

Návrh nástroje pro zpracování polymerních materiálů

Ondřej Dvořáček

Bakalářská práce
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Ondřej Dvořáček
Osobní číslo:	T21006
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Návrh nástroje pro zpracování polymerních materiálů

Zásady pro vypracování

- Vypracujte literární rešerši na zadané téma.
- Návrh modelu vybrané součásti.
- Návrh nástroje pro zpracování polymerních materiálů.
- Vyhodnocení a stanovení závěrů výsledků bakalářské práce.

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam doporučené literatury:

1. OSSWALD, Tim A., Lih-Sheng TURNG a Paul J. GRAMANN. Injection molding handbook. 2nd ed. Munich: Carl Hanser Publishers, c2008, xvii, 764 s. ISBN 978-1-56990-420-6
2. BEAUMONT, John P. Runner and gating design handbook: tools for successful injection molding. 2nd ed. Munich: Hanser Publishers, c2007, xvi, 308 s. ISBN 978-1-56990-421-3
3. ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: teorie a praxe. Praha: Grada Publishing, [2018], 455 s. ISBN 978-80-271-0614-1.
4. CATOEN, Bruce a Herbert REES. Injection mold design handbook. Munich: Hanser publishers, [2021], xxviii, 786 s. ISBN 978-1-56990-815-0.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lukáš Mañas, Ph.D.
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: 2. ledna 2024
Termín odevzdání bakalářské práce: 17. května 2024

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 4. března 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou 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 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou 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 bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji 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 bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá návrhem propagačního předmětu pro Fakultu technologickou Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a konstrukcí vstřikovací formy pro tento předmět. V teoretické části jsou popsány základní vlastnosti polymerních materiálů a technologie vstřikování. V praktické části je obsažen návrh 3D modelu propagačního předmětu, zpracování tokové analýzy a konstrukce vstřikovací formy.

Klíčová slova: vstřikování, vstřikovací forma, polymery, konstrukce

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the design of promotional item for Faculty of Technology of Tomas Bata University in Zlín and design of injection mold for this item. Within the theoretical part are described fundamental characteristics of polymer materials and injection molding. Practical part contains 3D model design of promotional item, mold flow analysis and design of injection mold for the designed item.

Keywords: injection molding, injection mold, polymers, design

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukáši Maňasovi Ph.D. za jeho věnovaný čas a cenné rady, které mi byly velmi nápomocné při zpracování této práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 POLYMERNÍ MATERIÁLY	11
1.1 CHARAKTERISTIKA POLYMERŮ.....	11
1.1.1 Polymerní řetězce.....	12
1.1.2 Nadmolekulární struktura.....	13
1.1.3 Charakteristické teploty	14
1.2 ÚPRAVA MATERIÁLŮ PRO VSTŘIKOVÁNÍ	14
1.2.1 Tepelné stabilizátory	14
1.2.2 Světelné stabilizátory	15
1.2.3 Maziva.....	15
1.2.4 Změkčovadla	15
1.2.5 Nadouvadla	15
1.2.6 Plniva.....	16
2 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ.....	17
2.1 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS	17
2.1.1 Vstřikování	18
2.1.2 Dotlak	19
2.1.3 Plastikace.....	19
2.1.4 Chlazení.....	20
2.1.5 Vyhození	20
2.2 VSTŘIKOVACÍ STROJ	20
2.2.1 Vstřikovací jednotka	21
2.2.2 Uzavírací jednotka	22
3 VSTŘIKOVACÍ FORMY	23
3.1 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ FOREM.....	23
3.1.2 Dvoudeskové formy	24
3.1.3 Třideskové formy	25
3.2 VTOKOVÝ SYSTÉM.....	25
3.2.1 Studený vtokový systém	25
3.3 VYHAZOVACÍ SYSTÉM.....	31
3.3.1 Vyhazovací kolík	32
3.3.2 Stírací deska	33
3.3.3 Vzduchový vyhazovač	33
3.4 TEMPERAČNÍ SYSTÉMY	34
3.5 ODVZDUŠŇOVACÍ SYSTÉMY	35
3.6 MATERIÁLY VSTŘIKOVACÍCH FOREM	36
II PRAKTICKÁ ČÁST	38

4	STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	39
5	VSTŘIKOVANÝ DÍL	40
5.1	KONSTRUKCE MODELU AUTA	40
5.1.1	Kabina	40
5.1.2	Kola	41
5.1.3	Rám auta.....	42
5.2	MATERIÁL VÝROBKU	45
6	NÁVRH VTOKOVÉ SOUSTAVY	47
6.1	VOLBA DĚLÍCÍ ROVINY	47
6.2	ANALÝZA VHODNOSTI VTOKOVÉHO ÚSTÍ	47
6.3	NÁVRH VTOKOVÉHO SYSTÉMU.....	49
6.4	VÝSLEDKY TOKOVÉ ANALÝZY	51
6.4.1	Čas plnění formy vybrané varianty	51
6.4.2	Jistota vyplnění dutiny formy vybrané varianty.....	52
6.4.3	Teplota čela taveniny u vybrané varianty	52
6.4.4	Vstříkovací tlak na konci fáze plnění dutiny.....	53
7	NÁVRH A KONSTRUKCE FORMY	54
7.1	TVAROVÉ VLOŽKY	55
7.2	VTOKOVÁ VLOŽKA.....	56
7.3	VYHAZOVACÍ SYSTÉM.....	57
7.3.1	Vodící elementy vyhazovacího systému	58
7.3.2	Přidržovače vtokového systému.....	59
7.4	ODVZDUŠNĚNÍ.....	59
7.5	TEMPERAČNÍ SYSTÉM.....	60
7.6	SESTAVA VSTŘIKOVACÍ FORMY	61
7.7	VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	62
	ZÁVĚR	64
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	65
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	67
	SEZNAM OBRÁZKŮ	68
	SEZNAM TABULEK.....	70
	SEZNAM PŘÍLOH.....	71

ÚVOD

Polymerní materiály zažily v posledních desetiletích nebývalý rozmach a v současnosti jsou již velmi těžko nahraditelné jinými alternativami. Vynikají velmi dobrými pevnostními a elastickými vlastnostmi, nízkou hmotností, a především minimálními výrobními náklady, což zásadně přispělo k jejich rozšíření v dnešním světě. Díky různorodosti jejich vlastností jsou použitelné na širokou škálu výrobků, jako jsou například potravinářské obaly, díly automobilového průmyslu, izolace, elektrospotřebiče nebo textilie.

S vývojem polymerů bylo třeba rozvíjet i způsoby jejich zpracování, přičemž v dnešní době patří mezi nejpoužívanější technologie zpracování polymerů vytlačování, válcování, vyfukování a vstřikování, kterým se bude zabírat i tato bakalářská práce. Vstřikování polymerních materiálů je vůbec nejpoužívanějším způsobem zpracování polymerů, protože umožňuje výrobu dílů značně různorodých tvarů při zachování dobrých rozměrových tolerancí a krátkého výrobního cyklu. Jeho podstata spočívá ve vstříknutí taveniny plastu do tvarové dutiny formy, v které tavenina ztuhne a výsledný výrobek je po otevření formy vyhozen.

Tato tvarová dutina v podobě tvarových vložek je umístěna ve vstřikovací formě, která uchycena k rámu stroje. Samotná forma nejenom udává tvar výslednému dílu, ale zároveň musí umožňovat odformování dílu a jeho vyhození. Vstřikovací forma je nástroj nákladný na konstrukci i výrobu, a proto je technologie vstřikování vhodná pouze pro díly o velkých výrobních sériích.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERNÍ MATERIÁLY

Polymer je látka patřící mezi makromolekulární sloučeniny skládajících se z molekul vázaných do dlouhých řetězců jednoho nebo více druhů atomů, které mají vzájemnou vazbu. Vznikají vzájemnou chemickou reakcí monomerů nazývanou polymerizace [1].

Nejčastěji se polymerní materiály dělí na dvě hlavní skupiny:

- **Plasty** – polymery, které jsou za normálních podmínek tuhé a namáhání u nich většinou způsobuje trvalou deformaci [2].
- **Elastomery** – polymery, které jsou za normálních podmínek elastické a lze je menší silou bez porušení deformovat [2].

Plasty jsou dále děleny podle jejich chování při zahřívání na:

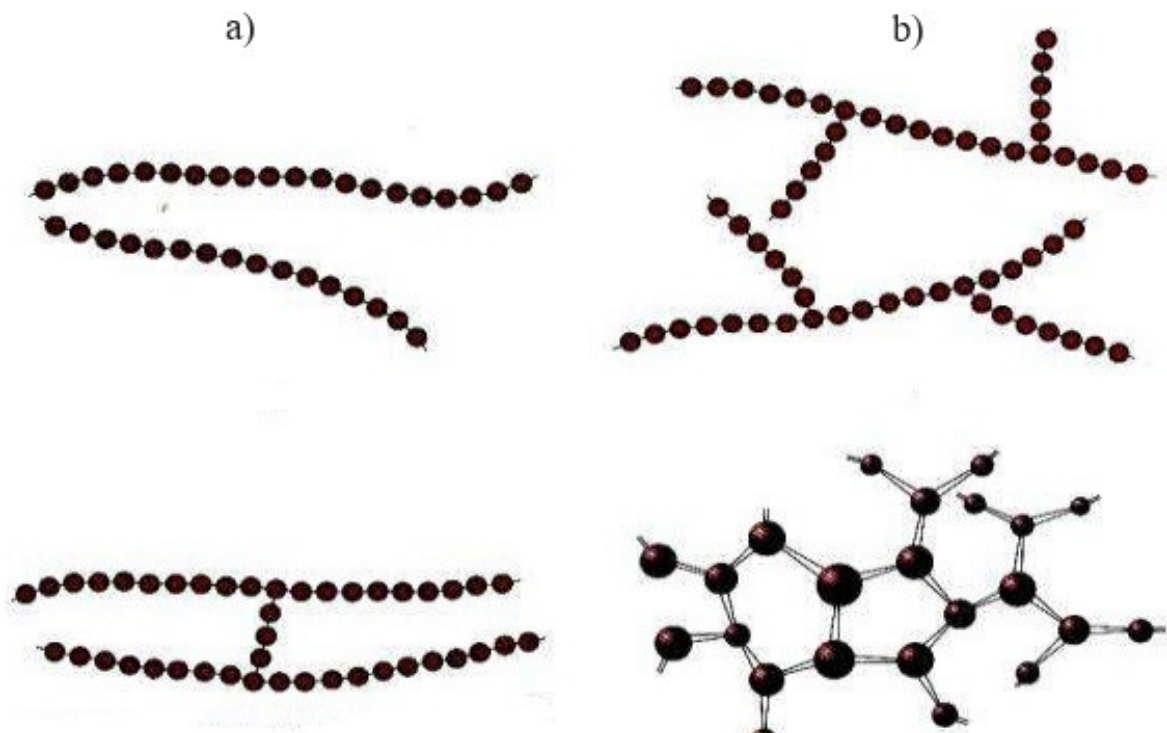
- **Termoplasty** – Polymery, které se zahřátím dostávají do plastického stavu a lze je tvářet. Ochlazením se dostávají zpátky do tuhého stavu. Při tomto cyklu nedochází k žádným chemickým změnám a proces je teoreticky nekonečně opakovatelný [2].
- **Reaktoplasty** – Polymery, které jsou tvarovatelné pouze při prvním zahřátí, jelikož u nich dochází k chemické reakci, při které jejich jednotlivé řetězce zesítují. Tento nevratný proces zvaný vytvrzování zajišťuje výrobkům vysokou chemickou a tepelnou odolnost, tvrdost a tuhost [2].

1.1 CHARAKTERISTIKA POLYMERŮ

Vlastnosti polymerních materiálů úzce souvisí s chemickým složením, tvarem řetězce, molekulární hmotností, velikostí a uspořádáním mezimolekulárních sil a nadmolekulární strukturou. Mezi rysy polymerů, které tyto charakteristiky ovlivňují patří například mechanické vlastnosti, teplota tání, viskozita taveniny, tepelné a elektrické vlastnosti, míra navlhavosti apod [2][3].

1.1.1 Polymerní řetězce

Řetězce makromolekul mohou vznikat v různých orientacích, podle kterých se dělí do několika patřičných skupin. Nejjednodušší z nich jsou řetězce *lineární*, kdy jsou jednotlivé monomery spojeny v souvislých řadách. Jsou-li k hlavním řetězcům připojeny boční řetězce, nebo-li větve, vznikají polymery s *rozvětvenými* makromolekulami. *Síťované* makromolekuly se vytváří vzájemným spojením lineárních nebo rozvětvených řetězců. *Žebříkové* řetězce se skládají z dvou lineárních řetězců s vzájemným příčným propojením. Tyto rozdílné uspořádání strukturálních jednotek makromolekul mají zásadní vliv na vlastnosti polymerů [1; 4].



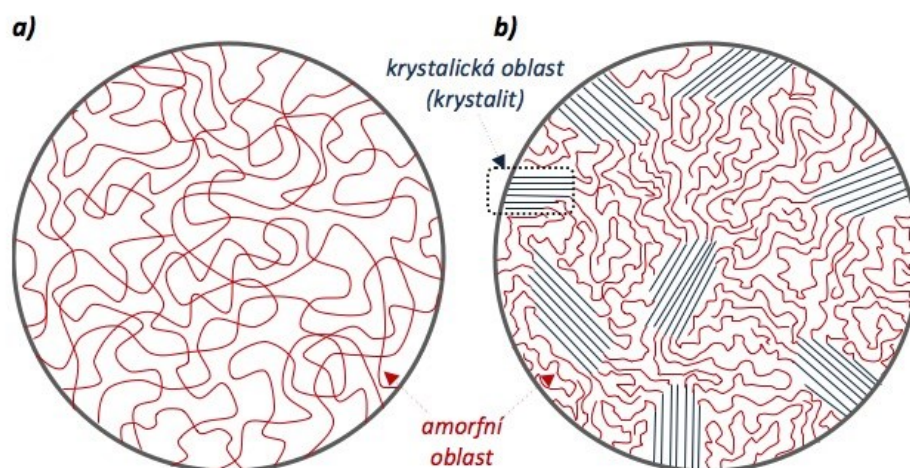
Obr. 1 Struktura řetězce polymerů [1]

a) lineární řetězec b) rozvětvený řetězec c) Síťovaný řetězec d) žebříkový řetězec

1.1.2 Nadmolekulární struktura

Polymerní materiály se liší od látek s nízkomolekulární strukturou ve své schopnosti krystalizovat. Kvůli mnoha faktorům jako jsou polydisperzita, různorodosti chemické struktury apod., nejsou makromolekulární látky schopny tvořit pravidelně uspořádanou strukturu. Proto polymery mohou krystalizovat pouze částečně nebo vůbec, dle čehož se dělí na: [5]

- **Amorfní polymery** – Makromolekulární látky, které i po přechodu z tekutého stavu do pevného stavu zůstávají amorfní, což znamená, že makromolekuly jsou nepravidelně uspořádány ve struktuře. V takovémto stavu připomínají polymery sklo, a proto se uvádí, že jsou ve skelném stavu. Amorfní polymery se vyznačují svou křehkostí, tvrdostí, vysokou pevností, modulem pružnosti a bývají zpravidla průhledné. Amorfní polymery jsou použitelné do teploty zesklnění T_g [6; 7].
- **Semikrystalické polymery** – Látky, které obsahují oblasti uspořádaných řetězců makromolekul. Tyto oblasti vykazují charakterní chování krystalů. U polymerů je však struktura vždy alespoň částečně tvořena amorfní částí. Poměru mezi krystalickou a amorfní částí se říká stupeň krystalinity a pohybuje se od 40 do 90 %. Tento poměr je ovlivněn jak strukturálními podmínkami makromolekuly, tak i podmínkami při jeho zpracování, především rychlosti ochlazování taveniny. Semikrystalické polymery jsou použitelné do teploty tání T_m [2; 7; 8].



Obr. 2 Schéma nadmolekulární struktury polymerních materiálů [2]

a) amorfní b) semikrystalické

1.1.3 Charakteristické teploty

Polymerní materiální mají díky své vysoké molekulární hmotnosti tu vlastnost, že jejich bod varu je neobyčejně vysoký a nachází se vždy nad teplotou rozkladu. Díky tomu se plasty nachází pouze ve stavu tuhém nebo kapalném. Dalším rozdílem termoplastických polymerů mezi nízkomolekulárními látkami je, že při zvyšování teploty nad teplotu skelného přechodu T_g se skupenství ihned nemění na kapalně, ale nachází se v přechodné oblasti mezi kapalným a pevným stavem. V takovém stavu je hmota poměrně malou silou deformovatelná a má elastické vlastnosti podobné kaučukům. Tento kaučukovitý stav vzniká nad T_g pouze u amorfních polymerů. Semikristalické plasty jsou v této oblasti stále pevné a houževnaté, protože pevnost jejich krystalů je pořád vysoká. U částečně krystalických polymerů se až dalším zvyšováním teploty přiblížíme teplotě T_m , kdy u nich začínají krystaly tát a látka přechází do kapalné fáze [9; 10].

1.2 ÚPRAVA MATERIÁLŮ PRO VSTŘIKOVÁNÍ

Výrobky z polymerních materiálů mají tak různorodé požadované vlastnosti, že je prakticky nemožné použít polymer v čisté formě. Proto se při vstřikování často používají polymerní směsi, které jsou složeny ze samotného polymeru a určité přísady. Před samotným procesem zpracování plastů do výsledného výrobku je nezřídka nutno použít technologických postupů, které upraví materiál do požadovaných vlastností. Tyto postupy mohou sloužit k lepší dopravě materiálu, k zajištění recyklace nebo k sušení polymeru [9; 11].

1.2.1 Tepelné stabilizátory

Slouží pro zlepšení tepelné odolnosti a pro zpomalení degradace plastů vlivem zvýšených teplot při jejich zpracování. Při degradaci probíhá proces autooxidace (oxidace polymeru kyslíkem), štěpení makromolekul nebo například hydrochloridace (odštěpování chlorovodíku z makromolekul polymerů). Tyto degradační jevy vedou k zhoršení jejich mechanických a technologických vlastností, stejně jako ke změně jejich vlastností vzhledových. Nutnost použití stabilizátorů je mnohdy ovlivněna i dalšími přísadami, zejména plnivými a změkčovadly, jelikož mnohdy urychlují degradační procesy [2].

1.2.2 Světelné stabilizátory

Světelné stabilizátory jsou používány především pro ty polymerní součásti, které jsou vystaveny přímému slunečnímu záření. Vůbec nejškodlivějším je pro polymery UV záření, které vyvolává vznik volných radikálů. Tyto volné radikály následně vyvolávají degradační procesy, jako jsou například štěpení nebo síťování makromolekul [2; 12].

1.2.3 Maziva

Usnadňují zpracování polymerů, ale mají také pozitivní vliv na jejich vlastnosti, jako například vzhled, tepelnou a světelnou stabilitu, nebo odolnost vůči povětrnostním podmínkám. Podle rozpustnosti maziv v polymeru se dělí na maziva s vnějším účinkem a vnitřním účinkem. Maziva s vnějším účinkem vystupují díky své nerozpustnosti na povrch, kde vytváří na polymeru vrstvu usnadňující vyjmutí výrobku z formy. Maziva s vnitřním účinkem se v polymeru dobře rozpouští a zlepšují reologické vlastnosti daného polymeru, což má za následek snazší průtok taveniny strojem a formou. Bez použití maziv polymery při zpracování degradují důsledkem vysokého tření mezi makromolekulárními řetězci [2; 12].

1.2.4 Změkčovadla

Jsou to látky, které jsou schopny se vázat sekundárními vazbami mezi jednotlivé řetězce polymerů, čímž zvyšují jejich vzájemné vzdálenosti. To má za následek pokles vzájemně působících sil mezi makromolekulami, díky čemuž se zvýší i jejich vnitřní pohyblivost. Jsou používány za účelem zlepšení ohebnosti, rázové houževnatosti a tekutosti taveniny. Jejich použití ovšem negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti polymeru, jako například mez pevnosti [2; 13].

1.2.5 Nadouvadla

Jsou to přísady přidávané do polymerů pro výrobu lehčených hmot. Tyto přísady se při zpracovatelských procesích vlivem tepla rozkládají a uvolňují tak plyny, které tvoří ve výrobku póry. Plynnou složkou zajišťující vznik těchto pórů je zejména oxid uhličitý nebo dusík [2].



Obr. 3 Zátka z TPE vyrobena s použitím nadouvadel [2]

1.2.6 Plniva

Plniva jsou látky organického nebo anorganického původu, přidávané do polymerů. Podle jejich tvaru se dělí na částicové plniva v podobě prášku nebo malých částic kulovitěho tvaru a na vlákenná plniva. Vzhledem k jejich schopnostem ovlivňovat mechanické vlastnosti materiálů mají vyztužující nebo nevyztužující charakter [2].

Nevyztužujícími plnivy bývají například různé moučky rozemleté břidlice, kaolinu, křídly, dřeva a jim podobných nenákladných materiálů, které plní různé funkční i vzhledové požadavky. Jsou používány například pro výrobu venkovních podlah a obkladů, kdy výsledný výrobek imituje vzhled dřeva a zároveň eliminuje veškeré jeho nežádoucí vlastnosti jako jsou hniloba, sesychání, nasákavost nebo kroucení. Jiná plniva můžou být využívány pro zlepšení jejich nemechanických vlastností, kdy například grafit zlepšuje kluzné vlastnosti polymerů nebo kovové prášky zvyšující jejich tepelnou vodivost [2].

Vyztužující plniva přidávána do polymerů ve formě vláken zvyšují jejich mechanické vlastnosti. Plasty obsahující vlákenné plniva mají zvýšenou tuhost, nižší smrštění a horší jakost povrchu. Mezi nejpoužívanější vlákna patří skelná, uhlíková, kovová, aramidová, minerální a jiná. Tyto vlákna jsou využívány ve formě krátkých (0,2 až 0,6 mm) a dlouhých vláken (10 až 12 mm). Materiály obsahující dlouhá vlákna mají lepší mechanické vlastnosti, avšak jejich zpracování je technologicky náročnější, neboť mají horší tokové vlastnosti a je složitější vlákna „narovnat“ do směru toku taveniny. Orientace vláken v konečném výrobku má zároveň zásadní vliv na jeho mechanické vlastnosti [2; 11; 12].

