma thesis focuses on the design of a sixteen-cavity injection mold for a secondary connector latch, with an emphasis on optimizing the gating system using flow analysis. The work is divided into theoretical and practical parts.

The theoretical section presents knowledge about polymer materials and their rheological behavior within the mold cavity, the injection molding technology with a focus on the design of gating systems, and the importance of CAE simulations in detecting manufacturing defects.

The practical part deals with the design of the specified plastic part and the optimization of the gating system using CAE tools, aiming to achieve uniform cavity filling and to analyze the possible causes of imbalance. Based on the analysis results, the final mold design is proposed and verified through complete simulation. The output also includes an assembly drawing and a bill of materials.

Keywords: injection molding, injection mold, unbalanced filling, flow analysis, runner system

Ráda bych poděkovala vedoucímu své diplomové práce Ing. Jiřímu Vaňkovi, Ph.D., za profesionální, ochotný a vstřícný přístup při zpracování této práce. Dále děkuji Ing. Martinu Sklářovi z firmy SMARTPLAST s.r.o. za cenné praktické rady, které pro mě byly velkým přínosem. Mé poděkování patří také příteli, rodině, kolegům a blízkým za jejich trpělivost, podporu a motivaci po celou dobu studia.

OBSAH

ÚVOD.....	13
I TEORETICKÁ ČÁST	14
1 POLYMERY A JEJICH ČLENĚNÍ	15
1.1 ROZDĚLENÍ.....	16
1.1.1 Rozdělení podle původu.....	16
1.1.2 Rozdělení podle teplotního chování.....	16
1.1.3 Rozdělení podle typu řetězce	18
2 TOKOVÉ CHOVÁNÍ POLYMERŮ	20
2.1 REOLOGICKÉ VLASTNOSTI.....	20
2.1.1 Smykové napětí	21
2.1.2 Rychlost smykové deformace	21
2.1.3 Viskozita	23
2.1.4 Zpracovatelské křivky	24
2.2 CHOVÁNÍ POLYMERU V DUTINĚ FORMY	26
2.2.1 Nerovnoměrné plnění geometricky vyvážené vtokové soustavy	27
3 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ.....	31
3.1 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS	32
3.1.1 Uzavření formy	32
3.1.2 Vstřikování taveniny	32
3.1.3 Dotlaková fáze	34
3.1.4 Chladicí fáze.....	34
3.1.5 Otevření formy a vyhození výrobku	34
3.2 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS V PVT DIAGRAMU.....	34
3.3 VSTŘIKOVACÍ FORMA.....	37
3.3.1 Vstřikovací strana.....	39
3.3.2 Vyhazovací strana	40
3.3.3 Vtokové systémy	41
4 TOKOVÉ ANALÝZY.....	48
4.1 TYPY SÍTÍ.....	49
4.1.1 1D (Midplane mesh)	49
4.1.2 2,5D (Dual domain mesh)	49
4.1.3 3D	50
4.2 VADY PŘI TECHNOLOGII VSTŘIKOVÁNÍ.....	50
4.2.1 Studené spoje	50
4.2.2 Uzavřený vzduch.....	51
4.2.4 Volný proud taveniny.....	52
4.2.5 Přetoky	53
4.2.6 Nedotečené výrobky.....	53
II PRAKTICKÁ ČÁST.....	54

5	STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	55
6	VSTŘIKOVANÝ VÝROBEK.....	56
6.1	MATERIÁL	58
7	PŘEDBĚŽNÉ ZHODNOCENÍ VÝROBNÍCH FAKTORŮ S VYUŽITÍM CAE.....	59
7.1	DĚLICÍ ROVINA	59
7.2	NÁSOBNOST	60
7.3	VOLBA VTOKOVÉHO SYSTÉMU	60
7.3.1	Návrh a nastavení sítě.....	60
7.3.2	Výsledky porovnání a volba kombinovaného systému	69
7.3.3	Vyvážení studeného vtokového systému a vliv smykové rychlosti	76
8	KONSTRUKCE FORMY.....	97
8.1	TVAROVÉ ČÁSTI.....	98
8.2	RÁM FORMY	99
8.3	VTOKOVÝ SYSTÉM.....	101
8.3.1	Horký vtokový systém.....	102
8.4	ODVZDUŠNĚNÍ.....	103
8.5	VYHAZOVACÍ SYSTÉM	106
8.5.1	Ochrana formy.....	108
8.6	VEDENÍ A STŘEDĚNÍ.....	110
8.7	TEMPERAČNÍ SYSTÉM	111
8.8	ZNAČENÍ A MONTÁŽ	114
8.9	PŘEPRAVA FORMY	116
9	OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI KONSTRUKCE	117
9.1	KONTROLA VYVÁŽENÍ VTOKOVÉHO SYSTÉMU.....	118
9.2	VSTŘIKOVACÍ TLAK.....	120
9.3	UZAVÍRACÍ SÍLA	121
9.4	PROPADLINY.....	122
9.5	ČAS PRO DOSAŽENÍ VYHAZOVACÍ TEPLoty	123
9.6	DEFORMACE	124
9.7	TEPLOTA TEMPERAČNÍHO MÉDIA.....	125
9.8	PRŮTOK TEMPERAČNÍHO MÉDIA	125
9.9	ÚČINNOST TEMPERAČNÍHO MÉDIA.....	126
10	VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	127
11	DISKUZE VÝSLEDKŮ	128
	ZÁVĚR.....	130

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	132
SEZNAM OBRÁZKŮ	136
SEZNAM TABULEK.....	140
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	141
SEZNAM PŘÍLOH.....	144

ÚVOD

Polymerní materiály jsou jednou z nejvýznamnějších skupin materiálů současné doby. Díky svým jedinečným vlastnostem, jako jsou výborná zpracovatelnost, nízká hmotnost, chemická odolnost a odolnost proti korozi, nacházejí uplatnění napříč různými obory, od obalového průmyslu, přes automobilový až po medicínu. Vývoj moderních materiálů jako jsou polymery pro náročné aplikace, kompozity nebo bioplasty se stále rozšiřuje, a s tím i nároky na technologie potřebné k jejich zpracování.

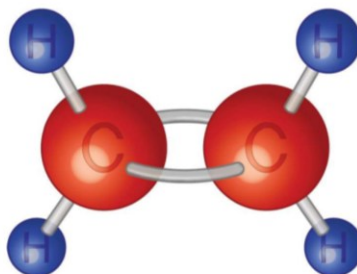
Výběr použité technologie obvykle závisí na typu polymeru, tvaru výrobku, jeho konečném použití a velikosti výrobní dávky. Technologie vstřikování se řadí mezi jednu z nejvýznamnějších, protože umožňuje vyrábět esteticky náročné díly s vysokou přesností a opakovatelností. Přestože historie vstřikování sahá už do konce 19. století, jedná se stále o velmi progresivní technologii, která prochází v posledních letech dynamickou proměnou pod vlivem digitalizace. Tradiční inženýrské přístupy jsou doplňovány nástroji umělé inteligence (AI), simulacemi toku polymeru ve formě (CAE), statistickými metodami optimalizace umožňujícími efektivní testování (DOE) nebo principům návrhu výrobku s ohledem na funkčnost a snadnou vyrobiteľnost (DFM/DFA). Jednou z nejpokročilejších metod současnosti je využívání digitálních dvojčat, která představují virtuální repliky fyzických výrobních systémů v reálném čase. To vše je podporováno s rozvojem CAD softwarů, jejichž možnosti se rovněž neustále rozšiřují. Tento komplexní přístup přináší nové možnosti v oblasti průmyslu 4.0, zejména zkracováním uvedení výrobků na trh a snižováním nákladů.

Nevyvážené plnění dutin vstřikovací formy je mnohdy výzvou, protože neexistuje všeobecně daná příčina jeho vzniku ani univerzální řešení této problematiky. Nerovnováha vtokového systému může vést ke vzniku vad, rozdílům v hmotnosti a rozměrech výrobku, což má za následek kolísání jakosti vyráběných dílů. Pro zajištění konzistentní kvality výroby je nutné příčinu nerovnoměrného plnění identifikovat a minimalizovat ideálně již ve fázi návrhu s využitím simulačních nástrojů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERY A JEJICH ČLENĚNÍ

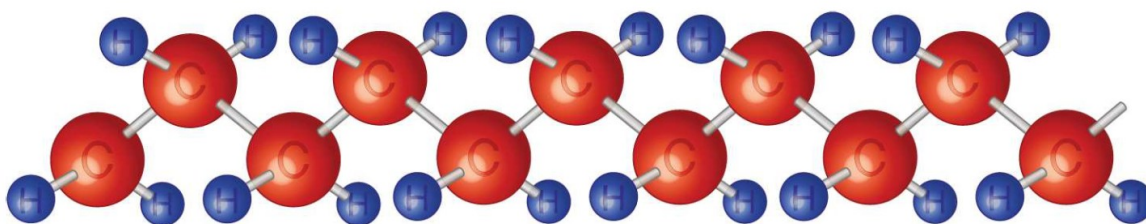
Polymerní materiály jsou skupinou látek, která je v moderním světě všudypřítomná, a má tak nenahraditelné postavení v každodenním životě. Díky svým širokospektrálním vlastnostem a schopnosti být snadno modifikovány pro speciální aplikace nacházejí využití v mnoha odvětvích jako je medicína, elektrotechnika a také automobilový nebo obalový průmysl. Samotné polymery jsou dlouhé řetězce makromolekul, v nichž se ve velkém počtu opakují základní strukturní jednotky zvané mery. Mery jsou pomocí chemických vazeb propojeny v monomery, které jsou základní stavební jednotkou pro tvorbu polymeru. Jednotlivé molekuly se spojují dohromady mechanismem nazvaným polymerace. [1; 2]



Obrázek 1 Etylen

(zdroj: [2])

Známý komoditní plast polyetylen (Obrázek 2) vzniká polymerací monomeru etylenu (Obrázek 1).



Obrázek 2 Polyetylen

(zdroj: [2])

1.1 Rozdělení

Rozdělení polymerů je klíčové pro pochopení jejich vlastností a praktického využití. Mohou se lišit svou strukturou, původem nebo fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Polymery lze klasifikovat mnoha způsoby, kdy záleží, z jakého kritéria jsou posuzovány. [1; 3]

1.1.1 Rozdělení podle původu

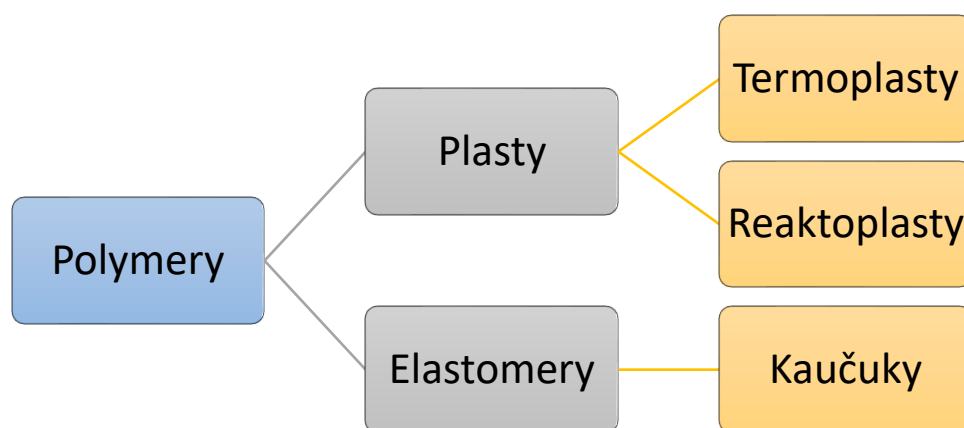
Nejčastěji se setkáváme s rozdělením dle zdroje, z kterého je získáváme na:

- přírodní,
- syntetické.

Přírodní polymery se nacházejí v přírodních látkách a patří mezi ně například bílkoviny, škrob nebo kaučuk. Oproti tomu syntetické polymery vznikají syntézou z fosilních paliv a mají nezastupitelné využití v průmyslových aplikacích. [1]

1.1.2 Rozdělení podle teplotního chování

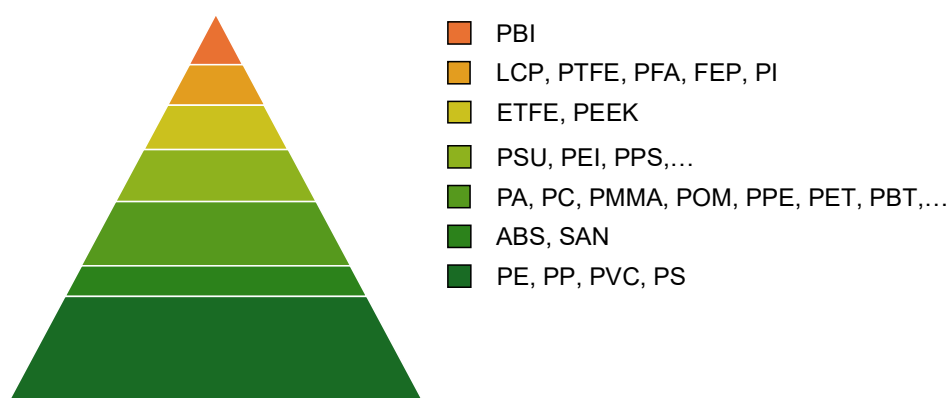
Různé skupiny polymerních materiálů se chovají diametrálně odlišně při vystavení teplotním vlivům, což z hlediska zpracovatelského vyžaduje jejich dělení podle teplotního chování (Obrázek 3). [1; 3; 4]



Obrázek 3 Členění polymerů dle chování při působení teploty

(zdroj: [4])

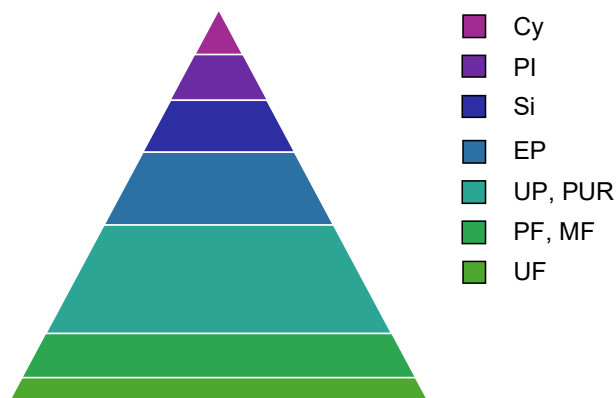
Termoplasty jsou polymery, které mají nejjednodušší molekulární strukturu s fyzikálními vazbami. Zpracovatelský proces je díky fyzikálním vazbám možné snáze kontrolovat. Tepelným působením měknou a taví se, a tak je možné je tvarovat, svařovat a jinak zpracovávat, přičemž si po ochlazení zafixují tvar. Termoplasty je možné několik cyklů opakovaně zahřívat a ochlazovat bez poškození vazeb, což umožňuje jejich efektivní recyklaci. Při zvyšování teploty dochází k významnému snížení modulu pružnosti a zhoršení chování při tečení a relaxaci. Spotřeba termoplastů tvoří zhruba 80 % celkové světové spotřeby plastů. Pyramida rozděluje termoplasty podle jejich vlastností, úrovně spotřeby a stupně specifičnosti (Obrázek 4). [1; 5; 6]



Obrázek 4 Pyramida celosvětového zastoupení nejvýznamnějších druhů termoplastů

(zdroj: [5])

Reaktoplasty jsou stejně jako termoplasty před zpracováním nezávislé makromolekuly, avšak po průběhu reakce jsou spojeny chemickými vazbami. Tato reakce, která způsobí chemické zesíťování se nazývá vytvrzování. Mezi jednotlivými řetězci vzniknou příčné vazby, díky nimž jsou polymery dále netavitelné, nerozpustné a odolné proti chemikáliím. Spotřeba reaktoplastů je zhruba 12 až 20 % celkové spotřeby plastů. Pyramidu pro reaktoplasty popisuje Obrázek 5. [5; 6]



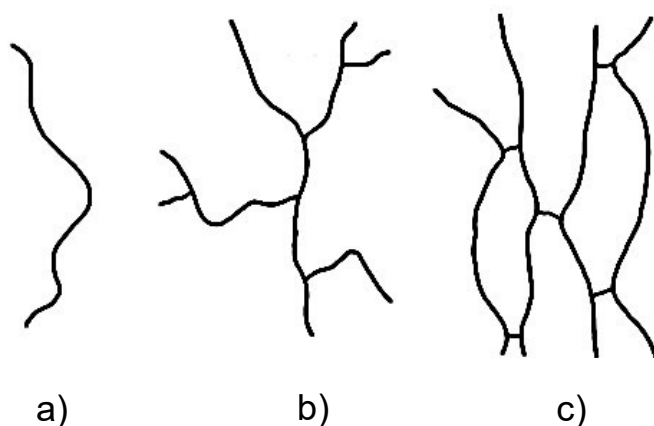
Obrázek 5 Pyramida celosvětového zastoupení
nejvýznamnějších druhů reaktivních plastů

(zdroj: [5])

Elastomery jsou unikátní polymerní materiály, které jsou stejně jako reaktivní plasty spojeny chemickou vazbou. Reakce způsobující řídkou polymerní síť se nazývá vulkanizace. Zvulkanizovaný elastomer známý jako pryž vyniká nízkým Youngovým modulem pružnosti a ve srovnání s jinými materiály vysokou mezí kluzu. Díky svým vlastnostem nalézají pryže nenahraditelné využití v pružných dílech a těsněních. [6; 7]

1.1.3 Rozdělení podle typu řetězce

Struktura polymerního řetězce ovlivňuje fyzikální, chemické i mechanické vlastnosti polymerů, což je klíčové pro jejich využití. Podle tvaru a způsobu propojení je možné rozlišit tři základní typy polymerních struktur (Obrázek 6). [1; 7]



Obrázek 6 Druhy řetězců:
a) lineární; b) rozvětvené; c) zesíťované

(zdroj: [7])

Lineární polymery jsou jednoduché linie monomerů spojeny přímo bez bočních větví. Tyto polymery jsou pružné a snadno zpracovatelné. Mezi zástupce patří HDPE nebo PVC. [7]

Rozvětvené polymery obsahují vedlejší větve, které se odpojují od hlavního řetězce nazývajících se boční substituenty. Tyto substituenty ovlivňují hybnost řetězce, a tím mohou způsobit zvýšení viskozity, ovlivnit tavení polymeru nebo jeho mechanickou pevnost. Příkladem rozvětveného polymeru je například LDPE. [7]

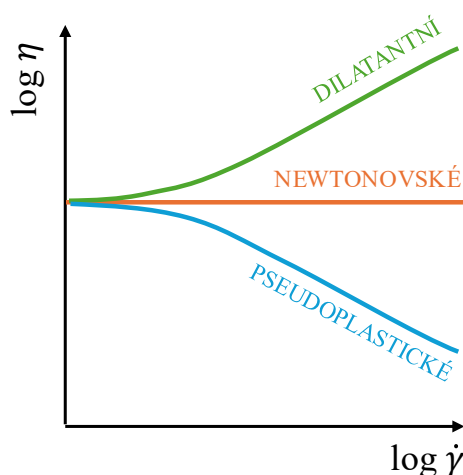
Zesíťované polymery vznikají propojením hlavních řetězců pomocí chemických vazeb. Propojení příčnými vazbami způsobuje zvýšení tuhosti, teplotní odolnosti, chemické stálosti, což je typické chování pro reaktoplasty a elastomery. [7]

2 TOKOVÉ CHOVÁNÍ POLYMERŮ

Tokové chování polymerní taveniny v dutině formy popisuje věda, která se nazývá reologie. Její název vychází z řeckého slova „rhéō“, což znamená téct nebo proudit. Význam tohoto vědního oboru spočívá ve studiu toku a deformace látek při působení sil. Polymery díky své struktuře vytvořené dlouhými makromolekulárními řetězci vykazují složité viskoelastické chování, které kombinuje vlastnosti dokonale viskózních kapalin (newtonovských) a dokonale pružných pevných látek (hookeovy). Z hlediska zpracování plastů má reologie velký význam, protože většina termoplastických materiálů se zpracovává ve formě taveniny. Tokové chování taveniny představuje komplexní proces, do kterého vstupuje vliv tření, teplot, tlaku, sbíhání a rozbíhání proudu, elastické vlivy a mnoho dalších. [6; 8; 2; 9]

2.1 Reologické vlastnosti

Látky v kapalném skupenství lze rozlišit na dilatantní, newtonovské a pseudoplastické. Toto rozdělení vychází z chování látek při změně smykové rychlosti a její závislosti na smykové viskozitě (Obrázek 7). Kapalina s konstantní viskozitou při jakékoliv změně smykové rychlosti se nazývá jako newtonovská. Závislost viskozity u plastů je komplikovaný jev, protože polymery se obecně chovají jako látky pseudoplastické. Při nízkých hodnotách smykových rychlostí se polymer může chovat jako látka newtonovská, ale se vzrůstající rychlostí vzájemného tření vrstev viskozita klesá. Oproti tomu viskozita látek dilatantních má se zvyšující smykovou rychlostí rostoucí charakteristiku. [8; 2]

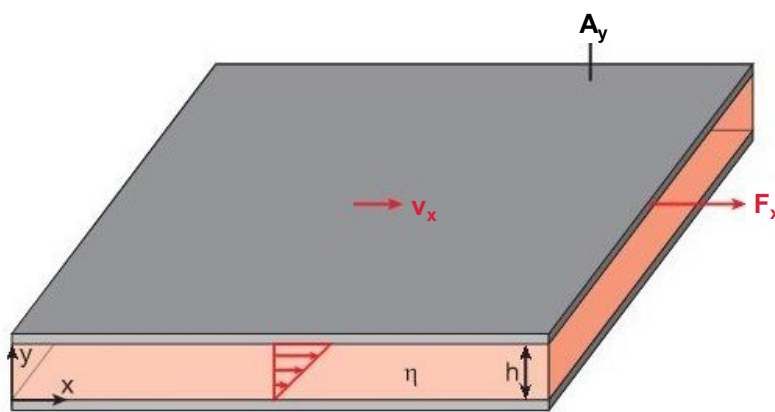


Obrázek 7 Závislost smykové viskozity na rychlosti smykové deformace

(zdroj: [8])

2.1.1 Smykové napětí

Pevné látky je možné namáhat tahem a zároveň smykovým napětím. Kapaliny mohou být oproti pevným látkám namáhány pouze smykovým namáháním a výsledná napětí odpovídající úhlovým změnám teoretického obdélníku na rovnoběžník. Idealizaci chování viskoelastické kapaliny, která je smýkána lze popsat pomocí dvoudeskového modelu (Obrázek 8). Kapalina je představována vodorovnými lamelami, na které působí jednostranná síla ve směru osy x. Na jedné straně jsou lamely ukotveny a postupně se jedna o druhou urychluje a tím vzniká v kapalině smykové napětí. [6; 2; 10]



Obrázek 8 Čistý ustálený smykový tok

(zdroj: [2])

Smykové napětí vyjadřuje rovnice (1): [2]

$$\tau_{xy} = \frac{F_x}{A_y} \quad (1)$$

τ_{xy} – napěťový stav taveniny ve směru x na rovině s normálovým směrem v ose y [Pa]

F_x – síla působící v ose x [N]

A_y – plocha kolmá na osu y [m²]

2.1.2 Rychlost smykové deformace

V dutině vstřikovací formy je žádoucí, aby tavenina tokovým kanálem tekla laminárně. Při laminárním toku vrstvy kapaliny proudí, a tak dochází k plynulému a pravidelnému pohybu myšlených proudnic bez jejich vzájemného mísení. Laminární proudění se vyznačuje nízkými hodnotami Reynoldsova čísla, lepší stabilitou procesu, vyšší kvalitou povrchu a minimalizací vad uvnitř vyrobených dílů. Vzhledem k vysoké viskozitě polymerních

materiálů je ve vtokovém systému žádoucí právě laminární tok, turbulentní by se naopak v dutině neměl vyskytovat. [8; 11]

Jak již bylo popsáno v předchozí kapitole 2.1.1. polymerní vrstvy se po sobě smýkají, a tím se navzájem urychlují. Vzájemný pohyb vrstev a zároveň pohyb vrstev vůči stěně kanálu dosahuje poměrně vysokých hodnot a je označován jako rychlost smykové deformace nebo smyková rychlost. Rychlost změny popisuje rovnice (2) a je definována jednotkou, která se nazývá reciproká sekunda. [8]

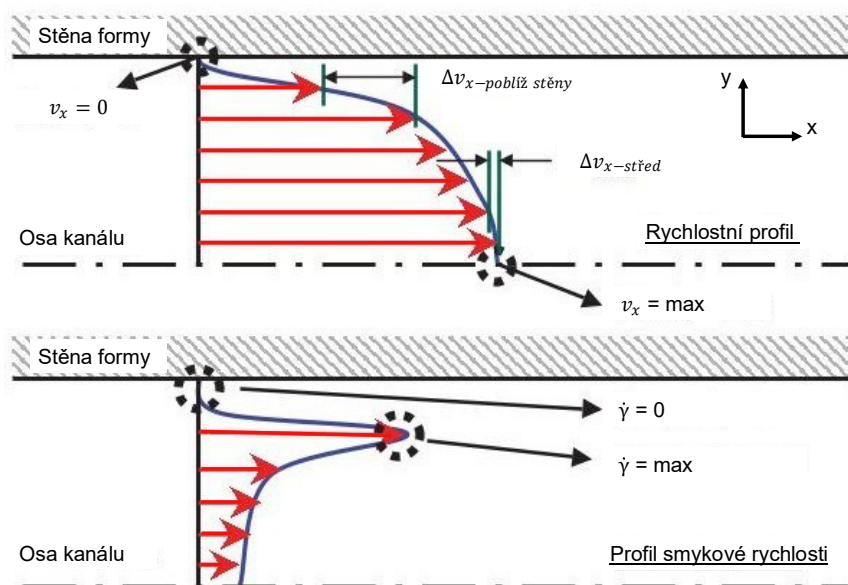
$$\dot{\gamma} = \frac{\delta v_x}{\delta y} \quad (2)$$

$\dot{\gamma}$ – rychlost smykové deformace [s^{-1}]

v_x – složka rychlosti proudění ve směru osy x [$m \cdot s^{-1}$]

y – výška nebo průměr vtokového kanálu [m]

Rovnice popisuje, jak se mění podélná rychlost taveniny v jejích různých vrstvách podél tloušťky kanálu (v průběhu osy y). Rychlost smykové deformace vychází z rychlostního profilu proudění v dutině a k nejvyšší změně dochází právě v místě, kde tavenina těsně přiléhá k vnitřní stěně tokového kanálu. Oproti tomu v oblasti přímo na stěně formy a uprostřed kanálu smyková rychlost nabývá nulových hodnot (Obrázek 9). [8; 10]



Obrázek 9 Znázornění profilu rychlosti a z něj odvozeného profilu rychlosti smykové deformace

(zdroj: [10])

2.1.3 Viskozita

Důležitou veličinou pro popsání toku látek je viskozita, která vyjadřuje odpor látky vůči tečení. Nižší viskozita znamená lepší schopnost materiálu téct, zatímco vyšší viskozita představuje vyšší odpor vůči toku. Z hlediska typu proudění se viskozita dělí na smykovou a tahovou. Smyková viskozita je charakterizována jako odpor vůči smykovému toku, kdy dochází ke změně rychlosti kolmo vůči směru toku. Oproti tomu tahová neboli elongační viskozita popisuje odpor vůči toku, při kterém se rychlost mění podél jeho směru. Smyková viskozita je ve výše zmíněném dvoudeskovém modelu popsána jako poměr smykového napětí a rychlosti smykové deformace. [6; 2; 8]

Vztah pro smykovou viskozitu popisuje rovnice (3): [10]

$$\eta = \frac{\tau_{xy}}{\dot{\gamma}} \quad (3)$$

η – smyková viskozita [Pa·s]

τ_{xy} – napěťový stav taveniny ve směru x na rovině s normálovým směrem v ose y [Pa]

$\dot{\gamma}$ – rychlost smykové deformace [s⁻¹]

Viskozitu ovlivňuje mnoho faktorů jako je tlak, teplota, velikost řetězců, jejich větvení nebo rychlost tahové a smykové deformace. Z viskozity a jejích závislých proměnných lze odvodit některé křivky, které se využívají při zpracovatelském procesu polymerních materiálů, které budou podrobněji popsány v kapitole 2.1.4. [8; 11]

Pro matematické vyjádření ovlivnění viskozity smykovou rychlostí se používají nejčastěji dva viskozitní modely, a to Power-Law model známý také jako mocninový zákon a druhý Cross-WLF model. Power-Law model zjednodušuje závislost smykové rychlosti na viskozitě na lineární, ale má omezení v širokém rozsahu zpracovatelských podmínek. Rovnice mocninového zákona poskytuje užitečné výsledky při vysokých hodnotách smykových rychlostí, avšak pro komerční programy na tokové simulace se příliš nepoužívá. Rovnice druhého Cross-WLF modelu rozšiřuje mocninový zákon z čistě lineární závislosti a umožňuje tak popisovat změny viskozity při velkých rychlostech deformace a zároveň proměnné teplotě a tlaku. [8; 11; 10]

Power-Law model je vyjádřen rovnicí (4): [8]

$$\eta = m \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (4)$$

η – smyková viskozita [Pa·s]

m – index konzistence [–]

$\dot{\gamma}$ – rychlost smykové deformace [s^{-1}]

n – index nenenewtonovského chování [–]

Cross-WLF model popisuje rovnice (5): [8]

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}} \quad (5)$$

η – smyková viskozita [Pa·s]

η_0 – newtonovská viskozita [Pa·s]

$\dot{\gamma}$ – rychlost smykové deformace [s^{-1}]

n – index nenenewtonovského chování [–]

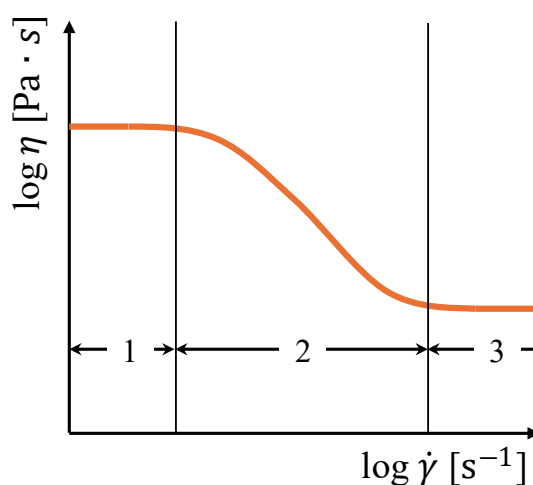
τ^* – kritické napětí [Pa]

2.1.4 Zpracovatelské křivky

Zpracovatelské křivky představují klíčový nástroj pro pochopení reologického chování polymerních tavenin během technologických procesů jako je vstřikování, vytlačování, lisování nebo tvarování. Analýza těchto diagramů umožňuje přesně popsat vztah mezi klíčovými procesními veličinami, jako je tlak, teplota, viskozita a smyková rychlost a dát je do souvislostí. Znalost těchto vztahů umožňuje proces optimalizovat nebo předcházet výrobním vadám na výsledné součásti. [6]

Plasty jsou makromolekulární látky, které se skládají z dlouhých polymerních řetězců. Z reologického hlediska je viskozita výrazně ovlivněna délkou řetězců a jejich interakcí, která se projevuje tvorbou takzvaných zapletenin. Vzhledem k délce řetězců je velká tendence, že se jednotlivé řetězce mezi sebou zamotají, a tím je lze hůře oddělit než kratší řetězce. Při vysoké molekulové hmotnosti lze pozorovat vysoké hodnoty viskozity a zhoršení zpracovatelských vlastností. Závislost mezi smykovou viskozitou a rychlostí smykové deformace se nazývá jako toková křivka (Obrázek 10). Tokovou křivku lze rozdělit na tři části, a to první newtonovské plató (1), oblast pseudoplastického chování (2) a druhé

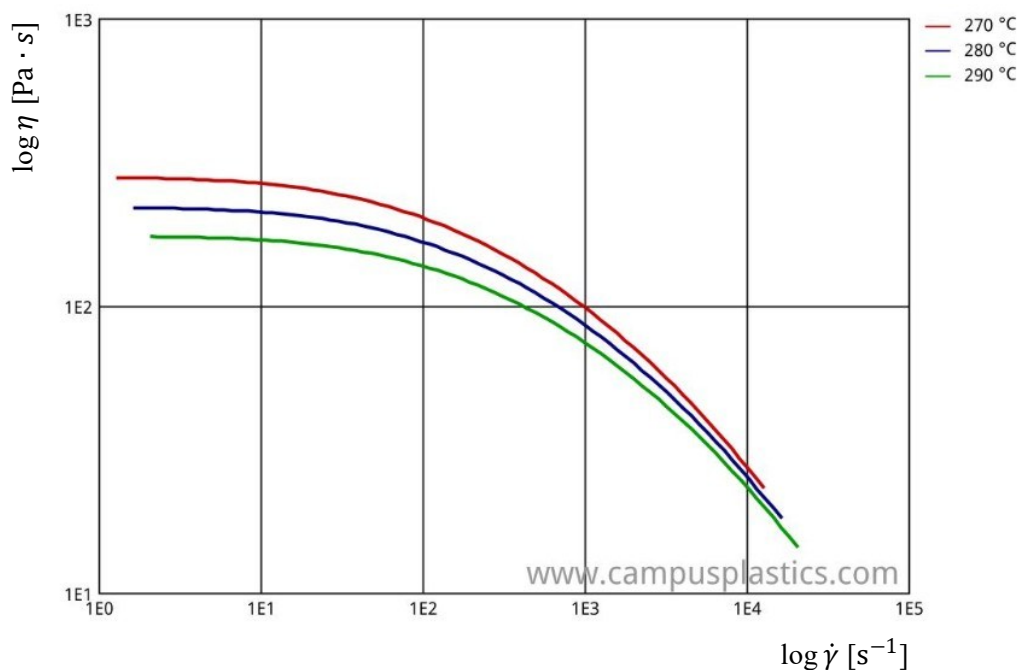
newtonovské plató (3). V první části je rovnováha mezi vznikem a zánikem zapletenin a vyznačuje se nízkými hodnotami smykových rychlostí, které neovlivňují viskozitu. Při vyšších smykových rychlostech se zapleteniny rychleji rozpadají, než vytvářejí, a to způsobuje, že se molekuly narovnávají, snadněji po sobě kloužou a snižuje se tak odpor proti toku (viskozita). Tato střední oblast grafu se nazývá jako zpracovatelská. V třetí oblasti po překročení určité hodnoty smykové rychlosti je tavenina již bez zapletenin a při zvyšování smýkání už nedochází k poklesu viskozity. Oblast druhého newtonovského plata je v praxi nedosažitelná. [6; 2]



Obrázek 10 Toková křivka popisuje rovnováhu mezi vznikem a rozpadem zapletenin

(zdroj: [6])

Polymerní makromolekuly mají v pevném stavu velmi nízkou tepelnou energii, a proto jsou téměř nepohyblivé. Chování polymerů závisí na okolní teplotě v závislosti na teplotě skelného přechodu T_g . Oblast pod teplotou T_g se nazývá jako sklovitá a polymer je v tomto rozmezí teplot křehký a nepoddajný. Nad hodnotou T_g je polymer ve viskoelastickém stavu měkký a houževnatý. Se zvyšující se teplotou se zvyšuje také tepelná energie, která drží makromolekuly pohromadě, a naroste tak jejich pohyblivost. Zvětšením rozestupů mezi makromolekulami se sníží interakce mezi řetězci, a tím dojde k poklesu viskozity. Z toho vyplývá, že s rostoucí teplotou tavenina lépe teče. Obrázek 11 popisuje charakteristickou závislost mezi smykovou rychlostí, teplotou a viskozitou pro PA plněný 15 % skelných vláken. Ve srovnání s vlivem smykové rychlosti je vliv teploty na viskozitu méně výrazný. [8; 11; 10]

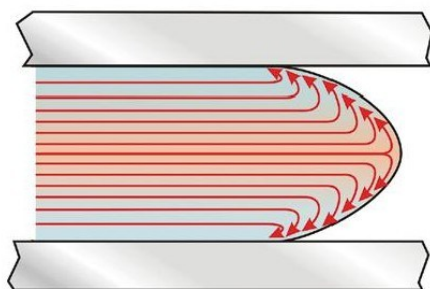


Obrázek 11 Účinky teploty i smykové rychlosti na viskozitu u Ultramidu B3ZG3 (PA6-I GF15)

(zdroj: [12])

2.2 Chování polymeru v dutině formy

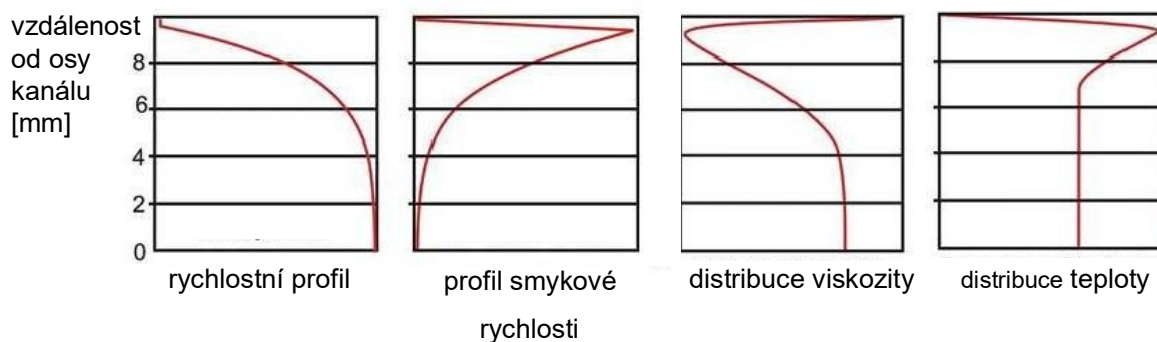
Při vstřikování termoplastů je teplota formy nižší než teplota taveniny a tok uvnitř formy je laminární. Při vstupu taveniny do tokového kanálu se tavenina při kontaktu se stěnou formy okamžitě ochladí, a tak na okraji vzniká zatuhlá vrstva. Tavenina poháněná vstřikovacím tlakem, která vstupuje do formy později proudí kolem středu kanálu a dostává se k vnitřní stěně formy těsně před tuto vrstvu. Výsledkem tohoto proudění je takzvaný fontánový tok (Obrázek 12), pro který je typický parabolický rychlostní profil. Tento profil je zřejmý pouze při prvním vstupu taveniny do vtokových kanálů nebo výrobku. [10; 8; 13]



Obrázek 12 Fontánový tok

(zdroj: [8])

V tokovém kanále jsou osově symetrické podmínky pro proudění taveniny, přičemž osa symetrie je reprezentována hodnotou 0. V blízkosti stěny kanálu je tavenina smýkána a vlivem disipace ohřívána, což má za následek nepravidelné profily rychlosti, smykové rychlosti, teploty a viskozity napříč kanálem (Obrázek 13). Tento jev je zvlášť výrazný pro oblasti se zvýšenou smykovou rychlostí jako jsou například vtoková ústí.

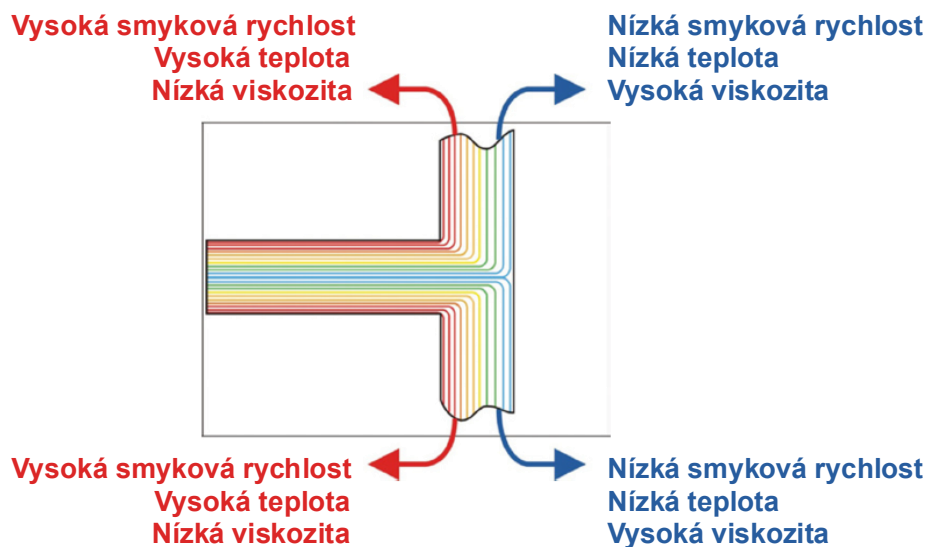


Obrázek 13 Nepravidelné podmínky pro proudění taveniny napříč kanálem

(zdroj: [8])

2.2.1 Nerovnoměrné plnění geometricky vyvážené vtokové soustavy

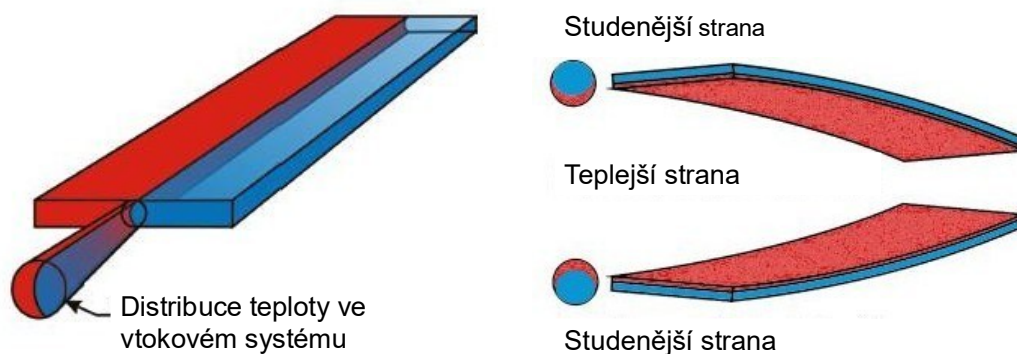
Při návrhu vtokového systému je snahou dosáhnout vyváženého vtokového systému, který je charakteristický tím, že tavenina doteče ke všem tvarovým dutinám současně. Potenciálním problémem geometricky vyvážených vtokových soustav je nepravidelné teplotní pole napříč kanálem způsobené smykovou rychlostí taveniny (Obrázek 13). Přestože je vzdálenost pro tok taveniny ke všem dutinám totožná, některé díly mohou být plněny rychleji v závislosti na jejich umístění ve vtokovém systému. Při průtoku kanálem je polymerní tavenina ve středu obklopena vrstvou s nižší teplotou a vyšší viskozitou. Ve chvíli, kdy laminární proud polymeru doteče k rozvětvení, studenější jádro pokračuje ve svém směru a rozštěpí se o opačnou stranu větve, zatímco teplejší tavenina v okraji kanálu zůstane ve své části (Obrázek 14). Výsledkem kolísání viskozity v průřezu kanálu je nerovnoměrná distribuce teploty v navazujícím kanále. [14; 8; 15; 16]



Obrázek 14 Rozložení teploty a viskozity v rozvodném kanálu

(zdroj: [8])

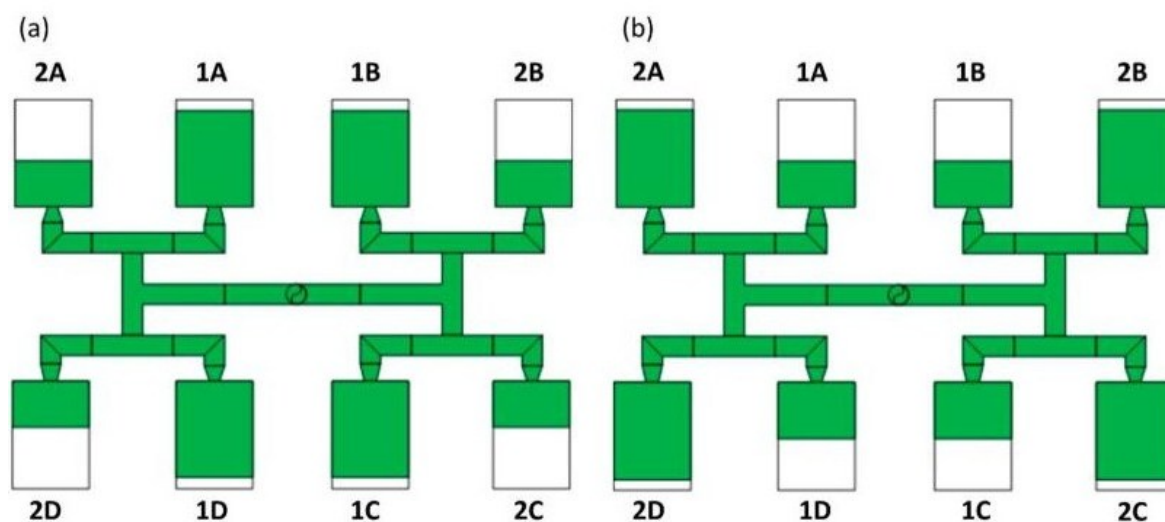
Odchyšky teploty taveniny je možné pozorovat již v jednonásobné formě, ale významnější jsou pro formy s 8 a více dutinami. Pokud dojde k rozvětvení toku taveniny i do následujícího rozvodného kanálu a tímto kanálem je naplněn výrobek, není možné dosáhnout konzistentních vlastností plastových dílů v rámci jednoho cyklu. Teplota vnitřní a vnější vrstvy taveniny se může lišit o desítky stupňů Celsia. U materiálů citlivých na změny teploty (např. PVC) může vlivem vysokých smykových rychlostí docházet k degradaci polymerních řetězců, přičemž některé dutiny mohou být vizuálně v pořádku a jiné vyplněné degradovaným polymerem. Pokud se výrobek naplní vtokovým kanálem s nerovnoměrnou distribucí teploty, dochází k rozdílnému smrštění mezi částí výrobku naplněnou studenější a teplejší částí. Obrázek 15 ilustruje vliv teploty taveniny na rozdílnou deformaci jednotlivých polovin a v neposlední řadě reziduální napjatost ve výrobku. Pokud se jedná o semikrystalický polymer, bude ve výrobku nerovnoměrné rozložení krystalické části. Všechny tyto důsledky způsobují kolísající a nepředvídatelnou kvalitu procesu. [8; 14; 16]



Obrázek 15 Vliv rozdílů ve smykové rychlosti na výslednou deformaci výrobku

(zdroj: [8])

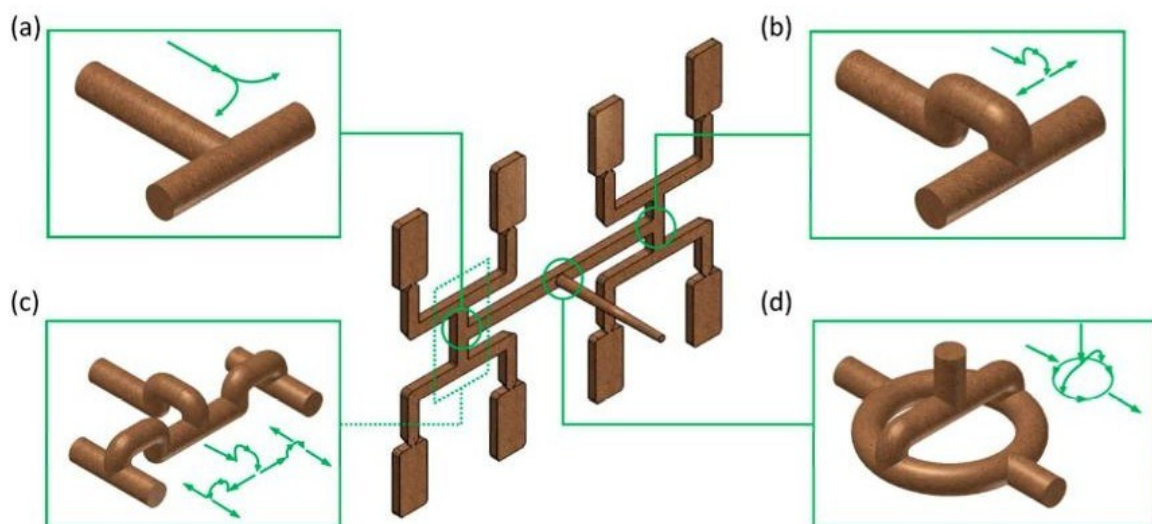
Dalším problémem nerovnoměrného plnění jsou rozdíly v gramáži výrobků, protože některé dutiny jsou v jednu chvíli přepřihovány, zatímco u jiných se mohou objevovat nedoplněná místa (Obrázek 16). Tento jev se vyskytuje jak u forem se studeným vtokovým systémem, tak pro formy s horkým systémem. Rozdíly ve smykové rychlosti lze minimalizovat zvětšením průměru kanálu, avšak u studených systémů to znamená zvyšování množství odpadu. [8; 14; 16]

Obrázek 16 Nerovnoměrné plnění se projevuje: a) nedoplněním vnějších dutin
b) nedoplněním vnitřních dutin

(zdroj: [16])

Nerovnoměrné plnění je momentálně předmětem intenzivního zkoumání vědeckou komunitou a neexistuje žádné univerzální řešení, které by se dalo generalizovat na jakýkoliv typ problému. Hojně využívané komerční řešení je MeltFlipper® od firmy Beaumont, kde

se využívá překlenutí taveniny z jedné strany dělicí roviny do druhé, a tím dojde k jejímu promíchání a homogenizaci. Toto překlenutí se umísťuje do části kanálu, kde dochází k rozdělení. Základní návrh designu byl rozšířen z jednoho na dva korekční prvky a byl využit také návrh kruhového prvku. Dalším řešením je náhrada rovných rozvodných kanálů profilovanými, použití škrťících ventilů, které se aktivují při zvýšení teploty a mnohé další. Jev byl pozorován ve formě s průhledítkem vybavené termočlánky a snímači pro nepřímé měření tlaku. Bylo zjištěno, že pouze 3D síť simulačních softwarů dokáže poskytovat věrohodné výsledky v předvídání smykových jevů. Jev nerovnovážného plnění je silně ovlivněný reologickými vlastnostmi, jako je index toku taveniny, kritické smykové napětí, koeficient přestupu tepla a teplotní vodivost. Mimo tyto vlastnosti důležitými faktory, které nerovnováhu ovlivňují, jsou nastavení procesu, geometrie vtokového systému, vstřikovaný materiál a jediným řešením je optimalizace těchto parametrů pro aktuální implementovaný případ. [16; 8; 15; 17; 18; 19]



Obrázek 17 Geometrie kanálů: a) standardní rozvržení b) s jednonásobnou korekcí
c) s dvojnásobnou korekcí d) s kruhovou korekcí

(zdroj: [16])

