



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## VÝROBA KROUŽKU PALL

PALL RING MANUFACTURING

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Wajda

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ladislav Žák, Ph.D.

BRNO 2018

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Jakub Wajda</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	<b>Ing. Ladislav Žák, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Výroba kroužku Pall

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce bude zaměřena na technologii vstřikování plastů. Výstupem úkolu bude konstrukční řešení formy pro zadanou součástku.

### Cíle diplomové práce:

Posouzení technologičnosti výroby součásti.

Literární studie problematiky technologie vstřikování plastů a konstrukce forem.

Návrh technologie výroby součásti s potřebnými výpočty.

Konstrukční řešení formy.

Ekonomické zhodnocení.

### Seznam doporučené literatury:

DILLINGER, Josef. Moderní strojírenství pro školu i praxi. Praha: Europa-Sobotáles, 2007. ISBN 978-80-86706-19-1.

KOLOUCH, Jan. Strojírenské výrobky z plastů vyráběné vstřikováním. 1. vyd. Praha : SNTL, 1986. ISBN 04-247-86.

ŘEHULKA, Zdeněk. Konstrukce výlisků z plastů a forem pro zpracování plastů. Brno: Sekurkon, 2007. ISBN 978-80-86604-36-7.

SOVA, Miloš a Josef KREBS. Termoplasty v praxi. Praha: Verlag Dashöfer, 2001. ISBN 80-86229--5-7.

MENGES, Georg. How to make injection molds. 3rd ed. Munich: Hanser, 2001. ISBN 978-3-4-6-21256-5.

ERHARD, Gunter. Designing with plastics. Munich: Hanser, 2006. ISBN 9783446225909.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

WAJDA Jakub: Výroba kroužku Pall.

---

Práce předkládá návrh vstřikovací formy se studeným vtokovým systémem pro zhotovení součástky typu Pall kroužek z polypropylenu. Na základě studia dané problematiky byla jako nejvhodnější metoda výroby zvolena technologie vstřikování. Tvar součástky spolu s umístěním dělicí roviny rozhodly o způsobu vytvoření tvarové dutiny. Velikost výrobní série určila jako nejvýhodnější variantu dvojnásobnou formu. Byl proveden i výpočet rozměrů odvodušňovací drážky, volba vhodného vstřikovacího stroje a základní simulace. Ekonomická část práce potvrdila vhodnost použití studeného vtokového systému proti horkému.

Klíčová slova: Pall kroužek, vstřikování, forma, tvarová dutina, studený vtokový systém

## **ABSTRACT**

WAJDA Jakub: Production of Pall ring.

---

The project elaborated design of injection mould with a cold runner system for a creation of component type Pall ring made of polypropylene. Pursuant to of the literary pursuit a problem, the injection technology has been selected as the most suitable method of manufacturing. The proportions of the component along with the placement of the parting line determined the creation process of shaped cavity. The quantity of a manufacturing batch specified two-cavity as the most advantageous variant. The calculation of vent channel's measurements, the choice of befitting injection machine and a basic simulations had been conducted. The economic part of the thesis has confirmed the suitability of usage cold runner system instead of hot runner system.

Keywords: Pall ring, injection, form, shaped cavity, cold runner system

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

WAJDA, Jakub. *Výroba kroužku Pall*. Brno, 2018. 62 s, 8 výkresů, 10 příloh, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Ladislav Žák, Ph.D.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V ..... dne 21. 5. 2018

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu Ing. L. Žákovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se diplomové práce. Dále děkuji členům své rodiny za jejich trpělivost a ochotu poskytnout mi stálé zázemí po dobu mého studia.

## **OBSAH**

Zadání  
Abstrakt  
Bibliografická citace  
Čestné prohlášení  
Poděkování  
Obsah

<b>ÚVOD</b> .....	9
<b>1 ROZBOR ZADÁNÍ</b> .....	10
<b>1.1 Výrobní možnosti</b> .....	13
<b>2 VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ</b> .....	15
<b>2.1 Materiál</b> .....	17
2.1.1 Struktura,vlastnosti a rozdělení plastů.....	18
2.1.2 Polypropylen .....	22
<b>2.2 Vstřikovací forma</b> .....	23
2.2.1 Vtokový systém.....	25
2.2.2 Temperační systém.....	27
2.2.3 Vyhazovací systém a odvzdušnění.....	28
<b>2.3 Vstřikovací stroj</b> .....	30
<b>3 NÁVRH ŘEŠENÍ</b> .....	34
<b>3.1 Stanovení násobnosti formy</b> .....	35
<b>3.2 Odvzdušnění formy</b> .....	39
<b>3.3 Řešení konstrukce formy</b> .....	40
3.3.1 Řešení vtokového systému .....	41
3.3.2 Řešení temperace formy .....	43
3.3.3 Řešení vyhazovacího systému.....	45
3.3.4 Vedlejší systémy formy.....	46
<b>3.4 Volba vstřikovacího stroje</b> .....	48
<b>3.5 Analýzy a simulace</b> .....	50
<b>4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ HODNOCENÍ</b> .....	54
<b>5 ZÁVĚRY</b> .....	62

Seznam použitých zdrojů  
Seznam použitých symbolů a zkratk  
Seznam obrázků  
Seznam tabulek  
Seznam příloh  
Seznam výkresů



## ÚVOD [1], [2], [3], [5], [5], [6], [7]

Za posledních sto let urazil vývoj v oblasti výroby a zpracování plastů obrovský skok a umožnil tak plastům zařadit se mezi běžně používané materiály. Když se dnes kolem sebe rozhlédneme, nemůžeme si nevšimnout, že nás plastové výrobky doprovázejí v našem každodenním životě na každém kroku. S přetrvávajícím trendem nahrazovat konvenční materiály plasty, musí technologie zabývající se jejich zpracováním držet krok s požadavky kladenými na jejich kvalitu a tvarovou rozmanitost při udržení dostatečné produktivity výroby. Právě tato schopnost, vytvářet složitější tvary bez exponenciálního navýšení výrobních nákladů, dává plastům oproti běžně používaným kovovým materiálům velikou výhodu.

Výrobky z plastů lze zhotovovat jak obráběcími, tak i tvářecími technologiemi. Z důvodu nižších teplot tavení materiálu je ovšem výhodnější používat právě tváření. Metod v této oblasti je mnoho a většina z nich se stále uplatňuje v provozech, přesto je to právě vstřikování, které si vydobylo v této oblasti výsadní postavení nejvíce využívané technologie. Postupným vývojem od prvotních pístových vstřikovacích strojů, s mnoha omezeními, a forem se studeným vtokovým systémem se došlo ke šnekovým vstřikovacím strojům a formám s horkým vtokovým systémem, které umožnily vytvářet tvarově a rozměrově složité výrobky s vysokou kvalitou povrchu. Dosažení plně automatizovaného procesu umožnilo výrazné zvýšení produktivity výroby, při téměř identických vlastnostech výrobků.



Obr. 1 Ilustrační obrázky technologie vstřikování plastů [4], Foto: ARBURG [5],[6], [7].

## 1 ROZBOR ZADÁNÍ [1], [2], [8], [9], [10], [11], [12], [13]

Cílem práce je zhotovení konstrukčního řešení vstřikovací formy ke vstřikování termoplastů pro součást typu Pall kroužek, přičemž forma bude mít studený vtokový systém.

Nejprve by bylo vhodné Pall kroužek představit. Jedná se o součást, která je charakteristická svým vysokým povrchem vzhledem k objemu, který v prostoru zabírá, čehož se využívá v aplikacích, kde je potřeba zvýšit velikost stykové plochy mezi plynem a kapalinou.

Proces absorpce začíná přivedením kapaliny do průchozí uzavřené komory, ve které jsou na sobě v mnoha vrstvách navržené Pall kroužky. Kapalina stéká shora dolů po kroužcích, jejichž tvar ji rozvádí do prostoru na další kroužky o vrstvu níže. Žádoucí je, aby se takto kapalina rozprostřela na co největší množství kroužků

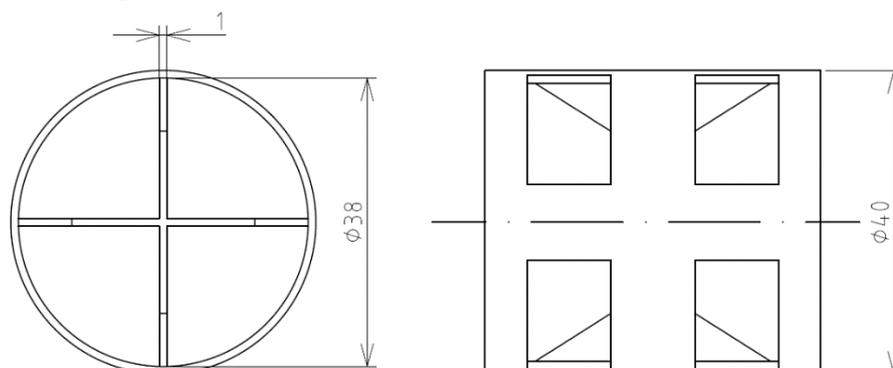


a zvětšila tak maximálně stykovou plochu mezi kapalinou a plynem. Plyn je do komory vhnán zdola nahoru. Při styku s kapalinou je z něj vypírána jedna nebo i více plynných složek. Pro větší efektivitu absorpčního procesu je vhodné umístit do řetězce několik průchozích komor, aby došlo k co největšímu navázání složky nebo složek na kapalinu. Praktickou průmyslovou aplikací jsou například sbsorbční benzolové pračky v koksárenském průmyslu, viz obrázek 2, kde je z koksárenského plynu vypírán benzol a naftalény pomocí praciho oleje.

Obr. 2 Benzolové pračky koksárenského průmyslu [10].

Jak je z popisu patrné, proces probíhá kontinuálně, a proto lze kroužky vyměňovat pouze při plánovaných opravách. Navíc v prostředí, kde některé z médií bývá chemicky agresivní, proto je jedním za základních požadavků, které jsou na Pall kroužek kladeny, chemická stálost a odolnost pro dané prostředí po dobu stanovené životnosti.

Existuje nepřehledné množství tvarových a rozměrových variací kroužků, které se liší podle požadavků zákazníka nebo nabídky výrobce. Konkrétní tvar dílce, viz obrázek 3, pro který bude navrhována forma, vznikl na základě úpravy původní součásti, kde byla mezi středy vnitřních křížů navíc vložena příčná podpora, jejíž existence zvyšovala konstrukční složitost formy. Rovněž prodlužovala délku součásti, čímž zbytečně narostl objem součásti při minimální změně povrchu, a proto bylo vhodné tento typ podpory odebrat. Došlo také k redukci počtu otvorů po obvodu součásti.



Obr. 3 Řešený tvar Pall kroužku.

Řešený tvar dílce je nutno zhodnotit i z hlediska splnění konstrukčních podmínek. Tloušťka stěny je v celém objemu dílce stejná, čímž je eliminováno rozdílné smrštění z důvodu různých tloušťek stěn, rovněž je tak zajištěna stejná a rovnoměrná rychlost proudu přivedené taveniny bez rizika hromadění materiálu. Z důvodu malé tloušťky je dílec opatřen žebry. U nich musí být splněna podmínka, že šířka žebra by měla být větší než polovina šířky stěny dílce, což je v případě řešené součásti splněno. Z hlediska zásad tvarového řešení by bylo vhodné opatřit ještě okraje kroužku zesílením v podobě lemu.

Sortiment materiálů, ze kterých je možno Pall kroužky vyrábět, je závislý na prostředí, do něhož jsou určeny. Mezi hojně používané materiály patří PP, PVC případně PVDF, HDPE. Pro tuto práci byl materiálem ke zhotovení součásti zvolen polypropylen, jehož základní vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1 Základní vlastnosti polypropylenu [1], [2], [9], [11], [12].

<b>Materiál:</b>	<b>Polypropylen (zkratka PP)</b>	
<b>Vlastnost:</b>	Upřesnění/ Symbol:	Hodnota:
<b>Hustota</b>	$\rho$	0,92 g·cm <sup>-3</sup>
<b>Viskozita</b>	$\eta$	střední
<b>Měrná tepelná vodivost</b>	$a_{eff}$	0,067 mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>
<b>Krystalinita</b>	podíl krystalické fáze ve struktuře	60 - 70 (75)%
<b>Teplota tání</b>	t	160 až 176°C
<b>Modul pružnosti v tahu</b>	E	1100 až 1500 MPa
<b>Pevnost v tahu</b>	R <sub>m</sub>	34 až 38 MPa
<b>Výrobní smrštění</b>	ve směru toku taveniny (radiální)	1,5 - 2,5 %
	kolmo na směr toku taveniny (tangenciální)	1,5 - 2,5 %

Polypropylen, viz obrázek 4, byl zvolen na základě toho, že na rozdíl od PVC nepůsobí na vstřikovací formu tak razantním korozním účinkem. Produkty koroze totiž způsobují zhoršení kvality povrchu vstřikovaného dílce, a proto je potřeba provádět častější údržbu stroje, což se projeví na době odstávek. Souhrn vstřikovacích parametrů, za kterých je vhodné polypropylen zpracovávat shrnuje tabulka 2.



Obr 4. Granulát polypropylenu [13].

Tab. 2 Vstřikovací parametry polypropylenu [12].

<b>Materiál:</b>	<b>Polypropylen (PP)</b>	
<b>Vstřikovací parametry:</b>	Upřesnění/ Symbol:	Hodnota:
<b>Teplota taveniny</b>	$T_M$	200 až 300°C
<b>Teplota formy</b>	$T_w$	20 až 100°C
<b>Střední vyhazovací teplota</b>	$T_e$	60 až 100°C
<b>Vstřikovací tlak</b>	$p_v$	80 až 140 MPa
<b>Dotlak</b>	$p_d$	50 až 90 MPa
<b>Zpětný tlak</b>	$p_z$	Do 50 MPa

Před použitím těchto parametrů k výpočtům, je nutno ověřit, zda součást, kterou hodláme vstřikovat, nelze považovat za tenkostěnnou a zda tedy není nutné uzpůsobit podmínky vstřikování. Z hlediska podmínky tloušťky stěny lze výrobek považovat za tenkostěnný, neboť tloušťka jeho stěn nepřesahuje 1,5 milimetru. Podmínku, z hlediska poměru délky tečení k tloušťce stěny materiálu, zatím nejsme schopni určit, její splnění bude třeba ověřit až výpočty. Pokud bude splněna i tato podmínka, bude nutno navýšit vstřikovací tlak nad 200 MPa.

Nutnost navržení vstřikovací formy rozhoduje o tom, že se výrobek bude vyrábět ve větších sériích, jinak by počáteční investice spojená s pořízením vstřikovacího stroje a formy byla nerentabilní. Z důvodu menších rozměrů výrobku a malé tloušťky jeho stěny, je také pravděpodobné, že velký podíl vstřikovaného materiálu bude vázaný ve vtokovém zbytku. Proto by bylo vhodné využít formu s horkým vtokovým systémem, čímž by se zabránilo vzniku vtokových zbytků a tím se zvýšila využitelnost materiálu. Nicméně navrhovaná forma bude mít studený vtokový systém.

Studený vtokový systém je ekonomicky výhodný především při menších sériích v řádech desítek tisíc kusů. Proto bude vhodné zvolit počet kusů někde z této oblasti, aby byla volba studeného vtokového systému odůvodnitelná. Při větších sériích už úspora materiálu ve vtokových zbytcích vyrovnává vyšší počáteční náklady na formu s horkým vtokem.

Volba vstřikovacího stroje se odvíjí od stanovení minimálních požadavků, které musí stroj splňovat. Jedná se o minimální hodnoty vstřikovací kapacity, plastifikační kapacity a přidržovací síly. Ty lze ovšem stanovit až na základě výpočtů pro danou formu. Žádnou z těchto hodnot nelze určit bez výpočtů, proto nelze v této fázi zvolit vstřikovací stroj.

Kvůli vyšším pořizovacím nákladům bude nutné z důvodu jeho maximální využitelnosti používat stroj ve vícesměnném provozu. Soupis parametrů spojených s výrobou udává tabulka 3.

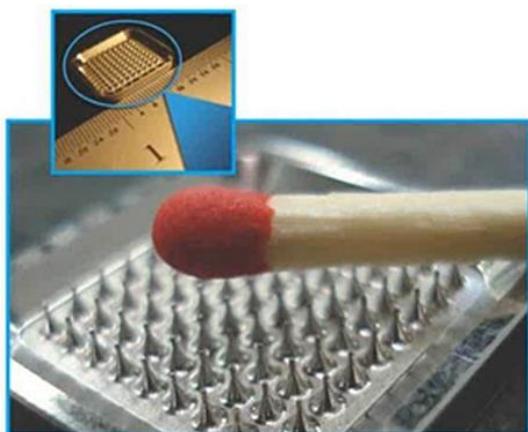
Tab. 3 Parametry výrobní série [1].

<b>Parametr:</b>	<b>Symbol:</b>	<b>Hodnota parametru:</b>
<b>Velikost výrobní série</b>	N	40.000 ks
<b>Faktor využití času</b>	K	0,7 až 0,9
<b>Směnnost provozu</b>	$S_m$	3
<b>Termín dodávky</b>	$T_p$	72 h (3 dny)

## 1.1 Výrobní možnosti [1], [2], [14], [15], [16], [17], [18], [19]

Při zvažování výrobních možností je potřeba brát v úvahu vhodnost technologie pro výrobu zadané součásti. Většina metod obrábění nepřichází v úvahu z důvodu tvarové složitosti a celkové velikosti součásti. Pro použití konvenčních metod tváření jsou zase problémem velmi malá tloušťka stěny a tvarová složitost součásti. Pro vytvoření Pall kroužku mohou být použity tyto technologie:

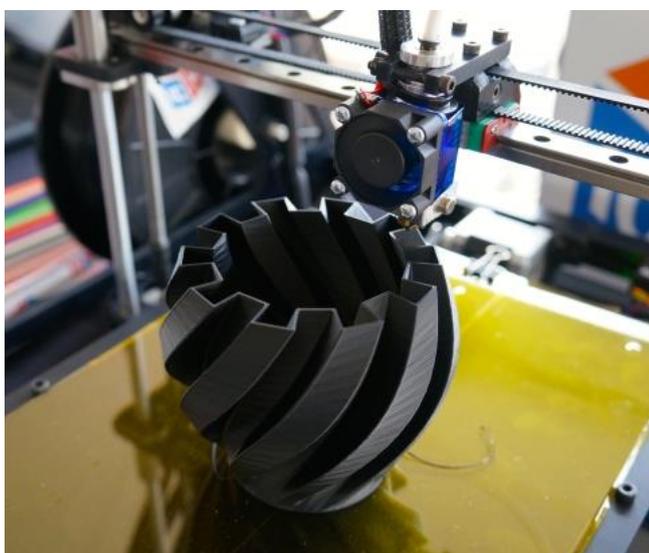
- Frézování a mikrofrézování - je metoda zhotovení výrobku odebráním přebytečného materiálu v podobě třísky za pomoci frézy. Jedná se o přesné metody, které umožňují frézovat i malé rozměry, viz obrázek 5. Problémem je ovšem chování obráběného materiálu,



neboť plasty vedou špatně teplo, proto by mohlo docházet ke změně rozměrů, nebo lokálnímu natavení. Bylo by nutné využít chlazení, jenže základem většiny řezných kapalin je voda, kterou jsou některé plasty do sebe schopné absorbovat. To vede ke změně jak jejich rozměrů, tak i mechanických vlastností. Celková doba procesu je značně dlouhá a pro velkosériovou výrobu absolutně nevhodná. Společně s náklady na takto přesné nástroje a stroje by se investice nikdy nevrátila. Z těchto důvodů je použití této technologie značně problematické.

Obr. 5 Demonstrace možnosti mikrofrézování [15].

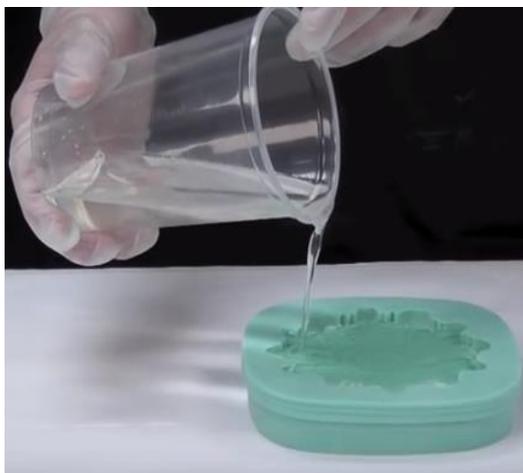
- 3D tisk lze použít ke zpracování omezeného sortimentu plastových materiálů. Pro zpracování polypropylenu je vhodná metoda FDM (z anglického fused deposition modeling), viz obrázek 6, kde se na základě počítačového modelu v pracovním prostoru stroje, 3D tiskárny, zhotovuje výrobek. Materiál je přiváděn ve formě drátu do prostoru trysky, kde se ohřívá a natavuje. Poté je nanášen na základovou desku, nebo předchozí vrstvu. Zborcení vznikajícího dílce se zabraňuje použitím opor zhotovených z pomocného materiálu, který lze po ukončení tisku odstranit. Po dostatečném ztuhnutí nanášené vrstvy materiálu dojde k poklesu základové desky o tloušťku vrstvy níže a proces nanášení se



opakuje. Metoda je vhodná pro kusovou výrobu, nebo pro zhotovení součástí, podle nichž se zhotovuje forma. Nad deset kusů je tato metoda neefektivní z důvodu vyšších nákladů na základní i přídavný materiál a z důvodu relativně dlouhé doby produkce. Pro výrobu Pall kroužku tímto způsobem by byla problematická především jeho malá tloušťka stěny a nutnost využít mnohonásobně vyššího množství pomocného materiálu. Obdobou metody FDM je metoda FFF (z anglického fused filament fabrication). Jediný rozdíl mezi oběma metodami je v licenčním vlastnictví.

Obr. 6 Zařízení otevřené 3D tiskárny pro metodu FDM [16].

- Odlévání je metoda, kdy zvýšením teploty plastu dochází k jeho převedení do stavu s dostatečnou tekutostí, který umožní jeho zatékání do tvarové dutiny formy. Problémem může být větší hodnota smrštění, spolu s problematickým doplňováním materiálu v průběhu



chladnutí z důvodu absence dotlaku. Riziko vzniká především u malých a konstrukčně složitých výrobků, kde se tento nedostatek může projevit vznikem propadlin, nebo jiných vad. Forma může být statická, viz obrázek 7, nebo může vykonávat pohyb. Mezi výhody metody patří možnost zhotovení druhu formy podle počtu vyráběných kusů, široký výběr možných odlévaných materiálů, nižší složitost metody a schopnost dosáhnout kvalitního povrchu. Problémem je podstatný podíl vtokových zbytků i u malých součástek a delší trvání procesu tuhnutí.

Obr. 7 Technologie statického lití plastů [18].

- Vstřikování je metodou, kdy je upravený granulát přeměněn na homogenizovanou taveninu a vpraven pod vysokým tlakem do prostor formy. Zde se rozvodovým systémem dostává do tvarové dutiny. S chladnutím materiálu dochází ke změně jeho rozměrů z důvodu smrštění. Úbytek materiálu je potřeba kompenzovat ve fázi působení dotlaku, minimalizuje se tak riziko vzniku vad. Po dostatečném ztuhnutí je výrobek vyhozen z prostoru tvarové dutiny formy, viz obrázek 8, a celý proces se opakuje. Metoda umožňuje rychlou a spolehlivou reprodukovatelnost vyráběné součásti, proces je možné plně automatizovat, a proto je vhodná pro velkosériovou výrobu. Umožňuje zpracovávat širokou škálu plastových



materiálů. Volba druhu vtokového systému ovlivňuje ekonomiku provozu a současně využitelnost materiálu. U forem s horkým vtokovým systémem nedochází ke vzniku vtokových zbytků. U forem se studeným vtokovým systémem lze zmetky a vtokové zbytky převést zpět na granulát, ovšem za cenu nákladů na pořízení drtících a zpracovávacích zařízení. Nevýhodou je relativní složitost oproti předchozím metodám a vyšší počáteční náklady.

Obr. 8 Vstřikování plastů, fáze vyhození výrobku z tvarové dutiny formy [19].

Z hlediska technologie výroby je tedy nepřijatelnější technologií vstřikování plastů, proto bude zadaná součást řešena touto technologií, která je nejlépe schopna dosáhnout žádoucího výsledku.

## 2 VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ [1], [2], [5], [9], [14], [20], [21]

Vstřikování je cyklický přerušovaný tvářecí proces, který řadíme mezi tvářecí technologie zpracování plastů, kde dochází během operací k výrazným tvarovým změnám výchozího polotovaru pomocí značného přemístování jeho částic. Vstřikování je nejvíce rozšířenou technologií pro zpracování plastů, z níž vychází velkým množstvím specializovaných metod např. sdružené nebo sendvičové vstřikování.

Metoda vstřikování je vhodná především pro hromadnou a velkosériovou výrobu z důvodu krátkých časů výrobních cyklů a z důvodu vysokých pořizovacích nákladů na vstřikovacího stroje, formy a pomocné vybavení. Proces vstřikování lze plně automatizovat, což umožňuje vysokou produktivitu práce tolik potřebnou pro velkosériovou výrobu. Výrobky se vyznačují prakticky identickými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Možnosti vstřikování umožňují vyrábět široké škály tvarů, rozměrů a hmotností výrobků, současně lze dosáhnout vysoké přesnosti a dobré kvality povrchu. Metodou vstřikování lze zpracovávat termoplasty, reaktoplasty i termoplastické elastomery.

Materiál je před vstřikováním nutné upravit pomocí přípravných operací, čímž se zajistí rovnoměrné rozptýlení přísady a tím rovnoměrnějších vlastností v celém objemu součásti. Vyžaduje to použití drahých zpracovatelských strojů pro míchání, nebo hnětení, proto se v případě menších sérií vyplatí kupovat vstupní materiál již v upraveném stavu. Vstupní materiál bývá nejčastěji v práškové podobě, proto se upravuje do podoby vhodné pro následné dávkování a mísení s jinými přísadami, nabývá tak podoby granulátu, pásů materiálu, roztoku, nebo taveniny. Pokud to druh materiálu dovoluje, je možné do vstupního materiálu přidat rozdrčené a upravené vtokové zbytky i vyrobené zmetky, čímž se zvýší využitelnost materiálu. V průběhu skladování dochází u mnohých plastů k pohlcování vody, jev označujeme jako tzv. navlhavost. Jejím hlavním projevem jsou viditelné změny kvality povrchu, v některých případech dochází k poklesu pevnostních vlastností, který se v případě jeho namáhání může projevit změnou objemu plastu a v horším případě i vznikem napěťových trhlin. Z tohoto důvodu je u většiny navlhavých plastů jako přípravnou operaci nutno zavést sušení, jejíž dobu a teplotu ovlivňuje druh plastu.

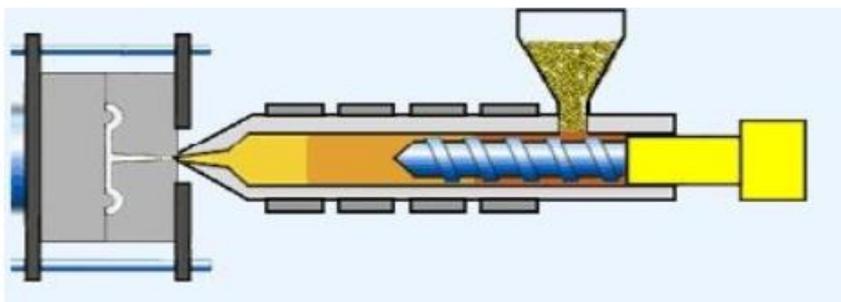
Kontrola požadovaných rozměrů a kvality je u vstřikování problematická. Rozměry součásti totiž kromě výrobního smrštění ovlivňuje ještě dodatečné smrštění, které probíhá až po dobu 168 hodin od okamžiku vyhození výrobku z tvarové dutiny formy. Největší změna rozměrů probíhá v počátečních hodinách od vyhození, z toho důvodu se rozměry měří převážně po uplynutí doby 24 hodin po vyhození.

Základem technologie vstřikování je vstřikovací cyklus, jedná se o soubor na sebe navazujících operací, jejichž výsledkem je vznik žádané součásti. Jako počátek je obvykle označován okamžik uzavření formy a jako konec okamžik otevření formy a vyhození součásti, kdy je součást už dostatečně pevná, aby se na ní pád neprojevil změnou tvaru a rozměrů.

Přípravnými operacemi upravený vstupní materiál, nejčastěji v podobě granulátu, je přiveden do násypky vstřikovacího stroje. Z hlediska časového průběhu, při uvažování šnekového vstřikovacího stroje, dělíme vstřikovací cyklus na:

- Fáze plastifikace materiálu, viz obrázek 9, kde se předpřipravený granulát přivede z prostoru násypky do prostoru tavného válce, jehož stěny jsou vyhřívány a ve středu kterého se pohybuje zpravidla jeden šnek. Granulát odebírá teplo ze stěny válce a zahřívá se. Další teplo ohřívající granulát vzniká jak v oblasti jeho styku se stěnou tavného válce, tak ve stykové ploše s povrchem šneku, tak i mezi jednotlivými granulami. Posouvání šneku spolu s vystavením tomuto teplu vede k přeměně granulátu na taveninu. S tím jak se granulát taví,

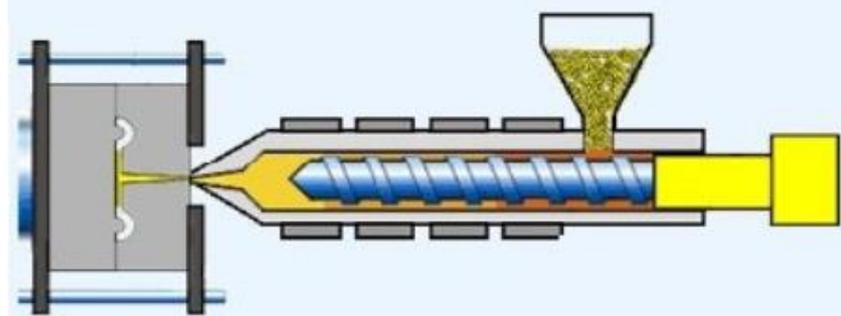
dochází k uvěznění bublin vzduchu v materiálu. Toto je nežádoucí a musí tedy dojít k jejich převážnému odstranění ve fázi homogenizace taveniny, se kterou pomáhají otáčky šneku a současně ji přitom stále posouvají vpřed. Během homogenizační fáze je vstřikovací tryska uzavřená, tavenina se tak hromadí před čelem šneku. Cílem je získat dostatečnou dávku taveniny plastu, která musí stačit na naplnění formy a doplňování úbytku materiálu z důvodu procesu smrštění ve fázi dotlaku, až do okamžiku zatuhnutí vtoku. Je žádoucí, aby materiál



setrval v tomto stavu co nejkratší dobu, jinak může dojít z důvodu teploty k degradaci jeho vlastností.

Obr. 9 Fáze přivedení granulátu do tavného válce [21].

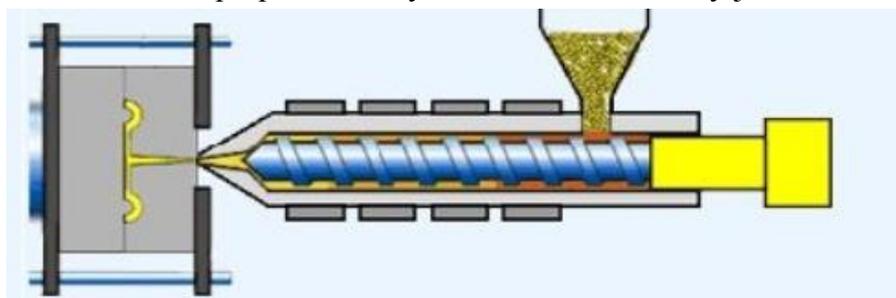
- Fáze plnění formy, viz obrázek 10, kdy dochází k vyvození uzavírací síly na zavřenou vstřikovací formu, ke které se po získání dostatečné dávky taveniny přisouvá vstřikovací jednotka. Do prostoru prázdné formy je pak vpravena homogenizovaná tavenina plastu osovým posuvem šneku. Těsně před zaplněním tvarové dutiny dochází k přepnutí vstřikovacího tlaku na dotlak, jehož cílem je zabránit nárůstu tlaku. Dotlak působí až do



doby zatuhnutí výstřiku, nebo jeho vtokového systému. U tenkostěnných součástí má tato fáze podstatný vliv a to především z hlediska rychlosti plnění, respektive doby plnění.

Obr. 10 Fáze vstřikování taveniny do dutiny formy [21].