2 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

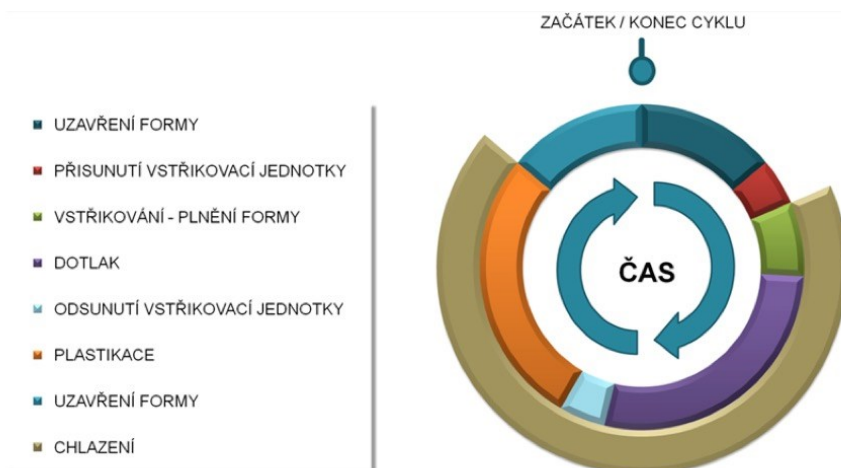
Vstřikování je nejpoužívanější technologie zpracování termoplastů, termoplastických elastomerů, polymerních směsí, kompozitů, ale i reaktoplastů, kaučuků a pryží. Principiálně vychází z technologie tlakového lití, avšak probíhá za výrazně odlišných teplot zpracování a tokových vlastností tavenin termoplastů. Podstata procesu vstřikování závisí na cyklickém opakování jeho po sobě jdoucích částí výrobního cyklu [11].

Technologie vstřikování plastů je použitelná jak pro výrobky konečného charakteru, tak i pro polotovary nebo díly určené pro kompletaci daného výrobního celku. Hmotnost těchto dílů může být menší jak 0,1 g, ale některé výrobky nabývají hmotnosti až několika kilogramů. Nejmenší výrobky se vyrábí metodou mikrovstřikování, kdy se hmotnost vstřikovaných dílů pohybuje od 0,05 do 15 gramů [11; 14].

Hlavními výhodami vstřikování jsou dobré tvarové a rozměrové přesnosti a dobrá kvalita povrchu výrobku, které jsou opakovatelné i pro velké série. Technologie také vyniká schopností vyrábět komplexní součásti, které již nepotřebují další konečné úpravy, a to během krátkého výrobního času. Nevýhody jsou vysoké pořizovací náklady vstřikovacího stroje i formy. Vstřikování je proto vhodné především pro velkosériovou výrobu [7; 11].

2.1 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS

Vstřikovací cyklus je po sobě jdoucí sled operací, jejímž výsledkem je výstřik. Cyklus se dělí na jednotlivé různě dlouhé úseky, jejichž trvání může být ovlivněno vstřikovaným materiálem, tvarem výrobku, technologickými podmínkami vstřikování, konstrukcí vstřikovací formy a typem stroje [11; 14].

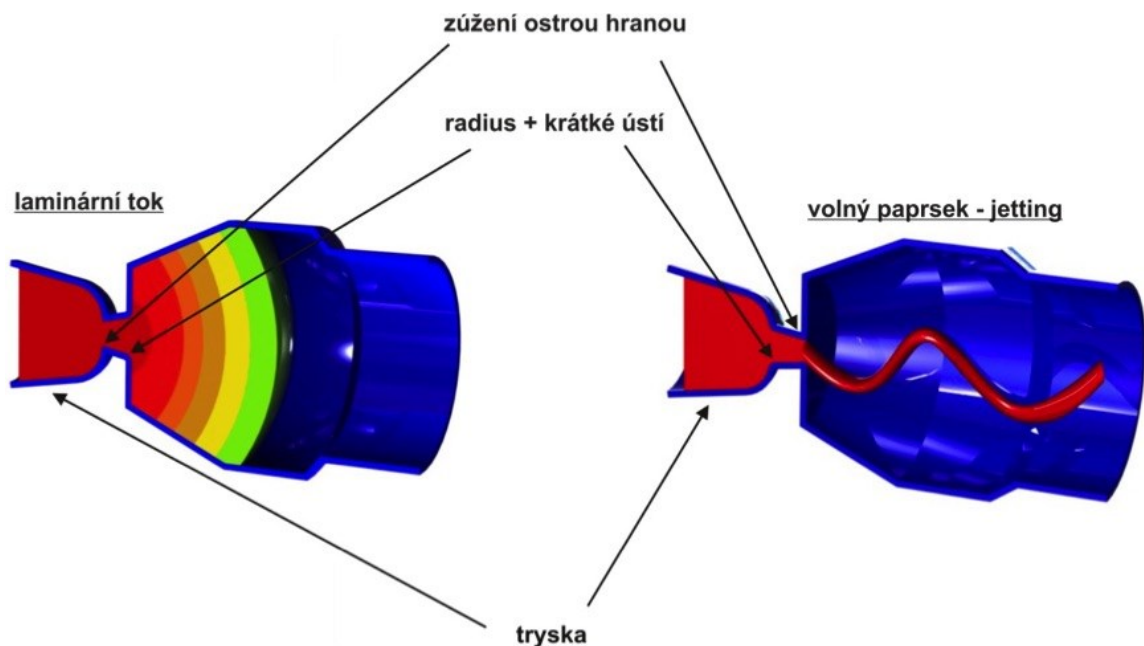


Obr. 4 Vstřikovací cyklus [15]

2.1.1 Vstříkování

Proces vstříkování je započat přisunutím plastikační jednotky ke vtokové vložce formy, kdy následně axiální pohyb šneku vyvodí samotné vstříknutí taveniny do dutiny formy. Tento proces je jedním z nejdůležitějších úseků technologie vstříkování, protože jeho parametry výrazně ovlivňují výsledné vlastnosti výrobku. Je proto důležité aby parametry plnění formy byly konstantní během výrobní série, neboť jejich odchylka může vyústit v nestálost vlastností výstřiků [7; 11; 16].

Doba plnění formy se pohybuje od zlomku sekundy do několika sekund. Obecně je žádané, aby rychlost vstříkování byla co nejvyšší, protože tavenina se při styku s chladnějším povrchem formy ochlazuje, čímž ztrácí tekutost. Při delším času vstříkování tak hrozí vznik nedostříknutého zmetku. Rychlost plnění ovšem nesmí být příliš vysoká, protože by měla za následek plnění formy *volným tokem*, který vede ke zhoršení mechanických vlastností vstříkovaného dílu. Proces plnění je proto přesně řízen tak, aby bylo docíleno složitého mechanismu tuhnutí vrstev taveniny, který se nazývá *laminární tok* [7; 11; 17].



Obr. 5 Princip procesu plnění formy [11]

2.1.2 Dotlak

Po naplnění formy taveninou na úroveň 90–99 % finálního objemu nastává fáze dotlaku. Tato fáze má za účel doplnit určité množství taveniny do formy, pro vyrovnání objemové změny dílu při jeho chladnutí, což zajistí zachování požadovaných rozměrových tolerancí. Dotlak je možný pouze do doby, než tavenina polymeru ztuhne v dutině formy, respektive ve vtokovém systému [11; 15; 18].

Další nutností použití dotlaku je pro zmenšení tlaku uvnitř dutiny formy po jejím naplnění, kdy se hmota začne stlačovat, díky čemu prudce stoupne tlak a rychlost plnění náhle klesne. Pokud by tlak zůstal na původní hodnotě vstřikovacího tlaku, nebo by zůstala stejná rychlost, došlo by ke vzniku tlakové špičky, ke zvětšení hmotnosti a rozměrů výstřiku a k velkému pnutí ve výrobku. Při tomto jevu vzniká také velké namáhání uvnitř formy, nebo by mohlo vést k částečnému, krátkému otevření formy v dělicí rovině, tzv. *dýchnutí*, nebo i k poškození některé části vstřikovací formy. Pro eliminaci těchto jevů je nutno po určité době snížit vstřikovací tlak, tzn. přepnout na dotlak [11].

2.1.3 Plastikace

Účelem plastikace je připravit pro fázi vstřikování homogenní taveninu dostatečného objemu před čelem šneku. Teploty taveniny T_{tav} je dosaženo vlivem elektrických topných těles a také třením granulí plastu o sebe a o stěnu tlakové komory. Poměr tohoto tepla je asi 2:1, kdy dvě třetiny tepla je zajištěno třením a jedna třetina je dodána topnými tělesy. Homogenita připravené dávky taveniny má zásadní vliv na výsledné vlastnosti výrobku. Nestálost taveniny se projeví především na kvalitě výstřiku, kdy se začnou objevovat tokové čáry, lesklý povrch, studené spoje, vnitřní pnutí, nebo i nerovnoměrná tvorba nadmolekulární struktury u částečně krystalických materiálů [11; 17].

Teplota taveniny hraje významnou roli v orientaci makromolekul ve výstřiku, kdy s narůstající teplotou taveniny klesá stupeň orientace a výstřik se z hlediska vlastností stává více izotropní. Ve směru toku se zároveň zhoršují některé mechanické vlastnosti, jako například pevnost v tahu a houževnatost, ale zvyšuje se pevnost studených spojů a snižuje velikost vnitřního pnutí. Při plastikaci je třeba dbát na dobu teplotní výdrže na zpracovatelské teplotě, a to zejména u aditivovaných plastů a polymerů s vysokými kvalitativními parametry, protože při nedodržení maximální uvedené doby může dojít k jejich tepelnému rozkladu [17].

2.1.4 Chlazení

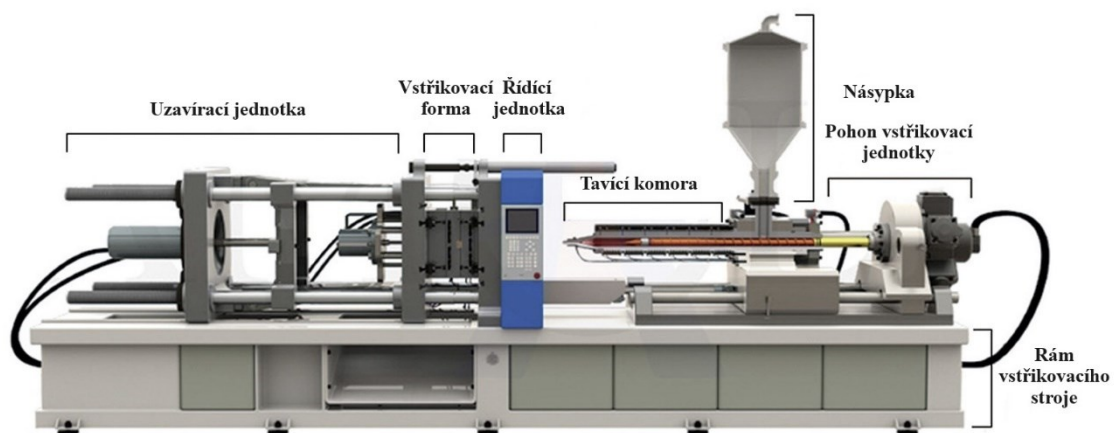
Chlazením je docíleno ztuhnutí taveniny v dutině formy, které je nutné pro vyjmutí výrobku bez jeho deformace. Fáze chlazení je započata už při prvním dotyku taveniny s povrchem formy a pokračuje během fáze dotlaku. Zabírá největší část vstřikovacího cyklu a pohybuje se od několika sekund až po několik minut. Doba chlazení je závislá na tloušťce stěny výrobku, typu vstřikovaného polymeru a na teplotě výstřiku v době vyjmutí z formy. Z ekonomického hlediska je výhodné chlazení co nejvíce urychlit, protože se tak zkrátí celkový výrobní čas a tím i cena výrobku. Příliš rychlá fáze chlazení může mít ale negativní vliv na vlastnosti výstřiku, protože její rychlost ovlivňuje nadmolekulární strukturu, velikost deformace, deformace výstřiku, pnutí a také vzhled jeho povrchu [11; 17].

2.1.5 Vyhození

Po dostatečném ztuhnutí polymeru v dutině se forma otevře v dělicí rovině a díl je vyjmut nebo vyhozen pomocí vyhazovacího systému. Celý vstřikovací cyklus je ukončen uzavřením formy, čím je forma připravena na vstříknutí dalšího kusu [14].

2.2 VSTŘIKOVACÍ STROJ

Proces vstřikování je uskutečněn na vstřikovacím stroji, který se skládá ze vstřikovací jednotky, uzavírací jednotky a z řízení a regulace. Samotný vstřikovací stroj může být navíc doplněn o další příslušenství, jako jsou například temperační zařízení, dopravníky, sušárny, manipulátory, roboty apod. Tyto přídatné zařízení mohou vést k částečné nebo úplné automatizaci, která vede k vysoké produktivitě práce [7; 17].



Obr. 6 Schéma vstřikovacího stroje [18]

2.2.1 Vstříkovací jednotka

Úkolem vstříkovací jednotky je přivedení polymeru, který do ní vstupuje ve formě granulí do homogenního plastického stavu a následně tuto taveninu vstříknout vysokou rychlostí a pod vysokým tlakem do dutiny formy. Důležitý požadavek kladený na vstříkovací jednotku jsou konstantní vstříkovací rychlosti při každém vstříkovacím cyklu, neboť její odchylky mohou mít za následek nestálosti ve výsledném výrobku [7; 19].

Pístové vstříkovací jednotky

Ranné vstříkovací jednotky používané do poloviny 20. století byly konstrukce pístové, jejichž princip byl převzat z tlakového lití kovů. Jejich funkce vychází z pohybu pístu vpřed a vzad, kdy polymer ve formě granulí nebo prášku padá z násypky před píst, který ho tlačí před sebou do tavící komory, kde se plast mění na taveninu. Tlakem pístu se tavenina následně dostane až ke konci tavící komory, kde je umístěna tryska, přes kterou je polymer vstříknut do dutiny formy. Před tryskou bývá umístěno torpédo, které materiál obtéká, což má za následek alespoň částečné homogenizování taveniny. V dnešní době se pístové vstříkovací jednotky používají už jen zřídka, protože byly nahrazeny šnekovými vstříkovacími jednotkami [7; 19].

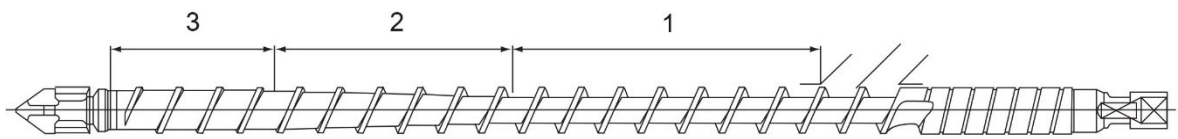
Šnekové vstříkovací jednotky

Šnekové vstříkovací jednotky se skládají šneku, který je uložen v tavící komoře, jejíž vnější strana je pokryta topnými tělesy. Šnek se při plastikaci otáčí a ustupuje dozadu, čímž odeberá polymer z násypky. Materiál následně stlačuje a posouvá do vyhřívané části tavící komory, kde se materiál mění v taveninu a hromadí se před čelem šneku. Po nahromadění potřebného množství polymeru se šnek přestane otáčet a přímočarým pohybem vstříkne plast do dutiny formy. Plastikace nové dávky zpravidla probíhá ještě během tuhnutí výstřiku ve formě, čímž je výrobní cyklus rychlejší oproti pístovým strojům. Další výhodou je vyšší homogenita taveniny a možnost zpracovávat materiály náchylné na teplotní degradaci, jako například PVC, protože polymer ve šnekových vstříkovacích jednotkách setrvává v plastickém stavu kratší dobu nežli v pístových vstříkovacích jednotkách [7; 20].

Pásma šneku

Standardní šnek je možno rozdělit na tři pásma, a to na vstupní, kompresní a výstupní. Vstupní pásmo předeřívá granule plastu nabírané z násypky a posouvá je do kompresního pásma, kde je polymer stlačován, čímž se vytěsni vzduch a začíná mít vlivem tření a zvýšení teploty komory. Po přechodu materiálu v taveninu vstupuje do výstupního pásma, kde je

promíchán, čímž se dosáhne homogenita směsi a materiál je připraven ke vstříknutí. Délka jednotlivých pásem je individuální vzhledem k typu zpracovávaného polymeru [19].

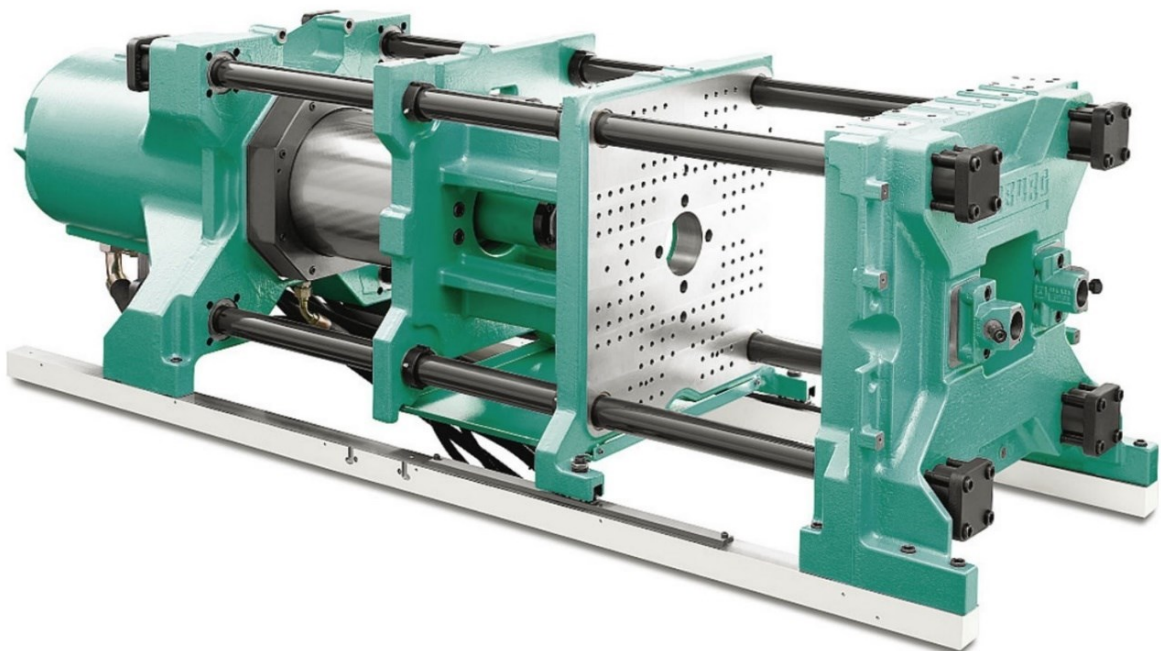


Obr. 7 Schéma šroubu vstříkovací jednotky [20]

1 - Vstupní pásmo, 2 - kompresní pásmo, 3 - výstupní pásmo

2.2.2 Uzavírací jednotka

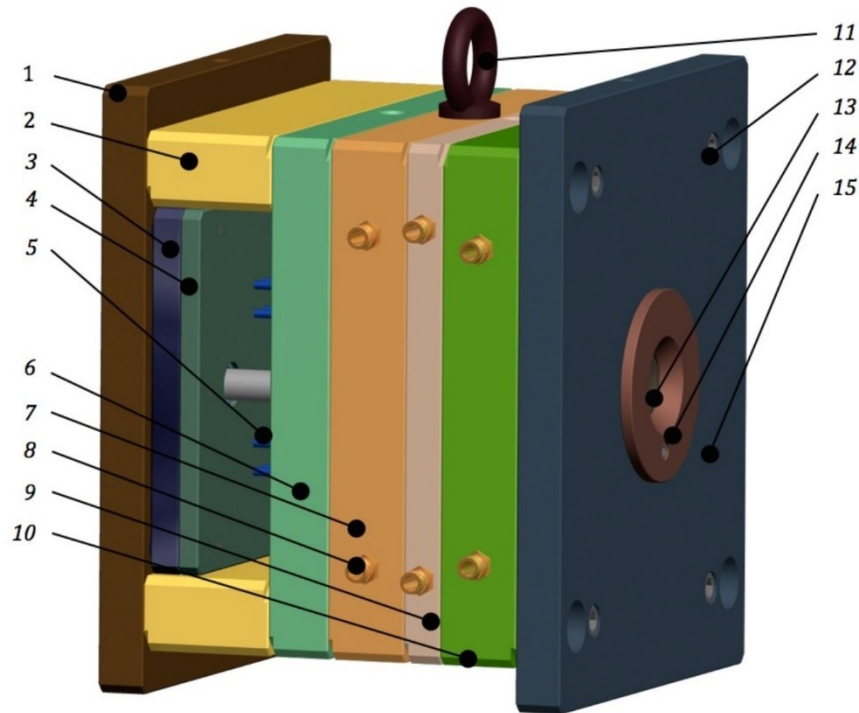
Uzavírací jednotka vstříkovacího stroje slouží pro upnutí a plynulé pohybování formy. Její základní konstrukční prvky jsou vodící sloupky, pevná deska pohyblivá upínací deska a uzavírací a přidržovací mechanismus. Tento mechanismus slouží pro otvírání a zavírání formy a zároveň je nutné, aby zajišťoval uzamknutí formy v zavřeném stavu během vstříkování. Tato uzamykací síla je vyvozena mechanicky, hydraulicky nebo mechanicko-hydraulicky. Velikost uzavírací síly je závislá na velikosti plochy průřezu vstříkovaného dílu uvnitř formy a na velikosti vstříkovacího tlaku. Podle typu pohonu zajišťující pohyb pohyblivé desky se uzavírací jednotky dělí na elektrické a hydraulické [16; 19].