3 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

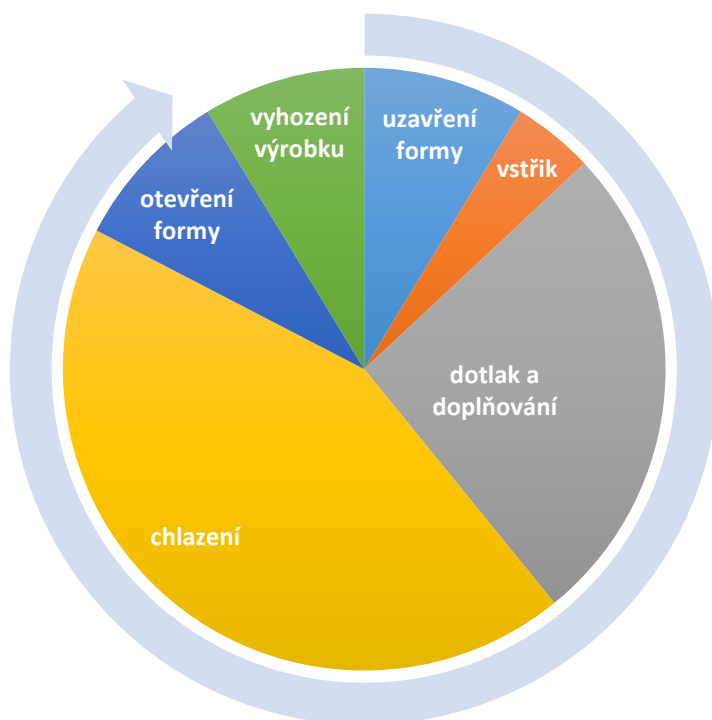
Technologie vstřikování plastů se řadí mezi nejrozšířenější metody zpracování plastů na světě. Jedná se o proces, který se vyznačuje vysokou opakovatelností a možností vyrábět složité tvarové díly s vysokou přesností. Své uplatnění nalézá vstřikování především v automobilovém průmyslu, elektronice, zdravotnictví a obalovém průmyslu. Popularita a důležitost vstřikování vychází nejen ze schopnosti produkovat kvalitní výrobky za krátké výrobní časy, ale také díky rozmanitým možnostem, kdy je možné vyrobit díly od několika miligramů až po desítky kilogramů. Výrobní cyklus probíhá na stroji, který se nazývá vstřikovací a nástrojem je forma, jenž nese negativ vyráběného tvaru. Základní princip vstřikování spočívá ve vstříknutí roztaveného polymeru vysokým tlakem do formy, kde se polymer ochladí a z formy se vyhodí hotový výrobek. [6]

Jedním z nejdůležitějších ukazatelů ekonomické efektivity je počet dílů, které se vyrobí za časovou jednotku. Nejvýznamnější vliv má na čas cyklu chlazení formy, který narůstá s druhou mocninou největší tloušťky stěny výrobku. Při návrhu výrobku by všechny technologické a výrobní náležitosti měly být brány v úvahu, jinak dochází ke zvýšení nákladů na provoz už tak velmi nákladného zařízení, jakým vstřikovací forma je. [6; 14; 20]

Na kvalitě procesu se podílí několik veličin, a to rychlost, tlak, čas a teploty. Aby bylo možné dosáhnout stabilního a konzistentního procesu, je nezbytné rozumět základním principům a pozorovat rovnováhu mezi těmito parametry. Stabilním procesem se rozumí takový, který je schopen akceptovat přiměřené a přirozené odchylky způsobené náhodnými chybami. Kvalita zpracovávaného výrobku lze být posuzována barvou, vzhledem, rozměry, hmotností nebo jinými parametry. Odchylky v procesu můžou být způsobené kolísající kvalitou vstupního materiálu, proměnným podílem vláken, recyklátu nebo závadou na některé z částí stroje nebo periferií. [10]

3.1 Vstřikovací cyklus

Vstřikování plastů je proces, který je diskontinuální a cyklický. Lze jej rozdělit do několika fází, přičemž jeho začátek je definován uzavřením formy. Celkový čas cyklu se počítá jako součet doby uzavírání, otevírání, chlazení a vyhazování. Obrázek 18 zobrazuje vstřikovací cyklus pro jednotlivé kroky vstřikovací formy. [21; 22; 23]



Obrázek 18 Sled operací vstřikovacího cyklu z hlediska formy

(zdroj: [24])

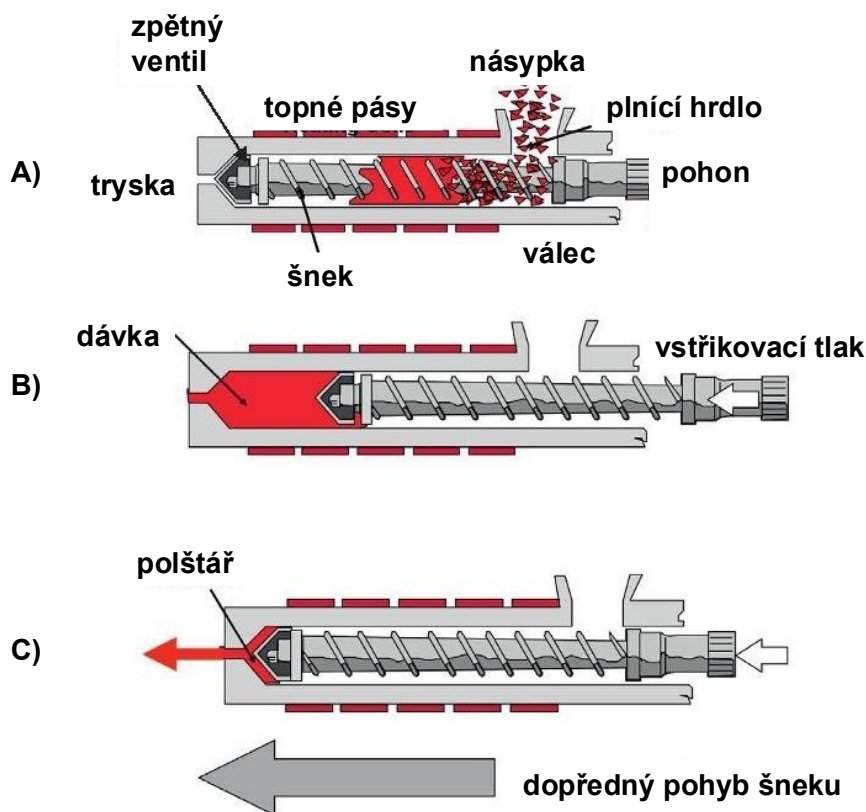
3.1.1 Uzavření formy

Forma je díky uzavíracímu mechanismu sevřena a připravena na vysoký tlak a teplotu, které budou následovat u vstřikovací fáze. Vstřikovací jednotka dosedne na vtokovou vložku formy. [24; 23]

3.1.2 Vstřikování taveniny

Aby bylo možné taveninu vstřikovat do dutiny formy, musí dojít nejprve k její plastikaci (Obrázek 19). Základní předpoklad pro naplnění výrobku je dosažení správné viskozity a teploty taveniny, k čemuž přispívá vhodné nastavení teplot na topných pásmech plastikačního válce, zpětný tlak šneku, jeho obvodová rychlost, respektive otáčky. Poslední

dvě veličiny je možné v závislosti na dráze plastikace profilovat. Nedostatečně homogenizovaná tavenina se projeví vzhledovými a vnitřními vadami jako jsou odchylky lesku, tokové čáry, studené spoje, vnitřní pnutí, orientace makromolekul a mnoho dalších. U semikrystalických polymerů nedojde k rovnoměrné krystalinitě. [25; 22]



Obrázek 19 Průběh plastikační fáze ve vstřikovací jednotce

(zdroj: [26])

Vstřikovací fáze je jedinou fází cyklu, kdy válec není zcela vyplněn taveninou. Šnek je poháněn elektrickým nebo hydraulickým pohonem a nejprve je v nejzazší pozici (A). Při rotaci šneku materiál ve formě prášku nebo granulí vyplňuje mezery a vlivem disipace a tepla generovaného z topných těles se postupně taví. Složka disipované energie by měla z těchto dvou převažovat. Během procesu se šnek kromě rotace vrací zpět a plastikovaný materiál se hromadí před jeho čelem (B). Zpětný ventil zabráňuje tavenině vracet se zpátky do šneku a tím generuje zpětný tlak, který pomáhá k dokonalejší homogenizaci. Zpětný tlak je velmi důležitou součástí správného nastavení vstřikovacího procesu. Díky zpětnému ventilu šnek může fungovat jako píst a lineárním pohybem vstříknout taveninu do formy (C). Malé množství materiálu před čelem šneku se nazývá polštář a jeho funkcí je kompenzovat pulzace během cyklu a zabránit poškození válce šnekem. Opotřebovaný a netěsnící zpětný

ventil může způsobit pulzace taveniny během vstřikování. Otáčení šneku pro další cyklus začne ve chvíli, kdy zamrzne vtokové ústí a nelze již do formy doplňovat další materiál. Rychlost šneku musí být přizpůsobena viskozitě polymerní taveniny, aby smyková rychlost mezi stěnou válce nepřesáhla povolené hodnoty a nedošlo k degradaci. [24; 26; 21; 27; 22]

3.1.3 Dotlaková fáze

Dotlaková fáze slouží ke kompenzaci objemových změn vzniklých během chladnutí materiálu. Během dotlakové fáze se šnek neotáčí, ale je vystaven vysokému tlaku (50 až 100 MPa). Šnek se posouvá velmi pomalým pohybem dopředu o několik milimetrů až do zatuhnutí vtokového ústí, poté je již dotlak neúčinný. Hodnota tlaku při dotlaku je obvykle stejná nebo nižší než hodnota vstřikovacího tlaku. K přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak dochází, když šnek dosáhne předem definovaného bodu zdvihu během dopředného pohybu. Fáze dotlaku je nutná kvůli velkým rozdílům kvůli měrnému objemu roztaveného a ztuhlého materiálu (až 20 %). Dotlakem lze zvýšit rozměrovou přesnost a kompenzovat propadliny. Tato fáze se někdy také nazývá jako dotlak a výdrž a je obtížné mezi nimi stanovit bod přepnutí. [21; 22; 10; 23]

3.1.4 Chladicí fáze

Chlazení je nezbytnou a rovněž dominující částí cyklu, která zajišťuje ochlazení výrobku na vyhazovací teplotu. Čas chlazení je nejvíce závislý na kvadrátu největší tloušťky výrobku. Mimo tloušťku je funkcí teploty taveniny, teploty formy a fyzikálních vlastností jako součinitel přestupu tepla. [27]

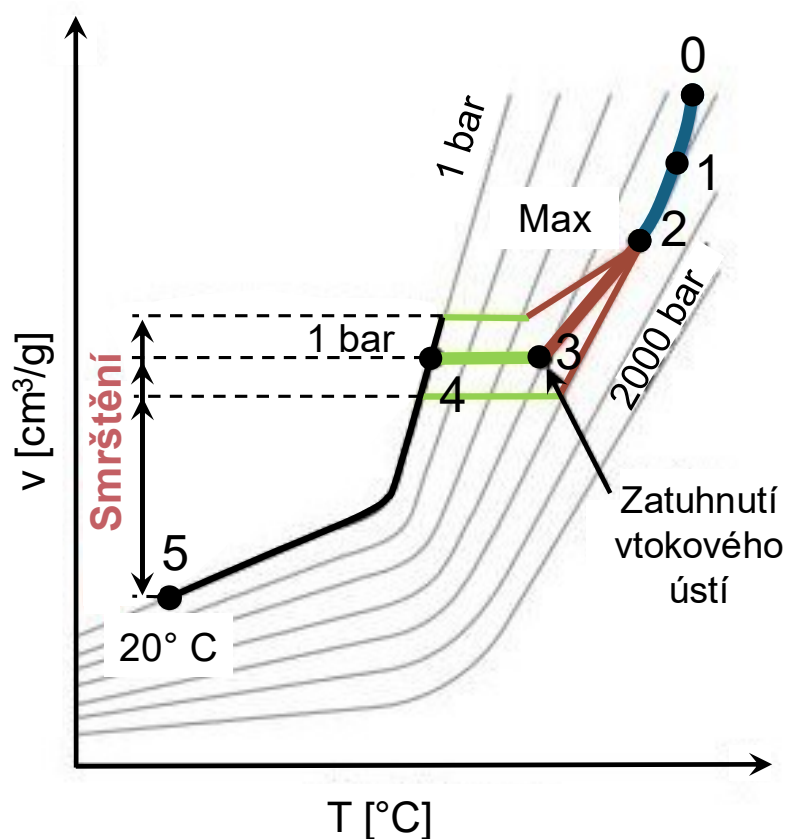
3.1.5 Otevření formy a vyhození výrobku

Při vstřikování semikrystalických plastů může být forma otevřena ihned po dokončení plastikace, ale obvykle je bezpečnější přidat rezervu přibližně 0,5–1 s, aby se vyrovnaly časové odchylky. U amorfních plastů je nutná delší doba prodlevy po plastikaci, aby měl materiál ve formě dostatek času zatuhnout. Fáze otevření a vyhození trvá několik sekund, a to i při použití robota pro vyjímání dílů z formy. [22]

3.2 Vstřikovací cyklus v pvT diagramu

Vstřikovací cyklus je možné zaznačit do pvT diagramu (Obrázek 20), který popisuje závislost měrného objemu na teplotě pro různé hodnoty tlaku. Tento diagram zajišťuje lepší pochopení termodynamických jevů polymerní taveniny v dutině vstřikovací formy. Díky

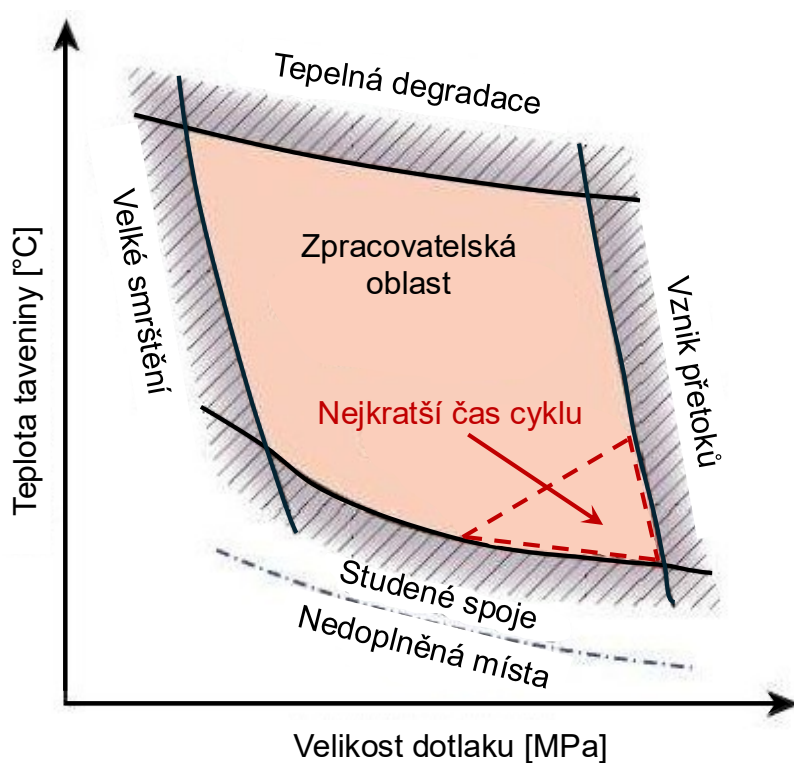
znalostí těchto závislostí je možné určit smrštění, jím způsobenou deformaci a tím v praxi efektivněji nastavit a optimalizovat proces. Aby bylo možné převést teplotu a tlak do diagramu, musí se do grafu zanést v odpovídajících časech. Diagram reprezentuje čtyři základní fáze procesu, a to izotermické vstřikování (0–1), doplňování taveniny s nárůstem tlaku na hodnotu dotlaku (1–2), izobarické chlazení (2–3) a izochorické ochlazení (3–4), při kterém zamrzne vtokové ústí a tlak postupně izobaricky klesá až na hodnotu atmosférického tlaku (4–5). Bod 4 definovaný jako počátek izobarického chlazení je důležitý, protože nominuje celkové smrštění výrobku. Tento bod je v největší míře ovlivněný teplotou taveniny a hodnotě tlaku použitého pro dotlak. Z grafu je patrné, že při použití vyššího dotlaku dochází k menšímu smrštění, a tedy k lepší rozměrové stabilitě. [21; 25; 27; 28]



Obrázek 20 Zobrazení tří vstřikovacích cyklů v p-v diagramu

(zdroj: [27])

Existuje velké množství kombinací nastavovacích parametrů stroje, které zajišťují výrobu jakostních dílů. Obrázek 21 ilustruje limitní křivky, jejichž překročení znamená vyrobit nekvalitní výrobek s patrnými vadami jako jsou přetoky, nedotečené výrobky, propadliny nebo degradovaný materiál. Oblast ohraničená křivkami se nazývá procesní okno. Při vysokých hodnotách dotlaku mají výrobky dobrou rozměrovou stabilitu, ale vznikají na nich přetoky. Příliš nízká teplota taveniny má za následek velmi nekvalitní studené spoje a hrozí riziko nedoplněných výrobků, ale zároveň pokud je teplota taveniny příliš vysoká, dochází k degradaci makromolekulárních řetězců a znehodnocení polymeru. Z těchto důvodů je nutné najít vhodné vstřikovací parametry tak, aby výrobek byl zcela doplněný, bez vzhledových vad a byla zajištěna opakovatelnost procesu. [21; 28]

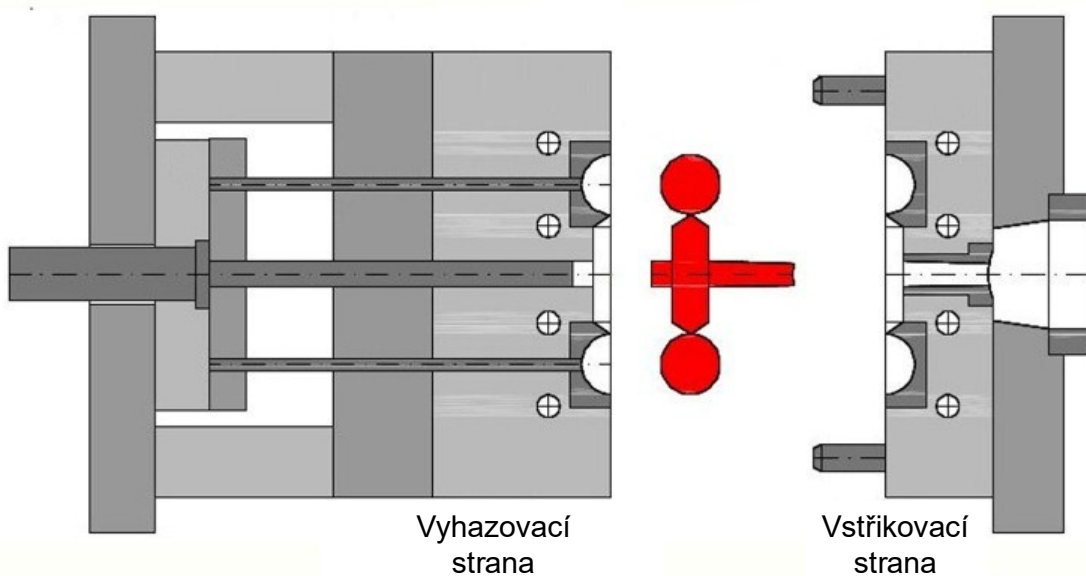


Obrázek 21 Ohraničení procesního okna

(zdroj: [27])

3.3 Vstřikovací forma

Vstřikovací forma určuje finální tvar, rozměry a povrch výrobku. Konstrukční návrh nástroje musí být dimenzován na vysoké teploty a tlaky, které vznikají během vstřikování. Správně navržená konstrukce včetně použitých materiálů hraje zásadní roli pro ekonomiku a životnost nástroje. Skládá se ze vstřikovací a vyhazovací strany, kdy každá z nich je připevněna na jednu z upínacích desek stroje a má vlastní systém řízení teploty. Ve formě se dále nachází tvarové vložky, vtokový, vyhazovací a temperační systém. Základní části formy jsou znázorněny na Obrázku 22. [6; 29]



Obrázek 22 Schématické zobrazení dvoudeskové konstrukce formy

(zdroj: [29])

Hlavní funkce vstřikovací formy:

- distribuce polymerní taveniny,
- tvarování výrobku,
- ochlazení výrobku na vyhazovací teplotu,
- vyhození výrobku z formy. [6]

Vstřikovací forma je velmi nákladné zařízení, jehož pořízení je rentabilní pouze pro sériovou a hromadnou výrobu. Většina dílů, které lze využít v konstrukci vstřikovací formy jsou standardizovány. Díly je možné nakoupit od výrobců normálí jako je Meuburger, HASCO, DME, STRACK aj., kteří nabízejí široké a propracované portfolio součástí včetně

montážních rozměrů. Výhodou použití normalizovaných dílů je zrychlení výroby, ušetření nákladů, dlouhodobá dostupnost náhradních dílů a snadná náhrada v případě poškození některé ze součástí. Online katalogy výrobců umožňují vlastní konfiguraci celého rámu vstřikovací formy nebo například horkého systému. [6; 30]

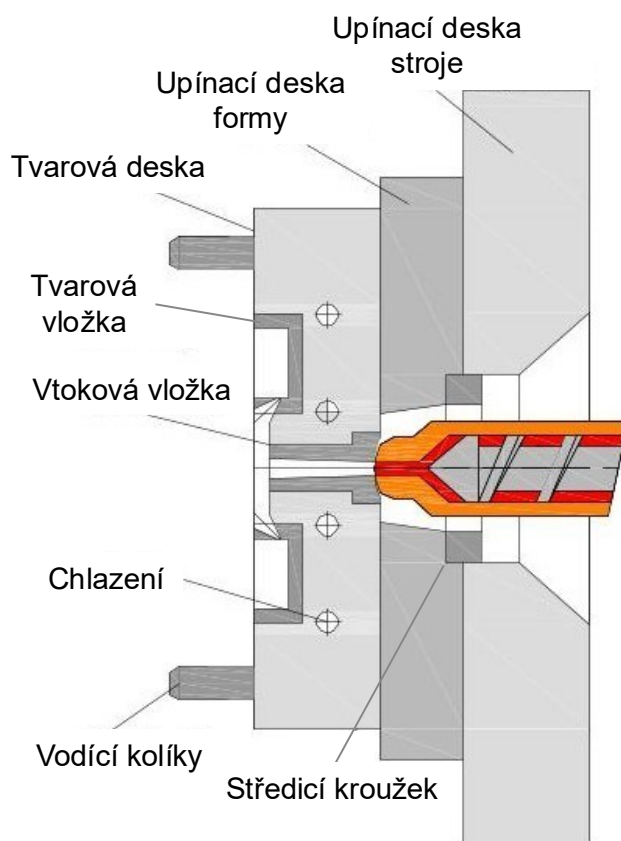
Konstruktor formy při návrhu musí dle zadaného 3D modelu výrobku akceptovat délkové, úhlové a geometrické tolerance dané výkresem. V dalším kroku zhodnotí dodatečné poučky, například že pro těsnící oblasti na výrobku nelze akceptovat stopy po dělicí rovině. Následujícím úkolem je zvětšit 3D model výrobku o hodnotu smrštění uvedenou na materiálovém listu použitého polymeru. Poté musí konstruktor provést rozvržení dělicích rovin a tvarových vložek s přihlédnutím na přesnost pro jednotlivé rozměry. Přesné rozměry jsou zpravidla opatřeny tvarovými vložkami, kvůli snadnějším dodatečným úpravám. Hlavní směry odformování obvykle definuje již konstruktor výrobku jeho tvarem. Koncept zaformování poté určí, jestli je možné výrobek odformovat pouze otevřením hlavní dělicí roviny, nebo jsou potřeba dodatečné mechanismy jako boční odformování, hydraulicky ovládané čelisti, šikmé vyhazovače nebo vytáčecí mechanismy. [25; 24]

Formy lze klasifikovat podle:

- násobnosti,
- počtu dělicích rovin,
- typu vtokového systému,
- typu vyhazovacího systému,
- velikosti formy. [6]

3.3.1 Vstřikovací strana

Vstřikovací strana (Obrázek 23) je připevněna na nepohyblivou stranu stroje a během výrobního cyklu je statická. Středění formy vůči stroji je realizováno pomocí středícího kroužku. Součástí vstřikovací strany je horký nebo studený vtokový systém, jehož součástí je vtoková vložka, na kterou dosedá tryska plastikační jednotky. Tryska stroje má menší rádius a větší průměr otvoru než vtoková vložka, aby došlo k dobrému zatěsnění během vstřikování. Těsný kontakt mezi formou a strojem zajišťuje vysoký tlak přenášený na kalenou vtokovou vložku. Mezi upínací deskou formy a stroje obvykle bývá izolační deska, která zabraňuje přenosu tepla do upínacích ploch stroje. Ve vstřikovací straně jsou vodící kolíky, které centrují polohu vyhazovací strany při zavírání. Zvláště při použití horkých systémů je velmi důležitá dekomprese, aby při otevření formě plast nemohl z formy volně vytékat. Šnek dekomprimuje taveninu ihned po ukončení dávkování mírným pohybem zpět. Při špatném nastavení může být do vtokového systému přisáván vzduch, což vede ke vzniku spálenin nebo bublin ve výrobku. [29; 31]



Obrázek 23 Vstřikovací strana včetně plastikační jednotky

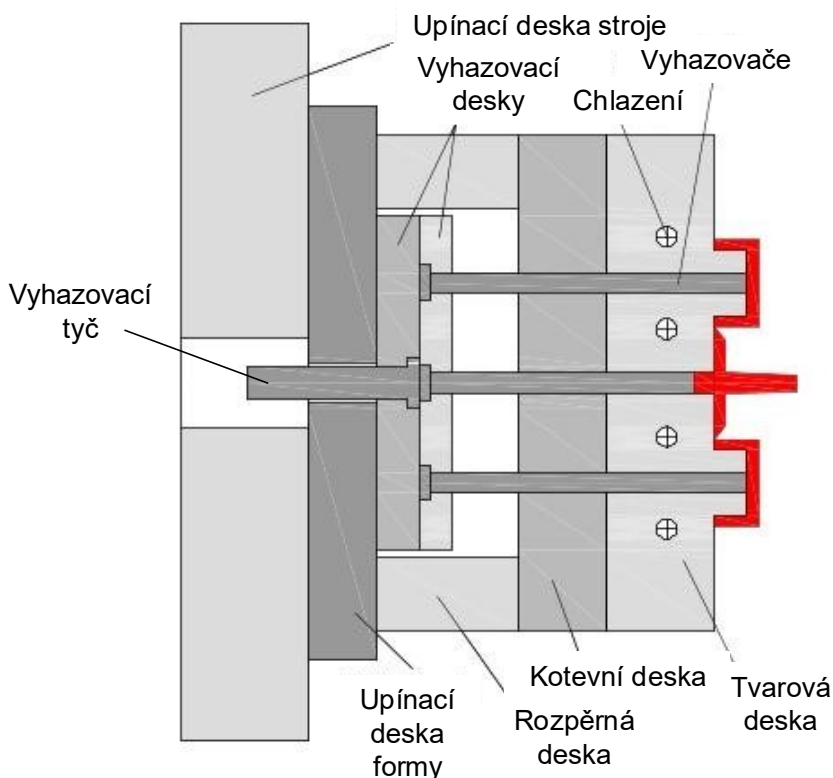
(zdroj: [29])

3.3.2 Vyhazovací strana

Vyhazovací strana (Obrázek 24) je upnuta na pohyblivou část stroje a při výrobě se pohybuje vzhledem k pevné straně formy. Středění vůči vstřikovací straně je díky vodicímu pouzdru, do kterého zajíždí vodicí kolík. Při otevírání výrobek musí zůstat na vyhazovací straně, aby forma následně mohla být vyprázdněna. Při konstrukci se dbá, aby větší plocha výrobku byla zaformována ve vyhazovací straně. Sestava vyhazovacích desek, vyhazovačů a vedení se nazývá vyhazovací paket, jenž je prostřednictvím tyče připojen ke stroji. Stroj ovládá vyhazovací paket pomocí mechanické, hydraulické nebo pneumatické energie. [31; 29]

Výrobky lze z formy vyhodit pomocí:

- válcových, trubkových nebo prizmatických vyhazovačů;
- stírací desky;
- šikmých vyhazovačů;
- pružných vyhazovačů;
- pneumatického nebo hydraulického zařízení. [29]



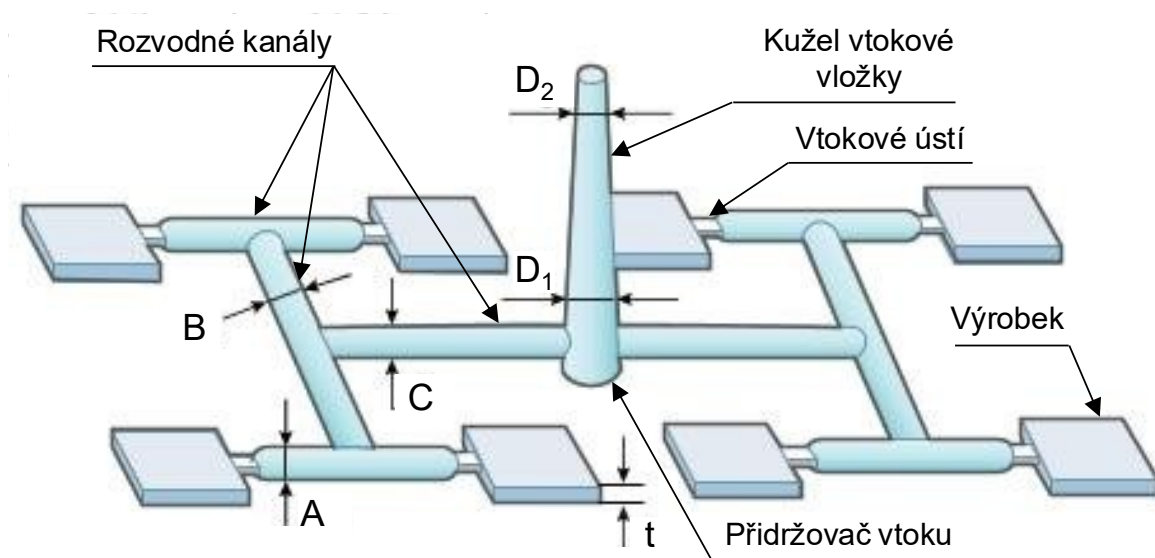
Obrázek 24 Schéma vyhazovací strany

(zdroj: [29])

3.3.3 Vtokové systémy

Klíčovým prvkem každé vstřikovací formy je vtokový systém, který zajišťuje dopravu polymerní taveniny z trysky vstřikovacího stroje do tvarové dutiny. Správně navržený vtokový systém je zásadní pro kvalitu výrobku, minimalizaci výrobních vad a optimalizaci času cyklu. Hlavní funkcí je zajistit rychlé a rovnoměrné plnění každé z dutin. Při konstrukci formy a návrhu vtoku je nutné zohlednit polohu a tvar vtokového ústí na výrobku, typ vtokového systému (studený, horký nebo kombinovaný), tvar rozvodných kanálů a také relativní rozměry jednotlivých částí rozvodného systému s minimální ztrátou tlaku. Vtokový systém při vstřikování plastů představuje technologický odpad, který nezůstává součástí finálního výrobku, a proto je důležité jeho velikost minimalizovat. V opačném případě se zvětšuje spotřeba materiálu, prodlužuje čas cyklu, čímž rostou výrobní náklady. [32; 24; 8]

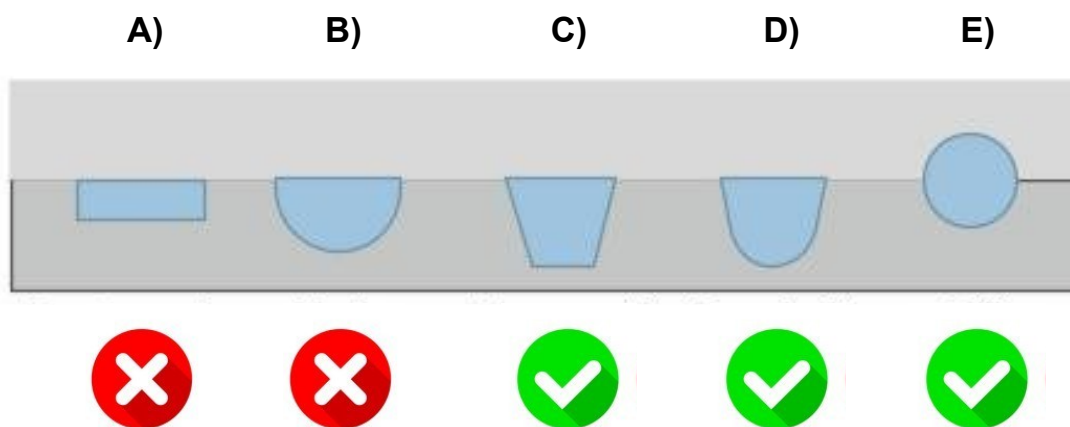
Studený vtokový systém (SVS) přivádí taveninu do dutiny, přičemž ihned při kontaktu se stěnou formy tuhne a poté je z nástroje vyhozen společně s výrobkem. Primárně se skládá z části ve vtokové vložce, rozvodných kanálů, vtokového ústí a přidržovače vtoku, jež jsou detailně znázorněny na Obrázku 25. Jejich návrh musí také zohledňovat bezpečné odformování, garantovat efektivní možnost použití dotlaku a výrobek nesmí ztuhnout dříve než vtokový systém. Tlakovou ztrátu lze minimalizovat odstupňovaným průřezem rozvodných kanálů, a to s klesajícím trendem směrem ke vtokovému ústí ($A < B < C$), kdy rozdíl mezi kanály je přibližně 1 mm. Rozměry vychází z průměrné tloušťky dílu. [20; 29]



Obrázek 25 Studený vtokový systém osminásobné formy

(zdroj: [24])

Je snahou provést rozložení výrobků ve formě tak, aby byla toková vzdálenost ke všem tvarovým dutinám totožná. Takto navržený systém se označuje jako geometricky vyvážený a jeho cílem je zajišťovat konzistentní podmínky pro všechny výrobky v rámci cyklu. I přesto vznikají rozdíly mezi dutinami v důsledku rozdílů smykové rychlosti napříč kanálem (jev je podrobněji popsán v kapitole 2.2.1). Kromě rozložení rozvodných kanálů je velmi důležitý jejich průřez. Nejpoužívanější průřezy vtokových kanálů zobrazuje Obrázek 26. Rozdílné průtočné průřezy se liší účinností, která je definována jako poměr obvodu smáčené plochy a průřezu kanálu. Kruhový typ kanálu je nejefektivnější, nejlépe přenáší tlak, má nejnižší odpor a ztráty tepla, ale vyžaduje obrábění do obou stran formy. Dalšími doporučenými tvary pro kanály jsou lichoběžníkový a parabolický, které jsou obrobena pouze do jedné strany formy, čímž lze ušetřit náklady na výrobu. Půlkruhový a obdélníkový průřez se kvůli nízké účinnosti nedoporučuje. [20; 29; 24]



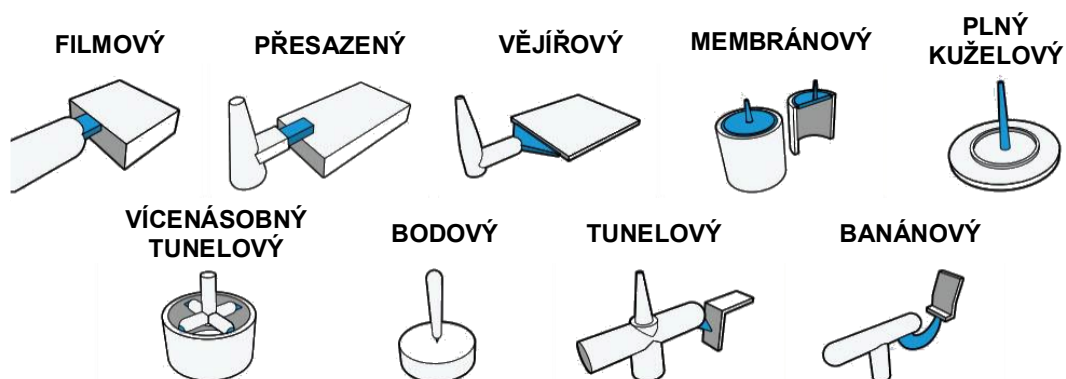
Obrázek 26 Vybrané průřezy vtokových kanálů: a) obdélníkový b) půlkruhový
c) lichoběžníkový d) parabolický e) kruhový

(zdroj: [24])

Vtokové ústí představuje místo s nejužším průřezem ve vtokovém systému, které se nachází na rozhraní výrobku a rozvodného kanálu. V případě, že poměr mezi délkou toku a tloušťkou stěny (L/t) nepřesahuje hodnoty dovolené výrobcem materiálu dané typem polymeru a teplotou taveniny, je nejvhodnější variantou plnit výrobek jedním vtokovým ústím. Tímto konstrukčním řešením lze dosáhnout mechanicky pevnějších studených spojů nebo je úplně odstranit, zlepšit orientaci makromolekulárních řetězců a dosáhnout rovnoměrnějšího rozložení teploty a tlaku. Varianta více vtokových bodů ústících do jednoho výrobku lze použít pouze v nevyhnutelném případě. Hledání polohy vtoku je velmi komplexní záležitost a je potřeba vyhodnotit několik faktorů. Jedním z hodnotících hledisek může být

neumistovat ústí na povrchy, které jsou vzhledové nebo funkční. Stopa po vtoku může z estetického hlediska působit na výrobku rušivě a rovněž by se vtok neměl nacházet v místě, které například zapadá do jiného dílu nebo je těsnicí. Kromě samotné stopy po vtoku se mohou vlivem vysokého namáhání kolem ústí vyskytovat různé vzhledové vady jako odchylky lesku nebo šmouhy. Dalším aspektem je, že polymerní tavenina by měla proudit z tlustší stěny do tenčí, aby tenké oblasti výrobku nestihly zatuhnout dříve, než budou ostatní doplněny. Celkový objem výrobku má rovněž významnou roli, protože jeho doplnění vyžaduje vysokou vstřikovací rychlost, která způsobuje nadměrné smýkání taveniny. Překročení kritické hodnoty smykové deformace dané výrobcem způsobuje degradaci polymeru, jež je během procesu nepřipustná. V některých případech je poloha určena podle tvaru výrobku, kdy se vtokové ústí dává skrz výrobní hledisko do tvarově nejjednoduššího místa, pokud to zaformování umožňuje. V případě umístění ústí do složitého tvaru vyvstává riziko, že při stříhání vtoku od výrobku nedojde k správnému odformování. Mezi další faktory lze zařadit vliv tokové dráhy na orientaci makromolekulárních řetězců, zvláště v případě plnění vláknovými plnivými. Uspořádání vláken ve výrobku má vliv na výslednou mechanickou pevnost a také na smrštění. V poslední řadě je potřeba vyhodnotit polohu studených spojů, které významně ovlivňují mechanickou odolnost při namáhání. [24]

Existuje mnoho druhů vtokových ústí, jejichž volba závisí především na geometrii dílu, materiálu výrobku a žádaném stupni automatizace. Některé typy ústí neumožňují oddělit výrobek od vtoku přímo ve formě a separují se až po vyhození dodatečně. Obrázek 27 zobrazuje nejpoužívanější typy vtokových ústí, přičemž pouze varianta tunelového a banánového vtoku dovoluje oddělení vtokového zbytku přímo ve formě, díky čemuž se ušetří náklady spojené s dodatečnými úpravami. [8; 29]

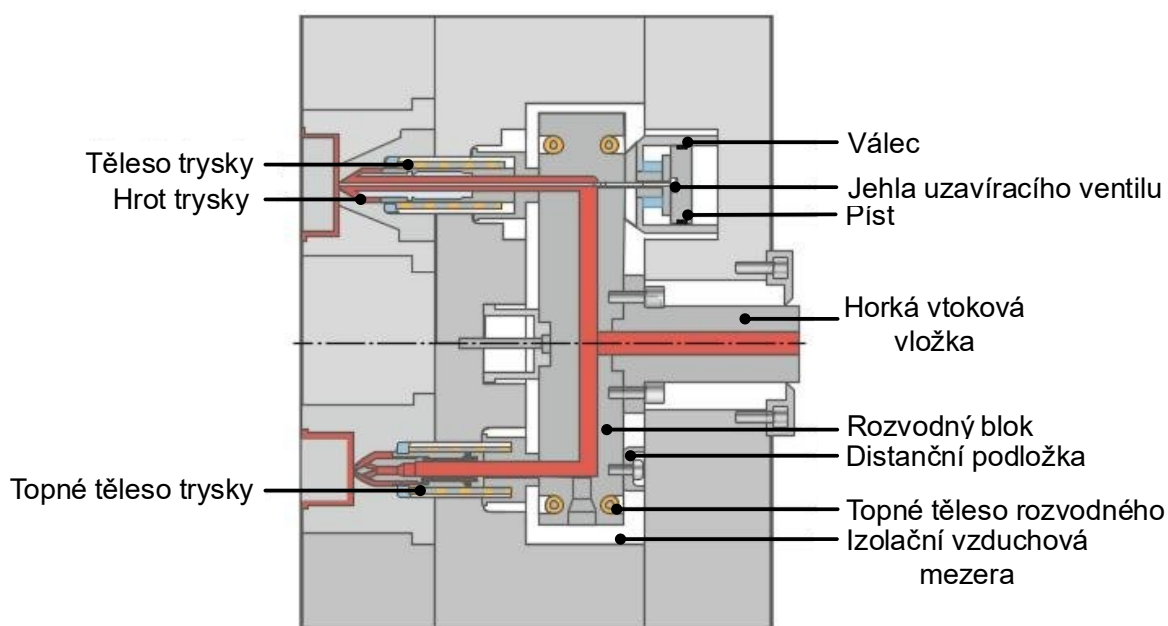


Obrázek 27 Vybrané druhy vtokových ústí

(zdroj: [33])

Pokud se vtokový systém nachází ve stejné dělicí rovině jako výrobek, jedná se o takzvaný dvoudeskový systém formy, nazvaný podle počtu desek, které jdou do styku s roztaveným polymerem. V tomto případě je vtok limitovaný prostorem mezi tvarovými dutinami, přičemž mnohdy není možné najít z boční strany vhodné umístění nebo jsou jeho varianty velmi omezující. Vtok je možné zaformovat do jiné dělicí roviny než výrobek, čímž rozvržení kanálů přestává být závislé na místu mezi dutinami a nabízí nové konstrukční možnosti. Pokud se ve formě otevírají dvě paralelní dělicí roviny, systém formy se nazývá jako třideskový a jeho předností je, že umožňuje oddělit vtokový zbytek od výrobku přímo ve formě. Třideskové systémy využívají bodový typ ústí vtoku. [20; 29]

Horký vtokový systém (HVS) zajišťuje kontinuální udržování taveniny v tekutém stavu až do okamžiku jeho vstupu do dutiny formy. Na rozdíl od SVS zde nedochází k ochlazení a tuhnutí materiálu, čímž se eliminuje technologický odpad a zvyšuje efektivita výroby. Stejně jako u třideskového systému, použití horkého systému je více flexibilní z hlediska umístění vtoku oproti možnosti, kdy vtok leží ve stejné dělicí rovině jako výrobek. Obrázek 28 zobrazuje schéma typického horkého systému skládající se z rozvodného bloku, který rozvádí taveninu ke vtokovému ústí, včetně obou druhů trysek: otevřená (spodní), s uzavírací jehlou (horní). Obě varianty trysek se v jedné formě standardně nevyskytují, schéma slouží pouze pro znázornění konstrukčních rozdílů mezi tryskami. [8; 20]



Obrázek 28 Schématické zobrazení horkého systému

(zdroj: [24])

Výhody HVS ve srovnání se SVS:

- kratší čas cyklu,
- snížení nákladů na odpad v podobě vtokového systému,
- možnost výroby rozměrnějších dílů,
- minimální stopa na výrobku,
- vyšší stupeň automatizace
- lepší možnost regulace.