- Fáze doplňování materiálu, či dotlaková fáze, viz obrázek 11. S tím jak dochází k poklesu teploty u vstřikovaného dílce, zmenšují se jeho rozměry vlivem smrštění. Úbytek materiálu je nutné kompenzovat přivedením dodatečné taveniny z před čela šneku. Cílem je zabránění vzniku vad a propadlin na výrobku. Přívod taveniny je ukončen až v okamžiku zatuhnutí

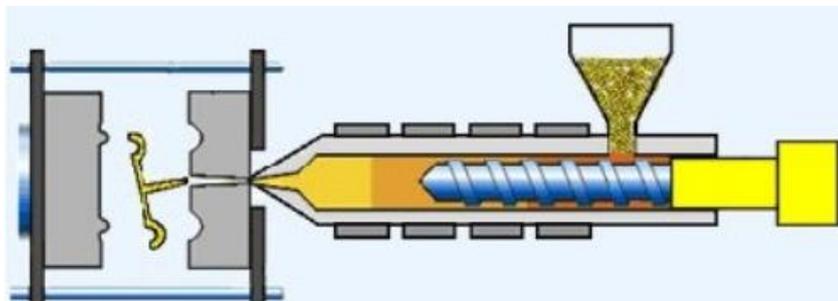


vtokového ústí na plastovém dílci. V tomto okamžiku dochází k odsunutí vstřikovací jednotky.

Obr. 11 Fáze působení dotlaku [21].



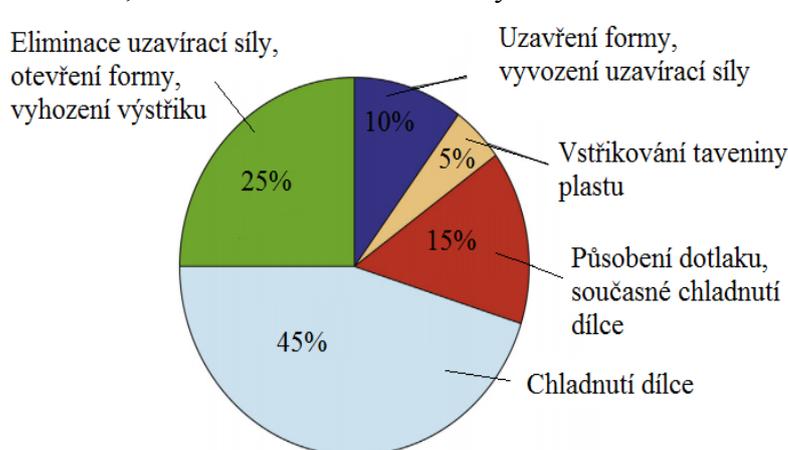
- Fáze ochlazování taveniny ve formě, viz obrázek 12. Tato fáze začíná už v okamžiku samotného plnění tvarové dutiny, pokračuje souběžně s doplňovací fází a končí ochlazením součásti na takovou teplotu, která umožní její bezpečně vyhození z formy, bez rizika deformace tvaru a rozměrů stále chladnoucí součásti. Pro snížení vnitřního pnutí je vhodné



zpomalit v průběhu tuhnutí pokles teploty pomocí udržování konstantního teplotního režimu formy, čehož lze dosáhnout pomocí temperačního systému formy.

Obr. 12 Fáze otevření formy a vyhození dílce [21].

Celkový čas vstřikovacího cyklu se skládá z mnoha dílčích úseků, viz obrázek 13. Snahou je, aby trval co nejkratší dobu. Časy spojené s manipulací s formou, ať už se jedná o otevírání, nebo uzavírání formy, stejně tak jako přisunutí vstřikovací jednotky, nebo vyhození výstřiku, je možné zkrátit automatizací procesu. Součet těchto časů je tak zpravidla v řádech jednotek sekund. Doba vstřikování bývá zpravidla nejkratším časovým intervalem, z důvodu zabránění nadměrnému tuhnutí taveniny už při její cestě do tvarové dutiny formy. Největší vliv na délku trvání vstřikovacího cyklu má doba chlazení. Při jejím zkracování je ovšem potřeba postupovat obezřetně, neboť dosažení rovnoměrných vlastností a minimalizace vnitřního pnutí vyžadují,



aby tato fáze trvala co nejdéle. Proti tomu jde snaha zkracovat čas cyklu z důvodu zvýšení produktivity práce. Proto je nutné nalezení kompromisu, který na jednu stranu umožní dosáhnout dostatečných vlastností, při maximálním zkrácení doby chlazení.

Obr. 13 Časové rozložení vstřikovacího cyklu [5].

## 2.1 Materiál [1], [2], [5], [20], [22], [23], [24]

Materiál, z něhož se budou Pall kroužky vyrábět je polypropylen, tedy plast. Bude tedy vhodné podrobit tuto problematiku hlubšímu rozboru. Plasty jsou skupinou materiálů, které vznikají smísením přísad s makromolekulárními látkami, přičemž ty se zpravidla přidávají za účelem zlepšení stávajících vlastností.

Pro vznik makromolekulární látky je potřebnou výchozí jednotkou monomer, jehož molekuly musí být cyklické, nebo mít alespoň jednu dvojnou vazbu. Z hlediska chemického složení jsou monomery tvořeny především atomy uhlíku, vodíku a kyslíku, jedná se tedy o organické látky. V některých případech jsou v jejich složení zastoupeny ještě atomy dusíku, fluoru, chloru, síry nebo křemíku. V průběhu polyreakce dojde k rozštěpení vazeb monomeru,

vzniká přechodně existující základní stavební jednotka makromolekulárních látek tzv. mer s volnými vazebnými místy. S pokračující polyreakcí se jednotlivé mery navzájem spojují a vytvářejí dlouhé řetězce, polymery. Pro vytvoření polymeru je tedy zapotřebí polyreakce. Tímto pojmem se označují tři základní typy reakcí, při nichž dochází ke vzniku makromolekulárních látek. Jsou to:

- Polymerace - chemická reakce vzniku makromolekulárních polymerů z velkého počtu monomerů, přičemž chemické složení polymeru a monomeru je stejné. Nedochází tedy ke vzniku vedlejších produktů reakce. Pro schopnost monomerů účastnit se polymerační reakce je nezbytné jejich převedení do aktivní formy prostřednictvím přivedení aktivační energie.
- Polykondenzace - jedná se o sled stejných opakujících se reakcí funkčních skupin výchozích látek. Podmínkou je, aby byl počet funkčních skupin v každé molekule roven minimálně dvěma. Chemické složení výchozí látky a konečného polymeru je odlišné, při reakci mohou vznikat produkty, nejčastěji se jedná o vodu.
- Polyadice - chemická reakce, kde jsou sloučeniny kromě vzájemného řetězení schopny i adiční reakce se sloučeninami. Makromolekulární látky tak vznikají postupnou adicí, přidáváním merových jednotek k rostoucí struktuře, podmínkou je minimální počet dvou funkčních skupin v každé molekule. Konečné chemické složení produktu se neliší od směsi výchozích látek, konečný produkt má ovšem rozdílnou strukturu oproti výchozím produktům.

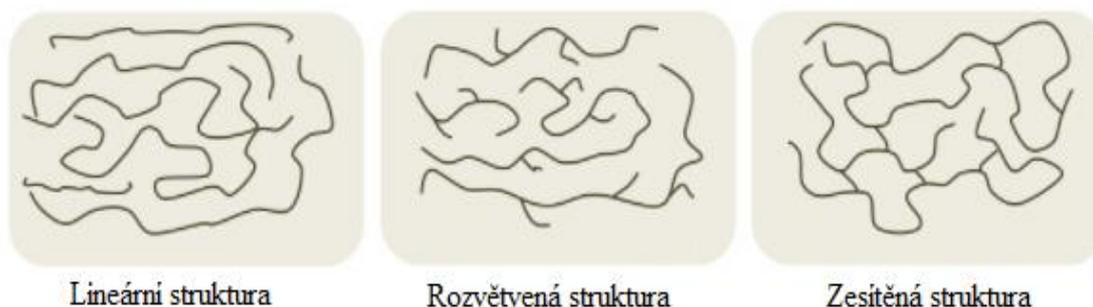
Jak již bylo uvedeno dříve, vliv přísad na vznik plastu je nezanedbatelný, jejich použití je z hlediska technologie a ekonomiky provozu nejlepší cestou jak dosáhnout požadovaných vlastností. Zpravidla se volí podle budoucího uplatnění součásti, podle prostředí, zatížení, požadavků na odolnost atd., mohou modifikovat fyzikální vlastnosti, nebo poskytovat jistý ochranný účinek. Lze jimi ovlivnit i zpracovatelský proces, což vede ke zlepšení jeho ekonomiky. V případě, že se do materiálu přidávají přísady, které se svými vlastnostmi podstatně liší od vlastností matrice polymeru, označují se jako plniva, vytváří se tak kompozitní materiály. Přísady tedy modifikací vlastností rozšiřují sortiment použitelných plastových materiálů.

### **2.1.1 Struktura, vlastnosti a rozdělení plastů [1], [2], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28]**

Způsob uspořádání řetězců spolu s chemickým složením monomerů určuje výsledné fyzikálně-chemické a chemické vlastnosti polymerů. Z hlediska mechanických vlastností, a to především deformace, má zásadní vliv struktura řetězce tzv. konstituce. Z hlediska stavby řetězců rozlišujeme řetězce:

- lineární - tvoří dlouhá nevětvená vlákna, která nejsou navzájem propojena. Díky tomu lze k sobě makromolekuly navzájem více přiblížit a vyplnit tak kompaktněji prostor, což se projeví zvýšenou hustotou. Lineární řetězce snáze vytvářejí krystalické struktury, proto je podíl krystalické fáze v nich obsažených vyšší.
- rozvětvené - z vláken vybíhají postranní větve a vlákna nejsou navzájem propojena. Postranní větve zamezují dostatečnému přiblížení makromolekul, což se projeví nižší hustotou oproti lineárním řetězcům.
- příčně zesílené - postranní větve navzájem propojují jednotlivá vlákna a vytvářejí motiv sítě, což se projeví ztrátou tavitelnosti a rozpustnosti polymeru.

Schématiký vzhled uvedených řetězců zobrazuje obr. 14.



Obr. 14 Schématický vzhled řetězců [22].

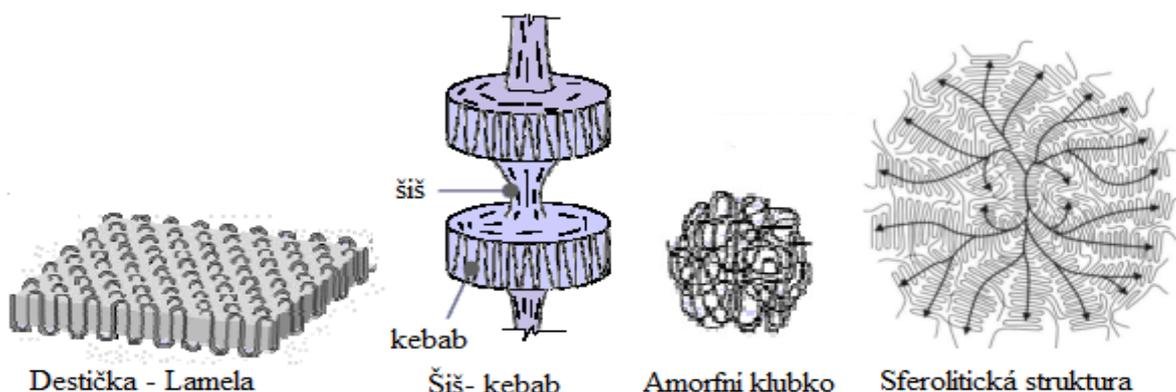
Struktura řetězců společně s jejich délkou ovlivňuje reologické (tokové) vlastnosti taveniny plastu, přičemž platí, že s rostoucí délkou řetězce a narůstajícím počtem bočních větví na hlavním vlákně nebo počtem větví, které spojují sousední vlákna, tekutost taveniny klesá.

Kromě konstituce má na vlastnosti podstatný vliv i konfigurace a konformace. Konfigurace se zabývá napojením postranních skupin na hlavní vlákno makromolekulární látky. Podle toho, zda je zde určitá pravidelnost v umístění bočních skupin rozlišujeme:

- ataktický (statistický) řetězec - bez pravidelného upořádání postranních skupin,
- izotaktický řetězec - postranní skupiny uloženy společně na jedné straně hlavního vlákna,
- syndiotaktický řetězec - pravidelné střídání postranních skupin na hlavním vlákně.

Konformace se zabývá různými způsoby natočení jednotlivých merů tvořících řetězec vůči sobě navzájem a to s přihlédnutím k energii, kterou v dané poloze mery mají. Soustava v přírodě vždy spěje ke stavu nejmenší energie, proto se vůči sobě snaží natočit tak, aby byl součet jejich energií co nejnižší.

Nadmolekulární struktura polymerů, viz obrázek 15, je dána především způsobem krystalizace. Pokud dochází ke krystalizaci ve zředěném roztoku, vzniká tzv. lamela. Jedná se o destičku s rozměry v řádu desítek nanometrů, která je tvořena určitým počtem za sebou naskládaných řetězců. Při krystalizaci z taveniny vzniká tzv. sferolit, kde jsou lamely radiálně rostoucích krystalizačních zárodků od sebe odděleny amorfní fází, což se vyskytuje u semikrystalických plastů. Je-li krystalizace ovlivněna střídavým prouděním, vzniká tzv. šiš-kebab. V případě, že je ovlivněna smykovým zatížením, vznikají fibrily (vlákna), které jsou uspořádané do amorfního klubka.



Obr. 15 Schématické znázornění nadmakromolekulární struktury polymerů [26].

Zásadní vliv na vlastnosti plastů má podíl jejich amorfnní a krystalické fáze, kdy zpravidla dochází ke zprůměrování vlastností obou. Amorfnní fáze má velkou viskozitu za cenu nižší odolnosti především proti ultrafialovému záření a jiným agresivním prostředím, její pevnostní vlastnosti jsou relativně nízké. Krystalická fáze se vyznačuje vyššími pevnostními vlastnostmi a zvýšenou tepelnou odolností.

Chování plastů ovlivňuje do značné míry teplota, z hlediska významu je nejdůležitější teplota skelného přechodu (značena  $T_g$ ). U amorfnních plastů je oblast vhodné použitelnosti pod touto teplotou, zatímco semikrystalické plasty lze využívat i nad ní. U části plastů nedochází při dosažení teploty tání k jejich přeměně na kapalinu, ale pouze ke změknutí. Nadměrný ohřev plastu vede k poklesu vlastností až k jeho tepelné degradaci.

Z hlediska chemické odolnosti má největší význam chemické složení a to jak u polymerní matrice, tak i přísad, pokud jsou v materiálu nějaké přidány. Významnou úlohu hrají i postranní skupiny na hlavním řetězci. Působení komplexních vlivů vnějšího prostředí, především vzdušných plynů, slunečního záření a atmosférických vlivů, může vést k nevratným změnám ve fyzikálních a fyzikálně chemických vlastnostech. Tyto spontánně probíhající změny v materiálu označuje pojmem stárnutí. Změna vlastností nemusí být nutně negativní.

Velice důležitým procesem, s nímž je třeba při vstřikování plastů počítat je smrštění. Jedná se o velice komplexní proces, na kterém se podílí celá řada faktorů a jeho přesné předběžné určení bývá velmi obtížné. Smrštění je zodpovědné za změnu rozměru výstřiku a současně i jeho objemu v průběhu poklesu teploty ze zpracovatelské na pokojovou. Tím se zásadně liší od deformace, neboť v jejím případě zůstává objem, na základě zákona o konstantním objemu, neměnný, mění se pouze rozměry. Parametry ovlivňující smrštění lze rozdělit do dvou skupin, kde:

- nárůst parametrů vede ke zvětšení hodnoty smrštění, kam patří teplota formy, teplota vstřikované taveniny plastu a velikost rozměrů výstřiku společně s tloušťkou jeho stěny,
- nárůst parametrů vede ke zmenšení hodnoty smrštění, kam patří počet vtoků a jejich průřez a vstřikovací tlak.

Na velikost smrštění má vliv i podíl amorfnní a krystalické fáze. U amorfnních plastů dosahuje hodnota smrštění většinou nižších hodnot, než v případě semikrystalických plastů. Smrštění navíc nebývá rovnoměrné ve všech směrech. Pokud je smrštění větší ve směru toku taveniny jedná se o smrštění radiální, pokud je naopak větší ve směru kolmém na tok taveniny, jedná se o smrštění tangenciální. U amorfnních plastů převažuje smrštění radiální, zatímco v případě semikrystalických plastů převažuje smrštění tangenciální.

Smrštění lze rozdělit na dvě hlavní fáze. První fází je tzv. výrobní smrštění trvajícím od okamžiku vpravení taveniny do tvarové dutiny formy, které končí v okamžiku měření rozměrů výstřiku, v praxi se uvádí doba 24 hodin. Druhou fází je dodatečné smrštění, navazující na výrobní a končící v okamžiku 168 hodin od vstřikování. Změny rozměrů zde již nejsou tak velké jako v případě výrobního smrštění. Přesto je nutné měřit splnění tvaru a rozměrů až po 24 hodinách od vyhození výrobku.

Podle jednotlivých hledisek lze plasty dělit na množství skupin. Nejvíce rozšířené je dělení podle vnitřní struktury, respektive jejího působení na chování v závislosti na teplotě, kde rozlišujeme tyto skupiny:

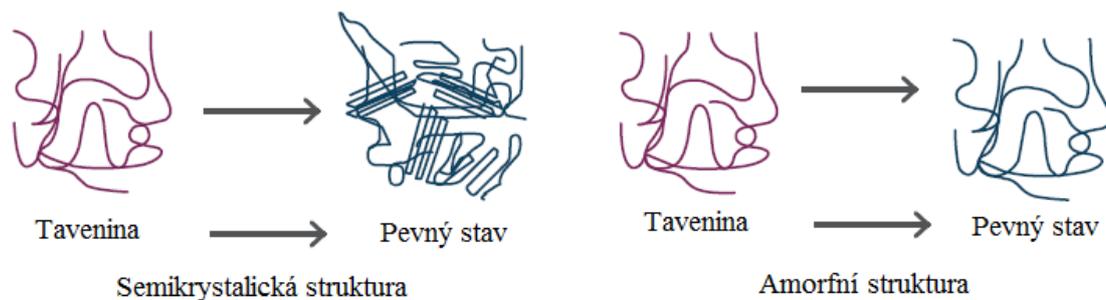
- Termoplasty - jsou polymery, které měknou se zvyšující se teplotou a stávají se viskózní taveninou, kterou lze po ztuhnutí opět roztavit a znovu převést do tuhého stavu. Proces lze

opakovat, nedochází totiž k chemické reakci. Struktura bývá tvořena dlouhými řetězci, které mohou a nemusí být rozvětvené. Po změknutí je lze snadno tvářet.

- Reaktoplasty - jsou polymery, u nichž s nárůstem teploty nedochází ke změknutí. Po dosažení určité teploty proběhne nevratná chemická reakce tzv. vytvrzování, která má za následek vytvoření 3d sítě mezi jednotlivými řetězci. V důsledku toho se reaktoplast stává zpravidla nerozpustným a netavitelným. Takto spojené řetězce již nelze působením tepla rozdělit, přičemž po ohřevu nedochází k tavení materiálu, ale k jeho tepelné degradaci. Po změknutí jsou tvářitelné jen po určitý čas.
- Elastomery - jsou polymery měknoucí se zvyšující se teplotou, stávají se tak na omezenou dobu tvářitelnými. Je-li překročena určitá teplota, dochází u nich k tzv. vulkanizaci. Jedná se o chemickou reakci, která se projeví prostorovým zesíťováním struktury. Elastomery lze snadno deformovat bez porušení, po odeznění zatížení se vrací do původního stavu. Skupinu lze dále dělit na kaučuky a pryže, přičemž kaučuk se vulkanizací převádí na pryž.

Z hlediska oblasti jejich použití rozlišujeme plasty pro špičkové využití, pro inženýrské aplikace a běžnou každodenní spotřebu. Využití plastů v armádním, leteckém a kosmickém průmyslu spadá do kategorie špičkového využití, které se na celkové produkci polymerních materiálů podílí přibližně pěti až sedmi procenty objemu světové produkce. Větší podíl, okolo čtvrtiny světové produkce, zabírají „inženýrské“, plasty využívané v běžných průmyslových aplikacích. Zbytek světové produkce tvoří plasty, se kterými se lze setkat v každodenním životě. V závislosti na přísadách, či plnivu známe plasty neplněné, plněné a vyztužené tzv. kompozity. Na základě chování makromolekul a jejich struktury (obr. 16) rozlišujeme plasty:

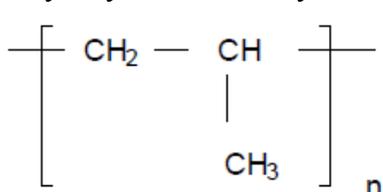
- Amorfní - jejichž makromolekuly při přechodu z taveniny do tuhého stavu nemají schopnost se pravidelně uspořádat a zůstávají proto bez pravidelné prostorové struktury. Použitelné pouze do teploty skelného přechodu, nad touto teplotou ztrácejí své mechanické vlastnosti a měknou.
- Krystalické - kde se část makromolekul skládá do pravidelné prostorové struktury. Jelikož ke krystalizaci dochází dendritickým způsobem, bude vždy zastoupen i podíl neuspořádané amorfní struktury. Nelze dosáhnout čistě krystalické struktury, proto jsou tyto plasty označovány jako semikrystalické, přičemž krystalinita běžně dosahuje zhruba 50% s maximem okolo 85% podílu na celkové struktuře. Použitelnost těchto plastů leží převážně nad teplotou skelného přechodu z důvodu výhodné kombinaci pevnosti a houževnatosti. Oproti amorfním mají výhodu vyšší chemické odolnosti a lépe odolávají působení vnějších vlivů, jejich únavová životnost je vyšší. Pro uvedení semikrystalického plastu v taveninu je potřeba větší množství tepla, než v případě amorfního.



Obr. 16 Srovnání struktury plastů v závislosti na teplotě [28].

### 2.1.2 Polypropylen [2], [12], [22], [23], [26]

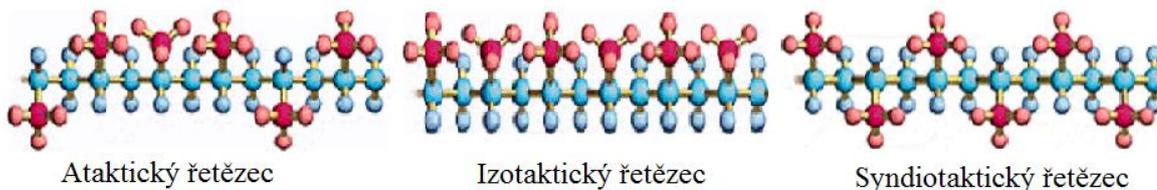
Polypropylen je synteticky vyráběný neprůhledný termoplast, patřící do skupiny polyolefinů. Z hlediska použití spadá do kategorie plastů pro běžnou spotřebu. Tvoří jej nasycený uhlovodíkový řetězec. Při zvyšující se teplotě se polypropylen mění v taveninu o



střední viskozitě, kterou lze po ztuhnutí opětovně roztavit a převést do pevného stavu, bez výrazného snížení mechanických vlastností. Po změknutí lze snadno tvářet. Teplota skelného přechodu polypropylenů je (-10°C), přičemž jeho teplota použitelnosti dosahuje až 100°C.

Obr. 17 Merová jednotka polypropylenu [23].

Pro vstřikování je vhodné používat částečně krystalický polypropylen, kde část struktury z 60 až 75% tvoří pravidelně uspořádaná krystalická struktura a zbytek je vyplněn neuspořádanou amorfni strukturou. Z hlediska řetězce má větvenou strukturu s postranní skupinou methylovou skupinou, viz obrázek 17, která způsobuje jeho větší viskozitu. Z hlediska konfigurace řetězce může polypropylen nabývat všech tří možných uspořádání, viz obrázek 18, které se mezi sebou liší svými vlastnostmi.



Obr. 18 Možné konfigurace řetězce polypropylenu [12].

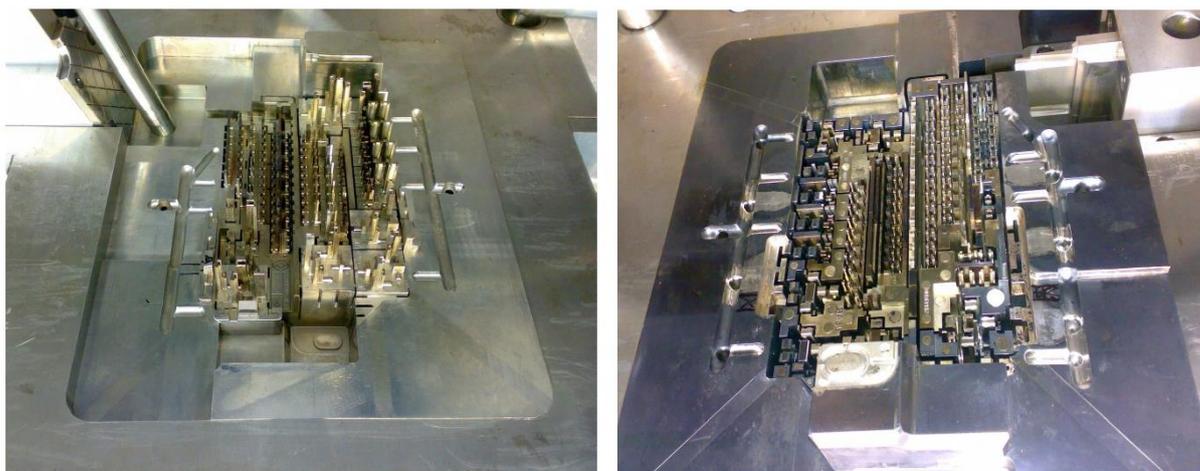
Z důvodu nejlepších pevnostních vlastností upřednostňujeme PP s izotaktickým typem řetězce. Tento typ má rovněž výhodu, že je nerozpustný v uhlovodících. Jeho bod tání je okolo 165°C, proto při spalování hoří plamenem a neodkapává, neboť jej plamen nestačí roztavit. Jiné způsoby konfigurace řetězce lze rozpouštět v uhlovodících a jejich pevnostní vlastnosti jsou nižší než v případě ataktického řetězce, proto nejsou vhodné pro některé aplikace Pall kroužků.

Problémem polypropylenu je jeho malá odolnost proti UV záření. Je-li mu materiál vystaven, dochází k poklesu jeho meze pevnosti. Z tohoto důvodu materiál nebudeme vstřikovat čistý, ale s určitým podílem plniva v podobě 2,5 procenta sazí, čímž se razantně zpomalí pokles vlastností při vystavení UV záření, což bývá především při jeho přepravě nebo uskladnění. Dalšími možnými plnivy jsou retardéry hoření nebo barviva, v případě, že se nebarví, má materiál průsvitně bílé zabarvení. Neplněné typy polypropylenu se vyznačují vyššími hodnotami smrštění, než je tomu v případě plněných typů, přičemž smrštění v radiálním směru dosahuje trochu nižších hodnot, než ve směru tangenciálním.

Polypropylen je rovněž náchylný na působení oxidačních činidel, ale odolává kyselinám, zásadám a solím pokud nejsou oxidační povahy. Z důvodu nízké hustoty je polypropylen lehčí než voda, plave tedy na hladině, a je odolný proti jejímu působení. Proto se řadí mezi materiály s malou navlhavostí, kterou zvyšuje podíl sazí v materiálu. U čistého materiálu obsah absorbované vody nepřesáhne 0,1 %. Před procesem vstřikování se obvykle nepředřazuje přípravná operace v podobě sušení, ale je-li to potřeba, suší se za teploty 90°C po dobu jedné hodiny.

## 2.2 Vstřikovací forma [1], [2], [5], [20], [29], [30], [31], [32]

Vyměnitelnou částí uzavírací jednotky vstřikovacího stroje je vstřikovací forma, ve které dochází k chladnutí taveniny plastu a jeho tunutí. Její koncepce musí umožňovat dostatečně plynulý přísun taveniny plastu vtokovým systémem do oblasti tvarové dutiny, která má na samotné správné zhotovení vstřikovaného dílce největší vliv. Rozměry tvarové dutiny bývají větší oproti skutečným rozměrům součásti z nutnosti kompenzace smrštění. Vstřikovací forma se skládá z pevné a pohyblivé části, viz obrázek 19, každá z nich je dále tvořena několika deskami. Podle zpracovávaného materiálu se formy rozlišují na ty, které jsou určeny pro vstřikování termoplastů, reaktoplastů, elastomerů a konstrukčních pěn.



Obr. 19 Pevná (vlevo) a pohyblivá část (vpravo) vstřikovací formy [31].

Hlavními požadavky kladenými na formy jsou především schopnost zajistit opakovatelnost tvaru i rozměrů výrobků navzdory zatížení během vstřikovacího procesu a dlouhá životnost z důvodu počátečních nákladů, neboť pořízení vstřikovací formy a její následný provoz nebývá levnou záležitostí. Náklady se odvíjejí především od tvarové složitosti a rozměrů vstřikovaného dílce, podstatný vliv má i materiál.

Rámy forem jsou zhotovovány převážně z ušlechtilé oceli, lze ale použít i jiné kovové materiály. Tvarové dutiny a vložky lze vyrábět jak z kovových, tak i nekovových materiálů, záleží na podmínkách vstřikovacího procesu, na zpracovávaném materiálu a ekonomických parametrech. Každý díl z daného materiálu je za dobu své životnosti schopen zhotovit jen určitý konečný počet kusů výrobku, než přestane správně vykonávat svůj účel, a proto je pro volbu použitého materiálu rozhodující velikost výrobní série, viz tabulka 4.

Tab. 4 Vyrobený počet kusů při zhotovení tvarové dutiny z daného materiálu. [20]

Materiál	Způsob zpracování	Počet vyrobených kusů
Slitiny zinku	odlévání	100.000
Hliník	odlévání	100.000
Hliník	válcování	100.000 až 200.000
Beryliové bronzы	povrchové kalení	250.000 až 500.000
Ocel	odlévání, povrchové úpravy	500.000 až 1.000.000

Během procesu vstřikování ovlivňuje formu celá řada faktorů, jako je silové a tlakové zatížení, otěr funkčních ploch zapříčiněný tvrdými přísadami plastu, rovněž dochází k působení tepla i chemického působení zpracovávaného materiálu. Z těchto důvodů je nutné, aby byl zvolený materiál vnitřních částí formy vhodně upraven. Kontury tvarové dutiny se zhotovují převážně pomocí obrábění, proto je žádané, aby měl použitý materiál dobrou obrobitelnost, leštitelnost a snadno se brousil. Funkční plochy se dále zušlechťují na vysoké pevnosti kalením, nebo se povrchově zpracovávají cementací, při nichž musí být deformace formy vlivem procesu co nejvíce minimalizována. Po těchto operacích je nutno provést kontrolu rozměrů a případné úpravy.

Z pohledu tepelného režimu formy je žádoucí dostatečná hmotnost formy, která sníží pokles teploty od okamžiku otevření formy až po její uzavření, což vede k větší stabilitě teplotního procesu. S vyšší hmotností roste i odolnost formy proti působení tlaků a sil. Chladnutí taveniny musí být pokud možno rovnoměrné, přičemž se chladí na teplotu, při níž je výrobek schopen vydržet vyhození z tvarové dutiny a následný pád do připraveného kontejneru či přepravy.

Pro splnění vysokých provozních požadavků kladených na formy, musí být zajištěna jejich pravidelná údržba a oprava, která zaručí plynulý provoz bez neplánovaných odstávek stroje a tím i splnění časového harmonogramu. Údržba zahrnuje odstranění nánosů vzniklých během provozu, mazání funkčních částí formy, posouzení stavu formy vzhledem k nutnosti naplánování oprav. Z hlediska výše investice, je oprava vždy výhodnější než pořízení nové formy, ovšem ne vždy je možné formu opětovně opravit. Opravy se provádějí přidavným nanášením kovu technologiemi svařování, vyvločkovaním poškozeného místa, nebo výměnou celé poškozené části, přičemž obnova ochranných chromových povlaků se provádí pomocí galvanického pokovování.

Vstřikovací stroj většinou používá více než jednu formu, proto je při návrhu třeba myslet i na manipulaci s formou, viz obrázek 20. Jedná se především o usazení a sundání formy ze vstřikovacího stroje a její přesun ze skladu do pracovní haly a zpět. Z těchto důvodů bývá forma opatřena manipulačními prvky, nejčastěji se jedná o oka, která umožňují její zavěšení na jeřáb. Tímto způsobem se značně zjednoduší usazování formy do stroje. Při manipulaci s formou hraje významnou roli její hmotnost, uvádí se, že ruční manipulace by se neměla provádět v případě, kdy hmotnost formy přesahuje 30 kilogramů a mělo se by tedy k jejímu přesunu využívat manipulačního prostředku (např. vysokozdvizného vozíku).