Obr. 8 Hydraulická uzavírací jednotka [16]

3 VSTŘIKOVACÍ FORMY

Vstřikovací forma je komplexní systém, který je navrhován vzhledem k mnoha požadavkům vyplývajících z technologického procesu vstřikování. Hlavní funkcí formy je přivedení taveniny do dutiny formy a její vyplnění, čímž se vytvoří díl kopírující tvar dutiny. Druhotnou funkcí formy je odvedení přebytečného tepla přivedené taveninou. Úkolem vstřikovací formy je i zajištění rychlého vyhození výstřiku z dutiny [15].



Obr. 9 Dvoudesková vstřikovací formy [15]

1 – upínací deska pohyblivé části vstřikovací formy, 2 – rozpěra, 3 – opěrná vyhazovací deska, 4 – kotevní vyhazovací deska, 5 – vyhazovač, 6 – podpěrná deska, 7 – „B“ deska, 8 – přípojka chlazení, 9 – „C“ deska, 10 – „A“ deska, 11 – manipulační oko, 12 – hlavní montážní šrouby, 13 – vtoková vložka, 14 – středící kroužek pevné části vstřikovací formy, 15 – upínací deska pevné části vstřikovací formy

3.1 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ FOREM

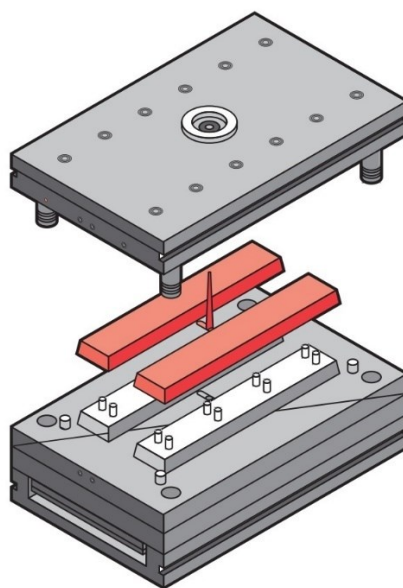
Vstřikovací formy jsou svou konstrukcí značně rozmanité a odvíjí se od tvaru výrobku, typu stroje, druhu vstřikovaného materiálu a požadovaného počtu kusů. Dle těchto požadavků je možné určit násobnost formy, způsob zaformování, dělicí rovinu a vtokovou soustavu [7; 18].

3.1.1 Násobnost vstřikovací formy

Násobnost formy znamená počet výrobků vyrobených za jeden vstřikovací cyklus. Jednonásobné formy mají pouze jednu tvarovou dutinu a jsou převážně používány pro velké díly. Vícenásobné formy mají dvě a více tvarových dutin. Jejich použití je výhodné, jelikož výrobní cyklus dílů vícenásobné formy je jenom nepatrně delší než cyklus jednonásobné formy, ale vede k vyrobení několikanásobného počtu výrobku. Díly z takovéto formy jsou tedy ekonomicky méně nákladné. Vícenásobné formy mají ovšem složitější vtokovou soustavu a potřebují větší uzavírací jednotku kvůli vyšší uzavírací síle a větší velikosti vstřikovací formy. Stejně tak je nutné použití větší vstřikovací jednotky, jelikož množství vstřikovaného polymeru je několikrát vyšší [18].

3.1.2 Dvoudeskové formy

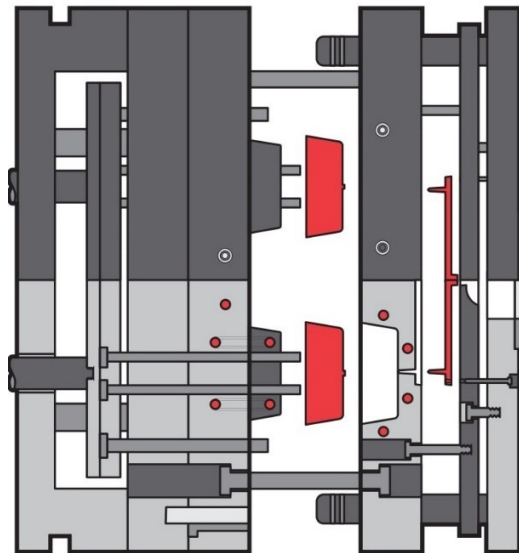
Dvoudesková forma je nejjednodušší a zároveň nejpoužívanější konstrukcí forem. Skládá se z pevné části, ve které je tvárnice a z pohyblivé části, kde je uchycen tvárník. V pevné části formy bývá vtoková vložka, která zajistí dopravení polymeru do dutiny formy a v pohyblivé části bývá vyhazovací systém formy. Mezi dosedacími plochami těchto desek je dělicí rovina výrobku i rozváděcích kanálek. Dvoudeskové formy se vyznačují jednoduchým, levnějším provedením, ale je u nich nutné po vyhození dodatečně oddělit vtokovou soustavu od výrobku [16; 18; 21].



Obr. 10 Schéma dvoudeskové formy s dvěma tvarovými dutinami [21]

3.1.3 Třideskové formy

U třideskových forem, je vložena mezi pevnou a pohyblivou část formy další deska. Mezi touto třetí deskou a pevnou částí formy vzniká druhá dělicí rovina a zároveň jsou mezi nimi vedeny rozvodné kanálky. Při odformování je nejdříve otevřena sekundární dělicí rovina, čímž se odtrhne vtokové ústí a až následně je otevřena hlavní dělicí rovina s tvarovou dutinou, po čemž následuje vyhození dílu. Tento systém zajistí automatické oddělení vtokové soustavy od vstřikovaného dílu a zároveň umožňuje větší flexibilitu při umístění vtoků. Nevýhodou bývá vyšší komplexnost formy a větší poměr odpadního materiálu [21; 22].



Obr. 11 Schéma třideskové formy v otevřené pozici [21]

3.2 VTOKOVÝ SYSTÉM

Vtokový systém zajišťuje dopravu taveniny z trysky vstřikovací jednotky do dutiny formy. Konfigurace, tvar a rozměry vtokového systému zásadně ovlivňuje proces plnění formy, což má velký vliv i na výsledné vlastnosti výrobku. Vtokové systémy se dají rozdělit na dvě hlavní kategorie, a to na studené vtokové systémy a horké vtokové systémy [23].

3.2.1 Studený vtokový systém

Studené vtokové systémy jsou takové, kdy vtoková soustava ztuhne a je vyhozena společně s výrobkem. Skládají se z hlavního vtokového kanálu, rozváděcího kanálu a z vtokového ústí. Tento typ vtokového systému je zdaleka nejjednodušší a i nejrozšířenější, zejména z důvodu nižších pořizovacích cen, ale i kvůli nižším provozním nákladům. Hlavní

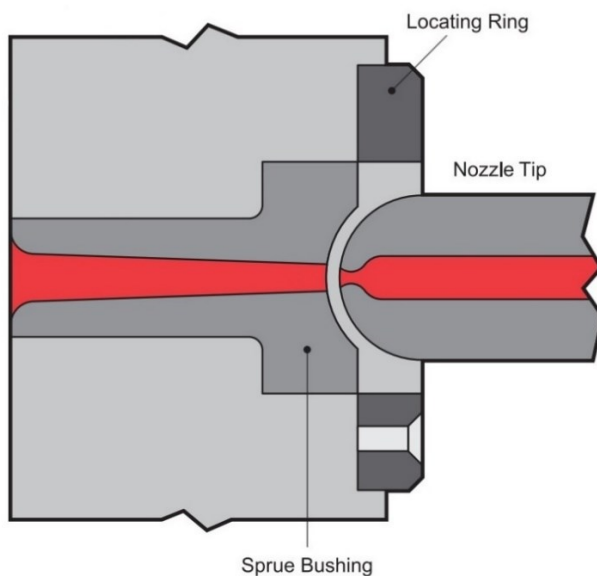
nevýhodou studených vtokových systémů je vznik odpadního materiálu, který zbyl po zatuhnutí vtokové soustavy. Tento odpad je proto třeba vytrít při vyhození dílu a zajistit recyklaci materiálu [23].

Vtoková vložka

Vtoková vložka je umístěna ve středu pevné části formy a funguje jako hlavní vtokový kanál, který vede taveniny z trysky vstřikovací jednotky. Vtokový kanál může být obroben i přímo do desek vstřikovací formy, ale většinou je užito vtokových vložek. U jednonásobných forem je polymer vstříknut přes vtokovou vložku přímo do středu dutiny formy. Vícenásobné formy mají navíc rozvodné kanálky, které vedou taveninu z vtokové vložky do jednotlivých tvarových dutin [21; 23].

Na hlavě vtokové vložky bývá obvykle zaoblení v rozmezí od R15,5 do R40, které má za úkol zajistit těsné dosednutí vstřikovací trysky. Vnitřní otvor vložky bývá opatřen úkosem od 0,5° do 1°, pro snadné vyjmutí vtoku při odformování [15; 21].

Konstrukce vtokové vložky má zásadní vliv na vstřikovací proces. Příliš malý průměr vtokové vložky může mít za následek zvýšení smykového namáhání taveniny. Tento efekt má za následek degradaci polymeru, vady výstřiku a zvýšený vstřikovací tlak. Vtoková vložka by měla zároveň mít o něco větší průměr otvoru dotýkajícího se čela trysky, aby zde nedošlo k zatuhnutí zbytku plastu, což by mohlo bránit odformování [15; 21].



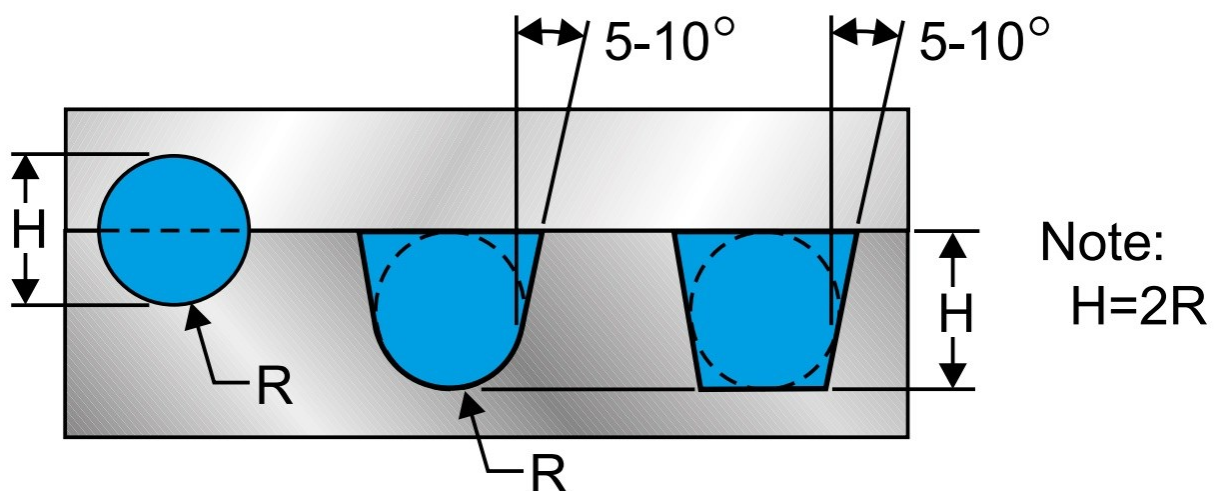
Obr. 12 Schéma vtokové vložky s vstřikovací tryskou [21]

Rozváděcí kanálky

Na rozdíl od hlavního vtokového kanálu, který vede taveninu středem formy v ose stroje, je tok taveniny veden rozváděcími kanálky, které jsou frézovány do dělicí roviny formy. Na výběr tvaru a rozměrů kanálku je třeba dbát zřetel, protože příliš velké kanálky zvyšují výrobní časy a množství odpadního materiálu tím i zbytečně rostou výrobní náklady. Naopak kanálky s příliš malým průřezem mají za následek zvýšený vstřikovací tlak a s tím spojené problémy při vstřikování [15; 21].

Ideálním tvarem průřezu kanálku je kruhový, protože má nejlepší poměr plochy vzhledem k obvodu průřezu. Nevýhodou je však složitost výroby, protože pro dosažení kruhového průřezu je nutno obrobit drážku tvaru půlkruhu do obou polovin formy. Tato metoda má ale za riziko nedokonalé lícování dvou polovin vlivem nepřesností při obrábění, což následně zhoršuje podmínky tečení taveniny v kanálech. Vzhledem ke zvýšeným nákladům na přesné obrobení takovýchto kanálků, jsou používány alternativy ke kruhovému průřezu kanálků. Dobrou alternativou jsou kanálky tvaru lichoběžníku, který má spodní hranu zaoblenou. Úkos drážky, který zlepšuje odformování by měl být přibližně $5-10^\circ$ na obou stranách [23].

Rozváděcí kanálky mnohdy odpovídají k více jak 40 % vstřikovacího tlaku potřebného k naplnění formy. Geometrie kanálků má vliv na tento tlak, a proto je žádoucí co nejvíce optimalizovat jejich vedení skrz formu. Pozitivní vliv může mít například zaoblení ostrých přechodů rohových kanálků, nebo přeorientování dutin formy, pro zajištění co nejkratších délek rozváděcích kanálů [21].



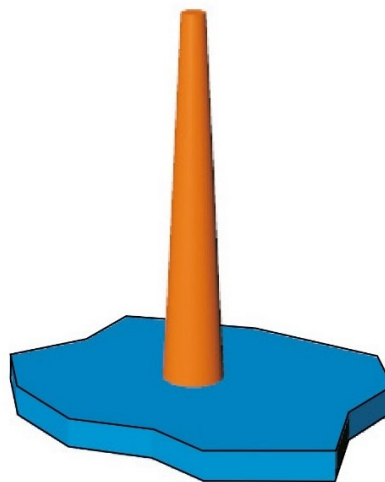
Obr. 13 Schéma optimálních tvarů rozváděcích kanálků [23]

Vtokové ústí

Vtok je prvek spojující rozváděcí kanálek k dutině formy, který plní dvě funkce. První je zamrznutí ústí vtoku po fázi dotlaku, čímž se zabrání unikání materiálu z tvarové dutiny a vstřikovací jednotka tak může polevit vstřikovací tlak dříve, než je polymer v dutině formy kompletně ztuhlý. Tímto je ušetřena energie a namáhání vstřikovací jednotky. Druhá funkce vtokového ústí zajišťuje snadné oddělení vtokové soustavy od výrobku. Tloušťka vtoku bývá většinou od 40 % do 70 % tloušťky stěny výrobku, a zároveň nesmí být větší, než je tloušťka rozvodného kanálku. Příliš malý průměr vtoku ale může vést k bránění dotlaku, velkému smykovému tření polymeru, k *jettingu* a dalším defektům. Je také vhodné, aby délky vtoků byly co nejkratší, většinou od 0,5–1 mm, protože dlouhé vtoky vedou ke ztrátám vstřikovacího tlaku [21; 23].

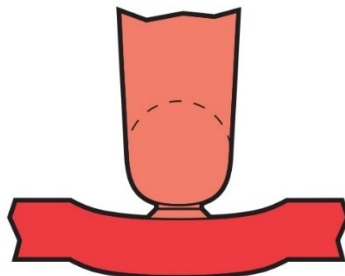
Vtokové ústí by mělo být v takovém místě výrobku, které neleží na pohledové straně výstřiku. Je také snaha, aby byl vtok umístěn tam, kde má výrobek co nejtlustší stěnu, aby se zajistil tok materiálu od nejtlustější části k nejtenčí části. Vtok v tenkostěnné části by měl za následné předčasné zamrznutí polymeru, které by zabránilo v dalším plnění formy. Existuje celá řada vtoků, která slouží pro různé použití [23].

Plný kuželový vtok je nejjednodušším typem, který se používá v případech, kdy forma nemá klasické rozváděcí kanálky, tedy hlavně u jednonásobných forem. Tento typ vtoku přivádí taveninu do středu výrobku a je vhodný pro celou řadu rotačně symetrických výrobků a musí být umístěn na nejtlustějším místě výrobku. Plný kuželový vtok musí být po odformování manuálně odstraněn a zanechává na výrobku značnou stopu [23].



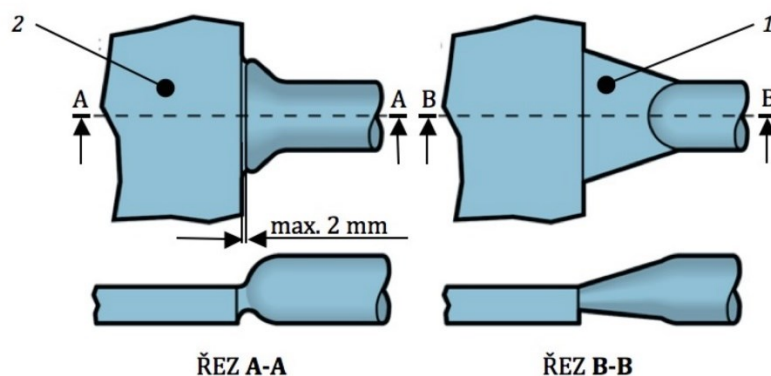
Obr. 14 Plný kuželový vtok [23]

Bodový vtok je používán pro formy s třídeskovým systémem, kde je vtokový systém umístěn podél sekundární dělicí roviny, což umožňuje jeho oddělení od dílu. Vtok musí být dostatečně malý na to, aby ho bylo možné odtrhnout bez poškození výstřiku [23].



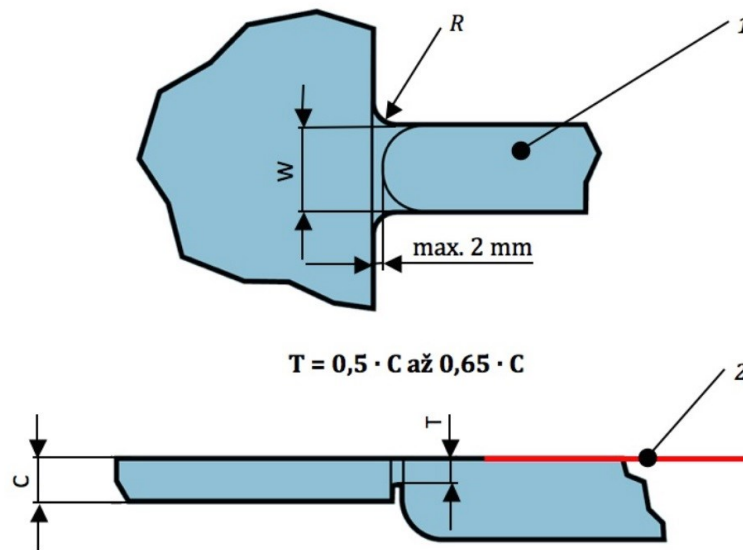
Obr. 15 Bodový vtok [21]

Vějířové a zvonové ústí je jistou variantou filmového vtoku a oproti němu umožňuje dokonalejší působení dotlaku a vzhled jeho povrchu je lepší v případě tlustostěnných dílů. Jeho profil zajistí pomalejší tok taveniny do formy, což má za následek zmenšení nebezpečí jettingu a zlepšení vlastností výstřiku [15; 23].



Obr. 16 Vějířové (1) a zvonové ústí (2) [15]

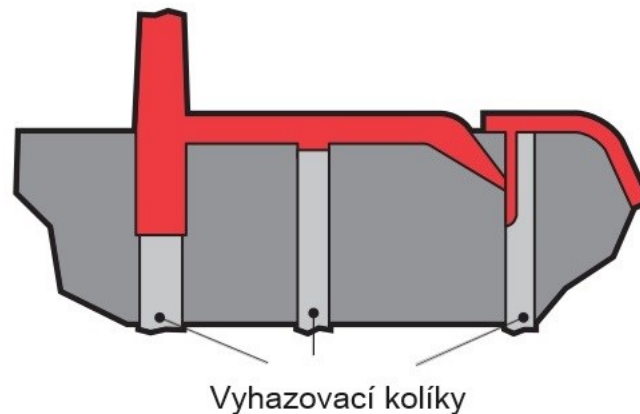
Filmový vtok dovoluje užití menších vstřikovacích tlaků v porovnání s ostatními typy ústí. Je používán u materiálů, které jsou citlivé na smykové namáhání, nebo například u velkoobjemových dílů s požadavky dobré kvality povrchu, vyrobené z materiálu s nízkou viskozitou [15].



Obr. 17 Filmový vtok [15]

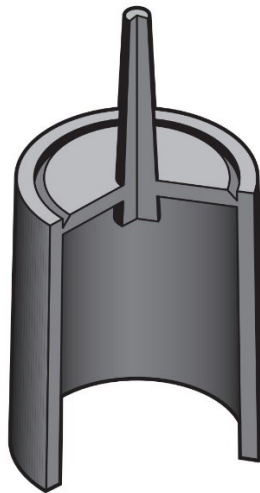
1 – rozváděcí kanál, 2 – dělicí rovina vstřikovací formy, R – rádius, T – tloušťka filmového ústí vtoku, C – tloušťka stěny vstřikovaného dílu, W – šířka filmového ústí vtoku

Tunelový vtok má tvar kužele, jehož menší část je spojena s výstřikem pod dělicí rovinnou. Během vyhození výrobku z formy je vtok vytržen a celý vtokový systém je oddělen. Tento typ ústí je používán pro zajištění automatického oddělení vtoku i u dvoudeskových systémů [23].



Obr. 18 Tunelový vtok [21]

Talířový vtok je používán pro válcové výrobky, které mají ve své ose větší otvor a mají nárok na vysokou přesnost. Jejich použití vyžaduje třídeskové formy, vyhřívané vtokové soustavy, nebo jednonásobné formy. Talířové formy zajišťují konzistentní plnění formy, díky čemuž se eliminují studené spoje a nadměrné deformace [23].