Nevýhody HVS ve srovnání se SVS:

- vysoká pořizovací cena,
- nelze snadno změnit barvu,
- není vhodné pro velmi malé díly,
- vyšší náklady na údržbu,
- možné prostoje,
- delší zavádění do procesu. [13; 34; 20]

Oba systémy, horký i studený, mají své přednosti i omezení, a proto je nutné pečlivě posoudit jejich vhodnost pro danou aplikaci s ohledem na specifické požadavky na výrobek. Výběr konkrétní technologie je většinou otázkou ekonomiky. Na jedné straně je potřeba vzít v úvahu na vysoké náklady na pořízení HVS, na druhou stranu zisk ze zkrácení cyklu, zvýšení produktivity a minimalizace technologického odpadu může být markantní. Rozměry forem pro oba typy rozvodů jsou přibližně stejné, jediný rozdíl je, že pro horký systém bude potřeba menší plastikační jednotka. Rentabilita nákladů tedy vychází především z množství kusů, které se vyrábí za určitou časovou jednotku, kdy nákup HVS je obvykle ekonomicky výhodný při výrobě více než 30 000 ks ročně. [20; 35]

Kromě ekonomické stránky věci, existuje další velké množství faktorů, které je potřeba před nákupem horkého vtoku brát na vědomí. Mezi tryskou stroje a vtokovým ústím by měla být minimální tlaková ztráta, aby zbylo co nejvíce tlaku na vyplnění tvarových dutin. Pravidlem je, že vstřikovací tlak použitý v horkém kanálu by neměl přesáhnout 25 % kapacity vstřikovacího tlaku stroje. To znamená, že se musí zvětšit průřez kanálu a tím i množství taveniny v kanálu, které slouží jako zásoba. S tímto zvyšujícím množstvím se také

zvyšuje doba, kdy je tavenina v rozvodném bloku vystavena působení tlaku a teplot. Nadměrná zdržná doba může vést k degradaci plastu v systému kanálků. Maximální povolený zdržný čas je pro každý polymer a teplotu jiný a lze odečíst z grafů od výrobce materiálu. Některé materiály jsou velmi citlivé na teplo a jiné méně, ale u většiny plastů platí, že množství taveniny v horkém systému by mělo být maximálně 2–3x vyšší než celková velikost vstřikované dávky. Zdržná doba je limitující především pro velmi malé výrobky a dlouhé časy cyklu. Dalším hlediskem je, že mezi tryskou stroje a dutinou výrobku by měla být minimální ztráta tepla. Teplotní rozdíl napříč horkým blokem by neměl přesahovat 5 % z jeho jmenovité teploty. Jeden z důležitých faktorů při instalaci je, že HVS by měl být důkladně izolován od okolních desek vzduchovou mezerou. Jistá tepelná ztráta je nevyhnutelná, protože horký vtok musí být ve formě podepřený proti vstřikovacím tlakům. U desek, které jsou takovým způsobem v kontaktu je nutné dobré chlazení. Dalším kritickým místem je oblast ústí trysky, kde je nutné dostatečné chlazení, aby při zatěsňování nedocházelo k úniku plastu z horkého kanálu a zbytečně se neprodlužoval čas cyklu. Neméně důležitou zásadou je, že všude, kde je to možné by mělo být pouze jedno vtokové ústí na jeden výrobek. Existují výjimky především pro rozměrné výrobky, například v případě, kde vzdálenost od ústí k nejzazšímu rohu je příliš dlouhá. Stejně jako u studeného vtoku by měl být pokles tlaku u každé dutině stejný, čímž se zajistí rovnoměrná kvalita vyráběných dílů. Obrázek 29 ilustruje standardní rozvržení kanálů pro rozvodný blok se čtyřmi tryskami, kde je patrné, že rozdílná teplotní pole v průřezu kanálu způsobující nestabilitu plnění se vyskytuje i v horkém systému (jev je podrobněji vysvětlen v kapitole 2.2.1). Obecně lze poznamenat, že není vhodné používat víceúrovňové rozvodné bloky a je naopak žádoucí používat uspořádání s co nejmenším počtem míst, kde se tavenina rozděluje (tvar X). [20; 35]



Obrázek 29 Standardní rozvržení kanálů v rozvodném bloku pro čtyřnásobnou formu

(zdroj: [20])

Existují dva typy vyhřívání horkých bloků, a to s vnějším a vnitřním ohřevem. V případě vnějšího ohřívání taveniny je kanál obklopen topným tělesem, které jej udržuje v izotermických podmínkách a zajišťuje rovnoměrné teplotní pole. V tomto systému

tavenina není v kontaktu s topnými elementy. Nejčastěji se využívají topné spirály, což jsou tvarově ohnuté šroubovice vložené do desek, kde jsou obloženy teplovodivým materiálem nebo zakrytovány. Další variantou jsou topné patrony vložené do vyvrtaných otvorů kolem kanálů za použití tepelně vodivé pasty. Vyznačují se snadnou výměnou v případě potřeby a své využití nachází zejména pro jednodušší formy. Vnitřní ohřev probíhá v ose kanálu pomocí torpéda. Přenos tepla do ostatních částí formy je v tomto případě nízký, což zaručuje vysokou pravděpodobnost, že forma bude utěsněna. Nevýhodou je změna barvy, při které se musí celý systém rozebrat a vyčistit. Vnitřně vyhřívaný systém se proto dnes téměř nepoužívá. [8; 21]

Světoví výrobci, kteří se zabývají návrhem HVS jsou například Meusburger, Mold-Masters nebo EWIKON atd. Některé konstrukční řešení jsou standardizovány (samostatné trysky), jiné lze online nakonfigurovat dle prostorových možností formy nebo poplatit řešení na míru od výrobce. Horký systém lze zakoupit jako jednotku, která se nazývá jako horká polovina, kdy zákazník dostane sestavený rozvodný systém společně se zapojenou kabeláží jakožto celek vložený přímo do formy. Nejjednodušší variantou je zakoupit jednotlivé komponenty HVS, které lze sestavit a zapojit do formy u výrobce nástroje. Pro velmi rozměrné díly a komplexní systémy jsou preferovány předem sestavené a zapojené, které lze jako jednotku vložit přímo do vlastní konstrukce formy. Výběr konkrétní varianty obvykle závisí na možnostech zákazníka, zejména zda má možnost si desky obrobit. Pro komplexní systémy s více než 8 tryskami jsou obvykle upřednostňovány horké poloviny. Obrázek 30 zobrazuje všechny výše zmíněné alternativy provedení HVS. [20]



Obrázek 30 Tři možnosti nákupu HVS: horká polovina (vlevo), zapojená sestava (uprostřed), samostatné komponenty (vpravo)

(zdroj: [30])

4 TOKOVÉ ANALÝZY

Tokové analýzy jsou moderní přístup k procesu vstřikování, který umožňuje detailní predikci reálného procesu, včetně toku taveniny, chlazení formy, smrštění a deformace výrobku. Tento druh analýz se řadí mezi CAE (Computer-Aided Engineering) systémy, což je způsob počítačem podporovaného návrhu, který vede k usnadnění konstrukce a optimalizace procesu. CAE softwary dokážou zahrnout složité reologické, tepelné a mechanické vlastnosti, a tím digitálně prověřit nové i stávající nástroje. Díky použití numerických simulací lze v rané fázi návrhu formy a výrobku identifikovat a eliminovat potenciální problémy, což vede ke snížení nákladů na dodatečné úpravy, kratší době vývoje a vyšší kvalitě finálních dílů. Kromě velkého podílu na vývoji mají své místo také v ilustraci pochopení příčin vzniku komplikací v reálném výrobním procesu včetně zpětného dohledávání a zkoumání možností nápravy chyb. Obrázek 31 ilustruje postup od návrhu až po výrobu včetně implementace CAE do procesu. Jistou nevýhodou je velká odborná znalost potřebná pro nastavení podmínek simulace včetně interpretace výsledků. Některé okrajové podmínky a simulační vstupy jsou funkcí dalších proměnných, které obecně nemusí být známy nebo jsou zjednodušeny. Z tohoto důvodu by výsledky neměly být považovány za ověřená řešení, ale pouze jako vývojový nástroj, který je potřeba v praxi ověřovat fyzickým testováním. [14; 24; 36; 21; 37; 38]

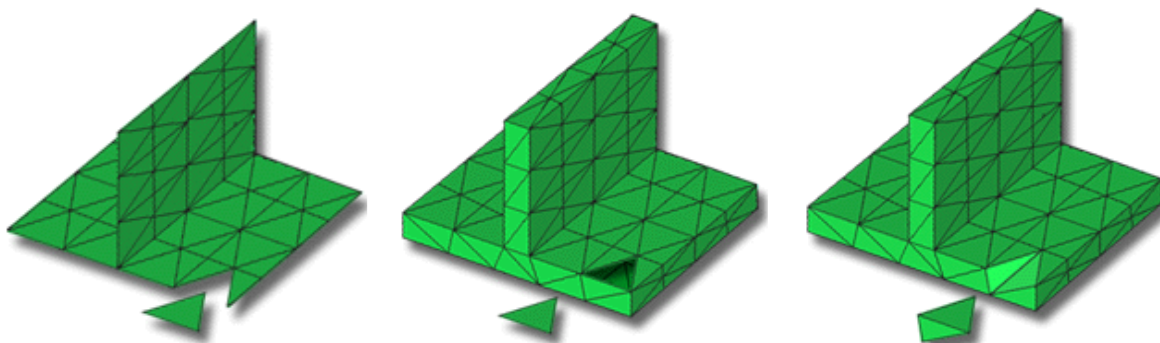


Obrázek 31 Vývojová fáze s použitím CAE

(zdroj: [24])

4.1 Typy sítí

Pro simulační analýzy je k dispozici celá řada softwarů, mezi ně patří například Autodesk Moldflow Insight, Cadmould 3D nebo Moldex 3D. Každý z těchto programů pracuje s modelem tak, že je vysítován metodou konečných prvků. Autodesk Moldflow nabízí tři druhy sítí, které jsou zobrazeny na Obrázku 32. Výběr typu sítě a její hustota se volí na základě typu výrobku a jejich určení je zásadní pro dosažení reálných výsledků. [36; 39]



Obrázek 32 Typy sítí v programu Autodesk Moldflow Insight: 1D (vlevo), 2,5D (uprostřed), 3D (vpravo)

(zdroj: [40])

4.1.1 1D (Midplane mesh)

Základní typ sítě je 1D, která se skládá z trojúhelníkových prvků se třemi uzly a reprezentuje model proložení součásti střednicovou plochou. Tloušťka sítě je pak v programu definována atributem tloušťky. Její použití je vhodné zejména pokud je díl tenkostěnný nebo pokud je určitý typ analýzy dostupný pouze pro tuto síť. Nosníkové elementy charakterizované dvěma uzly se zpravidla využívají pro definici vtokového systému a chladicích okruhů. [40; 39]

4.1.2 2,5D (Dual domain mesh)

Tento typ sítě si lze představit jako plášť, jehož domény jsou trojúhelníkové elementy tvořené třemi uzly. Tloušťka dílu je určena vzdáleností mezi protilehlými plochami. 2,5D síť je vhodná pro tenkostěnné díly s několika tlustšími oblastmi a analýzy, které poskytují výsledky napříč tloušťkou výrobku. To se týká například simulací pro zobrazení teploty nebo smykové rychlosti. Stejně jako u 1D sítě se nosníkové elementy používají na vtokový a temperační systém. [40; 39]

4.1.3 3D

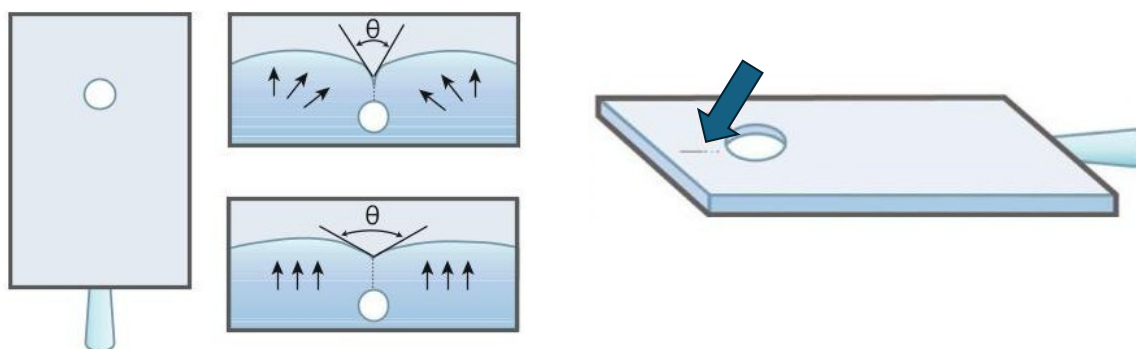
3D síť přesně kopíruje objem modelu vyplněním čtyřstěny. Je vhodná především pro díly, které mají mnoho přechodů v tloušťce, rohů a stěn, u kterých je žádoucí namodelovat přesně nelaminární proudění kolem těchto prvků. Pro síť tokového systému lze použít nosníkové nebo čtyřstěnné elementy. [40; 39]

4.2 Vady při technologii vstřikování

Vady na vstřikovaných výrobcích negativně ovlivňují vlastnosti produktu a mohou se projevit zvýšením nákladů na jeho produkci, a tím ovlivnit ziskovost zakázky. Nejčastějšími typy problémů, se kterými se lze při výrobě setkat, jsou vzhledové vady výrobku, rozměrové odchylky, lámaní dílů a vysoká míra zmetkovitosti. Příčiny vad mohou být různorodé, od špatně zvolených procesních parametrů, přes nevhodně zvolenou konstrukci formy i výrobku, až po použitý materiál. Porozumění vzniku vad je klíčovým faktorem pro optimalizaci výroby, snížení zmetkovitosti a zajištění konzistentní kvality finálního produktu. V následujících kapitolách jsou popsány základní typy vad na výrobku, které jsou výsledkem vlivu výše zmíněných faktorů. Vady se mohou vyskytovat jak na povrchu, tak i uvnitř vyráběného dílu. [34; 25]

4.2.1 Studené spoje

Tento jev nastává, jakmile se tekoucí materiál rozdělí na dva nebo více proudů a následně se ochlazená čela spojí. Nejtypičtěji se svarová linie vyskytuje ihned za obtékaným otvorem nebo na konci plnění. Výrobky, na nichž se vyskytují výrazné změny tloušťky nebo jsou plněny více vtoky jsou více náchylné na studené spoje. Jedná se o oblast na výrobku, kde v důsledku nedokonalého spojení dvou čel vznikají místa s nižšími mechanickými vlastnostmi. Obrázek 33 zobrazuje vznik studeného spoje na výrobku, přičemž obecně platí, že studený spoj vzniká, jakmile se čela taveniny sbíhají ze dvou směrů pod úhlem menším než 135° . Viditelnost svarové linie lze omezit zvýšením teploty taveniny a formy, avšak na úkor produktivity výroby. Dostatečné odvodušnění v kritickém místě napomáhá zvýšení kvality spoje. V případě, že se vzniku této vady nelze vyhnout, je možné ji pomocí technologických žeber, změnou polohy vtokového ústí nebo zvýšením jejich počtu přesměrovat do jiné oblasti. [24; 20; 13; 34]

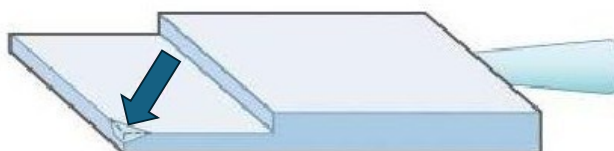


Obrázek 33 Studené spoje na výrobku vznikají spojením dvou a více proudů taveniny

(zdroj: [24])

4.2.2 Uzavřený vzduch

Vzduchová kapsa je typ vady, kdy se vzduch ve formě uzavře, nemá kam uniknout a je taveninou postupně stlačován, což může vést k různým defektům jako jsou povrchové vady, dutiny uvnitř výrobku nebo degradace materiálu. Obecně lze říct, že vzduch se uzavírá zejména v oblasti na konci plnění, pokud v tomto místě není zajištěno dostatečné odvzdušnění. Pokud je vzduch adiabaticky stlačován, vzniká v oblasti spálenina, která se projevuje zuhelnatělým degradovaným materiálem. Díky uzavřenému vzduchu v dutině mohou výrazně narůstat vstřikovací tlaky a docházet k nedotečení výrobků. Uzavřený vzduch lze minimalizovat přidáním odvzdušnění do kritických míst nebo jeho vyčištěním, snížením vstřikovací rychlosti, teploty taveniny, změnou polohy ústí nebo použitím nižší uzavírací síly. Adekvátní velikosti odvzdušňovacích drážek jsou obvykle udávány v materiálovém listu. [24; 13; 34]



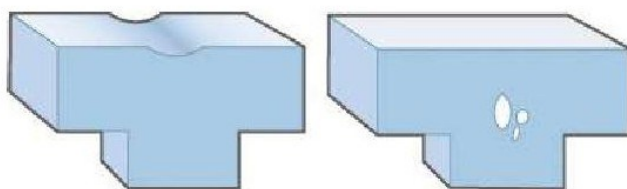
Obrázek 34 Vznik místa s uzavřeným vzduchem

(zdroj: [24])

4.2.3 Lunkry a propadliny

Lunkry a propadliny na výrobku vznikají zejména v oblastech s vyšší tloušťkou stěny, kdy se plast přicházející do styku s formou ochladí dříve než jeho jádro a povrch je vtažený dovnitř vlivem smršťování. Pokud je povrchová vrstva dostatečně zatuhlá, jsou na výrobku

patrné stopy po propadnutí. Lunkry jsou kapsy uvnitř dílu, které se liší od bublin tím, že zatímco bublina je zachycený plyn na výrobku, výplň lunkru je vakuum vzniklé smršťováním. Zda je příčinou bubliny vakuum nebo plyn není na první pohled patrné, z praktického hlediska je možné povrch zahřát. Pokud plocha bubliny klesá, jednalo se o lunkr a v případě, že se na bublině vytvoří puchýř, příčinou vzniku bubliny je zachycený plyn. Tyto vady je možné kompenzovat zvýšením hodnoty i délky dotlaku, zvýšením teploty taveniny nebo zvětšením vtokového ústí. Příliš malý průřez vtokového ústí způsobí, že ústí zatuhne brzy a není možné efektivně využívat dotlak, který je schopný smrštění v těchto místech do jisté míry kompenzovat. Optimalizace výrobku s ohledem na snížení tlustostěnných oblastí je také jedním z řešení. [24; 34; 13]

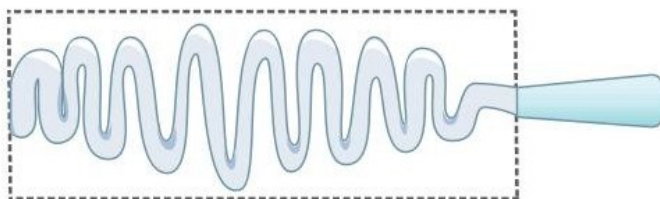


Obrázek 35 Vady tlustostěnných oblastí:
propadlina (vlevo), lunkr (vpravo)

(zdroj: [24])

4.2.4 Volný proud taveniny

Volný proud taveniny známý také jako jetting vzniká tehdy, pokud proud plastu do dutiny vstupuje příliš vysokou rychlostí a nenarazí na překážku, o kterou by se rovnoměrně rozprostřel. V důsledku nerovnoměrného tuhnutí a plnění dutiny od zadní strany vzniká na výrobku chaotická hadovitá stopa, jenž vede k oslabení strukturální integrity dílu a snížení vlastností. Tento jev může být způsoben také příliš malým vtokovým ústím, který významně zvyšuje rychlost nebo podchlazeným materiálem, který správně nepřilehne k formě. Použití vějířového typu vtokového ústí významně podpoří tvorbu fontánového toku. [24; 13; 34]

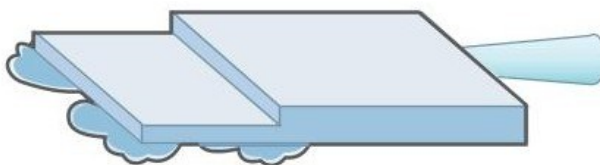


Obrázek 36 Volný proud taveniny (jetting)

(zdroj: [24])

4.2.5 Přetoky

Tento defekt je způsoben v případě, pokud tavenina uniká mimo tvarovou dutinu do dělicí roviny nebo do štěrbin ve formě, což vede k tvorbě plastových blan nebo výstupků, které je nutné minimalizovat. Mezi nejčastější příčiny patří příliš nízká uzavírací síla, místa v dělicí rovině, které dostatečně nedoléhají či jsou opotřebená, nesprávnou volbou vstřikovacích podmínek (příliš vysoká rychlost nebo tlak) anebo pokud je odvzdušňovací drážka příliš hluboká a plast do ní zateče. [24; 13; 34]



Obrázek 37 Přetoky na výrobku

(zdroj: [24])

4.2.6 Nedotečené výrobky

Nedoplnění výrobku se nejvíce projevuje v tenkých zónách nebo na konci plnění výrobku. Vada je způsobena nejčastěji nedostatečným přívodem roztaveného materiálu nebo vysokou viskozitou, která způsobí, že se tavenina předčasně zastaví. Mimo nízkou teplotu taveniny může být příčinou nedotečených výrobků také tenká geometrie dílu, nesprávné umístění vtoku nebo příliš dlouhá dráha taveniny. Nedotečené výrobky mohou vzniknout díky neadekvátnímu odvzdušnění dutiny, které způsobí, že se v jedné chvíli tavenina přetlačuje s uzavřeným plynem a markantně se zvyšují vstřikovací tlaky. Dalšími důvody může být nedostatečný polštář před čelem šneku, nízký protitlak, průsak trysky nebo horkého bloku a mnoho dalších vlivů. [24; 34]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cíle této práce jsou popsány následujícími body:

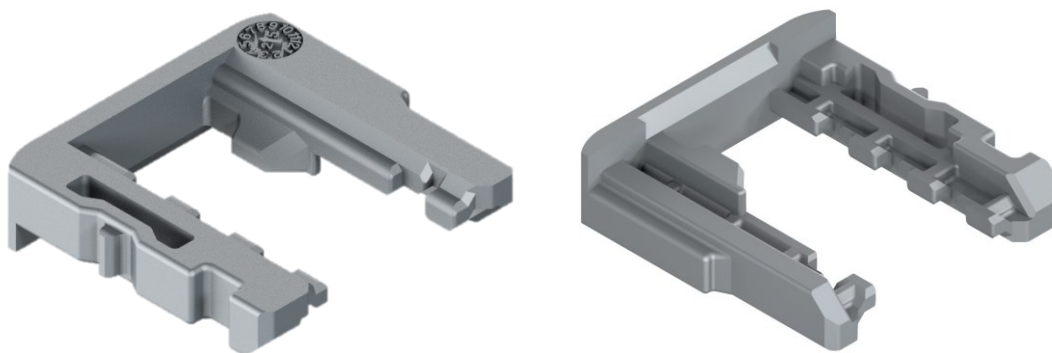
- vypracujte literární rešerši zaměřenou na danou problematiku;
- vytvořte trojrozměrný model zadaného plastového dílu;
- proveďte a vyhodnoťte tokovou analýzu;
- navrhnete sestavu formy pro výrobu daného dílu;
- nakreslete řez sestavou formy včetně patřičných pohledů a kusovníku.

Literární rešerše sjednocuje poznatky týkající se vstřikování. V prvních dvou částech studie jsou popsány polymerní materiály s důrazem na jejich reologické chování během vstřikovacího cyklu. V další části jsou zmíněny jednotlivé konstrukční prvky v kontextu s technologickým a funkčním popisem. Důležitost je kladena především na vtokové systémy, jejich druhy a zásady při návrhu. V poslední části je zmíněn přínos CAE analýz v procesu vstřikování při odhalování vad na plastových výrobcích.

V praktické části je prvním cílem vytvořit trojrozměrný model vstřikovaného výrobku, jímž je sekundární západka konektoru. Dalším cílem je implementovat CAE analýzu do všech fází návrhu formy, počínaje předběžným ekonomickým zhodnocením, přes optimalizaci prvotního návrhu až k závěrečnému ověření funkčnosti konstrukce. Zvlášť důraz je kladen na nevyvážené vtokové systémy a nestability plnění, hledání jejich původu s praktickým přesahem pro fázi návrhu i pro už vyrobené nástroje. Posledním cílem je pro optimalizovaný návrh vtokového systému zkonstruovat vícenásobnou vstřikovací formu včetně příslušné výkresové dokumentace a kusovníku.

6 VSTŘIKOVANÝ VÝROBEK

Plastovou součást, která je předmětem konstrukce formy představuje technický dílec sloužící v konektoru jako sekundární západka pro zajištění kontaktů v axiálním směru (Obrázek 38). Největší rozměry výrobku jsou $17,3 \times 4,4 \times 16,9$ mm (š × v × d) a celkový objem je $0,3 \text{ cm}^3$.



Obrázek 38 Vstřikovaný výrobek – sekundární západka kontaktů

(zdroj: vlastní)

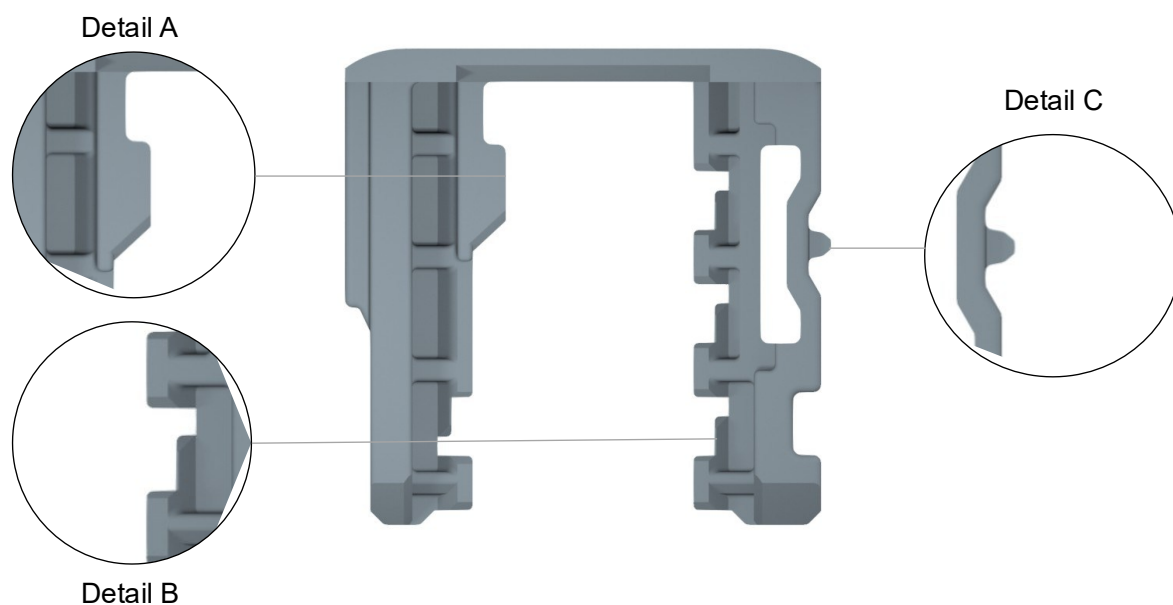
Tato součást v sestavě (Obrázek 39) brání samovolnému uvolnění kontaktu ze své polohy zejména při působení vibrací nebo mechanického namáhání. Díky své geometrii také napomáhá udržet jednotlivé piny v přesné poloze vůči sobě a také vůči druhé části konektoru, čímž zajišťuje spolehlivý elektrický kontakt. Další funkcí západky je zabránit otočení kontaktů během montáže do sestavy. Použití západky obecně zvyšuje mechanickou odolnost konektoru, zabraňuje deformaci kontaktů, vytažení kabelu a na vodotěsných konektorech udržuje těsnící prvky v poloze, a tím zamezuje průniku vlhkosti a nečistot.



Obrázek 39 Pohled na součást v části konektoru

(zdroj: vlastní)

Komplexní geometrie výrobku je složená z mnohočetných hran, rohů, výztužných žebér a přechodů v tloušťce stěny. Obrázek 40 zobrazuje ve zvětšeném měřítku konstrukční prvky, které ovlivňují správnou funkci sestavy, a tudíž musí být vyrobeny ve zvýšené přesnosti. V případě tohoto výrobku, jsou nejdůležitějšími geometrickými charakteristikami rozměry obepínající kontakt (detail A, B), výstupek určený k zapadnutí v sestavě ve směru zasouvání (detail C) a v neposlední řadě také průřez jednotlivých ramen, který je zasouván do profilované drážky.



Obrázek 40 Detaily na funkční prvky geometrie výrobku

(zdroj: vlastní)

6.1 Materiál

Materiálem výrobku je polymer s obchodním názvem Zytel MT409AHS BK010, který se řadí do skupiny polyamidů, konkrétně se jedná o PA66. Tento materiál vyniká vysokou mechanickou pevností a vynikající rovnováhou mezi tuhostí a houževnatostí, dobrou otěruvzdorností, dobrými vlastnostmi při zvýšených teplotách a také vyhovujícími elektrickými vlastnostmi. Stabilní tavenina umožňuje dobrou recyklovatelnost, což je klíčové pro udržitelnost výroby. Kombinace všech výše uvedených vlastností jej činí vhodným pro náročné aplikace v automobilovém a stavebním průmyslu, ve výrobě nábytku, domácích spotřebičů a sportovních potřeb. Vybrané parametry z materiálového listu jsou uvedeny v Tabulce 1, zbylé informace jsou dostupné v Příloze I. [41]

Tabulka 1 Vybrané materiálové vlastnosti

Vlastnost	Hodnota
Hustota v pevném skupenství [$\text{kg}\cdot\text{m}^3$]	1124
Hustota taveniny [$\text{kg}\cdot\text{m}^3$]	930
Smrštění (paralelní/normálové) [%]	1,7/1,7
Teplota formy [$^{\circ}\text{C}$]	50–90
Teplota taveniny [$^{\circ}\text{C}$]	270–300
Vyhazovací teplota [$^{\circ}\text{C}$]	220
Tepelná vodivost [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$]	0,21

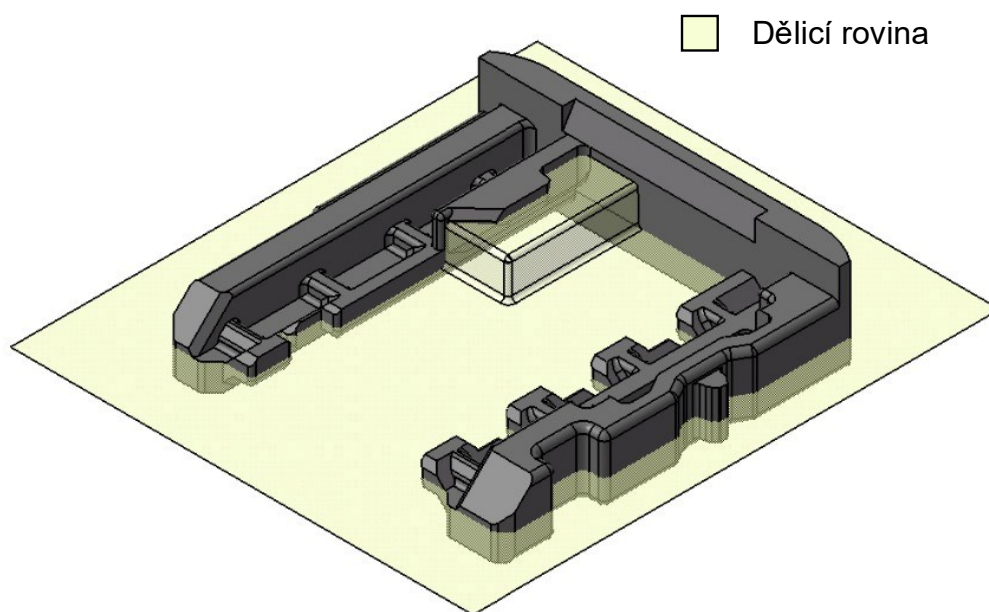
(zdroj: [41]; [42])

7 PŘEDBĚŽNÉ ZHODNOCENÍ VÝROBNÍCH FAKTORŮ S VYUŽITÍM CAE

Před samotnou konstrukcí formy pro zadaný výrobek je velmi důležité ekonomické zhodnocení a celková analýza procesu, která umožňuje předběžné zvážení potenciálních problémů. V tomto případě bylo před samotným návrhem využito CAE softwaru, jehož účelem je snížit potřebu fyzických prototypů, optimalizovat samotný návrh a predikovat proces. V této kapitole budou tyto poznatky aplikovány na konkrétní studii a bude zde detailně popsán návrh se zaměřením na vtokový systém. Analýzy byly vyhotoveny v programu Autodesk Moldflow Synergy 2024. Na základě výsledků analýz bude určeno umístění vtokového ústí, vtokový systém, problematická místa geometrie výrobku a odvzdušnění formy.

7.1 Dělicí rovina

Pojem dělicí rovina označuje u vstřikování rovinu, která výrobek rozděluje tak, aby po zaformování do obou polovin formy bylo možné jej spolehlivě vyjmout. V místě průběhu dělicí roviny výrobkem je možné vidět viditelný spoj nebo otřep, a proto je volba jejího umístění velmi důležitým faktorem. Na tomto výrobku se vyskytuje pouze jednoduchá hlavní dělicí rovina, která kopíruje střed dílu s výjimkou přechodu u háčku (Obrázek 41).



Obrázek 41 Znázornění dělicí roviny na výrobku

(zdroj: vlastní)

7.2 Násobnost

Násobností vstřikovací formy se rozumí počet výrobků, které se ve formě vyrobí na jeden zdvih. Zatímco vyšší počet dutin snižuje výrobní náklady, zároveň zvyšuje složitost formy a nárokuje vyšší požadavky na vstřikovací proces. Násobnost se obvykle odvíjí od složitosti dílu, potřebné výrobní kvantitě a potřeby vytíženosti určitého stroje ze strojového parku. Vzhledem k plánovanému výrobnímu množství 30 milionů kusů, jednoduché dělicí rovině a drobnému charakteru dílů bude vstřikovací forma konstrukčně řešena jako šestnáctinásobná.

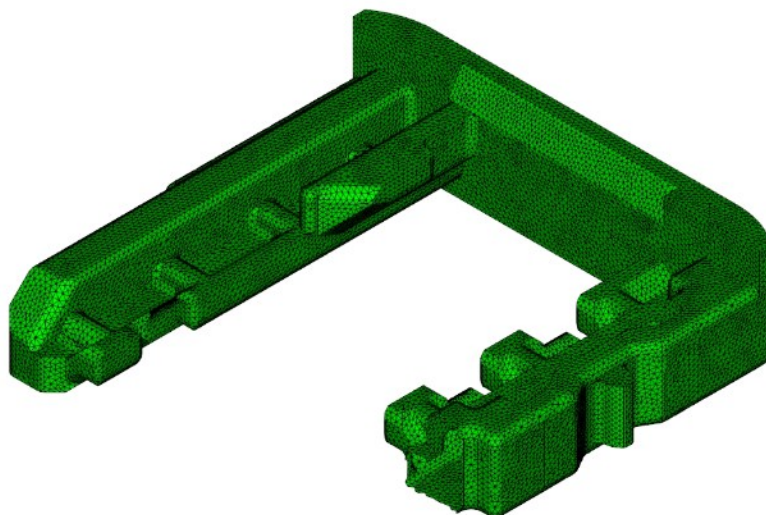
7.3 Volba vtokového systému

Vtokový systém zajišťuje dopravu taveniny do dutiny formy. Jeho správný návrh je stěžejní zejména z hlediska správného plnění, minimalizace tlakové ztráty a optimalizace výrobního procesu. V tomto případě není samotný studený ani horký vtokový systém vhodnou variantou pro tento konkrétní výrobek a zvolenou násobnost formy. Horký systém ústící přímo do dílu není možné realizovat skrz malé rozměry výrobku. Při použití studeného vtokového systému vzniká velké množství odpadu nutného k recyklaci společně s rizikem nerovnoměrného plnění a nestabilního procesu. V tomto případě je ideální použití kombinovaného vtokového systému – horké trysky ústící do studeného rozvodného kanálu. Při použití kombinovaného systému vzniká více možností zaformování. Celkový postup návrhu bude podrobně popsán v následujících kapitolách.

7.3.1 Návrh a nastavení sítě

Správné nastavení sítě u CAE analýz je klíčovým prvkem pro dosažení žádoucí přesnosti a kvalitních výsledků. Pro mnoho průmyslových aplikací plastových dílů je dostačující 2.5D síť, která modeluje pouze povrch součásti. Elementy jsou vzájemně propojeny mezi protilehlými stěnami a jejich vzdálenost definuje tloušťku stěny výrobku. Aplikace 2.5D sítě je vhodná zejména pro tenkostěnné typy dílů. V dnešní době jsou komerční softwary využívány na tokové analýzy vybaveny celou řadou ukazatelů a funkcí, které umožňují statistické vyhodnocení kvality sítě. Výhodou těchto možností je optimalizace sítě a shoda výsledků simulace s reálnými jevy ve formě.

Před spuštěním výpočtu sítě byl importován model výrobku s odstraněnou geometrií datumového razítka, jehož miniaturní hrany by mohly způsobovat nežádoucí chyby sítě. Na vstřikovaném výrobku byla vytvořena 2.5D síť (Obrázek 42), která byla specifikována délkou hrany 0,19 mm, jenž byla softwarem automaticky doporučena.



Obrázek 42 2.5D síť výrobku

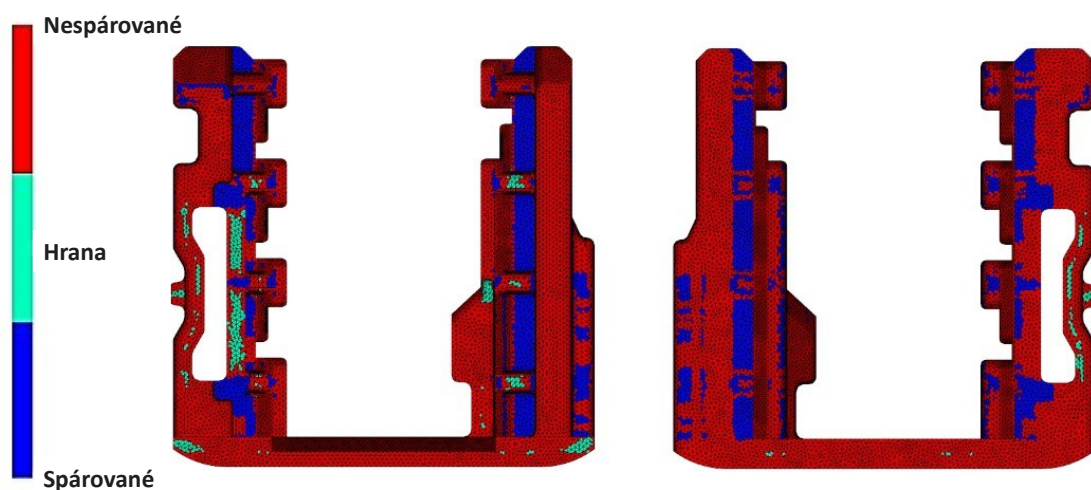
(zdroj: vlastní)

Po provedení výpočtu byla spuštěna statistika sítě. V síti nebyla nalezena žádná místa, která by detekovala volné nebo zdvojené hrany, neorientované nebo protínající se elementy a další vady, jejichž výskyt by mohl zkreslovat výsledky simulací. Dalším ukazatelem kvality je poměr délky stran, jenž definuje poměr délky hrany deformovaných trojúhelníků sítě vůči ideálnímu rovnostrannému trojúhelníku. Pro 2.5D síť by neměl přesahovat hodnotu 20, což je maximální hodnotou 10,91 splněno. Průměrná hodnota byla 1,56. Všechny výsledky statistiky sítě popisuje Obrázek 43.

Triangles			Edge details:	
-----			Free edges	0
Entity counts:			Manifold edges	77664
Triangles	51776		Non-manifold edges	0
Connected nodes	25888		Orientation details:	
Connectivity regions	1		Elements not oriented	0
Invisible triangles	0		Intersection details:	
Area:			Element intersections	0
(Mold blocks and cooling channels are not included)			Fully overlapping elements	0
Surface Area:	6.90771 cm ²		Match percentage:	
Volume by element types:			Match percentage	73.0%
Triangle:	0.347116 cm ³		Reciprocal percentage	72.6%
Aspect Ratio:			Not suitable for Dual Domain analysis.	
Maximum	Average	Minimum		
10.91	1.56	1.15		

Obrázek 43 Výsledky statistiky výchozí 2.5D sítě

Vzhledem k charakteru 2.5D sítě je důležité, aby elementy na jedné straně byly schopny najít protilehlý element skrz tloušťku stěny výrobku. Tuto vlastnost popisuje výsledek procento shody a jeho doporučená minimální hodnota je 85 %. Výsledky statistiky prokázaly, že se shoda pohybuje pouze okolo 73 % a díky nedodržení minimální hodnoty byl výrobek softwarem už vyhodnocen jako nevhodný pro 2.5D síť. Byla prověřena různá nastavení sítě, a to konkrétně lokální i globální zpřesnění sítě a úprava hodnoty Chord angle, která charakterizuje kolik elementů se vytvoří kolem přechodových prvků. Žádná z těchto úprav nevedla k dosažení minimální doporučené shody, a tak bylo vyhodnoceno, že se nejedná o chybu nastavení sítě, avšak o problematickou geometrii výrobku. Tento fakt byl dále potvrzen také výsledkem zobrazující spárování elementů sítě, který je na Obrázku 44.

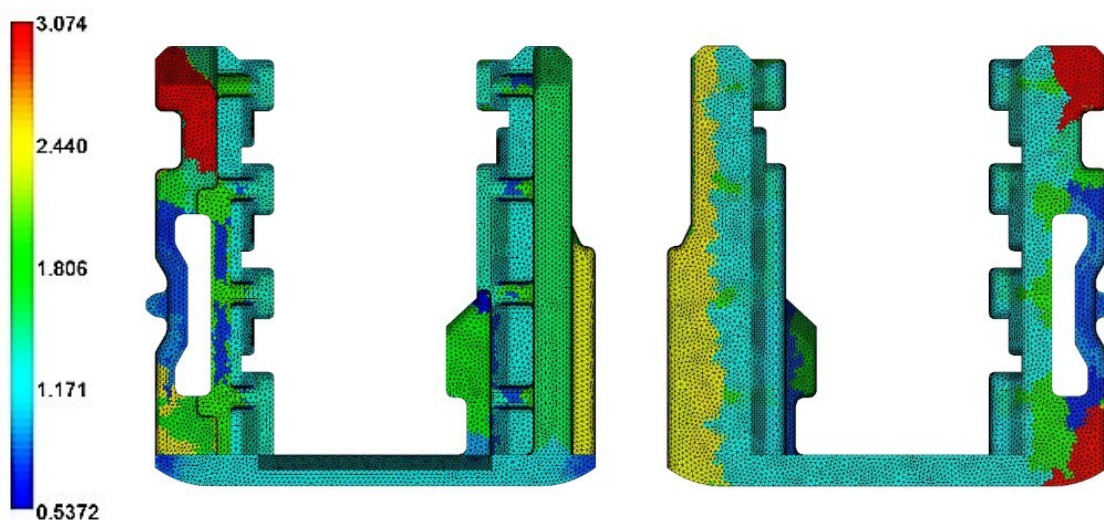


Obrázek 44 Vyhodnocení kvality 2.5D sítě

(zdroj: vlastní)

Dále byla analyzována tloušťka stěny sítě v jednotlivých místech. Výpočet tloušťky sítě, jehož výsledky jsou na Obrázku 45, ukázal značné přechody v tloušťce stěny napříč výrobkem. Samotná geometrie výrobku je velmi komplexní, plná ostrých hran, rohů a žeber, což také přispívá k znemožnění použití 2.5D sítě pro simulační výsledky. Již předem je možné predikovat, že modrá škála bude kritickou oblastí z důvodu velmi výrazné změny tloušťky. Dalším potenciálním problémem může být jedno z nejtlustších míst výrobku umístěné na konec plnění.

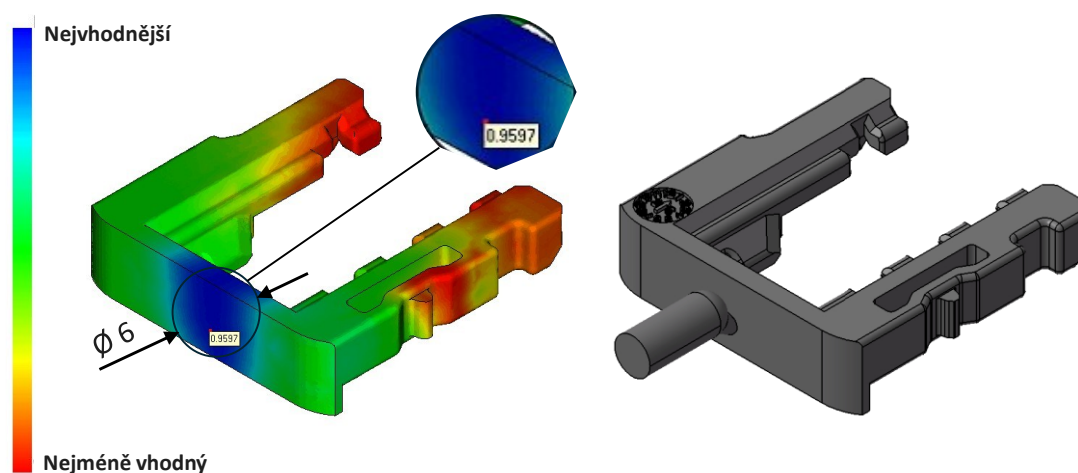
Diagnostika tloušťky sítě [mm]



Obrázek 45 Diagnostika tloušťky sítě

(zdroj: vlastní)

Před přechodem na 3D síť byla vypočtena analýza umístění vtokového ústí, která je dostupná pouze pro 2.5D typ sítě. Výstupem tohoto výsledku je škála, která hodnotí na modelu procentuálně vhodnost k umístění vtokového ústí. Tento výsledek nebere v úvahu konstrukční dispozice a nemusí zaručovat vysoce kvalitní díl. Na základě potenciálně vhodných míst určených výpočtem a známým průběhem dělicí roviny (Obrázek 41) byla navržena poloha vtokového ústí na výrobku (Obrázek 46). Nejvhodnější oblast je ohraničena kružnicí o průměru 6 mm. Vybrané místo je dispozičně vhodné z 96 %. Z důvodu možnosti automatické separace výrobku od vtoku ve formě byl zvolen tunelový typ ústí.



Obrázek 46 Analýza umístění vtokového ústí

(zdroj: vlastní)

Průměr tunelového vtokového ústí byly navrženy na základě analytického výpočtu smykové rychlosti při průtoku kruhovou kapilárou: [43]

$$\dot{\gamma} = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot t \cdot R^3} \quad (6)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{4 \cdot 0,35 \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot 0,45 \cdot (0,4 \cdot 10^{-3})^3}$$

$$\dot{\gamma} = 15\,473 \text{ s}^{-1}$$

$\dot{\gamma}$ – rychlost smykové deformace [s^{-1}]

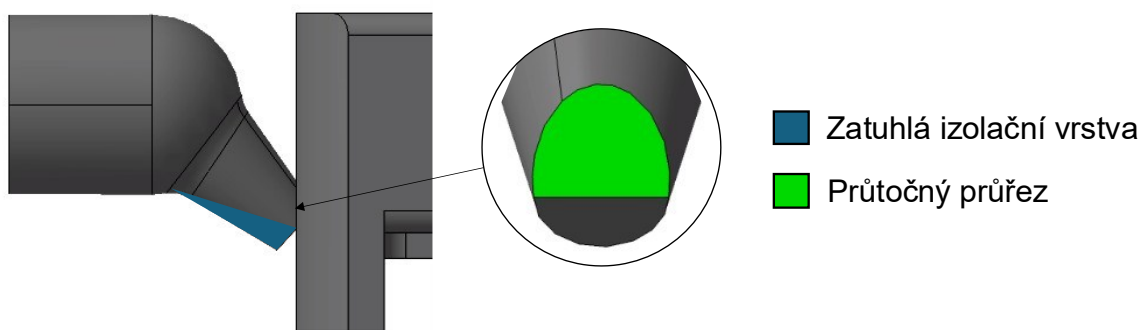
V – vstříkovaný objem výrobku [m^3]

π – Ludolfovo číslo [-]

t – čas plnění [s]

R – poloměr vtokového ústí [m]

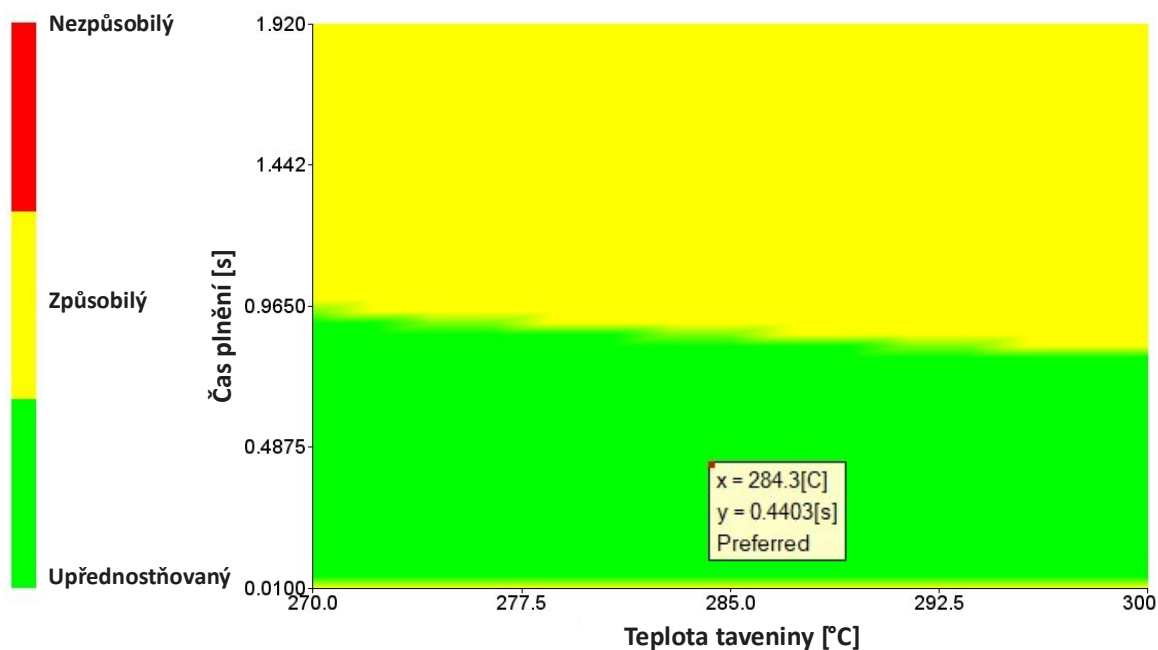
Odborná literatura uvádí maximální povolenou rychlost smykové deformace u PA66 na 60.000 s^{-1} . V použitém empirickém vzorci figuruje poloměr ústí v třetí mocnině, z čehož je patrné, že volba průměru ústí má na výslednou smykovou rychlost v tokovém kanále největší vliv. Výpočetní vztah je zjednodušen na kruhový průřez ústí. Tunelový vtok je ukončen již před stěnou výrobku, čímž vzniká izolační vrstva polymeru a zúžený průřez ústí, který na výrobku po oddělení zanechává minimální stopu a zlepšuje účinnost dotlaku (Obrázek 47). V případě ukončení tunelového ústí před připojenou stěnou nevzniká kruhový průřez, ale průtočný průřez tvaru části elipsy. Skrz toto zjednodušení je ponechána značná technologická rezerva do maximální povolené hodnoty. [24]



Obrázek 47 Detail napojení vtoku k výrobku

(zdroj: vlastní)

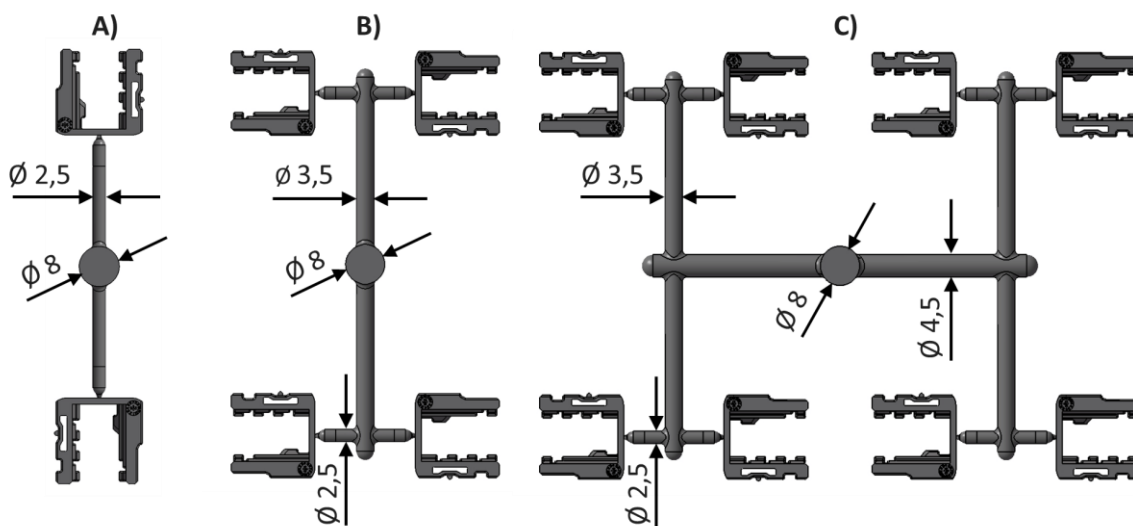
Byla vytvořena analýza procesního okna, která ukazuje optimální teploty formy a taveniny v kontrastu s časem plnění pro vstřikovaný materiál. Zelená část barevné škály je preferovaná, při žluté oblasti bude možné díl vyrobit, ale nebude disponovat příliš kvalitními vlastnostmi a pro červenou oblast neexistuje žádná kombinace nastavení procesu s použitým materiálem. Výsledek této analýzy je na Obrázku 48, kde je vidět pás možných nastavení, přičemž teplota formy je konstantní, a to $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na základě procesního okna byl určen čas plnění $0,45\text{ s}$, který se vyskytuje přibližně v polovině obou intervalů a je tedy možné použít procesní podmínky v širokém rozmezí nad i pod ním. Tento čas byl použit také pro výpočet návrhu průměru tunelového ústí.



Obrázek 48 Procesní okno

(zdroj: vlastní)

Pro šestnáctinásobnou vstřikovací formu byly s využitím CAD softwaru navrženy tři varianty kombinovaných systémů s 8, 4 a 2 tryskami. Na Obrázku 49 jsou znázorněny studené části pro jednu trysku u jednotlivých variant včetně základních rozměrů kanálů.

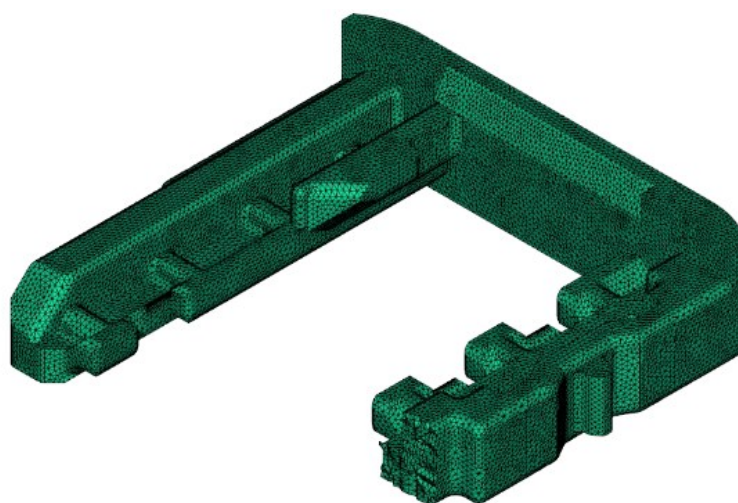


Obrázek 49 Návrh studené části kombinovaného systému včetně hlavních rozměrů:

A) 8 trysek; B) 4 trysky; C) 2 trysky

(zdroj: vlastní)

V této fázi návrhu byl model konvertován z 2.5D sítě na 3D (Obrázek 50), přičemž vytvořená síť byla následně zkontrolována. Maximální poměr délky strany 2.5D sítě před konverzí by neměl přesahovat 30, což bylo s hodnotou 10,91 dosaženo. 3D síť vyplňuje celý objem výrobku a je složena ze čtyřstranných elementů, jenž jsou tvořeny šesti hranami a čtyřmi uzlovými body. 3D síť je vhodná především pro tlustostěnné výrobky a díly s lokálně silnějšími oblastmi, protože využívá Navier-Stokesovy rovnice, které umožňují reprezentovat trojrozměrné jevy vedení tepla a zohledňují i vliv gravitace. Z toho vyplývá, že dokáže lépe kopírovat objem výrobku a výsledky jsou přesnější, ale značně zvyšuje náročnost výpočtu.