Obr. 20 Manipulace se vstřikovacími formami [32].



Důvodem je dodržení bezpečnosti práce a současně minimalizace rizika poškození formy během manipulace. Formy se do skladu umísťují vyčištěné zbavené zbytků plastu a vody, aby se zabránilo jejich korozi a současně byly schopné okamžitého použití. Z těchto důvodů by měl mít sklad pokud možno řízené podmínky z hlediska vlhkosti vzduchu a stálosti teploty. Odstavení formy z provozu je vhodné spojit s rozsáhlejší údržbou a případnými opravami.

Návrhové práce na formě jsou komplikovány především faktem, že jednotlivé systémy nelze řešit individuálně, ale je nutné brát v potaz jejich vzájemné ovlivnění, při návrhu tak hraje významnou úlohu zkušenost konstruktéra. Na základě důležitosti lze dělit systémy na dvě skupiny. První jsou hlavní systémy, kam spadá vtokový systém zodpovědný za rozvod taveniny formou, tvarová dutina ovlivňující výsledný tvar a rozměry výrobku, temperační systém určují teplotní režim formy a konečně vyhazovací systém s úkolem rychlého a bezpečného vyhození výrobku z tvarové dutiny. Druhou skupinou jsou systémy pomocné, kam spadají upínací elementy a plochy, vedení pohybu, středící prvky, pro přesnost vzájemného dosednutí ploch na sebe.

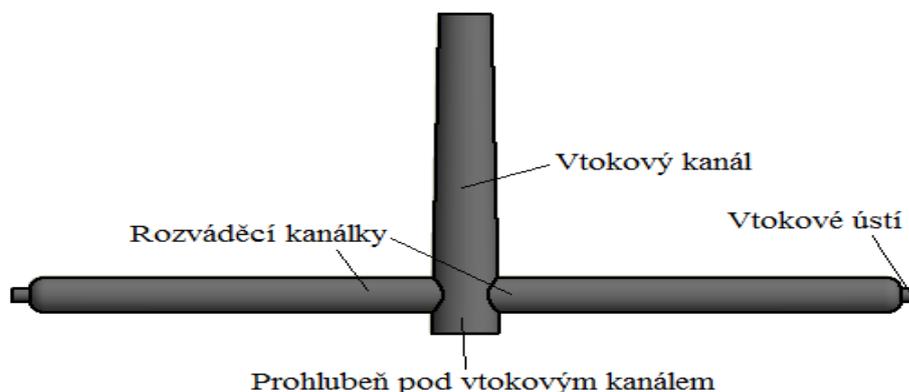
### 2.2.1 Vtokový systém [1], [2], [5], [20], [29], [30], [33]

Vtokový systém zodpovídá za rovnoměrný a plynulý rozvod taveniny v prostoru formy směrem do tvarové dutiny formy, přičemž žádoucí je, aby k jejímu naplnění došlo pokud možno v co nejkratším čase. Jeho uspořádání a fungování ovlivňuje do značné míry fázi chladnutí vstřikovacího cyklu. Při navrhování vtokového systému je žádoucí, aby přírodní kanálky vedoucí k tvarovým dutinám měly stejnou délku z důvodu identických tlakových podmínek. Dosáhne se tak větší přesnosti, mnohdy ale na úkor materiálových ztrát. Obecně se doporučuje minimalizovat vtokový systém na minimum, neboť je odpadním produktem vstřikování a váže v sobě velký podíl použitého materiálu, čímž snižuje materiálovou využitelnost procesu. Z tohoto důvodu je vhodné vtokové systémy zpětně recyklovat v granulát a opětovně použít, nebo používat horké vtokové systémy. Samotná složitost vtokového systému se obvykle odvíjí především od násobnosti formy. Pro snadnější odstranění vtokového systému od vstřikovaného dílce, je vhodné snížit průměr kanálků v místech jejich vstupu do tvarové dutiny nebo změnit jejich tvar pro vhodnější usměrnění zatékání taveniny, tato oblast se označuje jako vtokové ústí. Odstranění vtokového systému z formy obvykle probíhá za pomoci vyhazovacího systému současně se vstřikovanými součástmi. Rozlišují se dva základní typy vtokových systémů:

- studený, kde má vyšší rozdíl teplot mezi stěnami a taveninou při vstřikování za následek vznik vrstvy ztuhlého plastu na stěnách rozváděcích kanálků, což vede ke snížení průměru kanálku a tím i průtoku taveniny. Protože tavenina proudí pouze jejich středem, je třeba dimenzovat kanálky na větší průměry. Z tohoto důvodu není vhodný pro tvarově složitě a tenkostěnné součásti. Studený vtokový systém vytváří vtokové zbytky, současně jsou však náklady na zhotovení formy s tímto vtokem nižší než v případě horkého vtoku, ovšem za cenu vyšších nákladů na jeden zhotovený kus. Vhodnější je proto využívat horký vtokový systém.

Samotný vtokový systém se skládá z několika částí, viz obrázek 21. První částí je hlavní vtokový kanál ve tvaru kužele zpravidla opatřený vtokovou vložkou drženou na místě středícím kroužkem, který umožňuje přesné dosednutí vstřikovací jednotky. Na hlavní vtok navazuje síť rozváděcích kanálků, která rozděluje proud taveniny a distribuuje ji po formě směrem k jednotlivým tvarovým dutinám, přičemž je vyžadováno, aby k zaplnění dutin došlo ve stejném čase. Rozváděcí kanálky mohou mít různé tvary, průřezy, nicméně je to právě kruhový průřez umístěný v dělicí rovině, který dosahuje nejvýhodnějších parametrů. Třetí částí je vtokové ústí. Jedná se o zúžení usměrňující tok taveniny mezi rozváděcími kanálky a tvarovou dutinou a současně usnadňuje oddělení výrobku od vtokového zbytku.

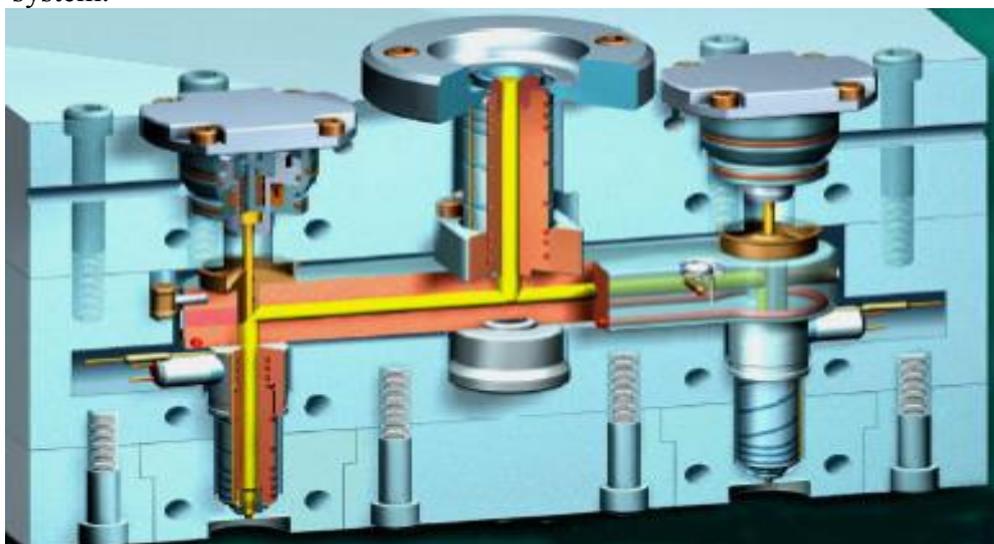
Existuje velké množství druhů studených vtokových ústí, která se používají podle tvaru a rozměrů vstříkovaných součástí nebo podle jejich počtu. Od konstrukčně nejjednodušších plných kuželových vtoků pro jednonásobné formy, přes bodové vtoky s širokým využitím pro větší série, které lze využít pro jednonásobné i vícenásobné formy, ke specifickým formám uzpůsobeným tvaru vstříkovaného dílce s vhodným směřováním směru tečení taveniny, kam patří například deštníkové, talířové, prstencové a další vtoky.



Obr. 21 Schéma vtokové systému s popisem jednotlivým částí.

- horký, kde je hlavním cílem udržení taveniny v rozváděcích kanálcích v tekutém stavu. Bývá označováno jako vstříkávání bez vzniku vtokových zbytků, což platí v případě vstříkávání přímo do dutiny formy. Jelikož zde nedochází k předčasnému tuhnutí taveniny na stěnách kanálek, je tento systém vhodný pro tenkostěnné výrobky. Alternativou je vstříkávání do studeného podrozvodu, kde už ke vzniku zbytku dochází, nicméně jeho velikost je menší, než kdyby byl použit pouze studený vtokový systém

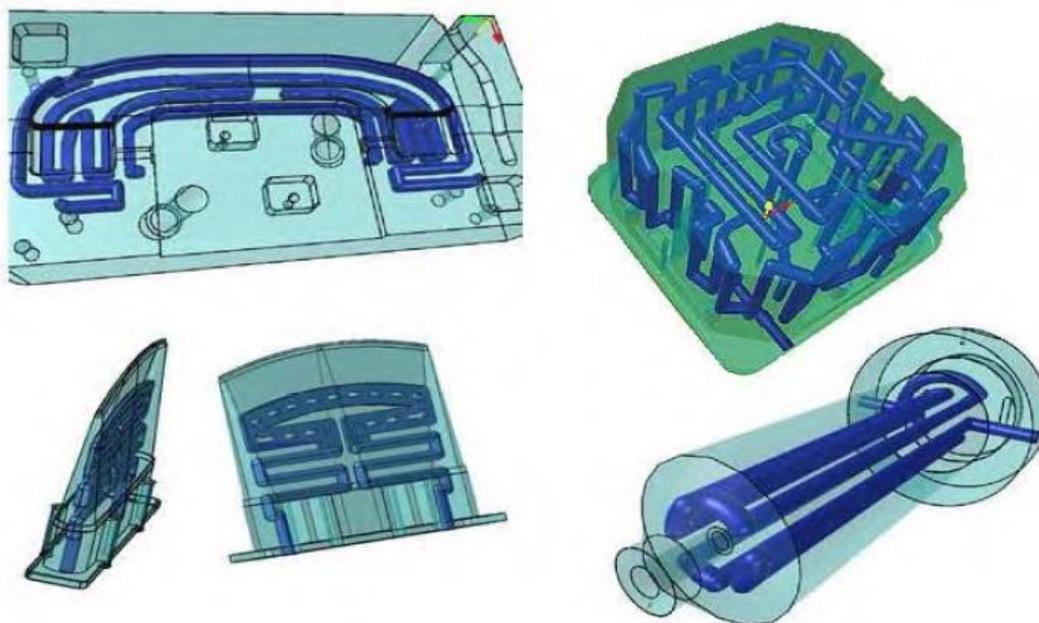
Navzdory vyšším počátečním nákladům na pořízení formy a větší složitosti formy spolu s obtížnější údržbou je tento systém rentabilní od již několika desetitisíců až statisíců kusů, což bývá mnohdy vzhledem k výrobním sériím zanedbatelné množství. Vyšší investice je vyvážena náklady na výrobu jednoho kusu, kde díky absenci vtokových zbytků nedochází k plýtvání drahým materiálem. Ten tak není třeba recyklovat, nebo v horším případě vyhazovat, což je výhoda u vstříkávání malých součástí, jejichž objem je výrazně menší než vtokový systém.



Obr. 22 Schéma horkého vtokového systému [33].

### 2.2.2 Temperační systém [1], [2], [5], [17], [20], [29], [30], [31], [34]

Společně s taveninou je do tvarové dutiny formy přivedeno určité množství tepla, které je z části odvedeno přirozeným způsobem a z části temperačním (chladicím) systémem, viz obrázek 31, který musí být vhodně uspořádán a dimenzován, aby došlo k pokud možno rovnoměrnému chladnutí taveniny v celém vstřikovaném dílci. Při vyšší teplotě formy je naopak nutné unikající teplo temperačním systémem dodávat, forma zpravidla obsahuje tyto systémy dva, přičemž jeden je umístěn v pohyblivé a druhý v pevné části formy, aby se eliminovala nutnost propojení systému v průběhu pohybu formy. Temperační systém je vhodné umisťovat do jedné desky formy a to z důvodu problematického zaručení těsnosti systému v případě rozhraní dvou desek.



Obr. 23 Různá schémata rozvržení temperačních systémů [31].

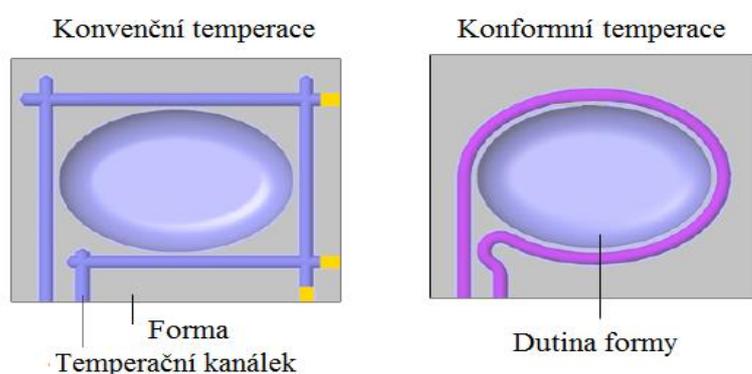
Při vstřikování semikrystalických plastů je potřeba věnovat návrhu temperačního systému zvýšenou pozornost, přičemž jeho správné navržení se projeví především snížením deformace a rozdílů smrštění, spolu se zlepšením kvality povrchu a tvaru výrobku. Bývá uváděn soubor základních pravidel, které je nutno pro správné fungování temperace formy dodržet:

- umístit kanálky temperačního systému v největší blízkosti tvarové dutiny, při současném zachování dostatečně velké tuhosti formy,
- umístění a dimenzování kanálků je podmíněno odvodem tepla, přičemž průtok je vždy volen od oblasti s největší teplotou k nejtudenější části formy
- pro každou polovinu formy zhotovit samostatný temperační okruh, opačný případ by vyžadoval neustálé propojování obou systémů a tím snižoval produktivitu práce,
- volit průřez kanálků dostatečně velký, aby byly snadněji vyrobitelné a současně se snížilo riziko jejich ucpání, ad.

Temperační systém je tvořen kruhovými kanály, jimiž proudí temperační medium. Tím bývá při nižších teplotách pod 90°C voda, která má ale tu nepříjemnou vlastnost, že v rozvodných kanálcích vytváří usazeniny minerálů v ní obsažených, čímž vzniká další vrstva pro přestup tepla a účinnost procesu se tak snižuje. Proto je nutné pravidelné čištění kanálků. Působení vody má za následek korozi materiálu formy. Z těchto důvodů se tak místo běžné vody používá voda

upravená. Pro teploty nad 90°C se doporučuje jako chladicí médium používat olej. Lze jej sice využívat za vyšších teplot, na druhou stranu však měrná tepelná kapacita, čili schopnost absorbovat teplo, není tak vysoká jako v případě vody. Další alternativou jsou glykoly, které se díky svému minimálnímu riziku vzniku koroze a usazenin dají použít v případě kanálek o malém průměru. Nevýhodou je postupný pokles jejich vlastností a s tím spojená kratší životnost. Navíc se jedná o látky znečišťující životní prostředí, proto je nutné je nechat ekologicky zneškodnit, což prodražuje výrobu.

Běžně používané systémy temperace jsou tvořeny soustavou rovných kanálek, které jsou mezi sebou příčně spojené, kde je směr toku média korigován soustavou zásepek. Tento systém má svá omezení u tvarově složitých a kulových tvarů, kde je při požadavcích větší přesnosti a menší tvarové deformace vhodnější použít tzv. konformní systém temperace, viz obrázek 24,



kteří lépe kopíruje tvar dutiny formy a tím je tedy dosaženo lepších výsledků za cenu větších výrobních nákladů. Konformní systémy se zhotovují metodami na principu slinování prášků, nebo se mohou vytvářet i za pomoci 3D tisku.

Obr. 24 Porovnání konvenčně používané a konformní temperace [34].

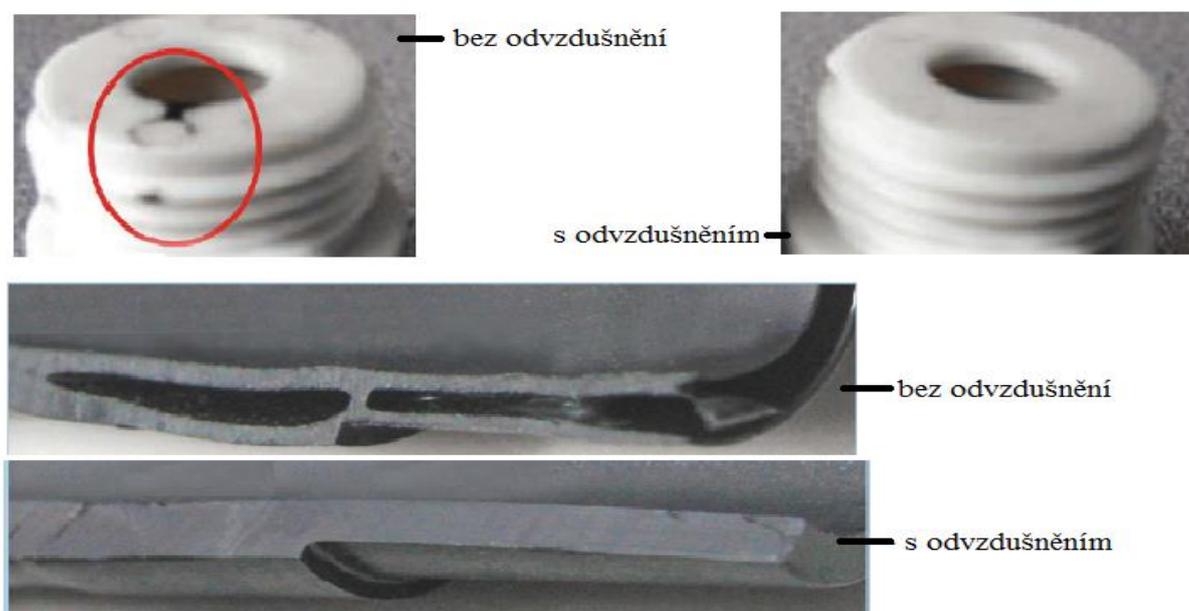
Z hlediska temperace bývají problematickými místy především rohy či zaoblení, kde je vždy rozdílná rychlost chladnutí mezi vnější a vnitřní stranou. Daný problém je možné řešit lokálně a to jak pomocí tvarové vložky z materiálu o vyšší tepelné vodivosti, nebo usměrněním toku temperačního média blíže k problematickému prostoru pomocí chladících kolíků, přepážek či fontánek.

### 2.2.3 Vyhazovací systém a odvodušnění [1], [2], [5], [20], [29], [30], [35], [36]

Po otevření tvarové dutiny formy je potřeba vyhodit její obsah, aby mohlo být provedeno zopakování vstřikovacího cyklu. Je podstatné, aby formu opustil jak vstřikovaný výrobek, tak i vtokový zbytek. Za správnost provedení této operce zodpovídá vyhazovací systém. S vyhozením je vhodné počítat už ve fázi návrhu samotného tvarového dílce, který je vhodné opatřit prvky usnadňujícími vyhození, jedná se především o zkosení a zaoblení. Okamžik vyhození je nutné zvolit tak, aby součást byla dostatečně pevná a nedošlo tak k jejímu poškození. Rovněž si je třeba dát pozor, aby vyhazovače nezanechaly na povrchu dílce stopy. Vyhazovací systémy mohou fungovat na různém principu, na základě toho se dělí na:

- mechanické řešení, které je díky své jednoduchosti a pořizovacím nákladům nejvíce rozšířenou variantou. Vyhození lze realizovat jak pomocí kolíků, tak stírací deskou, její využití ovšem vyžaduje zvětšení délky formy.
- pneumatické řešení, pracující na bázi plynného média a systému ventilů. Jedná se o méně rozšířenou variantu, která se většinou nepoužívá u výrobků s odvodušněním.
- hydraulické řešení, jedná se o vzácně využívanou variantu, hodí se pro aplikace, kde je nutné dosáhnout vysoké vyhazovací síly.

O odvod přebytečného vzduchu a zplodin kondenzace z tvarové dutiny formy při jejím plnění se stará odvodušňovací systém. Vzduch, který se zde nacházel před samotným zahájením vstřikovacího cyklu, musí mít možnost plynule unikat, jinak brání plnému zaplnění tvarové dutiny. Pro plné zaplnění tvarové dutiny tak lze navýšit vstřikovací tlak, což sebou ovšem přináší řadu problémů. Prvotním problémem je skutečnost, že narůstající tlak vede k zatlačování bublin vzduchu do samotného materiálu, viz obrázek 25, čímž se zhoršují jeho vlastnosti a kvalita povrchu. Vyšší tlak způsobuje nadměrné zahřátí kapes vzduchu, což se zpravidla projeví lokálním spálením materiálu vlivem tzv. Dieslova efektu. Tento efekt společně s tlakem nadměrně zatěžují tvarovou dutinu formy a při pravidelném opakování vedou k jejímu poškození.



Obr. 25 Vliv odvodušňení na kvalitu stěny výrobku [35].

Návrh odvodušňení není nutný u všech forem, u některých stačí k úniku plynu prostory vytvořené zbroušením v oblasti vyhazovacích kolíků, popřípadě jej umožňuje uspořádání výrobku, vzhledem k dělicí rovině. V takovém případě se jedná o pasivní odvodušňení. Při návrhu odvodušňovací drážky má významnou úlohu viskozita zpracovávaného materiálu, přičemž platí pravidlo, že nesmí docházet k jeho zatékání do prostoru drážky. Důležitou roli hraje i umístění drážky ideálně do místa, k jehož zaplnění dochází úplně na konec. Nejvhodnějším tvarem průřezu drážky z hlediska výroby je obdélník s obvyklou hloubkou v řádech setin milimetru, která se odvíjí od druhu použitého materiálu (například v případě polypropylenu bývá uváděna hloubka 0,03 až 0,04 milimetru) a šířkou v jednotkách milimetru, přičemž ta se stanovuje na základě výpočtů odvodušňení formy z plochy průřezu odvodušňovací drážky.

Mimo to existují ještě systémy aktivního odvodušňení, které jsou koncipovány tak, aby podporovaly odvod vzduchu z tvarové dutiny formy. Mezi tyto systémy se řadí například SPG ventily, jejichž vnitřní geometrie vytváří drážku, s tím jak touto drážkou uniká vzduch, vzniká podtlak, který dále pomáhá s odvodem dalšího vzduchu. Proces končí v okamžiku, kdy tlak čela taveniny způsobí uzavření ventilu. Další alternativou je odstranit vzduch z dutiny formy již před samotným vpravením taveniny pomocí vakuového zařízení.

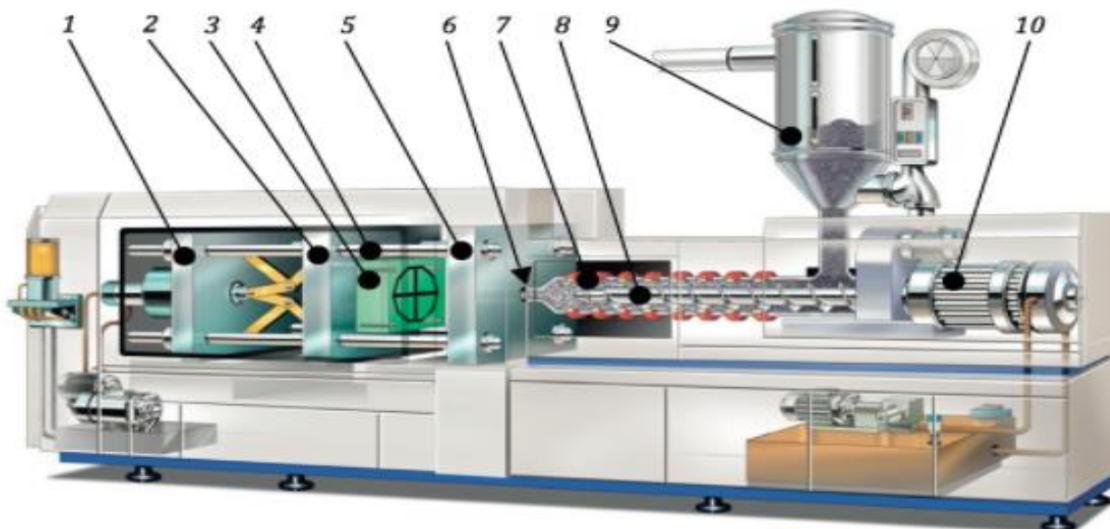
## 2.3 Vstřikovací stroj [1], [5], [24], [29], [30], [37], [38], [39], [40], [41], [42]

Základním požadavkem kladeným na vstřikovací stroj je schopnost přeměnit granulát v homogenní taveninu a tu následně vpravit v určeném vhodně navoleném množství optimální vstřikovací rychlostí do prostoru tvarové dutiny formy. Současně musí být zajištěny takové síly, aby nedošlo k otevření formy v průběhu procesu vstřikování. Hlavními parametry pro volbu stroje jsou tedy vstřikovací kapacita, plastifikační kapacita a uzavírací síla. Mimo ně hraje podstatnou roli i velikost upínacích ploch, jejich vzdálenost, nebo světlost (vzdálenost) mezi sloupky.

Z vývojového hlediska rozlišujeme dva druhy vstřikovacích strojů, a to stroje pístové a šnekové.

Pístové stroje patří ke starším a konstrukčně jednodušším strojům, jak už název napovídá jejich princip práce je založen na využití dvou pracovních pístů. Tento typ se vyznačuje řadou nedostatků spojených s teplotní homogenitou taveniny plastu, což se negativně projevuje na konečných vlastnostech dílce. Mezi nevýhody pístových strojů se dále řadí: malá plastifikační kapacita, tlakové ztráty s posuvem hmoty v tavné komoře, značné ztráty materiálu vynaložené na čištění stroje při přechodu na jiný materiál a dlouhá časová prodleva taveniny v tavné komoře vedoucí k tepelné degradaci. V praxi se již klasické pístové stroje nevyrábějí, vzácně se lze setkat s jejich modifikovanou verzí využívající šnekovou předplastifikaci.

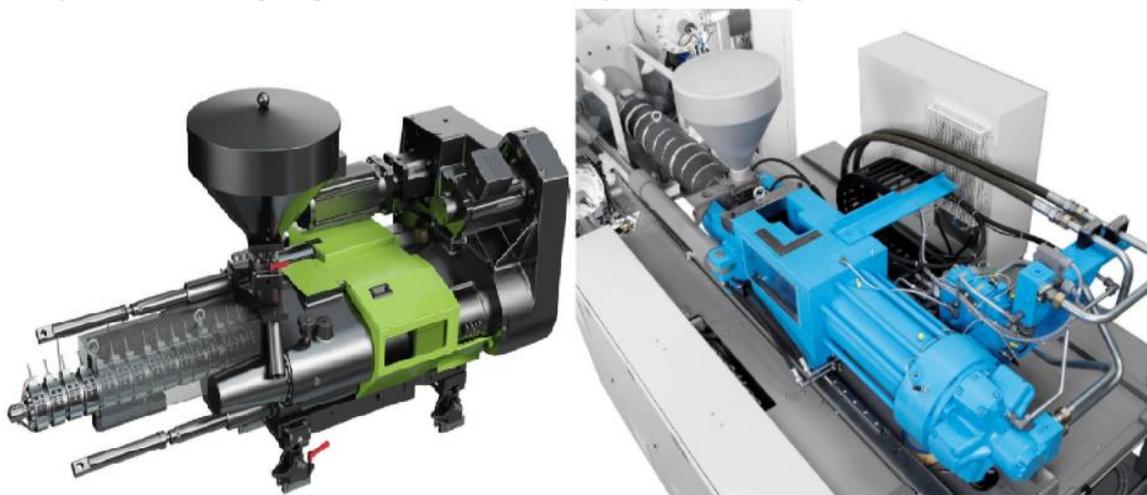
Dnes již v absolutní většině případů převažují univerzální vstřikovací stroje šnekové, jejichž vznik byl podmíněn neustálým zvyšováním produkce, spolu s rostoucími rozměry výrobků. Pracují na principu tvarového šneku umístěného v tavném válci, který se účastní jak plastifikace, tak i vstřikování. Tento způsob uspořádání netrpí problémy s malou plastifikační kapacitou, k tlakovým ztrátám sice dochází, jsou ale nižší než v případě pístových strojů a materiál není vystaven vysoké teplotě po dlouhou dobu. Navíc je možno pracovat s taveninou o vyšší teplotě, přičemž plastifikace granulátu je velmi rychlá, i v řádech sekund. Na obrázku 26 je vidět jednotlivé základní části šnekového vstřikovacího stroje.



Obr. 26 Schéma šnekového vstřikovacího stroje, kde 1 - uzavírací jednotka, 2 - pohyblivá upínací plocha, 3 - vstřikovací forma, 4 - vodící sloupky, 5 - pevné upínací plochy, 6 - vstřikovací tryska, 7 - tavný válec, 8 - šnek, 9 - násypka s granulátem, 10 - pohon šneku [29].

Jako každé jiné zařízení se i vstříkovací stroj skládá z jednotlivých dílčích jednotek, které na sebe navzájem navazují nebo se vzájemně ovlivňují a vytvářejí tak komplexní systém schopný konat požadovanou činnost, za stanovených procesních podmínek. U šnekových vstříkovacích strojů rozlišujeme tři základní funkční celky:

- Vstříkovací a plastifikační jednotka, viz obrázek 27 - její funkcí je přeměna granulátu na homogenní taveninu plastu o žádané teplotě a její následné dopravení, pod vysokým tlakem, do tvarové dutiny formy požadovanou rychlostí. Pro zajištění reprodukovatelnosti je šnek opatřen zpětným ventilem, tím je umožněno provádět optimalizaci procesu. Dalšími důležitými částmi tvořícími tuto jednotku jsou násypka, kam se přivádí granulát, vyhřívaný tavný válec, zahřívající granulát, vstříkovací tryska a samozřejmě i šnek.



Obr. 27 Vstříkovací jednotka [40], [41].

Podle samotného označení vstříkovacího lisu je jasné, že použitý typ šneku a jeho parametry mají zásadní vliv na produktivitu a výslednou homogenitu taveniny. Jako hlavní kritérium se obecně uvádí poměr délky šneku k jeho průměru ( $L/D$ ), přičemž platí, že se zvětšující se délkou šneku se produktivita zvětšuje, ovšem jsou zde jistá omezení spojená se samotnou pevností materiálu šneku. Dalším podstatným parametrem je kompresní poměr, který udává rozdíl výšky závitu mezi vstupním a kompresním pásmem šneku, což ovlivňuje vzhled šneku, viz obrázek 28. Šnek lze rozdělit na tři části na základě funkčního hlediska, ke kterému je daná část určena:

- vstupní pásmo, je oblastí šneku, kam se přivádí granulát z prostoru násypky. Jeho účelem je především dostatečně stlačit granulát a vytěsnit přebytečný vzduch, přičemž dochází k malému ohřevu materiálu, což ovšem není primárním účelem tohoto úseku. Obvykle zabírá zhruba 50% délky šneku.
- přechodové pásmo, nebo též kompresní pásmo navazující na vstupní pásmo, kde vzniká většina tepla potřebná pro přeměnu granulátu na taveninu. Teplo vzniká vlivem tepla, tlaku a tření granulátu. Sekce přechodového pásma zabírá zhruba 25% délky šneku.
- výstupní, či dávkovací pásmo, kde dochází k dokončení homogenizace taveniny a jejímu hromadění za zpětným ventilem před jejím vstříknutím do prostoru formy. Pásmo zabírá zbývajících 25% délky šneku.

### Standartní šnek pro zpracování termoplastů



L/D 20:1; kompresní poměr 2:1

### Šnek s nízkým kompresním poměrem



L/D 20:1; kompresní poměr 1,6:1 pro nižší tepelné namáhání materiálů

### Šnek s vysokým kompresním poměrem



L/D 20:1; kompresní poměr 2,4:1 prověšší homogenitu taveniny, lepší natavení a přesné dodržení doby plastifikace

Obr. 28 Vzhled šneku, vliv rozdílného kompresního poměru [38].

- Uzavírací jednotka, viz obrázek 29 - nese těleso vstřikovací formy, přičemž zodpovídá za pohyby spojené s otevřením a uzavřením vstřikovací formy, včetně vyhození dílce z tvarové dutiny formy. Pohyb formy musí být dostatečně rychlý a současně bezpečný, aby nedošlo k poškození formy. Z tohoto důvodu je jednotka opatřena vodícími tyčemi, tzv. sloupky, jejichž počet je dán velikostí stroje. V případě malých strojů stačí dva sloupky, u velkých se používají čtyři. K zaručení pevné pozice vstřikovací formy v rámci stroje je uzavírací jednotka vybavena pevnou a pohyblivou upínací plochou, kde lze docílit upnutí pomocí magnetických, hydraulických nebo bajonetových mechanismů. Ovšem nejdůležitější funkcí je vyvození uzavírací síly na formu po dobu vstřikování a ve fázi doplňování, během kterých nesmí dojít k jejímu pootevření, čehož se dosahuje vyvozením síly mechanickým nebo hydraulickým způsobem, popřípadě kombinací obou způsobů.