Obr. 19 Talířový vtok [21]

Vyhříváné vtokové soustavy

Vyhříváné vtokové soustavy, někdy také nazývané horké vtokové soustavy, využívají vyhříváné, nebo izolované kanálky, které vedou taveninu přímo do dutiny formy, nebo i do studeného vtokového systému. Jejich použitím se eliminuje nutnost použití studeného vtokového systému, nebo se alespoň zmenší jeho velikost, čímž vzniká minimální, nebo žádný odpad. Vyhříváné vtokové soustavy jsou však nákladné na pořízení i údržbu a přidávají na komplexnosti formy [21]

Vyhříváné vtokové soustavy jsou vzhledem k jejich komplexitě většinou kupovány jako normálie od výrobců specializujících se na jejich vývoj a výrobu. Při výrobě formy je možné použití integrovaného systému, nebo jednotlivě složených komponent [23].

3.3 VYHAZOVACÍ SYSTÉM

Úkolem vyhazovacího systému je odformování vstříknutého dílu poté, co je forma otevřena. Komplexnost těchto systémů se liší vzhledem k požadavkům konkrétní formy. Obecně je žádané, aby byl výrobek z formy vyhozen co nejdříve, čímž se zachovají co nejkratší výrobní cykly. Některé vyhazovací systémy dovolují dřívější vyhození, zatímco u jiných je nutné, aby byl vstřík více ztuhlý [18].

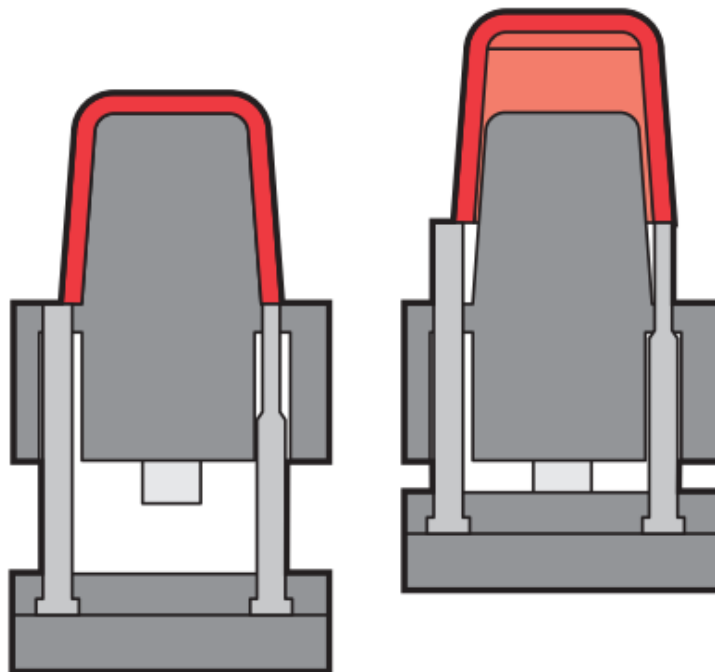
Vyhození vstříkovaného dílu je ve velké většině zajištěno mechanickým. Někdy je ale tento způsob nedostatečný a používají se systémy pneumatické nebo hydraulické. Konstrukce vyhazovacího systému by měla být řešena co možná nejjednodušším způsobem tak, aby

zbytečně nezvyšovala komplexnost formy. Běžně se ale můžeme setkat s takovými výrobky, které vyžadují použití složitějších odformovacích prvků [20; 22].

3.3.1 Vyhazovací kolík

Vyhazovací kolíky jsou nejjednodušší variantou při řešení vyhození dílu. Bývají vyráběné jako normálie válcového nebo nožového profilu s velkým výběrem průměrů a délek, díky čemuž jsou finančně nenáročné. Nevýhodou vyhazovacích kolíků je jejich malá plocha dotyku s vyhazovaným dílem, čímž hrozí nebezpečí deformace výrobku, není-li před vyhozením dostatečně ochlazen. Další nevýhodou jsou také stopy po vyhození zanechávané kolíky, a proto je nutné je umístit tak, aby výsledné otláčení neovlivňovalo vzhledové vlastnosti vstříkovaného dílu [18].

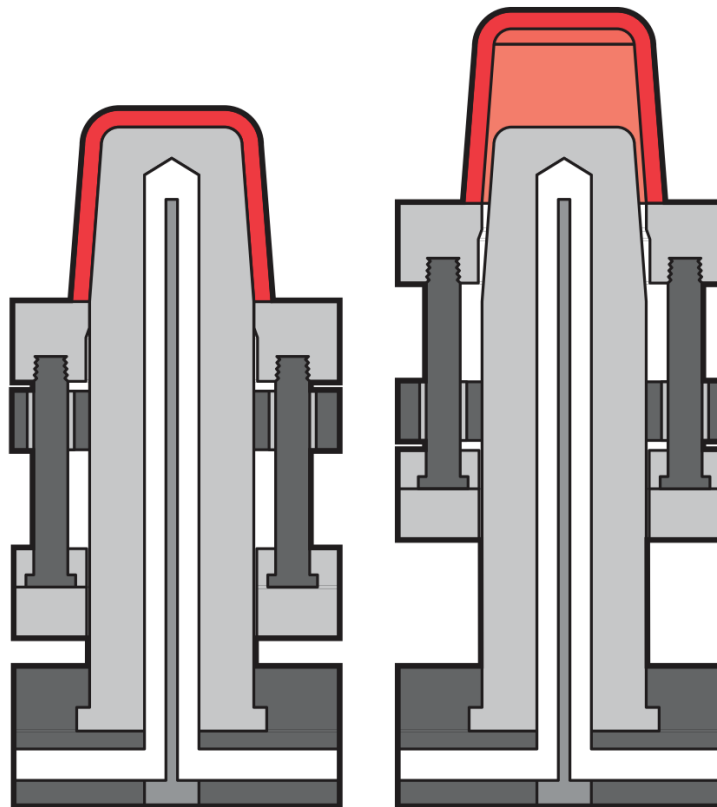
Vyhazovací kolíky bývají upevněny mezi kotevní vyhazovací deskou a přidržovací deskou a tento celek je následně spojen s mechanismem vstříkovacího stroje. Po otevření formy vysouvá vstříkovací stroj tento systém, čímž se vysunou i vyhazovací kolíky směrem do dutiny formy. Tento pohyb způsobí odformování dílu, který vlivem gravitace spadne do prostoru pod formou [15].



Obr. 20 Vyhození součásti válcovým a nožovým kolíkem [21]

3.3.2 Stírací deska

Stírací desky jsou na úkor vyhazovacích kolíků preferovány všude tam, kde to konstrukce formy a tvar výrobku dovolí. Kontaktní plocha mezi stírací deskou a dílem bývá relativně velká a vyhazovací síla je rovnoměrně rozložena. Tato metoda je vhodná zejména pro díly, které nedovolují žádné vizuální stopy po vyhození, nebo díly cylindrického tvaru, které kladou velký odpor vůči vyhození [22].



Obr. 21 Vyhození součásti pomocí stírací desky [21]

3.3.3 Vzduchový vyhazovač

Vzduchové vyhazovače používají tlak vzduchu k oddělení výrobku od povrchu dutiny. Jsou využívány pro díly jednoduché konstrukce tvaru připomínající misku, nebo kbelík, protože při kontaktu s tímto typem dílce není proud vzduchu ihned rozptýlen a má možnost vyvinout dostatek síly na jeho povrch, který vede k vyhození dílu z formy. Tento typ vyhazovače je také možné použít společně s mechanickými vyhazovači, pro snížení jejich potřebné vyhazovací síly. Výhodou vzduchových vyhazovačů je zabránění deformace během vyhození a možnost kompletní eliminace konvenčního vyhazovacího systému, což má za následek jednodušší, lehčí formu [18; 22].

3.4 TEMPERAČNÍ SYSTÉMY

Při vstřikování termoplastů je chlazení jedním z hlavních úkolů vstřikovací formy. Její konstrukce by měla zajistit co nejrychlejší a zároveň co nejrovnoměrnější chlazení. Rovnoměrné tuhnutí taveniny předchází deformacím při smrštění, vysokým vnitřním pnutím a problémům při odformování. Rychlejší chlazení má pozitivní vliv na celkovou rychlost vstřikovacího cyklu, což ovlivňuje výslednou cenu výrobku [16].

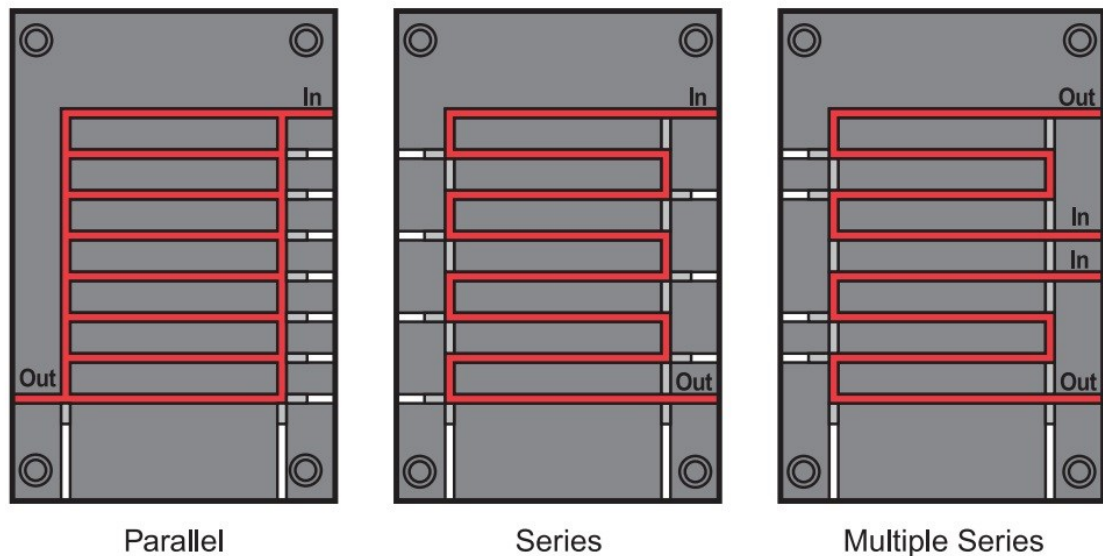
Teplota na povrchu formy také ovlivňuje vzhledové vlastnosti výsledných výstřiků. Vyšší teplota formy například snižuje viskozitu taveniny a zvyšuje schopnost materiálu kopírovat texturu tvarové dutiny, což vede ke sníženému lesku. Nerovnoměrné chlazením mohou vznikat výrobky s rozdílnými vzhledovými charakteristikami napříč jeho povrchem [21].

Rychlost chlazení výstřiku obecně klesá při zvyšující se tloušťce stěny. Děje se tomu proto, že teplo taveniny musí být nejdříve vedeno skrze samotný materiál výstřiku, než je možné ho odvézt z povrchu formy. A jelikož plasty jsou izolanty, což znamená, že jejich součinitel tepelné vodivosti je nízký, je toto vedení tepla skrz materiál výrobku také značně pomalejší než vedení tepla v dutině formy. Rychlost odvodu tepla z povrchu dutiny formy závisí na tepelné vodivosti materiálu ze které je vyrobena a na hustotě a vzdálenosti chladících kanálků od jejího povrchu. Dvojnásobná vzdálenost kanálku od povrchu může mít za následek čtyřnásobné zpomalení teploty chlazení. Z tohoto důvodu je žádoucí, aby kanálky byly co možná nejbližší povrchu dutiny formy [21].

Chlazení formy je prováděno přes kanálky, které jsou vrtány do pevné i pohyblivé části z důvodu teplotní stálosti obou polovin. Jejich teplotní rozdíly by vedly k nežádoucím důsledkům na vstřikovaný díl a hrozilo by, že by rozměry jednotlivých polovin formy mohly být různě ovlivněny vlivem teplotní roztažnosti. Tato rozměrová odchylka by mohla vést k neplynulému, nebo nedokonalému zavírání formy. Z tohoto důvodu by teplotní rozdíl mezi dvěma polovinami neměl být více než 10 °C [16].

Chladící kanálky mohou být uspořádány v paralelní, nebo sériové konfiguraci. Kanálky v paralelním rozpoložení mají pouze jeden vstup a výstup, čímž je systém jednodušší. Problém ale nastává, pokud je mezi jednotlivými řadami rozdíl v tlakovém spádu. V takovém případě je průtok jednotlivými řadami značně rozdílný. Sériové zapojení řeší tento problém, jelikož zachovává jednotný průtok skrze celý svůj okruh. Značné zvýšení teploty v dlouhých kanálcích může mít ale za následek nízkou efektivitu chlazení na jeho

konci. Kompromisem je rozdělení jednoho rozsáhlého chladicího systému do několika menších sériových systémů [21].



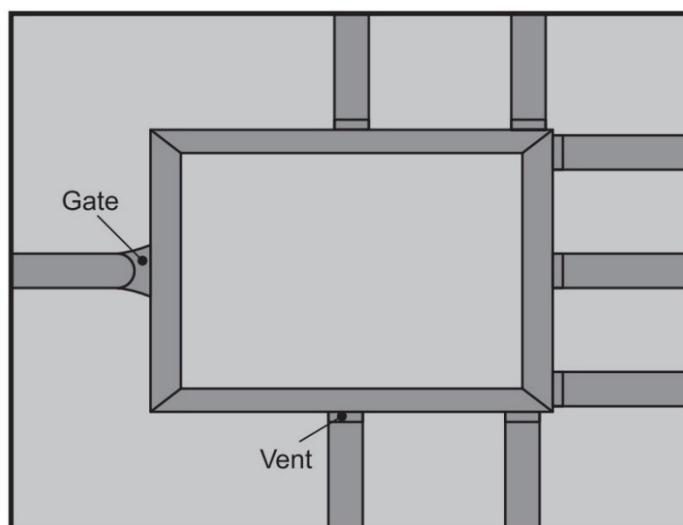
Obr. 22 Varianty uspořádání temperančního okruhu [21]

3.5 ODVZDUŠŇOVACÍ SYSTÉMY

Tavenina, která vstupuje do dutiny formy před sebou při vstříknutí stlačuje vzduch. Přestože většina vzduchu samovolně unikne přes dělicí rovinu nebo například přes vodící plochy vyhazovačů, může zůstat jeho určité množství v dutině. Tento vzduch by následně mohl způsobovat řadu problémů vyznačujících se například spálenými místy na povrchu výstřiku, nedostříknutými díly nebo propadlinami [15; 20; 16].

Nejjednodušším způsobem odvzdušnění forem představuje vytvoření odvzdušňovací plochy v dělicí rovině formy, protože jsou snadno vyrobitelné a jsou přímou cestou pro vzduch vytlačovaný taveninou. Je vhodné potom přizpůsobit tok taveniny ve formě tak, aby vedl k postupnému vytlačování vzduchu směrem k dělicí rovině. Přítomnost odvzdušňovacího kanálu v dutině formy je důležitá hlavně tam, kde vtéká polymer jako poslední. Tyto místa se nachází zpravidla nejdále od vtokového ústí [15].

Vhodnou alternativou ke standardním odvzdušňovacím kanálkům může být odvedení vzduchu přes vodící plochu vyhazovače. Pro tento účel se vyhazovače lehce zploští na protilehlých stranách, čímž vznikne malá mezera mezi vodící plochou a vyhazovačem, přes kterou je schopný vzduch uniknout [15].



Obr. 23 Pozice odvzdušňovacích kanálků podél dělicí roviny tvarové dutiny [21]

3.6 MATERIÁLY VSTŘIKOVACÍCH FOREM

Při návrhu vstřikovacích forem je třeba klást důraz na mnoho faktorů, které ovlivňují výběr jejich materiálů. Hlavním kritériem při výběru materiálu je konečné použití formy, od čehož se odvíjí i vlastnosti, které musí materiál splňovat, pro zajištění bezproblémové a ekonomické funkce formy. Mezi zvažované vlastnosti materiálu patří například jeho pevnost, tvrdost, obrobiteľnosť, svařitelnost, odolnosť proti otěru apod. [18; 21]

Neméně důležitou vlastností materiálu vstřikovacích forem, která ovlivňuje její samotné vlastnosti je jeho tepelná vodivost. Vzhledem k nutnosti prostupu tepla z taveniny do chladicího média je žádoucí, aby materiál tvarové dutiny měl co nejvyšší tepelnou vodivost. Bohužel ale obecně platí, že materiály dobře vedoucí teplo nemají vysokou pevnost a tvrdost. Je proto nutné volit určitý kompromis mezi těmito vlastnostmi [15].

Naprostá většina produkčních forem pro zpracování plastů je konstruována z různých typů ocelí. Méně namáhané díly, například upínací desky, rozpěrné desky apod., jsou vyráběny z konstrukčních ocelí třídy ČSN 11, jako kupříkladu ČSN 11 500 (EN E295) nebo ČSN 11 600 (EN 335). Tyto výrobky jsou dodávány tepelně upravené v podobě normalizačního žíhání nebo žíhání naměkko pro jejich snazší obrobiteľnosť. Součásti více namáhané, jako například vodící elementy bývají vyrobeny z ocelí třídy ČSN 12 ku příkladu 12 050 (EN C45). Tyto součásti, které přicházejí do přímého kontaktu s jinými díly je možno cementovat a následně zušlechťit, čímž se zvýší jejich povrchová tvrdost a oteruvzdornost.

Tvarové vložky dutiny formy a součásti, které jsou v přímém kontaktu s vstříkovaným dílem jsou vyráběny ze zušlechtovaných nástrojových ocelí [17; 21; 24].

Hliníkové formy, dříve využívané především pro experimentální použití, začínají nacházet využití i u produkčních forem určené pro nižší série. To je možné z toho důvodu, že dnešní zdokonalené slitiny hliníku mají čím dál tím lepší pevnost a tvrdost než klasické, dříve používané slitiny hliníku. Povlakováním je navíc možné zvýšit tvrdost povrchu na více než 50 HRC, čímž se zajistí ještě vyšší odolnost proti opotřebení. Hliníkové formy většinou používají ocelové vložky v místech, které typicky musí snášet velké namáhání, čímž se prodlouží životnost těchto forem. Desky hliníkových forem jsou snadněji obrobitelné, což se projeví v pořizovací ceně a zároveň forma sestavena z takových desek umožňují rychlejší vstříkovací cyklus [21].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Pro bakalářskou práci byly stanoveny následující cíle:

- 1) Vypracování literární rešerše na zadané téma
- 2) Návrh modelu vybrané součásti
- 3) Návrh nástroje pro zpracování polymerních materiálů
- 4) Vyhodnocení a stanovení závěru výsledků bakalářské práce

Literární rešerše se věnuje obecné problematice vstřikování polymerů. Jednotlivé kapitoly popisují základní vlastnosti polymerů, princip technologie vstřikování plastů a konstrukci vstřikovací formy.

Prvním cílem praktické části bakalářské práce je návrh výrobku určeného pro výrobu pomocí technologie vstřikování. Ke zhotovení 3D modelu byl použit program Autodesk Inventor Professional 2023. Výrobek je koncipován jako propagační předmět pro Fakultu technologickou Univerzity Tomáš Bati ve Zlíně. Druhým cílem praktické části je návrh tvarových vložek vstřikovací formy pro výrobu tohoto modelu.

5 VSTŘIKOVANÝ DÍL

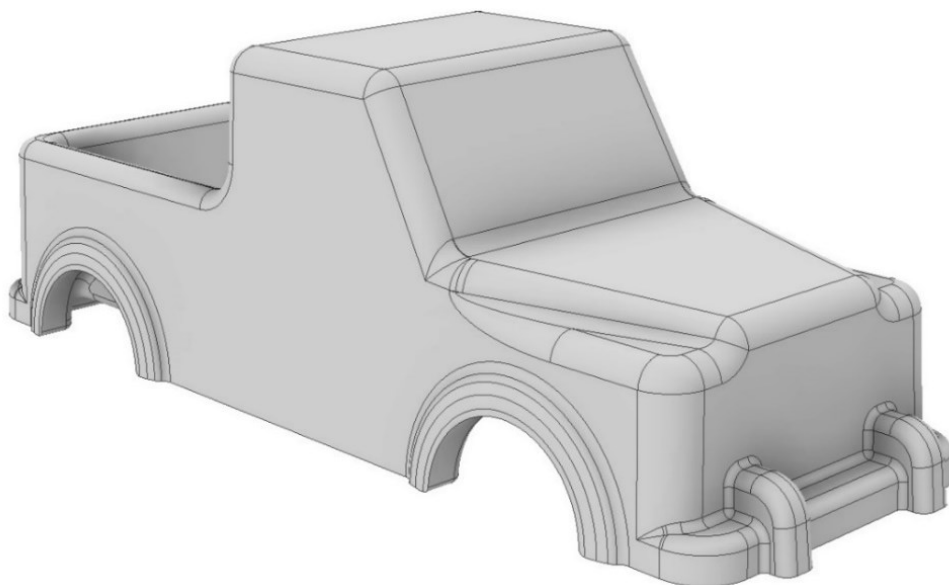
Zadáním bylo navrhnout propagační předmět z polymerního materiálu pro Fakultu technologickou UTB. Pro tento účel byl zvolen vícedílný odpružený model auta, který má za úkol zaujmout a poukázat na možnosti využití polymerů. Díly tohoto auta byly konstruovány pro výrobu na univerzálním dvoudeskovém rámu vstřikovací formy, kterým disponuje fakulta.

5.1 Konstrukce modelu auta

Model auta se skládá ze tří hlavních částí – rámu, kol a kabiny. Tyto části jsou navzájem spojeny pomocí západkových a kuželových spojů. Konstrukce auta musela vycházet z omezených rozměrů univerzálního rámu a z nutnosti umístění všech dílů do jedné formy o jedné dělicí rovině. Tyto kritéria zásadně ovlivnili tvar i funkci konstruovaných dílů, jelikož možnosti odformování výrobků a umístění vtoků byly limitované. Dalším důležitým kritériem při zhotovení návrhu auta bylo zvážení vyrobiteľnosti tvarových dutin jeho dílů. Bylo vytvořeno několik koncepčních variant dílů modelu auta, lišící se tvarově i rozměrově. Vzájemná funkčnost těchto dílů byla otestována pomocí 3D tištěných prototypů.