Obrázek 50 3D síť výrobku

(zdroj: vlastní)

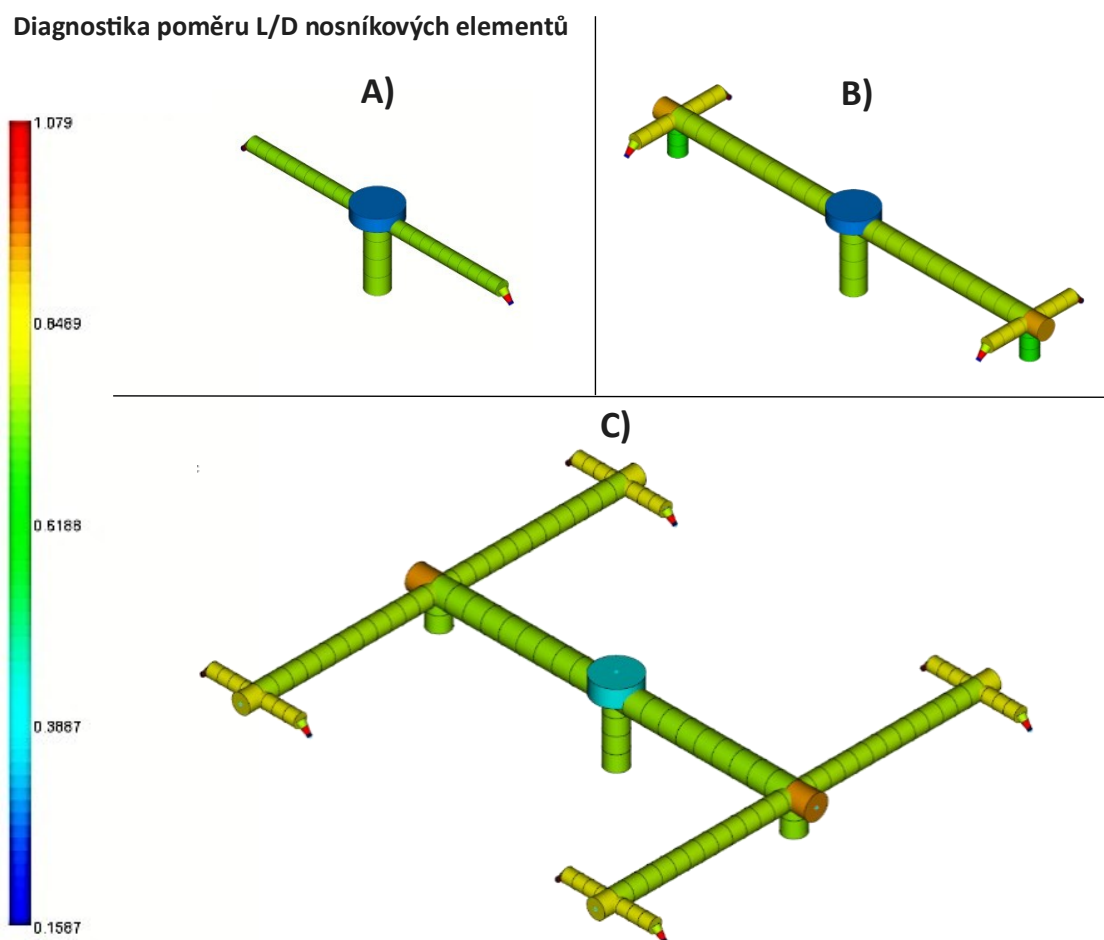
Výchozí délka hrany byla zvýšena na 0,5 mm a v případě 10 vrstev skrz tloušťku stěny síť vykazovala nejmenší počet dlouhých vnitřních hran nad maximální povolenou hodnotou 3 mm. Síť nedisponuje známkami překročení doporučených hodnot. V Tabulce 2 jsou vybrány základní parametry sítě.

Tabulka 2 Vybrané nastavení parametrů sítě pro 3D síť jednoho výrobku

Výchozí délka hrany [mm]	0,5
Počet vrstev na tloušťku stěny [-]	10
Maximální poměr délky strany [-]	22,05 (doporučené maximum 100)
Průměrný poměr délky strany [-]	2,69
Celkový počet elementů [-]	194 186

(zdroj: vlastní)

Kvůli zjednodušení výpočetní zátěže byly pro analýzu vtokového systému použity 1D elementy nosníkového typu, které jsou definovány dvěma uzly a jejich lineární spojnici. Kvalitativní analýzu sítě lze určit pomocí poměru L/D , který určuje poměr mezi délkou a průměrem jednotlivých elementů (Obrázek 51). Po překročení hodnoty 2,5 elementy neurčují dostatečně jednotlivé křivky. Tato podmínka byla splněna pro síť s výchozí délkou hrany 2 mm, přičemž minimální počet elementů na každé křivce je 3. V oblasti vtokového ústí byla kvůli přesnosti výpočtu lokálně zjemněná hustota sítě.



Obrázek 51 Analýza poměru L/D u všech navržených systémů:

A) 8 trysky; B) 4 trysky; C) 2 trysky

(zdroj: vlastní)

7.3.2 Výsledky porovnání a volba kombinovaného systému

Pro navržené varianty byla spuštěna druhá sekvence analýz, která simuluje postupné proudění polymerního materiálu v dutině formy až do dosažení bodu přepnutí. Tato analýza byla využita především k vzájemnému porovnání jednotlivých variant a optimalizaci vtokového systému. Výsledkem je závěrečné zhodnocení, který systém je pro danou aplikaci preferovaný. V této fázi není uvažována temperace. V Tabulce 3 jsou vybrána základní nastavení výpočtu.

Tabulka 3 Použité parametry nastavení simulace

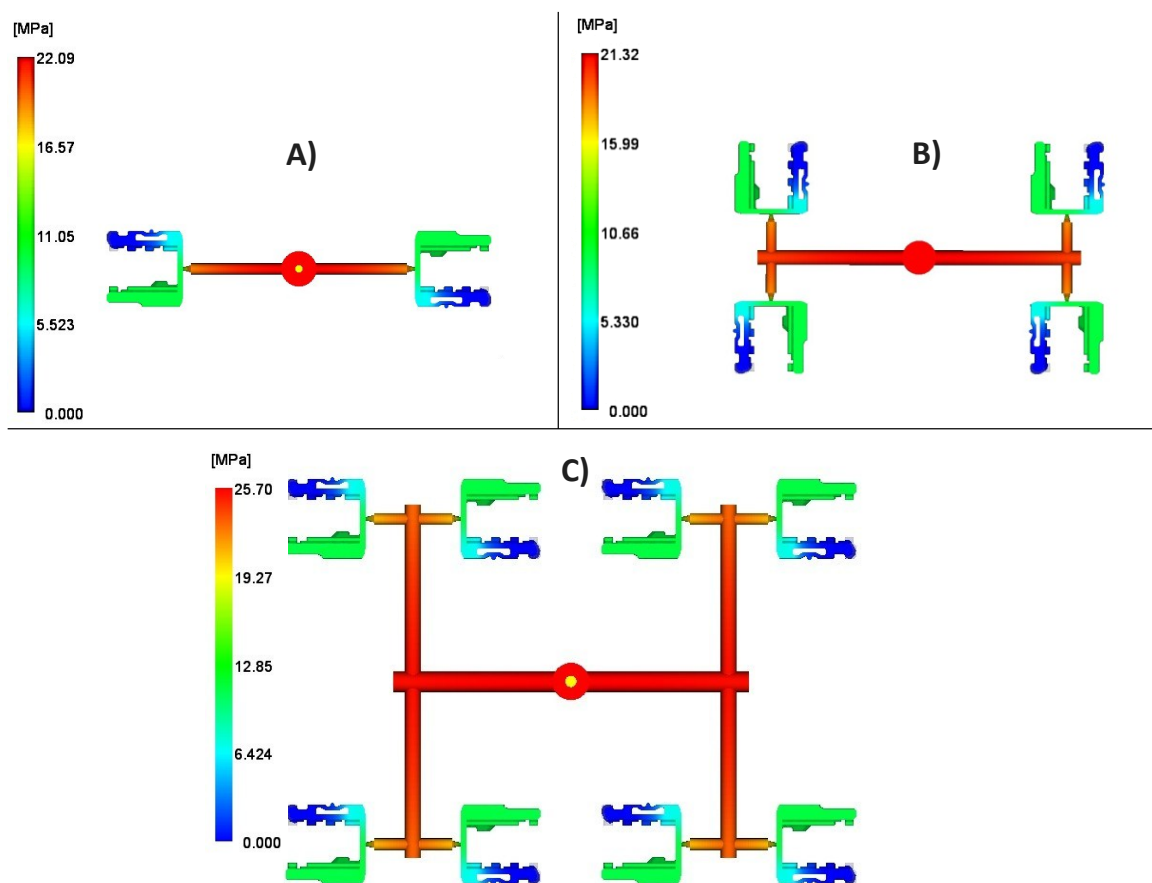
Procesní podmínky	
Čas plnění (8/4/2 trysky) [s]	0,8/1/2
Teplota formy [°C]	70
Teplota taveniny [°C]	285
Bod přepnutí na dotlak [%]	99
Velikost dotlaku [%]	80
Parametry Cross-WLF modelu	
n [-]	0,4395
τ^* [Pa]	$1,3187 \cdot 10^5$
D1 [Pa·s]	$1,6733 \cdot 10^{16}$
D2 [K]	323,15
D3 [K/Pa]	0
A1 [-]	39,7910
A2T [K]	51,6000

(zdroj: vlastní)

Vícenásobné formy jsou v procesu vstřikování plastů velmi efektivním nástrojem, jak rozložit fixní náklady. Dalším výrazným benefitem je lepší využití výrobních kapacit, čímž výrazně narůstá efektivita. Na druhou stranu je ve výrobním procesu mnohdy velmi náročné zajistit stejné teplotní a tlakové podmínky pro všechny výrobky v rámci jednoho cyklu, a tím vzniká fluktuace jejich kvality. V rámci sériové výroby v mnoha případech díky úzkému procesnímu oknu není možné dosáhnout spolehlivé kvality a samotná výroba je pouze balancování mezi přetoky, nedotečenými výrobky a spáleninami. V takovém případě, pokud jedna vada je odstraněna, projeví se druhá a řešení je pouze kompromis, která z nich je pro

danou oblast méně problematická. V rámci navrhované vícenásobné formy bude využito tokových simulací za účelem zhodnocení teplotních a tlakových podmínek.

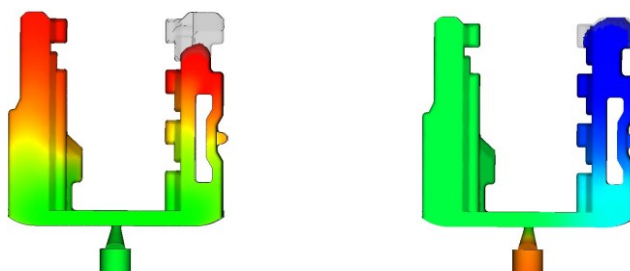
Výsledek tlaku při přepnutí na dotlak definuje rozložení tlaku uvnitř formy, při naplnění 99 % objemu výrobku. Po výběru vstřikovacího stroje by mělo být využito pouze 75 % jeho tlakové kapacity pro vtokový systém a 50 % pro samotný výrobek. Na konci každé průtokové cesty by průtok měl být nulový, čímž je zajištěno rovnoměrné plnění. V tomto případě je z výsledků porovnání (Obrázek 52) patrné, že rameno výrobku opatřené otvorem je pro všechny navržené systémy v bodě přepnutí nedoplňeno, zatímco rameno bez otvoru je již v tu samou chvíli přeplňováno. Největší tlak je generován ve vtokovém systému, kde nejvyšších hodnot je dosaženo pro systém s 2 tryskami, což odpovídá jeho významně většímu objemu. Nejnižšího tlaku v doplněném ramenu i ve vtokovém systému bylo dosaženo při použití 4 horkých trysek.



Obrázek 52 Porovnání výsledků tlaku při přepnutí na dotlak: A) 8 trysek; B) 4 trysky; C) 2 trysky

(zdroj: vlastní)

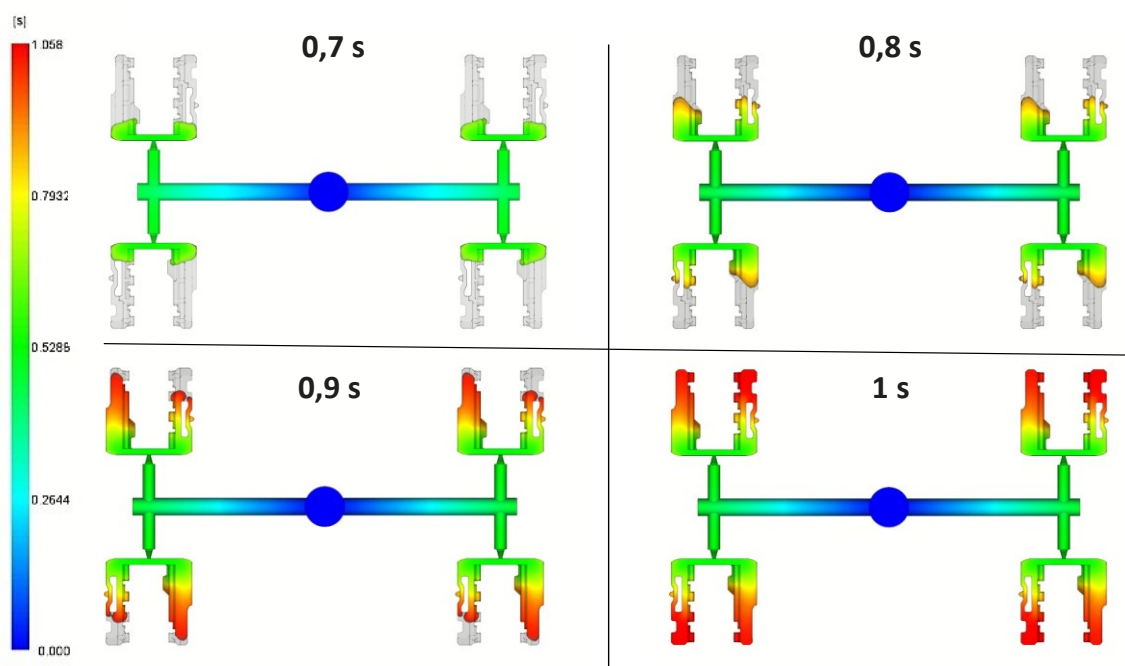
Na Obrázku 53 je možné pozorovat, jak vzájemně koresponduje výsledek času plnění a tlaku při přepnutí na dotlak. Čas plnění se nachází na obrázku vlevo a hodnota tlaku při přepnutí na dotlak vpravo. Poloha vtokového ústí je umístěna symetricky tak, že vzdálenost k obou koncům průtokové cesty je totožná. V tomto případě je problém způsoben geometrií výrobku. Ve chvíli, kdy tavenina teče zúženým místem, klade pro ni menší průtokový odpor tlustší rameno bez otvoru, které se tím důsledkem začne plnit rychleji.



Obrázek 53 Diagnostika nerovnoměrného plnění

(zdroj: vlastní)

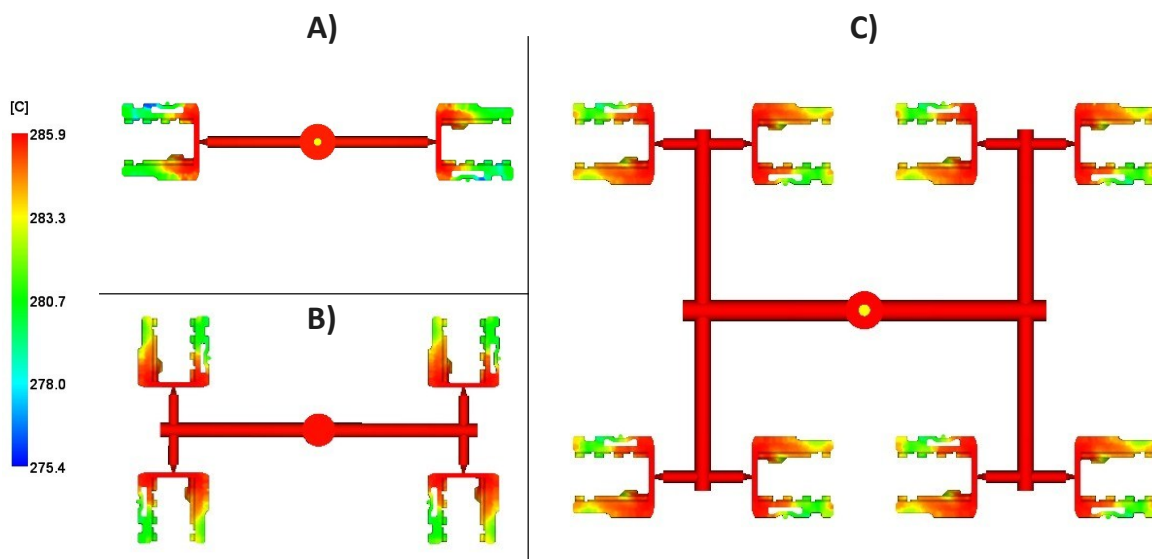
Tento jev byl validován pro všechny návrhy a je zobrazen také na plnicí studii systému se čtyřmi tryskami (Obrázek 54), kde je možné vidět, že zpočátku se obě ramena plní symetricky, ale okolo 0,9 s se rameno bez otvoru výrazně urychlí na úkor ramena s otvorem. Pro navržené časy plnění se na žádném ze třech systémů nevyskytovala nedotečená místa.



Obrázek 54 Plnicí studie u systému se čtyřmi tryskami

(zdroj: vlastní)

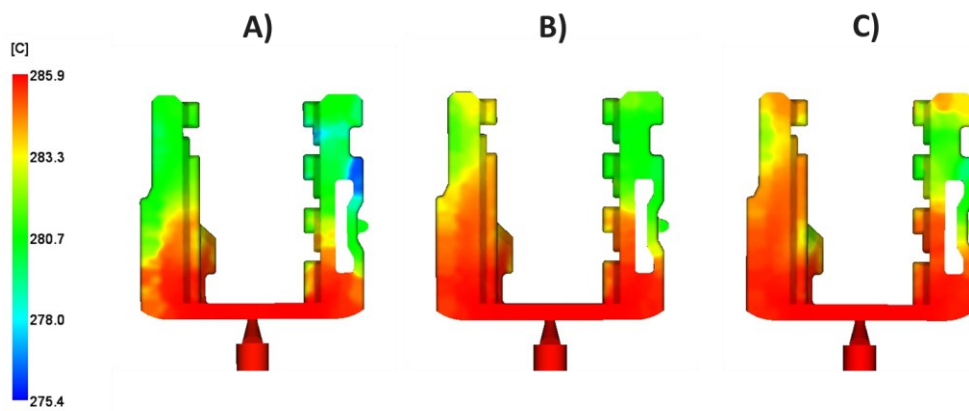
Rozložení teploty čela taveniny v různých typech vtokových systémů je zobrazeno na Obrázku 55.



Obrázek 55 Rozložení teploty na čele taveniny: A) 8 trysek; B) 4 trysky; C) 2 trysky

(zdroj: vlastní)

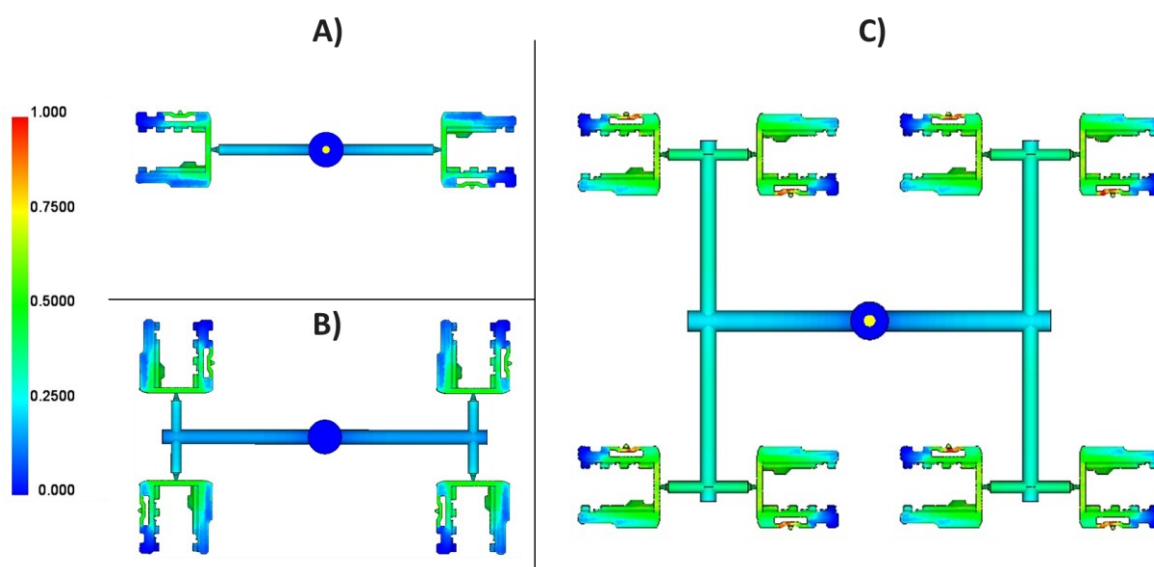
Teplota čela taveniny by během plnění neměla v průběhu plnění klesnout o více jak 5 °C. Větší rozdíly obvykle poukazují na krátkou dobu vstřikování nebo na zastavení toku taveniny. Úměrně s velikostí vtokového systému roste také nerovnoměrnost rozložení teploty způsobená v důsledku distribuce smykové rychlosti v rozvodném kanále (Obrázek 56). Pro systém s osmi tryskami se tavenina v modré oblasti zpomalí a ochladí, což poukazuje opět na jev problematicky navržené geometrie zmíněný již dříve.



Obrázek 56 Detail distribuce teploty: A) 8 trysek; B) 4 trysky; C) 2 trysky

(zdroj: vlastní)

Obrázek 57 porovnává mezi jednotlivými navrženými systémy, které oblasti jsou na konci plnění již zatuhlé a z jaké procentuální míry. Obecně lze říct, že pro všechna řešení tuhne nejpozději nejtlustší oblast umístěná na konec plnění, která byla zmíněna již na Obrázku 45 při analýze tloušťky. Toto místo může navyšovat čas cyklu skrz prodlouženou dobu potřebnou k dosažení vyhazovací teploty. V systému se dvěma tryskami se tavenina významně ochladí, než doteče k výrobkům. Tenká stěna ochladne dříve než ostatní geometrie, což může snižovat efektivní využití dotlaku. Mezi systémem s 8 a 4 tryskami není výrazný rozdíl ve způsobu ochlazování.



Obrázek 57 Podíl zamrzlé vrstvy na konci plnění: A) 8 trysek; B) 4 trysky; C) 2 trysky

(zdroj: vlastní)

CAE analýzy byly využity k návrhu vtokových systémů, vzájemnému porovnání a vyhodnocení procesních rizik. K těmto hlediskům byly dále přidány ekonomické, ekologické a technické parametry, které byly při výběru mezi jednotlivými systémy rovněž zohledněny. Tyto parametry jsou uvedeny v Tabulce 4. Veličiny, které nebylo možné číselně vyhodnotit jsou zobrazeny symbolicky v kontrastu: červená (nejhorší), oranžová (průměrný) a zelená (nejlepší).

Tabulka 4 Porovnání kombinovaných systémů

Počet trysek	8	4	2
Hmotnost studeného vtokového systému [g]	4,1	5,3	7,4
Cena odpadu za životnost formy [mil. Kč]	1	1,3	1,9
Cena horkého systému [tis. Kč]	300	200	75
Spotřeba náhradních dílů horkého systému [-]			
Čas plnění [s]	0,8	1	2
Maximální smyková rychlost [1/s]	33 254	32 054	27 142
Maximální vstřikovací tlak [MPa]	22	21,3	25,7
Rovnoměrné rozložení teploty [-]			
Možnost regulace procesu [-]			
Náročnost údržby [-]			
Riziko odstávky [-]			

(zdroj: vlastní)

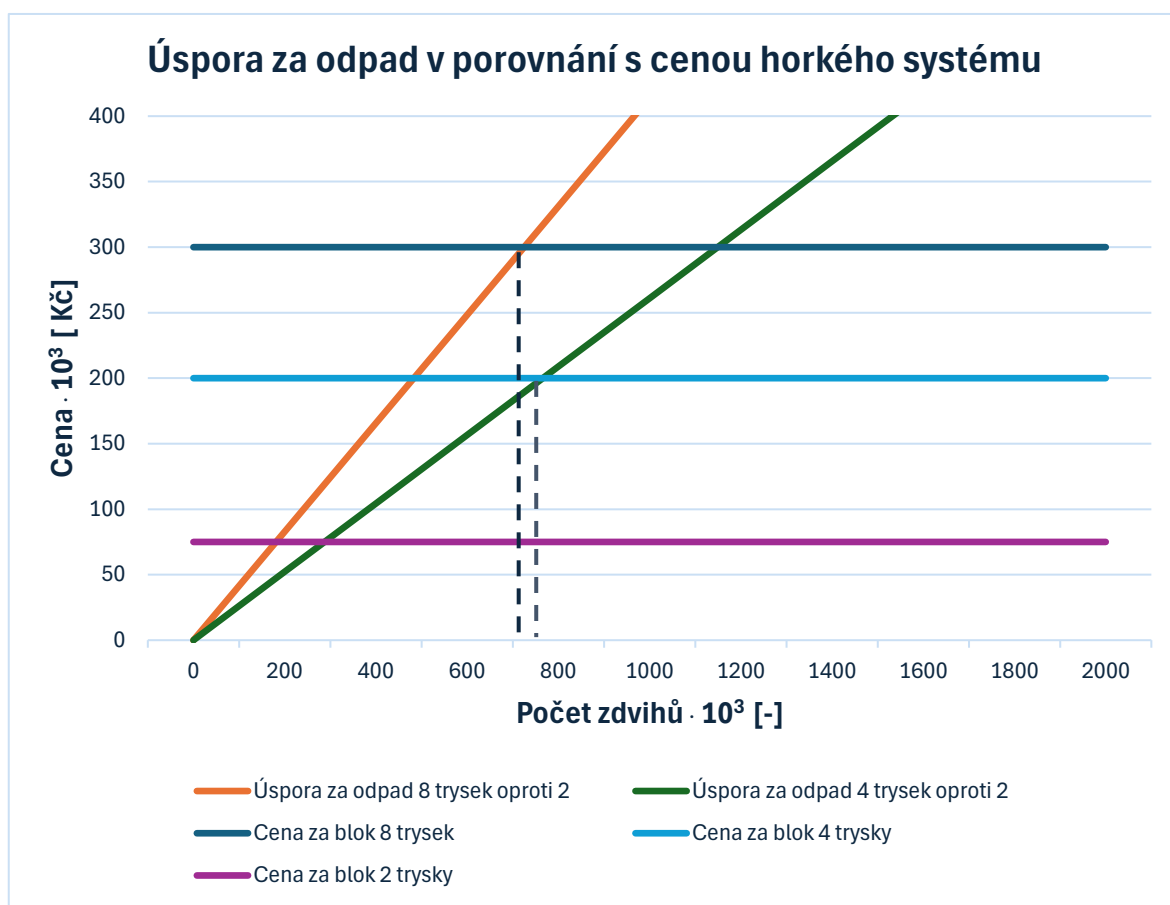
Všechny varianty návrhu byly simulovány tak, že smyková rychlost nabývá hodnot přibližně $30\,000\text{ s}^{-1}$. Z hlediska procesní způsobilosti je systém s osmi tryskami nejvhodnější, protože disponuje nejlepším rozložením teploty, a především je možné efektivně regulovat teplotu každé trysky separovaně. Obecně platí, že čím víc trysek je v systému použito, tím lépe pro procesní stabilitu. Horký blok s osmi tryskami také disponuje nejkratším vstřikovacím časem a nejmenším objemem studené vtokové části, což jej činí i z ekonomického a ekologického hlediska nejefektivnějším. Na druhou stranu se s velkým systémem pojí riziko, protože každá tryska je element náchylný k poruchám, kde porucha jedné trysky znamená odstávku celé formy. Dalším faktorem je, že větší systémy mají delší dobu stabilizace při rozběhu a vyšší nároky na elektrickou energii.

Nevýhody u osmi tryskového řešení jsou naopak výhody u horkého bloku se dvěma tryskami. Toto řešení je jednoduché, vyniká snadnou údržbou, jednoduchým zapojením a nízkou cenou. Jeho nevýhodami jsou větší náklady spojené s objemem odpadu a délkou vstřikovacího cyklu vlivem chladnutí a delšího času plnění. Mezi další nevýhody patří ze všech zmíněných variant nejhorší procesní stabilita, nerovnoměrné rozložení teploty a vyšší vstřikovací tlaky.

Kompromisem mezi oběma variantami je systém se čtyřmi tryskami, který může být řešený blokem tvaru H nebo X. V porovnání bloku s osmi tryskami není toto řešení

významně horší, obě mají podobný čas plnění, vstřikovací tlak a také celkový objem vtokového systému. Velkou nevýhodou osmi trysek je také minimální výrobitelná vzdálenost mezi tryskami, která v případě tohoto drobného výrobku způsobuje navyšování velikosti formy. Použití větších rozměrů desek vyžaduje větší nároky na stroj, uzavírací sílu a temperaturu.

Velmi důležitou částí procesu vstřikování je část ekonomická, která určuje finální výrobní zisk. Technologické náklady za plastový odpad, který při procesu vzniká, jsou významnou položkou. Dnes už jsou vyvinuty pokročilé techniky recyklace, které umožňují materiál znova vrátit do výrobního procesu, ale do namáhaných výrobků je možné jej použít pouze v omezené míře nebo vůbec, proto je nutné jej obecně minimalizovat. V následujícím Obrázku 58 je zhodnoceno, v jaké fázi výroby úspora za odpad předčí náklady na pořízení horkého systému. Je uvažováno, že navržená forma za svou životnost vykoná 2 miliony zdvihů a cena použitého materiálu je 125 Kč/kg. Úspora je porovnávána vůči bloku se dvěma tryskami, jakožto k systému s největším objemem odpadu. [44]



Obrázek 58 Závislost úspory za plastový materiál na počtu zdvihů

(zdroj: vlastní)

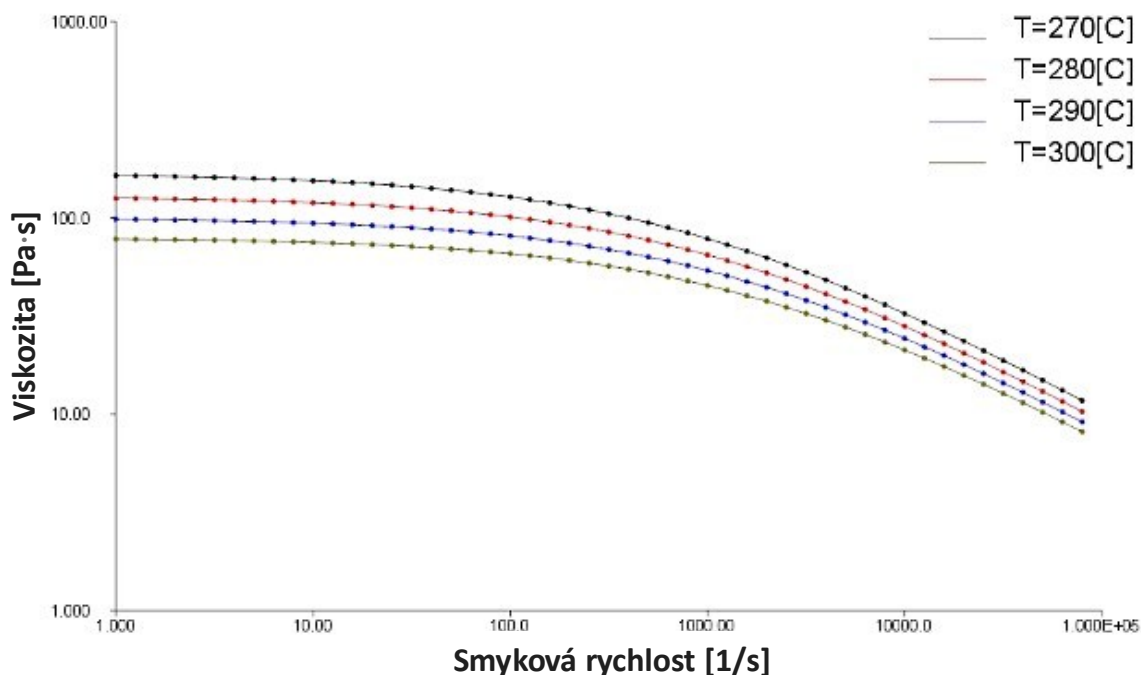
Fixní náklady spojené s horkým blokem jsou vysoké, proto je jeho využití rentabilní až pro velké série vyrobených kusů, přičemž jeho cena se také negativně promítá do ceny výrobku. Z toho vyplývá, že pořízení tohoto systému má smysl až tehdy, když úspora za materiál předčí jeho pořizovací náklady. Na základě Obrázku 58 bylo vyhodnoceno, že pro danou aplikaci má horký systém význam přibližně od 750 tisíc zdvihů, přičemž doba návratnosti osmitryskového řešení je kratší. Jinými slovy lze říct, že investice do horkého bloku přinese zisk až ve 38 % plánované životnosti formy.

Na základě všech výše zmíněných kritérií byl pro konstrukci formy vybrán horký systém se čtyřmi tryskami, který vyniká oproti bloku se dvěma tryskami v mnoha ohledech, ale zároveň nebylo dosaženo zásadně horších vlastností oproti použití systému s osmi tryskami. Rozhodující kritérium byla především složitost a rizikovost velkého systému, u kterého roste možnost potenciálních nákladů spojených s poruchami. Dalším negativním jevem je navyšování velikosti formy, které také vede ke zvyšování nákladů na provoz formy.

7.3.3 Vyvážení studeného vtokového systému a vliv smykové rychlosti

Smyková rychlost je velmi důležitou veličinou při vstřikování plastů. Nelineární závislost viskozity na smykové rychlosti způsobuje jev, který se nazývá „shear thinning“, jakožto zvyšování teploty materiálu vlivem tření a zlepšování jeho tekutosti. Dalším efektem je vliv na orientaci skelných vláken patrný zejména při vyšších rychlostech smykové deformace. Při překročení materiálového maxima dochází ke smykové degradaci, jenž se projevuje zápachem, změnou barvy nebo prasklinami. Vysoká smyková rychlost může být na výrobku patrná tokovými liniemi na povrchu vyráběného dílu. Jedním z možných důsledků smykové rychlosti je také jev nerovnoměrného plnění geometricky vyvážené vtokové soustavy podrobněji popsany v teoretické části práce v kapitole 2.2.1.

Nejvýznamnější hledisko v projevení vlivu smykové viskozity je materiálová vlastnost, a to náchylnost ke změně viskozity změnou teploty. Vstřikovaný materiál je Zytel MT409AHS BK010, jehož parametry Cross-WLF modelu (Tabulka 3) vypovídají o vysoké počáteční viskozitě, silném projevu „shear thinning“ chování, vysokou citlivost na změny teploty a zanedbatelnou závislost viskozity na tlaku. Závislost viskozity na teplotě je znázorněna na Obrázku 59 v podobě tokových křivek.

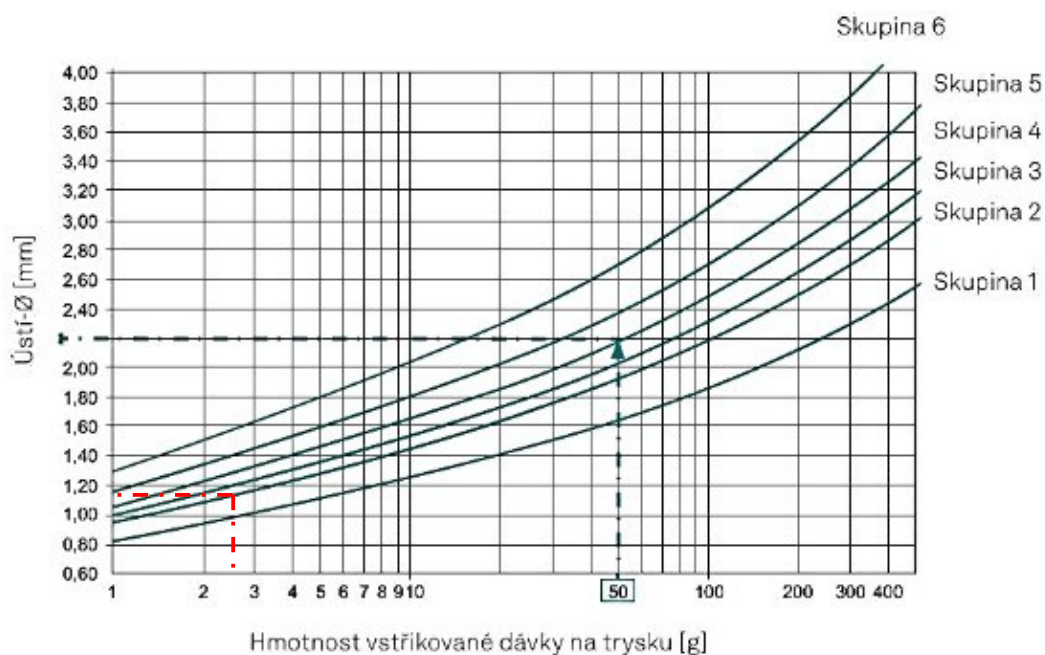


Obrázek 59 Závislost viskozity na smykové rychlosti Zytel MT409AHS BK010

(zdroj: [42])

Z tohoto důvodu je stávající vtokový systém prověřen na vliv smykové rychlosti ve vtokovém kanále a provedena třetí sekvence analýz. Vybraný vtokový systém se čtyřmi tryskami byl analyzován pomocí analýzy na symetrické čtvrtině formy. Největší gradient smykové rychlosti se projevuje pro vysoké vstřikovací rychlosti, nízké teploty taveniny a formy a zejména také pro tenkostěnné části geometrie. Aby vliv smykové rychlosti byl podrobně vyšetřen, byly v simulaci nastaveny podmínky, u kterých je možné projev smykové rychlosti zdůraznit. V praxi je zvyšování vstřikovací rychlosti žádoucí především kvůli zkrácení doby cyklu, a tím i snížení výrobních nákladů.

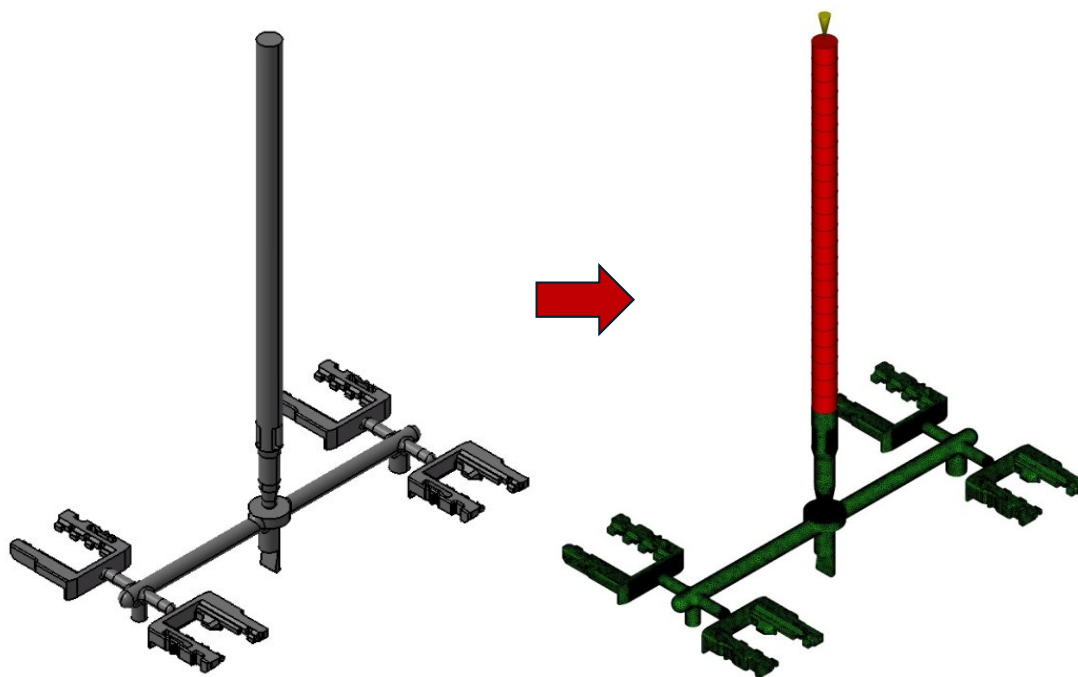
Z hlediska přesného zachycení smykového chování musí být v této fázi zvolena horká tryska včetně jejího ústí. Bylo zvoleno vtokové ústí EH 4240, které je vhodné pro vstřikování do studeného kanálu i napřímo do dílu. U tohoto typu ústí je špička trysky vysoce odolná a snadno vyměnitelná. Pro PA66 se možná gramáž na trysku pohybuje v rozmezí 0,5–15 g pro trysku série 19. Materiál PA66 se řadí do skupiny 2 a při dávce 2,6 g na trysku je průměr ústí z grafu cca 1,1 mm (Obrázek 60). Tato hodnota byla kvůli bezpečnosti zvětšena na nejbližší vyšší průměr, který činí 1,5 mm.



Obrázek 60 Graf volby velikosti vtokového ústí horké trysky

(zdroj: [30])

Simulace byla provedena pro geometrii horké trysky včetně torpéda ústící do studeného vtokového systému. Pro tyto účely kvůli potřebné zvýšené přesnosti byl studený vtok i špička trysky simulována 3D sítí, kde část trysky za torpédem byla kvůli usnadnění náročnosti výpočtu zjednodušena pomocí nosníkových elementů (Obrázek 61).



Obrázek 61 Sít' horké trysky s výrobky

(zdroj: vlastní)

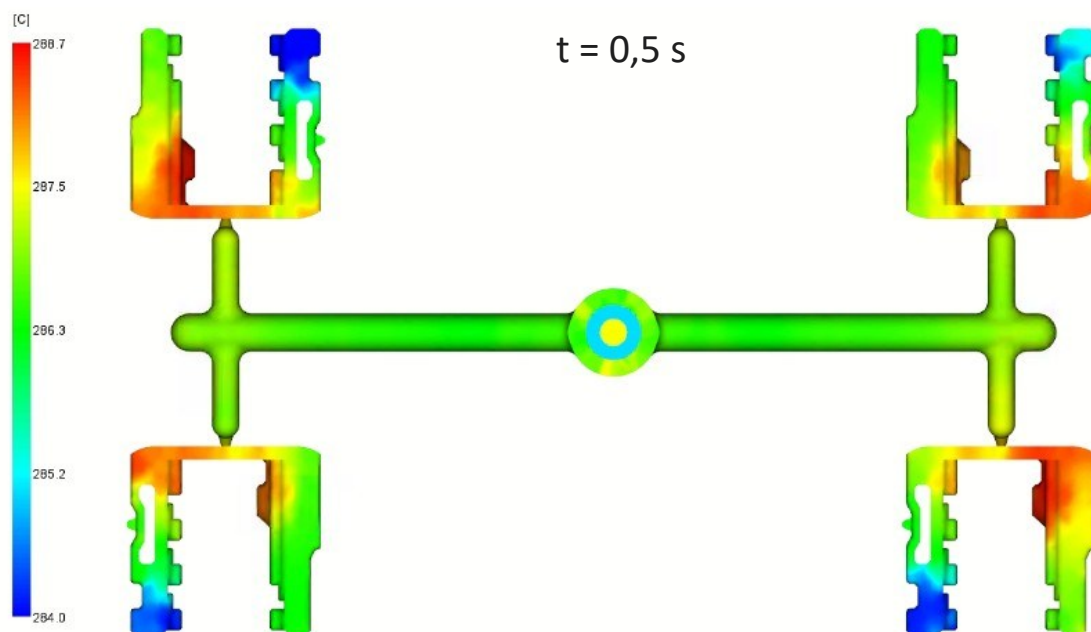
Pro nastavení simulace byly použity výchozí parametry z předchozí kapitoly s výjimkou veličin zmíněných v Tabulce 5. Rozdíly se týkají především kvality sítě, kdy je potřeba detailní jemnou 3D síť, aby bylo možné projevy smykové rychlosti v systému zaznamenat. Síť byla navíc lokálně zjemněná v oblasti torpéda, tunelového vtoku a ústí trysky. Dalším rozdílem je projevení setrvačných sil ve výpočtu. Čas plnění byl zkrácen na polovinu.

Tabulka 5 Změny v nastavení simulace (výchozí nastavení Tabulka 3)

Čas plnění [s]	0,5
Počet vrstev čtyřstěňů [-]	16
Výchozí délka hrany [mm]	0,5
Výchozí délka hrany (lokální) [mm]	0,15
Maximální poměr délky strany [-]	51,37 (doporučené maximum 100)

(zdroj: vlastní)

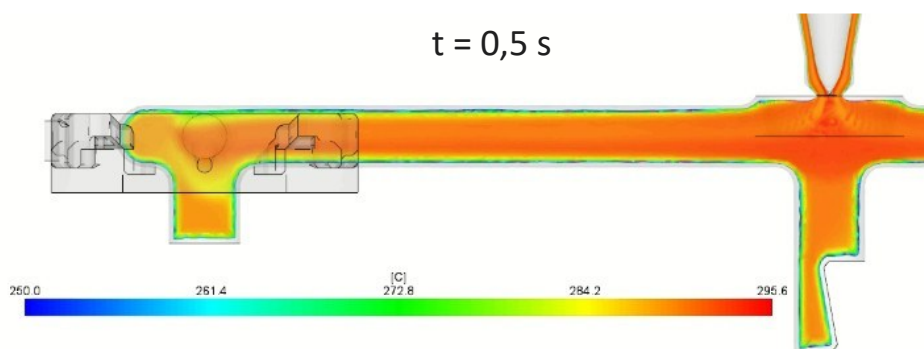
Zajímavé hodnoty poskytuje teplota na čele taveniny, kde je patrné, že při vyšší rychlosti vstřikování ve všech vnějších ramenech došlo k nárůstu teploty v důsledku vzájemného tření polymerních vrstev (Obrázek 62). V případě druhé sekvence analýz s 1D vtokovým systémem byl projev teploty na čele taveniny s trendem teplejšího ramena bez otvoru pro všechny kombinované systémy (Obrázek 55). Maximální hodnota teploty neprojevila významný nárůst.



Obrázek 62 Projev smykové rychlosti na teplotě čela taveniny $t = 0,5$ s

(zdroj: vlastní)

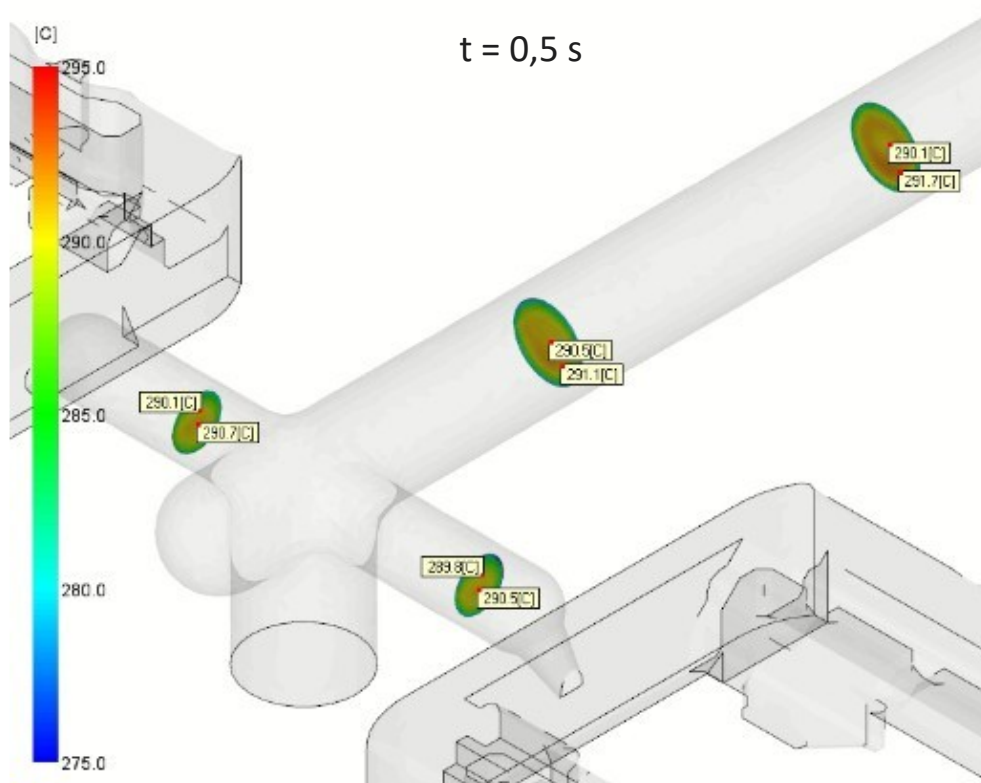
Po vyšetření teploty v průřezu (Obrázek 63 a 64) nebyly detekovány významné anomálie v nárůstu teploty a jejího přerozdělení za vtokovým kanálem. Teplota středu a okrajů kanálu se pohybuje v rozmezí 1 °C.



Obrázek 63 Podélný průřez kanálu $t = 0,5$ s

(zdroj: vlastní)

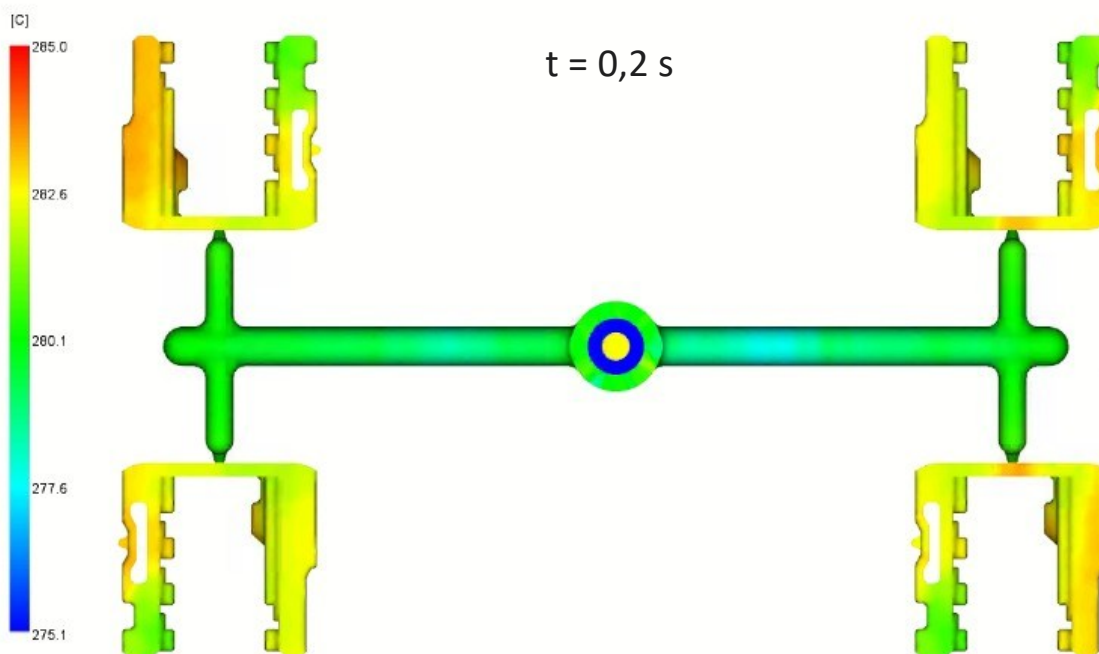
Největší rozdíly v gradientu vznikají za horkou tryskou a postupně se zmenšují. Za větvením je rozdíl teplot stále patrný, ale pouze v desítkách °C, přičemž trend přerozdělení teplot se vyrovnal a střed kanálu je teplejší než jeho okraje.