Z hlediska pohonu rozlišujeme uzavírací jednotky elektrické, hydraulické, nebo kombinované, přičemž hlavní funkcí pohonu je posuv pevné upínací desky, se kterou se posouvá i na ní upnutá pohyblivá část formy.

Obr. 29 Uzavírací jednotka, foto: ARBURG [5].



- Řídicí a regulační jednotka - řídí činnost stroje podle nastavených parametrů, či vloženého programu. Jednotka monitoruje činnost stroje a případné odchylky od zadaných parametrů vyrovnává za pomoci regulačních prvků, v případě že dojde k nějaké poruše nebo problému dojde k podání hlášení. Řízení vstřikovacích strojů se dnes především provádí centrální ovládací jednotkou na bázi mikroprocesorů, která obsahuje paměť, v níž je vložen program řídicí stroj.



Obr. 30 Komunikační rozhraní stroje [42].

Díky výše zmíněným je možné stroj provozovat ve třech pracovních režimech podle podílu zapojení lidského faktoru. Manuální režim, kde je podíl zapojení člověka největší, se zpravidla používá jen ve fázi umístění formy do stroje, případně během jejího seřízení. Poloautomatický režim vyžaduje ruční spuštění každého cyklu obsluhou, je vhodný tam, kdy je z prostoru formy třeba něco vyjmout nebo tam naopak něco zakládat. Nejvíce žádoucí je plně automatický režim, který po správném seřízení nevyžaduje bezprostřední přítomnost obsluhy, která tak může prostřednictvím počítače ve velícím středisku sledovat provoz více strojů najednou. Lidský faktor zde může jednou za určitou dobu doplňovat granulát, nebo nahrazovat plný kontejner výrobků prázdným, i to lze ovšem automatizací eliminovat.

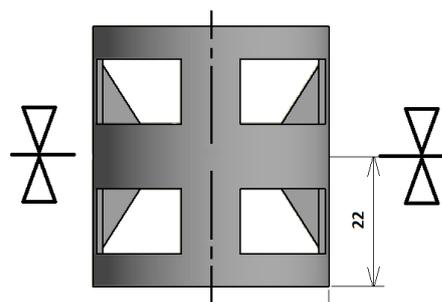
Stroj bývá opatřen komunikačním rozhraním, které umožňuje ruční zadání provozních parametrů, kam lze nahrát program řízení stroje, nebo z něj naopak odebírat data o probíhající činnosti stroje, pro zpětnou vazbu.

V současné době, kdy se hovoří o průmyslu „4. generace“ se objevují nové inovace spojené s modernizací stávajícího systému vstřikovacích strojů, kde hlavní prioritou nadále zůstává vysoká produktivita práce. Cílem je flexibilita, při současném nahrazení nedostatkového kvalifikovaného lidského faktoru, čehož se dosahuje implementací robotických systému řízených počítačem. Výrobní proces je důkladně studován, případné nalezené problémy eliminovány, následně dochází k optimalizaci. Management informací hraje rovněž podstatnou roli, neustálé snímání a porovnávání dat z výrobních cyklů umožňuje proces důkladně sledovat. Přetrvává snaha získávat data přímo z prostoru formy, což dříve bylo poměrně problematické. Nyní lze pomocí tzv. „chytrého zařízení formy“, získávat data z oblasti horkého vtokového systému z pohyblivé části formy a odesílat je na cloud. Vývoj se rovněž dotýká i samotné technologie zde je třeba zmínit možnost vícekomponentní vstřikování, které umožňuje vstřikovat více materiálů různých vlastností a barev na jednom stroji pomocí více vstřikovacích jednotek při rotaci samotné vstřikovací formy o více dutinách.

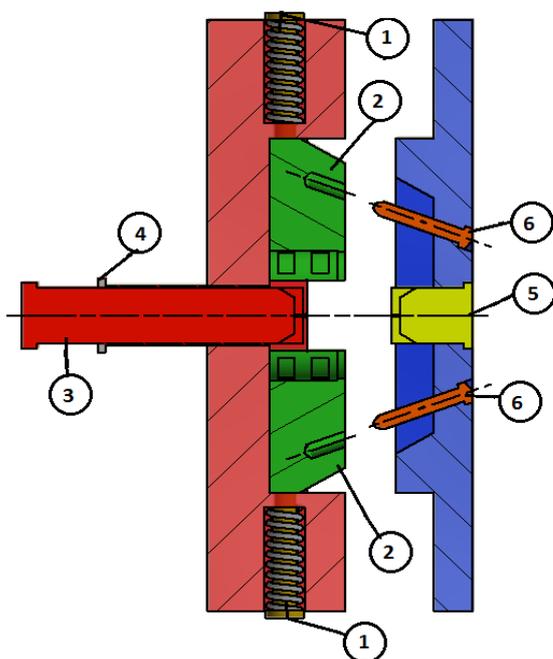
### 3 NÁVRH ŘEŠENÍ [8], [29], [43]

Prvním nezbytným krokem řešení vstříkovací formy pro danou součást je poloha dělicí roviny na součásti, její nevhodnější umístění vzhledem k tvarové složitosti zobrazuje obrázek 31.

Obr. 31 Umístění dělicí roviny na dílci.

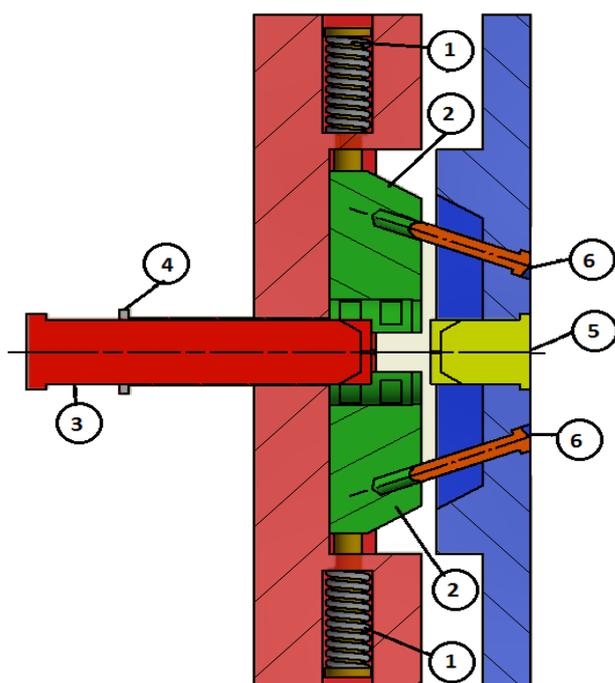


Tvar řešené součásti společně s takto umístěnou dělicí rovinou umožňuje navrhnout postup, vytváření tvarové dutiny, přestavováním prvků formy, který je doplněn o schématické obrázky.

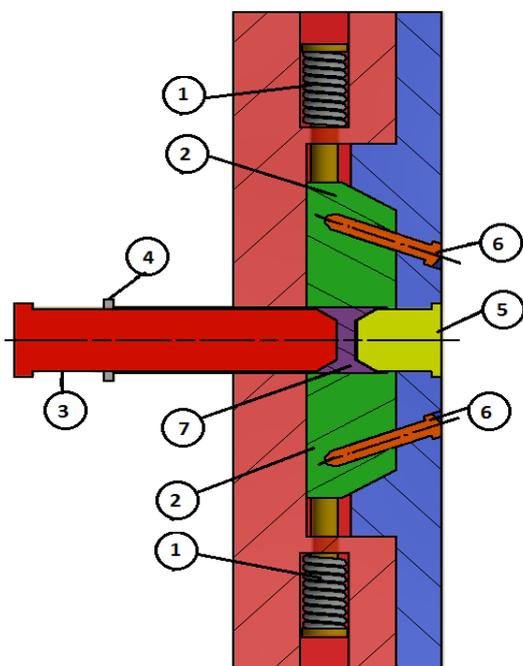


V prvním kroku, viz obrázek 32, kdy je forma plně otevřená, je na pružiny (1) vyvinuta síla, což vede k jejich stlačení a posunutí kamenů (2) směrem ke středu formy, ve kterém se nachází pevný trn (3), jehož spodní část se opírá o pevnou upínací desku a horní část vytváří levou polovinu dutiny v prostoru dílce. Vyhazovací kroužek (4) obepíná pevný trn a vytváří tak okraj dílce. Identicky naproti v pohyblivé části formy se nachází pohyblivý trn (5), který vytváří pravou část dutiny ve vyráběném dílci, přičemž druhý okraj je tvořen samotnou pohyblivou částí formy (*modře*). Přesnou polohu kamenů zajišťují vodící klíny (6) nacházející se rovněž v pohyblivé části formy.

Obr. 32 Tvarová dutina v okamžiku otevření formy (*vlevo nahoře*).



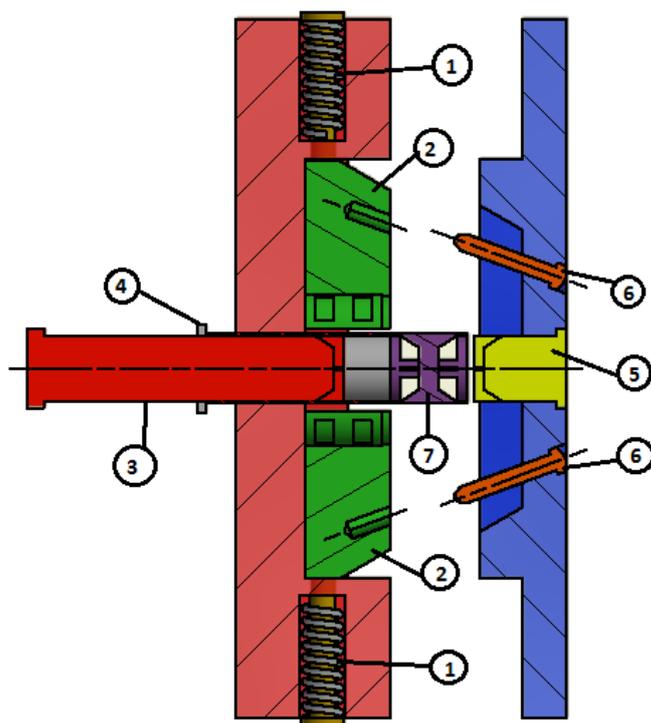
V druhém kroku, viz obrázek 33, který je charakterizován vzájemným přiblížením pevné a pohyblivé části formy, se stále zvyšuje síla stlačující pružiny (1), kameny (2) se tak posouvají stále blíže k pevnému trnu (3). Současně s tím, jak se přibližuje pohyblivá část formy k té pevné, nacházejí vodící klíny (6) díry v kamenech, čímž je pomáhají správně ustavovat. Rovněž i pohyblivý trn (5) se pomalu blíží k oblasti budoucí tvarové dutiny. Vyhazovací kroužek (4) setrvává stále ve stejné poloze. Obr. 33 Tvarová dutina v okamžiku uzavírání formy (*vlevo dole*).



Ve třetí kroku, viz obrázek 34, je vyvozena maximální síla působící na pružiny (1), které společně s dosedající pohyblivou částí formy ustavují kameny (2) do žádoucí polohy pro proces vstřikování. Pohyblivý trn (5) dosedl na pevný trn (3) a budoucí tvárníky zodpovědné za vznik dutého prostoru uvnitř vyráběného dílce jsou již, tam kde mají být. Nyní lze na uzavřenou formu vyvodit plnou uzavírací sílu a započít proces vstřikování, v jehož průběhu dochází ke vzniku tvarového dílce (7), přičemž forma zůstává uzavřená po stanovenou dobu chladnutí. Vyhazovací kroužek (4) setrvává stále ve stejné poloze.

Obr. 34 Tvarová dutina v okamžiku plného uzavření formy (*vlevo nahoře*).

V závěrečném kroku, viz obrázek 35, dochází k eliminaci uzavírací síly a otevření formy v dělicí rovině. Otvírání vede



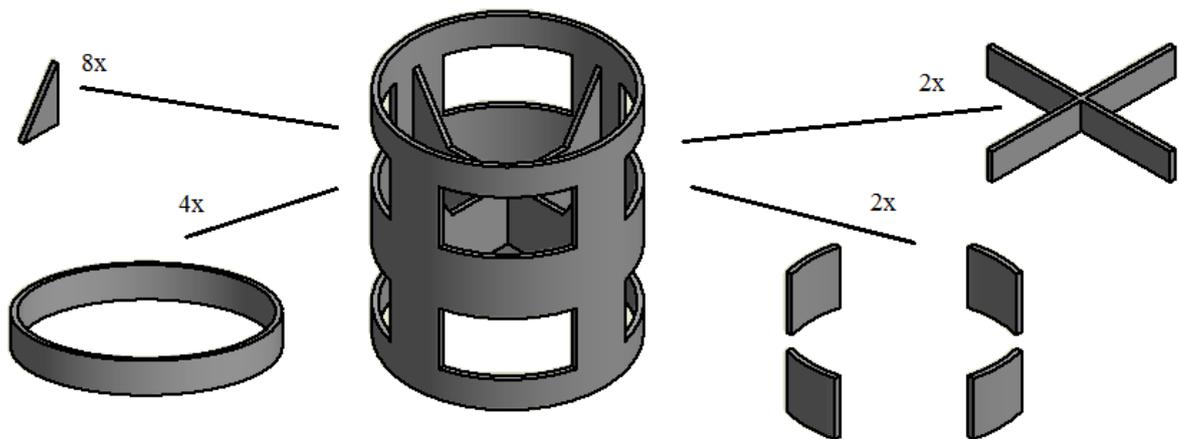
ke vzdalování pohyblivé části formy, vodící klíny (6) tak opouštějí díry v kamenech (2), spolu s tím se snižuje i síla působící na pružiny (1), které se vrací zpět a stahují sebou i kameny. Prvky otevírající formu se opírají o stejnou desku jako vyhazovací kroužek (4), s tím jak se zvedají a rozevírají formu, vede to i k posuvu kroužku, který stahuje z pevného trnu (3) hotovou součást (7), která padá do prostoru pod formou. Celý proces se tak opět ocitá na začátku a může být opětovně proveden.

Obr. 35 Tvarová dutina v okamžiku vyhození dílce (*vlevo nahoře*).

V dnešní době se již z praktických důvodů spojených s produktivitou práce a vyšší spolehlivostí odstupuje od pružin k hydraulice, nicméně pro potřeby menší výrobní série, lze s toto řešení stále použít.

### 3.1 Stanovení násobnosti formy [1], [8], [30]

Prvotním krokem, který je nutno provést je stanovení objemu vstřikované součásti. Z důvodu relativní složitosti tvaru bude vhodné jej rozdělit na několik dílčích tvarových skupin, viz obrázek 36. U každé z nich se pak vypočte objem jejích prvků a sečtením se získá celkový objem vstřikovaného dílce.



Obr. 36 Rozdělení vstřikovaného dílce na jednotlivé tvarové prvky.

$$V_1 = 4 \cdot \left[ \left( \frac{\pi \cdot D^2}{4} - \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) \cdot h_1 \right] \quad (3.1)$$

$$V_1 = 4 \cdot \left[ \left( \frac{\pi \cdot 40^2}{4} - \frac{\pi \cdot 38^2}{4} \right) \cdot 5,5 \right] \doteq 2695,48 \text{ mm}^3$$

kde:  $V_1$  - objem prvků tvaru prstence [ $\text{mm}^3$ ]

$D$  - vnější průměr kroužku [mm]

$d$  - vnitřní průměr kroužku [mm]

$h_1$  - výška prstence [mm]

$\pi$  - Ludolfovo číslo[-]

Prvním tvarem jsou čtyři prstence, objem se získá vynásobením plochy mezikruží výškou prstence, viz rovnice 3.1. Výsledek zaokrouhlen na dvě desetinná místa.

$$V_2 = 2 \cdot \left[ x \cdot \left( \frac{\pi \cdot D^2}{4} - \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) \cdot h_2 \right] \quad (3.2)$$

$$V_2 = 2 \cdot \left[ 0,33 \cdot \left( \frac{3,14 \cdot 40^2}{4} - \frac{3,14 \cdot 38^2}{4} \right) \cdot 11 \right] \doteq 889,06 \text{ mm}^3$$

kde:  $V_2$  - objem propojujících prvků [ $\text{mm}^3$ ]

$h_2$  - výška propojujícího prvku [mm]

$x$  - vytnutá plocha mezikruží [%]

Druhým tvarem jsou dvě skupiny propojujících prvků, které vytínají necelou třetinu plochy mezikruží, při vynásobení této plochy výškou spojovacího prvku se získá objem, viz rovnice 3.2. Výsledek zaokrouhlen na dvě desetinná místa.

$$V_3 = 2 \cdot \{ [2 \cdot (d \cdot s) - (s^2)] \cdot h_3 \} \quad (3.3)$$

$$V_3 = 2 \cdot \{ [2 \cdot (38 \cdot 1) - (1^2)] \cdot 5,5 \} = 825 \text{ mm}^3$$

kde:  $V_3$  - objem prvků tvaru kříže [ $\text{mm}^3$ ]

$s$  - tloušťka stěny prvku [mm]

$h_3$  - výška kříže [mm]

Třetím tvarovým prvkem jsou dva vnitřní kříže, které se skládají se dvou křížících se obdélníků, proto je nutné odečíst střed jejich průniku, který je započten dvakrát, viz rovnice 3.3. Výsledek zaokrouhlen na dvě desetinná místa.

$$V_4 = 8 \cdot \left[ \left( \frac{h_4 \cdot b}{2} \right) \cdot s \right] = 8 \cdot \left[ \left( \frac{11 \cdot 7}{2} \right) \cdot 1 \right] = 308 \text{ mm}^3 \quad (3.4)$$

kde:  $V_4$  - objem prvků tvaru žebra [ $\text{mm}^3$ ]

$s$  - tloušťka stěny prvku [mm]

$h_4$  - výška žebra [mm]

$b$  - délka žebra [mm]

Posledním tvarovým prvkem je soustava dvanácti podpůrných žeber, viz rovnice 3.4. Výsledek zaokrouhlen na dvě desetinná místa.

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 \quad (3.5)$$

$$V = 2695,48 + 889,06 + 825 + 308 = 4717,54 \text{mm}^3$$

$$V \doteq 4718 \text{mm}^3 \rightarrow V = 4,718 \text{cm}^3$$

kde: V - celkový objem vstřikované součásti [ $\text{cm}^3$ ]

Následně se součtem dílčích objemů jednotlivých tvarových prvků získá celkový objem vstřikované součásti, viz rovnice 3.5. Výsledek zaokrouhlen na celá čísla a převeden na centimetry čtvereční podělením.

$$G = \rho \cdot V = 0,92 \cdot 4,718 = 4,3046 \text{ g} \doteq 4,34 \text{ g} \quad (3.6)$$

kde:  $\rho$  - hustota polypropylenu [ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ]

G - hmotnost vstřikovaného dílce [g]

Výpočet hmotnosti vstřikovaného dílce, viz rovnice 3.6, se provede vynásobením objemu součásti hustotou polypropylenu, viz tab. 1. Výsledek zaokrouhlen na tři desetinná místa.

Druhým krokem je stanovení násobnosti formy, přičemž je nejprve potřeba určit dobu vstřikovacího cyklu. Pro jejich stanovení je nutné vypočítat základní parametry vtokového systému, u něhož budeme z důvodu nejlepších vlastností volit kruhový průřez kanálků. Samotný výpočet vyžaduje zvolení koeficientů odpovídajících použitému materiálu a tabulkovou hodnotu průměru kanálku. Z použitého materiálu vychází koeficient tekutosti, který je pro polypropylen roven jedné.

$$h = 4 \cdot h_1 + 2 \cdot h_2 = 4 \cdot 5,5 + 2 \cdot 11 = 44 \text{mm} \quad (3.7)$$

kde: h - výška vstřikovaného dílce [mm]

Při návrhu koeficientu délky rozváděcího kanálku je potřeba vycházet z největšího rozměru vstřikovaného dílce, kterým je v tomto případě celková výška vstřikované součásti, viz rovnice 3.7.

$$h = 44 \text{mm} \rightarrow L = 60 \text{mm} \rightarrow K_2 = 1,08 \quad (3.8)$$

kde: L- délka rozváděcího kanálku [mm]

$K_2$  - koeficient délky rozváděcího kanálku [-]

Pro vypočtenou výšku vstřikovaného dílce se stanoví interval koeficientu, viz příloha 1, přičemž jejím navýšením se získá délka rozváděcího kanálku, viz rovnice 3.8, přičemž při navýšování je vhodné zůstat v určeném intervalu.

$$D_k = D_{\text{TAB}} \cdot K_1 \cdot K_2 = 2,55 \cdot 1 \cdot 1,08 = 2,754 \text{mm} \quad (3.9)$$

kde:  $D_k$ - průměr rozváděcího kanálku [mm]

$D_{\text{TAB}}$  - tabulková hodnota průměru rozváděcího kanálku [mm]

$K_1$  - koeficient tekutosti materiálu [-]

Určení tabulkové hodnoty průměru rozváděcího kanálku je závislé na tloušťce stěny výstřiku, v případě zadané součásti je roven jedné, a na hmotnosti výstřiku, hodnotu určíme z tabulky, viz příloha 2.

$$V_k = \frac{\pi \cdot D_k^2}{4} \cdot L = \frac{3,14 \cdot 2,754^2}{4} \cdot 60 = 357,2307 \text{ mm}^3 \quad (3.10)$$

$$V_k \doteq 357,2 \text{ mm}^3 \rightarrow V_k = 0,3572 \text{ cm}^3$$

kde:  $V_k$ - objem rozváděcího kanálku [ $\text{cm}^3$ ]

Při znalosti délky a průměru kanálku lze vypočítat jeho objem, viz rovnice 3.10, přičemž bude větší než ve skutečnosti, neboť se nebere v potaz zúžení v oblasti vtokového ústí. Pro následující výpočty je vhodné provést zaokrouhlení na jedno desetinné místo spolu s převodem výsledku na centimetry krychlové. Skutečný objem bude nižší z důvodu zmenšení průřezu kanálku těsně před vtokem do tvarové dutiny a to z důvodu snadnějšího oddělení výrobku od vtokového systému.

Třetím krokem je určení násobnosti formy. Nejprve se stanoví praktická násobnost z počtu kusů výrobní série (tab. 3), přičemž pro zadaný počet kusů vyneseme v grafu (příloha 3) na ose x kolmici, v bodě protnutí s křivkou se určí velikost na ose y a výsledek se zaokrouhlí na celé číslo, neboť nelze vyrábět jen část výrobku. Pro zadané parametry výrobní série je praktická násobnost rovna dvěma.

$$V_D = n_p \cdot [V + V_k] + V_{HV} + y \quad (3.11)$$

$$V_D = 2 \cdot [4,718 + 0,3572] + (3 \cdot 0,3572) + 2,778 = 14 \text{ cm}^3$$

kde:  $V_D$ - vstříkovaný objem [ $\text{cm}^3$ ]

$n_p$  - praktická násobnost [-]

$V_{HV}$ - předběžný objem vtokového kužele [ $\text{cm}^3$ ]

$y$  - navýšení z důvodu doplňování materiálu ve fázi dotlaku [ $\text{cm}^3$ ]

Pro určení termínové násobnosti formy je nutno určit nejprve dobu vstříkování a to na základě vstříkovaného objemu, kam je nutno zahrnout i objem vtokových systémů, a typu vstříkovaného materiálu, viz rovnice 3.11, Navíc je nutné připočíst přídavek na doplňování materiálu, který se volí v rozmezí 2 až 3 krychlových centimetrů, pro výpočet byla zvolena hodnota 2,778 krychlových centimetrů. V tomto okamžiku nelze stanovit objem vtokového kužele, z důvodu neznalosti rozměrů desek formy. Víme však, že průměr vtokového kužele bude větší než průměr rozváděcího kanálku, proto lze objem vtokového kužele předběžně stanovit jako trojnásobek objemu vtokového kanálku. Polypropylen je materiál se střední viskozitou, viz příloha 4., proto se hodnota doby vstříkování volí z prostředního sloupce, což pro daný vstříkovaný objem tedy spadá do intervalu 0,6 až 0,75 sekund, pro další výpočty uvažováno 0,6 sekund.

$$t_k = \frac{s^2}{\pi^2 \cdot a_{\text{eff}}} \cdot \ln \left[ \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{(T_M - T_W)}{(T_e - T_W)} \right] \quad (3.12)$$

$$t_k = \frac{1^2}{3,14^2 \cdot 0,067} \cdot \ln \left[ \frac{8}{3,14^2} \cdot \frac{(250 - 50)}{(100 - 50)} \right] = 1,78 \text{ s}$$

kde:  $t_k$  - doba chlazení [s]

$a_{\text{eff}}$  - měrná tepelná vodivost [ $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$T_M$  - teplota taveniny plastu [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_W$  - teplota formy [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_e$  - střední teplota odformování [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Pro stanovení doby chlazení je nezbytné navolit parametry teploty ležící v intervalech tabulky 2. Teplota taveniny zvolena  $250^{\circ}\text{C}$ , teplota formy  $50^{\circ}\text{C}$  a střední teplotu odformování  $100^{\circ}\text{C}$ , provedení výpočtu, viz rovnice 3.12, s následným zaokrouhlením výsledku na dvě desetinná místa.

$$t_c = t_1 + t_2 + t_v + t_k + t_3 + t_4 = 3 \text{ až } 4 + t_v + t_k \quad (3.13)$$

$$t_c = 3,62 + 0,6 + 1,78 = 6 \text{ s}$$

kde:  $t_c$  - doba vstříkovacího cyklu [s]

$t_v$  - doba vstříkování [s]

$t_1$  - doba uzavření formy [s]

$t_2$  - doba přisunutí vstříkovací jednotky [s]

$t_3$  - doba otevření formy a vyhození výstřiku [s]

$t_4$  - časová prodleva [s]

Jak již bylo uvedeno výše, doba vstříkovacího cyklu v sobě zahrnuje několik dílčích úseků, jedná se o dobu uzavření formy před vstříkováním, dobu přisunutí vstříkovací jednotky, dobu vstříkování a chlazení, dobu otevření formy a vyhození výstřiku, a čas prodlevy, jejich součtem dostaneme dobu vstříkovacího cyklu, viz rovnice 3.13. Obecně se uvádí, že operace spojené s pohybem stroje zabírají zhruba 3 až 4 sekundy, pro výpočet byla zvolena hodnota 3,62 sekund.

$$n_t = \frac{N \cdot t_c}{T_p \cdot K \cdot 3600} = \frac{40\,000 \cdot 6}{72 \cdot 0,7 \cdot 3600} = 1,32 \doteq 2 \quad (3.14)$$

kde:  $n_t$  - termínová násobnost [-]  
 $N$  - velikost výrobní série [-]  
 $T_p$  - termín dodávky [h]  
 $K$  - faktor využití času [-]

Nyní, při znalosti doby vstřikovacího cyklu lze přejít k výpočtu termínové násobnosti formy, viz rovnice 3.14. Výsledek zaokrouhlen na celá čísla. Z termínové násobnosti vyplývá, že pro danou výrobní sérii bude postačovat dvojnásobná forma, čili zde budou dvě tvarové dutiny.

### 3.2 Odvzdušnění formy [1], [2]

Odvzdušnění formy je podstatným výpočtem, správné dimenzování odvzdušňovacích mezer zabraňuje zatlačování bublin neuniklého vzduchu do materiálu, nebo jeho spálení, které je způsobeno nárůstem teploty z důvodu zvýšení tlaku, kdy vzduch nemá kam unikat.

$$G_{S\,max} = 2,15 \cdot f \cdot p_1 \cdot \sqrt{\frac{1}{R \cdot T_2}} \quad (3.15)$$

$$G_{S\,max} = 0,4 \cdot f \cdot p_1 \cdot \sqrt{\frac{1}{T_2}} \quad (3.16)$$

kde:  $G_{S\,max}$  - maximální průtočné množství plynu [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ]  
 $f$  - průřez (plocha odvzdušňovacího kanálku) [ $\text{m}^2$ ]  
 $R$  - plynová konstanta vzduchu  $R=29,3$  [ $\text{m} \cdot \text{K}^{-1}$ ]  
 $T_2$  - konečná teplota stlačeného vzduchu [K]  
 $p_1$  - tlak vzduchu v tvarové dutině před plněním [ $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$ ]

Pochody odehrávající se při vstřikování materiálu v tvarové dutině formy jsou po termodynamické stránce složité, pro výpočty je proto vhodné uvažovat, že při nich nedochází ke sdílení tepla. Za tohoto předpokladu je průtočné množství plynu definováno rovnicí 3.15, kterou lze zjednodušit na rovnici 3.16.

$$\tau = \frac{G_1}{G_{S\,max}} \rightarrow G_{S\,max} = \frac{G_1}{\tau} = \frac{V \cdot \gamma}{10^6 \cdot t_v} \quad (3.17)$$

$$\tau = \frac{4,718 \cdot 1,16}{10^6 \cdot 0,6} = 9,125 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

kde:  $\tau$  - doba, za kterou vzduch opustí tvarovou dutinu [s]  
 $G_1$  - hmotnost vzduchu v tvarové dutině [kg]  
 $\gamma$  - měrná hmotnost vzduchu [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

Při znalosti objemu tvarové dutiny lze stanovit hmotnost vzduchu před začátkem vstřikování, přičemž lze definovat dobu, za jakou vzduch opustí dutinu na základě maximálního průtoku plynu, viz rovnice 3.17, jelikož objem dutiny dosazujeme v centimetrech krychlových je potřeba jej převést na metry krychlové podělením milionem.

$$k = \frac{\ln \frac{p_2}{p_1}}{\ln \frac{V_1}{V_2}} = \frac{\ln \frac{p_2}{p_1}}{\ln \frac{V_1}{0,01 \cdot V_1}} = \frac{\ln \frac{20}{0,11}}{\ln \frac{4,718}{0,01 \cdot 4,718}} = 1,1298187 \doteq 1,13 \quad (3.18)$$

kde:  $k$  - koeficient pro výpočet teploty [-]  
 $p_1$  - tlak vzduchu v tvarové dutině před plněním [MPa]  
 $p_2$  - tlak stlačeného vzduchu před koncem plnění [MPa]  
 $V_1$  - objem tvarové dutiny formy [ $\text{cm}^3$ ]  
 $V_2$  - uvažované 1% nezatečení objemu materiálu určeného pro dutinu [ $\text{cm}^3$ ]

Dalším krokem je stanovení teploty vzduchu unikajícího odvodušňovací drážkou, přičemž pro její určení je nutné znát koeficient  $k$ , viz rovnice 3.18. Tlak vzduchu ve formě je o něco málo větší než běžný atmosférický tlak z důvodu vyšší teploty formy, pro výpočet se bude uvažovat 0,11 MPa, tlak před koncem plnění obvykle dosahuje hodnoty mezi 20 až 30 MPa, ve výpočtu bude pracováno s 20 MPa. Koeficient  $k$  se pohybuje v rozsahu 1 až 1,4, což potvrzuje výsledek rovnice 3.18, ten byl navíc zaokrouhlen na dvě desetinná místa.