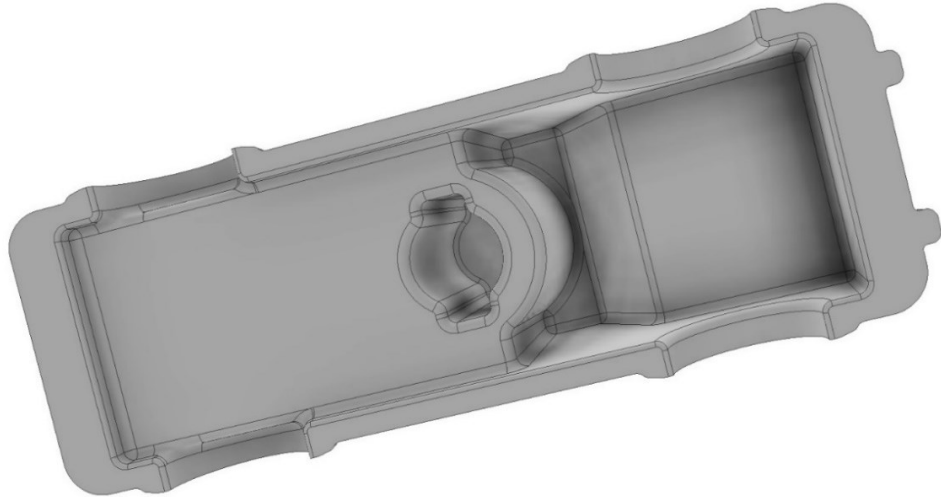
5.1.1 Kabina

Kabina auta byla navržena po vzoru vozidel typu pick-up. Model bylo nutno navrhnout se zásadami konstrukce dílů pro vstřikování, což znamená vyvarování se ostrých hran a opatření stěn kolmých na dělicí rovinu úkosem.



Obr. 24 Model Kabiny

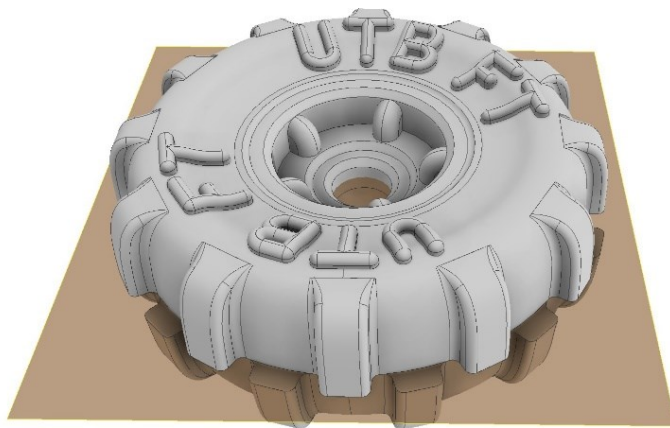
Konstrukce dílu je skořepinového charakteru o tloušťce 3 mm, čímž je minimalizována spotřeba materiálu a redukována výsledná váha výrobku. Byla snaha zachovat co možná nejrovnoměrnější šířku stěn, jelikož variace mezi jejich tloušťkou vede k nerovnoměrnému chladnutí, což má za následek vysoké vnitřní pnutí a tvarové deformace. Ostré hrany byly zaobleny a stěny kolmé na dělicí rovinu byly opatřeny úkosem, pro zajištění snadného odformování.



Obr. 25 Pohled na spodní část kabiny

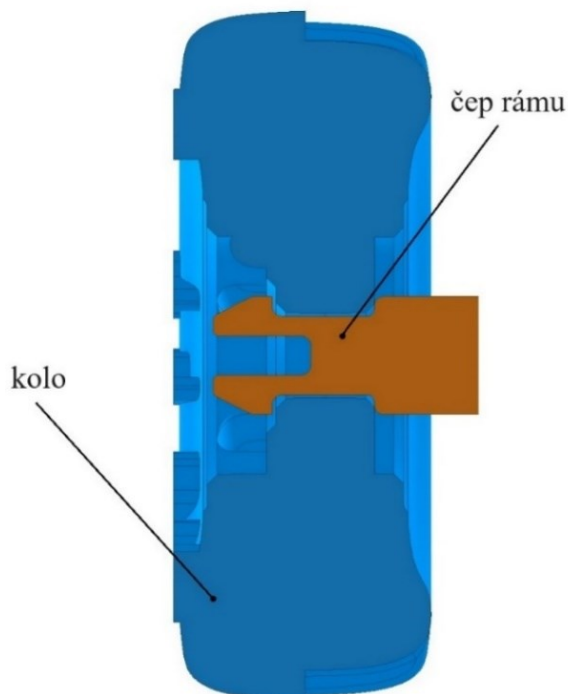
5.1.2 Kola

Kola byla opatřena dezénem, především pro imitaci reálných pneumatik, ale i kvůli zdrsnění stykové plochy kol, čímž se zajistí nižší míra skluzu kol. Tvar dezénování byl značně omezen technologickými podmínkami, a to především dělicí rovinou a vyrobiteľností formy. Z tohoto důvodu byl pro dezén použit reliéf obdélníkového tvaru kolmý na dělicí rovinu, který nebude bránit odformování dílů.



Obr. 26 Model kola s dělicí rovinou

Spojení kol s rámem je realizováno pomocí západkového spojení dvěma háky, které zamezují axiálnímu pohybu, který by vedl k vypadnutí čepu rámu z kola. Pro zajištění volné rotace kol byla zvolena mezi otvorem a čepem vůle 0,3 mm.



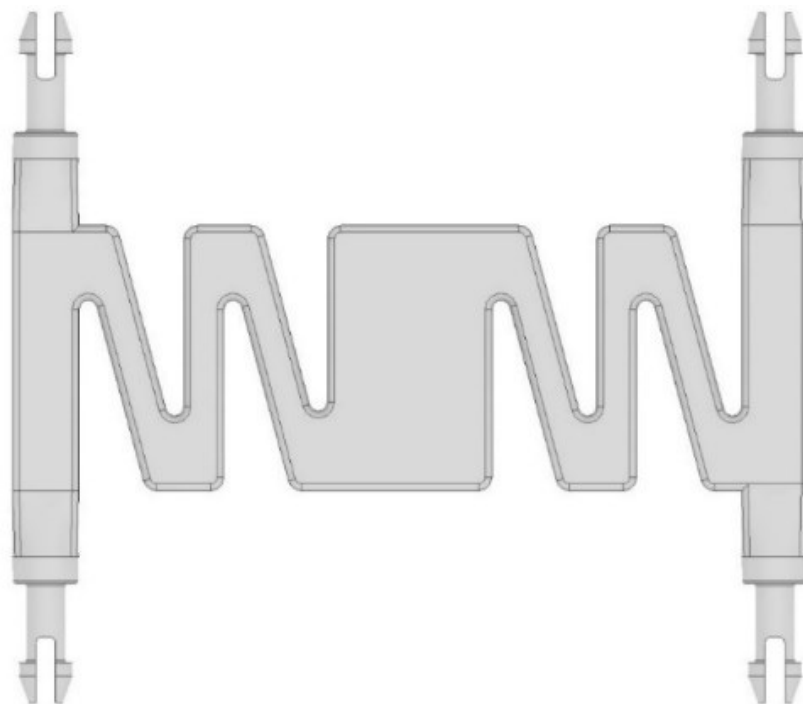
Obr. 27 Spojení kola s rámem

5.1.3 Rám auta

Rám auta slouží jako nosná konstrukce sestavy, na kterou jsou připevněny ostatní díly. Dalším úkolem rámu, pro který byl navrhován, je zajištění odpružení kabiny auta od podvozku. Toho je docíleno pomocí vinuté středové části, která je schopna elastické deformace při zatížení. Tato pružnost rámu byla testována na několika prototypech.

První prototyp rámu

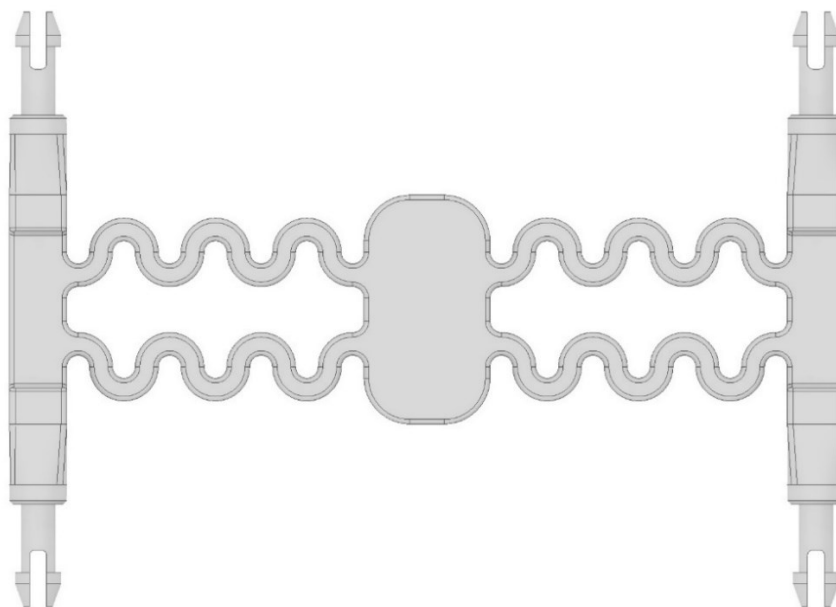
První verze profilu rámu má jednoduchý lomený tvar pružné části. Větší šířka této oblasti má příznivý vliv na proces vstřikování, protože klade nižší odpor toku taveniny. Při testování se projevila značná tuhost rámu, kvůli čemuž byl tento návrh zavrhnut.



Obr. 28 První prototyp rámu

Druhý prototyp rámu

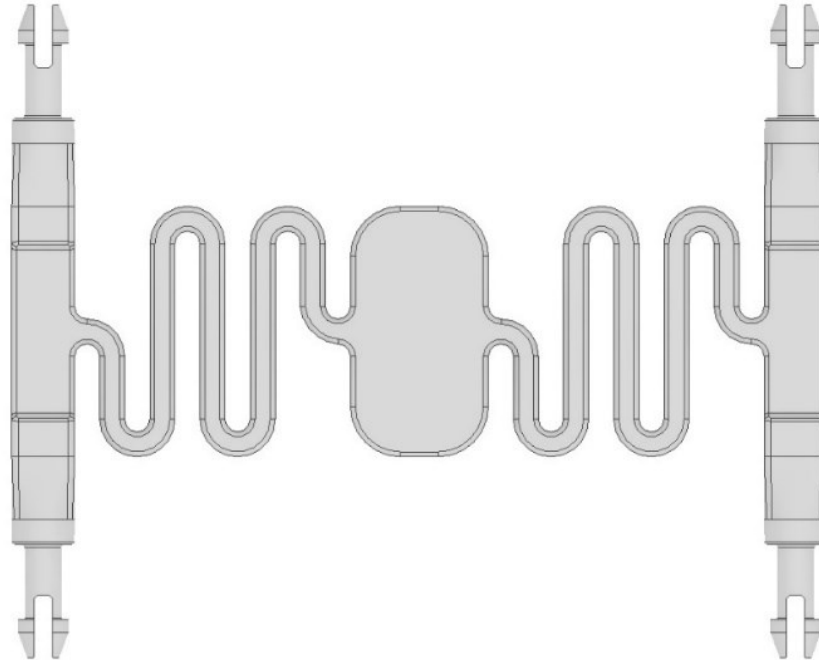
V druhé verzi byl testován profil s dojitým vinutím, který se projevil opět jako příliš tvrdý. Takovéto provedení by také vedlo k vyšším nákladům na výrobu, kvůli náročné geometrii.



Obr. 29 Druhý prototyp rámu

Třetí prototyp rámu

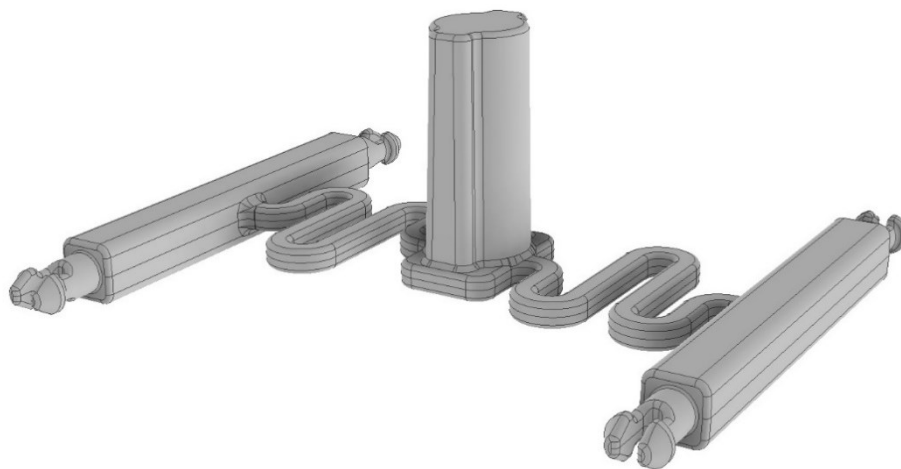
V tomto návrhu bylo použito jedno vinutí, které se projevilo nejlepšími pružnými vlastnostmi, díky čemuž byl tento profil použit i pro konečnou verzi rámu.



Obr. 30 Třetí prototyp rámu

Finální verze rámu

Konečná verze rámu má zkrácené vinutí a je zvětšena plocha jeho průřezu. Tato změna byla důležitá především pro snazší plnění dutiny formy, ale také pro lepší stabilitu auta. Krajní profil rámu, který spojuje čepy kol byl zjednodušen pro snadnější výrobu.



Obr. 31 Finální rám

Rám byl opatřen kuželovým čepem s vrcholovým úhlem 2° , který zajišťuje upevnění kabiny. Dvojce zubů na čepu vymezuje rovnoběžnou orientaci kabiny a brání jejímu pootočení.

5.1.4 Výsledná sestava auta

Konečný výrobek sestavený ze vstřikovaných dílů je vyobrazen na obrázku č. 32. Sestava má největší rozměry. rozměry 95 x 65 x 60 mm.



Obr. 32 Sestava auta

5.2 Materiál výrobku

Pro výrobek byl zvolen materiál HDPE, a to konkrétně LITEN MB 71 dodávaný společností ORLEN Unipetrol RPA. Je dodáván v granulích o rozměrech 2-7 mm o typické sypné hmotnosti $520-580 \text{ kg/m}^3$. Je využíván pro výrobu přepravek, nádob a různých technických dílů. Vyznačuje se dobrou tuhostí, rázovou houževnatostí a dobrými tokovými vlastnostmi.

Tabulka 1 Vlastnosti materiálu LITEN MB 71 [25]

PARAMETR	HODNOTA	JEDNOTKA	ZKUŠEBNÍ METODA
REOLOGICKÉ VLASTNOSTI			
Index toku taveniny (190 °C/2,16 kg)	8	g/10 min	ISO 1133-1
Index toku taveniny (190 °C/5 kg)	25	g/10 min	
Celkové smrštění	podélné	3,5	%
	kolmé	2,9	
MECHANICKÉ VLASTNOSTI			
Modul pružnosti v ohybu	1150	MPa	ISO 178
Modul pružnosti v tahu	1000	MPa	ISO 527-1,2
Napětí na mezi kluzu	25	MPa	
Prodloužení na mezi kluzu	8	%	
Vrubová houževnatost Charpy při	23 °C	7	kJ/m ²
	-30 °C	6	
TEPELNÉ VLASTNOSTI			
Teplota tání (DSC)	135	°C	ISO 11357-1, 3
Teplota měknutí dle Vicata (VST)	126	°C	ISO 306
OSTATNÍ VLASTNOSTI			
Hustota (21±1) °C	963	kg/m ³	ISO 1183-2
Tvrdość Shore D	58	-	ISO 868

Tabulka 2 zpracovatelské podmínky materiálu LITEN MB 71 [25]

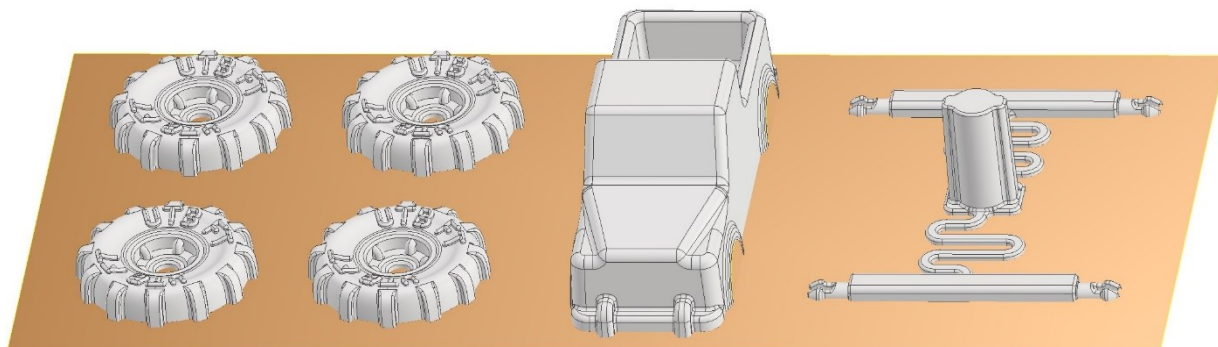
ZPRACOVATELSKÉ PODMÍNKY		
PARAMETR	DOPORUČENÁ HODNOTA	JEDNOTKA
Teplota taveniny	210–250	°C
Teplota formy	10–40	

6 NÁVRH VTOKOVÉ SOUSTAVY

Návrh vtokové soustavy je jednou z nejdůležitějších operací při samotném návrhu vstříkovací formy. Vtokový systém má za úkol dopravit taveninu od vstříkovací trysky přes vtokovou vložku a rozváděcí kanálky až do samotné dutiny formy.

6.1 Volba dělicí roviny

Dělicí rovina je plocha kontaktu pevné a pohyblivé části formy a musí být navrhnutá tak, aby zajistila bezproblémové odformování výrobku a zabránila úniku taveniny z dutiny formy. Obecně je žádoucí navrhovat dělicí roviny co nejjednodušeji, protože při složitě tvarovaných dělicích rovinách, nebo s rostoucím počtem dělicích rovin se zvyšuje výrobní cena vstříkovací formy.



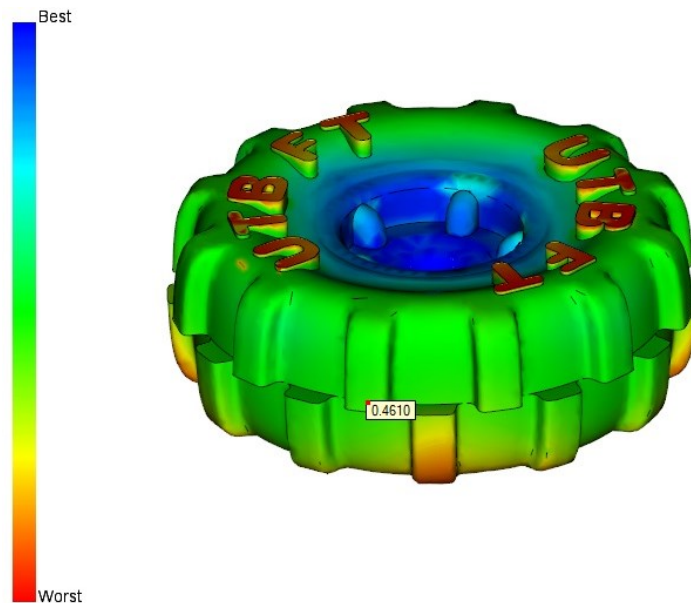
Obr. 33 Umístění dílů v dělicí rovině

Pro zachování jednoduchosti vstříkovací formy byla tedy použita pouze jedna dělicí rovina orientována kolmo ke směru otvírání formy. Vedení roviny jednotlivými díly je zobrazeno na obrázku č. 33. Správné zaformování dílů a volba dělicí roviny je stěžejním krokem při konstrukci vstříkovací formy a zásadně ovlivňuje návrh vtokového systému, vzhledem k použití dvoudeskového systému formy.

6.2 Analýza vhodnosti vtokového ústí

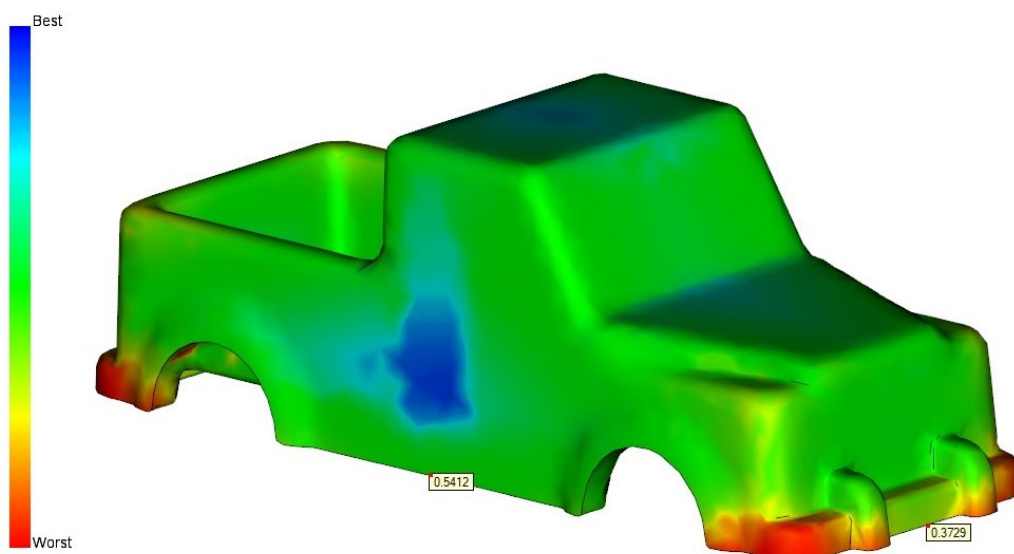
Pro zjištění neoptimálnější pozice vtokového ústí byla vyhotovena analýza polohy vtokového ústí v programu Autodesk Moldflow Adviser 2024. Vhodnost vtoku je na povrchu součásti vyjádřena pomocí barevného gradientu. Nejvhodnější oblasti pro vtokové ústí jsou vyobrazeny modře, zatímco červené oblasti jsou nejméně vhodné.