Obrázek 64 Výsledek teploty v průřezu kanálem $t = 0,5 \text{ s}$

(zdroj: vlastní)

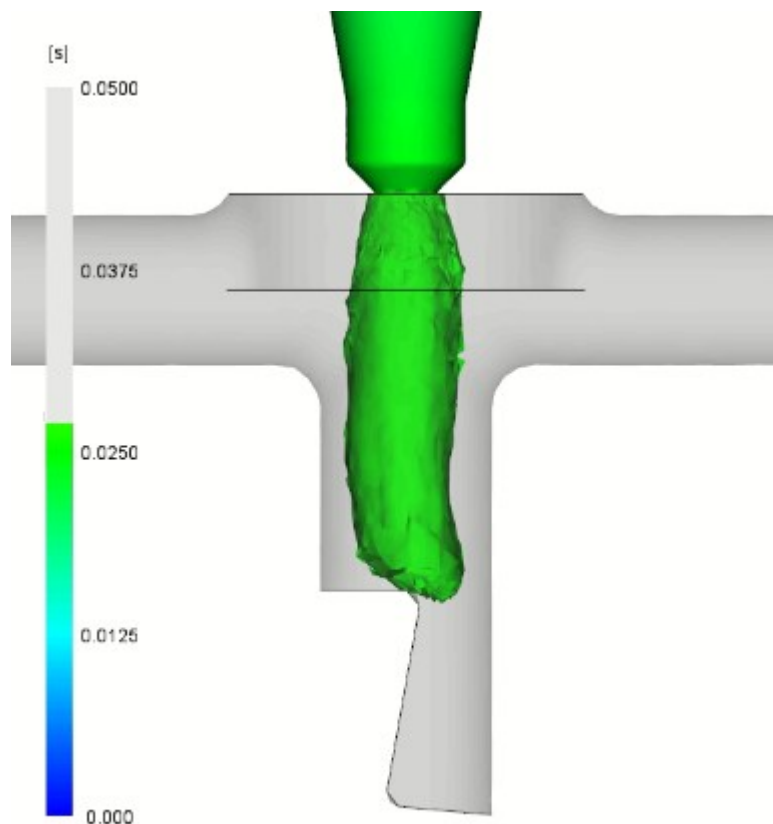
Jediným proměnlivým parametrem následující simulace je snížení času plnění na 0,2 s. Díky nižšímu času plnění je projev vnitřního tření taveniny ztelnější především v minimalizování teplotních rozdílů na výrobcích (Obrázek 65). Celková teplota narostla o 5° C, došlo také k nárůstu tlaku při přepnutí na dotlak o 20 MPa a celková smyková rychlost již je lokálně nad materiálovým limitem.



Obrázek 65 Projev smykové rychlosti na teplotě čela taveniny $t = 0,2 \text{ s}$

(zdroj: vlastní)

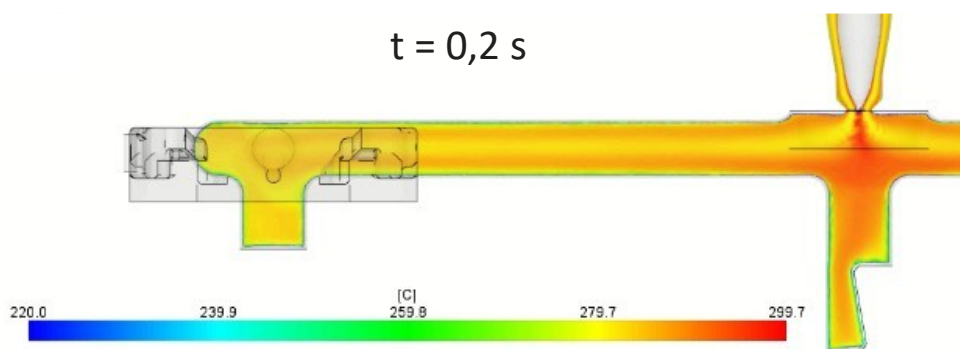
Při navýšení vstřikovací rychlosti už je možné zaznamenat volný tok taveniny (tzv. jetting) z trysky do přidržovače vtoku (Obrázek 66).



Obrázek 66 Volný tok taveniny z trysky

(zdroj: vlastní)

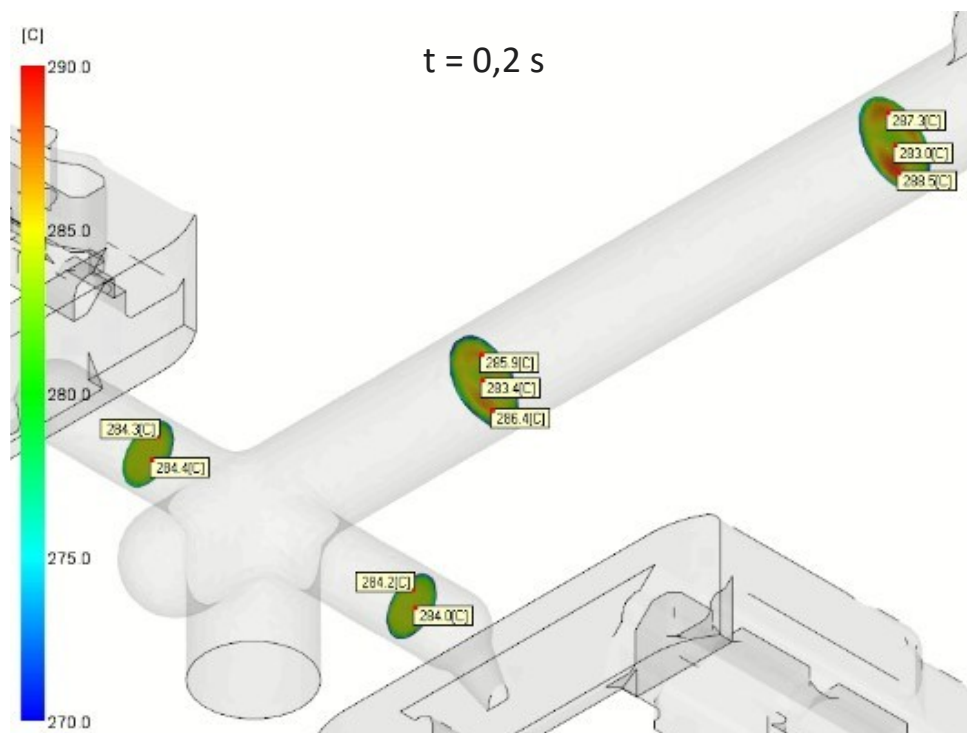
Podíl studenější části jádra průřezu významně narostl (Obrázek 67).



Obrázek 67 Podélný průřez kanálu $t = 0,2 \text{ s}$

(zdroj: vlastní)

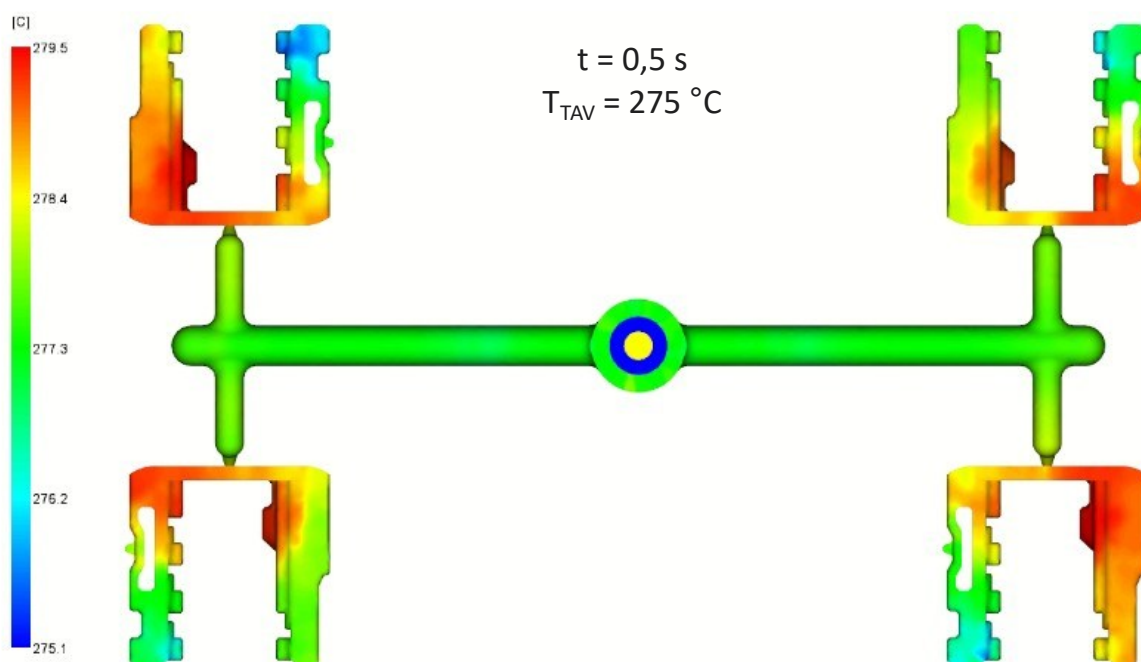
V tomto rozvržení při nastavených podmínkách se začíná projevovat nesymetrický teplotní gradient, který podporuje nerovnovážné vlastnosti taveniny plnicí výrobek (Obrázek 68). Za horkou tryskou je rozdíl teplot největší (3–4 °C) a postupně se s dráhou proudění zmenšuje. Tento teplotní rozdíl v tavenině se za dělením kanálů pohybuje pouze v desítkách °C. Simulací nebyl odhalen vliv na odlišný způsob plnění výrobku.



Obrázek 68 Výsledek teploty v průřezu kanálem $t = 0,2 \text{ s}$

(zdroj: vlastní)

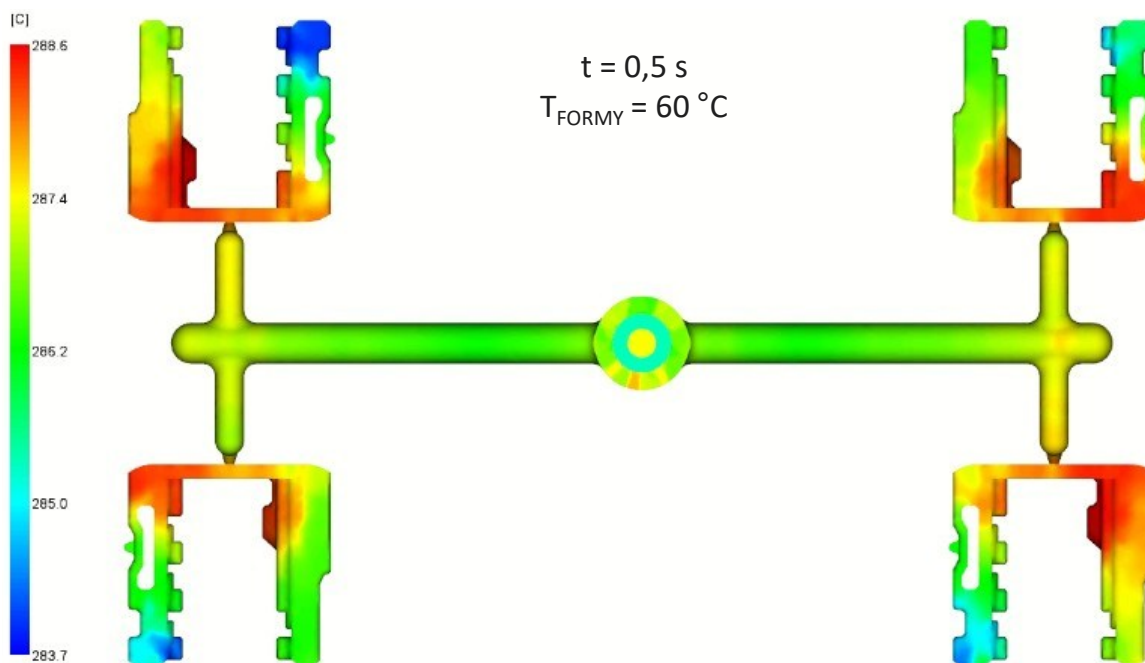
V další studii byl řešený vliv teploty taveniny při výchozím čase plnění 0,5 s. V praktických případech je mnohdy potřeba snížit teplotu taveniny, aby bylo zabráněno některým vadám, například přetokům nebo spáleninám. Teplota taveniny byla snížena o 10 °C na 275 °C. Rozdíl teplot byl 1 °C mezi hodnotou jádra tokového kanálu a částí u stěny ovlivněné smýkáním taveniny. Jev potvrzený u první studie s časem 0,5 s, kde vnější ramena byla teplejší byl zde opět také potvrzen. Jediným rozdílem bylo, že snížení teploty taveniny se projeví výrazným zhoršením teplotního pole výrobku, zvláště mezi jednotlivými rameny (Obrázek 69). Nesymetrické podmínky napříč průřezem kanálu nebyly potvrzeny.



Obrázek 69 Projev smykové rychlosti na teplotě čela taveniny $t = 0,5 \text{ s}$; $T_{TAV} = 275 \text{ °C}$

(zdroj: vlastní)

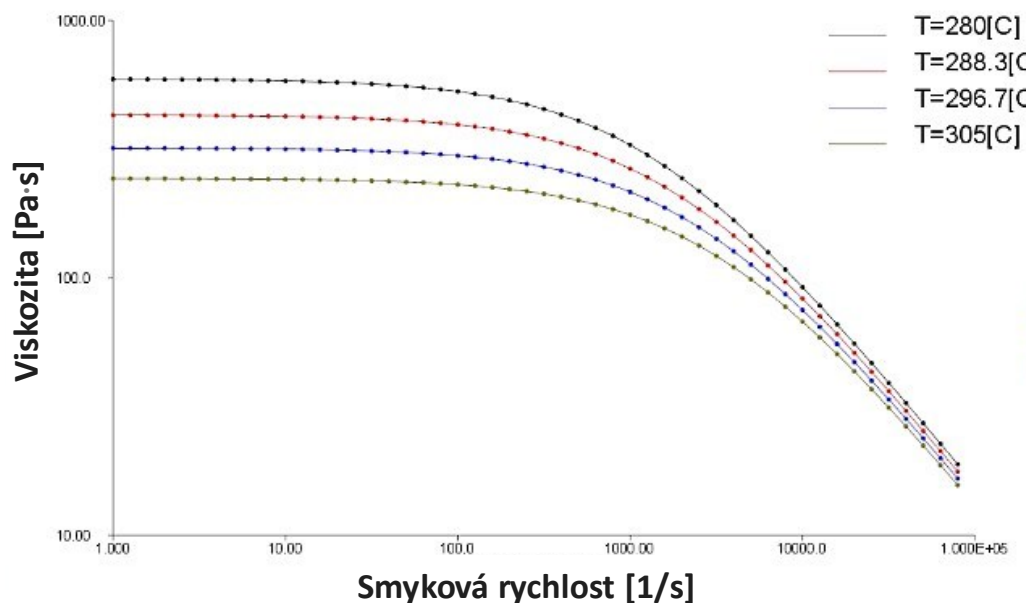
V následující studii byl prověřen vliv teploty formy na rychlost smykové deformace. Teplota formy byla snížena o 10 °C na 60 °C. Použití nižší teploty formy zajišťuje menší náklady v souvislosti se snížením nákladů na její temperaci. Celková teplota taveniny vzrostla na 295 °C, symetrický teplotní gradient se pohybuje s rozdíly 1 °C a smyková rychlost se pohybuje pod materiálovým maximem. Na výsledku teploty na čele tavenině je pozorováno zhoršení teplotního pole vnějších ramen oproti původní teplotě formy (Obrázek 70).



Obrázek 70 Projev smykové rychlosti na teplotě čela taveniny $t = 0,5 \text{ s}$, $T_{\text{FORMY}} = 60 \text{ °C}$

(zdroj: vlastní)

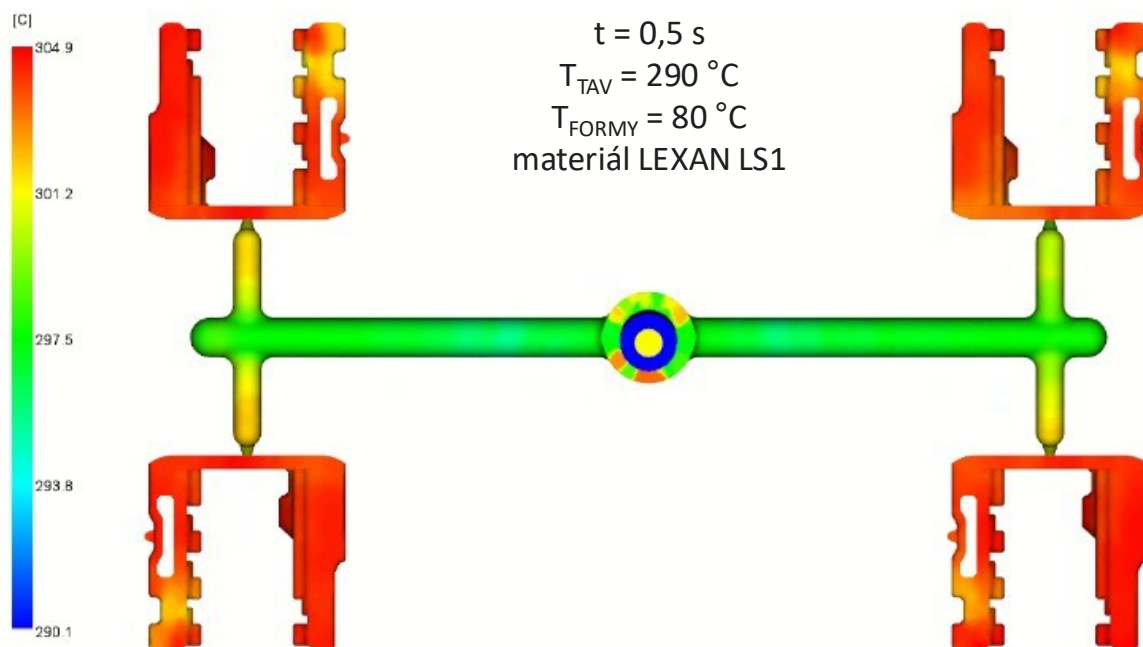
Pro poslední porovnání vlivu smykové rychlosti byl vybrán rozdílný materiál, jehož viskozitní model vykazuje výraznější teplotní náchylnost při změně smykové rychlosti než původní Zytel. Tento krok byl učiněn, aby byl zaznamenán vliv identické geometrie s jedním větvením pro různé materiály. Pro tuto aplikaci je zvolen materiál Lexan LS1, kde již na první pohled na Obrázku 71 je zjevná velká vzdálenost křivek demonstrující tento jev.



Obrázek 71 Závislost viskozity na smykové rychlosti Lexan LS1

(zdroj: [42])

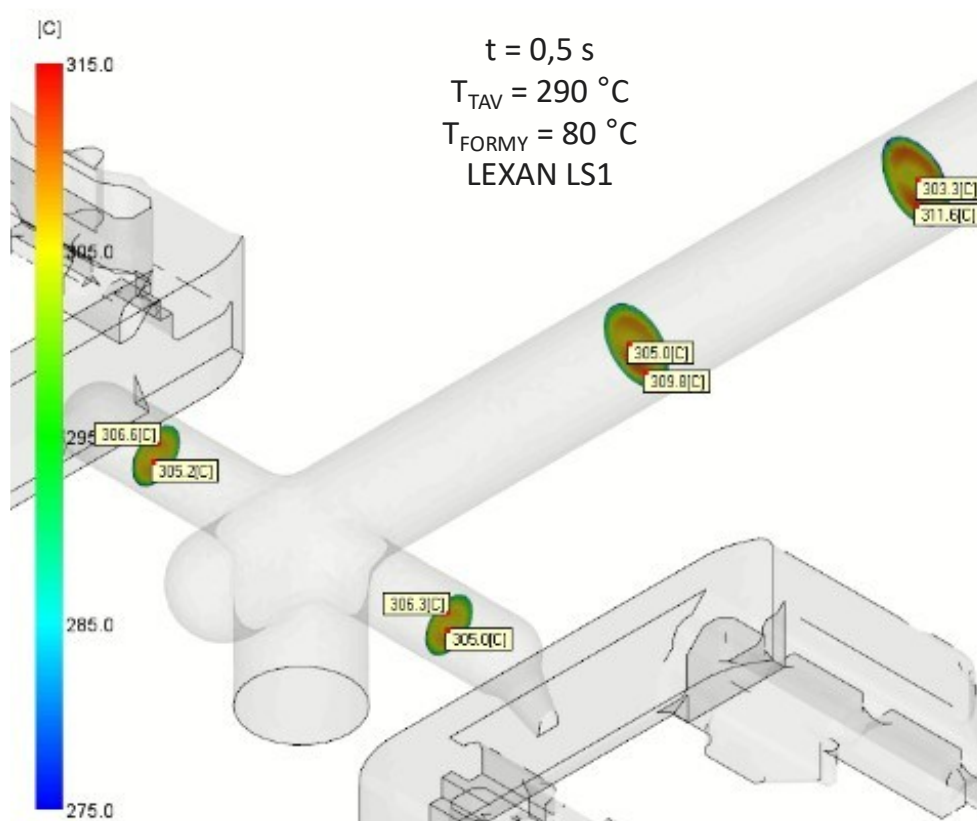
Při použití rozdílného materiálu vzniká kompletně odlišné teplotní pole (Obrázek 72) a pro vysokou smykovou rychlost již dochází k degradaci plastového materiálu. Celková teplota taveniny lokálně narostla až na 330 °C. Teplota ve vtokovém systému se zvýšila o 15 °C.



Obrázek 72 Projev smykové rychlosti na teplotě čela taveniny
 $t = 0,5 \text{ s}$; $T_{\text{FORMY}} = 80 \text{ °C}$; $T_{\text{TAV}} = 290 \text{ °C}$; pro Lexan LS1

(zdroj: vlastní)

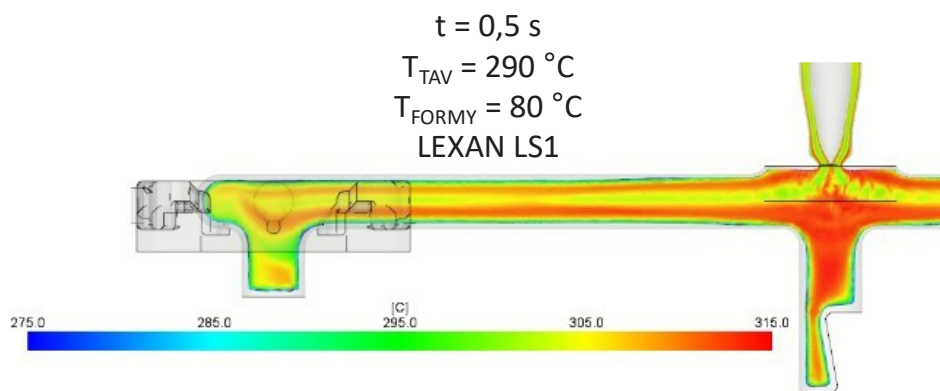
Pro materiál Lexan LS1 byly pozorovány disbalance teplotního gradientu v průřezu kanálu i za jeho rozdělením (Obrázek 73). V plnicí studii nebyl prokázán žádný vliv nesymetrického teplotního pole na způsob plnění, což je zřejmě dáno relativně krátkou dráhou rozvodných kanálů pouze s jedním větvením a miniaturním charakterem dílu.



Obrázek 73 Výsledek teploty v průřezu kanálem $t = 0,5$ s; $T_{\text{FORMY}} = 80$ °C; $T_{\text{TAV}} = 290$ °C; pro Lexan LS1

(zdroj: vlastní)

V podélném průřezu rozvodného kanálu jsou vidět rozdíly jádra a okrajů kanálu 10 °C, které jsou již markantní a patrné i za větvením (Obrázek 74). V rámci začátku plnění byl opět pozorován „jetting“ z trysky do přidržovače vtoku.

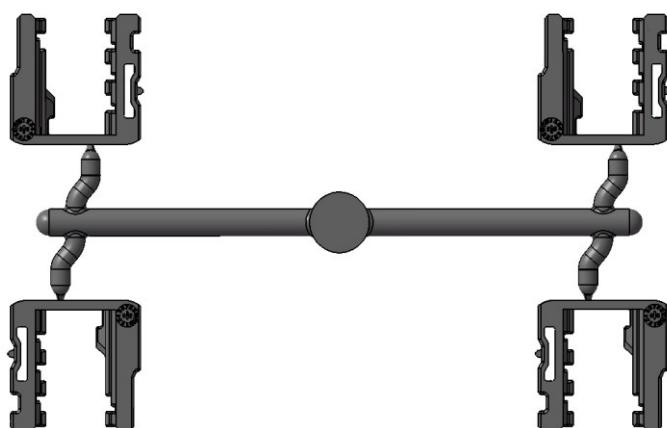


Obrázek 74 Podélný průřez kanálu $t = 0,5 \text{ s}$; $T_{FORMY} = 80 \text{ °C}$; $T_{TAV} = 290 \text{ °C}$; pro Lexan LS1

(zdroj: vlastní)

Výsledkem porovnání vlivu smykové rychlosti na „shear thinning“ chování pro různá nastavení simulace. Bylo testováno zkrácení času plnění, snížení teploty formy, teploty taveniny a také citlivější materiál. Rozdílný materiál byl do studie implementován, aby byl porovnán vliv identické geometrie na různé materiálové modely. Efekt smykové rychlosti na nerovnoměrné rozložení gradientu teploty v průřezu kanálu byl prokázán, přičemž nejvíce se projevil pro krátký čas plnění a změněný materiál. Nicméně ani v těchto případech nebyl prokázán rozdílný způsob plnění výrobku, a tedy vliv větvení na redistribuci teploty v průřezu. V tomto případě je to pravděpodobně způsobeno krátkými kanály s jedním větvením a malým objemem dílu.

Vzhledem k tomuto zjištění byl vybrán vtokový systém se čtyřmi tryskami dále optimalizován. Bylo snahou vykompenzovat nerovnoměrnost plnění způsobenou umístěním otvoru a rozdílnou tloušťkou ramen vyosením vtokového ústí proti původní poloze o 2 mm blíž ramenu s otvorem (Obrázek 75). Ostatní geometrické rozměry zůstaly zachovány. Pro vyhodnocení návrhu bylo použito nastavení procesních podmínek z původní studie (Tabulka 3), přičemž bylo kvůli přesnosti výpočtu použito stejně jako v předchozí studii jemnější nastavení sítě (Tabulka 5) pouze s rozdílem snížení počtu vrstev čtyřstěnných elementů na 6. Počet čtyřstěnných vrstev je klíčový parametr pro nastavení sítě a je vždy nutné jej individuálně vyhodnotit, zejména dopad na kvalitu žádaných výsledků. Šest vrstev je v tomto případě dostatečných a nedochází k chybám zjemnění sítě kolem středu modelu. Hodnota maximálního poměru délky strany snížením vrstev klesla na 48,62. Původní navržený čas plnění byl kvůli zrychlení času cyklu optimalizován na 0,5 s

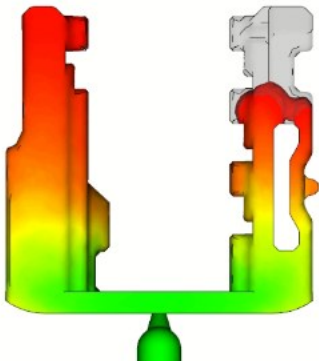
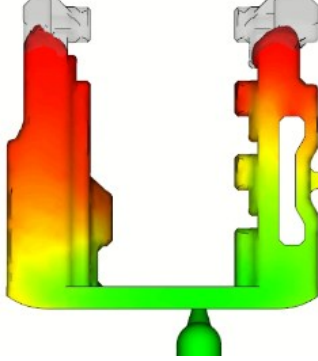
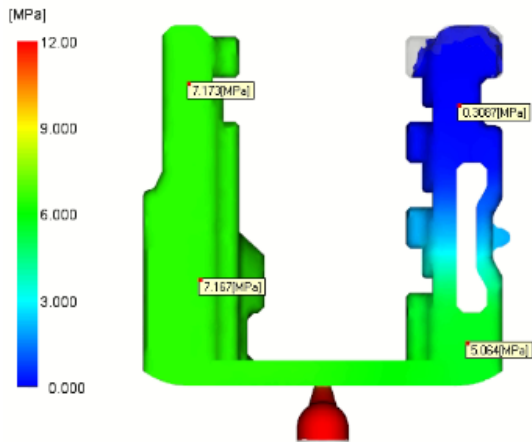
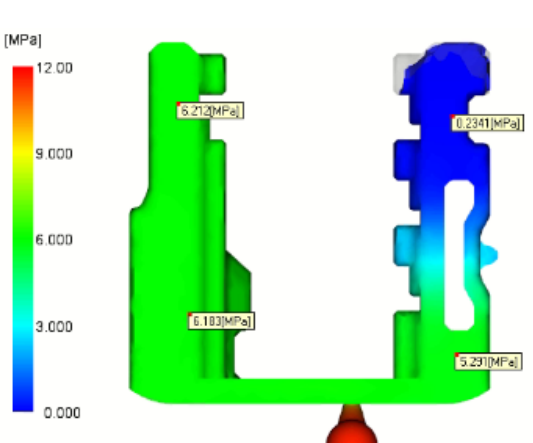
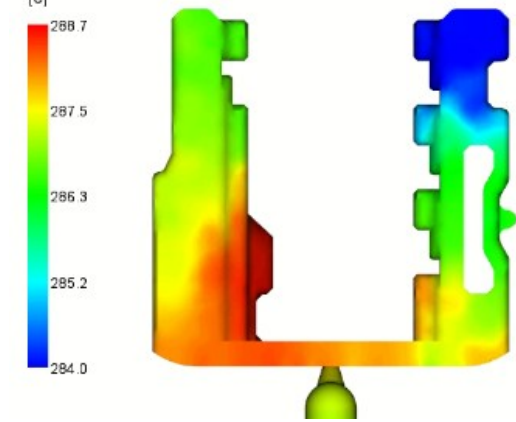
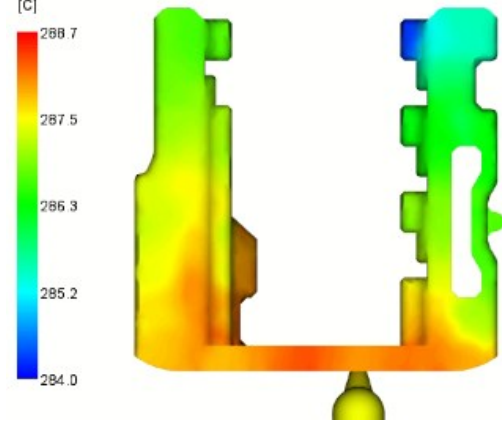


Obrázek 75 Optimalizovaný návrh vtokového systému

(zdroj: vlastní)

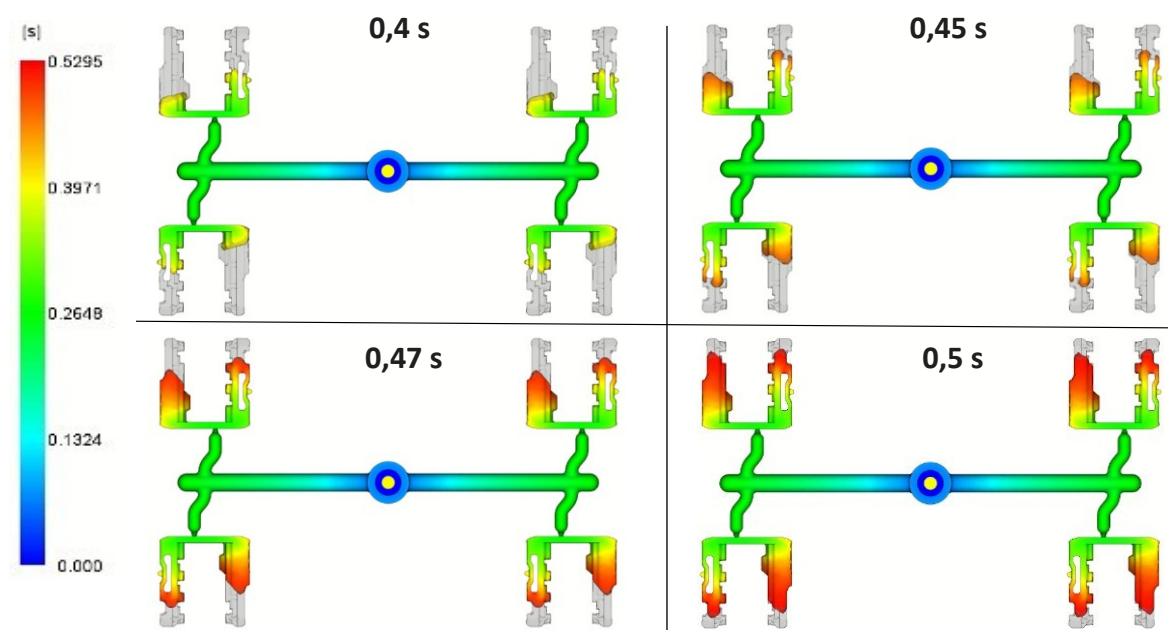
Vliv kompenzace polohy ústí oproti původnímu návrhu porovnává Tabulka 6. Změna polohy vedla k rovnoměrnějšímu doplnění ramen, snížení celkového tlaku a lepšímu rozložení teploty na čele taveniny během fáze plnění. Tento jev není možné eliminovat, protože při průtoku tenčím místem nelze zabránit urychlení plnění ramena bez otvoru.

Tabulka 6 Porovnání původní a optimalizované geometrie vtokového systému

Původní návrh	Optimalizovaný návrh
Rovnoměrné plnění	
	
Tlak v bodě přepnutí na dotlak	
	
Rovnoměrné teplotního pole	
	

(zdroj: vlastní)

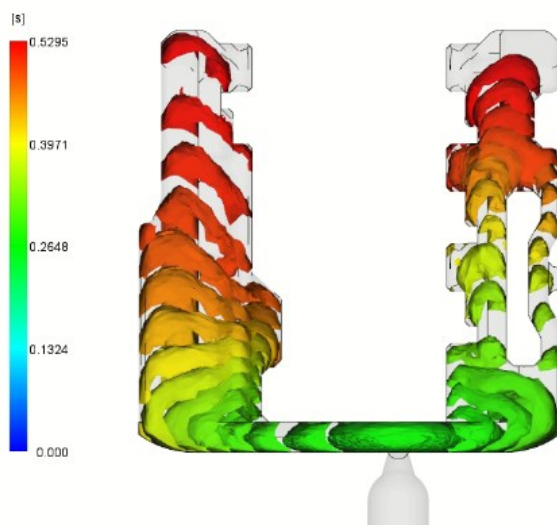
Při detailní plnicí studii (Obrázek 76) je možné pozorovat vliv míst geometrie s nižší tloušťkou na urychlení taveniny. Nejprve tavenina efektivně plní rameno bez otvoru, protože díky vyosení k němu doteče dříve, než začne plnit objemnější rameno s otvorem. Ve chvíli, kdy se plní rameno bez otvoru, plnění ramena s otvorem probíhá ve velmi zpomalené míře. K závěrečnému výsledku, že rameno bez otvoru se doplní rychleji napomáhá také fakt, že rameno bez otvoru je na konci plnění zúžené, zatímco rameno s otvorem přechází opět do širší geometrie.



Obrázek 76 Plnicí studie optimalizovaného vtokového systému

(zdroj: vlastní)

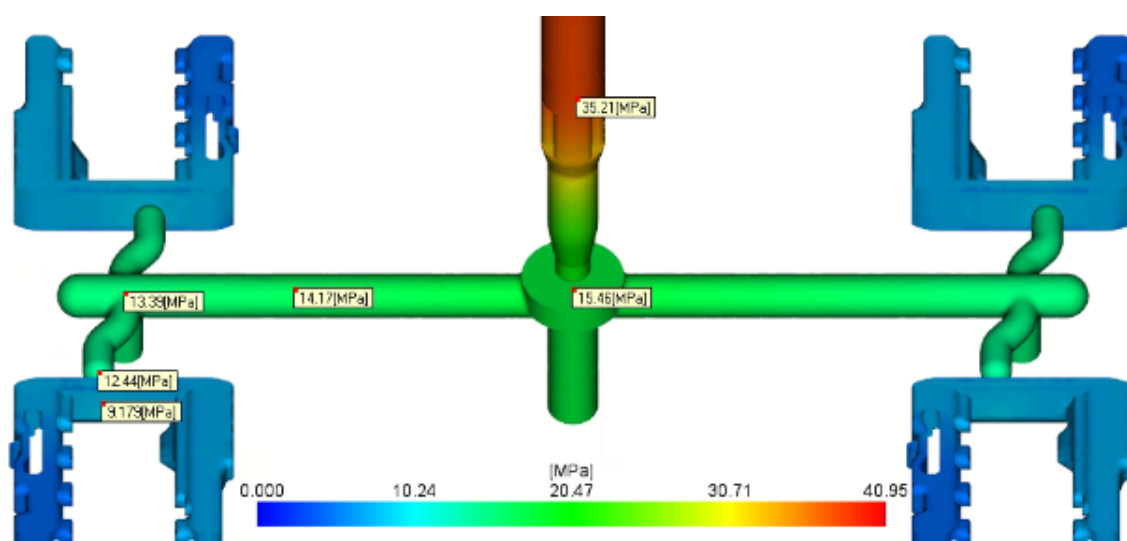
Místa, kde tavenina zpomalí své proudění je možné pozorovat na plnicí studii především vzdáleností izochor, kdy jejich malá vzdálenost symbolizuje zpomalení proudění (Obrázek 77). Tento jev je možné omezit profilováním rychlosti dávkování šneku, ale při malých objemech výrobku tyto rozdíly není možné vzhledem ke zpoždění hydraulického systému dobře kompenzovat.



Obrázek 77 Izochory při plnění

(zdroj: vlastní)

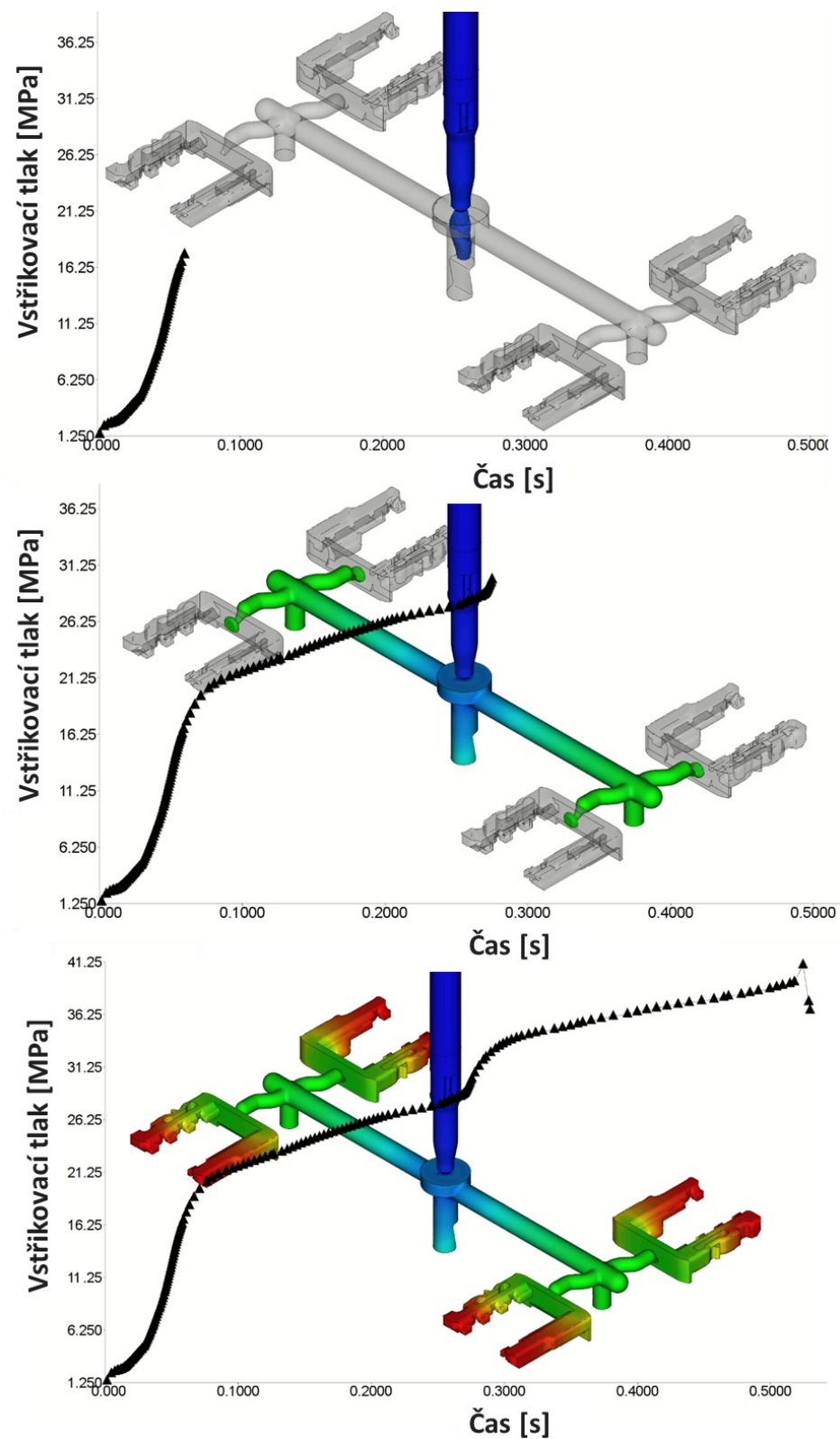
Výsledek vstřikovacího tlaku zobrazuje hodnoty tlaku ve formě během fáze plnění a dotlaku. Rozdíl tlaku mezi jednotlivými místy určuje sílu potřebnou na rozpohybování polymerních molekul. Z toho vyplývá, že maximální tlak se vždy vyskytuje v místě vstřikování a minimální naopak na čele taveniny. Maximální tlak v systému na konci plnění činí 41 MPa. Tlaková ztráta na ústí horké trysky se pohybuje kolem 20 MPa a u tunelového ústí se jedná o 3 MPa. Tlakovou situaci ve formě popisuje Obrázek 78.



Obrázek 78 Tlaková situace ve vtokovém systému

(zdroj: vlastní)

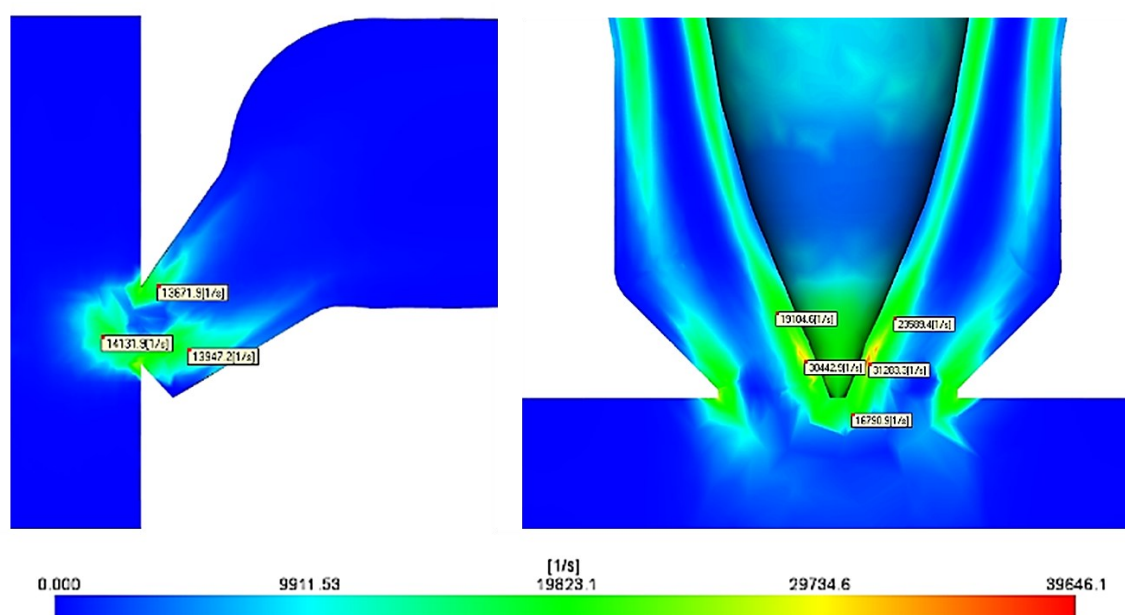
Na tlakové křivce jsou patrné dva výrazné odklony křivky, jedním z nich je průchod taveniny skrz ústí horké trysky a druhým skrz tunelové vtokové ústí (Obrázek 79).



Obrázek 79 Závislost vstřikovacího tlaku na čase

(zdroj: vlastní)

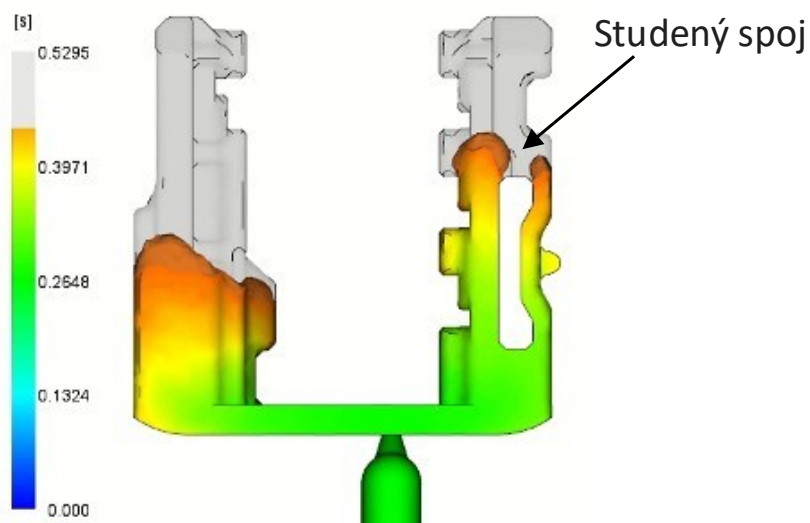
Při nově navrženém čase plnění se na výrobku nevyskytovala nedoplněná místa, hodnota smykové rychlosti nepřesahuje materiálový limit (60 000 1/s) a materiál z trysky nevykazuje volný proud taveniny (jetting) přímo do přidržovače vtoku. Zvýšená smyková rychlost se vyskytuje v oblasti horkého a studeného vtokového ústí (Obrázek 80). Hodnota smykové rychlosti v oblasti tunelového vtokového ústí se pohybuje okolo 15 000 1/s, což koresponduje s hodnotou uvedenou v Rovnici 6 při dimenzování tunelového ústí. K největšímu smýkání dochází při obtékání torpéda v horké trysce, a to 40 000 1/s.



Obrázek 80 Lokální maxima smykové rychlosti

(zdroj: vlastní)

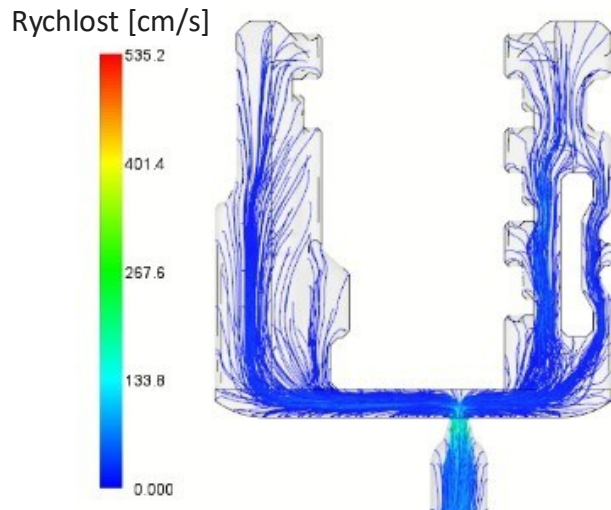
Při obtékání tvarového otvoru se čelo taveniny rozdělí na dva proudy, které se následně po obtečení překážky ochladí a spojí. V tomto místě vzniká studený spoj, který zapříčiňuje významné snížení mechanických vlastností výrobku. Tento jev je možné minimalizovat zvýšením teploty taveniny, vstřikovací rychlosti a hodnoty dotlaku. Z geometrického hlediska je možné studený spoj přemístit zvýšením počtu vtokových ústí nebo změnou jeho polohy. V rámci tohoto výrobku poloha studeného spoje není v mechanicky namáhaném místě, a proto bude místo ve formě pouze odvzdušněno. Odvzdušněním lze zvýšit kvalitu napojení čel taveniny. Studený spoj je zobrazen na Obrázku 81.



Obrázek 81 Lokalizace studeného spoje na výrobku

(zdroj: vlastní)

Proudnice na Obrázku 82 definují trajektorie, po kterých jednotlivé částice polymerní taveniny proudí v průběhu plnění. Díky tomuto výsledku lze lépe porozumět, jakým způsobem polymer obtéká složité geometrické prvky.



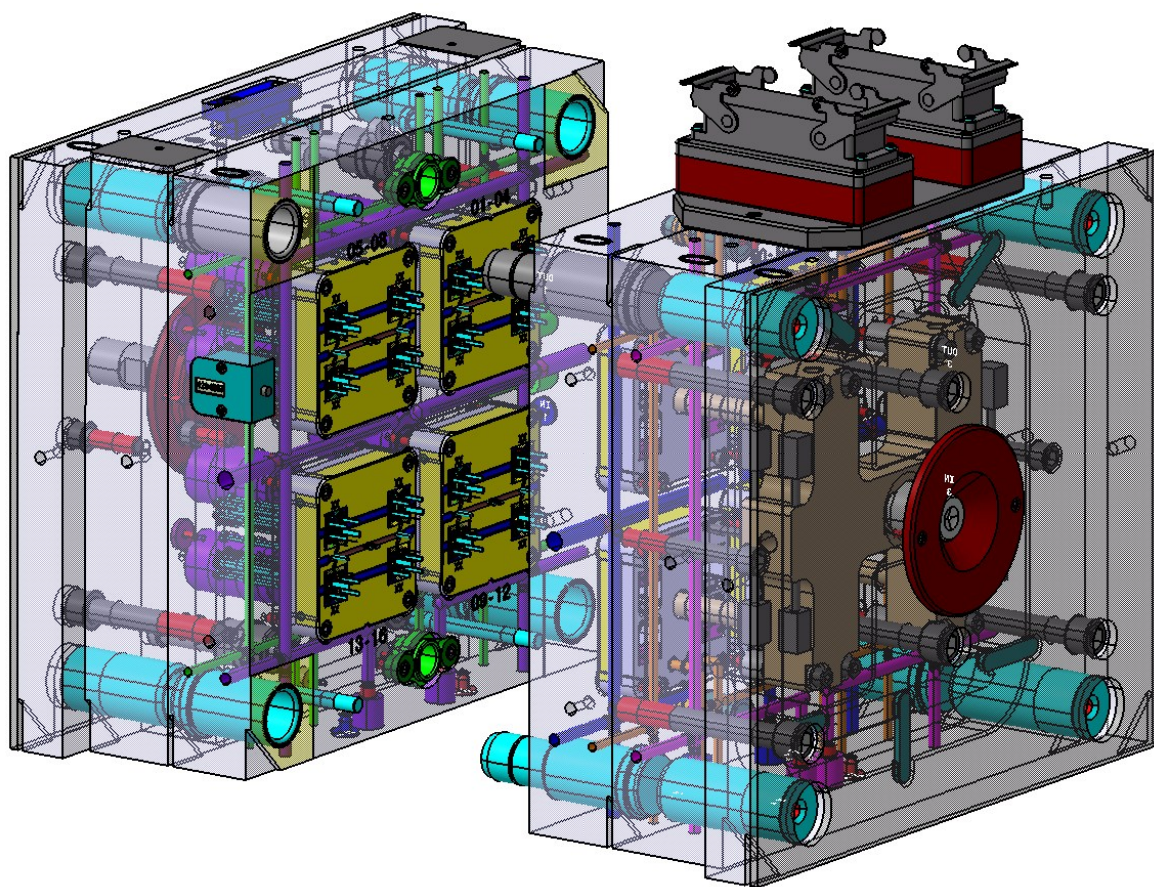
Obrázek 82 Tokové dráhy ve výrobku

(zdroj: vlastní)

Vyosení vtokového ústí z původní polohy mělo zásadní význam na vyvážení vtokového systému. Z tohoto důvodu bude tento optimalizovaný vtokový systém použitý v konstrukci vícenásobné vstříkovací formy.