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (3.19)$$

$$T_2 = (273,15 + 50) \cdot \left(\frac{20}{0,11}\right)^{\frac{1,13-1}{1,13}} = 587,98 \text{ K} \doteq 588\text{K}$$

kde:  $T_1$ - teplota v prostoru formy před vstříkovaním (teplota temperace formy) [K]  
Pro teplotní podmínky v prostoru formy se bude uvažovat zvolená teplota formy 50 °C. Při znalosti koeficientu  $k$  lze nyní přistoupit k výpočtu konečné teploty stlačeného vzduchu, viz rovnice 3.19. Výsledek je zaokrouhlen na celá čísla.

$$f = 2,5 \cdot G_1 \cdot \frac{\sqrt{T_2}}{p_1 \cdot \tau} = 2,5 \cdot G_1 \cdot \frac{\sqrt{T_2}}{p_1 \cdot t_v} \quad (3.20)$$

$$f = 2,5 \cdot 9,125 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\sqrt{588}}{110000 \cdot 0,6} = 8,3814 \cdot 10^{-9} m^2$$

$$f = 8,3814 \cdot 10^{-9} m^2 \rightarrow 8,3814 \cdot 10^{-3} mm^2$$

kde:  $f$ - průřez odvodušňovacího kanálku [m<sup>2</sup>]

Nyní je možné spočítat průřez odvodušňovacího kanálku, viz rovnice 3.20. Výsledek je vhodné převést na milimetry čtvereční.

$$f = h \cdot \check{s} \rightarrow \check{s} = \frac{f}{h} = \frac{0,0083814}{0,04} = 0,09535 \text{ mm} \cong 0,1 \text{ mm} \quad (3.21)$$

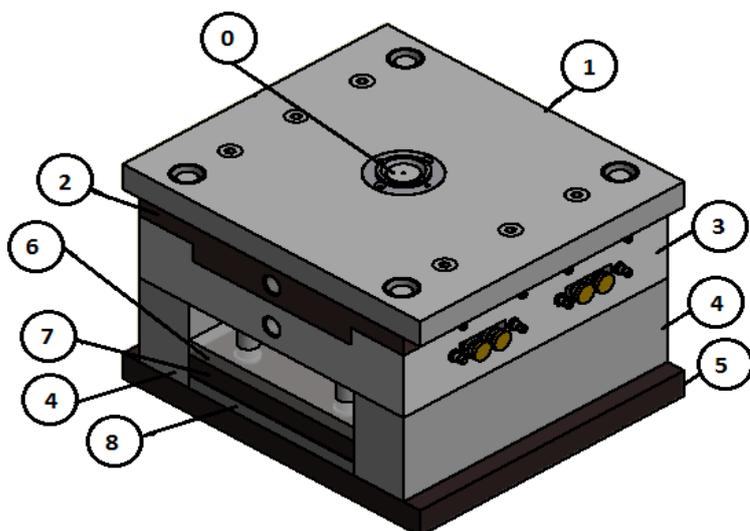
kde:  $h$ - hloubka odvodušňění [mm]

$\check{s}$ - šířka odvodušňění [mm]

Pro polypropylen se doporučuje používat hloubku odvodušňění 0,04 milimetru, viz příloha 7., takže lze nyní dopočítat rozměry šířky drážky odvodušňění, viz rovnice 3.21. Pro správné umístění drážky však bude vhodné provést simulaci hromadění bublin vzduchu v součásti.

### 3.3 Řešení konstrukce formy [1], [30]

Znalost násobnosti formy, spolu s údaji o délce rozváděcích kanálků umožňuje stanovit potřebné rozměry desek formy, které musí být schopny pojmout všechny potřebné systémy



formy, spolu s tím jde i nutnost dostatečné kompenzace tloušťky jednotlivých desek, která záleží především na jejich účelu, který v rámci celku formy plní. Na obrázku 37 jsou očíslovány jednotlivé desky, s výjimkou bodu nula, který zobrazuje umístění vtokového kužele zajištěného objímkou vtokového kanálu na středu.

Obr. 37 Desky tvořící vstříkovací formu.



Desky značené body 1 a 2 tvoří pohyblivou část formy, body 3 až 8 jsou umístěny v pevné části, nicméně u desek 6 a 7 dochází k pohybu.

Přehled jednotlivých desek na obrázku 37 a jejich výšek, shrnuje tabulka 5, tyto rozměry budou důležité jak při kontrole zvoleného vstřikovacího stroje. V případě desek 2 a 3 je nutno brát v potaz jejich členitost, která umožňuje jejich vzájemné zapadnutí do sebe, důležité je říci, že desky v uzavřeném stavu mají společnou výšku 114 milimetrů.

Tab. 5 Rozměry desek formy z obrázku 37.

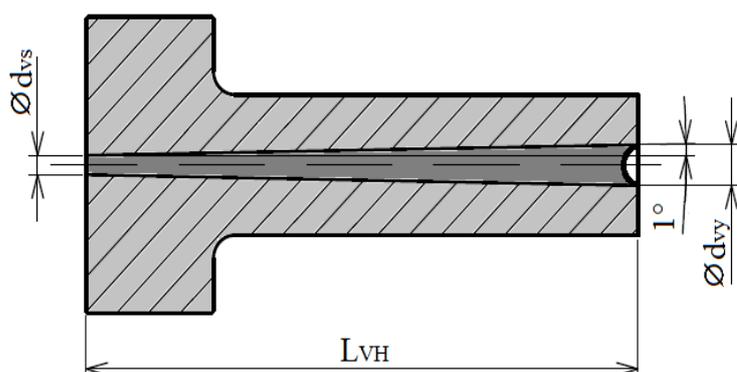
Číslo desky	Název desky odvozený od její funkce	Délka [mm]	Šířka [mm]	Maximální výška [mm]
1	Pohyblivá upínací deska	450	400	36
2	Deska pohyblivého trnu	400	400	52
3	Deska vedení kamenů	400	400	89
4	Podpěrná deska*	400	75	120
5	Pevná upínací deska	450	400	36
6	Deska vedení vyhazovačů	250	400	20
7	Deska vyhazovačů	250	400	30
8	Deska pevného trnu	250	400	20

\* zastoupeno v rámci formy dvakrát

### 3.3.1 Řešení vtokového systému [1], [30]

Nyní, když jsou jednotlivé tloušťky desek známy, bude vhodné vrátit se do oblasti výpočtů násobnosti a upřesnit zde předběžně stanovené hodnoty, které umožnily určit násobnost, ale neodpovídají skutečným hodnotám. Prvotní orientační hodnoty byly vztahovány k jednotlivým částem vtokového systému, jehož velikost je výhodné znát jednak z důvodu ověření toho zda předběžně zvolené hodnoty leží ve stejných intervalech jako ty skutečné, dále pak z příčiny určení poměru mezi objemem vstřikovaných dílců a objemem vtokovým zbytkům, pro možné ekonomické zhodnocení výroby.

První hodnotou, kterou je potřeba přesně specifikovat je objem hlavního vtokového kužele, který byl pro neznalost tlouštěk desek předběžně stanoven jako trojnásobek objemu



rozdávěcího kanálku. V praktické aplikaci je hlavní vtok obvykle obepínán vtokovou vložkou, která určuje jeho rozměry, viz obrázek 38.

Obr. 38 Nákres vtokové vložky s rozměry hlavního vtokového kužele.

$$G_2 = 2 \cdot G = 2 \cdot 4,34 = 8,68 \text{ g} \quad (3.22)$$

$$G_2 = 8,68 \text{ g} \doteq 10 \text{ g} \rightarrow d_{vs} = 2,5 \text{ mm}$$

kde:  $d_{vs}$  - vstupní průměr hlavního vtokového kužele [mm]

Prvním rozměrem, který je potřeba stanovit je vstupní průměr hlavního vtoku, k jeho určení je potřeba znát hmotnost vstříkovaných dílců, ta v tomto případě nepřekročí deset gramů, viz rovnice 3.22, jelikož se tato hodnota v příloze 5. nevyskytuje, budeme brát hodnotu jí nejbližší, čili deset gramů, při znalosti materiálu tak určíme vstupní průměr.

$$d_{vy} = d_{vs} + 2 \cdot tg\alpha \cdot L_{VH} = 2,5 + 2 \cdot tg1 \cdot 84 \doteq 5,433 \text{ mm} \quad (3.23)$$

kde:  $d_{vy}$  - výstupní průměr hlavního vtokového kužele [mm]

$L_{VH}$  - délka kužele hlavního vtoku [mm]

$\alpha$  - úhel rozšíření vtokového kužele [°]

Běžně dosahuje úhel rozšíření vtokového kužele velikosti 1 až 1,5 stupně, pro výpočet výstupního průměru hlavního vtoku, viz rovnice 3.23, se bude uvažovat jeden stupeň.

$$V_{HVs} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot L_{VH} \cdot \left[ \left( \frac{d_{vy}}{2} \right)^2 + \frac{d_{vy}}{2} \cdot \frac{d_{vs}}{2} + \left( \frac{d_{vs}}{2} \right)^2 \right] \quad (3.24)$$

$$V_{HVs} = \frac{1}{3} \cdot 3,14 \cdot 84 \cdot \left[ \left( \frac{5,433}{2} \right)^2 + \frac{5,433}{2} \cdot \frac{2,5}{2} + \left( \frac{2,5}{2} \right)^2 \right]$$

$$V_{HVs} = 1084,7127 \text{ mm}^3 \doteq 1085 \text{ mm}^3 \rightarrow V_{HVs} = \frac{1085}{1000} = 1,085 \text{ cm}^3$$

kde:  $V_{HVs}$  - skutečný objem vtokového kužele [ $\text{cm}^3$ ]

Nyní již lze stanovit objem vtokového kužele, viz rovnice 3.24, pro výpočet lze použít vzorec pro výpočet komolého kužele, přičemž výsledný objem je o něco vyšší, než bylo jeho předběžné stanovení. Výsledek je zaokrouhlen na celá čísla a převeden na centimetry krychlové.

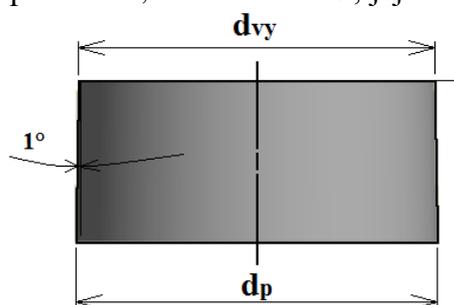
$$d_p = d_{vy} + 2 \cdot tg\alpha \cdot L_p = 5,433 + 2 \cdot tg1 \cdot 2,5 \doteq 5,52 \text{ mm} \quad (3.25)$$

kde:  $d_p$  - průměr dna prohlubně [mm]

$L_p$  - hloubka prohlubně [mm]

$\beta$  - úhel rozšíření prohlubně [°]

Částí vtokového systému, která ještě nebyla zmíněna a nesmí se na ni zapomenout je prohlubeň, viz obrázek 39, jejíž úhel rozšíření je stejný jako úhel vtokového kužele na který navazuje, proto lze výstupní průměr hlavního vtoku brát jako vstupní průměr prohlubně. Její hlavní význam účel souvisí s vyhozením vtokového zbytku. Pro určení průměru dna prohlubně se použije rovnice 3.25, přičemž výsledek se zaokrouhlí na dvě desetinná místa. Hlavní význam této veličiny bude při stanovení minimální přídržovací síly.



Obr. 39 Prohlubeň pod vtokovým kuželem.

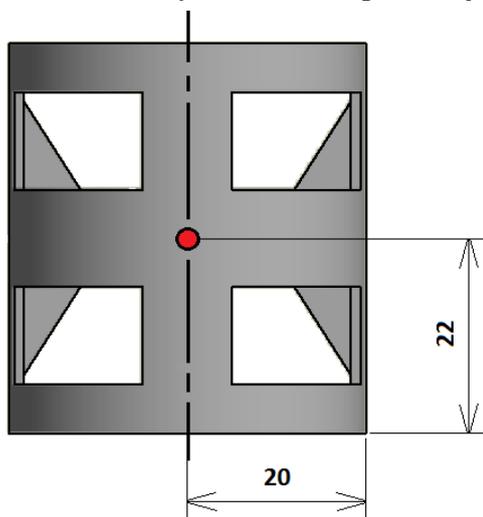
$$V_p \doteq 59 \text{ mm}^3 \rightarrow V_p = \frac{59}{1000} = 0,059 \text{ cm}^3 \quad (3.26)$$

kde:  $V_p$  - objem prohlubně [ $\text{cm}^3$ ]

Objem prohlubně by se určil modifikovanou rovnicí 3.24, namísto opakování podobného výpočtu bude vhodnější určit její objem pomocí programu Autodesk Inventor 2016, výsledek zaokrouhlit na celé číslo a následně převést na centimetry krychlové viz rovnice 3.26.

Dalším prvkem vtokového systému, k němuž ještě nebylo nic řečeno, je druh vtokového ústí, Z důvodu výroby větší série se bude využívat bodový vtok, jehož rozměry se stanoví z přílohy 6., nicméně příloha se přímo nevztahuje na polypropylen, proto odpovídající průměr bodového vtoku 0,6 až 0,8 mm bude pro jistotu navýšen na 1 mm, při délce jednoho milimetru.

Umístění vtokového ústí na vstřikované součásti bude mít zásadní vliv na správné plnění tvarové dutiny taveninou plastu, jelikož byl zvolen bodový vtok, který se vyznačuje



symetričností tvaru, bude v případě jeho umístění do dělicí roviny usnadněno jeho vyjmutí současně s vtokovým zbytkem. Umístění bodového vtoku na vstřikovaném dílci zobrazuje obrázek 40. Pro zjištění správnosti umístění vtoku bude nezbytné provést analýzu plnění dané součásti a to jednak z důvodu, zda výpočty stanovené parametry umožňují zaplnit prostor za daný čas, jednak zda nedojde k zatuhnutí vtoku před plným zaplněním tvarové dutiny, což by se projevilo zmetkovitostí součásti. K analýze byl použit program Autodesk Inventor 2016, podle něhož dojde k zaplnění dutiny za stanovený čas a nedojde tedy k předčasnému zamrznutí vtokového ústí.

Obr. 40 Umístění bodového ústí na vstřikovaném dílci.

Celkový objem navrhovaného vtokového systému, viz obrázek 21, nelze určit sečtením jeho dílčích prvků, neboť se v některých úsecích překrývají, nebo jako v případě ústí vtoku zkracují délku rozváděcího kanálku o jeden milimetr, proto bude vhodné k určení celkového objemu vtokového systému využít program Autodesk Inventor 2016, podle něhož je objem 1,815 cm<sup>3</sup>.

$$G_z = \rho \cdot V_z = 0,92 \cdot 1,815 = 1,6698 \text{ g} \doteq 1,67 \text{ g} \quad (3.27)$$

kde:  $G_z$  - hmotnost vtokového zbytku [g]

$V_z$  - objem vtokového systému [cm<sup>3</sup>]

Pro ekonomické zhodnocení bude výhodné určit hmotnost vtokového zbytku, viz rovnice 3.27. Výsledek je zaokrouhlen na tři desetinná místa.

Po dosažení skutečných hodnot navrhovaného vtokového systému do vzorců násobnosti formy nedošlo k výrazným změnám, které by se projevíly ať už změnou koeficientů, nebo jiným způsobem, nebyl tedy důvod k uvedení přepočtených vztahů. Pro přesnost níže uvedených výpočtů se však již bude počítat se skutečnými hodnotami stanovenými v této podkapitole.

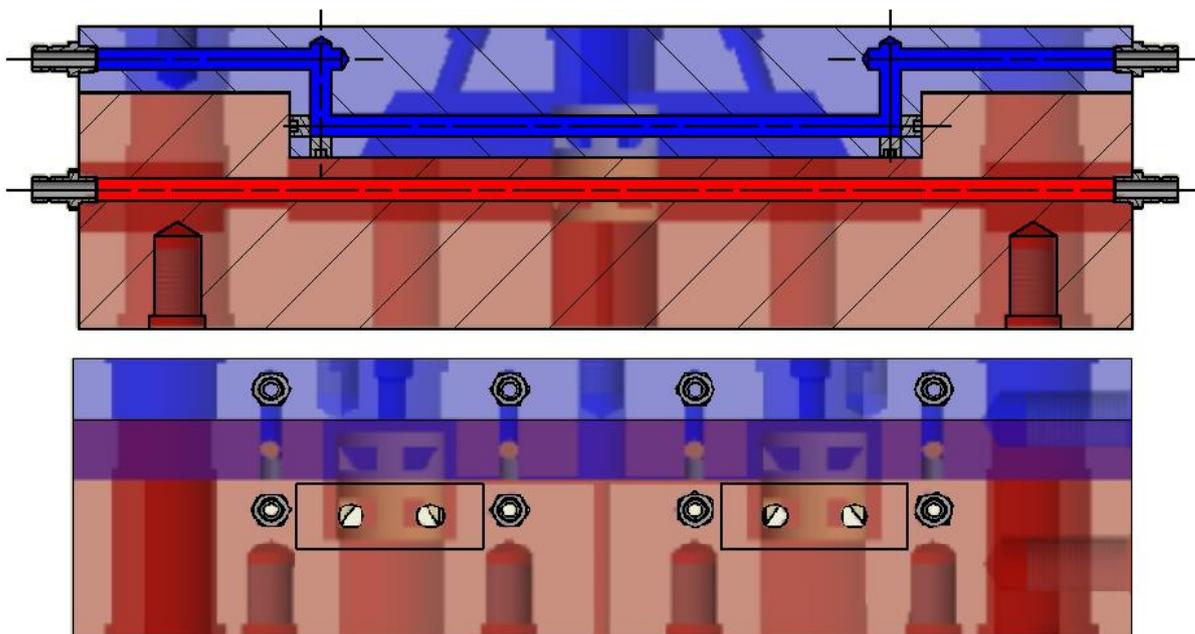
### 3.3.2 Řešení temperace formy [1], [30], [44]

Dalším systémem formy, kterému prozatím nebyla věnována pozornost, je temperační systém, kde bude vhodné nejprve určit průměr temperačních kanálů na základě přílohy 8. Velikost rámu formy sice neodpovídá standardizovaným rozměrům, nicméně jeho velikost spadá do intervalu, ve kterém se doporučuje použít kanál o průměru 8 milimetrů. Podle navolených parametrů, které byly použity při výpočtech, byla hodnota teploty formy stanovena na 50°C, což je teplota, pro kterou je použití vody jako temperačního média přijatelné. Výhodou bude lepší teplotní vodivost než v případě, kdyby byl použit olej. Konce kanálů budou zakončeny prvky, které umožňují připojení hadic pro přívod média.

Po stanovení průměru kanálů lze nyní přejít k samotnému uspořádání temperačního systému, a zamyslet se nad možnými variantami:

- využít systém konformní temperace, který by umožnil vést temperační kanály v těsné blízkosti vnitřní stěny chladnoucí součásti, nicméně by se zde mohl negativně projevit relativně malý průměr trnu. Hlavním problémem by zde však byla nemožnost umístit temperační kanály z vnější strany dílce do stejné vzdálenosti, proto, že by musely procházet skrz několik dílů formy a tudíž by bylo problematické zajistit těsnost média v systému na rozhraní jednotlivých dílů.
- využít konvenční systém temperace, kde by byly temperační kanály umístěny pouze z vnějšku, ve větší vzdálenosti od dílce. Z důvodu tvarového členění formy by musel být využit systém záslepek v pohyblivé části tvarové dutiny. Sice by zde docházelo k určité nerovnoměrnosti chladnutí, ale nebylo by potřeba řešit těsnost systému.

Z důvodu zajištění těsnosti temperačního systému bude použit systém konvenční temperace. Na obrázku 41 je vidět jeho rozložení, kde okolo každého vstřikovaného dílce vedou čtyři kanály. Dva umístěné v pevné části formy, která je vybarvena červeně, a dva v pohyblivé části formy, zobrazena modře. Nahoře je umístěn řez samotnými kanály, dole je pak pohled z boku na umístění kanálů ve stejné vzdálenosti od vstřikované součásti.



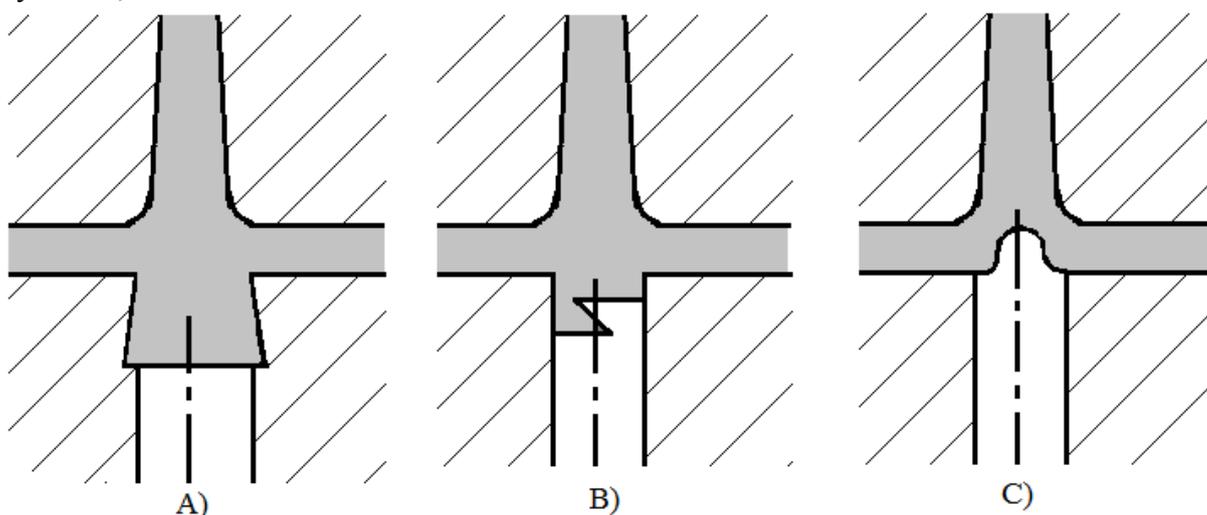
Obr. 41 Zobrazení uspořádání temperačního systému.

Tvar temperačních rozvodů v pevné části formy není ovlivněn tvarem desky, ve které se nachází, proto je možné je vést přímo. Problémem je zde uložení konců otvorů pod šrouby relativně blízko kanálům, proto jsou uloženy trochu výše od kraje vstřikované součásti, než je tomu v případě kanálů v pohyblivé části formy.

Průběh temperačních kanálů v pohyblivé části je do značné míry ovlivněn tvarem desky, ve které se nachází. Proto nelze vytvářet přímý kanál, ale musí být použita soustava na sebe navzájem kolmých kanálů, přičemž její tvar je navržen tak, aby se médium dostalo ve středu desky do optimální výšky vzhledem k součásti. Těsnost systému v každém kanálu zaručují čtyři záslepky, které usměrňují temperační médium správným směrem a současně zabraňují jeho vylití do prostoru dělicí roviny formy.

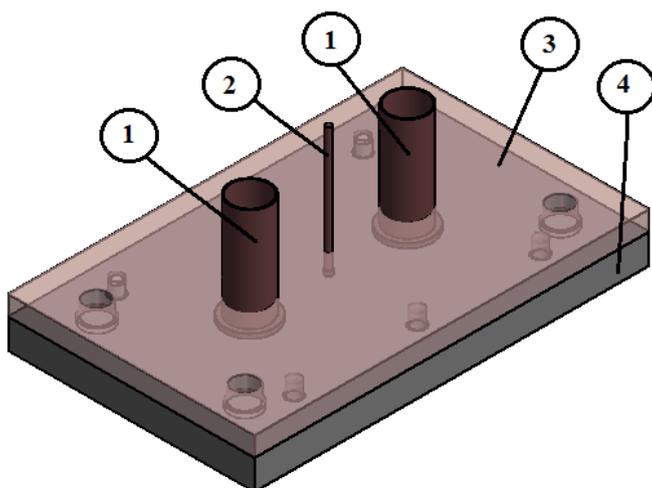
### 3.3.3 Řešení vyhazovacího systému

Po upřesnění výše uvedených systémů bude vhodné zamyslet se nad způsobem vyhození součásti z tvarové dutiny formy. Jelikož má součást válcový tvar a k jejímu vytvoření budou využity trny, bude způsob vyhození založený na setření součásti z trnu pomocí vyhazovacího kroužku. Současně se součástí je potřeba provést vyhození zbytku vtokového systému, proto bude třeba použít minimálně jeden vyhazovací kolík i na něj. Protože je největší koncentrace zbytkového materiálu v oblasti prohlubně pod vtokovým kuželem a jelikož se zde vtokový zbytek rozděluje na dvě symetricky stejné poloviny, bude nejvhodnější umístit vyhazovací kolík do oblasti pod prohlubeň. Existuje několik možných konstrukčních řešení tohoto vyhození, viz 42 obrázek.



Obr. 42 Možné způsoby řešení vyhození vtokového zbytku [1].

Při výše uvedených výpočtech byla uvažována možnost A, pro se vyhození vtokového zbytku provede tímto způsobem.



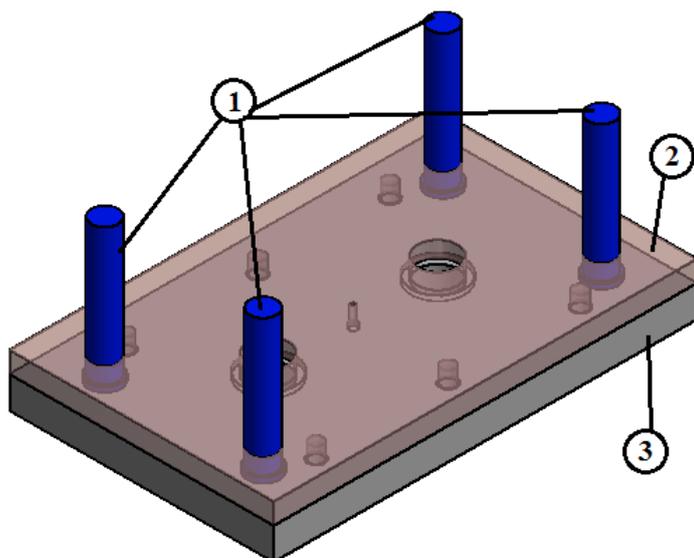
Na základě výše zmíněného lze navrhnout konečnou podobu vyhazovacího systému, viz obrázek 43. Vyhazovací kroužky a vyhazovač vtokového zbytku se budou opírat o desku vyhazovačů, která je pomocí soustavy šesti šroubů spojena s deskou vedení vyhazovačů a zabezpečuje tak polohu opřených vyhazovacích prvků. Společně s vyhazovacími prvky soustava nese i prvky, které pomáhají otevírat formu, těmi se ale práce bude zabývat až v následující podkapitole.

Obr. 43 Řešení vyhazovacího systému navrhované formy, kde 1 - vyhazovací kroužek, 2 - vyhazovač vtokového zbytku, 3 - deska vedení vyhazovačů, 4 - deska vyhazovačů.

### 3.3.4 Vedlejší systémy formy

Po vyřešení všech hlavních systémů formy se bude vhodné zaobírat návrhem jednotlivých vedlejších systémů a prvků, které ačkoliv nehrají tak podstatnou roli v rámci samotného procesu vzniku vstřikovaného dílce, mají stále často zásadní význam pro samotnou správnou činnost formy.

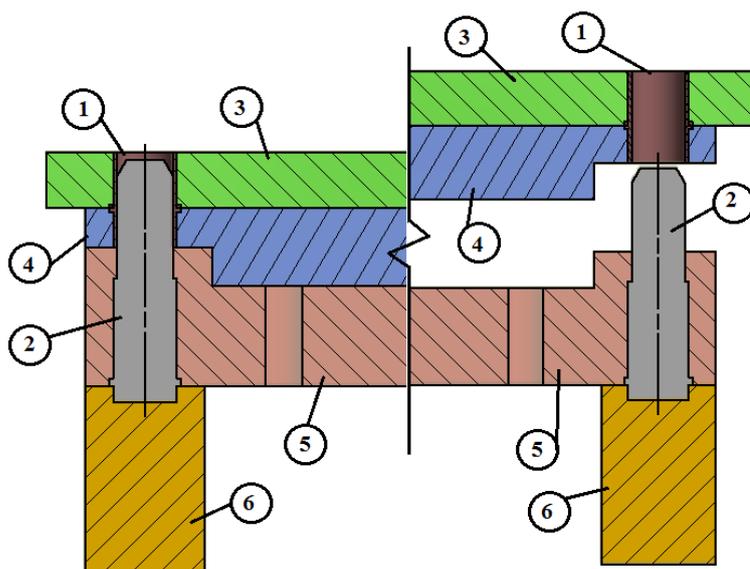
První z těchto skupin jsou prvky, které pomáhají se samotným pootevřením formy. Jedná se o otevírací kolíky, které jsou umístěny na stejné desce jako vyhazovače a v klidové poloze sahají do dělicí roviny formy. V počátcích otevírání formy, kdy se deska s vyhazovači posouvá



směrem k dělicí rovině formy, jsou to právě tyto kolíky, které pomáhají s otevíráním formy posunem pohyblivé části formy. S tím jak se forma otevírá stále více, kolíky ztrácejí s pohyblivou částí kontakt a na dalším otevírání se již nepodílejí. Jejich počet je do značné míry ovlivněn jejich průměrem a celkovou velikostí formy. Pro rovnoměrnost byly použity čtyři kolíky, viz obrázek 44, o menším průměru. Lze rovněž říci, že svou přítomností pomáhají správně vést desku s vyhazovači.

Obr. 44 Umístění otevíracích kolíků, kde 1 - otevírací kolík, 2 - deska vedení vyhazovačů, 3 - deska vyhazovačů.

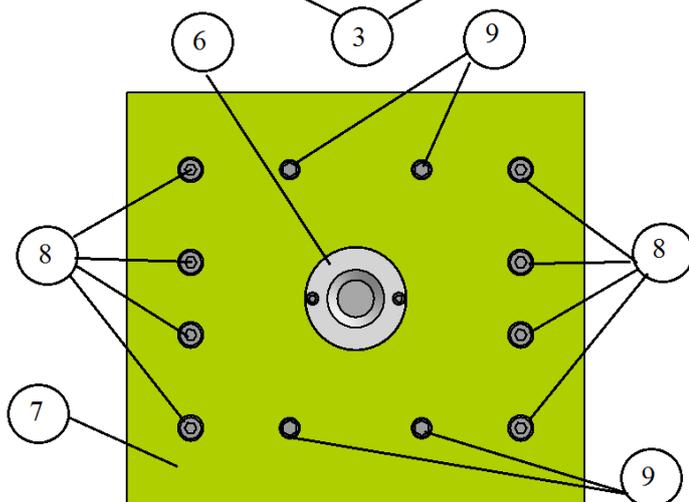
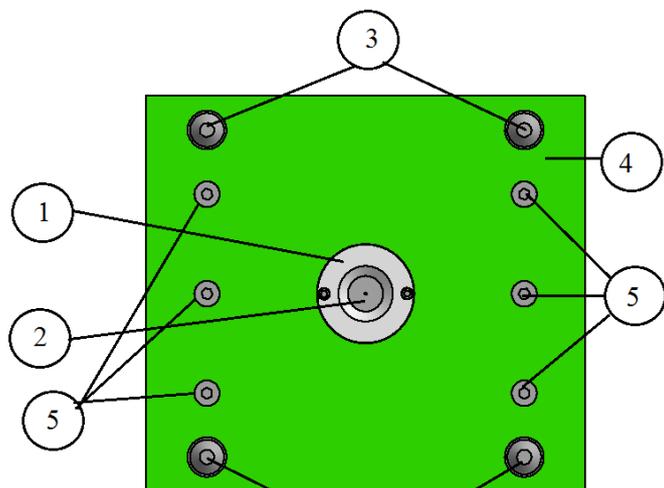
Vodící prvky jsou dalšími podstatnými vedlejšími systémy. Jejich účelem je zabezpečit přesnou polohu pohyblivých částí formy vůči sobě v průběhu a po ukončení pohybu. Z tohoto důvodu je jejich umístění vhodné do oblasti dělicí roviny. Pro navrhovanou formu byly použity čtyři vodící prvky, skládající se z vodícího sloupku a z vodícího pouzdra, přičemž vodící



sloupek je umístěn v pevné části formy, zapřen o podpěrnou desku a na místě držen deskou kamenů, která je spojena s podpěrnou deskou šrouby. Jeho konec je opatřen zkosením pro snadné zahledání vodícího pouzdra, které se nachází v pohyblivé části formy, kde se opírá o desku pohyblivého trnu a na místě je drženo pohyblivou upínací deskou pomocí šroubů. Na obrázku 45 je vidět řez uzavřené a otevřené formy se zaměřením na vodící prvek.

Obr. 45 Vodící prvek formy, kde 1 - vodící pouzdro, 2 - vodící kolík, 3 - pohyblivá upínací deska, 4 - deska pohyblivého trnu, 5 - deska vedení kamenů, 6 - podpěrná deska.

Při ustavení formy vůči vstřikovacímu stroji zaujímají významnou úlohu středící elementy, viz obrázek 46. První středící kroužek se nachází na pevné upínací desce, kde plní funkci objímky vtokového kanálu, která pomáhá s ustavením vstřikovací trysky stroje vůči vtokovému kuželi a současně svou přítomností zajišťuje jeho polohu. Druhý středící kroužek



je umístěn na pevné upínací desce, jehož přítomnost zajišťuje přesné ustavení pevné poloviny formy vzhledem ke vstřikovacímu stroji. Mimo tyto elementy se mohou u forem vyskytovat ještě další a to v závislosti na typu upínacích ploch. Pro navrhovanou formu bude stačit použití vtokové objímky a středícího kroužku. Oba tyto prvky vyžadují jisté zhloubení, v rámci desky ne níž se nacházejí.

Obr. 46 Umístění objímky vtokového kanálu a středícího kroužku, kde

1 - objímka vtokového kanálu, 2 - vtokový kužel, 3 - vodící element (vodící sloupek + vodící pouzdro), 4 - pohyblivá deska, 5 - šrouby spojení pohyblivé upínací desky s deskou pohyblivého trnu, 6 - středící kroužek 7 - pevná upínací deska, 8 - šrouby spojující pevnou upínací desku s podpěrnou deskou a deskou vedení kamenů, 9 - šrouby spojující pevnou upínací desku s deskou pevného trnu.