Kvůli použití dvoudeskové konstrukce formy se studeným vtokovým systémem můžou být vtokové ústí umístěny pouze do oblasti dělicí roviny. Z tohoto důvodu nelze využít nejlepší umístění doporučené analýzou, protože leží mimo tuto dělicí rovinu. Stejně tak je obecně snaha vyhnout se umístění vtoků do pohledové části vstřikovaného dílu, protože po vtoku zůstávají nežádoucí stopy.



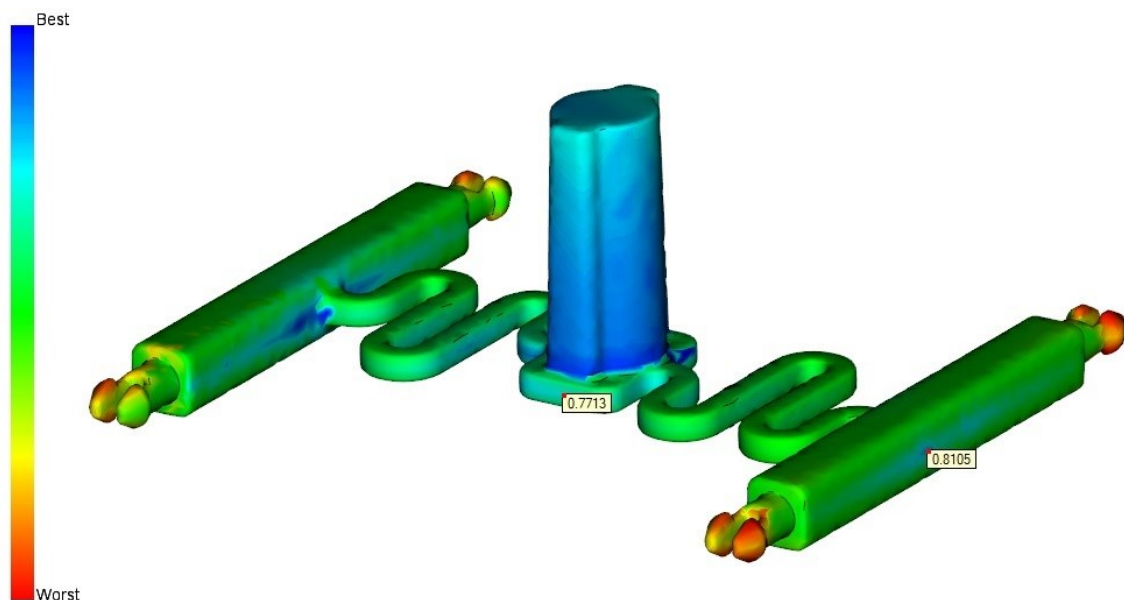
Obr. 34 Analýza umístění vtokového ústí kola

Z analýzy vyplývá, že nejlepší umístěním pro vtok by bylo ve středové oblasti kola. Toto umístění je ovšem nepoužitelné vzhledem ke konstrukci formy, a proto bylo umístění zvoleno dle obrázku 34, které je dle analýzy vhodné ze cca 46 %.



Obr. 35 Analýza umístění vtokového ústí kabiny

Umístění vtoků na kabině auta bylo zvoleno dle obrázku č. 35. Celkem byly použity tři lokace vtokových ústí, a to dvě o identické vhodnosti 37 % na přední a zadní části a jedno na boční části s vhodností 54 %.



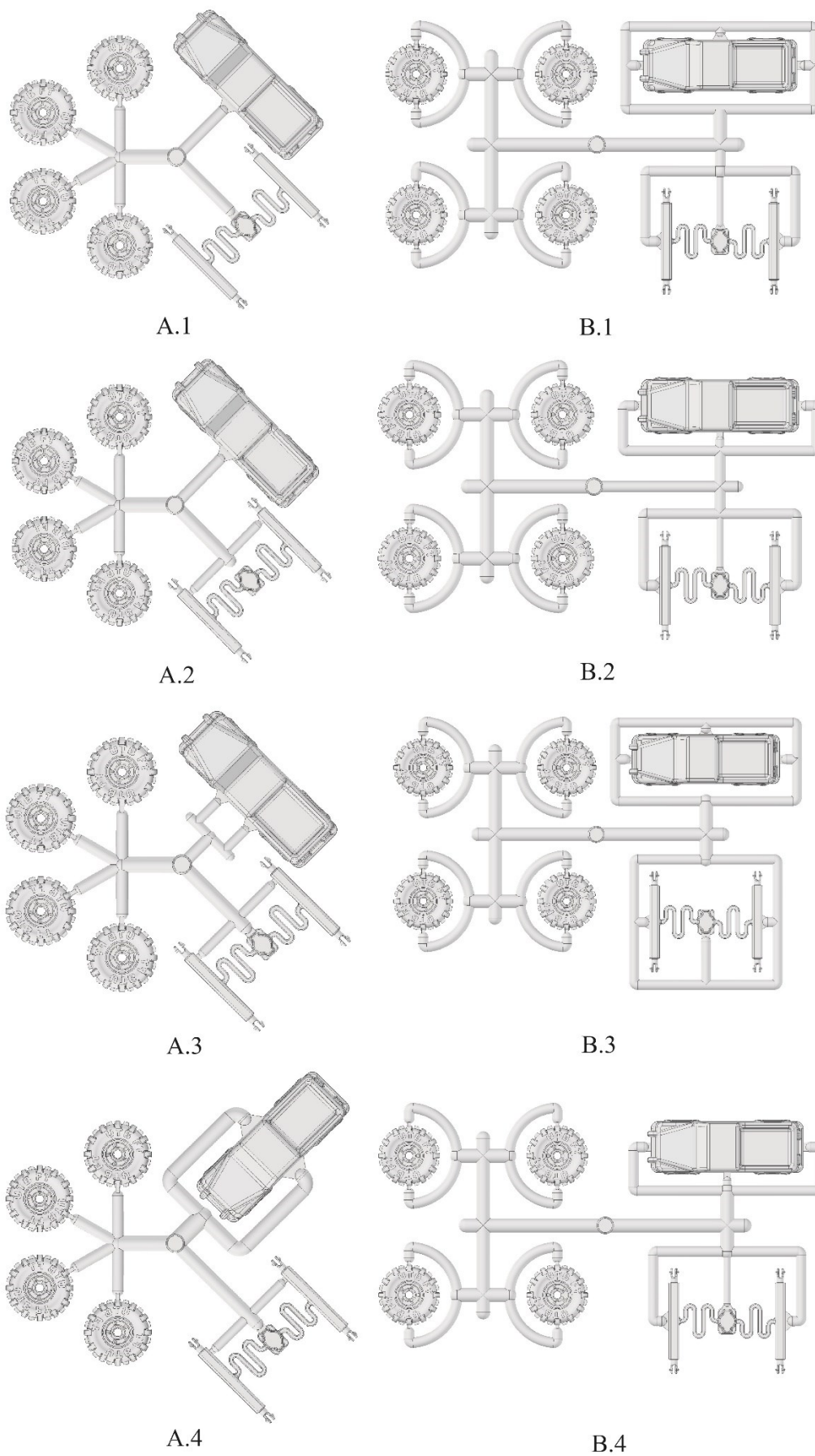
Obr. 36 Analýza umístění vtokového ústí rámu

Pro rám byly použity dvě pozice na protějších bočních stranách o vhodnosti 81 % a jedna pozice ve středu rámu o vhodnosti 77 %.

6.3 Návrh vtokového systému

U vícenásobných forem je důležité, aby tavenina vtekla do všech dutin, pokud možno ve stejný čas a za stejného tlaku. Standartně se používají rozvodné kanálky konstantních délek. V našem případě není varianta konstantní délky kanálků použitelná, kvůli rozdílným tvarům a velikostem jednotlivých dutin. Proto bylo rovnoměrného plnění dutin docíleno kanálky různých délek a průměrů.

Byly navrženy dvě základní rozpoložení vtokového ústí, které byly dále upraveny různými průměry vtokových kanálků v rozmezí 6–10 mm a rozdílnými počty vtokových ústí za účelem optimalizace tokových vlastností taveniny. Tyto varianty jsou vyobrazeny na obrázku č. 37. Pro zjištění tokových vlastností byly jednotlivé verze vtokového systému podrobeny tokové analýze v programu Autodesk Moldflow Advisor 2024.



Obr. 37 Varianty vtokového systému

6.4 Výsledky tokové analýzy

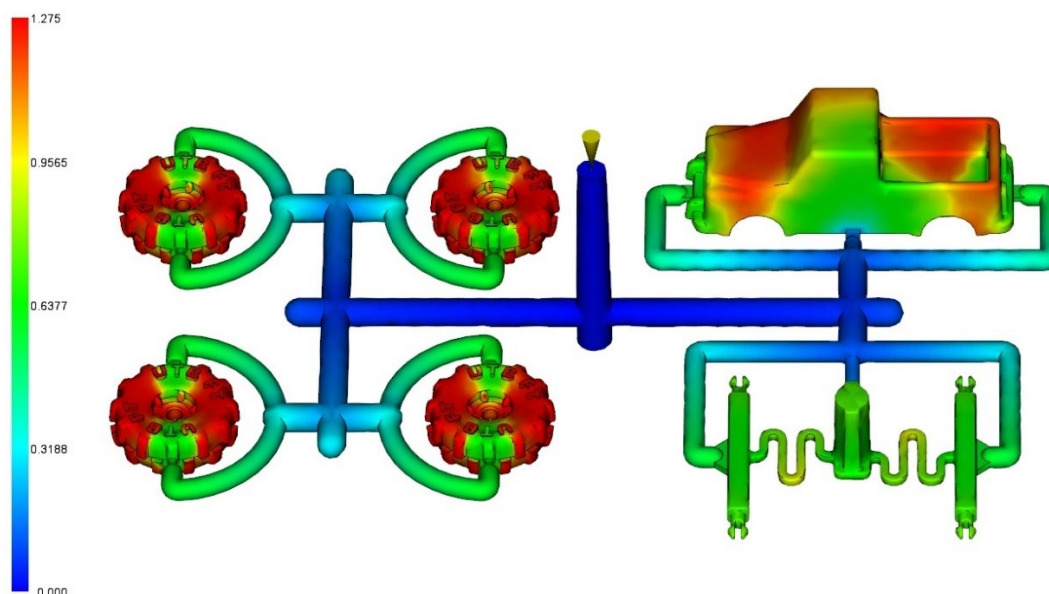
Tokové analýzy byly prováděny pro vybraný materiál LITEN MB 71. Vstřikovací tlak byl nastaven na 180 MPa při teplotě taveniny 240 °C a teplotě formy 40 °C. Výsledky analýz pro vtokové systémy vyobrazené na obrázku č. 37 jsou zpracovány v tabulce č. 3.

Tabulka 3 *Vybrané výsledky tokové analýzy pro dané vtokové soustavy*

Vtokový systém	Čas plnění [s]	Pravděpodobnost vyplnění dutiny [-]	Teplota na čele taveniny [°C]	Maximální vstřikovací tlak [MPa]
A.1	1,579	nízká	208,5	35,25
A.2	2,180	nízká	204,9	33,61
A.3	1,061	vysoká	230,7	13,68
A.4	1,164	střední	227,5	11,42
B.1	1,401	vysoká	232,1	20,99
B.2	1,291	střední	224	20,52
B.3	1,404	střední	225,9	22,26
B.4	1,275	vysoká	234,1	15,26

Po zhodnocení výsledků analýzy byla vybrána varianta B.4 jako finální, a to především proto, že pravděpodobnost vyplnění byla dle simulace 100 % a teplota na čele taveniny dosahovala nejvyšších hodnot ze všech testovaných variant

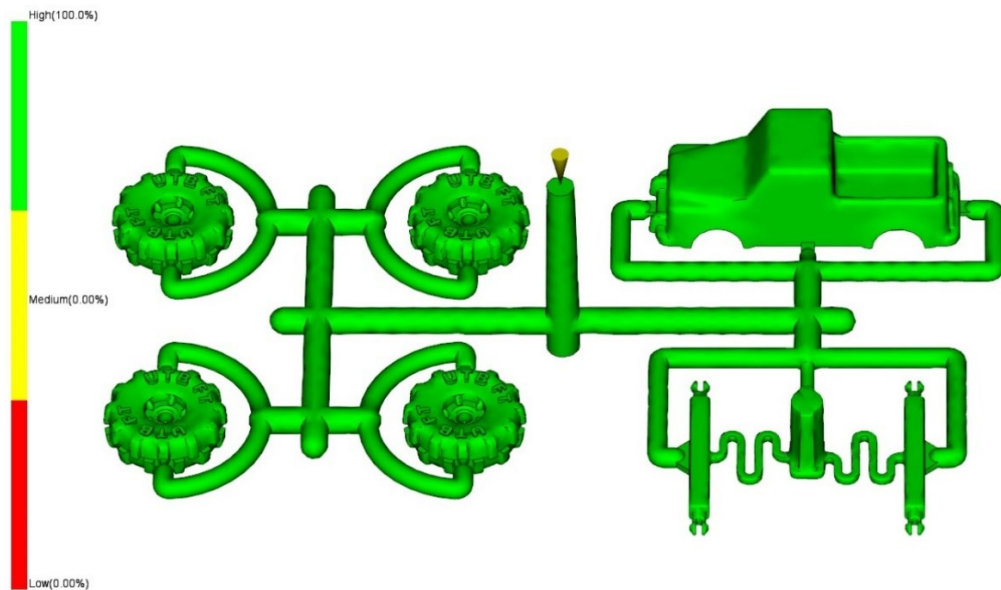
6.4.1 Čas plnění formy vybrané varianty



Obr. 38 čas plnění formy

Ze simulace je zřejmé, že ke kompletnímu vyplnění dutiny dojde za 1,275 s. Jednotlivé oblasti jsou zabarveny podle času, při kterém došlo k jejich zaplnění.

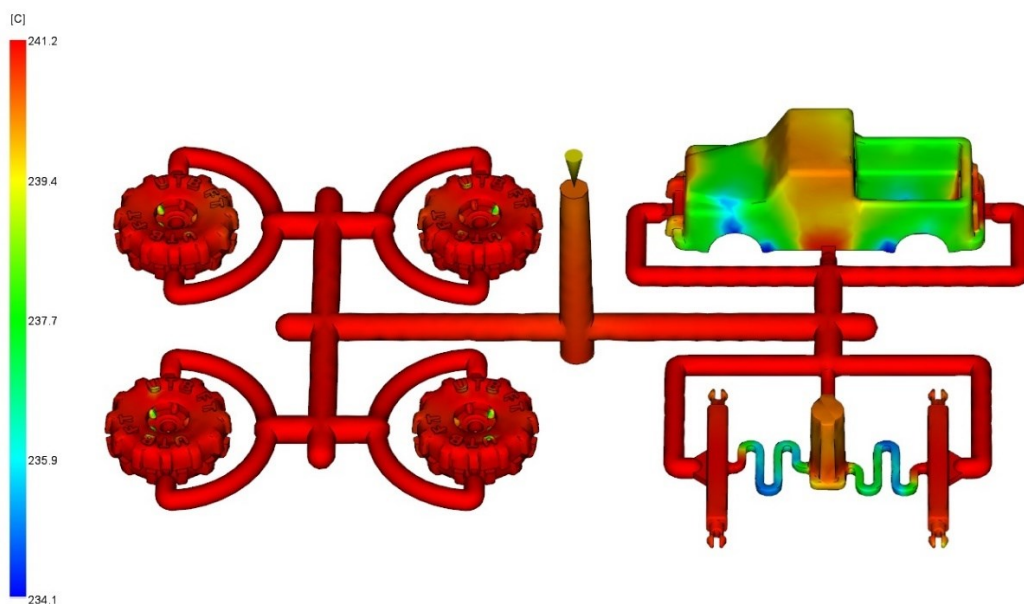
6.4.2 Jistota vyplnění dutiny formy vybrané varianty



Obr. 39 Jistota vyplnění dutiny formy

Analýza jistoty vyplnění dutiny zjišťuje pravděpodobnost, s jakou dojde ke kompletnímu vyplnění dutiny. Výsledek naší simulace dává najevo, že k vyplnění formy dojde s naprostou jistotou. Objevily by se v modelu vstřikovaného dílu žluté nebo červené oblasti, znamenalo by to, že výrobek bude mít zhoršenou kvalitu nebo vůbec nedojde k vyplnění tvarové dutiny.

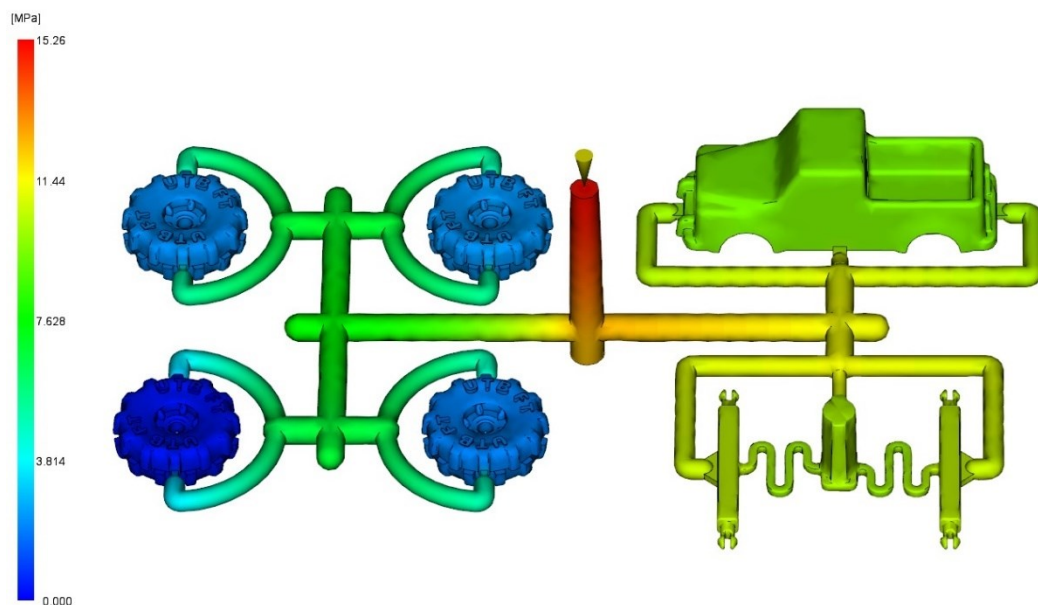
6.4.3 Teplota čela taveniny u vybrané varianty



Obr. 40 Teplota čela taveniny

V případě termoplastů je tavenina při průchodu dutinou formy ochlazována kontaktem s temperovanou formou, která má nižší teplotu než polymer. Analýza teploty čela taveniny proto zjišťuje, o kolik se čelo taveniny ochladí při toku dutinou. Obecně je žádoucí, aby měla tavenina při plnění formy co nejstabilnější teplotu. Příliš vysoký teplotní spád by mohl vést k neúplnému vyplnění formy anebo přispět ke vzniku studených spojů, které mají za následek zhoršení mechanických vlastností výrobku. Naopak zvýšení teploty taveniny během toku formou může vést k degradaci vstřikovaného polymeru.

6.4.4 Vstřikovací tlak na konci fáze plnění dutiny

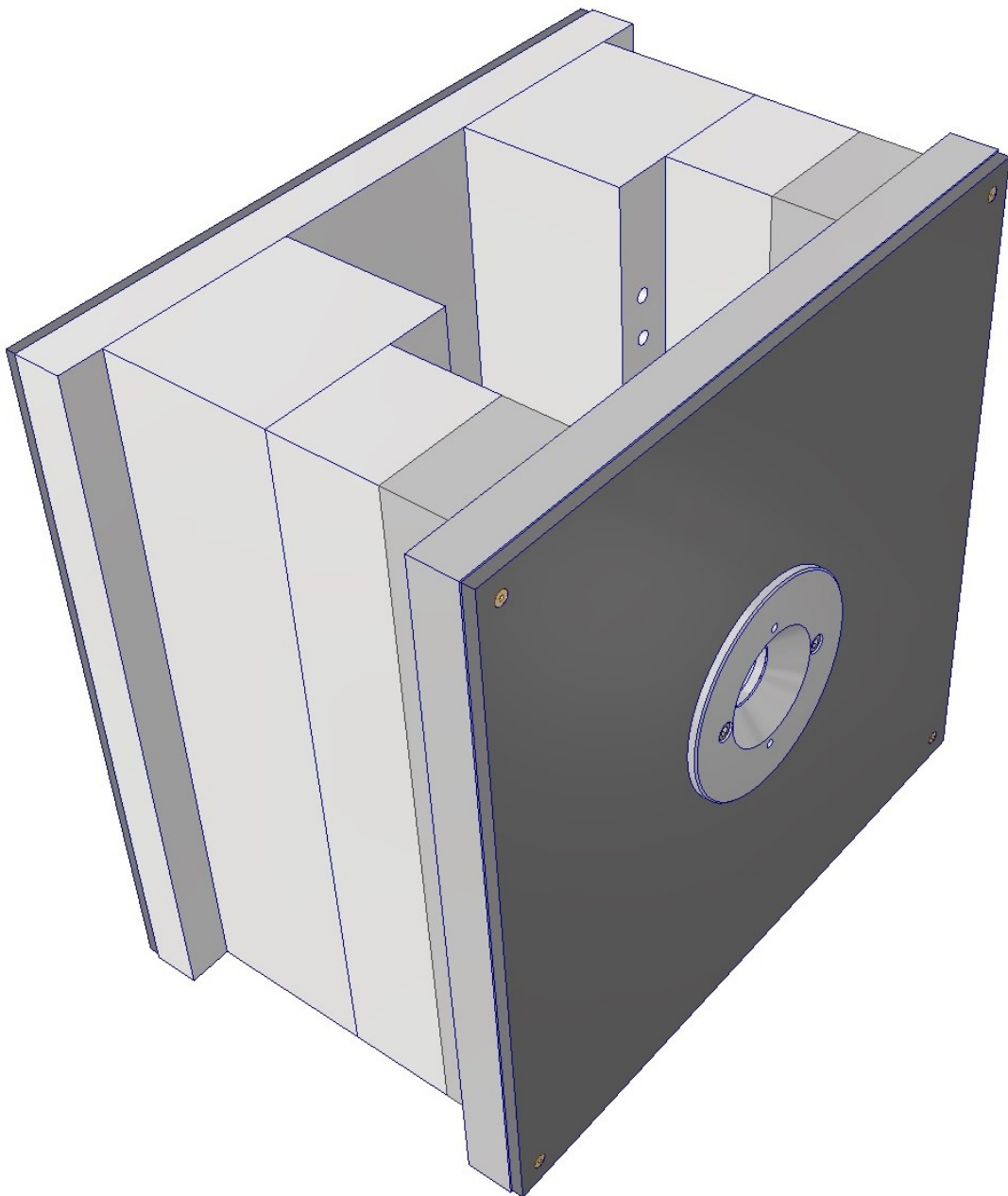


Obr. 41 Vstřikovací tlak na konci fáze plnění dutiny

Na začátku vstřikovacího cyklu při fázi plnění je v dutině formy prudce zvyšován tlak až do doby, než je docíleno její úplné vyplnění. Po zaplnění dutiny klesá tlak a následuje fáze dotlaku. Analýza maximálního vstřikovacího tlaku zjišťuje tlak právě v tento moment. Zároveň také ukazuje distribuci tlaku po zaplnění dutiny formy taveninou. Nerovnoměrné rozložení tohoto tlaku v jednotlivých tvarových dutinách může mít za následek deformaci vstřikovaného dílu.