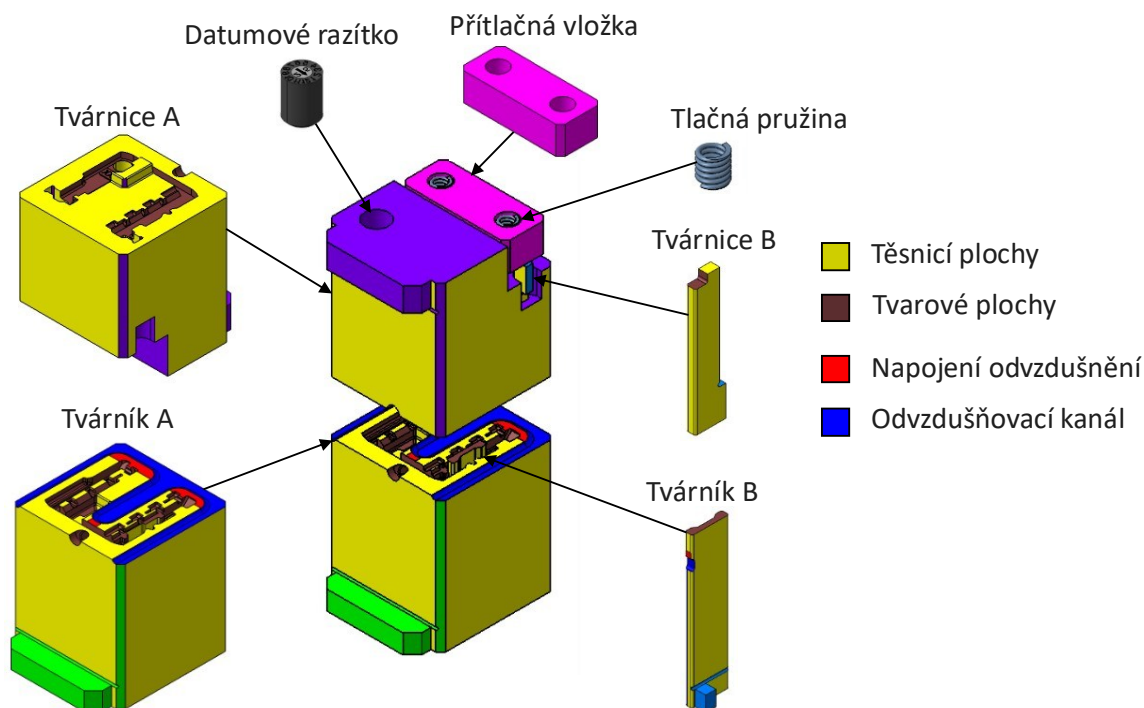
8 KONSTRUKCE FORMY

S využitím CAD programu CATIA V5R20 od firmy Dassault Systèmes byl vytvořen konstrukční návrh šestnáctinásobné vstřikovací formy (Obrázek 83), který vycházel z poznatků zjištěných pomocí tokových simulací ve fázi vývoje. Samotný návrh dbá na zásady doporučené při navrhování vstřikovacích forem a je v něm využito maximálního počtu normalizovaných součástí, které urychlují výrobu a snižují náklady.



8.1 Tvarové části

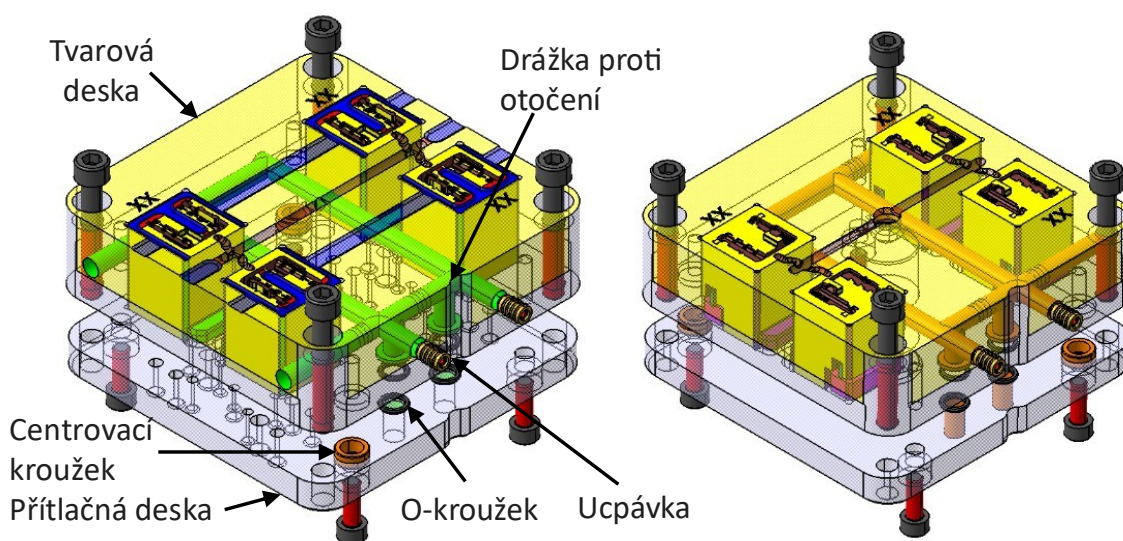
Tvarové části (Obrázek 84) jsou negativem vyráběného dílu, čímž tvoří dutinu, kterou vyplní roztavená polymerní tavenina. Při konstrukci vložek bylo využito barevného značení zmíněného na Obrázku 84. Rozměry dutiny jsou navýšeny o přídavek na smrštění, který pro tento konkrétní materiál činí 1,7 %. Díly tvořící tvar výrobku musí odolávat náročným podmínkám ve vstřikovací formě, proto jsou vyrobeny z vysoce legované nástrojové oceli označené jako 1.2343 ESU, jejíž tvrdost je zvýšena kalením. Tvarové vložky, které jsou součástí vstřikovací strany se nazývají tvárnice a na straně vyhazovací se jedná o tvárníky. Z ekonomického hlediska čím více je vložek ve formě použito, tím rostou náklady na výrobu formy. Z tohoto důvodu vložky použity pouze z opodstatněných důvodů. Části nazvané tvárník a tvárnice A tvoří hlavní základní obrys výrobku. Vložka na vyhazovací straně označená tvárník B formuje otvor a je zde realizována především z výrobního hlediska a možnosti aplikovat v tomto místě odvzdušnění. U výrobků, kde je přibližně stejná část geometrie zaformovaná v obou polovinách formy hrozí riziko, že výrobek po otevření formy nezůstane na vyhazovací straně a nebude možné jej odformovat. Jako zamezení tomuto riziku jsou do formy přidány díly na pružině, které po otevření formy odseparují vyrobený díl ze vstřikovací strany.



Obrázek 84 Sestava tvarových vložek

(zdroj: vlastní)

Tvarové vložky jsou ukotveny v tvarových deskách (Obrázek 85), které umožňují snadnou montáž a demontáž z dělicí roviny. V otvoru pro šrouby na tvarové desce se nachází závit pro snazší vyjmutí podstavy tvarových desek z kotevní desky. Díky symetrickému čtvercovému průřezu desky by bylo možné vložit tvarové desky do otvoru v kotevní desce obráceně, a z tohoto důvodu je deska vybavena drážkou zabráňující pootočení. Přítlačná deska je vůči kotevní přesně centrována a zajišťuje polohu vložek. Tvarové desky na vyhazovací i vstřikovací straně jsou opatřeny vrtanými okruhy, které umožňují efektivnější odvod tepla přímo z dutiny.



Obrázek 85 Sestava tvarových desek: vyhazovací strana (vlevo);
vstřikovací strana (vpravo)

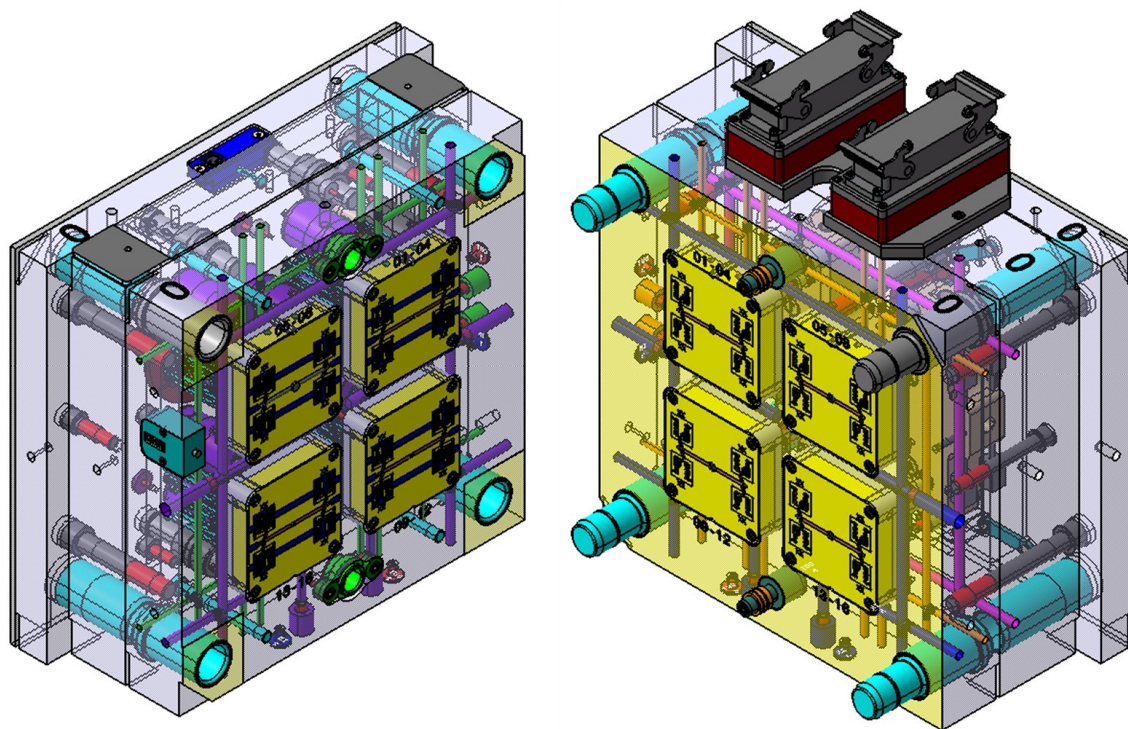
(zdroj: vlastní)

Při konstrukčním návrhu bylo snahou co nejvíce minimalizovat výrobní a montážní náročnost odlehčováním a využitím vůlí v místech, kde není potřeba přesného dosedání. Například kapsy na vkládané desky mají uvolněné rohy, třetina jejich výšky je s menším rozměrem kvůli snadnějšímu vkládání do kotevní desky a přítlačná deska je oproti vkládané menší o jeden milimetr na každé straně.

8.2 Rám formy

Vstřikovací forma (Obrázek 86) je složena celkem z šesti desek standardizovaných rozměrů 396×396 mm (š × v). Rozteče a škálování otvorů jsou dodrženy dle výrobců normálí Meusburger, aby bylo možné použít tzv. F desky – desky s již obrobenými otvory, které šetří

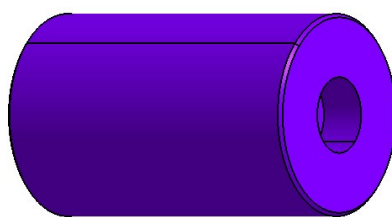
náklady a výrobní čas. Mezi formou a strojem se nachází izolační desky, které brání přenosu tepla a nečistot z formy na upínací plochy stroje. Mezi jednotlivými deskami se nachází kapsy pro snadnou demontáž.



Obrázek 86 Pohled do dělicí roviny: vyhazovací strana (vlevo);
vstřikovací strana (vpravo)

(zdroj: vlastní)

Vstřikovací forma je vybavena mechanickým počítadlem zdvihů, které slouží ke zřetelné identifikaci životnosti formy. Krom čtyřech hlavních spojovacích šroubů se na formě dále nachází také šrouby o menší velikosti spojující jen část desek. Kolem horkého bloku byly také přidány další šrouby, které zpevňují střed formy a zamezují průhybu vlivem vstřikovacího tlaku a teplotní roztažnosti bloku. Průhyb desek je rovněž velmi významný v oblasti mezi rozpěrnými deskami, kde se nachází volná plocha pro chod vyhazovačů. Plocha mezi tvarovou deskou a upínací deskou je zpevněna podpěrnými válci (Obrázek 87), které jsou umístěny kolem tvarových dutin a vyrábí se tolerančně předepjaté. Válce jsou normálně a pro jednoduchost montáže jsou připevněny šroubem k upínací desce.

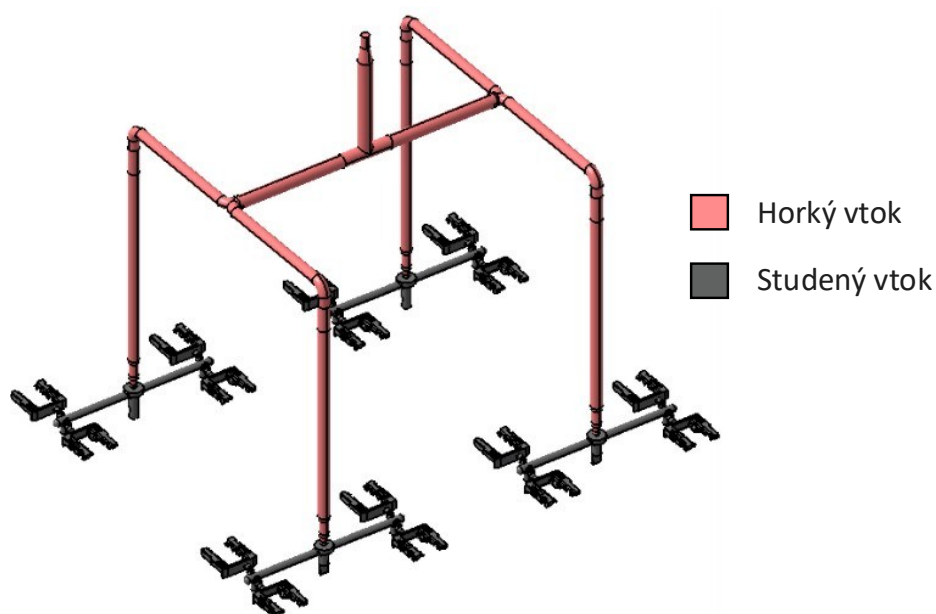


Obrázek 87 Podpěrný válec

(zdroj: vlastní)

8.3 Vtokový systém

Na základě výstupu CAE analýz byl zachován tvar studeného vtokového systému a pomocí online katalogu dodavatele Meusburger vytvořena sestava horkého bloku tvaru H, jenž se často používá u větších násobností a vyniká jednodušší konstrukcí oproti bloku tvaru X. Tvarové dutiny jsou rozmístěny symetricky kolem středu, čímž bylo rovnoměrně rozloženo tlakové namáhání. Kompletní rozvětvení kanálů je zobrazeno na Obrázku 88. Detail studené části kanálu je na Obrázku 75.

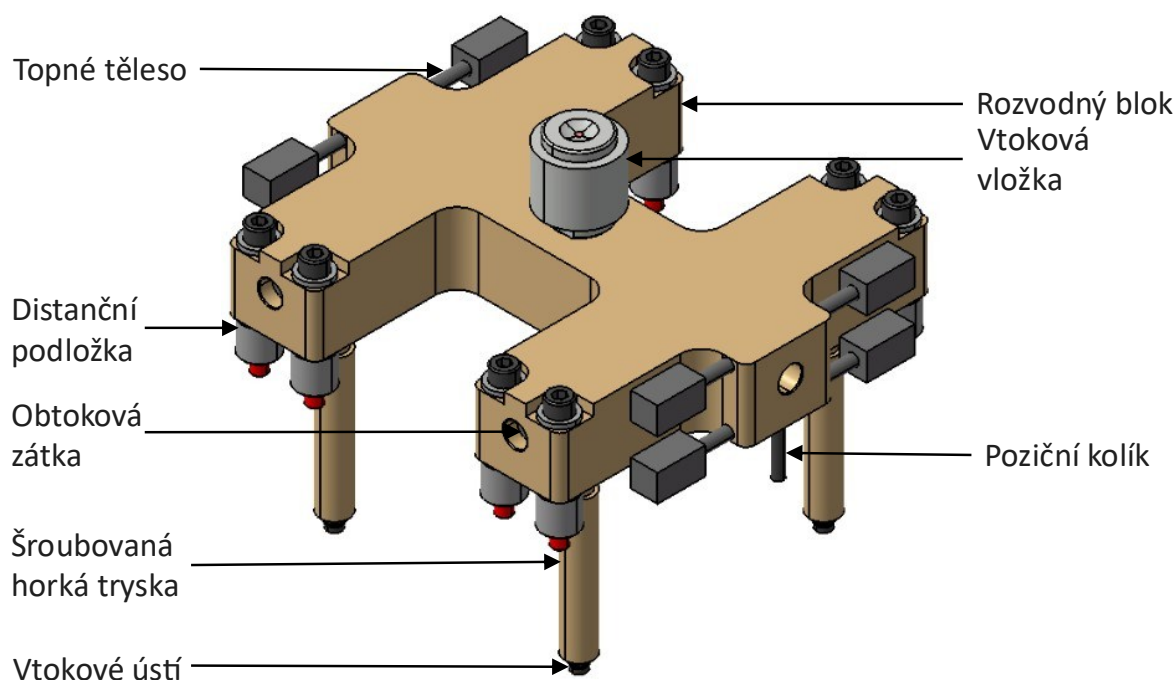


Obrázek 88 Celkové rozvětvení vtokového systému

(zdroj: vlastní)

8.3.1 Horký vtokový systém

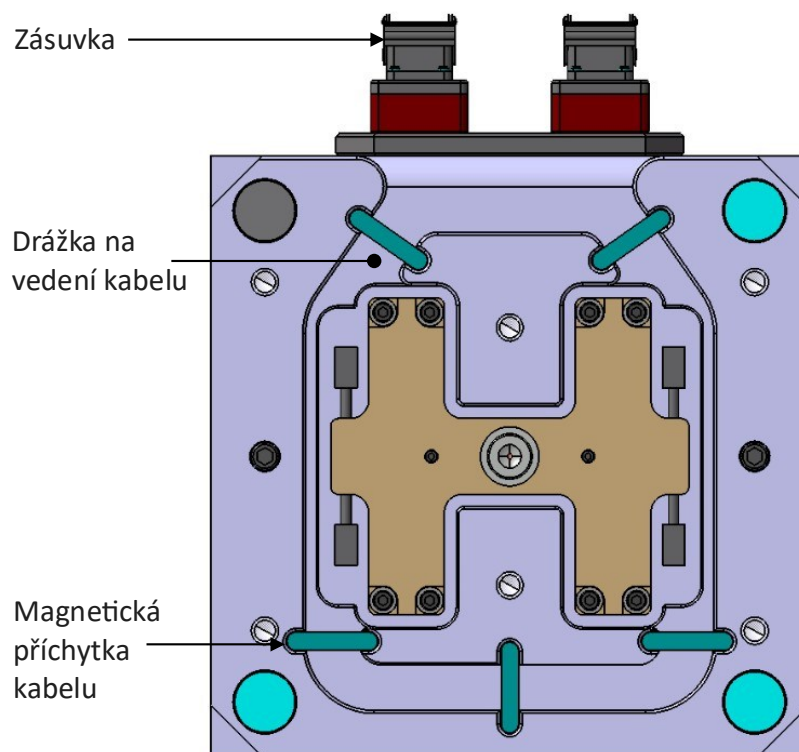
Sestava horkého bloku vycházela z rozteče výrobků v rámci formy, zpracovávaného plastového materiálu a objemu dávky taveniny na trysku. Ve formě byly použity šroubované trysky EH 4100 série 19 délky 100 mm se sestavou ústí EH 4240 RT-D. Volba velikosti ústí byla již provedena v předchozí kapitole na základě grafu (Obrázek 60). Tryska je odolná vůči opotřebení, korozi a kyselinám a povrch kanálu je vysoce kvalitní. Šroubovaná tryska tvoří s rozvodným blokem jeden celek, což zajišťuje spojení bez netěsností, a především minimalizaci kontaktních bodů s nástrojem, čímž se eliminují tepelné ztráty. Rozvodný blok je oboustranně vyhříván trubicovými topnými tělesy, které vynikají zejména flexibilitou při montáži. Tokový kanál je rozdělován různými propojovacími prvky pro homogenní a šetrné vedení taveniny, které snižují odpor při průtoku a nezvyšují smykové namáhání. Izolace od zbytku formy je provedena distančními podložkami. Díky symetrii horkého bloku je zde nutná ochrana proti otočení v podobě pozičního kolíku. Kompletní sestava horkého bloku je znázorněna na Obrázku 89.



Obrázek 89 Konfigurace rozvodného bloku tvaru H se čtyřma tryskami

(zdroj: vlastní)

Celkově se horký systém skládá ze čtyř topných hadů, čtyř trysek a jedné vtokové vložky, na jejichž zapojení je potřeba 28 pinů. Z těchto důvodů jsou na formě potřeba 2 zásuvky se 24 piny. Na kabely horkého bloku je v desce vyfrézovaný kanál, který má zaoblené veškeré hrany a rohy, díky kterým by mohlo dojít k poškození kabelu. Kabely jsou ukotveny magnetickými příchytkami, aby při montáži a demontáži nedošlo k stříhnutí kabelu deskou. Obrázek 90 vyobrazuje část formy, ve které je připravený prostor na elektromontáž.



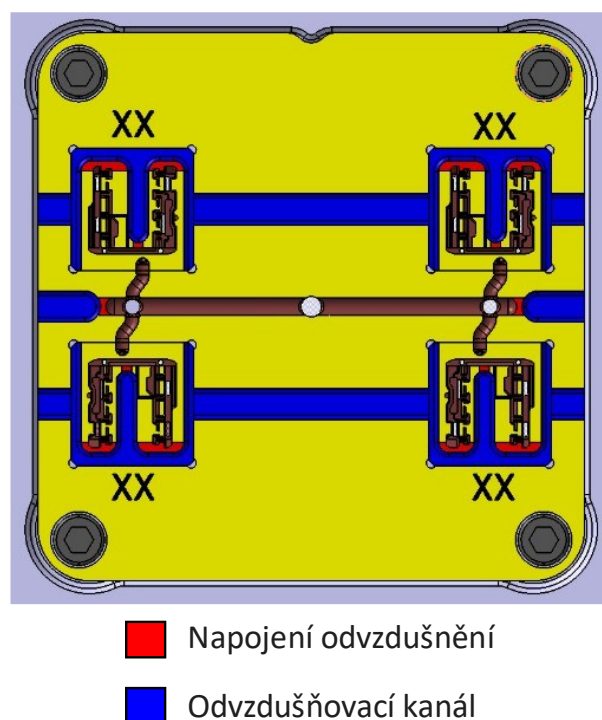
Obrázek 90 Schéma řešení horkého systému

(zdroj: vlastní)

8.4 Odvzdušnění

Otevřená forma je vyplněna vzduchem, který během rychlého pohybu stroje nemá možnost uniknout z formy. Během fáze plnění čelo polymerní taveniny před sebou vzduch vytlačuje přes rozvodné kanály až do výrobku, a proto je nutné ve formě provést efektivní odvzdušnění, které část stlačeného plynu pojme. Část vzduchu z formy odchází vůlí mezi vyhazovači nebo dělicí rovinou, ale pro vysoké vstřikovací rychlosti, a především u nových forem toto řešení není dostatečné. V případě, že je odvzdušnění neúčinné je možné vidět spálená místa, nedotečené výrobky nebo nadměrné zvyšování uzavírací síly stroje. Naopak s nadměrným odvzdušněním se pojí riziko, že polymerní tavenina do něj může zatéct a vytvořit nevzhledné přetoky.

Nejvhodnější variantou odvzdušnění je realizace přímo v dělicí rovině, která umožňuje v případě zanesení snadné čištění přímo na stroji. Klíčovými oblastmi, na které je nutné se zaměřit, jsou zejména studený vtokový kanál, oblast naproti vtokovému ústí a konec plnění. Většina odvzdušnění je integrována do tvarových desek a vložek, odkud vzduch uniká skrze dělicí rovinu (Obrázek 91). Při návrhu odvzdušňovacích kanálů bylo využito barevného značení, které bylo použito v celé práci. Hloubka odvzdušňovacího kanálu činí 0,3–0,5 mm dle potřeby, přičemž napojení na dutinu je 0,005 mm dle doporučení výrobce polymeru.



Obrázek 91 Odvzdušnění v dělicí rovině

(zdroj: vlastní)

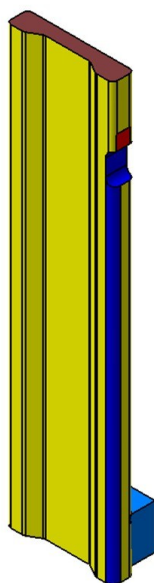
Na začátku vtokového kanálu je hlavní vyhazovač vtoku, jehož polotovár je normálie s broušenými drážkami, které také odvádějí nežádoucí vzduch (Obrázek 92).



Obrázek 92 Odvzdušňový vyhazovač vtoku

(zdroj: vlastní)

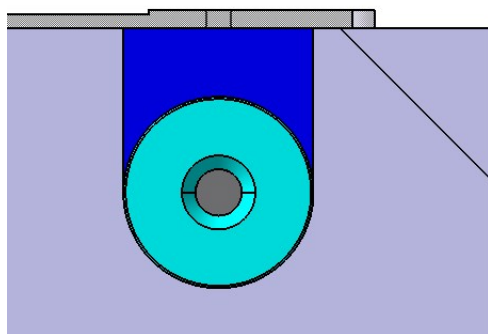
Tokovou simulací byla odhalena oblast, ve které se tvoří studený spoj. Toto místo je možné odvzdušnit díky tvarové vložce v problematickém místě, ale není možné odvést vzduch přímo do dělicí roviny. Z tohoto důvodu byl vzduch odveden nejprve uvolněným konturovým rádiusem dolů do tvarových desek, kde je frézovanou drážkou sveden do dělicí roviny (Obrázek 93). Odvzdušnění je rovněž napojeno až k tvarové dutině.



Obrázek 93 Odvzdušnění studeného spoje

(zdroj: vlastní)

Při uzavírání formy část vzduchu zůstává v prostoru vodicích pouzder a díky rychlému pohybu formy nemá kam uniknout. Za účelem eliminace zbytečného navyšování uzavírací síly byly odvzdušněny vodicí elementy skrz upínací desku na vyhazovací straně formy. (Obrázek 94).

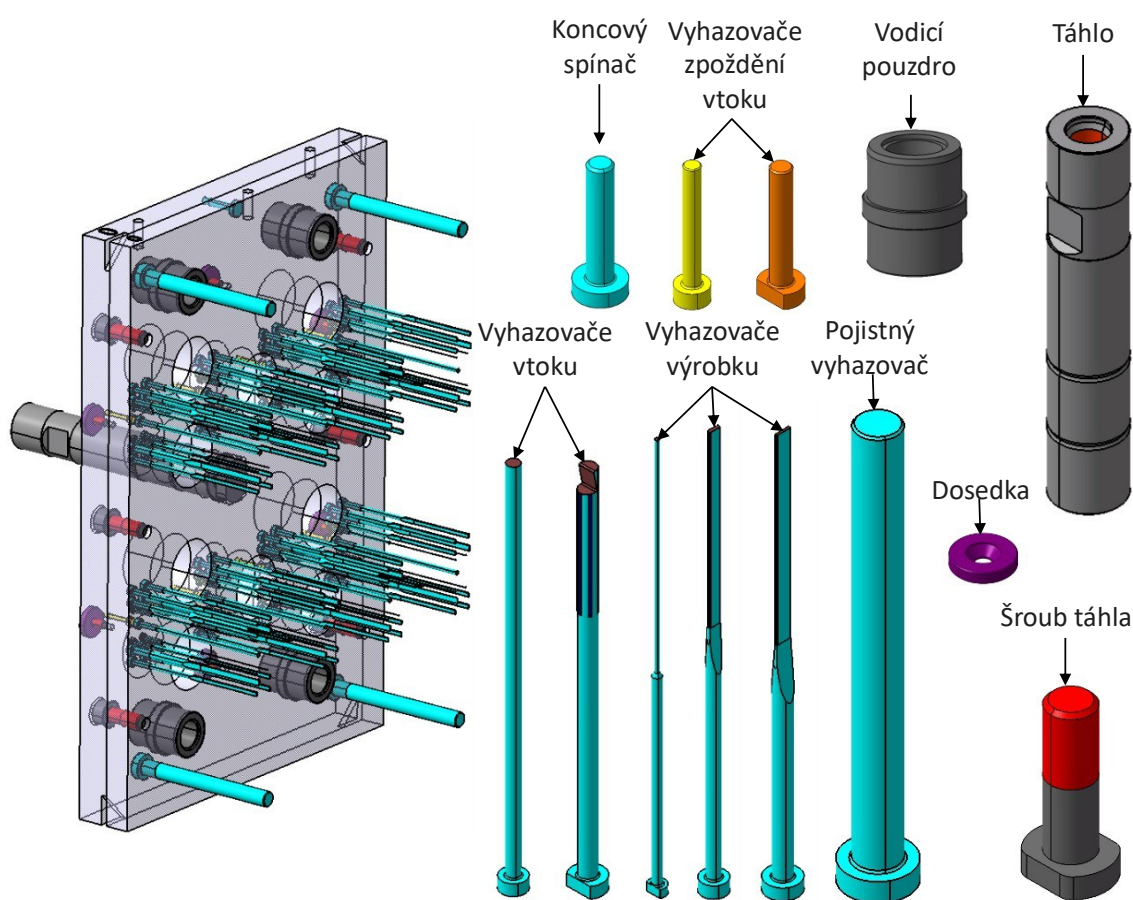


Obrázek 94 Odvzdušnění středících komponent

(zdroj: vlastní)

8.5 Vyhazovací systém

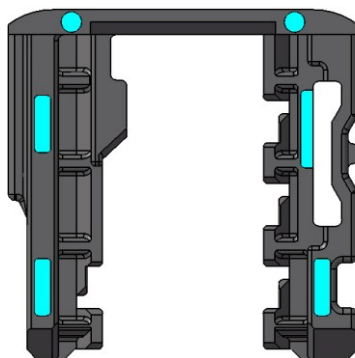
Vyhazování systém zajišťuje vyjmutí ochlazeného výrobku z dutiny formy. Je tvořen soustavou dvou desek, kde v jedné jsou vyhazovače uloženy a druhá je uvádí do pohybu díky spojení táhlem se strojem. Dosedky umístěné rovněž co nejbliž oblasti dutin snižují hlučnost chodu. Přehled všech komponent vyhazovacího paketu je na Obrázku 95. Vyhazovače jsou v maximální možné míře v deskách uvolněny, aby bylo usnadněno jejich navádění a samotný chod.



Obrázek 95 Přehled komponent vyhazovacího systému

(zdroj: vlastní)

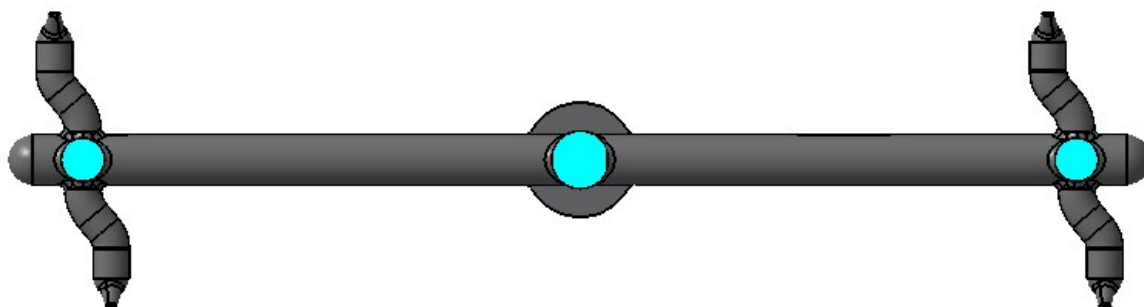
Výrobek je z formy vyjmut pomocí kombinace šesti válcových a prizmatických vyhazovačů umístěných symetricky po tvaru výrobku (Obrázek 96). Zdvih vyhazovacího systému musí být dostatečný na to, aby byl schopen odjet nad dělicí rovinu. V tomto případě byl původní zdvih 23 mm zmenšen omezovačem zdvihu na 15,8 mm, což je v případě tohoto výrobku dostačující.



Obrázek 96 Rozmístění vyhazovačů na výrobku

(zdroj: vlastní)

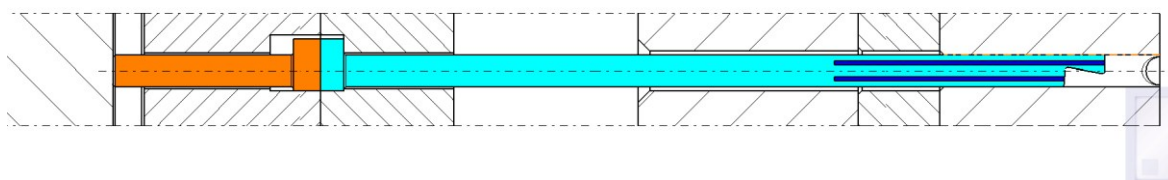
Vtokový systém je vyhozen pomocí třech válcových vyhazovačů umístěných centrálně a do míst, ve kterých dochází k větvení (Obrázek 97). Středový vyhazovač je vybaven podkosem tvaru písmene „Z“, jehož význam je přidržet vtok na vyhazovací straně do té chvíle, dokud nebude tunelový vtok úplně odštíhnutý od výrobku. Tvar „Z“ musí být otevřen do směru, ve kterém vtok padá z formy, jinak mohou nastat komplikace s odformováním. Nezbytné je všechny tvarové vyhazovače ve formě zajistit proti otáčení sražením hlavičky.



Obrázek 97 Rozmístění vyhazovačů na vtoku

(zdroj: vlastní)

V případě, že by tunelové ústí nebylo od výrobku odděleno a vyhazovač vtoku vyhazoval po malé dráze, dojde k napružení vtoku, který namísto volného pádu opustí formu nekontrolovaně vysokou rychlostí. To může vést k extrémnímu znečištění stroje, formy a celého pracovního prostředí. Aby tomuto jevu bylo zabráněno, bylo použito zpoždění všech vyhazovačů vtoku, které bylo provedeno pomocí obráceného vyhazovače s vůlí hlavičky 3 mm (Obrázek 98). Jinými slovy lze říct, že při dopředném pohybu vyhazovačů výrobku se vtok dává do pohybu až po uplynutí dráhy 3 mm. Samotný vyhazovací systém je opatřen magnetickým krytem, aby se do mezery mezi deskami v případě, že toto řešení nebude dostatečné, nedostával materiál. Další možností je zkrácení vyhazovače vtoku, přičemž nevýhodou tohoto řešení je nárůst objemu vtokového systému, a tím i technologického odpadu.

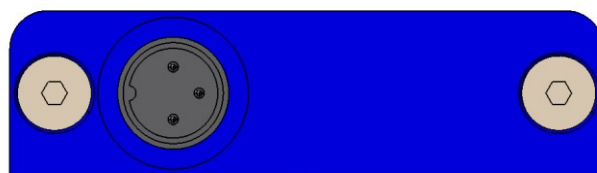


Obrázek 98 Schéma vyhazovače vtoku se zpožděním

(zdroj: vlastní)

8.5.1 Ochrana formy

Vstřikovací forma je velmi nákladný nástroj, a proto je nutné do konstrukce implementovat systémy, které zabrání jejímu poškození. Nejčastější typ kolize bývá způsoben zavřením formy před tím, než se vyhazovače vrátí do výchozí polohy. Jako ochrana formy na stroji slouží pojistné vyhazovače a třípólový koncový spínač (Obrázek 99). Koncový spínač dovolí stroji započít nový cyklus až poté, co dojde k mechanickému sepnutí spínače. Kolík, který spíná ochranu formy je součástí vyhazovacích desek.

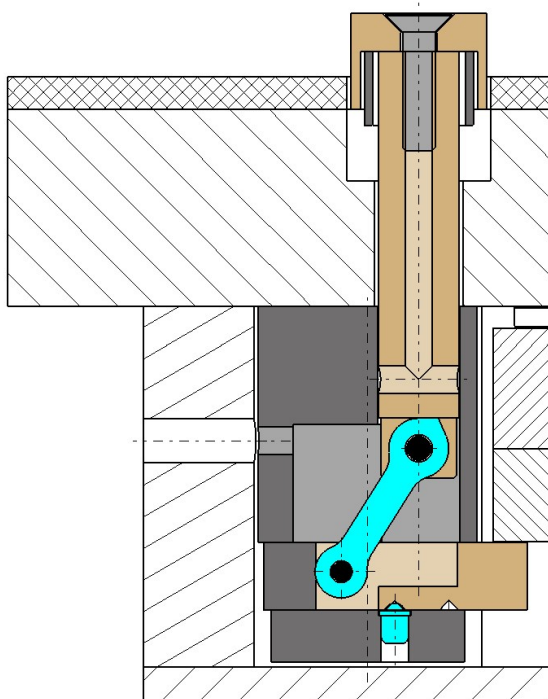


Obrázek 99 Třípólový mechanický spínač

(zdroj: vlastní)

V případě selhání nebo opotřebení spínače jsou do vyhazovacího systému umístěny čtyři pojistné vyhazovače, které končí v dělicí rovině. Při zavírání formy se vyhazovací systém odtlačí od pevné strany formy, a tím zajistí výchozí polohu vyhazovačů.

Jako ochrana formy při údržbě a přepravě slouží pojistka vyhazovacího paketu (Obrázek 100), která je normálíí E1940 od firmy Meusburger. Pokud je forma sundána ze stroje a je opatřena pouze tyčí, mohou se vyhazovače volně pohybovat. Potom je možné s vyhazovači vyjetými nad dělicí rovinou formu zavřít a poškodit. Zámek slouží jako mechanická pojistka, která se uvolní pouze stlačením části nad izolační deskou buďto manuálně nebo montáží na vstřikovací stroj.

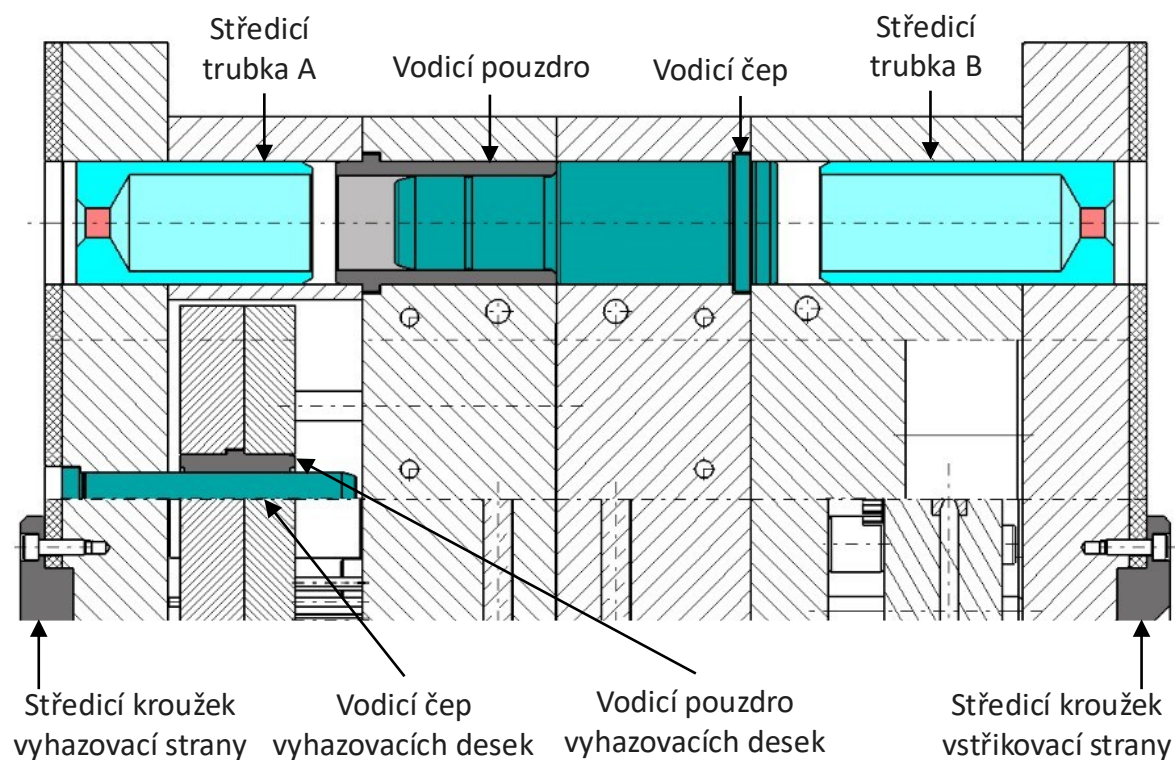


Obrázek 100 Zámek vyhazovacího systému

(zdroj: vlastní)

8.6 Vedení a středění

Dokonalé navádění jednotlivých komponent formy je velmi důležité kritérium pro zachování přesného dosednutí tvarových částí na sebe. Vedení polovin formy je zajištěno díky čtveřici vodicích čepů a pouzder, které jsou normálíí formy Meusburger. Standardně se tyto komponenty dodávají v sérii 3+1, kdy jedna dvojice komponent je menšího průměru a díky tomu znemožňuje složit formu pootočenou. Tato menší dvojice je implementována na roh formy označený „0“. Vodicí čepy jsou součástí vstřikovací strany, zatímco pouzdra jsou část vyhazovací strany formy. Zbylé desky jsou centrovány pomocí středících trubek, které jsou opatřeny závity na zjednodušení vyjímání z formy. Forma je středěná vůči stroji dvojicí středících kroužků o průměru 125 mm. Celý přehled systému vedení je v řezu detailně vyobrazen na Obrázku 101.



Obrázek 101 Vodicí a středící komponenty formy

(zdroj: vlastní)

Rovněž vyhazovací desky musí být přesně vedeny. Toto vedení je uskutečněno čtyřmi vodicími čepi, které jsou pevnou součástí upínací desky. Čepy se pohybují v samomazných pouzdrech, které jsou umístěny ve vyhazovacím systému.

Kromě standardního provedení vodících komponent bylo ve formě nainstalováno také přesné středění od firmy Agathon AG (Obrázek 102). Díky přesné axiální poloze tento systém zajišťuje, že na začátku centrování jsou v předpětí dvě řady válečků v jeden okamžik. Řešení stykových ploch valivým způsobem oproti klasickému kluznému způsobu vyniká bezúdržbovým provozem, dlouhou životností a chodem bez vůle. Na základě výpočtu, který vycházel z hmotnosti pohyblivé strany formy (193 kg), která dosedá na středění bylo vypočteno, že jsou potřeba dvě jednotky 7993.015.059.



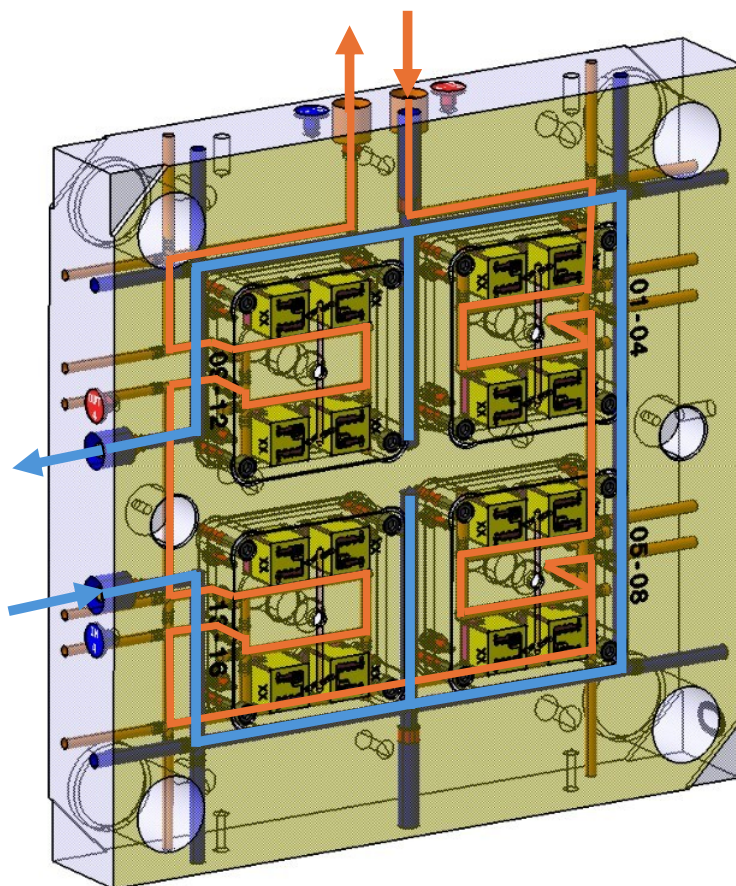
Obrázek 102 Agathon 7993.015.059

(zdroj: [45])

8.7 Temperační systém

Temperace formy udržuje rovnoměrné teplotní pole v soustavě tvarových desek. Nejprve se musí forma vyhřát na pracovní teplotu a poté teplo přivedené roztavenou polymerní taveninou plynule odvádět. Teplota formy hraje klíčovou roli na deformaci, smršťování a tvarovou stabilitu vyráběných dílů. Nedostatečné chlazení vede ke prodlužování části cyklu potřebné na ochlazení výrobku na vyhazovací teplotu, a navyšuje tak výrobní náklady. Temperační systém se skládá celkem z 5 okruhů, kterými proudí voda. Ke směřování proudu vody byly použity ucpávky a k utěsnění přechodu chladicího okruhu mezi deskami jsou využity těsnící kroužky. Všechny vstupy a výstupy jsou označeny barevnými štítky, opatřeny přípojkami a vyvedeny z formy tak, aby se nenacházely na straně obsluhy stroje. Veškeré temperační komponenty jsou normálie od firmy Meusburger nebo Knarr.

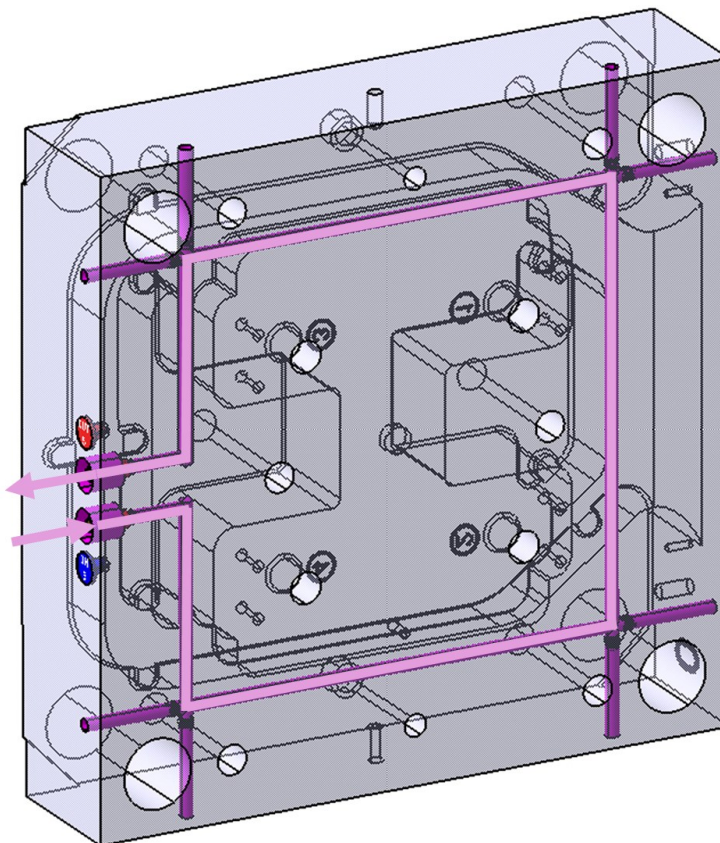
Velký důraz je kladen na zajištění dobré teplotní regulace v okolí ústí horké trysky a naproti němu. V této oblasti má polymerní tavenina tendenci se přehřívat a nadměrně prodlužovat čas potřebný na ochlazení. Okruhy na obou tvarových deskách jsou provedeny identicky. Vnitřní kanál o průměru 6 mm proudí i do tvarových desek a temperuje vnitřní část výrobků. Vnější okruh o průměru 8 mm, ve kterém jsou implementovány i přepážky o průměru 10 mm temperuje vnější část výrobku (Obrázek 103).



Obrázek 103 Provedení temperačních okruhů na straně trysky

(zdroj: vlastní)

Další vrtaný temperační okruh o průměru 8 mm (Obrázek 104) byl realizován v desce, ve které je ukotven horký blok na doporučení výrobce horkého systému. Okruh je zde umístěn, protože distanční podložky horkého bloku přicházejí do styku s touto deskou a díky vedení tepla dochází k přehřívání vstřikovací strany formy.