Posledním prvkem formy, který nelze označit ani jako systém je soustava dvou určených pro manipulaci s formou, přičemž jedno oko je zašroubováno do desky pohyblivého trnu a druhé do desky vedení kamenů. Oko je značeno jako GB/T 825-1988 Type A M 24, viz obrázek 47. Tím byly vyčerpány veškeré náležitosti týkající se návrhu formy, nyní je možno přejít k volbě vhodného stroje pro danou formu.

Obr. 47 Oko GB/T 825-1988 Type A M 24.



### 3.4 Volba vstřikovacího stroje [1], [8], [30], [45], [46]

Nyní už lze přejít k určování parametrů, podle nichž se bude volit stroj, jedná se o minimální hodnoty vstřikovací kapacity, plastifikační kapacity a přidržovací síly sloužící ke stanovení nejnižší hranice parametrů, které musí stroj zaručeně splňovat.

$$c_v \geq 1,25 \cdot n_t \cdot (V + V_k) + 1,25 \cdot (V_{HVs} + V_p) \quad (3.28)$$

$$c_v = 1,25 \cdot 2 \cdot (4,718 + 0,3572) + 1,25 \cdot (1,085 + 0,059)$$

$$c_v = 14,118 \text{ cm}^3 \doteq 14,12 \text{ cm}^3$$

kde:  $c_v$  - minimální vstřikovací kapacita [ $\text{cm}^3$ ]

Vstřikovací kapacita stroje je množství taveniny plastu, které je schopen stroj během vstřikovací fáze vpravit do tvarové dutiny formy. Její minimální hodnota se určí na základě násobnosti formy a vstřikovaného objemu, viz rovnice 3.28. Výsledek je zaokrouhlen na dvě desetinná místa.

$$c_p \geq \frac{4,5 \cdot n_t \cdot \rho \cdot (V + V_k)}{t_c} + \frac{4,5 \cdot \rho \cdot (V_{HVs} + V_p)}{t_c} \quad (3.29)$$

$$c_p = \frac{4,5 \cdot 2 \cdot 0,92 \cdot (4,718 + 0,3572)}{6} + \frac{4,5 \cdot 0,92 \cdot (1,085 + 0,059)}{6}$$

$$c_p = 7,793136 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \doteq 7,8 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

kde:  $c_p$  - minimální plastifikační kapacita [ $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ]

Plastifikační kapacita stroje je takové množství homogenizované taveniny plastu nahromaděné před čelem šneku, aby umožnila jak plné zaplnění tvarové dutiny formy a vtokových systémů, tak i doplňování materiálu ve fázi dotlaku. Její určení je dáno rovnicí 3.29, přičemž výsledek je zaokrouhlen na jedno desetinné místo.

Přidržovací síla je taková síla, která zajistí pevné uzavření formy po celou dobu vstřikování a během následného chladnutí taveniny. Ve výpočtu její minimální hodnoty figuruje vstřikovací tlak, je proto vhodné se nyní vrátit k úvaze z kapitoly 1., kde se určilo, že lze výrobek z hlediska podmínky tloušťky stěny považovat za tenkostěnný. Druhou podmínku nebylo možné určit, tato podmínka říká, že dílec lze označit za slabostěnný v případě, že poměr délky tečení k tloušťce stěny je větší než 150 na jedno vtokové ústí. Vzhledem k tomu, že výpočty již umožňují základní představu o formě lze říci, že poměr větší jak 150 a tudíž bude tato podmínka splněna. Z důvodu splnění obou podmínek bude přesto vhodné vstřikovací tlak navýšit na 200 MPa, nicméně maximální povolený tlak v dutině formy pro polypropylen by neměl přesáhnout 180 MPa, proto se pro výpočet využije vstřikovací tlak 170 MPa.

$$F_p \geq 1,25 \cdot n_t \cdot p_v \cdot \left( \frac{\pi \cdot D^2}{4} + 2 \cdot S_k \right) + 1,25 \cdot p_v \cdot \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} \quad (3.30)$$

$$F_p = 1,25 \cdot 2 \cdot 170 \cdot \left( \frac{3,14 \cdot 40^2}{4} + 2 \cdot 155,883 \right) + 1,25 \cdot 170 \cdot \frac{3,14 \cdot 5,52^2}{4}$$

$$F_p \doteq 671,384 \text{ N} \rightarrow F_p = 671,384 \text{ kN} \doteq 672 \text{ kN}$$

kde:  $F_p$  - minimální přidržovací síla [kN]

$p_v$  - vstřikovací tlak [MPa]

$S_k$  - průmět rozváděcího kanálku s ústím vtoku do dělicí roviny formy [ $\text{mm}^2$ ]

Pro určení minimální přidržovací síly, viz rovnice 3.30, je třeba znát průmět vstřikovaných součástí, rozváděcích kanálků, vtokového kužele, respektive prohlubně pod ním, neboť její průměr dna je větší. Výsledek převeden na kilonewtony a zaokrouhlen směrem nahoru na celá čísla.

Zjištěné požadavky na stroj je dále nutné doplnit jak o rozměry potřebné upínací plochy, jejíž minimální velikost je odvozená od rozměrů formy a musí být 400x500 mm, tak o světlost sloupků, aby bylo možné formu umístit na své místo.



Vypočteným parametrům vyhovuje stroj EC100SXII, viz obrázek 48, který byl zvolen na základě vyhovujících rozměrů upínacích ploch a splnění výše vypočtených požadavků. K němu byla zvolena vstřikovací jednotky s označením i2 s typem tavného válce Y, protože splňuje vypočtené hodnoty plastifikační a vstřikovací kapacity a oproti jiným typům, kde jsou tyto kapacity větší, bude procentuální využití potenciálu plastifikační jednotky vyšší. Další důležité informace o zvoleném stroji lze najít v příloze 9.



Obr. 48 Zvolený vstřikovací stroj EC100SXII [45].

Tab. 6 Srovnání parametrů zvoleného vstřikovacího stroje s požadavky. [46]

Parametr	Minimální požadavky	Zvolený stroj
Vstřikovací kapacita [cm <sup>3</sup> ]	14,12	78
Plastifikační kapacita [kg·h <sup>-1</sup> ]	7,8	40
Přidržovací síla [kN]	672	980
Upínací plochy [mm]	450x400	660x610
Světlost sloupků[mm]	více než 450x400	460x410

Stroj sice minimální požadavky splňuje, ale kromě toho je ještě nutné provést kontrolu na rozměry uzavírací jednotky, přesněji maximální a minimální vzdálenost mezi upínacími plochami, viz obrázek 49. Splnění této podmínky je nezbytné, jinak by se navrhovaná forma nemusela do stroje vůbec vlézt, nebo by nedošlo k jejímu dostatečnému otevření, které by umožňovalo vyhození výstřiku.

$$L_{s \min} > L_f \quad (3.31)$$

$$L_{s \min} = L_f = 36 + 114 + 120 + 36 = 306 \text{ mm}$$

kde:  $L_{s \min}$  - minimální otevření vstřikovacího stroje [mm]

$L_f$  - výška formy [mm]

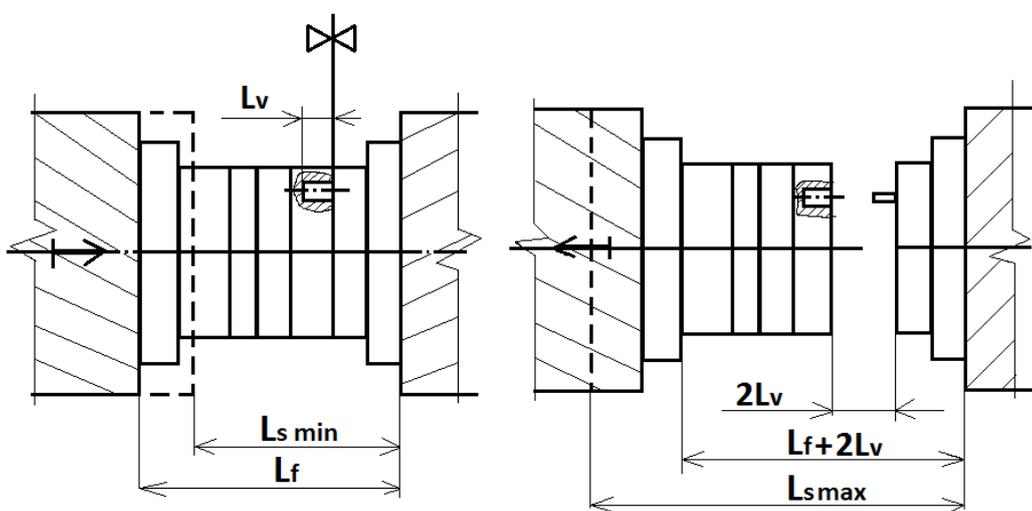
Ověření, zda se navrhovaná forma do prostoru stroje vůbec vejde, se provede srovnáním její výšky s minimálním otevřením stroje viz rovnice 3.31. Hodnota rozsahu výšky formy pro stroj EC100SXII je stanovena mezi 180 až 550 milimetry, viz příloha 10. Výsledek rovnice 3.30 leží v tomto rozmezí, proto lze říci, že tato podmínka bude splněna.

$$L_{s \max} \geq L_f + 2 \cdot L_v \quad (3.32)$$

$$L_{s \max} = L_f + 2 \cdot L_v = 36 + 114 + 120 + 36 + 2 \cdot 44 = 394 \text{ mm}$$

kde:  $L_{s \max}$  - maximální otevření vstřikovacího stroje [mm]  
 $L_v$  - výška výstřiku [mm]

Obdobně se bude postupovat i v případě maximálního rozměru otevřené formy, viz rovnice 3.32, kde navíc musíme počítat i s rozměrem výrobku vyhazovaného z tvarové dutiny formy, obecně se uvádí, že rozevření formy v dělicí rovině je rovno dvojnásobku výšky vstřikovaného dílce. V tomto případě je uzavírací zdvih, viz příloha 10, roven 350 milimetrům, což je podstatně více než je dvojnásobná výška dílce, která nepřesáhne 100 milimetrů, proto lze i tuto podmínku pokládat za splněnou. Do výpočtu nebyly zahrnuty středící elementy, nicméně jejich vliv by byl v tomto případě minimální, neboť rozměry otevření a uzavření stroje jsou dostatečné.



Obr. 49 Schématický obrázek plného uzavření (vlevo) a rozevření (vpravo) stroje [1].

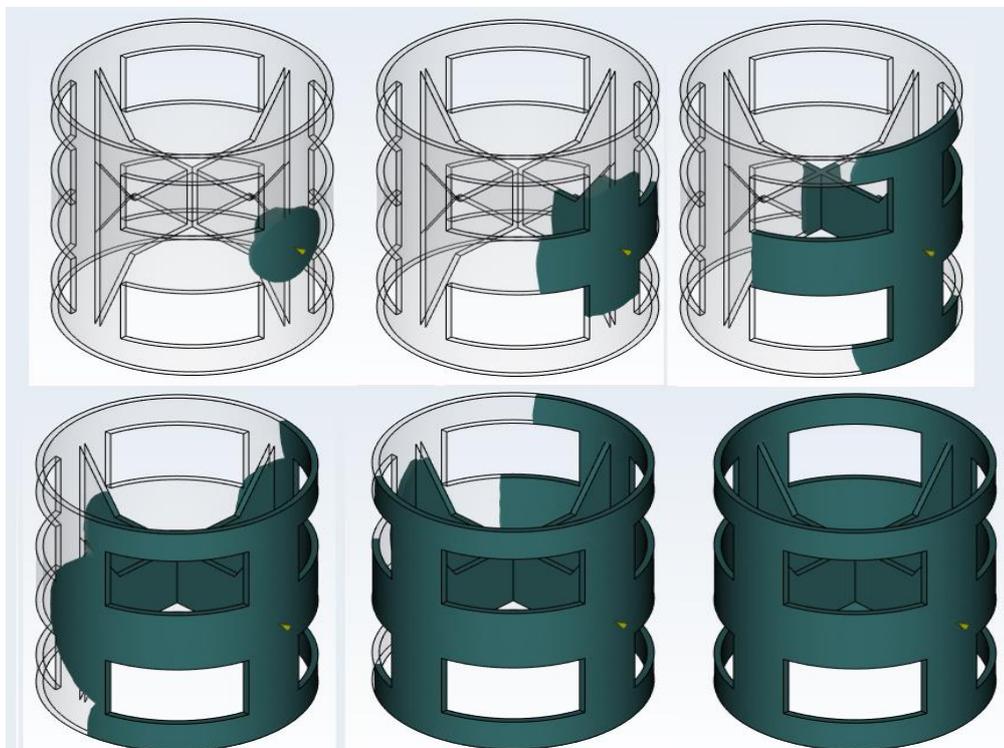
### 3.5 Analýzy a simulace

Tato podkapitola mohla být zařazena trochu dříve, nicméně z důvodu toho, že se ještě u volby stroje mění parametry mající podstatný vliv na vstřikovací cyklus, bude mít zařazení této podkapitoly na závěr i své výhody.

Autodesk Inventor 2016 není program primárně určený k provádění simulací vstřikování plastu, proto bylo možné v kapitole 3.3.1 pouze ověřit vhodnost umístění vtoku z hlediska času plnění formy a zjistit tak, zda nedojde k předčasnému zamrznutí vtoku. Pro simulace lze použít jeden z několika programů jako je například Cadmould, nebo Autodesk Moldflow, pro níže uvedené simulace byl použit právě Autodesk Inventor 2016 z důvodu dostupnosti studentské licence.

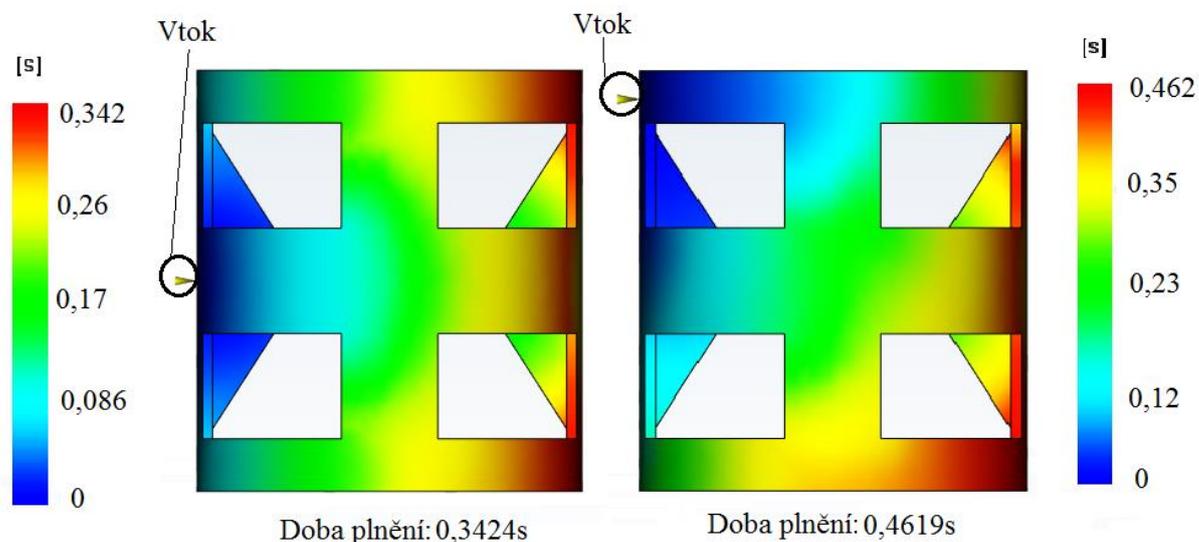
Než se přejde k samotnému simulování, je potřeba se ještě zamyslet nad volbou materiálu v simulačním softwaru. Jelikož se definice vlastností polypropylenu v programu liší od dříve počítaných hodnot, byl pro simulaci zvolen materiál od společnosti Philips Sumika Polypropylene Company, s obchodním označením Marlex HLN-200 a to z důvodu, že se jeho vlastnosti téměř shodují s hodnotami, se kterými byl prováděn teoretický výpočet.

První simulací, kterou je nutné provést je ověření, zda dojde při vstřikování k vytvoření dílce za určenou dobu vstřikování, uvažovat se bude zvýšený vstřikovací tlak 170 MPa. Provedením simulace bylo zjištěno, že k zaplnění dutiny dojde za dobu kratší než je doba vstřikování, tedy méně než 0,6 vteřiny. Na obrázku 50 je vidět postup, jakým se bude tvarová dutina zaplňovat taveninou plastu.



Obr. 50 Simulace plnění vstřikovaného dílce.

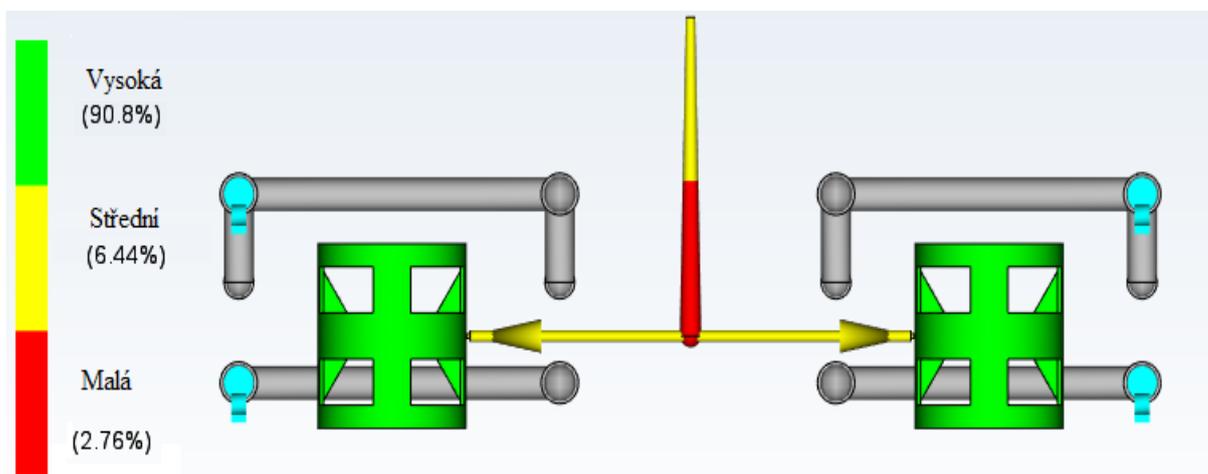
Při volbě umístění vtoku na součásti nebylo provedeno ověření správnosti umístění. Žádoucí je zaplnění tvarové dutiny v pokud možno v co nejkratším čase. Srovnání, viz obrázek 51, ukazuje, jak ovlivní umístění vtoku rychlost plnění, potvrzuje tak správnost volby vtoku kratším časem plnění.



Obr. 51 Srovnání doby plnění součásti v závislosti na poloze vtoku.



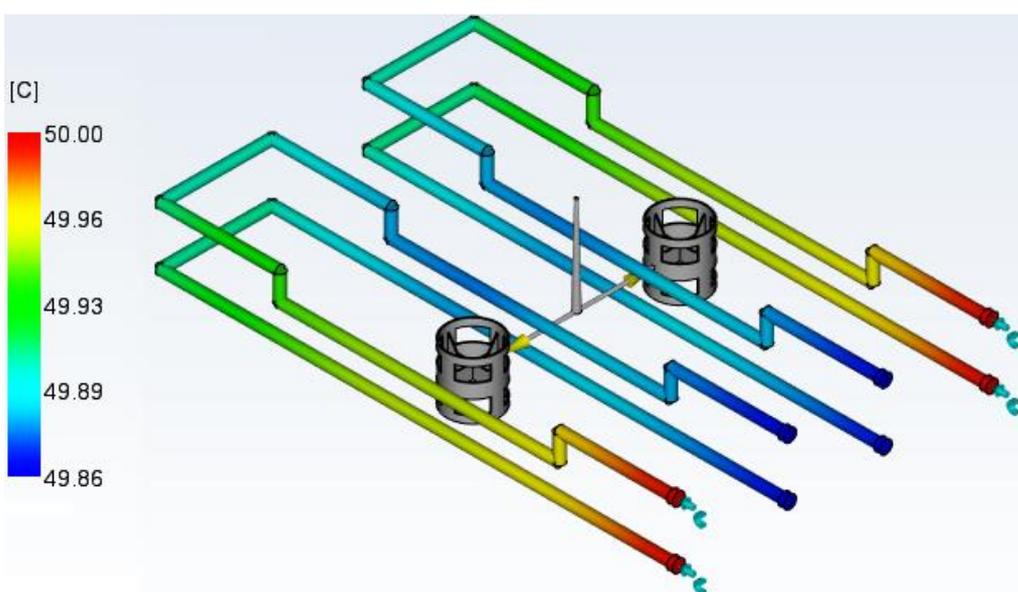
Z důvodu tvarové složitosti vstřikované součástí je vhodné se podívat na predikci dosažené kvality, viz obrázek 54. Největší kvality dosáhnou podle predikce vstřikované součásti, nicméně i tak by nebylo na škodu provést další modifikace pro minimalizaci nežádoucího výsledku. V oblasti vtokového systému už je možnost vzniku nežádoucího výsledku poměrně značná, což ovšem nevadí, neboť se stejně se stejně odebírá jako zbytek a následně přeměňuje na regenerát.



Obr. 54 Pravděpodobnost dosažení požadované kvality.

Pro úplnost simulací je možné se zabývat i teplotou temperačního systému. Pro provedení výpočtů bylo jako pracovní médium uvažována voda o teplotě 50°C, jak bylo uvedeno v podkapitole zabývající se temperačním systémem. Pro možnost simulování bylo nezbytné navolit množství průtoku média, bylo použito množství 10 litrů za minutu.

Simulace, viz obrázek 55, prokázala, že teplota temperačního média poklesne, z toho lze usuzovat, že je množství tepla přivedené taveninou plastu relativně malé, aby dostatečně zahřívalo formu. Pokles teploty média není nikterak velký, takže médium je schopno vykonávat svou funkci. Modré zakončení na obrázku označují místa přívodu média.



Obr. 55 Teplota temperačních kanálů.

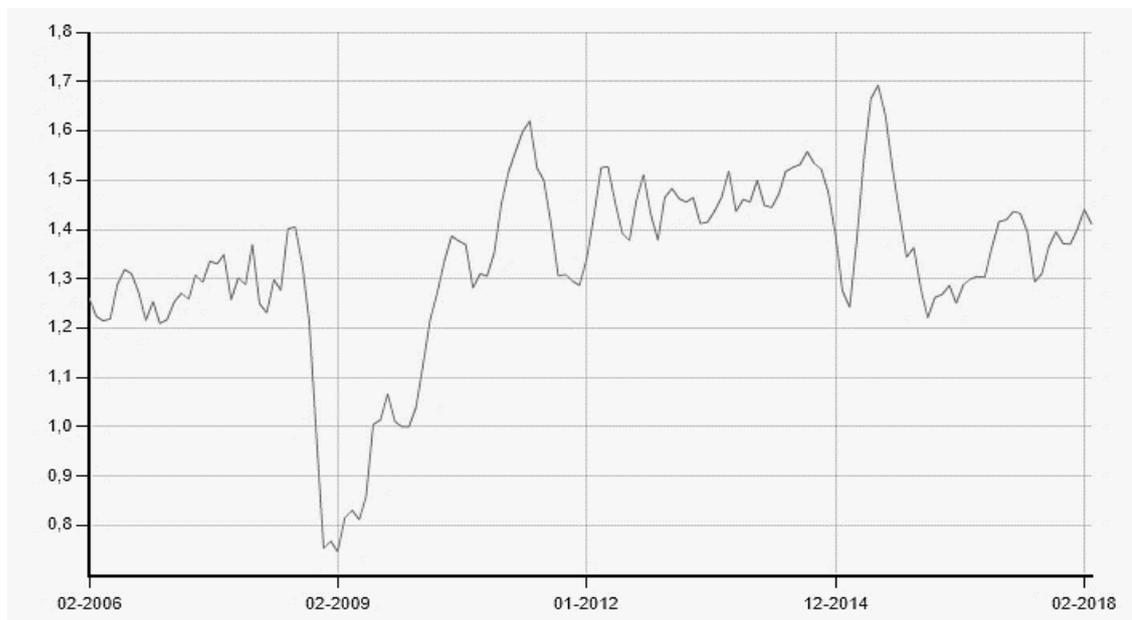
#### 4 TECHNICKO- EKONOMICKÉ HODNOCENÍ [30], [47], [48]

V první kapitole bylo provedeno zhodnocení alternativních možností výroby zadané součásti jinými technologiemi, než je vstřikování. Nicméně všechny z navrhovaných alternativ byly z důvodu malé produktivity zamítnuty, proto nemá smysl provádět jejich srovnání z hlediska ekonomie provozu.

Zhodnocení nákladů na výrobu samotné formy by sice stanovit šlo, ale jednalo by se o rozsáhlou činnost, která by vydala na samostatnou práci. Pro každý díl tvořící formu by bylo potřeba stanovit řadu věcí ať už by se jednalo o určení nejvhodnějšího způsobu výroby, volbu či návrh nástrojů ad. Bylo by nezbytné využít řadu simulačních programů pro tvorbu drah, aby se předběžně stanovily jednotlivé dílčí časy, nicméně i takto určený čas by byl pouze orientační. Z těchto výše uvedených důvodů se tím nebude tato práce zabývat.

Největší význam z hlediska ekonomiky provozu bude mít ověření správnosti volby typu vtokového systému vzhledem k velikosti zadané výrobní série. Forma byla navržena se studeným vtokovým systémem, nicméně během řešení se několikrát ukázalo, že by bylo vhodnější využít formu se systémem horkým, proto bude vhodné ověřit správnost volby alespoň z hlediska výrobních nákladů. Pro výpočty bude nezbytné stanovit řadu parametrů.

Prvním z nich je cena granulátu, jedná se o nejsnáze zjistitelnou výpočetní položku. Cena granulátu jako většina komodit podléhá výkyvům trhu, viz obrázek 56, proto její hodnota není fixně daná, závisí tedy na konečném odběrateli. V tomto případě provozovateli stroje, jakým způsobem řeší nákup vstupního materiálu, zda skrze dlouhodobou smlouvu, nebo skrze nákup aktuálně nejvýhodnější nabídky na trhu. Pro výpočty byla použita cena v okamžiku tvorby této části práce, kdy se kilogram polypropylenu při aktuální kurzu prodával za necelých 36 korun. Do ceny nebudou zahrnuty náklady za dopravu.



Obr. 56 Vývoj cen polypropylenu v eurech [47].

Oproti surové vstupní surovině se regenerát prodává za podstatně menší cenu, je to dáno především poklesem prvotních vlastností, který je způsoben samotným prodělaným výrobním procesem a následnou recyklací. Pro výpočet se bude předpokládat odprodej regenerátu k dalšímu zpracování cizí firmě, při dostatečné kapacitě skladů i možnosti skladovat regenerát po delší dobu. Z těchto důvodů bude možné požadovat přibližně třetinovou cenu vzhledem k původní nákupní ceně surového granulátu polypropylenu.

Náklady na provoz stroje ovlivňuje celá řada faktorů, hlavní položku tvoří pořizovací náklady stroje rozpočítané na počet pracovních hodin vykonaných za dobu předpokládané životnosti stroje. Snahou je, aby stroj za dobu svého provozu pokryl náklady na své pořízení a vydělal navíc dostatek peněz pro nákup nového zařízení. Cenu provozu navyšují další faktory, jako jsou finance vynaložené na pořízení provozních prostor, nebo na jejich nájem, někdy se započítávají i náklady na případnou opravu stroje. Svou roli mohou hrát i úroky bance, je-li cokoliv pořízeno za pomoci půjčky. Velikost provozních nákladů se liší i podle použitého vtokového systému, kde horký je z hlediska ceny provozu výhodnější než studený, za cenu vyšších počátečních pořizovacích nákladů. Jelikož se ve stanovení může projevit celá řada parametrů, budou pro výpočty použity hodnoty ze cvičení z předmětu Technologie zpracování plastů.

Platy zaměstnanců jsou taky podstatnou cenovou položkou provozu. Obsluhu do značné míry ovlivňuje pracovní režim stroje, přičemž nejvýhodnější bude v tomto případě plně automatický režim, kde obsluha stroje bude pouze doplňovat granulát do násypky podle potřeby a případně vyměňovat plné přepravky s dílci za prázdné. Bude vhodné předpokládat, že pracující stroj není jediným zařízením tohoto typu v daném provozu. Obsluha bude zahrnovat:

- technologa se znalostmi procesu, který je schopen vytvořit řídicí program stroje
- strojního dělníka schopného provést seřízení stroje a upnutí vstříkovací formy, popřípadě provést drobné opravy, manipulovat s formou apod.
- výrobního dělníka pro dohled nad probíhajícím procesem, který v případě potřeby provede doplnění granulátu v násypce, nebo výměnu plné přepravky za prázdnou
- obslužný personál, pro provádění oddělení vtokového zbytku od vstříkovaných součástí (jen v případě studené formy), popřípadě kontrolu rozměrů součástí

S výjimkou obslužného personálu se budou jednotliví zaměstnanci podílet na provozu více provozních zařízení. Proto jejich plat nebude potřeba hradit pouze z provozu jednoho stroje. Náklady na obsluhu lze tedy rozdělit na tyto položky, viz tabulka 7, která zároveň srovnává náklady v rámci daného typu formy. Hodnota platu daného zaměstnance je pouze orientační.

Tab. 7 Platy zaměstnanců.

Post zaměstnance	Forma se studeným vtokovým systémem („studená forma,“)	Forma se horkým vtokovým systémem („horká forma,“)
Technolog	50 Kč· h <sup>-1</sup>	50 Kč· h <sup>-1</sup>
Strojní dělník	40 Kč· h <sup>-1</sup>	40 Kč· h <sup>-1</sup>
Výrobní dělník	60 Kč· h <sup>-1</sup>	60 Kč· h <sup>-1</sup>
Obslužný personál	120 Kč· h <sup>-1</sup>	-
Celkem	270 Kč· h <sup>-1</sup>	150 Kč· h <sup>-1</sup>

Nyní jsou již známy veškeré parametry pro provedení srovnávacího výpočtu, jejich shrnutí podává tabulka 8.

Tab. 8 Parametry ekonomických kritérií [30].