7 NÁVRH A KONSTRUKCE FORMY

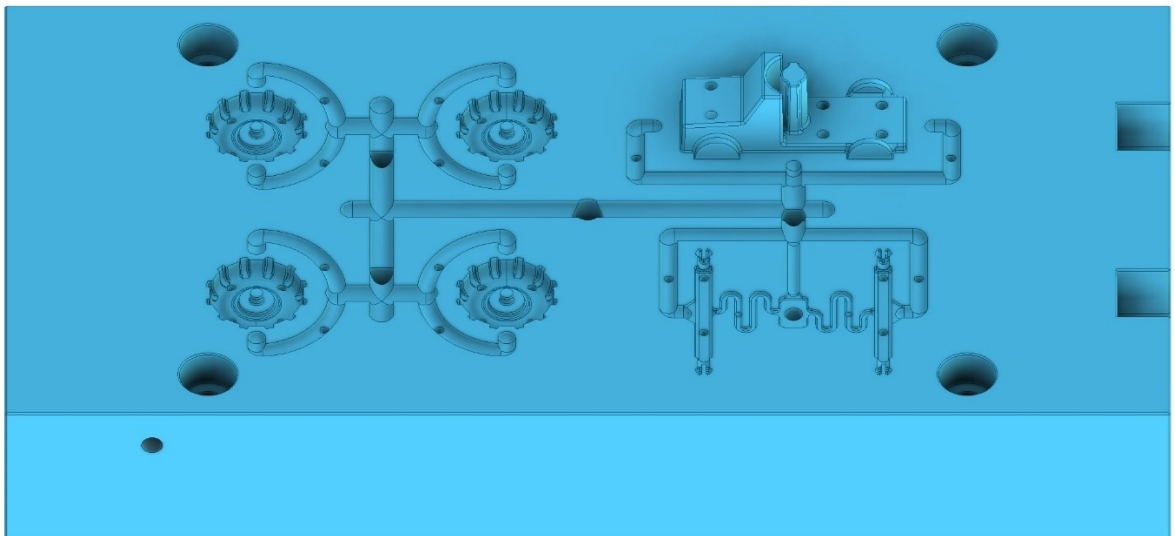
Při konstrukci vstřikovací formy byl použit univerzální rám, kterým disponuje Fakulta technologická. Konstrukce rámu umožňuje výměnu pouze tvarových desek spolu s vyhazovacím systémem a vtokovou vložkou. Tento systém je užíván pro malosériové díly a experimentální výrobu, protože je finančně méně nákladný než konstrukce jednoúčelové formy. Pro konstrukci formy byly dále použity normálie z katalogů společnosti HASCO a Meusburger.



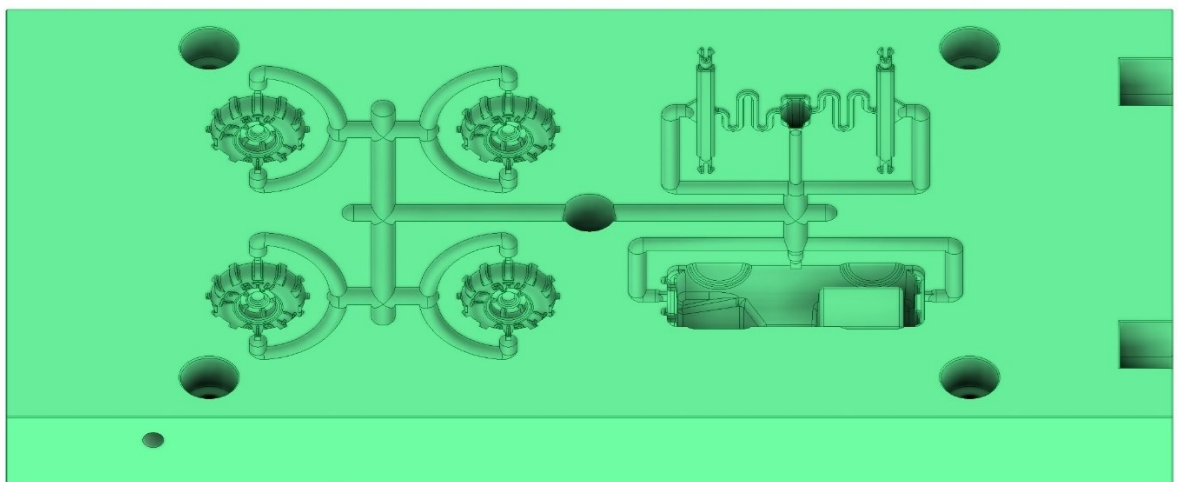
Obr. 42 Univerzální rám formy

7.1 Tvarové vložky

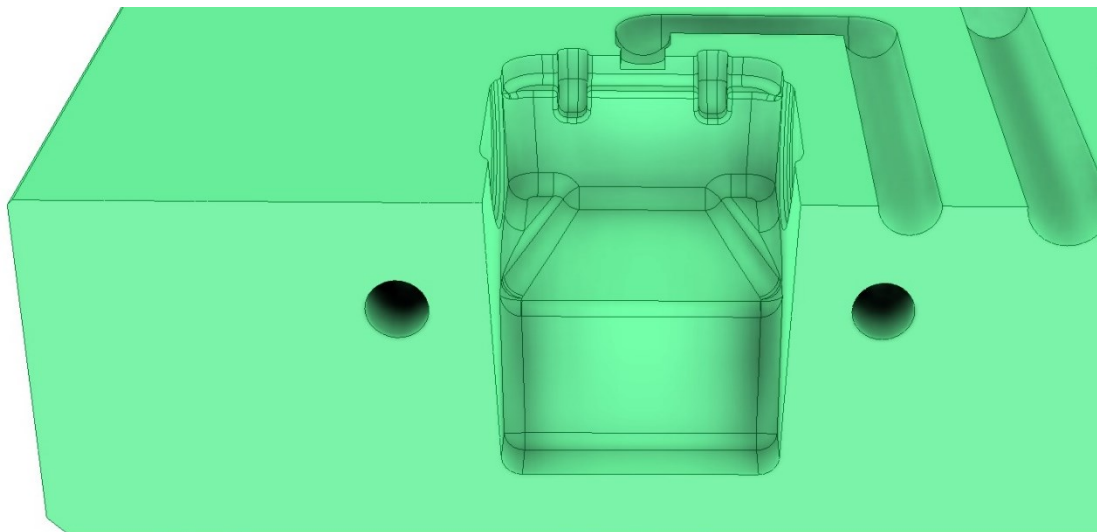
Tvarové vložky jsou desky obsahující dutiny ve tvaru negativu vstříkovaných dílů, které se skládají z pravé strany v podobě tvárníku a levé strany v podobě tvárnice. Vzhledem ke konstrukční variantě formy o dvou deskách musí tvarové desky obsahovat také rozvodné kanálky. Nástrojová ocel 1.2312 (ČSN 19 552) byla zvolena jako materiál pro výrobu tvarových vložek. Tvárník má rozměry 396 x 196 x 62 mm a tvárnice 396 x 196 x 35 mm. V obou tvarových vložkách jsou vyfrézovány vybrání pro zapuštění přípojek temperačního systému, díky čemuž se předchází jejich poškození při manipulaci s formou.



Obr. 43 *Tvárník*



Obr. 44 *Tvárnice*

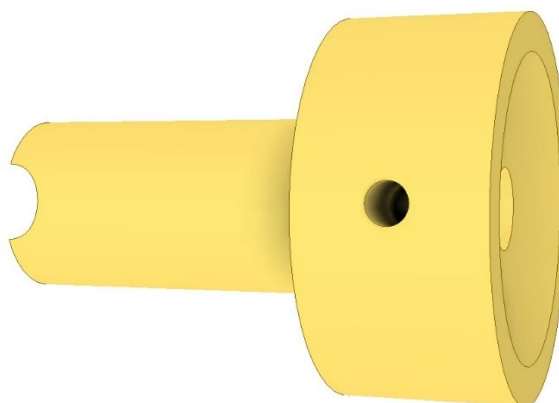


Obr. 45 Řez tvárnici

Všechny plochy kolmé na dělicí rovinu byly zkoseny pod úhlem 1° pro bezproblémové odformování. Hrany dosedacích ploch obou tvarových vložek byly sraženy $2 \times 45^\circ$ pro zajištění paralelního upnutí s rámem stroje.

7.2 Vtoková vložka

Vtoková vložka slouží k dopravení taveniny od trysky vstřikovacího stroje do rozváděcích kanálků a následně do dutiny formy. Je vložena do pravé upínací desky a tvárnice, přičemž v upínací desce je kolík, který vsunutím do vtokové vložky brání její pootočení.

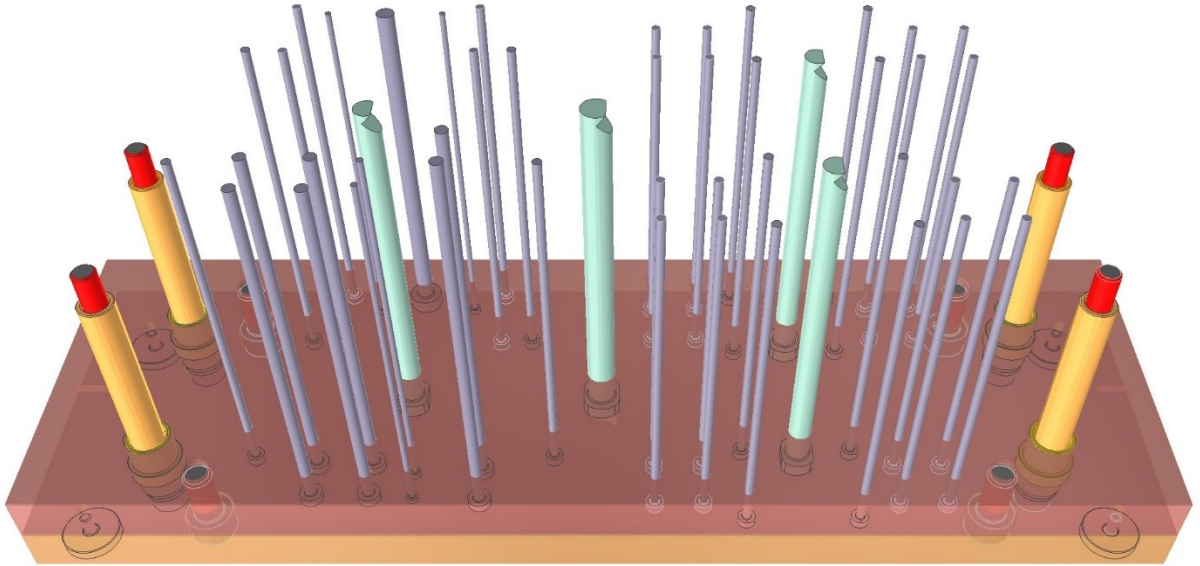


Obr. 46 vtoková vložka

Dle tokové analýzy bylo zjištěno, že optimální vnitřní průměr vtokové trysky je 10 mm u ústí do vtokového kanálku. Takovýto průměr v kombinaci s rozměry vložky převzatými z otvorů v deskách univerzálního rámu ovšem není standardně nabízen v katalogích výrobců normálií. Proto bylo rozhodnuto, že vtoková vložka bude vyrobena z plného polotovaru vtokového pouzdra z nabídky společnosti HASCO, a to konkrétně Z50/18x36.

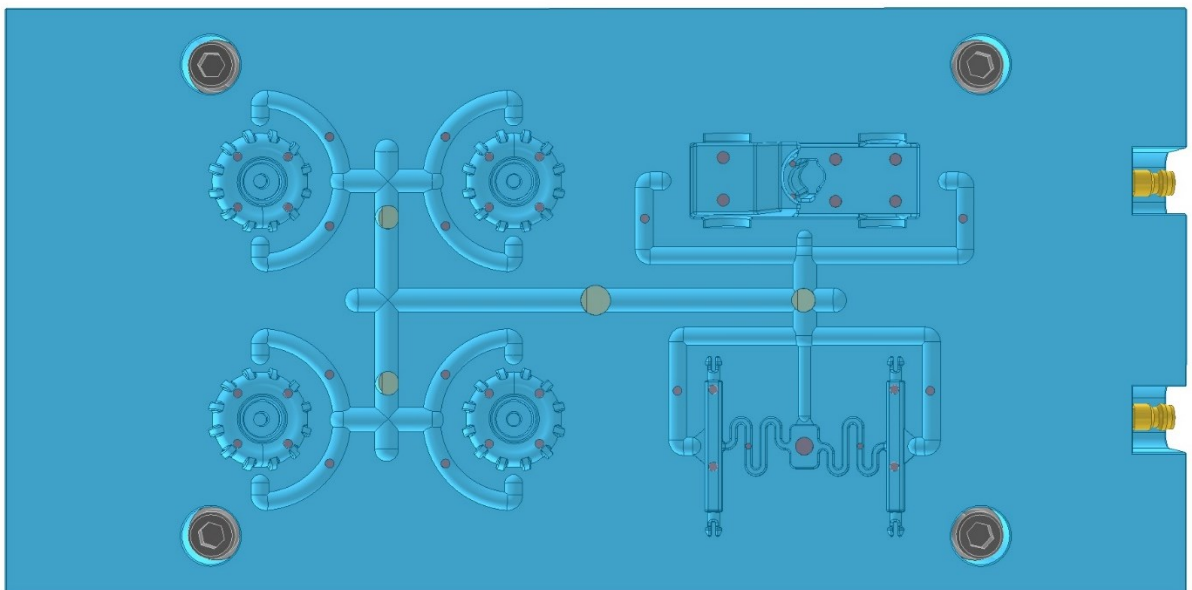
7.3 Vyhazovací systém

Vyhazovací systém má za úkol vyhození vstříknutých dílů po zatuhnutí taveniny v dutině formy. Toho je docíleno pomocí válcových vyhazovačů, které jsou upevněny mezi opěrnou a kotevní vyhazovací deskou.



Obr. 47 Vyhazovací systém

Správné umístění vyhazovačů v dutině formy je zásadní kritérium pro správné fungování vyhazovacího systému. Musí být rozmístěny tak, aby došlo k správnému vyhození výstřiku a aby se předešlo jeho deformaci nebo jiného poškození.

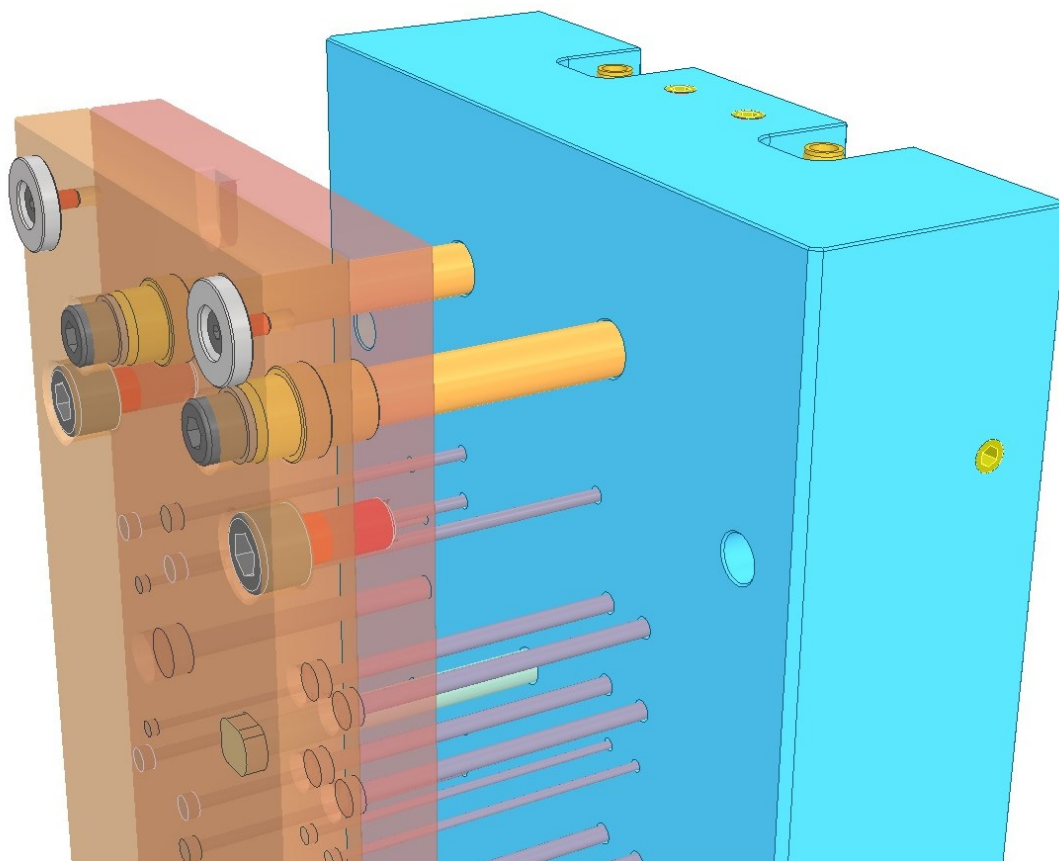


Obr. 48 Umístění vyhazovačů v tvarové dutině

Byly použity válcové vyhazovače E1710 od firmy Meusburger o průměrech 2, 3, 4 a 6 mm. Vzhledem k tomu, že vyhazovače zanechávají na vstřikovaném dílu po odformování stopy, byly umístěny tak, aby doléhaly na nepohledové strany výstřiků. Kvůli rozvětvení vtokového systému bylo nutno umístit vyhazovače i do míst rozvodných kanálků, aby se zajistilo kompletní vyhození dílů i s vtokovou soustavou.

7.3.1 Vodící elementy vyhazovacího systému

Plynulý pohyb a vystředění vyhazovacích desek je zajištěno použitím vodící jednotky E1064 od společnosti Meusburger. Jedná se o normálii skládající se z vodícího pouzdra, vodící trubky, šroubu a podložky, která je dodávána jako celek. Vodící pouzdro je umístěno mezi vyhazovacími deskami a vodící trubka je připevněna k tvarové vložce tvárníku pomocí šroubu. Toto konstrukční řešení bylo zvoleno kvůli použití univerzálního rámu, který nemá vodící elementy v levé upínací desce.

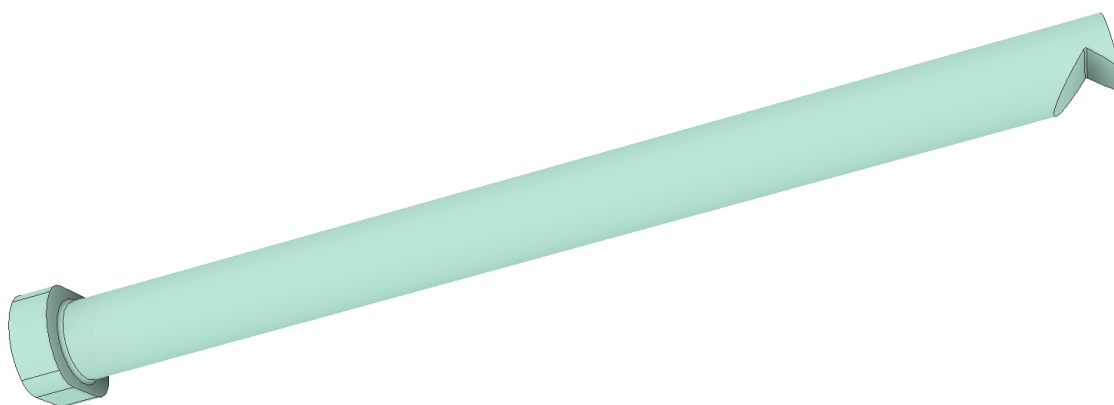


Obr. 49 Vodící elementy vyhazovacího systému

7.3.2 Přidržovače vtokového systému

Při otevření formy je důležité, aby vstříkované díly spolu s vtokovou soustavou zůstaly v levé pohyblivé části formy, čímž je umožněno správné vyhození součásti vyhazovacím systémem. K tomuto účelu jsou používány přidržovače vtokového systému, které většinou fungují i jako vyhazovače vtokové soustavy.