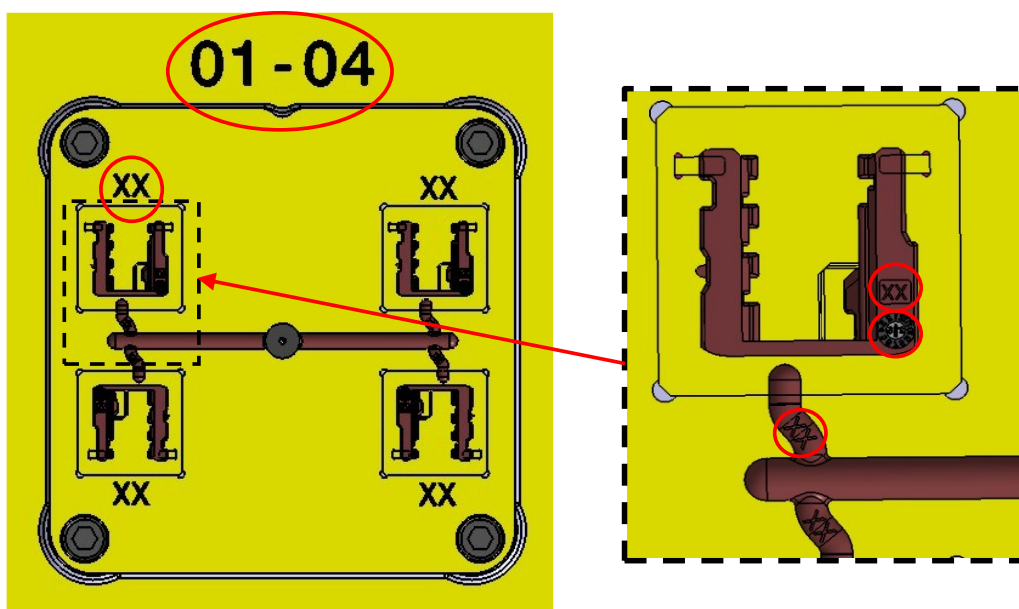


Obrázek 104 Provedení temperačních okruhů kolem horkého bloku

(zdroj: vlastní)

8.8 Značení a montáž

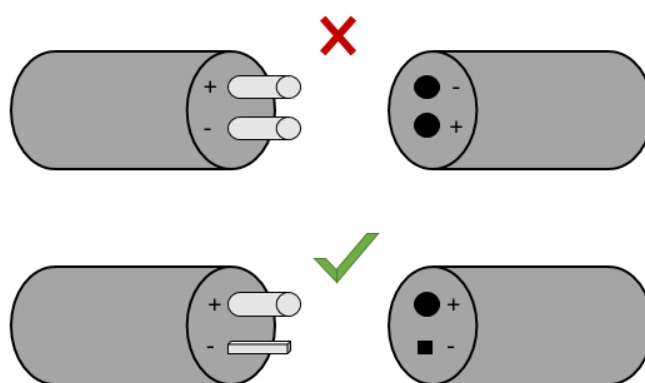
Každý díl ve formě má specifickou funkci a umístění. Z tohoto důvodu je nutné evidovat, návaznost dílu formy na výsledný výrobek, a tím rychle identifikovat, který díl je poškozený nebo minimalizovat riziko záměny při údržbě. Na hlavní tvarové desce a vkládané desce jsou značení pro optickou kontrolu při montáži a identickým číslem je označený výrobek i vtokový systém (Obrázek 105). Na výrobku je datumové razítko, které umožňuje rychlou identifikaci šarže například v případě reklamace. Označené jsou rovněž trysky, aby bylo možné jednoznačně určit jejich zapojení. Dalším způsobem značení na formě je označení „0“ na jednom z rohů formy, které určuje polohu nástroje vůči stroji a označuje stranu, z které bude k formě přistupovat její operátor.



Obrázek 105 Schéma značení formy

(zdroj: vlastní)

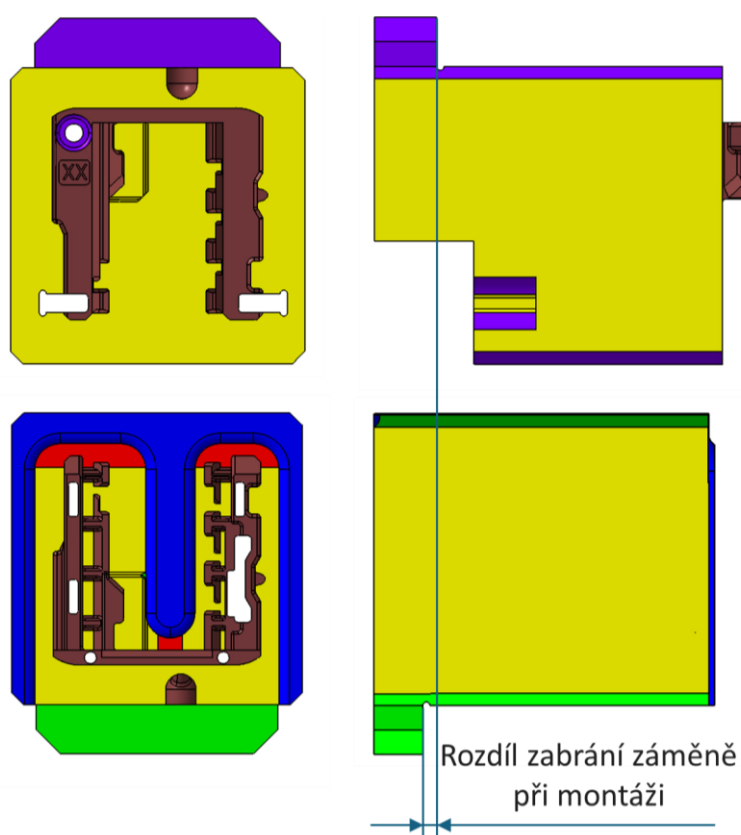
Dalším principem použitým ve vstřikovací formě je japonský způsob prevence neúmyslných chyb zvaný jako „Poka Yoke“. Tato metoda eliminuje chyby v procesech takovým způsobem, že zabraňuje možnosti jejich vzniku. Výhodou tohoto přístupu je zvýšení efektivity, bezpečnosti a snížení nákladů. Aplikace této metody u vstřikovacích forem spočívá v principu mechanického zabránění vložit díl do formy jiným způsobem než správným (Obrázek 106). To je možné zejména s použitím nesymetrických řešení, vyosení nebo rozdílných rozměrů některé z částí. Na tomto principu je postaveno i řešení vodicích čepů v sérii 3+1 zmíněné již dříve nebo drážkou proti otočení, která je součástí vkládané desky. [46]



Obrázek 106 Vizualizace „Poka Yoke“ principu

(zdroj: [46])

V konstrukčním řešení byl tento přístup implementován v případě vložek o stejném průřezu, přičemž jejich záměna by znamenala, že ke vkládané desce nebude možné přišroubovat přítlačnou desku, a formu tak nebude možné díky mechanickému přesahu zavřít. Princip je zobrazen na Obrázku 107.

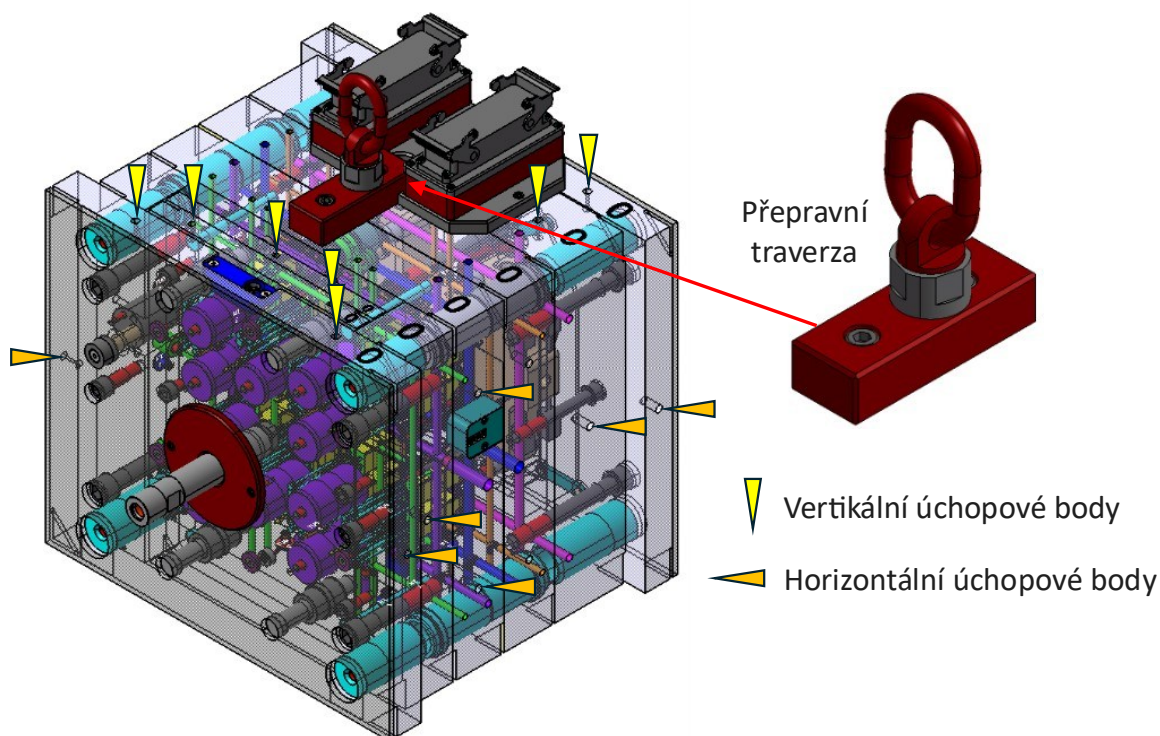


Obrázek 107 Aplikace „Poka Yoke“ principu v konstrukčním řešení

(zdroj: vlastní)

8.9 Přeprava formy

Vstřikovací forma váží často stovky kilogramů a je proto důležité dbát na bezpečnost a efektivitu, jak při její montáži, tak přepravě. Správně umístěné a dimenzované manipulační závity umožňují bezpečné zavěšení, zvedání a otáčení pomocí jeřábů nebo jiných zdvihacích zařízení. Pro manipulaci s celou sestavou formy slouží manipulační traverza vybavena výkyvným přepravním okem se závitem M10, které má maximální nosnost při zvedání kolmo na osu závitu 600 kg. Celková váha formy je 411 kg, takže velikost oka je zvolena dostatečně s ohledem na míru jeho zátěže. Oko je umístěné do těžiště, aby byla zajištěna maximální stabilita při přepravě. Kromě hlavního závitu oka jsou umístěné také další horizontální a vertikální úchopové body na horní a boční straně formy. Tyto body jsou umístěny do středu tloušťky jednotlivých desek a zajišťují snadné rozložení formy při výrobě, údržbě či demontáži komponent (Obrázek 108). Při volbě polohy úchopových bodů je důležité, aby nebyla ve formě žádná překážka, která by bránila dosednutí manipulačního oka celou plochou.

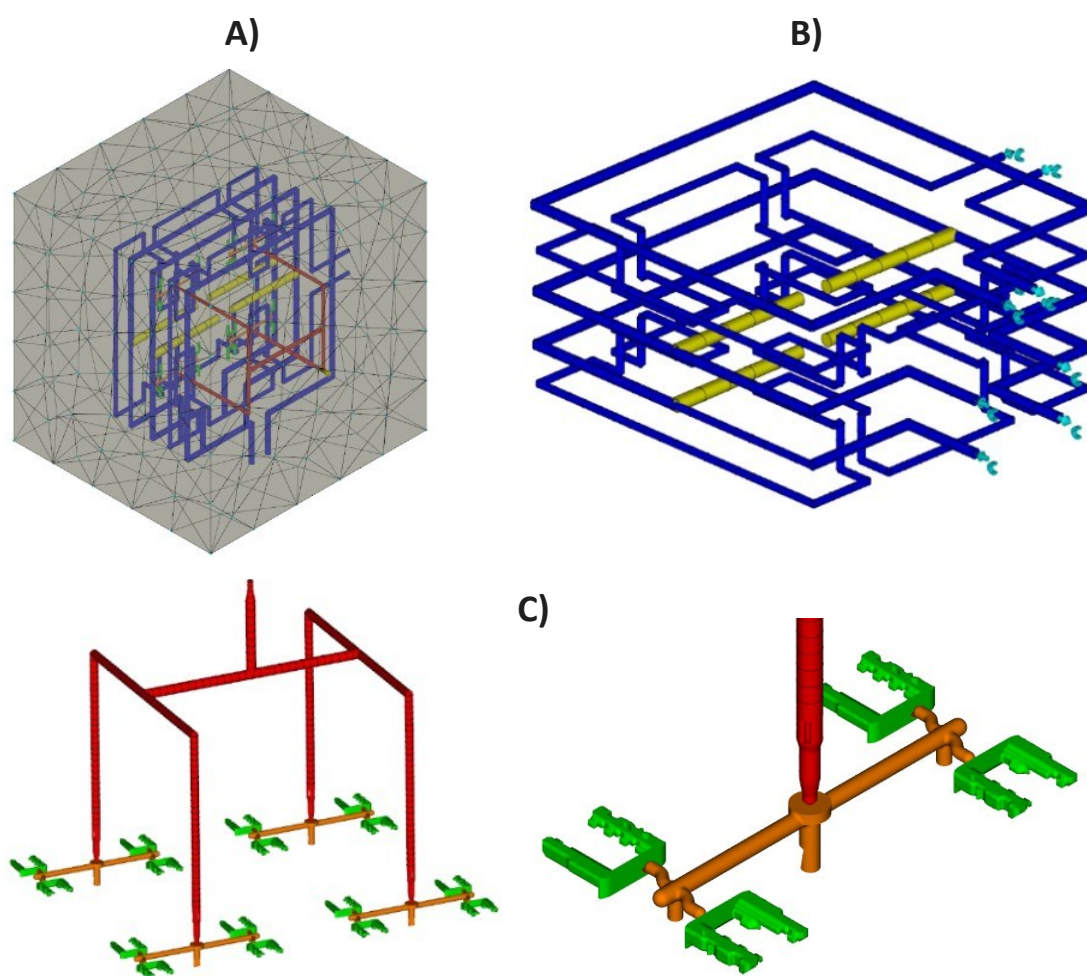


Obrázek 108 Kompletní sestava formy včetně úchopových bodů

(zdroj: vlastní)

9 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI KONSTRUKCE

Navržené konstrukční řešení bylo pomocí kompletní analýzy (chlazení + plnění + dotlak + deformace) ověřeno. Tato čtvrtá a již poslední sekvence analýz byla implementována na celou šestnáctinásobnou formu včetně rozhraní horkého bloku a studených rozvodných kanálů (Obrázek 109). Při nastavení simulace bylo zachováno rozhraní 3D modelu výrobku, vtokového systému i ústí trysky včetně torpéda s nastavením 6 čtyřstěnných elementů skrz tloušťku stěny. Tento výpočet slouží k ověření základních funkcí formy jako jsou hodnoty tlaku, uzavírací síly, velikost deformace nebo validace funkčnosti temperačních kanálů.



Obrázek 109 Síť kompletní analýzy: A) celá forma; B) temperační systém; C) vtokový systém včetně výrobků

(zdroj: vlastní)

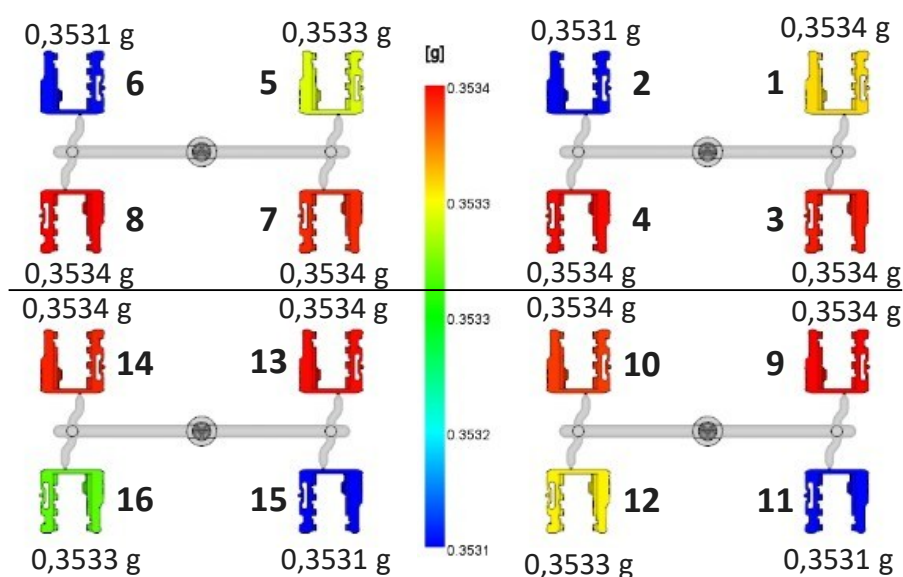
Tabulka 7 Použité parametry nastavení celkové simulace

Materiál výrobku	Zytel MT409AHS BK010
Čas plnění [s]	0,5
Teplota formy [°C]	70
Teplota taveniny [°C]	285
Bod přepnutí na dotlak [%]	99
Velikost dotlaku [%]	80
Čas chlazení [s]	20
Čas otevírání formy [s]	5
Vyhazovací teplota [°C]	220
Temperační médium	Voda
Teplota temperačního média [°C]	60
Tlak temperačního média [bar]	2,4
Materiál formy	Nástrojová ocel

(zdroj: vlastní)

9.1 Kontrola vyvážení vtokového systému

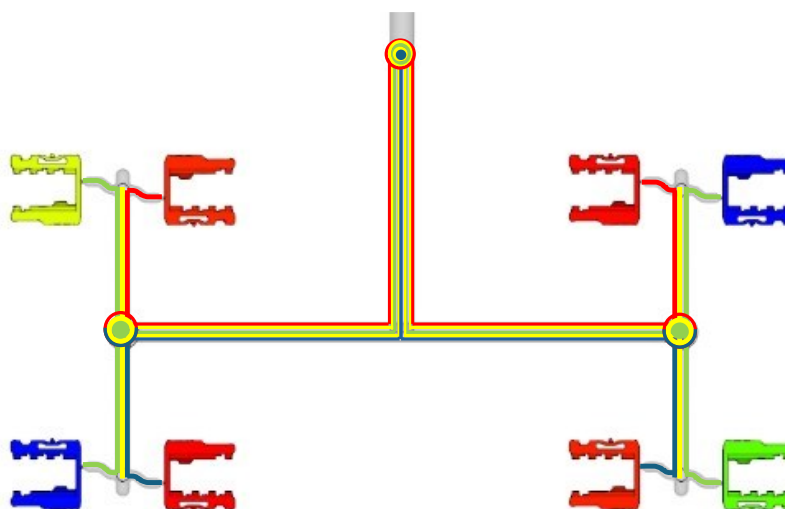
Vyvážení vtokového systému se nejnáze pozoruje na diferenci hmotnosti výrobků mezi jednotlivými dutinami. Na simulaci kompletní konstrukce šestnáctinásobné formy se jev nerovnoměrného plnění projevil přeplněním vnitřních dutin, nicméně rozdíly se pohybují v rozmezí desetitisícin gramu, což je v tomto případě zanedbatelné (Obrázek 110). Nerovnoměrné plnění studeného vtokového systému již bylo vyloučeno (jev podrobně popisuje kapitola 7.3.3), ale nerovnováha vzniká i v samotném horkém systému. Výrobci horkých bloků zaručují stejnoměrné plnění mezi tryskami v rozmezí do 5–10 %. Rozdíly jsou způsobené tím, že v horkém systému se tavenina zahřívá pouze vnějškem kanálu, čímž je gradient v průřezu nerovnoměrný a na každém větvení dochází k redistribuci teplotního pole.



Obrázek 110 Projev nevyváženého plnění

(zdroj: vlastní)

Pro pochopení nevyváženosti teplotního pole byla tavenina pro ilustraci rozvrstvena na jednotlivé části. Část taveniny označená červenou a modrou barvou je nejdelší dobu na okraji kanálu a tím pádem nejdéle vystavena působení topných těles (Obrázek 111). Díky tomu vykazuje nižší viskozitu a lépe teče. Toto vysvětlení je ovšem pouze zjednodušené, protože nevyváženost plnění silně závisí také na parametrech Cross-WLF modelu, relaxačnímu času, koeficientu přestupu tepla, tepelné vodivosti, geometrii kanálů, procesních parametrech a dalších veličinách, jejichž kombinace mohou způsobit i inverzní variantu tohoto projevu.

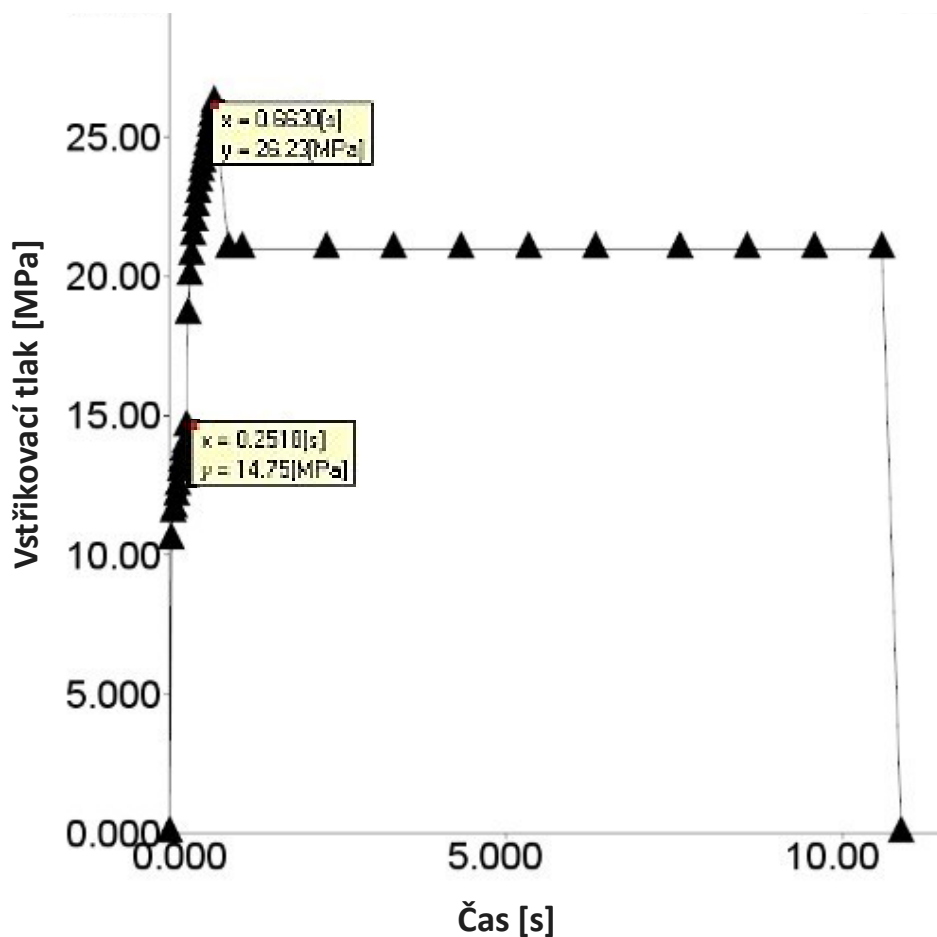


Obrázek 111 Zjednodušené objasnění původu nerovnováhy

(zdroj: vlastní)

9.2 Vstřikovací tlak

Na tlakové křivce se nevyskytuje žádná výrazná změna sklonu křivky, která by indikovala změnu gradientu tlaku ve výrobku (Obrázek 112). Křivka plnění je plynule rostoucí, což vypovídá o rovnovážném proudění uvnitř výrobku i mezi všemi šestnácti dutinami. Na křivce jsou patrné dva významné přechody, přičemž první z nich je v čase 0,2 s, kdy tavenina doteče ke vtokovému ústí a začíná plnit výrobek. Druhým významným bodem je tlakové maximum, jenž lze interpretovat způsobem, že v čase 0,65 s při maximálním dosaženém tlaku 26,23 MPa zatuhne vtokové ústí a jakékoliv další doplňování taveniny do systému se již stává neúčinným.

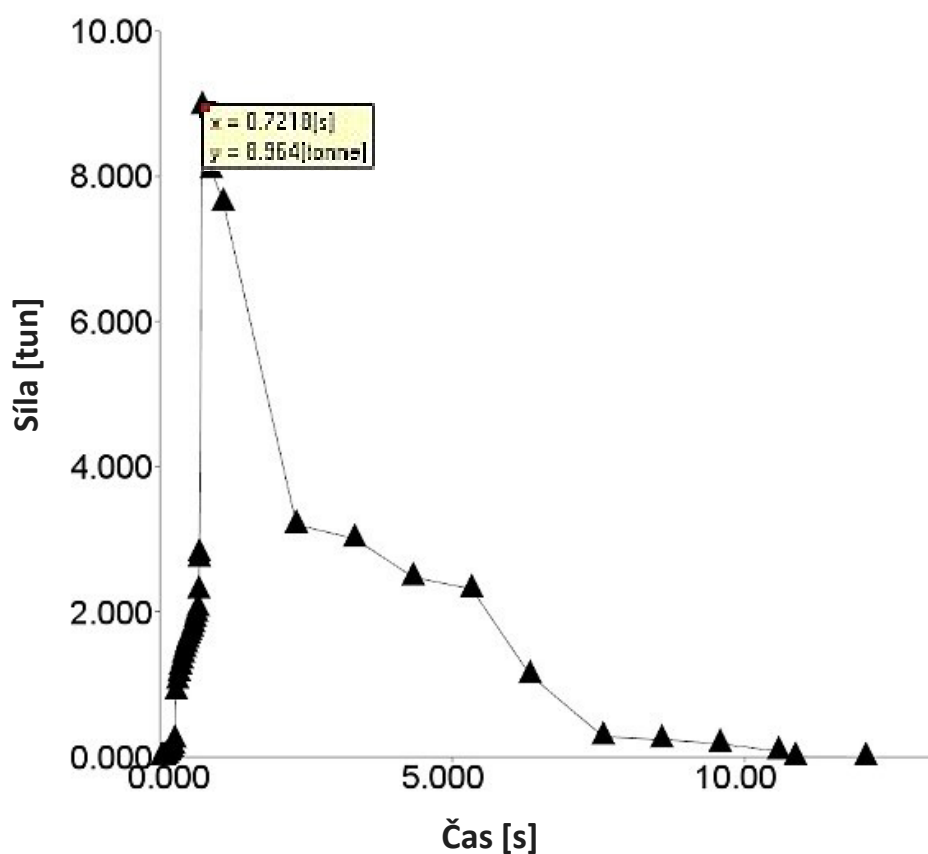


Obrázek 112 Graf závislosti vstřikovacího tlaku na čase

(zdroj: vlastní)

9.3 Uzavírací síla

Uzavírací síla je funkcí vstřikovacího tlaku a průmětu plochy všech vyráběných dílů do dělicí roviny. Při návrhu stroje bude celková hodnota uzavírací síly dosahující 9 tun (Obrázek 113) zahrnuta, přičemž potřebná síla by neměla přesahovat 80 % kapacity stroje, zbylých 20 % je ponecháno jako bezpečnost kvůli zvyšování uzavírací síly na základě použitých předpětí v konstrukci formy.

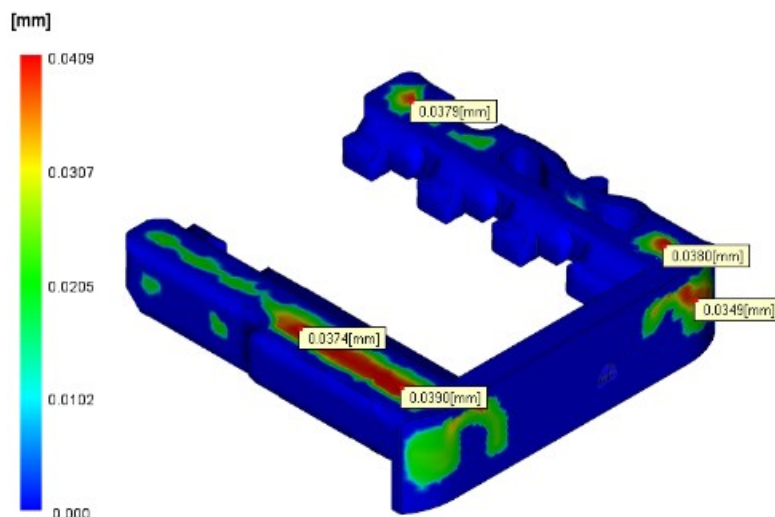


Obrázek 113 Graf závislosti uzavírací síly na čase

(zdroj: vlastní)

9.4 Propadliny

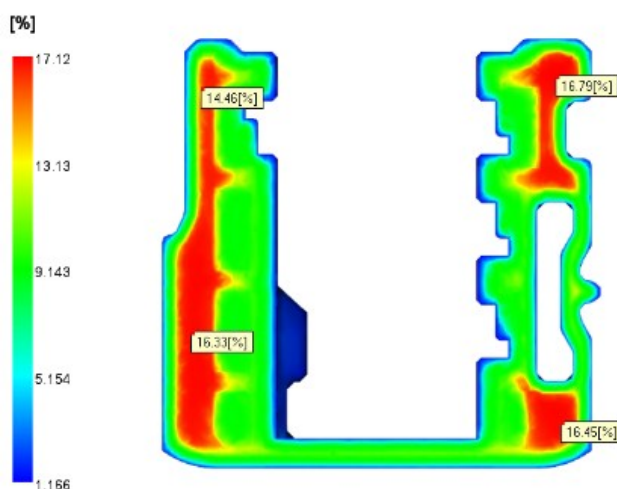
Propadliny na výrobku vznikají v důsledku nerovnoměrného tuhnutí a smršťování materiálu, kdy v tlusté stěně materiálu může vzniknout dutina, která se na výrobku projeví propadlým povrchem. Nerovnoměrná tloušťka stěn a ostré přechody, kterými je tento díl typický způsobují vznik propadlin dosahujících až 0,04 mm (Obrázek 114).



Obrázek 114 Propadliny na výrobku

(zdroj: vlastní)

Vznik propadlin charakterizuje objemové smrštění. Na výrobku jsou kritické oblasti tlustostěnné základny ramen bez otvoru a konec plnění ramena s otvorem, kde je dosahováno hodnot objemového smrštění až 17 % (Obrázek 115).

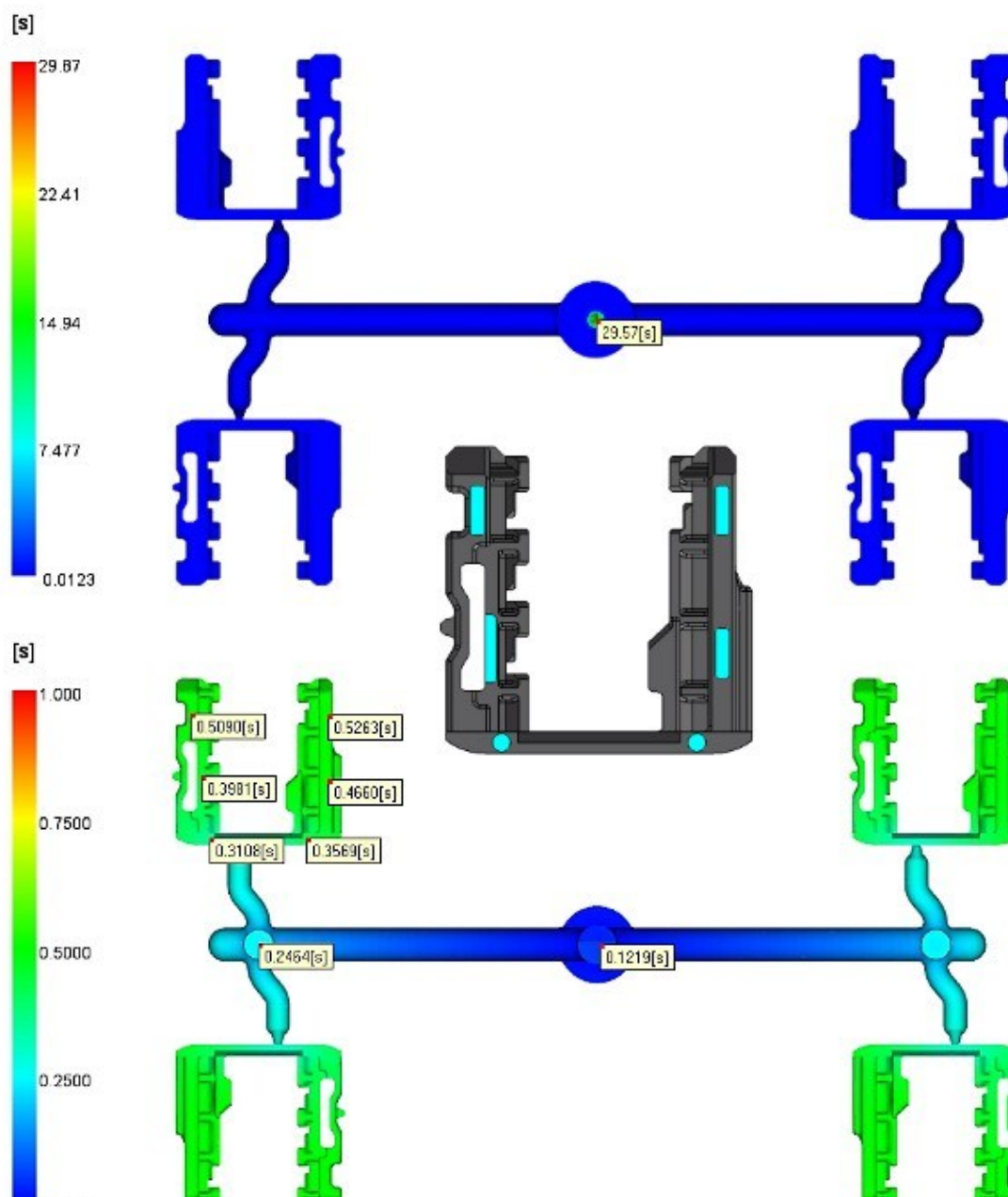


Obrázek 115 Objemové smrštění (řez dílem)

(zdroj: vlastní)

9.5 Čas pro dosažení vyhazovací teploty

Výsledek určující čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty je možné optimalizovat, čímž se významně ovlivní čas cyklu. Byla detailně prověřena místa, do kterých se opírají vyhazovače. Celkový čas 30 s, který byl simulací vyhodnocen jako potřebný lze zkrátit, protože oblast, která enormně prodlužuje tento čas je ústí horké trysky (Obrázek 116).

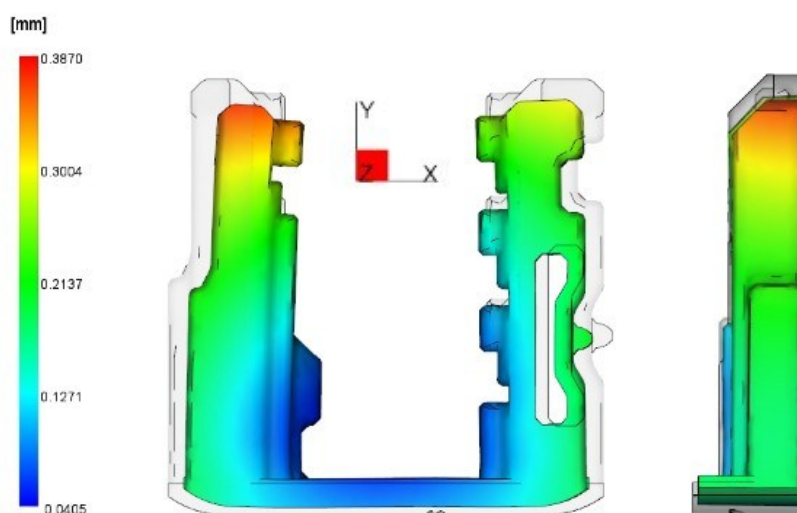


Obrázek 116 Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty

(zdroj: vlastní)

9.6 Deformace

Tento výsledek definuje charakter deformace určený rozdílem smrštěním, orientací makromolekul a rozdílem ve způsobu ochlazování. Po identifikaci stěžejní příčiny deformace je možné přijmout konkrétní opatření k jejímu omezení. Na Obrázku 117 je deformace výrobku pro ilustraci zvětšená 4x. Hodnota deformace se týká součtu ve všech třech osách souřadného systému, přičemž maximální hodnota dosahuje až 0,39 mm. Obecně v problematice konstrukce forem mají volné konce, které jsou v tomto případě obě ramena, větší tendence k deformování. Vektor posunutí pro jednotlivé osy je (0,30; 0,29; 0,08) mm. Při smršťování se materiál stahuje k nejobjemnější části, tedy k části, která chladne nejpozději. Při detailní analýze je vliv chladnutí tlustostěnné oblasti v ramenu bez otvoru klíčový pro výslednou deformaci dílu.

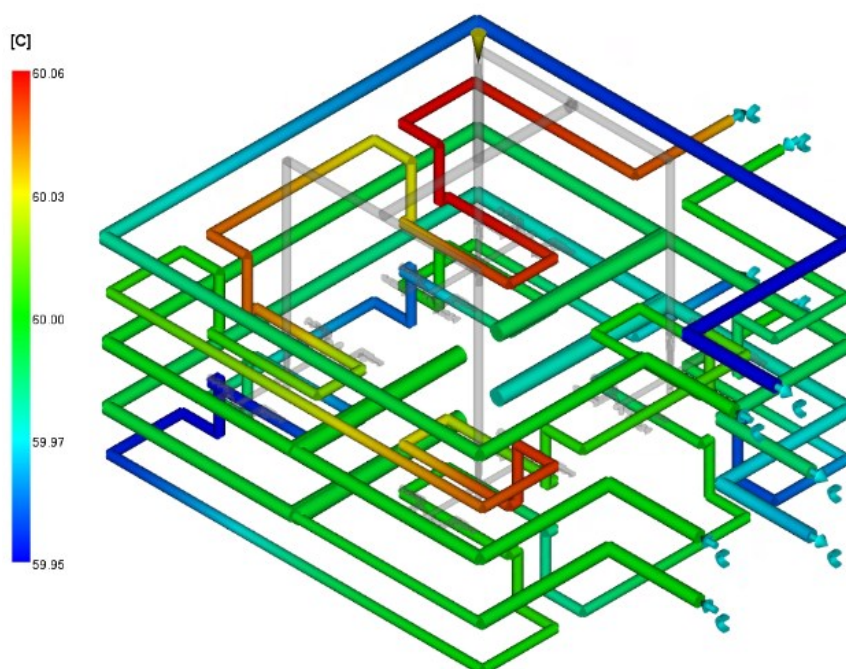


Obrázek 117 Celková deformace v měřítku 4:1

(zdroj: vlastní)

9.7 Teplota temperačního média

Výsledek teploty temperačního média popisuje jeho teplotu uvnitř chladicího okruhu. Rozdíl mezi vstupem a výstupem okruhu by neměl přesáhnout 3 °C. Tato podmínka byla s rezervou splněna pro všechny okruhy (Obrázek 118).

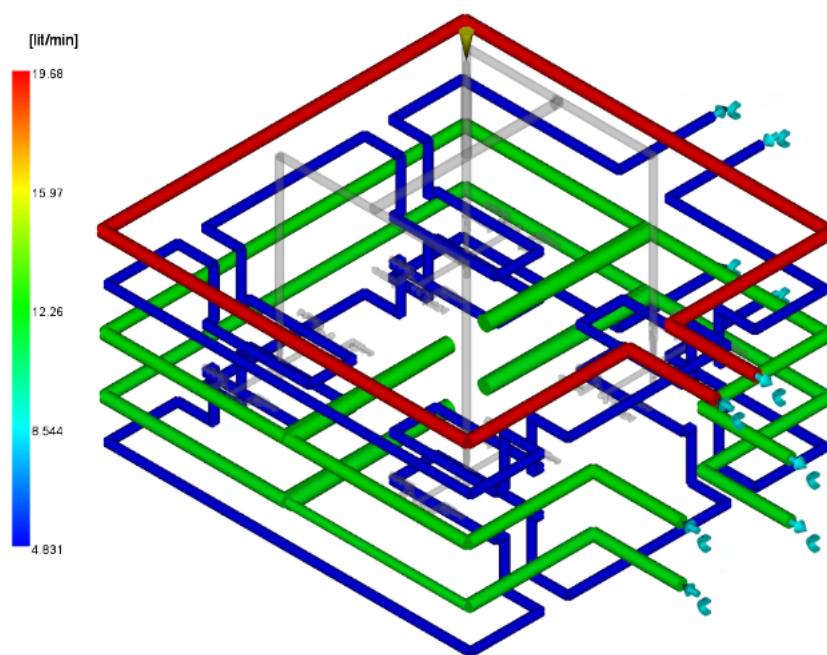


Obrázek 118 Teplota v chladicích okruzích

(zdroj: vlastní)

9.8 Průtok temperačního média

Pro zajištění efektivního odvodu tepla je nutné, aby proudění v systému bylo turbulentní. S délkou okruhů a počtem temperačních součástí (přepážky, fontány, a další) v okruhu roste také tlaková ztráta. Na obrázku je možné vidět porovnání průtoku v jednotlivých okruzích (Obrázek 119). Pro vnitřní okruhy je Reynoldsovo číslo 37 000, což demonstruje turbulentní proudění média ve všech místech. V temperačním systému se nevyskytují slepá místa s nulovým průtokem.

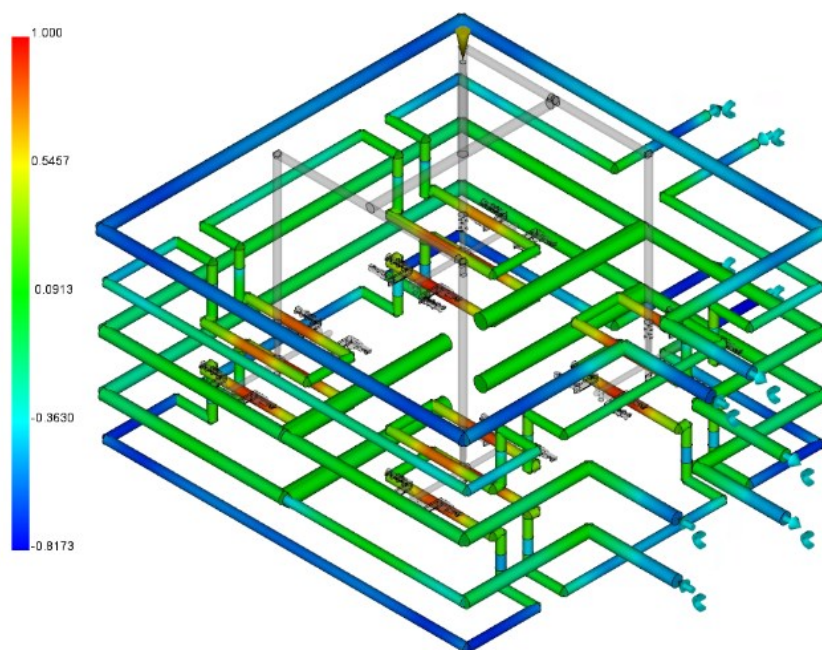


Obrázek 119 Průtok v temperačních kanálech

(zdroj: vlastní)

9.9 Účinnost temperačního média

Nejefektivnější v odvodu tepla jsou vnitřní okruhy, přičemž okruhy na vyhazovací straně jsou přibližně o 10% účinnější než identické okruhy na straně vstrikovací (Obrázek 120).



Obrázek 120 Účinnost při odvodu tepla

(zdroj: vlastní)

10 VSTŘIKOVACÍ STROJ

Volba vstřikovacího stroje je zásadní proměnnou pro výrobu kvalitních výrobků. Nevhodně zvolený stroj může vést k vadám na výrobku, nedoplněným dílům nebo zvýšené ekonomické náročnosti výroby. Základní parametry pro volbu stroje jsou:

- velikost uzavírací síly,
- vzdálenost mezi vodicími sloupky,
- kapacita plastikační jednotky.

Zvolený stroj na základě požadovaných parametrů formy a výstupů simulace je Arburg Allrounder 470 S opatřený hydraulickým ovládáním. Porovnání vybraných údajů stroje a formy uvádí Tabulka 8, zbylé údaje o stroji jsou součástí přílohy. Uzavírací síla formy nepřesahuje 80 % kapacity stroje.

Tabulka 8 Porovnání parametrů stroje s požadavky formy

Parametr	Požadovaná hodnota	Hodnota stroje
Vzdálenost mezi vodicími sloupky [mm]	446 × 396	470 × 470
Uzavírací síla [kN]	88	800
Vstřikovací tlak [bar]	262	2500
Objem dávky [g]	10,3	53
Délka formy [mm]	374,25	750
Zdvih vyhazovačů [mm]	15,8	175
Váha pohyblivé strany formy [kg]	193	760

(zdroj: vlastní; [47])

11 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Vyvážený vtokový systém a rovnoměrné plnění dutin je žádoucí a zásadní u všech vstřikovacích forem. Pokud tavenina během proudění vtokovými kanály nedoplní všechny výrobky současně, vzniká úzké procesní okno balancující mezi přetoky, spáleninami a nedoplněnými výrobky. Problém nerovnoměrného plnění je velmi komplexní a neexistuje univerzální řešení, které by dokázalo popsat všechny případové studie a jejich příčiny. V následujících kapitolách provedeno ucelené shrnutí možných příčin a praktických doporučení z konstrukčního, výrobního a technologického hlediska.

V praktické části práce byly nejprve porovnávány tři varianty kombinovaných systémů (se 2, 4 a 8 tryskami), které se lišily složitostí vtokového systému, zejména počtem rozvětvení a délkou tokových drah. Na základě vyhodnocení teploty, tlaku, objemu odpadu a dalších technických parametrů byl jako nejvhodnější zvolen systém se čtyřmi tryskami. Původní návrh vykazoval nerovnoměrné plnění jednotlivých ramen výrobku. Na symetrické čtvrtině formy byl sledován vliv různých nastavení simulace na smykový ohřev taveniny a jeho účinek na rozdílný způsob plnění výrobku. Největší rozdíl v teplotním gradientu napříč průřezem se projevil při krátkém čase plnění (0,2 s) a použití materiálu citlivého na „shear thinning“ chování (Lexan LS1). Přesto však ani tato nastavení, která překračovala maximální povolenou smykovou rychlost, neprokázala přímý vliv na způsob plnění. To lze přičítat krátké délce rozvodných kanálů s jediným větvením a velmi malým rozměrům výrobku. Nevyvážené plnění vznikající na výrobku bylo vykompenzováno vyosením vtokového ústí. Při kompletní analýze celé formy, včetně optimalizovaného vtokového systému a větvení horkého rozvodu, se rozdíly mezi jednotlivými výlisky projevily pouze v řádu deseti tisíců gramů, což lze považovat v praxi za zanedbatelné. Vnitřní dutiny se obecně plnily rychleji a mezi vnějšími dutinami vznikaly úhlopříčně konzistentní hmotnostní rozdíly. Tato nevyváženost pravděpodobně souvisí s přerozdělením teplotního pole taveniny ve větvení horkého bloku. Bylo očekáváno totožné plnění všech vnějších dutin a zároveň identické mezi vnitřními dutinami. Výsledná nevyváženost ukazovala na rychlejší plnění tří ze čtyř dutin, přičemž původ této odchylky byl objasněn pouze částečně.

Konstruktor formy by měl při návrhu formy v ideálním případě uvažovat s geometricky vyváženými vtokovými kanály. Klíčovým faktorem je vhodně umístěné vtokové ústí. Při návrhu je nutné individuálně posoudit viskozitní modely a stanovit náchylnost konkrétního vstřikovaného materiálu ke „shear thinning“ efektu. Materiály s výraznějším odstupem viskozitních křivek jsou k nerovnováze plnění vlivem smykového ohřevu citlivější. Dále je

potřeba zohlednit objem výrobku, podíl skelných vláken, tlakový spád, rozvětvenost, průřezy a délku kanálů, které jsou kritickými parametry ovlivňujícími projevy nerovnoměrného plnění u geometricky vyvážených vtokových systémů. Zejména dlouhé dráhy s četným větvením mohou být problematické. Další nestabilitu může způsobit samotná konfigurace horkého systému, kde složitější rozvětvené systémy vykazují vyšší riziko z důvodu nestejnoměrného teplotního pole. Nerovnoměrnost lze v horkém systému částečně kompenzovat použitím uzavíratelných trysek, které dávkuje pouze potřebné množství taveniny, nebo regulací teplot jednotlivých trysek. Z výrobního hlediska je vhodné navrhovat vtoková ústí jako samostatné vložky, u kterých se v případě projevu nevyváženého plnění snadno upraví rozměry (např. zvětší rozměr ústí u pomaleji plněných dutin) a zároveň provede přesné měření. Toto řešení je mnohdy dostačující, ale není ideální, protože i při současném doplnění dutin dochází k rozdílům ve vlastnostech taveniny mezi jednotlivými výrobky.

Příčin nerovnoměrného plnění může být celá řada a nelze jednoznačně určit, že hlavním faktorem je v každém případě rychlost smykové deformace. U již vyrobených forem je prvním žádoucím krokem před zásahem do formy zkontrolovat vyrobené díly vůči požadovaným rozměrovým tolerancím. Zvláštní pozornost je třeba věnovat vtokovým ústím, jejichž rozdílné rozměry mohou být důsledkem opotřebení elektrod během výroby. Některé materiály s vysokou tekutostí jsou velmi citlivé i na malé odchylky v průměru vtokového ústí. Dalším zdrojem může být vyhazovač vtoku, kde rozdíly mezi délkou vyhazovačů mohou být zdrojem nevyváženého plnění zejména pro malé výrobky. Dále je třeba ověřit, zda je odvzdušnění mezi dutinami jednotné a nezanesené. Je účelné také zkontrolovat na tuširovacím lise, zda dosedání dělicí roviny nevykazuje rozdíly, protože i to může být zdrojem nestability.

Z technologického hlediska může být příčinou i opotřebení vstřikovacího stroje, například zhoršená rovnoběžnost uzavírací jednotky a hlavních desek u starších typů strojů. V některých případech může být příčinou zpoždění sekvenčního ovládání uzavíratelných trysek, zejména kritické u malých výrobků. Je potřeba ověřit, zda je dostatečné vyztužení formy, kdy vysoké vstřikovací tlaky mohou způsobovat její lokální průhyb. Z hlediska nastavení procesních podmínek by měl být kladen důraz na sledování projevu nevyváženosti zejména při vysokých a nízkých vstřikovacích rychlostech, nižších teplotách taveniny a formy. Rozdíly v tekutosti jádra a středu kanálu mohou být pro kombinace různých nastavení a vstupních veličin zásadní.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo vypracovat literární rešerši popisující zpracovávanou problematiku, vytvořit 3D model plastového výrobku, provést a vyhodnotit tokovou analýzu a na základě jejích výstupů vytvořit konstrukční návrh formy pro tento díl, který je doplněn o výkres sestavy včetně kusovníku.

Provedená literární studie popisuje základní rozdělení polymerních materiálů a souvislost reologických veličin s chováním polymeru v dutině formy. Další část procesu byla zaměřena na technologii vstřikování v souvislosti s jednotlivými fázemi procesu a konstrukcí formy s důrazem na vtokové systémy, jejich druhy a zásady při jejich návrhu. Poslední část rešerše se věnuje využití tokových analýz v procesu vstřikování při odhalování technologických vad na vyráběném dílu.

Prvním krokem praktické části bylo provést 3D model vstřikovaného výrobku, konkrétně sekundární západky konektoru, která slouží k zabránění axiálnímu posuvu kontaktů. Na základě funkce dílu byl zvolen materiál s komerčním označením Zytel MT409AHS BK010. Po zvolení vhodného materiálu byla určena dělicí rovina, násobnost, rovněž byly zhodnoceny možnosti vtokových systémů a byla provedena první sekvence tokových analýz, která sloužila k dimenzování vtokového ústí a volbě jeho umístění.