Název parametru	Studený vtokový systém („studená forma,,)	Horký vtokový systém („horká forma,,)
Cena granulátu	36 Kč· kg <sup>-1</sup>	36 Kč· kg <sup>-1</sup>
Cena regenerátu	13 Kč	–
Hmotnost plastového dílce	4,34 g	4,34 g
Hmotnost vtokových zbytků	1,67g	–
Násobnost formy	dvojnásobná	dvojnásobná
Doba vstřikovacího cyklu	6 s	6 s
Velikost série	40.000 ks	40.000 ks
Životnost formy	3 roky	2,5 roku
Náklady na provoz stroje	600 Kč· h <sup>-1</sup>	450 Kč· h <sup>-1</sup>
Náklady na obsluhu stroje	270 Kč· h <sup>-1</sup>	150 Kč· h <sup>-1</sup>
Výroba formy s násobností n=1	200.000 Kč	250.000 Kč

Cílem výpočtů bude stanovit celkové náklady výroby vztahené na určitý počet dílů, z důvodu větší přehlednosti a zjednodušení některých výpočtových vztahů se bude uvažovat počet jednoho tisíce součástí typu Pall kroužek, přičemž zde bude podstatnou roli hrát i velikost zadané výrobní série. Náklady na pořízení stroje sice nejsou v tabulce uvedeny, nicméně se s nimi počítá v rámci nákladů na provoz stroje, kde je jeho cena rozpočítána na dobu jeho předpokládané životnosti.

$$N_{M_s} = 1000 \cdot c \cdot \frac{G}{1000} + 1000 \cdot \frac{G_z}{1000 \cdot n} \cdot (c - r) \quad (4.1)$$

$$N_{M_s} = 36 \cdot 4,34 + \frac{1,67}{2} \cdot (36 - 13) = 175,445 \text{ Kč} \doteq 176 \text{ Kč}$$

kde:  $N_{M_s}$  - náklady na materiál „studené formy,, pro tisíc kusů [Kč]  
 $c$  - cena granulátu [Kč·kg<sup>-1</sup>]  
 $G$  - hmotnost vstřikovaného dílce [g]  
 $G_z$  - hmotnost vtokového zbytku [g]  
 $n$  - násobnost formy [-]  
 $r$  - cena regenerátu [Kč]

$$N_{M_h} = 1000 \cdot c \cdot \frac{G}{1000} = 36 \cdot 4,34 = 156,24 \text{ Kč} \doteq 157 \text{ Kč} \quad (4.2)$$

kde:  $N_{M_h}$  - náklady na materiál „horké formy,, pro tisíc kusů [Kč]

Nejprve je výhodné vypočítat náklady na materiál, viz rovnice 4.1 a 4.2, přičemž v případě formy se studeným vtokem se bude nutno vzít do výpočtu vtokový zbytek. Díky tomu, že je výpočet prováděn pro tisíc kusů, odpadá potřeba převádět gramy na kilogramy. Výsledky je vhodné zaokrouhlit směrem nahoru na celé koruny.



$$N_{V_s} = \frac{1000 \cdot (S_s + M_s) \cdot t_c}{3600 \cdot n} = \frac{(600 + 270) \cdot 6}{3,6 \cdot 2} = 725 \text{ Kč} \quad (4.3)$$

kde:  $N_{V_s}$  - náklady na provoz „studené formy“, pro tisíc kusů [Kč]

$S_s$  - náklady na provoz stroje se „studenou formou“, [Kč]

$M_s$  - náklady na obsluhu stroje se „studenou formou“, [Kč]

$t_c$  - doba vstřikovacího cyklu [s]

$$N_{V_h} = \frac{1000 \cdot (S_h + M_h) \cdot t_c}{3600 \cdot n} = \frac{(450 + 150) \cdot 6}{3,6 \cdot 2} = 500 \text{ Kč} \quad (4.4)$$

kde:  $N_{V_h}$  - náklady na provoz „horké formy“, pro tisíc kusů [Kč]

$S_h$  - náklady na provoz stroje s „horkou formou“, [Kč]

$M_h$  - náklady na obsluhu stroje s „horkou formou“, [Kč]

Dalším druhem nákladů, které bude nutné určit, jsou náklady na provoz formy, do kterých se zahrnují náklady na hodinový provoz stroje, a náklady na mzdu zaměstnanců. Vztah lze upravit podělením tisícem a tím jej zjednodušit, výsledek je opět vhodné zaokrouhlit na celé koruny.

$$F_s = F_{z_s} \cdot n^{0,5} = 200000 \cdot 2^{0,5} \doteq 282.843 \text{ Kč} \quad (4.5)$$

kde:  $F_s$  - náklady na zhotovení dvojnásobné „studené formy“, [Kč]

$F_{z_s}$  - náklady na zhotovení „studené formy“, s násobností jedna [Kč]

$$F_h = F_{z_h} \cdot n^{0,55} = 250000 \cdot 2^{0,55} \doteq 366.021 \text{ Kč} \quad (4.6)$$

kde:  $F_h$  - náklady na zhotovení dvojnásobné „horké formy“, [Kč]

$F_{z_h}$  - náklady na zhotovení „horké formy“, s násobností jedna [Kč]

Cena na zhotovení formy je známa pouze pro jednonásobnou formu, jelikož se však bude zhotovovat forma dvojnásobná je nutno provést úpravu nákladů, tak aby odpovídala zvolené vícenásobné formě, viz rovnice 4.5 a 4.6. Výsledky je vhodné zaokrouhlit na celá čísla.

$$N_{F_s} = \frac{1000 \cdot F_s \cdot \left(\frac{1}{L_s} + 0,05\right)}{N} \quad (4.7)$$

$$N_{F_s} = \frac{1000 \cdot 282843 \cdot \left(\frac{1}{3} + 0,05\right)}{40000} = 2710,57875 \text{ Kč} \doteq 2711 \text{ Kč}$$

kde:  $N_{F_s}$  - rozpočítání nákladů „studené formy“, na tisíc výrobků [Kč]

$L_s$  - odhadovaná životnost „studené formy“, [r]

$$N_{F_h} = \frac{1000 \cdot F_h \cdot \left(\frac{1}{L_h} + 0,05\right)}{N} \quad (4.8)$$

$$N_{F_h} = \frac{1000 \cdot 366021 \cdot \left(\frac{1}{2,5} + 0,05\right)}{40000} = 4117,73625 \text{ Kč} \doteq 4118 \text{ Kč}$$

kde:  $N_{F_h}$  - rozpočítání nákladů „horké formy“, na tisíc výrobků [Kč]

$L_h$  - odhadovaná životnost „horké formy“, [r]

Takto vypočítané náklady na výrobu formy se rozpočítají na tisíc vyráběných kusů pro danou velikost zhotovované série, přičemž je zřejmé, že náklady připadající na tisíc vyrobených kusů budou poměrně vysoké, neboť je vyráběná série relativně malá. Lze ovšem předpokládat, že forma bude zhotovovat dané součásti i pro další zakázky proto to není podstatný problém.

$$N_{c_s} = N_{M_s} + N_{V_s} + N_{F_s} = 176 + 725 + 2711 = 3612 \text{ Kč} \quad (4.9)$$

kde:  $N_{c_s}$ - celkové náklady „studené formy“, na tisíc kusů výrobku [Kč]

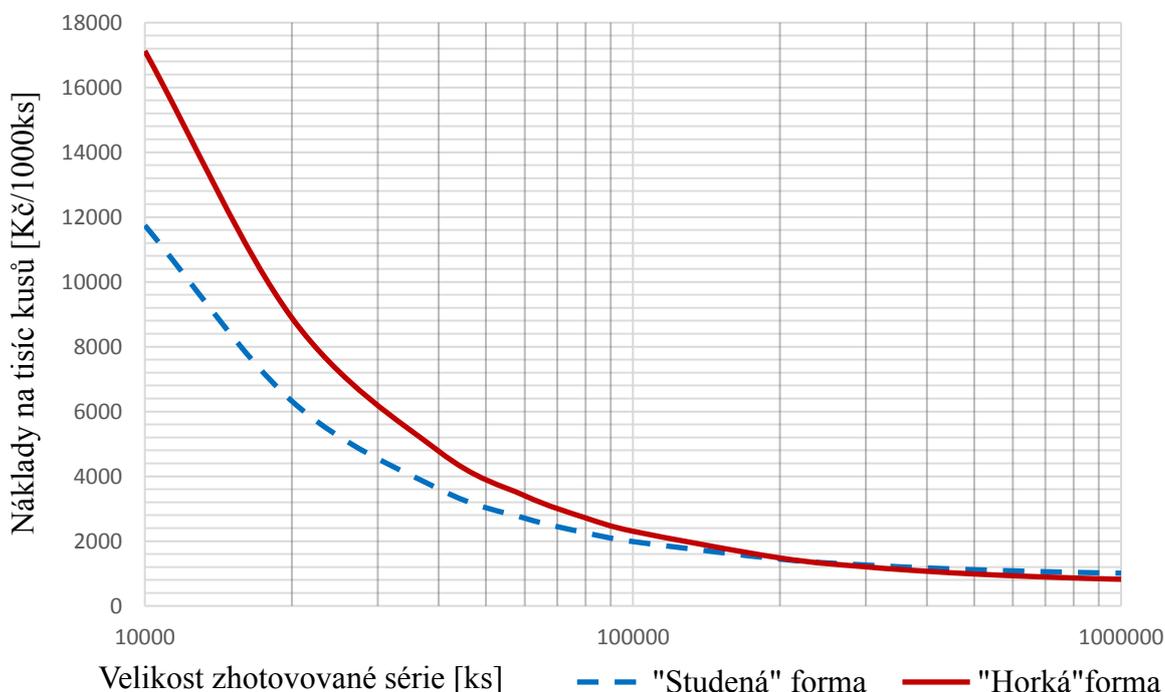
$$N_{c_h} = N_{M_h} + N_{V_h} + N_{F_h} = 157 + 500 + 4118 = 4775 \text{ Kč} \quad (4.10)$$

kde:  $N_{c_h}$  - celkové náklady „horké formy“, na tisíc kusů výrobku [Kč]

Nyní už je možno určit celkové výrobní náklady pro tisíc kusů při zadané velikosti série, které se určí jako součet jednotlivých dílčích nákladů. Tím se získají hodnoty pro možné srovnání ekonomičnosti výroby pro oba druhy vtokového systému, viz rovnice 4.9 a 4.10. Při velikosti série 40.000 kusů jsou výrobní náklady spojené se zhotovením jednoho tisíce kusů ekonomicky výhodnější pro formu se studeným vtokovým systémem.

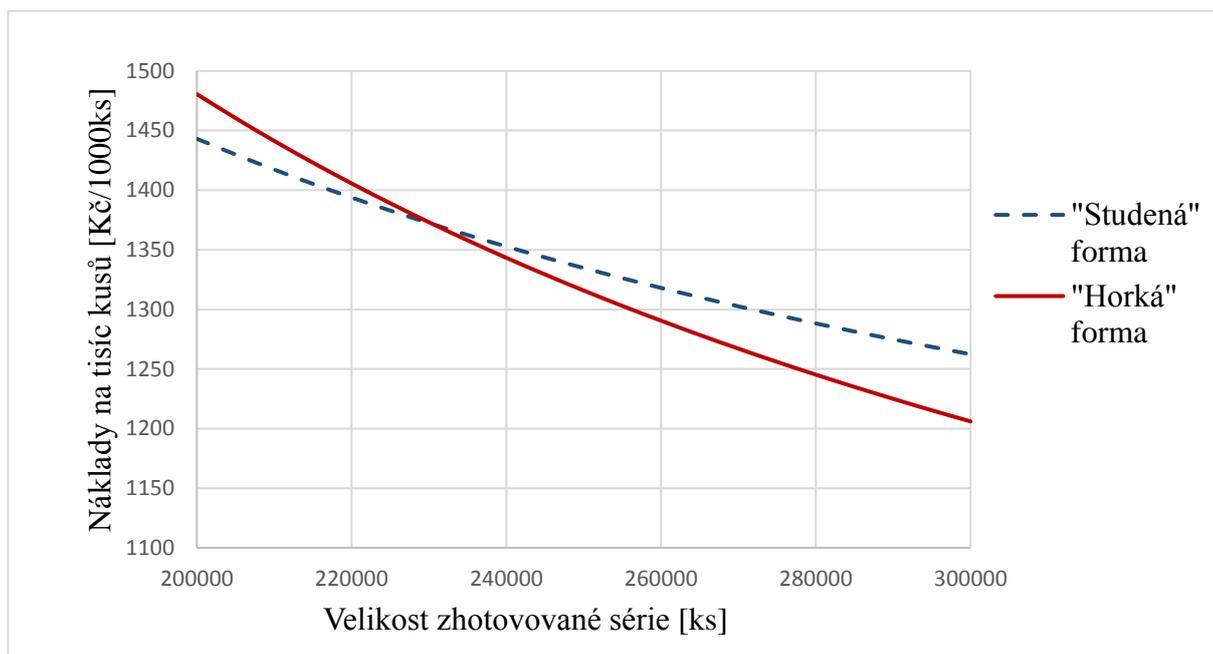
Pro úplnost by bylo přínosné určit, pro jak velkou výrobní sérii se již vyplatí součást vyrábět formou s horkým vtokovým systémem. Postupovat se bude obdobně jako v předchozích výpočtech, přičemž cena za materiál a náklady na zhotovení tisíce kusů se nemění, jedinou proměnnou bude rozpočítání nákladů daného druhu formy na tisíc kusů, kde bude mít výsadní postavení velikost dané série.

Na obrázku 57, je graf zobrazující závislost vynaložených výrobních nákladů potřebných pro zhotovení jednoho tisíce kusů dané součásti v závislosti na velikosti výrobní série. Průběh grafu potvrzuje teoretický předpoklad, který říká, že forma se studeným vtokem je výhodnější pro menší počet kusů výrobní série, zatímco pro větší množství kusů je lepší zvolit formu s horkým vtokovým systémem.



Obr. 57 Graf nákladů na studenou a horkou formu v závislosti na velikosti vyráběné série.

Z grafu je patrné, že hranice vhodnosti použití daného typu vtokového systému leží někde mezi dvěma sty a třemi sty vyrobenými kusy. Přiblížením grafu do této oblasti, viz obrázek 58, je patrné že se dělící hranice nachází okolo dvě stě třiceti tisíc kusů.



Obr. 58 Graf hraniční meze vhodnosti použití „studené,, formy.

Stanovení přesné dělicí hranice se provede srovnáním celkových nákladů pro daný typ formy, které je uvedeno v tabulce 9, kde jsou celkové náklady na zhotovení jednoho tisíce kusů zaokrouhleny na dvě desetinná místa. Lze tak stanovit že formu se studeným vtokovým systémem bude výhodné použít jen do velikosti výrobní série, která nepřekročí 230 tisíc kusů.

Tab. 9 Volba vhodnosti daného vtokového systému.

Počet kusů výrobní série	Celkové náklady „studené formy,, na tisíc kusů výrobku [Kč]	Celkové náklady „horké formy,, na tisíc kusů výrobku [Kč]
225.000	1382,88	1389,04
226.000	1380,75	1385,8
227.000	1378,64	1382,59
228.000	1376,54	1379,41
229.000	1374,46	1376,26
230.000	1372,41	1373,13
231.000	1370,36	1370,03
232.000	1368,34	1366,95
233.000	1366,34	1363,91
234.000	1364,35	1360,89
235.000	1362,38	1357,89

\*Pozn. Pro názornost je v tabulce cenově výhodnější z obou variant vyznačena barevně, kde studený vtokový systém je znázorněn modře a horký vtokový systém červeně, tmavěji vybarvený řádek značí dělicí hranici.

Posledním výpočtem ekonomické části je určení doby, za kterou se forma při daných podmínkách, zaplatí, respektive po jak dlouhou dobu. Cílem je zjistit, kolik kusů při daných velikostech sérií je nutné vyrobit, aby se zisk pokryl náklady. Výpočet je prováděn pro výrobní sérii 40.000 kusů jako doposud.

$$N_{v\_1ks} = \frac{N_{c\_s}}{1000} = \frac{3612}{1000} = 3,612 \text{ Kč} \doteq 3,7 \text{ Kč} \quad (4.11)$$

kde:  $N_{v\_1ks}$  - náklady na jeden kus při dané sérii [Kč]

Pro učení ceny jednoho kusu se využije rovnice 4.11, přičemž výsledek bude vhodné zaokrouhlit na jednu desetinu směrem nahoru.

$$N_{c\_1ks} = N_{v\_1ks} \cdot \left(1 + \frac{P_r}{100}\right) = 3,7 \cdot \left(1 + \frac{200}{100}\right) = 11,1 \text{ Kč} \quad (4.12)$$

kde:  $N_{c\_1ks}$  - režijní i výrobní náklady na jeden kus při dané sérii [Kč]

$P_r$  - procento režie [%]

Na ceně výrobku se ale budou kromě samotných výrobních nákladů podílet i náklady na přidruženou režii z toho důvodu bude nutné náklady navýšit, viz rovnice 4.12, do režie spadají náklady na energie, pohonné hmoty, zaměstnance sjednávající ochody, účetnictví a další. Režie obvykle navyšuje náklady na o dvojnásobnou hodnotu.

$$N_{p\_1ks} = N_{c\_1ks} \cdot z = 11,1 \cdot 1,3 = 14,43 \text{ Kč} \doteq 14,5 \text{ Kč} \quad (4.13)$$

kde:  $N_{p\_1ks}$  - prodejní cena jednoho kusu při dané sérii [Kč]

$z$  - navýšení o hodnotu zisku [-]

Prodejní cena navyšuje výrobní náklady o hodnotu zisku, který bude vhodné volit mezi 25 až 50%, v případě výpočtu se využije hodnota 30%, viz rovnice 4.13. Výsledek se opět zaokrouhlí směrem nahoru na jedno desetinné místo.

$$N_{F\_sc} = N_{F\_s} \cdot \left(1 + \frac{P_r}{100}\right) = 282843 \cdot \left(1 + \frac{200}{100}\right) = 848.529 \text{ Kč} \quad (4.14)$$

kde:  $N_{F\_sc}$  - celkové náklady na „studenou formu,, [Kč]

Náklady na výrobu formy nezahrnují režijní náklady spojené s jejím navržením, testování, případnými úpravami, softwarové licence a podobně. Proto bude nutné do nákladů zahrnout tyto položky jako režijní náklady, jejich hodnota opět navýší náklady o dvojnásobnou hodnotu, viz rovnice 4.14.

$$D_{n\_ks} = \frac{N_{F\_sc}}{N_{p\_1ks} - N_{c\_1ks}} = \frac{848529}{14,5 - 11,1} = 249567,35 \text{ Ks} \doteq 249.568 \text{ Ks} \quad (4.15)$$

kde:  $D_{n\_ks}$  - doba návratnosti ve vyrobených kusech [Ks]

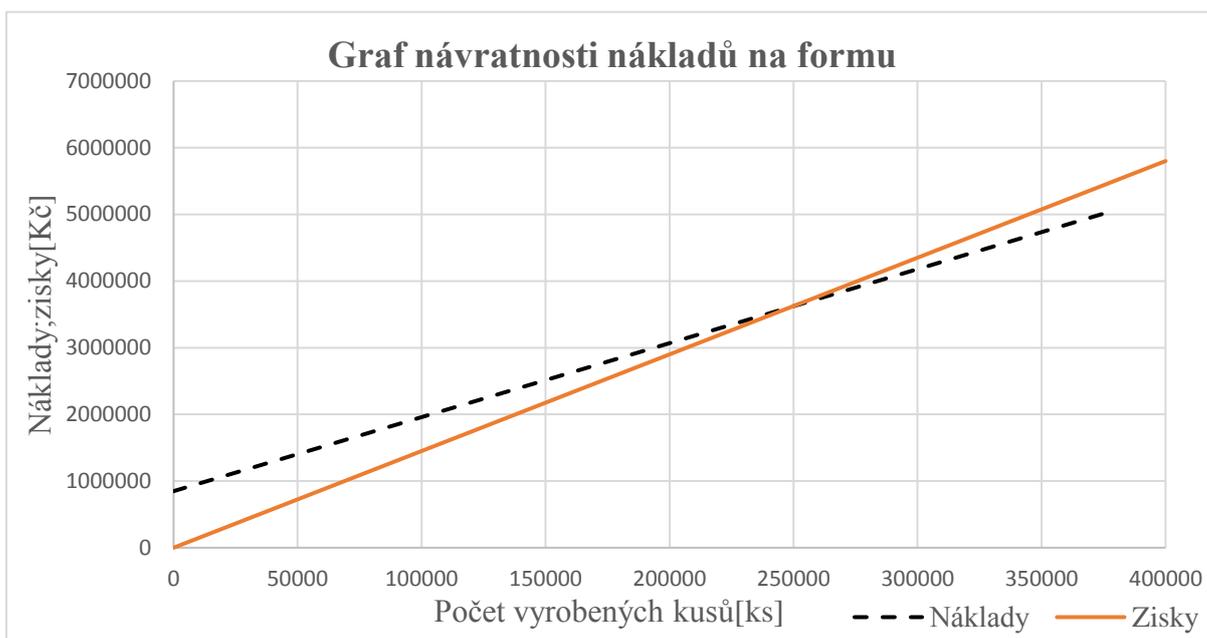
Nyní lze přikročit k určení samotné návratnosti investice, kde se hledá okamžik, kdy zisky dosáhnou hodnotu součtu počátečních a výrobních nákladů. Zjišťuje se, za kolik vyrobených kusů bude splacena investice na výrobu formy, viz rovnice 4.15. Výsledek se zaokrouhlí na celá čísla, neboť nelze vyrábět jen část výrobku.

$$n_t = \frac{N \cdot t_c}{T_p \cdot K \cdot 3600} \rightarrow T_p = \frac{N \cdot t_c}{n_t \cdot K \cdot 3600} = \frac{249568 \cdot 6}{2 \cdot 0,7 \cdot 3600} = 297,1\text{h} \quad (4.16)$$

$$T_p = D_{n\_t} = 297,1\text{h} \rightarrow \frac{297,1}{24} = 12,379 \doteq 13\text{d}$$

kde:  $D_{n\_t}$  - doba návratnosti ve výrobním čase [d]

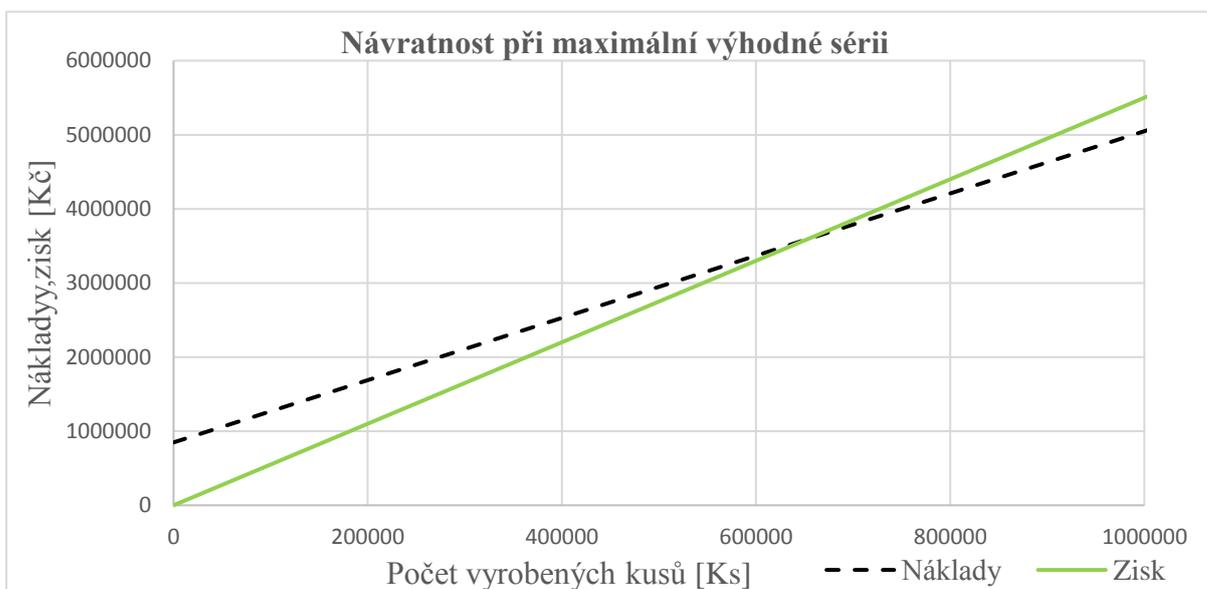
Při předběžném odhadu doby životnosti formy na tři roky je vhodné určit dobu výroby série, za níž se forma zaplatí, viz rovnice 4.16. Výsledek je vhodné pro větší názornost převést na dny a zaokrouhlit na celá čísla směrem nahoru. Pro úplnost lze ještě danou závislost vykreslit, viz obrázek 59.



Obr. 59 Graf návratnosti nákladů na formu

Výpočtem bylo zjištěno, že k získání financí na zaplacení formy stačí třináct dní trojsměnného provozu, při daném koeficientu využití času. Tím byla potvrzena ziskovost formy při daných podmínkách provozu a sérii 40.000 kusů. Nicméně předchozí výpočty ukázaly, že je vhodné formu s daným typem vtoku provozovat až do 230.000 kusů, protože se počítá, že forma bude co nejvíce využita, bude vhodné obdobným způsobem provést výpočet i pro tuto větší sérii.

Při obdobném výpočtu dojde k poklesu ceny jednoho kusu a současně s tím klesne i zisk nicméně zvýší se konkurenceschopnost z hlediska ceny. Doba návratnosti se naroste na 33 dní provozu, během nichž se bude muset pro vrovnání nákladů a zisků vytvořit 652.715 kusů výrobků. Při maximální velikosti série, vhodné pro daný vtokový systém, je tedy doba návratnosti formy velmi dobrá.



Obr 60. Návratnost při maximální výhodné sérii

## 5 ZÁVĚRY

Pro výrobu zadané součástky tvaru Pall kroužku byla jako nejhodnější zvolena technologie vstřikování plastů. Výpočet v závislosti na velikosti vyráběné série stanovil jako nejlepší řešení dvojnásobnou vstřikovací formu. Pro vznik tvarové dutiny bylo využito dvou kamenů, které jsou nejprve do středu formy tlačeny pouze stlačením pružin, ke kterým se následně připojují vodící klíny, ty spolu s pokračujícím stlačením pružin zajistí při plném uzavření formy správné ustavení kamenů.

Vyhození dílců bylo řešeno pomocí vyhazovacích kroužků, vtokový systém se vyhodí za pomoci kolíkového vyhazovače. Temperační systém byl umístěn do obou desek, které se stýkají v dělicí rovině, přičemž každou ze vstřikovaných součástí z vnějšku obchází dva kanály v každé z desek, jako temperační médium byla zvolena voda. Pro možnost snadné manipulace byla forma osazena dvěma manipulačními oky. Byla stanovena i velikost odvodušňovací drážky, její použití ovšem bude záležet až na praktických testech formy.

V průběhu práce se několikrát ukázalo, že by bylo z konstrukčního hlediska lepší namísto použitého studeného vtokového systému, kvůli prokázané tenkostěnnosti vstřikovaného dílce, upřednostnit systém horkých vtoků. Závěrečné ekonomické zhodnocení ovšem potvrdilo správnost zvoleného vtokového systému, který se ukázal být finančně výhodnější variantou z důvodu relativně malé výrobní série. Ziskovost navržené formy byla potvrzena, výpočty, kde se ukázalo, že náklady vynaložené na výrobu formy se vrátí již během prvních měsíců provozu.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. SOVA, Miloš a Josef KREBS. *Termoplasty v praxi: praktická příručka pro konstruktéry, výrobce, zpracovatele a uživatele termoplastů*. 5. aktualiz. vyd. . Praha: Verlag Dashöfer, 1999-2000. ISBN 80-86229-15-7.
2. ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2009. s. 248. ISBN 978-80-7300-026-1
3. *Metal vs. Plastic: 5 Key Comparisons* [online]. Spojené státy americké: Mt Laurel New Jersey, 103 West Park Drive: Productive Plastics, 2017 [cit. 2018-02-7]. Dostupné z: <http://www.productiveplastics.com/metal-vs-plastic-5-key-comparisons/>
4. GARRETT, Mars. Bols: Today's tabletop news. *Geekery: The Magic of Injection Molding* [online]. BoLS Interactive, 2017, 7.1.2017 [cit. 2018-02-7]. Dostupné z: <http://www.belloflostsouls.net/2017/01/geekery-magic-injection-molding.html>
5. GOODSHIP, Vanessa. *Design and manufacture of plastic components for multifunctionality: structural composites, injection molding, and 3d printing*. 1. Boston, MA: Elsevier, 2015. 103-170 s. ISBN 978-0-323-34061-8.
6. Indiamart. *Plastic molding tools* [online]. Indie: Indiamart Intermesh, 2010 [cit. 2018-02-8]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/plastic-molding-tools-12498763191.html>
7. Indiamart. *Plastic injection molding products* [online]. Indie: Indiamart Intermesh, 2013 [cit. 2018-02-8]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/plastic-injection-molding-products-9316495512.html>
8. ŘEHULKA, Zdeněk. *Konstrukce výlisků z plastů a forem pro zpracování plastů*. Sekurkon, organizační a vzdělávací servis. s. 225. ISBN 80-86604-18-7.
9. LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování* [online]. 1. vyd. .Svitavy, Code Creator, s.r.o. 2016 [cit. 2018-02-8]. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/Impresum.html>
10. Chemické provozy: Benzolová pračka. In: *Hutní projekt Frýdek-Místek* [online]. Frýdek-Místek: Weiron Dynamics, 2013 [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <http://www.hpfm.cz/project/chemicke-provozy-benzolova-pracka/>
11. ŽÁK, Ladislav. VUT FSI: Aktuality z předmětu: HTN. *Tabulky k výpočtům vstřikovací formy* [online]. 2017 [cit. 2017-2-12]. Dokument ve formátu PDF. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/studis/student.phtml?sn=aktuality\\_predmet/studis/student.phtml?sn=aktuality\\_predmet](https://www.vutbr.cz/studis/student.phtml?sn=aktuality_predmet/studis/student.phtml?sn=aktuality_predmet)
12. Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, Přírodovědecká fakulta, Katedra chemie, *Polyolefiny: polyethylen, polypropylen: Výroba, vlastnosti, použití* [online]. Ústí nad Labem, 2013 [cit. 2018-02-8]. Dostupné také z: <http://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/PE%20a%20PP2013.pdf>
13. Polypropylengranulat. *Solostocks* [online]. Barcelona: Comercio Digital, 2017 [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: <https://www.solostocks.de/produkte-kaufen/thermoplast-kunststoffmaterialien/pp-polypropylen/polypropylengranulat-1551320>

14. LENFELD, Petr. Skripta technologie II. *Technologie II: Část II - Zpracování plastů* [online]. Liberec: Technická univerzita Liberec- Fakulta strojní- Katedra strojírenské technologie-Oddělení tváření kovů a plastů, 2005 [cit. 2018-02-17]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/obsah\\_plasty.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/obsah_plasty.htm)
15. PAGÁČ, Marek. Konstruktor. *Jak funguje mikrofrézování od Cimatronu*. [online]. Vydavatelství Nová média, s. r. o, 2011, 28.3.2011 [cit. 2018-02-10]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/2011/03/28/jak-funguje-mikrofrézování-od-cimatronu/>
16. CAO, Michael. Consumables: For 3d printers by 3d printers. *Fused deposition modeling (FDM) and its main limitations* [online]. IC3D, LLC., 2015, 19.8.2015 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <https://consumables.ic3dprinters.com/fused-deposition-modeling-fdm-and-its-main-limitations/>
17. ZOUHAR, Jan. Počítačové modelování a rapid prototyping [přednáška a cvičení]. Brno: Vysoké učení technické Fakulta strojního inženýrství 5. 2. až 4.5 2018
18. Smooth-on. *Casting Quickies - Smooth-Cast® 300 White Liquid Plastic* [online]. 2010 [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <https://www.smooth-on.com/tutorials/casting-quickies-smooth-cast-300-white-liquid-plastic/>
19. DU Vivian. *Plastic PET Preform Injection Molding Machine Manufacturer* [online]. 31. 1. 2018 [cit. 2018-02-10]. Dostupné také z: <https://www.youtube.com/watch?v=WfXZ8lmUPj8>
20. MENGES, Georg. *How to make injection molds*. 3 vyd. Munich: Hanser, 2001. s. 631 ISBN 978-3-446-21256-6.
21. MININ, Igor V. a Oleg V MININ. Modelling and Simulation for Micro Injection Molding Process. XIE, Lei, Longjiang SHEN a Bingyan JIANG. *Computational fluid dynamics technologies and applications* [online]. 1. Chorvatsko: Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka: InTech, 2011, s. 317-333 [cit. 2018-02-26]. ISBN 978-953-307-169-5. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/computational-fluid-dynamics-technologies-and-applications/modelling-and-simulation-for-micro-injection-molding-process>
22. BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. 1. Praha: Code Creator, 2016 [cit. 2018-02-10]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Impresum.html>
23. DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití* [online]. 2. vyd. .Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. s. 24-48; s. 69-70 [cit. 2018-02-10]. ISBN 80-708-0617-6. Dostupné z: [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_isbn-80-7080-617-6/pages-img/001.html](http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-617-6/pages-img/001.html)
24. DILLINGER, Josef. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. 1. vyd. Praha: Europa-Sobotáles cz., 2007. ISBN 978-80-86706-19-1.
25. SKÁLOVÁ, Jana, Vladislav MOTYČKA a Jaroslav KOUTSKÝ. *Nauka o materiálech*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006. s. 199-208. ISBN 80-704-3244-6.
26. BĚHÁLEK, Luboš. *Hodnocení nadmolekulární struktury plastů* [online]. Liberec, 2007. [cit. 2018-02-11]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/Intech/Morfologie.pdf>
27. Ústav materiálových věd a inženýrství. *09 polymery - struktura a vlastnosti: Polymery* [online]. [cit. 2018-02-11]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/index.php/cs/studium/podklady-pro-vyuku-zimni-semestr>