V našem případě byly použity celkem 4 přidržovače o průměru 10 a 8 mm, které mají na svém konci vyfrézovaný podkos. Při plnění dutin formy zateče tavenina do tohoto vybrání a po ztuhnutí zamezí oddělení celého výstřiku od tvárníku až do doby, než je vyhazovacím systémem vysunut. Na jejich výrobu byly použity válcové vyhazovače E1712 průměru 8 a 10 mm od firmy Meusburger. Tyto normálie jsou již opatřeny pojištěním proti jejich pootočení, což je důležitým požadavkem pro správné fungování přidržovačů.



Obr. 50 přidržovač vtoku

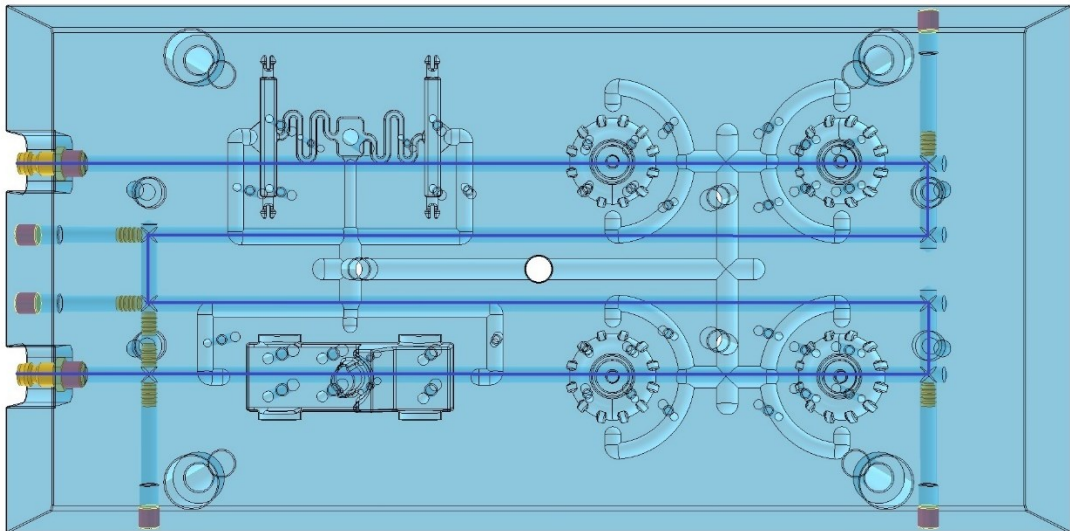
7.4 Odvzdušnění

Při plnění formy klade vzduch v její dutině odpor vstříkovanému polymeru a je stlačován před čelem taveniny. Není-li tento vzduch veden pryč z dutiny formy, může tento jev mít za následek zhoršenou kvalitu vstříkovaného výrobku. Pro zajištění odvodu stlačovaného vzduchu bývají zhotoveny odvzdušňovací kanálky v tvarových vložkách nebo je využita vůle mezi tvárníkem a vyhazovači, jako je tomu i v našem případě.

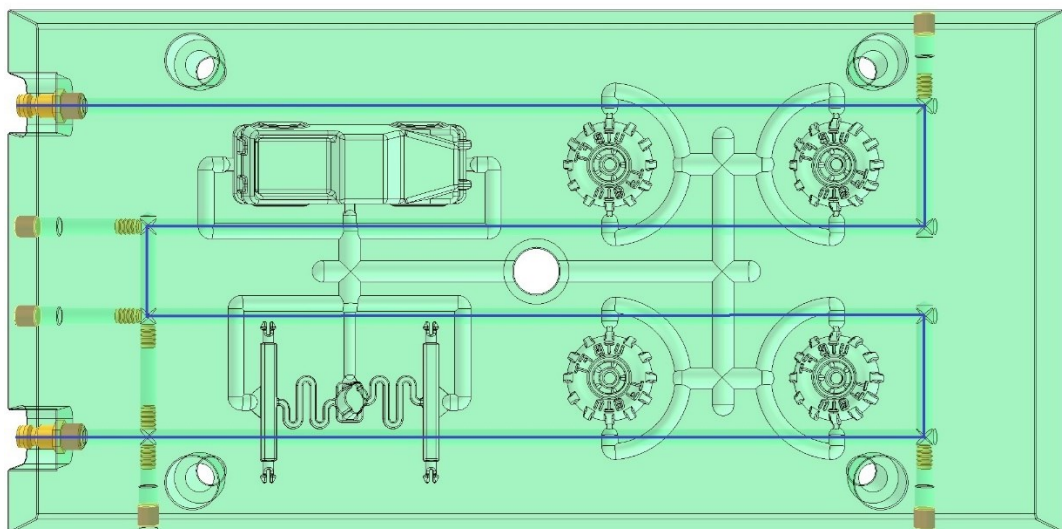
7.5 Temperační systém

Úkolem temperačního systému je odvádět z povrchu dutiny formy za pomoci temperačního média teplo, které je předané taveninou během procesu termoplastického vstřikování. Je snaha navrhnout tento systém tak, aby výkyvy teplot byly co nejmenší. Příliš velké teplotní variace mají za následek prodloužení vstřikovacího cyklu v důsledku dlouhého tuhnutí taveniny v dutině formy a negativní vlastnosti vstřikovaných dílů.

Temperační systém byl realizován pomocí dvou samostatných sériových okruhů skládajících se z vrtaných kanálků o průměru 6 mm v tvarových vložkách tvárníku a tvárnice. Okruhy jsou připojeny k temperační jednotce pomocí přípojek Meusburger E2000. Pro zaslepení děr byly použity záslepky E2078 a uzavírací šrouby E2080.



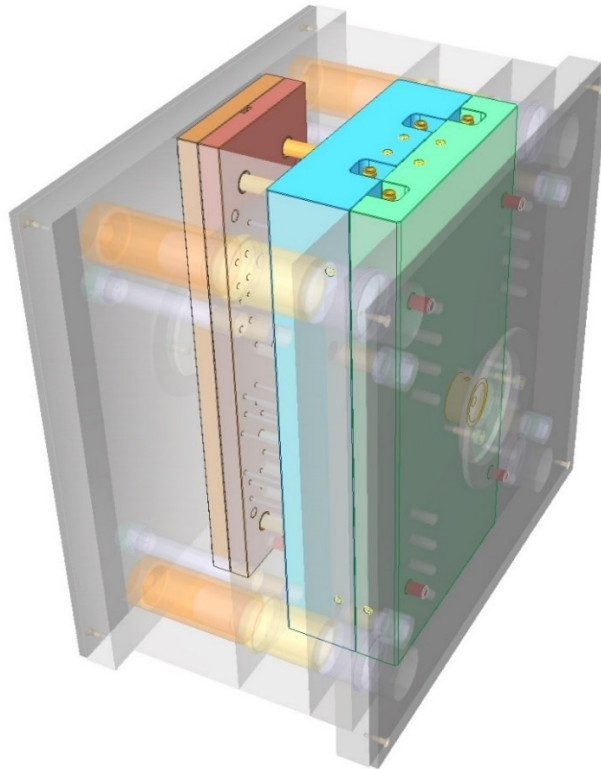
Obr. 51 Temperační okruh tvárníku



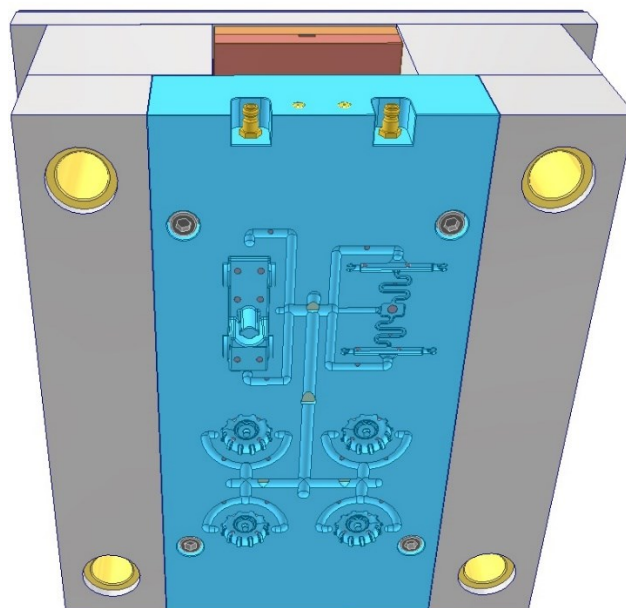
Obr. 52 Temperační okruh tvárnice

7.6 Sestava vstříkovací formy

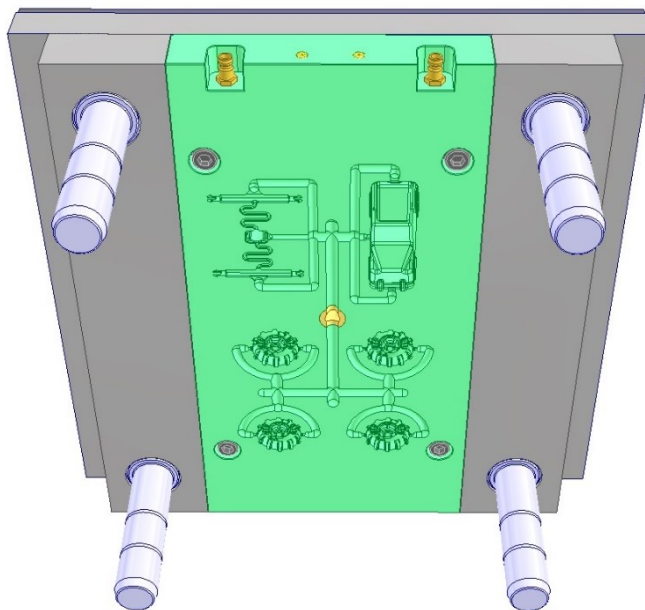
Tvárník je uchycen v rámu formy pomocí šroubů Meusburger E1200/10 x 70, tvárnice pomocí E1200/10 x 40 s použitím podložek E 15662/19. Ovládání vyhazovacích desek je realizováno pomocí spojkového čepu, který je našroubován v základní vyhazovací desce. Tento spojkový čep je následně spojen s vyhazovacím systémem vstříkovacího stroje.



Obr. 53 Sestava formy



Obr. 54 Pohled do levé části formy



Obr. 55 Pohled do pravé části formy

7.7 Vstřikovací stroj

Vstřikovací stroj byl vybrán od firmy Arburg, konkrétně model Allrounder 470 E 1000-290 (GE). Tento model je součástí strojového vybavení laboratoře Ústavu Výrobního Inženýrství Fakulty Technologické.

Tabulka 4 Vybrané parametry vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 470 E 1000-290 (GE) [26]

	PARAMETR	HODNOTA	JEDNOTKA
UZAVÍRACÍ JEDNOTKA	Vzdálenost mezi sloupky	470 x 470	mm
	Výška formy	250–500	mm
	Maximální rozměr upínací desky	637 x 637	mm
	Maximální zdvih vyhazovačů	175	mm
	Maximální vyhazovací síla	40	kN
	Maximální uzavírací síla	1000	kN
	Maximální hmotnost pohyblivé části formy	760	kg
VSTŘIKOVACÍ JEDNOTKA	Průměr šneku	35	mm
	Délka šneku	20	L/D
	Vstřikovací tlak	2000	bar
	Maximální kalkulovaný objem materiálu	144	cm ³



Obr. 56 Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 470 E 1000-290 (GE) [26]

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce byl návrh propagačního předmětu pro Fakultu technologickou Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a konstrukce vstřikovací formy pro tento předmět. Práce se dělí na dvě části, a to na praktickou a teoretickou.

V teoretické části je zpracována literární rešerše na téma vstřikování polymerních materiálů.

V praktické části byl nejdříve vybrán předmět vícedílného autíčka pro děti, který měl plnit reklamní funkci. Nejdůležitějším kritériem při výběru předmětu byla jeho schopnost zaujmout. Proto bylo zvolen design s odpružením ve střední části rámu auta. Následně bylo vyhotoveno několik koncepčních návrhů v programu Autodesk Inventor Professional 2023, které byly otestovány pomocí 3D tisku.

Po vyhotovení konečného designu auta bylo nutno navrhnout vstřikovací formu pro tento výrobek. Pro méně složitou a nákladnou konstrukci byl použit univerzální rám vstřikovací formy, kterou disponuje Fakulta technologická. Pro tento rám bylo nutno zkonstruovat tvarové vložky a vyhazovací systém.

Prvním krokem při konstrukci formy bylo navrhnout studený vtokový systém pro daný rám. Po zhotovení několika variant vtokového systému byly tyto verze podrobeny tokové analýze v programu Autodesk Moldflow Adviser 2024. Pomocí této analýzy byl vybrán jeden vtokový systém s nejhodnějšími výsledky, který byl použit pro výslednou formu. Následně byly zkonstruovány tvarové vložky pro univerzální rám spolu s vyhazovacím systémem. Temperační systém byl zvolen formou dvou oddělených sériových okruhů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] YOUNG, Robert Joseph a Peter A. LOVELL. *Introduction to polymers*. 3rd ed. Boca Raton: CRC, c2011. ISBN 978-084-9339-295.
- [2] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. Verze knihy: 15. [Online]: [Code Creator], 2015. ISBN 978-80-88058-66-3.
- [3] REGAN, Emil. *Vstrekovanie a spracovanie plastických hmôt*. Prešov : Fakulta výrobných technológií Technickej univerzity, 2008.: FVT TU, 2008. ISBN 978-80-553-0102-0.
- [4] RUDIN, Alfred a Phillip Yip-Kam CHOI. *The elements of polymer science and engineering*. 3rd ed. Waltham: Academic Press, c2013. ISBN 978-0-12-382178-2.
- [5] FAKIROV, Stojko Christov. *Fundamentals of polymer science for engineers*. Weinheim: Wiley-VCH, [2017]. ISBN 978-3-527-80217-3.
- [6] RAVVE, A. *Principles of polymer chemistry*. 3rd ed. New York: Springer, c2012. ISBN ISBN978-1-4614-2211-2.
- [7] LENFELD, Petr. *Technologie II. - Vstřikování plastů* [online]. In: . 2009 [cit. 2024-03-05]. Dostupné z: https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [8] TRES, Paul A. *Designing Plastic Parts for Assembly*. 9th Edition. 2021. ISBN 978-1-56990-820-4.
- [9] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0617-6.
- [10] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-802-7106-141.
- [11] LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování* [online]. [cit. 2024-05-03]. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/02.html>
- [12] VALERO, José R. Lerma. *Plastics Injection Molding - Scientific Molding, Recommendations, and Best Practices*. Hanser Publishers, 2000. ISBN 978-1-56990-689-7.
- [13] MARTURANO, Valentina, Pierfrancesco CERRUTI a Veronica AMBROGI. 5. Polymer additives. *Polymer Engineering* [online]. De Gruyter, 2017, 139-170 [cit. 2024-03-17]. ISBN 9783110469745. Dostupné z: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/9783110469745-005/html>
- [14] AUSPERGER, Aleš. *Technologie zpracování plastů* [online]. [cit. 2024-03-16]. ISBN 978-80-88058-77-9. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/Cover.html>
- [15] BOBEK, Jiří. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů* [online]. [cit. 2024-03-17]. ISBN 978-80-88058-65-6.
- [16] GOODSHIP, Vanessa, Bethany MIDDLETON a Ruth CHERRINGTON. *Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality, Structural Composites, Injection Molding, and 3D Printing*. Elsevier, 2016. ISBN 978-0-323-34061-8.
- [17] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2021. ISBN 978-80-271-1294-4.
- [18] CATOEN, Bruce a Herbert REES. *Injection mold design handbook*. Hanser publishers, 2021. ISBN 978-1-56990-815-0.

- [19] SEIDL, Martin. *Stroje pro zpracování polymerních materiálů* [online]. [cit. 2024-03-23]. ISBN 978-80-88058-71-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/Impresum.html>
- [20] GOODSHIP, Vanessa. *Practical Guide to Injection Moulding*. 2nd Edition. Smithers Rapra, 2017. ISBN 978-1-91024-294-0.
- [21] LANXESS Inc. *Engineering Plastics: Part and Mold Design* [online]. [cit. 2024-03-23]. Dostupné z: https://techcenter.lanxess.com/scp/americas/en/docguard/Part_and_Mold_Design_Guide.pdf?docId=77015
- [22] KAMAL, Musa R., Avram ISAYEV a Shih-Jung LIU. *Injection moulding Technology and Fundamentals*. Technology and Fundamentals, 2009. ISBN 978-3-446-41685-7.
- [23] BEAUMONT, John P. *Runner and Gating Design Handbook - Tools for Successful Injection Molding*. 3rd Edition. Hanser Publishers, 2019. ISBN 978-1-56990-590-6.
- [24] MEUSBURGER. [online]. [cit. 2024-03-24]. Dostupné z: <https://ecom.meusburger.com/>
- [25] PE-LITEN. *Technický list PE-HD LITEN MB 71* [online]. [cit. 2024-05-11]. Dostupné z: https://www.pe-liten.com/Liten/media/Content/PDF_CZ/TDS-Liten-MB-71-CZ.pdf
- [26] *Arburg* [online]. [cit. 2024-05-15]. Dostupné z: <https://www.arburg.com/cs/cz/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

T_g	Teplota skelného přechodu
T_m	Teplota tání
%	Procento
UV	Ultrafialové
TPE	Termoplastický elastomer
Mm	Milimetr
g	Gram
T_{tav}	Teplota taveniny
PVC	Polyvinylchlorid
R	Radius
°	Stupeň
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
3D	Trojdimenzionální
č.	Číslo
HDPE	High density polyethylene
kg/m^3	Jednotka hustoty
MPa	Megapascal
kJ/m^2	Jednotka vrubové houževnatosti

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1</i> Struktura řetězce polymerů [1]	12
<i>Obr. 2</i> Schéma nadmolekulární struktury polymerních materiálů [2].....	13
<i>Obr. 3</i> Zátka z TPE vyrobená s použitím nadouvaděl [2].....	16
<i>Obr. 4</i> Vstřikovací cyklus [15]	17
<i>Obr. 5</i> Princip procesu plnění formy [11]	18
<i>Obr. 6</i> Schéma vstřikovacího stroje [18]	20
<i>Obr. 7</i> Schéma šroubu vstřikovací jednotky [20].....	22
<i>Obr. 8</i> Hydraulická uzavírací jednotka [16].....	22
<i>Obr. 9</i> Dvoudesková vstřikovací formy [15].....	23
<i>Obr. 10</i> Schéma dvoudeskové formy s dvěma tvarovými dutinami [21].....	24
<i>Obr. 11</i> Schéma třídeskové formy v otevřené pozici [21]	25
<i>Obr. 12</i> Schéma vtokové vložky s vstřikovací tryskou [21].....	26
<i>Obr. 13</i> Schéma optimálních tvarů rozváděcích kanálků [23]	27
<i>Obr. 14</i> Plný kuželový vtok [23].....	28
<i>Obr. 15</i> Bodový vtok [21].....	29
<i>Obr. 16</i> Věžířové (1) a zvonové ústí (2) [15].....	29
<i>Obr. 17</i> Filmový vtok [15].....	30
<i>Obr. 18</i> Tunelový vtok [21]	30
<i>Obr. 19</i> Talířový vtok [21]	31
<i>Obr. 20</i> Vyhození součásti válcovým a nožovým kolíkem [21]	32
<i>Obr. 21</i> Vyhození součásti pomocí stírací desky [21].....	33
<i>Obr. 22</i> Varianty uspořádání temperančního okruhu [21].....	35
<i>Obr. 23</i> Pozice odvzdušňovacích kanálků podél dělicí roviny tvarové dutiny [21].....	36
<i>Obr. 24</i> Model Kabiny	40
<i>Obr. 25</i> Pohled na spodní část kabiny	41
<i>Obr. 26</i> Model kola s dělicí rovinou	41
<i>Obr. 27</i> Spojení kola s rámem	42
<i>Obr. 28</i> První prototyp rámu	43
<i>Obr. 29</i> Druhý prototyp rámu.....	43
<i>Obr. 30</i> Třetí prototyp rámu	44
<i>Obr. 31</i> Finální rám.....	44
<i>Obr. 32</i> Sestava auta.....	45
<i>Obr. 33</i> Umístění dílů v dělicí rovině	47
<i>Obr. 34</i> Analýza umístění vtokového ústí kola.....	48

<i>Obr. 35</i> Analýza umístění vtokového ústí kabiny	48
<i>Obr. 36</i> Analýza umístění vtokového ústí rámu	49
<i>Obr. 37</i> Varianty vtokového systému	50
<i>Obr. 38</i> čas plnění formy	51
<i>Obr. 39</i> Jistota vyplnění dutiny formy	52
<i>Obr. 40</i> Teplota čela taveniny.....	52
<i>Obr. 41</i> Vstřikovací tlak na konci fáze plnění dutiny.....	53
<i>Obr. 42</i> Univerzální rám formy	54
<i>Obr. 43</i> Tvárník.....	55
<i>Obr. 44</i> Tvárnice	55
<i>Obr. 45</i> Řez tvárnící.....	56
<i>Obr. 46</i> vtoková vložka	56
<i>Obr. 47</i> Vyhazovací systém	57
<i>Obr. 48</i> Umístění vyhazovačů v tvarové dutině	57
<i>Obr. 49</i> Vodící elementy vyhazovacího systému	58
<i>Obr. 50</i> přidržovač vtoku	59
<i>Obr. 51</i> Temperační okruh tvárníku	60
<i>Obr. 52</i> Temperační okruh tvárnice	60
<i>Obr. 53</i> Sestava formy	61
<i>Obr. 54</i> Pohled do levé části formy	61
<i>Obr. 55</i> Pohled do pravé části formy.....	62
<i>Obr. 56</i> Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 470 E 1000-290 (GE) [26].....	63

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Vlastnosti materiálu LITEN MB 71 [25]</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 2 zpracovatelské podmínky materiálu LITEN MB 71 [25]</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 3 Vybrané výsledky tokové analýzy pro dané vtokové soustavy</i>	<i>51</i>
<i>Tabulka 4 Vybrané parametry vstřikovacího stroje Arburg Allrounder 470 E 1000-290 (GE) [26]</i>	<i>62</i>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Materiálový list LITEN MB 71

Příloha P II: Model auta

Příloha P III: Model formy

Příloha P IV: Toková analýza