Byly navrženy tři možnosti řešení kombinovaných systémů, a to konkrétně dvě, čtyři a osm trysek horkého systému pro plnění šestnáctinásobné formy. Druhá sekvence analýz sloužila k vzájemnému porovnání jednotlivých variant a zhodnocení teplotních a tlakových veličin. Původní navržený vtokový systém vykazoval nevyvážené plnění jednotlivých částí výrobku. K výstupům simulace byly přidány další ekonomické, ekologické a technické aspekty včetně porovnání úspory za technologický odpad oproti systému s největším objemem odpadu. Výsledkem bylo závěrečné zhodnocení, že použití horkého bloku se čtyřmi tryskami je pro danou aplikaci nejvhodnější.

Tento navržený systém se čtyřmi tryskami byl na symetrické čtvrtině formy prověřen pomocí třetí sekvence analýz. Byl zkoumán vliv smykového ohřevu taveniny na teplotní gradient v průřezu rozvodného kanálu a způsob plnění výrobku. Byly použity nastavení simulace, které jsou kritické na vliv rychlosti smykové deformace, a to zvýšení vstřikovací rychlosti, snížení teploty taveniny, snížení teploty formy a použití materiálu s větší náchylností ke „shear thinning“ chování, konkrétně se jedná o Lexan LS1 oproti původním podmínkám. Nejintenzivnější difference teploty v průřezu se projeví pro rychlost

vstřikování 0,2 s a změněný materiál. Obecně byly rozdíly teplot v průřezu největší za horkou tryskou a postupně se zmenšovaly. V některých případech se za větvením úplně eliminovaly nebo změnily charakter rozdílu. Pro nastavené procesní parametry nebyl pozorován vliv smykového ohřevu na způsob plnění, a tak byl jev nerovnoměrného plnění geometricky vyvážené vtokové soustavy ve studeném vtokovém systému vyloučen.

Bylo snahou kompenzovat nevyvážené plnění výrobku vyosením vtokového ústí blíž geometrii, která se plnila pomaleji. To se ukázalo jako efektivní a zásadní pro rovnoměrné plnění výrobku. Pro tento návrh vtokového systému byl dále upravený čas plnění a plnicí studie ukázala významný studený spoj, který bude v rámci konstrukce formy odvzdušněn.

Po získání výsledků byla pro optimalizovaný vtokový systém zkonstruována šestnáctinásobná vstřikovací forma s jednou dělicí rovinou. V maximální možné míře bylo využíváno normalizovaných součástí, které urychlují výrobu a snižují výrobní náklady. Horká část kombinovaného systému byla vytvořena pomocí online konfigurátoru výrobce Meusburger s použitím šroubovaných trysek. Odvzdušnění formy bylo provedeno pro výše zmíněný studený spoj, vodicí sloupky, vtokový systém, konec plnění a místo na výrobku naproti vtokovému ústí, které jsou z pohledu uzavírání vzduchu kritické. Výrobek je vyjmut z formy kombinací šesti válcových a prizmatických vyhazovačů. Vyhazování vtokového systému je řešeno pomocí centrálního vyhazovače a vyhazovače s menším průměrem umístěného do větvení, přičemž oba jsou zpožděny. Forma je chráněna proti kolizím při údržbě i výrobě koncovým spínačem, pojistnými vyhazovači a zámkem vyhazovacího paketu. Jednotlivé desky jsou vzájemně přesně vedeny pomocí vodicích a středících komponent, přičemž sousost polovin formy je podpořena přesným středěním od firmy Agathon AG. Temperační systém tvoří celkem pět okruhů, dva vnější, dva vnitřní a jeden dodatečný v desce horkého bloku, který udržuje rovnoměrné teplotní pole kolem stykových ploch. Všechny tvarové části jsou systematicky označeny pro snadnou trasovatelnost při poruchách a rozměrových odchylkách a zkonstruovány v rámci principů „Poka Yoke“.

Poslední sekvence analýz sloužila k ověření funkčnosti navržené konstrukce. Projevily se hmotnostní odchylky v rámci desetitisícin gramu mezi vyrobenými díly, které jsou v praxi zanedbatelné. Tato část potvrdila efektivitu temperačního systému, stanovila velikost a charakter deformace, určila místa rizika propadlin a definovala základní parametry pro volbu stroje. Na základě požadavků formy a výstupů poslední analýzy byl zvolen vstřikovací stroj Arburg Allrounder 470 S. Finální konstrukční návrh byl zakončen zhotovením výkresu sestavy s patřičnými pohledy. Sestava byla doplněna o kusovník.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOLTZENBURG, Sebastian; MASKOS, Michael a NUYKEN, Oskar. Polymer Chemistry. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-662-49277-2.
- [2] OSSWALD, Tim a RUDOLPH, Natalie. Polymer Rheology – Fundamentals and Applications. Hanser Publishers, 2015. ISBN 978-1-56990-517-3.
- [3] NICHOLSON, John W. The Chemistry of Polymers. 5th Edition. Royal Society of Chemistry, 2017. ISBN 978-1-78262-832-3.
- [4] AL ALI ALMADEED, Mariam (ed.). Polymer Science and Innovative Applications: Materials, Techniques, and Future Developments. Elsevier, 2020. ISBN 978-0-12-816808-0.
- [5] BIRON, Michael. Thermoplastics and Thermoplastic Composites. 3rd Edition. Elsevier, 2018. ISBN 978-0-08-102501-7.
- [6] HOPMANN, Christian; GRIEF, Helmut a WOLTERS, Leo. Training in Plastics Technology. 3rd Edition. Hanser Publishers, 2024. ISBN 978-1-56990-910-2.
- [7] MCKEEN, Laurence W. Permeability Properties of Plastics and Elastomers. 4th Edition. Elsevier, 2017. ISBN 978-0-323-50859-9.
- [8] BEAUMONT, John P. Runner and Gating Design Handbook – Tools for Successful Injection Molding. 3rd Edition. Hanser Publishers, 2019. ISBN 978-1-56990-590-6.
- [9] DEALY, John; READ, Daniel a LARSON, Ronald. Structure and Rheology of Molten Polymers - From Structure to Flow Behavior and Back Again. 2nd Edition. Hanser Publishers, 2018. ISBN 978-1-56990-611-8.
- [10] KULKARNI, Suhas. Robust Process Development and Scientific Molding - Theory and Practice. 2nd Edition. Hanser Publishers, 2017. ISBN 978-1-56990-586-9.
- [11] MALKIN, Alexander a ISAYEV, Avraam. Rheology - Concept, Methods, and Applications. 4th Edition. ChemTec Publishing, 2022. ISBN 978-1-927885-93-2.
- [12] CAMPUS, Plastics. Ultramid® B3ZG3 datasheet. online. In: BASF. Dostupné z: <https://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/Ultramid®+B3ZG3/BASF/20/76234fad>. [cit. 2025-01-23].
- [13] SCHILLER, Gary F. Practical Approach to Scientific Molding. 2nd Edition. Hanser Publishers, 2024. ISBN 978-1-56990-203-5.

- [14] KAZMER, David O. Injection Mold Design Engineering. 3rd Edition. Hanser Publishers, 2022. ISBN 978-1-56990-891-4.
- [15] BEAUMONT TECHNOLOGIES INC. MeltFlipper. online. In: Beaumont Technologies. Dostupné z: <https://www.beaumontinc.com/meltflipper/>. [cit. 2025-01-26].
- [16] WILCZYŃSKI, Krzysztof a NAROWSKI, Przemysław. A Strategy for Problem Solving of Filling Imbalance in Geometrically Balanced Injection Molds. online. Polymers. 2020, roč. 12, č. 4, s. 805. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym12040805>. [cit. 2025-01-25].
- [17] WILCZYŃSKI, Krzysztof; WILCZYŃSKI, Krzysztof a NAROWSKI, Przemysław. Experimental and simulation studies on filling imbalance in geometrically balanced runner systems of multi-cavity injection molds. online. Polimery. 2015, roč. 60, s. 411-421. Dostupné z: <https://doi.org/10.14314/polimery.2015.411>. [cit. 2025-01-26].
- [18] WILCZYŃSKI, Krzysztof a NAROWSKI, Przemysław. Simulation Studies on the Effect of Material Characteristics and Runners Layout Geometry on the Filling Imbalance in Geometrically Balanced Injection Molds. online. Polymers. 2019, roč. 11, č. 4. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym11040639>. [cit. 2025-02-13].
- [19] LIN, Chung-Chih; TIAN-CHENG, Wu; YU-SHIANG, Chen a BO-YU, Yang. A Semi-Analytical Method for Designing a Runner System of a Multi-Cavity Mold for Injection Molding. online. Polymers. 2022, roč. 14, č. 24. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym14245442>. [cit. 2025-02-13].
- [20] CATOEN, Bruce a REES, Herbert. Injection Mold Design Handbook. Hanser Publishers, 2021. ISBN 978-1-56990-815-0.
- [21] OSWALD, Tim A. Understanding Polymer Processing - Processes and Governing Equations. 2nd Edition. Hanser Publishers, 2017. ISBN 978-1-56990-647-7.
- [22] BRUDER, Ulf. User's Guide to Plastic. 2nd Edition. Hanser Publishers, 2019. ISBN 978-1-56990-734-4.
- [23] JAROSCHEK, Christoph. Injection Molding for Practitioners. Hanser Publishers, 2024. ISBN 978-1-56990-178-6.
- [24] WANG, Maw-Ling; CHANG, Rong-Yeu a HSU, Chia-Hsiang. Molding Simulation - Theory and Practice. 2nd Edition. Hanser Publishers, 2022. ISBN 978-1-56990-884-6.

- [25] ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: teorie a praxe. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.
- [26] BHARGAVA, Vikram. Robust Plastic Product Design – A Holistic Approach. Hanser Publishers, 2018. ISBN 978-1-56990-580-7.
- [27] OSWALD, Tim a MENGES, Georg. Material Science of Polymers for Engineers. 3rd Edition. Hanser Publishers, 2012. ISBN 978-1-56990-514-2.
- [28] CHEN, Schia-Chung a TURNG, Lih-Sheng (ed.). Advanced Injection Molding Technologies. Hanser Publishers, 2019. ISBN 978-1-56990-603-3.
- [29] PRUNER, Harry a NESCH, Wolfgang. Understanding Injection Molds. 2nd Edition. Hanser Publishers, 2020. ISBN 978-1-56990-843-3.
- [30] MEUSBURGER, Meusburger – normované komponenty pro výrobu nástrojů a forem. online. In: . Dostupné z: <https://www.meusburger.com/cs-cz>. [cit. 2025-02-02].
- [31] DANGEL, Rainer. Injection Molds for Beginners. 3rd Edition. Hanser Publishers, 2023. ISBN 978-1-56990-911-9.
- [32] UNGER, Peter. Gastrow Injection Molds - 130 Proven Designs. 4th Edition. Hanser Publishers, 2006. ISBN 978-3-446-40592-9.
- [33] AUTODESK. Gatesize Infographic Wireframe. online. In: . Dostupné z: <https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/>. [cit. 2025-02-06].
- [34] KERKSTRA, Randy a BRAMMER, Steve. Injection Molding Advanced Troubleshooting Guide. 2nd Edition. Hanser Publishers, 2021. ISBN 978-1-56990-834-1.
- [35] SVOBODA, Jan. Horké trysky jako standard. online. In: Technický týdeník. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/plasty/horke-trysky-jako-standard_43784.html. [cit. 2025-02-08].
- [36] ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů 2. Grada, 2021. ISBN 978-80-271-1294-4.
- [37] FERNANDES, Célio et. al. Advanced Polymer Simulation and Processing: Volume 1. online. Basel: MDPI – Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023. ISBN 978-3-0365-6665-8. Dostupné z: <https://directory.doabooks.org/handle/20.500.12854/98097>. [cit. 2025-02-13].
- [38] FERNANDES, Célio et. al. Advanced Polymer Simulation and Processing: Volume II. online. Basel: MDPI – Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023. ISBN 978-3-

0365-6667-2. Dostupné z: <https://directory.doabooks.org/handle/20.500.12854/98098>. [cit. 2025-02-13].

[39] SHOEMAKER, Jay (ed.). Moldflow Design Guide. Hanser Publishers, 2006. ISBN 978-3-446-40640-7.

[40] AUTODESK,. Moldflow Insight Help. online. In: . Dostupné z: <https://help.autodesk.com/view/MFIA/2024/ENU/>. [cit. 2025-02-09].

[41] CELANESE. Zytel® MT409AHS BK010. online. In: . Dostupné z: <https://materials.celanese.com/gb/products/datasheet/SI/Zytel%20MT409AHS%20BK010>. [cit. 2025-05-03].

[42] AUTODESK, INC. Autodesk Moldflow overview. In: . Dostupné z: <https://www.autodesk.com/in/products/moldflow/overview>. [cit. 2025-04-28].

[43] RAO, Natti a SCHOTT, Nick. Understanding Plastics Engineering Calculations - Hands-on Examples and Case Studies. Hanser Publishers, 2012. ISBN 978-3-446-42278-0.

[44] Polyamide 66 Plastic Pellets Zytel MT409AHS. online. In: YIFUHUI Plastic. Dostupné z: <https://yifuhuiplastic.com/polyamide-66/polyamide-66-plastic-pellets-zytel-mt409ahs>. [cit. 2025-04-05].

[45] AGATHON AG. Agathon. online. Dostupné z: <https://precision-parts.agathon.ch/en/>. [cit. 2025-04-28].

[46] LEAN SIX SIGMA. Poka-Yoke, vizualizace. online. In: . Dostupné z: <https://lean6sigma.cz/poka-yoke-vizualizace/>. [cit. 2025-04-29].

[47] ARBURG GMBH + CO KG. Allrounder S – Hydraulické vstřikovací stroje. online. In: . Dostupné z: <https://www.arburg.com/cs/cz/svet-vyroby/vstrikovaci-stroje/hydraulicke-stroje/allrounder-s/>. [cit. 2025-05-08].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Etylen.....	15
Obrázek 2 Polyetylen	15
Obrázek 3 Členění polymerů dle chování při působení teploty	16
Obrázek 4 Pyramida celosvětového zastoupení nejvýznamnějších druhů termoplastů.....	17
Obrázek 5 Pyramida celosvětového zastoupení nejvýznamnějších druhů reaktoplastů	18
Obrázek 6 Druhy řetězců: a) lineární; b) rozvětvené; c) zesíťované	18
Obrázek 7 Závislost smykové viskozity na rychlosti smykové deformace	20
Obrázek 8 Čistý ustálený smykový tok.....	21
Obrázek 9 Znázornění profilu rychlosti a z něj odvozeného profilu rychlosti smykové deformace.....	22
Obrázek 10 Toková křivka popisuje rovnováhu mezi vznikem a rozpadem zapletenin	25
Obrázek 11 Účinky teploty i smykové rychlosti na viskozitu u Ultramidu B3ZG3 (PA6-I GF15)	26
Obrázek 12 Fontánový tok.....	26
Obrázek 13 Nepravidelné podmínky pro proudění taveniny napříč kanálem	27
Obrázek 14 Rozložení teploty a viskozity v rozvodném kanálu.....	28
Obrázek 15 Vliv rozdílů ve smykové rychlosti na výslednou deformaci výrobku.....	29
Obrázek 16 Nerovnoměrné plnění se projevuje: a) nedoplněním vnějších dutin b) nedoplněním vnitřních dutin.....	29
Obrázek 17 Geometrie kanálů: a) standardní rozvržení b) s jednonásobnou korekcí c) s dvojnásobnou korekcí d) s kruhovou korekcí	30
Obrázek 18 Sled operací vstřikovacího cyklu z hlediska formy.....	32
Obrázek 19 Průběh plastikační fáze ve vstřikovací jednotce.....	33
Obrázek 20 Zobrazení tří vstřikovacích cyklů v pvT diagramu	35
Obrázek 21 Ohraničení procesního okna	36
Obrázek 22 Schématické zobrazení dvoudeskové konstrukce formy	37
Obrázek 23 Vstřikovací strana včetně plastikační jednotky	39
Obrázek 24 Schéma vyhazovací strany	40
Obrázek 25 Studený vtokový systém osminásobné formy	41
Obrázek 26 Vybrané průřezy vtokových kanálů: a) obdélníkový b) půlkruhový c) lichoběžníkový d) parabolický e) kruhový	42
Obrázek 27 Vybrané druhy vtokových ústí	43
Obrázek 28 Schématické zobrazení horkého systému	44
Obrázek 29 Standardní rozvržení kanálů v rozvodném bloku pro čtyřnásobnou formu	46

Obrázek 30 Tři možnosti nákupu HVS: horká polovina (vlevo), zapojená sestava (uprostřed), samostatné komponenty (vpravo)	47
Obrázek 31 Vývojová fáze s použitím CAE	48
Obrázek 32 Typy sítí v programu Autodesk Moldflow Insight: 1D (vlevo), 2,5D (uprostřed), 3D (vpravo)	49
Obrázek 33 Studené spoje na výrobku vznikají spojením dvou a více proudů taveniny	51
Obrázek 34 Vznik místa s uzavřeným vzduchem	51
Obrázek 35 Vady tlustostěnných oblastí: propadlina (vlevo), lunkr (vpravo)	52
Obrázek 36 Volný proud taveniny (jetting)	52
Obrázek 37 Přetoky na výrobku	53
Obrázek 38 Vstřikovaný výrobek – sekundární západka kontaktů	56
Obrázek 39 Pohled na součást v části konektoru	56
Obrázek 40 Detaily na funkční prvky geometrie výrobku	57
Obrázek 41 Znázornění dělicí roviny na výrobku	59
Obrázek 42 2.5D síť výrobku	61
Obrázek 43 Výsledky statistiky výchozí 2.5D sítě	62
Obrázek 44 Vyhodnocení kvality 2.5D sítě	62
Obrázek 45 Diagnostika tloušťky sítě	63
Obrázek 46 Analýza umístění vtokového ústí	64
Obrázek 47 Detail napojení vtoku k výrobku	65
Obrázek 48 Procesní okno	66
Obrázek 49 Návrh studené části kombinovaného systému včetně hlavních rozměrů: A) 8 trysek; B) 4 trysky; C) 2 trysky	66
Obrázek 50 3D síť výrobku	67
Obrázek 51 Analýza poměru L/D u všech navržených systémů: A) 8 trysek; B) 4 trysky; C) 2 trysky	68
Obrázek 52 Porovnání výsledků tlaku při přepnutí na dotlak: A) 8 trysek; B) 4 trysky; C) 2 trysky	70
Obrázek 53 Diagnostika nerovnoměrného plnění	71
Obrázek 54 Plnicí studie u systému se čtyřmi tryskami	71
Obrázek 55 Rozložení teploty na čele taveniny: A) 8 trysek; B) 4 trysky; C) 2 trysky	72
Obrázek 56 Detail distribuce teploty: A) 8 trysek; B) 4 trysky; C) 2 trysky	72
Obrázek 57 Podíl zamrzlé vrstvy na konci plnění: A) 8 trysek; B) 4 trysky; C) 2 trysky ...	73
Obrázek 58 Závislost úspory za plastový materiál na počtu zdvihů	75
Obrázek 59 Závislost viskozity na smykové rychlosti Zytel MT409AHS BK010	77
Obrázek 60 Graf volby velikosti vtokového ústí horké trysky	78
Obrázek 61 Síť horké trysky s výrobky	79

Obrázek 62 Projev smykové rychlosti na teplotě čela taveniny $t = 0,5$ s	80
Obrázek 63 Podélný průřez kanálu $t = 0,5$ s	80
Obrázek 64 Výsledek teploty v průřezu kanálem $t = 0,5$ s	81
Obrázek 65 Projev smykové rychlosti na teplotě čela taveniny $t = 0,2$ s	82
Obrázek 66 Volný tok taveniny z trysky	83
Obrázek 67 Podélný průřez kanálu $t = 0,2$ s	83
Obrázek 68 Výsledek teploty v průřezu kanálem $t = 0,2$ s	84
Obrázek 69 Projev smykové rychlosti na teplotě čela taveniny $t = 0,5$ s; $T_{TAV} = 275$ °C...85	
Obrázek 70 Projev smykové rychlosti na teplotě čela taveniny $t = 0,5$ s, $T_{FORMY} = 60$ °C.86	
Obrázek 71 Závislost viskozity na smykové rychlosti Lexan LS1	87
Obrázek 72 Projev smykové rychlosti na teplotě čela taveniny $t = 0,5$ s; $T_{FORMY} = 80$ °C; $T_{TAV} = 290$ °C; pro Lexan LS1	87
Obrázek 73 Výsledek teploty v průřezu kanálem $t = 0,5$ s; $T_{FORMY} = 80$ °C; $T_{TAV} = 290$ °C; pro Lexan LS1.....	88
Obrázek 74 Podélný průřez kanálu $t = 0,5$ s; $T_{FORMY} = 80$ °C; $T_{TAV} = 290$ °C; pro Lexan LS1	89
Obrázek 75 Optimalizovaný návrh vtokového systému.....	90
Obrázek 76 Plnicí studie optimalizovaného vtokového systému.....	92
Obrázek 77 Izochory při plnění	93
Obrázek 78 Tlaková situace ve vtokovém systému	93
Obrázek 79 Závislost vstřikovacího tlaku na čase	94
Obrázek 80 Lokální maxima smykové rychlosti	95
Obrázek 81 Lokalizace studeného spoje na výrobku.....	96
Obrázek 82 Tokové dráhy ve výrobku.....	96
Obrázek 83 Otevřená forma s vyhazovači v koncové poloze.....	97
Obrázek 84 Sestava tvarových vložek	98
Obrázek 85 Sestava tvarových desek: vyhazovací strana (vlevo); vstřikovací strana (vpravo)	99
Obrázek 86 Pohled do dělicí roviny: vyhazovací strana (vlevo); vstřikovací strana (vpravo)	100
Obrázek 87 Podpěrný válec	101
Obrázek 88 Celkové rozvržení vtokového systému.....	101
Obrázek 89 Konfigurace rozvodného bloku tvaru H se čtyřma tryskami.....	102
Obrázek 90 Schéma řešení horkého systému.....	103
Obrázek 91 Odvzdušnění v dělicí rovině.....	104
Obrázek 92 Odvzdušnění vyhazovač vtoku.....	104
Obrázek 93 Odvzdušnění studeného spoje	105

Obrázek 94 Odvzdušnění středících komponent	105
Obrázek 95 Přehled komponent vyhazovacího systému	106
Obrázek 96 Rozmístění vyhazovačů na výrobku	107
Obrázek 97 Rozmístění vyhazovačů na vtoku.....	107
Obrázek 98 Schéma vyhazovače vtoku se zpožděním	108
Obrázek 99 Třípólový mechanický spínač	108
Obrázek 100 Zámek vyhazovacího systému	109
Obrázek 101 Vodící a středící komponenty formy.....	110
Obrázek 102 Agathon 7993.015.059	111
Obrázek 103 Provedení temperačních okruhů na straně trysky	112
Obrázek 104 Provedení temperačních okruhů kolem horkého bloku.....	113
Obrázek 105 Schéma značení formy	114
Obrázek 106 Vizualizace „Poka Yoke“ principu	115
Obrázek 107 Aplikace „Poka Yoke“ principu v konstrukčním řešení	115
Obrázek 108 Kompletní sestava formy včetně úchopových bodů	116
Obrázek 109 Sít' kompletní analýzy: A) celá forma; B) temperační systém; C) vtokový systém včetně výrobků.....	117
Obrázek 110 Projev nevyváženého plnění.....	119
Obrázek 111 Zjednodušené objasnění původu nerovnováhy	119
Obrázek 112 Graf závislosti vstřikovacího tlaku na čase	120
Obrázek 113 Graf závislosti uzavírací síly na čase	121
Obrázek 114 Propadliny na výrobku	122
Obrázek 115 Objemové smrštění (řez dílem)	122
Obrázek 116 Čas potřebný k dosažení vyhazovací teploty	123
Obrázek 117 Celková deformace v měřítku 4:1	124
Obrázek 118 Teplota v chladících okruzích	125
Obrázek 119 Průtok v temperačních kanálech	126
Obrázek 120 Účinnost při odvodu tepla	126

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Vybrané materiálové vlastnosti.....	58
Tabulka 2 Vybrané nastavení parametrů sítě pro 3D síť jednoho výrobku	67
Tabulka 3 Použité parametry nastavení simulace	69
Tabulka 4 Porovnání kombinovaných systémů	74
Tabulka 5 Změny v nastavení simulace (výchozí nastavení Tabulka 3)	79
Tabulka 6 Porovnání původní a optimalizované geometrie vtokového systému.....	91
Tabulka 7 Použité parametry nastavení celkové simulace.....	118
Tabulka 8 Porovnání parametrů stroje s požadavky formy	127

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

%	procento
°C	stupeň Celsia
$\dot{\gamma}$	rychlost smykové deformace
θ	úhel konvergence čel
η	smyková viskozita
η_0	neneutronovská viskozita
τ^*	kritické napětí
τ_{xy}	napěťový stav taveniny ve směru x na rovině s normálovým směrem v ose y
1D	jednorozměrný
2D	dvourozměrný
2.5D	dva a půl rozměrný
3D	trojrozměrný
AI	Artificial Intelligence – umělá inteligence
A_y	plocha kolmá na osu y
A1	WLF konstanta 1
A2T	WLF konstanta 2
CAD	Computer-Aided Design – počítačem podporované konstruování
CAE	Computer-Aided Engineering – počítačem podporované inženýrství
cm ³	centimetr kubický
d	délka
D	průměr
DFA	Design for Assembly – návrh s ohledem na montáž
DFM	Design for Assembly – návrh s ohledem na výrobu
DOE	Design of Experiments – návrh experimentů
D1	logaritmická závislost při referenční teplotě

D2	teplotní koeficient
D3	tlakový koeficient
F_x	síla působící v ose x
g	gram
GF	skelné vlákno
HDPE	vysokohustotní polyetylen
HVS	horký vtokový systém
Kč	koruna česká
kg	kilogram
m	metr
m^3	metr kubický
min	minuta
mm	milimetr
n	index neneutonského chování
K	stupeň Kelvinovy stupnice
kN	kilonewton
kg	kilogram
L	délka toku
lit	litr
LDPE	nízkohustotní polyetylen
Pa	pascal
MPa	megapascal
PA	polyamid
PA6	polyamid 6
PA66	polyamid 66
PVC	polyvinylchlorid

R	poloměr vtokového ústí
s	sekunda
s ⁻¹	reciproká sekunda
SVS	studený vtokový systém
š	šířka
t	čas plnění
T	teplota
T _g	teplota skelného přechodu
T _{FORMY}	teplota formy
T _{TAV}	teplota taveniny
tun	tuna
v	měrný objem
V	objem
v _x	složka rychlosti proudění ve směru osy x
W	watt
y	výška nebo průměr vtokového kanálu

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha P I: Materiálový list Zytel® MT409AHS BK010
- Příloha P II: Technický list stroje Arburg Allrounder 470 S
- Příloha PIII: Výkresová dokumentace:
- základní technické informace;
 - pohled do pravé strany strany formy;
 - pohled do levé strany formy;
 - řez formou A-A, B-B;
 - kusovník.

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST



Zytel® MT409AHS BK010

NYLON RESIN

Common features of Zytel® nylon resin include mechanical and physical properties such as high mechanical strength, excellent balance of stiffness and toughness, good high temperature performance, good electrical and flammability properties, good abrasion and chemical resistance. In addition, Zytel® nylon resins are available in different modified and reinforced grades to create a wide range of products with tailored properties for specific processes and end-uses. Zytel® nylon resin, including most flame retardant grades, offer the ability to be coloured.

The good melt stability of Zytel® nylon resin normally enables the recycling of properly handled production waste. If recycling is not possible, we recommend, as the preferred option, incineration with energy recovery (-31kJ/g of base polymer) in appropriately equipped installations. For disposal, local regulations have to be observed.

Zytel® nylon resin typically is used in demanding applications in the automotive, furniture, domestic appliances, sporting goods and construction industry.

Zytel® MT409AHS BK010 is a Medium Toughened, high performance, heat stabilised polyamide 66 resin having good stiffness, improved knit line strength, surface appearance with outstanding processability.

Product information

Resin Identification	PA66-I	ISO 1043
Part Marking Code	>PA66-I<	ISO 11469
ISO designation	ISO 16396-PA66-I,,M1CG1HR,S14-020	

Rheological properties

	dry/cond.		
Moulding shrinkage, parallel	1.7 / -	%	ISO 294-4, 2577
Moulding shrinkage, normal	1.7 / -	%	ISO 294-4, 2577

Typical mechanical properties

	dry/cond.		
Tensile modulus	2400 / 1100	MPa	ISO 527-1/-2
Tensile stress at yield, 50mm/min	61 / 43	MPa	ISO 527-1/-2
Tensile strain at yield, 50mm/min	5 / 28	%	ISO 527-1/-2
Tensile stress at break, 50mm/min	50 / -	MPa	ISO 527-1/-2
Nominal strain at break	25 / >50	%	ISO 527-1/-2
Tensile strain at break, 50mm/min	45 / -	%	ISO 527-1/-2
Flexural modulus	2200 / 1000	MPa	ISO 178
Flexural strength	75 / 40	MPa	ISO 178
Charpy impact strength, 23 °C	N / N	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy impact strength, -30 °C	N / N	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy notched impact strength, 23 °C	17 / 40	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Charpy notched impact strength, -30 °C	13 / 12	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Charpy notched impact strength, -40 °C	12 / 12	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Izod notched impact strength, 23 °C	17 / 90	kJ/m ²	ISO 180/1A
Izod notched impact strength, -30 °C	13.0 / 15.0	kJ/m ²	ISO 180/1A
Izod notched impact strength, -40 °C	11.0 / -	kJ/m ²	ISO 180/1A
Hardness, Rockwell, M-scale	65 / 55 ^[DS]		ISO 2039-2
Hardness, Rockwell, R-scale	115 / 105 ^[DS]		ISO 2039-2
Ball indentation hardness, H 358/30	- / 60 ^[DS, 1]	MPa	ISO 2039-1
Ball indentation hardness, H 961/30	125 / -	MPa	ISO 2039-1
Poisson's ratio	0.38 / 0.45		

[DS]: Derived from similar grade

[1]: 132/30

Zytel[®] MT409AHS BK010

NYLON RESIN

Thermal properties

	dry/cond.		
Melting temperature, 10°C/min	262 / *	°C	ISO 11357-1/-3
Glass transition temperature, 10°C/min	80 / 20	°C	ISO 11357-1/-3
Temperature of deflection under load, 1.8 MPa	65 / *	°C	ISO 75-1/-2
Temperature of deflection under load, 0.45 MPa	187 / *	°C	ISO 75-1/-2
Coefficient of linear thermal expansion (CLTE), parallel	100 / *	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Coefficient of linear thermal expansion (CLTE), normal	100 / *	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Thermal conductivity, flow	0.21	W/(m K)	ISO 22007-2
RTI, electrical, 0.75mm	130	°C	UL 746B
RTI, electrical, 1.5mm	130	°C	UL 746B
RTI, electrical, 3.0mm	130	°C	UL 746B
RTI, impact, 0.75mm	65	°C	UL 746B
RTI, impact, 1.5mm	105	°C	UL 746B
RTI, impact, 3.0mm	105	°C	UL 746B
RTI, strength, 0.75mm	95	°C	UL 746B
RTI, strength, 1.5mm	105 / *	°C	UL 746B
RTI, strength, 3.0mm	110	°C	UL 746B

Flammability

	dry/cond.		
Burning Behav. at 1.5mm nom. thickn.	HB / *	class	IEC 60695-11-10
Thickness tested	1.5 / *	mm	IEC 60695-11-10
UL recognition	yes / *		UL 94
Burning Behav. at thickness h	HB / *	class	IEC 60695-11-10
Thickness tested	0.8 / *	mm	IEC 60695-11-10
UL recognition	yes / *		UL 94
Thickness tested	3 / *	mm	IEC 60695-11-20
UL recognition	yes / *		UL 94
Oxygen index	21 / *	%	ISO 4589-1/-2
Glow Wire Flammability Index, 3.0mm	700 / ^[DS]	°C	IEC 60695-2-12
FMVSS Class	B		ISO 3795 (FMVSS 302)
Burning rate, Thickness 1 mm	29	mm/min	ISO 3795 (FMVSS 302)

[DS]: Derived from similar grade

Electrical properties

	dry/cond.		
Relative permittivity, 100Hz	3.9 / 9.8		IEC 62631-2-1
Relative permittivity, 1MHz	3.7 / 4		IEC 62631-2-1
Dissipation factor, 100Hz	60 / 4350	E-4	IEC 62631-2-1
Dissipation factor, 1MHz	130 / 5100	E-4	IEC 62631-2-1
Volume resistivity	>1E13 / 9.7E9	Ohm.m	IEC 62631-3-1
Surface resistivity	* / 4.7E11	Ohm	IEC 62631-3-2
Comparative tracking index	600 / -		IEC 60112
Electric Strength, Short Time, 2mm	25 / 22	kV/mm	IEC 60243-1

Zytel® MT409AHS BK010

NYLON RESIN

Physical/Other properties

	dry/cond.		
Humidity absorption, 2mm	2.1 / *	%	Sim. to ISO 62
Water absorption, Immersion 24h	0.9 / *	%	Sim. to ISO 62
Density	1110 / -	kg/m³	ISO 1183

VDA Properties

	dry/cond.		
Weather stability delta I	2.9		DIN 53236
Weather stability delta a	0.3		DIN 53236
Weather stability delta b	1.6		DIN 53236
Weather stability delta E	2.5		DIN 53236
Weather stability grey scale	2-3		ISO 105-A02
Emission of organic compounds	10	µgC/g	VDA 277
Odour	4	class	VDA 270
Fogging, G-value (condensate)	0.1 / *	mg	ISO 6452

Injection

Drying Recommended	yes
Drying Temperature	80 °C
Drying Time, Dehumidified Dryer	2 - 4 h
Processing Moisture Content	≤0.2 %
Melt Temperature Optimum	285 °C
Min. melt temperature	270 °C
Max. melt temperature	300 °C
Screw tangential speed	≤0.3 m/s
Mold Temperature Optimum	70 °C
Min. mould temperature	50 °C
Max. mould temperature	90 °C
Hold pressure range	50 - 100 MPa
Hold pressure time	4 s/mm
Ejection temperature	220 °C

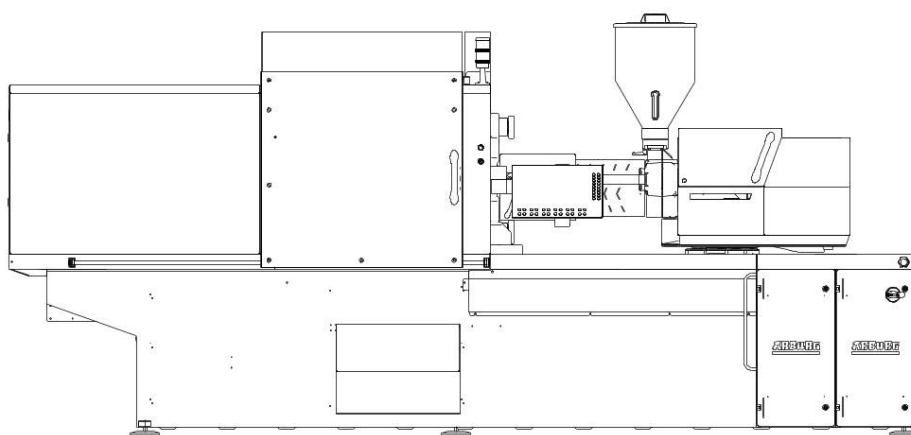
Extrusion

Drying Temperature	≤80 °C
Drying Time, Dehumidified Dryer	2 - 4 h
Processing Moisture Content	≤0.2 %
Melt Temperature Optimum	290 °C
Melt Temperature Range	280 - 300 °C

Characteristics

Processing	Injection Moulding, Extrusion
Special characteristics	High impact or impact modified, Heat stabilised or stable to heat

PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST STROJE ARBURG ALLROUNDER 470 S

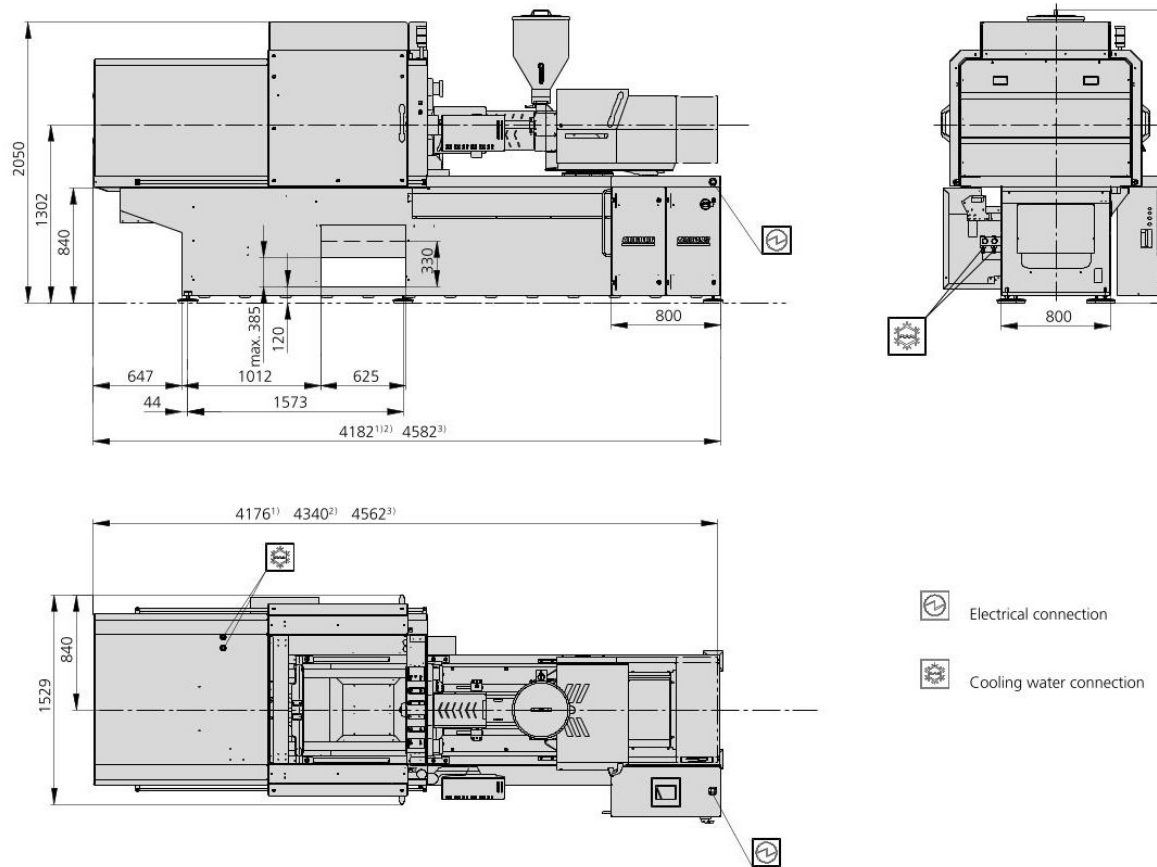


ALLROUNDER 470 S

Distance between tie bars: 470 x 470 mm
Clamping force: 800, 1000, 1100 kN
Injection unit (acc. to EUROMAP): 170, 290, 400

ARBURG

MACHINE DIMENSIONS | 470 S



- 1) injection unit 170
2) injection unit 290
3) injection unit 400

TECHNICAL DATA | 470 S

Clamping unit			470 S		
with clamping force	max. kN		800	1000	1100
Opening force stroke	max. kN mm		255 500		
Mould height, fixed variable	min. mm		250 ---		
Platen daylight fixed variable	max. mm		750 ---		
Distance between tie bars (w x h)	mm		470 x 470		
Mould mounting platens (w x h)	max. mm		637 x 637		
Weight of movable mould half	max. kg		760		
Ejector force stroke	max. kN mm		40 175		
Dry cycle time EUROMAP 2	1 pump	min. s - mm	2,3 2,1 - 329		
	2 pumps	min. s - mm	1,8 - 329		
	Accum.	min. s - mm	1,5 - 329		

Injection unit			170			290			400		
with screw diameter	mm		25	30	35	30	35	40	35	40	45
Effective screw length	L/D		24	20	17	23,3	20	17,5	23	20	18
Screw stroke	max. mm		120			150			160		
Calculated stroke volume	max. cm ³		59	85	115	106	144	188	154	201	254
Shot weight	max. g PS		54	77	105	97	132	172	141	184	232
Material throughput	max. kg/h PS		10	13,5	16	17	20,5	24,5	25	29	35
	max. kg/h PA6.6		5	7	8	8,5	10,5	12,5	12,5	15	17,5
Injection pressure	max. bar		2500	2000	1470	2500	2000	1530	2500	2000	1580
Holding pressure	max. bar		2500	2000	1470	2500	2000	1530	2500	2000	1580
Injection flow 2	1 pump	max. cm ³ /s	120	172	236	130	178	232	128	168	212
	2 pumps	max. cm ³ /s	120	172	236	130	178	232	128	168	212
	Accum.	max. cm ³ /s	216	312	424	316	430	562	492	642	814
Screw circumferential speed 2	1 pump	max. m/min	49 50	59 60	69 70	46 51	54 60	62 69	47	53	60
	2 pumps	max. m/min	49 50	59 60	69 70	46 51	54 60	62 69	47	53	60
	Accum.	max. m/min	14	17	19	20	24	27	16	19	21
Screw torque	max. Nm		210	250	290	320	380	430	480	550	610
Nozzle contact force retraction stroke	max. kN mm		50 210			60 240			60 300		
Heating capacity zones	kW		9 5			7,7 5			9,7 5		
Feed hopper	l		50			50			50		

Drive and connection			1 pump			2 pumps			Accum.		
with injection unit			170	290	400	170	290	400	170	290	400
Net weight of machine	kg		4500	4550	4750	4500	4550	4750	---		
Sound press. level Insecurity 4	dB(A)		66 3			66 3			66 3		
Oil filling	l		180			180			180	180	240
Drive power 2	max. kW		18,5			18,5	18,5	22	15		
Electrical connection 3		kW	30	27	30	30	27	34	26	24	26
	Total	A	80			80	80	100	80	63	80
	Machine	A	---			---			---		
	Heating	A	---			---			---		
Cooling water connection	max. °C		30			30			30		
	min. Δp bar		1,5 DN 25			1,5 DN 25			1,5 DN 25		

Machine type	
with EUROMAP size designation 1	Drive
470 S 800-170 290	1 2 -
470 S 1000-170 290 400	1 2 -
470 S 1100-170 290 400	- 2 Accum.

Upon request: other machine types and mould installation heights, screws, drive powers etc.

All specifications relate to the basic machine version. Deviations are possible depending on variants, process settings and material type. Depending on the drive, certain combinations, e.g. max. injection pressure and max. injection flow may be mutually exclusive.

1) Clamping force (kN) - size of injection unit = max. stroke volume (cm³) x max. injection pressure (kbar).

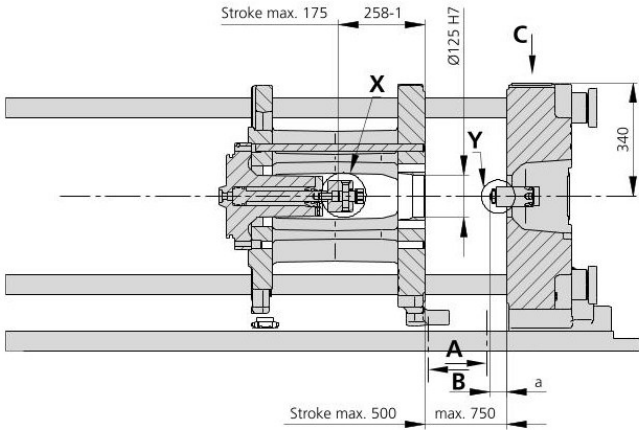
2) Specifications depend on the drive config. - 1st value applies to the lowest clamping force.

3) Specifications relate to 400 V/50 Hz.

4) Detailed info in the operating instr.

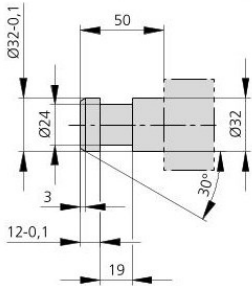
[] Specifications apply to alternative equipment.

MOULD INSTALLATION DIMENSIONS | 470 S

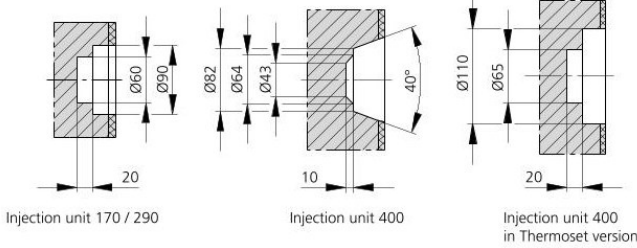


a max.	Injection unit	
	170 / 290	400
Standard	40	50
Thermoset	20	50

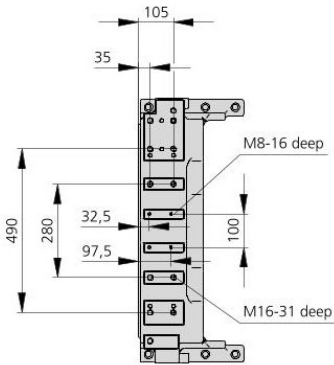
Ejector bolt | X



Bore in mould (if required) | Y

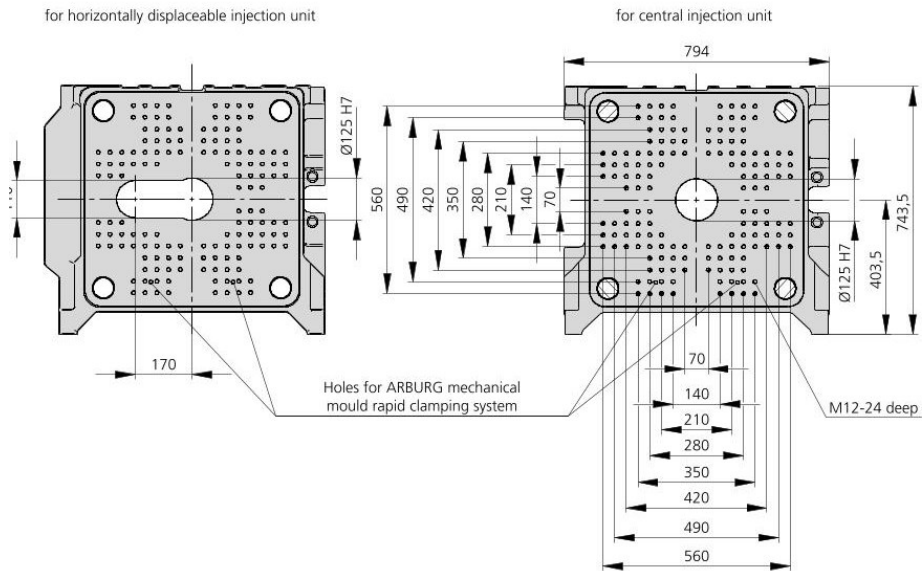


Robotic system mounting | C

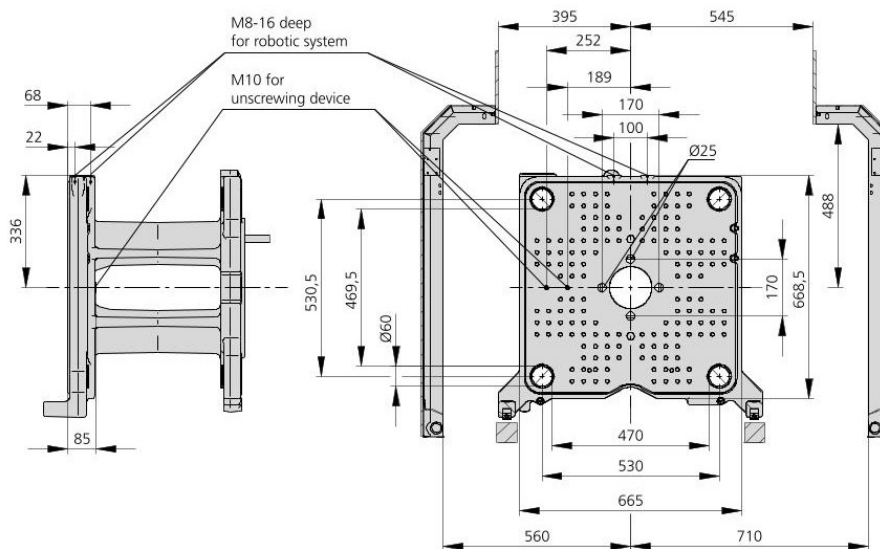


MOULD INSTALLATION DIMENSIONS | 470 S

Fixed mould mounting platen | A



Moving mould mounting platen | B



SHOT WEIGHTS | 470 S

Theoretical shot weights for the most important injection moulding materials

Injection units according to EUROMAP		170			290			400		
Screw diameter	mm	25	30	35	30	35	40	35	40	45
Polystyrene	max. g PS	54	77	105	97	132	172	141	184	232
Styrene heteropolymerizates	max. g SB	53	76	103	95	129	168	137	179	227
	max. g SAN, ABS ¹⁾	52	74	101	93	126	165	135	176	223
Cellulose acetate	max. g CA ¹⁾	61	87	119	109	148	194	158	207	262
Celluloseacetobutyrate	max. g CAB ¹⁾	56	81	110	101	138	180	147	192	243
Polymethyl methacrylate	max. g PMMA	56	80	109	100	136	178	145	190	240
Polyphenylene ether, mod.	max. g PPE	50	72	98	90	122	160	131	171	216
Polycarbonate	max. g PC	57	81	111	102	139	181	148	193	244
Polysulphone	max. g PSU	58	84	115	105	143	187	153	199	252
Polyamides	max. g PA 6.6 PA 6 ¹⁾	53	77	104	96	131	171	140	183	231
	max. g PA 6.10 PA 11 ¹⁾	50	72	98	90	122	160	131	171	216
Polyoximethylene (Polyacetal)	max. g POM	66	96	130	120	163	213	174	227	287
Polyethylene terephthalate	max. g PET	64	92	126	115	157	205	167	219	277
Polyethylene	max. g PE-LD	41	59	80	73	100	130	106	139	176
	max. g PE-HD	42	60	82	76	103	134	110	143	181
Polypropylene	max. g PP	43	62	84	77	105	137	112	146	185
Fluoropolymerides	max. g FEP, PFA, PCTFE ¹⁾	86	124	169	155	211	276	225	294	372
	max. g ETFE	76	109	148	136	185	242	196	256	324
Polyvinyl chloride	max. g PVC-U	65	94	127	117	159	208	170	222	281
	max. g PVC-P ¹⁾	60	87	118	108	147	192	157	205	260

1) average value

ARBURG GmbH + Co KG
Arthur-Hehl-Strasse
72290 Lössburg
Tel.: +49 7446 33-0
www.arburg.com
contact@arburg.com