28. *Plastics technology* [online]. Cincinnati: Gardner Business Media, 2018, 64(02) s. 92 [cit. 2018-02-24]. ISSN 0032-1257. Dostupné z: <http://pty.epubxp.com/i/929876-feb-2018>
29. BOBEK, Jiří. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů* [online]. 2016 [cit. 2018-02-13]. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/Impresum.html>
30. KANDUS, Bohumil. *Technologie zpracování plastů* [přednášky a cvičení]. Brno: Vysoké učení technické Fakulta strojního inženýrství 22. 9. až 15.12 2016
31. ŽÁK, Ladislav. Obor technologie tváření kovů a plastů: Podklady pro cvičení *Vstřikovací formy*[online]. 2017 [cit. 2017-4-13]. Dokument ve formátu PDF. Dostupné z: [https://http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/cviceni/htn\\_tvareci\\_nastroje\\_vstrikovaci\\_formy\\_zak.pdf](https://http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/cviceni/htn_tvareci_nastroje_vstrikovaci_formy_zak.pdf)
32. Injection moulding shop. In: *VJB: Jáchymov* [online]. Jáchymov: VJB Partner, 2014, 2014 [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <http://www.vjbpartner.cz/en/injection-moulding-shop>
33. Hot runner market report for period 2022 Milacron, Barnes Group, HASCO Hasenclever GmbH, Inglass, Seiki Corporation, Gunther, INglass, Husky and Others. In: *OpenPR: Worldwide public relations* [online]. Spojené státy americké: openPR, 2017, 29.11.2017 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://www.openpr.com/news/837674/Hot-Runner-Market-Report-for-Period-2022-Milacron-Barnes-Group-HASCO-Hasenclever-GmbH-INglass-Seiki-Corporation-Gunther-INglass-Husky-and-Others.html>
34. KOŠÍK, Miroslav, Jozef BILÍK a Roland ŠÚBA. Design of injection mould with conformal cooling using numerical modelling. *Acta technica corvinensis: Bulletin of engineering*. Trnava, Slovensko: University Politehnica Timisoara, Faculty of Engineering Hunedoara, 2016, 9(3), 19-26. ISSN 2067-3809.
35. *Plastics technology* [online]. Cincinnati: Gardner Business Media, 2018, 64(01) s. 50 až 52 [cit. 2018-02-24]. ISSN 0032-1257. Dostupné z: <http://pty.epubxp.com/i/918111-jan-2018>
36. SVOBODA, Jan. Odvzdušňovací ventil SGD: vyšší ekonomická úspěšnost projektů. *Technický portál.cz* [online]. Praha: Business Media CZ, s.r.o, 2016, 12.10.2016 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/odvzdušnovaci-ventil-sgd-vyssi-ekonomicka-uspesnost-projektu\\_37527.htm](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/odvzdušnovaci-ventil-sgd-vyssi-ekonomicka-uspesnost-projektu_37527.htm)
37. *Plastics technology* [online]. Cincinnati: Gardner Business Media, 2017, 63 (07) s. 20 až 22s. [cit. 2018-02-24]. ISSN 0032-1257. Dostupné z: <http://pty.epubxp.com/i/839458-jul-2017>
38. SEIDL, Martin. *Stroje pro zpracování polymerních materiálů* [online]. 1. Svitavy: Code Creator, s.r.o, 2016 [cit. 2018-03-23]. ISBN 978-80-88058-71-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/Impresum.html>
39. *Plastics technology* [online]. Cincinnati: Gardner Business Media, 2016, 62 (11) s. 6. [cit. 2018-04-16]. ISSN 0032-1257. Dostupné z: <https://pty.epubxp.com/i/730914-oct-2016>
40. ENGEL e-motion: plně elektrický vstřikovací stroj pro špičkové použití. *ENGEL* [online]. Rakousko: Engel austria, 2018 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://www.engelglobal.com/cs/cz/reseni/vstrikovaci-stroje/e-motion.html>
41. Vstřikovací jednotka: Vysoce výkonné vstřikovací jednotky a šneky. *Kuboušek: technologies and instruments* [online]. České Budějovice: Kuboušek group, 2016 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://www.kubousek.cz/cz/divize-kraussmaffeivstrikovaci-stroje/rada-gx/vstrikovaci-jednotka.html>

42. Systec SP: hybridní stroj, přesné a rychlé řešení. *Esinte* [online]. Japonsko: Esinte, 2018 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://www.esinte.eu/vstrikovaci-lisy-na-plasty-sumitomo-shi-demag/produkty/systec-sp-hybridni-vstrikovaci-lisy-na-plasty>
43. ERHARD, Gunter. *Designing with plastics*. Mnichov: Hanser, 2006. ISBN 9783446225909.
44. Rectus Accessories Components. *Kovaz: hydraulika a pneumatika* [online]. Pardubice: Kovaz, 2018 [cit. 2018-03-27]. Dostupné z: <https://www.kovaz.cz/media/752542/rectus-chlaz-uk-29-32.pdf?&key=ZGpmIyQwNUZfNzUyNTQy>
45. Toshiba EC-SXII Toshiba EC-SXII. In: *Invera: Český výrobce strojů na plasty a gumu a hydraulických lisů* [online]. Rakovník: INVERA, 2016 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <https://invera.cz/produkty/vstrikovaci-stroje/toshiba/toshiba-ec-sxii>
46. Ec: all-electric injection moulding machines. *Invera: český výrobce strojů na plasty a gumu a hydraulických lisů* [online]. Rakovník: INVERA, 2016 [cit. 2018-03-26]. Dostupné z: <https://invera.cz/files/prilohy/6-toshiba-ec-sxii/katalog-f01-ec30sx2-ec230sx2.pdf>
47. PP random. *PlasticPortal.eu: portál pro plasty a gumu* [online]. Nitra, Slovensko: ICOSA s.r.o, 2018 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://www.plasticportal.cz/cs/ceny-polymerov/lm/1/price/2809//>
48. MRŇA, Libor. *Seminář k diplomové práci* [cvičení]. Brno: Vysoké učení technické Fakulta strojního inženýrství 11.04 2018

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
$a_{eff}$	měrná tepelná vodivost polypropylenu	$[mm^2 \cdot s^{-1}]$
$b$	délka žebra	$[mm]$
$c$	cena granulátu	$[Kč \cdot kg^{-1}]$
$c_v$	minimální vstřikovací kapacita	$[cm^3]$
$c_p$	minimální plastifikační kapacita	$[kg \cdot h^{-1}]$
$d$	vnitřní průměr kroužku	$[mm]$
$d_p$	průměr dna prohlubně	$[mm]$
$d_{vs}$	vstupního průměru hlavního vtoku	$[mm]$
$d_{vy}$	výstupní průměr hlavního vtoku	$[mm]$
$D$	vnější průměr kroužku	$[mm]$
$D_k$	průměr rozváděcího kanálku	$[mm]$
$D_{n_{ks}}$	doba návratnosti ve vyrobených kusech	$[Ks]$
$D_{n_t}$	doba návratnosti ve výrobním čase	$[d]$
$D_{TAB}$	tabulková hodnota průměru rozváděcího kanálku	$[mm]$
$E$	modul pružnosti v tahu	$[MPa]$
$f$	průřez odvzdušňovacího kanálku	$[m^2]$
$F_h$	náklady na zhotovení dvojnásobné „horké formy“	$[Kč]$
$F_p$	minimální přidržovací síla	$[kN]$
$F_s$	náklady na zhotovení dvojnásobné „studené formy“	$[Kč]$
$F_{z_h}$	náklady na zhotovení „horké formy“, s násobností jedna	$[Kč]$
$F_{z_s}$	náklady na zhotovení „studené formy“, s násobností jedna	$[Kč]$
FDM	technologie 3D tisku (z anglického fused deposition modeling)	$[-]$
FFF	technologie 3D tisku (z anglického fused filament fabrication)	$[-]$
$G$	hmotnost vstřikovaného dílce	$[g]$
$G_1$	hmotnost vzduchu v tvarové dutině	$[kg]$
$G_2$	hmotnost vstřikovaných dílců (dvou pro dvojnásobnou formu)	$[g]$
$G_{S_{max}}$	maximální průtočné množství plynu	$[kg \cdot s^{-1}]$
$G_z$	hmotnost vtokového zbytku	$[g]$
$h$	výška vstřikovaného dílce	$[mm]$
$h_1$	výška prstence	$[mm]$
$h_2$	výška propojujícího prvku	$[mm]$
$h_3$	výška hvězdy	$[mm]$
$h_4$	výška žebra	$[mm]$
$h_o$	hloubka odvzdušnění	$[mm]$
HDPE	polyethylen s vysokou tuhostí	$[-]$
$k$	koeficient pro výpočet teploty	$[-]$
$K$	faktor využití času	$[-]$
$K_1$	koeficient tekutosti materiálu	$[-]$
$K_2$	koeficient délky rozváděcího kanálku	$[-]$
$L$	délka rozváděcího kanálku	$[mm]$
$L_f$	výška formy	$[mm]$
$L_h$	odhadovaná životnost „horké formy“	$[r]$
$L_p$	hloubka prohlubně	$[mm]$
$L_s$	odhadovaná životnost „studené formy“	$[r]$
$L_{s_{max}}$	maximální otevření vstřikovacího stroje	$[mm]$
$L_{s_{min}}$	minimální otevření vstřikovacího stroje	$[mm]$
$L_v$	výška výstřiku	$[mm]$
$L_{vH}$	délka kužele hlavního vtoku	$[mm]$

$M_h$	náklady na obsluhu stroje s „horkou formou,,	[Kč]
$M_s$	náklady na obsluhu stroje se „studenou formou,,	[Kč]
$n$	násobnost formy	[-]
$n_p$	praktická násobnost	[-]
$n_t$	termínová násobnost	[-]
$N$	velikost výrobní série	[ks]
$N_{c\_1ks}$	režijní i výrobní náklady na jeden kus při dané sérii	[Kč]
$N_{C\_h}$	celkové náklady „horké formy,, na tisíc kusů výrobku	[Kč]
$N_{C\_s}$	celkové náklady „studené formy,, na tisíc kusů výrobku	[Kč]
$N_{F\_sc}$	celkové náklady na „studenou formu,,	[Kč]
$N_{F\_h}$	rozpočítání nákladů pro „horkou formu,, na tisíc výrobků	[Kč]
$N_{F\_s}$	rozpočítání nákladů pro „studenou formu,, na tisíc výrobků	[Kč]
$N_{M\_h}$	náklady na materiál „horké formy,, pro tisíc kusů	[Kč]
$N_{M\_s}$	náklady na materiál „studené formy,, pro tisíc kusů	[Kč]
$N_{p\_1ks}$	prodejní cena jednoho kusu při dané sérii	[Kč]
$N_{v\_1ks}$	náklady na jeden kus při dané sérii	[Kč]
$N_{V\_h}$	náklady na provoz „horké formy,, pro tisíc kusů	[Kč]
$N_{V\_s}$	náklady na provoz „studené formy,, pro tisíc kusů	[Kč]
$p_1$	tlak vzduchu v tvarové dutině před plněním	[kg·mm <sup>-2</sup> ], [MPa]
$p_2$	tlak stlačeného vzduchu před koncem plnění [MPa]	[MPa]
$p_d$	dotlak	[MPa]
$p_v$	vstřikovací tlak	[MPa]
$p_z$	zpětný tlak	[MPa]
$P_r$	procento režie	[%]
PP	polypropylen	[-]
PVC	polyvinylchlorid	[-]
PVDF	polyvinylidenfluorid	[-]
$r$	cena regenerátu	[Kč]
$R$	plynová konstanta vzduchu	[m·K <sup>-1</sup> ]
$R_m$	pevnost v tahu	[MPa]
$s$	tloušťka stěny prvku	[mm]
$S_h$	náklady na provoz stroje s „horkou formou,,	[Kč]
$S_k$	průmět rozváděcího kanálku s ústím vtoku do dělicí roviny formy	[mm <sup>2</sup> ]
$S_m$	směnnost provozu	[-]
$S_s$	náklady na provoz stroje se „studenou formou,,	[Kč]
$\check{s}$	šířka odvodu	[mm]
$t$	teplota tání	[°C]
$t_1$	doba uzavření formy	[s]
$t_2$	doba přisunutí vstřikovací jednotky	[s]
$t_3$	doba otevření formy a vyhození výstřiku	[s]
$t_4$	časová prodleva	[s]
$t_k$	doba chlazení	[s]
$t_v$	doba vstřikování	[s]
$T_2$	konečná teplota stlačeného vzduchu	[K]
$T_e$	střední teplota odformování	[°C]
$T_M$	teplota taveniny plastu	[°C]
$T_p$	termín dodávky	[h]
$T_w$	teplota formy	[°C]
$V$	celkový objem vstřikované součásti	[cm <sup>3</sup> ]
$V_1$	objem prvků tvaru prstence	[mm <sup>3</sup> ]
$V_2$	objem propojujících prvků	[mm <sup>3</sup> ]
$V_3$	objem prvků tvaru hvězdy	[mm <sup>3</sup> ]

$V_4$	objem prvků tvaru žebra	[mm <sup>3</sup> ]
$V_D$	vstříkovaný objem	[cm <sup>3</sup> ]
$V_{HV}$	předběžný objem vtokového kužele	[cm <sup>3</sup> ]
$V_{HV_s}$	skutečný objem vtokového kužele	[cm <sup>3</sup> ]
$V_k$	objem rozváděcího kanálku	[cm <sup>3</sup> ]
$V_p$	objem prohlubně	[cm <sup>3</sup> ]
$V_z$	objem vtokového systému	[cm <sup>3</sup> ]
$x$	vytnutá plocha mezikruží	[%]
$z$	navýšení o hodnotu zisku	[-]
$\alpha$	úhel rozšíření vtokového kužele	[°]
$\beta$	úhel rozšíření prohlubně	[°]
$\gamma$	měrná hmotnost vzduchu	[kg·m <sup>-3</sup> ]
$\eta$	viskozita	[Pa·s]
$\rho$	hustota	[g·cm <sup>-3</sup> ]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Ilustrační obrázky technologie vstřikování plastů [4], Foto: ARBURG [5], [6], [7] .....	9
Obr. 2 Benzolové pračky koksárenského průmyslu [10].....	10
Obr. 3 Řešený tvar Pall kroužku .....	10
Obr. 4 Granulát polypropylenu [13] .....	11
Obr. 5 Demonstrace možností mikrofrézování [15] .....	13
Obr. 6 Zařízení otevřené 3D tiskárny pro metodu FDM [16].....	13
Obr. 7 Technologie statického lití plastů [18] .....	14
Obr. 8 Vstřikování plastů, fáze vyhození výrobku z tvarové dutiny formy [19].....	14
Obr. 9 Fáze přivedení granulátu do tavného válce [21].....	16
Obr. 10 Fáze vstřikování taveniny do dutiny formy [21] .....	16
Obr. 11 Fáze působení dotlaku [21].....	16
Obr. 12 Fáze otevření formy a vyhození dílce [21].....	17
Obr. 13 Časové rozložení vstřikovacího cyklu [5] .....	17
Obr. 14 Schématický vzhled řetězců [22].....	19
Obr. 15 Schématické znázornění nadmakromolekulární struktury polymerů [26] .....	19
Obr. 16 Srovnání struktury plastů v závislosti na teplotě [28] .....	21
Obr. 17 Merová jednotka polypropylenu [23] .....	22
Obr. 18 Možné konfigurace řetězce polypropylenu [12].....	22
Obr. 19 Pevná a pohyblivá část vstřikovací formy [31] .....	23
Obr. 20 Manipulace se vstřikovacími formami [32].....	24
Obr. 21 Schéma vtokové systému s popisem jednotlivým částí.....	26
Obr. 22 Schéma horkého vtokové systému [33].....	26
Obr. 23 Různá schémata rozvržení temperačních systémů [31].....	27
Obr. 24 Porovnání konvenčně používané a konformní temperace [34] .....	28
Obr. 25 Vliv odvodu vzdušného na kvalitu stěny výrobku [35] .....	29
Obr. 26 Schéma šňekového vstřikovacího stroje [29] .....	30
Obr. 27 Vstřikovací jednotka [39], [40] .....	31
Obr. 28 Vzhled šneku, vliv rozdílného kompresního poměru [38] .....	32
Obr. 29 Uzavírací jednotka, foto: ARBURG [5] .....	32
Obr. 30 Komunikační rozhraní stroje [41] .....	33
Obr. 31 Umístění dělicí roviny na dílci .....	34
Obr. 32 Tvarová dutina v okamžiku otevření formy .....	34
Obr. 33 Tvarová dutina v okamžiku uzavírání formy .....	34
Obr. 34 Tvarová dutina v okamžiku plného uzavření formy.....	35
Obr. 35 Tvarová dutina v okamžiku vyhození dílce.....	35
Obr. 36 Rozdělení vstřikovaného dílce na jednotlivé tvarové prvky .....	36
Obr. 37 Desky tvořící vstřikovací formu .....	40
Obr. 38 Nákres vtokové vložky s rozměry hlavního vtokového kužele.....	41
Obr. 39 Prohlubeň pod vtokovým kuželem .....	42
Obr. 40 Umístění bodového ústí na vstřikovaném dílci .....	43
Obr. 41 Zobrazení uspořádání temperačního systému .....	44
Obr. 42 Možné způsoby řešení vyhození vtokového zbytku [1] .....	45
Obr. 43 Řešení vyhazovacího systému navrhované formy.....	45
Obr. 44 Umístění otevíracích kolíků.....	46
Obr. 45 Vodící prvek formy .....	46
Obr. 46 Umístění objímky vtokového kanálu a středícího kroužku.....	47
Obr. 47 Oko GB/T 825-1988 Type A M 24 .....	47
Obr. 48 Zvolený vstřikovací stroj EC100SXII [45] .....	49

Obr. 49 Schématický obrázek plného uzavření a rozevření stroje.....	50
Obr. 50 Simulace plnění vstřikovaného dílce .....	51
Obr. 51 Srovnání doby plnění součásti v závislosti na poloze vtoku .....	51
Obr. 52 Znázornění plnění vtokové soustavy a dílců v závislosti na čase .....	52
Obr. 53 Předpokládané rozložení kapes vzduchu v součásti .....	52
Obr. 54 Pravděpodobnost dosažení požadované kvality .....	53
Obr. 55 Teplota temperačních kanálů .....	53
Obr. 56 Vývoj cen polypropylenu v eurech.....	54
Obr. 57 Graf nákladů na studenou a horkou formu v závislosti na velikosti vyráběné série ...	58
Obr. 58 Graf hraniční meze vhodnosti použití „studené,, formy .....	59
Obr. 59 Graf návratnosti nákladů na formu .....	61
Obr. 60 Návratnost při maximální výhodné sérii.....	61

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Základní vlastnosti polypropylenu [1], [2], [9], [11], [12] .....	11
Tab. 2 Vstřikovací parametry polypropylenu [12] .....	12
Tab. 3 Parametry výrobní série [1] .....	12
Tab. 4 Vyrobený počet kusů při zhotovení tvarové dutiny z daného materiálu [20] .....	23
Tab. 5 Rozměry desek formy z obrázku 36 .....	41
Tab. 6 Srovnání parametrů zvoleného vstřikovacího stroje s požadavky [46] .....	49
Tab. 7 Platy zaměstnanců .....	55
Tab. 8 Parametry ekonomických kritérií [30] .....	56
Tab. 9 Volba vhodnosti daného vtokového systému .....	59

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Tabulka koeficientů $K_2$ [11]
Příloha 2	Tabulka průměru $D'$ [11]
Příloha 3	Graf pro určení praktické násobnosti formy [20]
Příloha 4	Tabulky pro určení doby vstřikování [11]
Příloha 5	Diagram pro volbu rozměrů hlavního vtokového kanálu [1]
Příloha 6	Tabulka stanovení rozměrů bodových vtoků pro středně tekuté plasty (PS) [1]
Příloha 7	Tabulka hloubek od vzdušňovacích mezer různých plastů [1]
Příloha 8	Tabulka volby průměru temperačního kanálu formy [1]
Příloha 9	Parametry zvoleného vstřikovacího stroje [46]
Příloha 10	Rozměry uzavírací jednotky [46]

## SEZNAM VÝKRESŮ

Výkres 1	Pall kroužek	DP-161341-01-01
Výkres 2	Výkres sestavy	DP-161341-01-02
Výkres 3	Deska pohyblivého tnu	DP-161341-02-02
Výkres 4	Deska vedení kamenů	DP-161341-02-03
Výkres 5	Kámen levý	DP-161341-03-01
Výkres 6	Kámen pravý	DP-161341-03-02
Výkres 7	Pevný trn	DP-161341-03-03
Výkres 8	Pohyblivý trn	DP-161341-03-04



## PŘÍLOHY

### 1. Tabulka koeficientů $K_2$ [11]

List 1/1

Délka kanálku L	$K_2$	Délka kanálku L	$K_2$
0-20	1,00	100-150	1,20
20-40	1,04	150-200	1,29
40-70	1,08	200-250	1,39
70-100	1,12	250-300	1,51

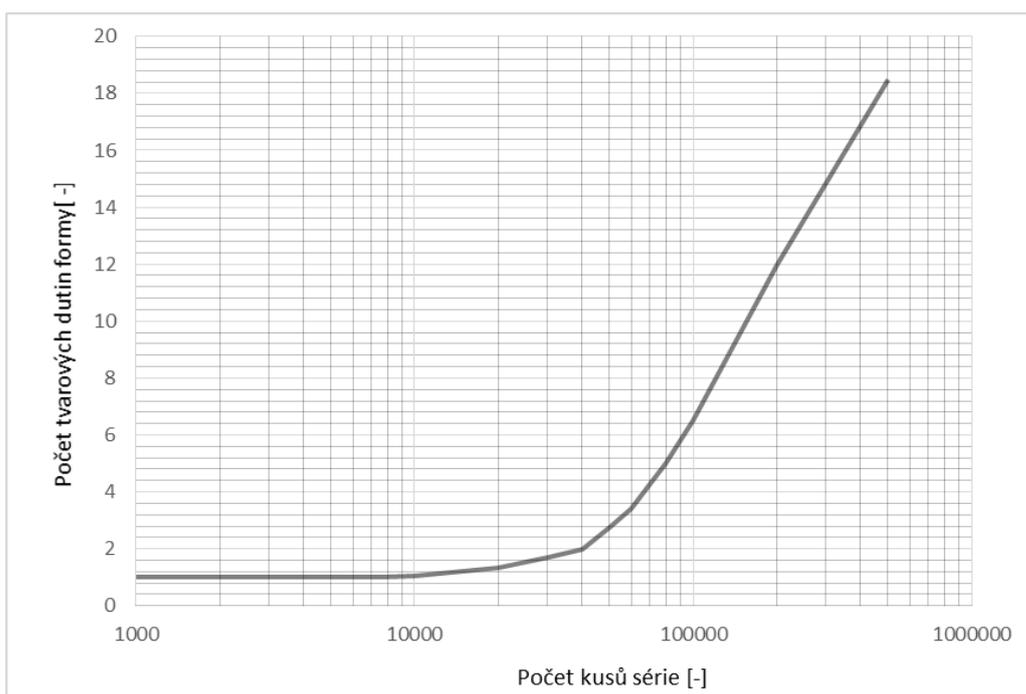
### 2. Tabulka průměru $D_{TAB}$ [11]

List 1/1

G [g]	s [mm]								
	s = 1	s = 1,5	s = 2	s = 2,5	s = 3	s = 3,5	s = 4	s = 4,5	s = 5
0	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5
<10	2,55	3,06	3,56	4,05	4,55	5,04	5,54	6,03	6,53
10-16	2,59	3,09	3,59	4,09	4,57	5,06	5,56	6,05	6,54
16-25	2,63	3,14	3,64	4,13	4,62	5,10	5,59	6,08	6,56
25-40	2,72	3,22	3,73	4,21	4,69	5,16	5,64	6,12	6,60
40-63	2,84	3,35	3,86	4,34	4,79	5,25	5,72	6,19	6,66
63-100	3,04	3,55	4,08	4,53	4,96	5,40	5,85	6,30	6,76
100-160	3,36	3,88	4,42	4,85	5,24	5,64	6,06	6,48	6,91
160-250	3,84	4,38	4,94	5,33	5,66	6,01	6,38	6,76	7,14
250-400	4,65	5,21	5,80	6,13	6,35	6,61	6,90	7,21	7,53
400-700	6,26	6,87	7,53	7,73	7,77	7,82	7,95	8,12	8,30

### 3. Graf pro určení praktické násobnosti formy [19]

List 1/1



#### 4. Tabulky pro určení doby vstřikování [11]

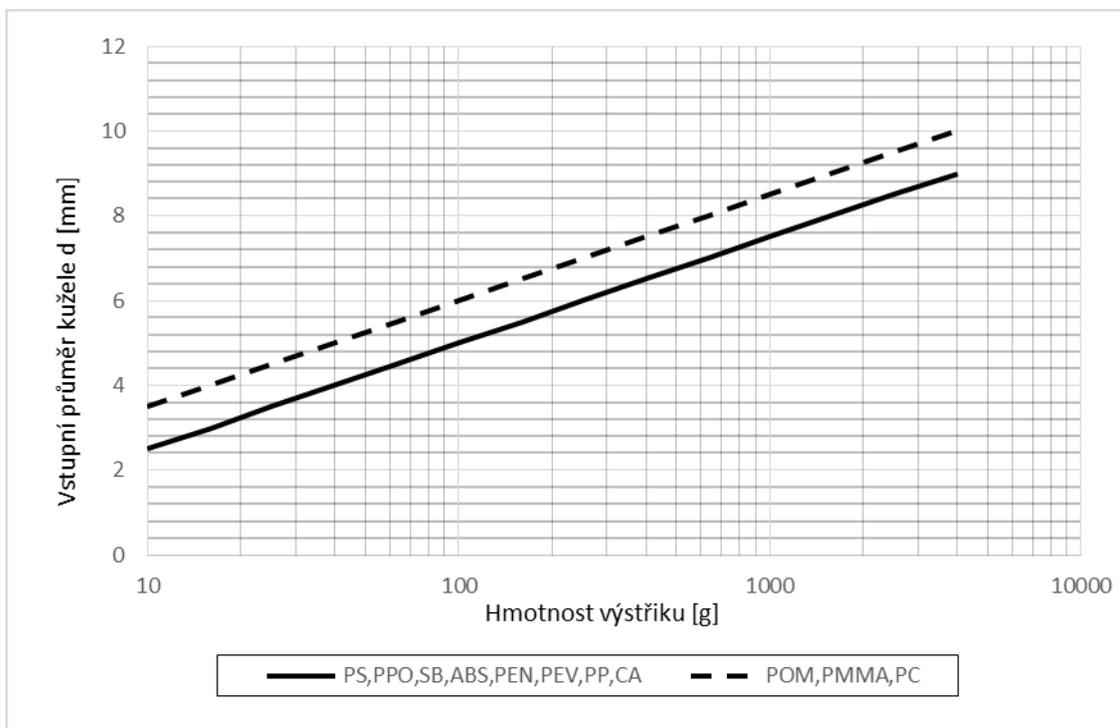
List 1/1

Viskozita	Vstřikovaný materiál
malá	PE-LD, PA 6, PA 6.6, PA 6.10, PA 11, POM, PET, PBT
střední	PS, ABS, PPO, PVC <small>weich</small> , PE- HD, PP, PA 12
vysoká	PVC <small>hart</small> , PMMA, PC

Vstřikovaný objem [cm <sup>3</sup> ]	Doba vstřikování [s]		
	Materiál s nízkou viskozitou	Materiál se střední viskozitou	Materiál s vysokou viskozitou
1-8	0,2 - 0,4	0,25 - 0,5	0,3 - 0,6
8-15	0,4 - 0,5	0,5 - 0,6	0,6 - 0,75
15-30	0,5 - 0,6	0,6 - 0,75	0,75 - 0,9
30-50	0,6 - 0,8	0,75 - 1,0	0,9 - 1,2
50-80	0,8 - 1,2	1,0 - 1,5	1,2 - 1,8
80-120	1,2 - 1,8	1,5 - 2,2	1,8 - 2,7
120-180	1,8 - 2,6	2,2 - 3,2	2,7 - 4,0
180-250	2,6 - 3,5	3,2 - 4,4	4,0 - 5,2

#### 5. Diagram pro volbu rozměrů hlavního vtokového kanálu [1]

List 1/1



6. Tabulka stanovení rozměrů bodových vtoků pro středně tekuté plasty (PS) [1]

List  
1/1

Objem výstřiku [cm <sup>3</sup> ]	Bodový vtok, průměr vtokového ústí [mm]
do 10	0,6 - 0,8
10 - 20	0,8 - 1,2
20 - 40	1,0 - 1,8
40 - 60	1,2 - 2,0
60 - 100	1,3 - 2,2
100 - 300	1,5 - 2,6
300 - 500	1,8 - 2,8
500 - 1000	-
1000 - 2000	-
2000 - 5000	-

7. Tabulka hloubek odvzdušňovacích mezer různých plastů [1]

List 1/1

Plast	Mezera [mm]
PS, ABS	do 0,05
PE, PP	do 0,04
PA	0,02 až 0,03
PPO	do 0,04
PBT	do 0,03
PC	do 0,05
POM	do 0,05
Sklem plněné	0,05 až 0,08
Strukturální pěny	do 0,1

8. Tabulka volby průměru temperačního kanálu formy [1]

List 1/1

		Hmotnost výstřiku v gramech														
		.	1	3	5	8	10	15	20	30	50	100	200	300	500	800
		1	3	5	8	10	15	20	30	50	100	200	300	500	800	1000
R á m	160x160	6	6	6	6	6	8	8	8							
	160x230		6	8	8	8	8	8	8	8						
	230x230		8	8	8	8	8	8	8	8	8					
	230x300			8	8	8	8	8	8	8	8	10				
	300x300			8	8	8	8	8	8	8	8	10	10			
	300x370				8	8	8	8	8	8	8	10	10	10		
	370x370				8	8	8	8	8	8	8	10	10	10	10	
	370x440					8	8	8	8	8	8	10	10	10	12	12
	440x440					8	8	8	8	8	10	10	12	12	12	12
	440x510						8	8	8	10	10	10	12	12	12	12
510x510						8	8	8	10	10	10	12	12	12	12	

9. Parametry zvoleného vstřikovacího stroje [46]

List 1/1

項目 ITEM		単位 UNIT	EC75SX II					EC100SX II								
射出 出 INJECTION	射出記号 INJECTION UNIT CODE		i 1, 5		i 2			i 2			i 3		i 4			
	バレル記号 BARREL CODE		Y	A	Y	A	B	Y	A	B	Y	A	Y	A	B	
	スクリユ径 SCREW DIAMETER	mm	25	28	28	32	36	28	32	36	32	36	36	40	45	
	理論射出体積 INJECTION VOLUME CALCULATED	cm <sup>3</sup>	55	69	78	102	130	78	102	130	115	146	162	201	254	
	射出質量 SHOT WEIGHT	PS	g	51	63	72	94	120	72	94	120	105	134	145	180	230
		PE	g	40	50	57	75	95	57	75	95	83	106	115	145	185
	最大射出圧 INJECTION PRESSURE (MAX)	MPa	276	220	287	220	174	287	220	174	253	200	247	200	158	
	最大保圧 HOLDING PRESSURE (MAX)	MPa	276	220	287	220	174	287	220	174	253	200	247	200	158	
	射出速度 INJECTION SPEED	標準 STANDARD	mm/s	300					300							
	射出率 INJECTION RATE (MAX)		cm <sup>3</sup> /s	147	184	184	241	305	184	241	305	241	305	305	376	477
	射出速度 INJECTION SPEED	高負荷 HIGH DUTY	mm/s	200					200							
	射出率 INJECTION RATE (MAX)		cm <sup>3</sup> /s	98	123	123	161	204	123	161	204	161	204	204	251	318
	射出速度 INJECTION SPEED	高速 HIGH SPEED	mm/s	500					500			400				
	射出率 INJECTION RATE (MAX)		cm <sup>3</sup> /s	245	308	308	402	509	308	402	509	321	407	407	502	636
	可塑化能力 PLASTICIZING CAPACITY	PS	kg/h	25	35	40	61	83	40	61	83	61	83	83	110	120
スクリユ回転速度 MAXIMUM SCREW SPEED		min <sup>-1</sup>	390	390	400	390	350	400	390	350	390	350	350	320	285	
スクリユトルク SCREW TORQUE		N·m	204	280	280	407	407	280	407	407	407	566	566	761	761	
ノズル押付力 NOZZLE TOUCH FORCE		kN(tf)	9.8(1.0)					11.8(1.2)								

型 締 MOLD CLAMPING	型締力 CLAMPING FORCE	kN(tf)	735(75)					980(100)					
	タイバー間隔(H×V) DISTANCE BETWEEN TIE RODS	mm	410×360					460×410					
	ダイプレート寸法(H×V) PLATEN DIMENSIONS	mm	580×530					660×610					
	型締ストローク CLAMP STROKE	mm	300					350					
	デーライト OPEN DAYLIGHT (Max.)	mm	770(★710)(★★750)					900(★840)(★★880)					
	最小型厚~最大型厚 MOLD HEIGHT (Min.~Max.)	mm	150~470(★90~410)(★★130~450)					180~550(★120~490)(★★160~530)					
	押出力 EJECTION FORCE	kN(tf)	20(2.0)					30(3.0)					
	押出ストローク EJECTOR STROKE	mm	70					90					

共 通 GENERAL	ヒータ電力 HEATER CAPACITY	kW	6.6 (5.5)	6.8 (5.6)	7.6 (6.3)	6.8 (5.6)	7.6 (6.3)	7.9 (6.5)	11.2 (9.2)	11.9 (9.8)
	機械寸法 MACHINE DIMENSIONS	L	4.0	4.1		4.6		4.6	4.9	
		W	1.2	1.2		1.3		1.3	1.3	
		H	1.6	1.6		1.7		1.7	1.7	
機械質量 MACHINE WEIGHT	合計 TOTAL	t	3.2	3.3		4.2		4.3	4.3	

◆ 金型取付関係図 Mold mounting space

