

Implementace procesu vstřikování ve firmě SMR Plus, s.r.o.

Bc. Dušan Bílek

Diplomová práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Dušan Bílek
Osobní číslo:	T23492
Studijní program:	N0788A270002 Výrobní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Implementace procesu vstřikování ve firmě SMR Plus, s.r.o.

Zásady pro vypracování

- Teoretická studie k tématu práce
- Porovnání dosavadní technologie výroby se vstřikovacím procesem
- Návrh univerzálního rámu a tvarových vložek pro proces vstřikování
- Návrh procesních parametrů vstřikování
- Technicko-ekonomické zhodnocení a určení environmentálních přínosů

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

Seznam doporučené literatury:

ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Grada, 2018. ISBN 978-80-271-0614-1. Dostupné také z: <https://www.bookport.cz/AccountSaml/SignIn/?idp=https://shibboleth.utb.cz/idp/shibboleth&returnUrl=/kniha/vstrikovani-plastu-4633/>

KAMAL, Musa R.; ISAYEV, Avraam I. a LIU, Shih-Jung (ed.). *Injection molding: technology and fundamentals. Progress in polymer processing*. Munich: Hanser, c2009. ISBN 9781569904343.

KERKSTRA, Randy a Steve BRAMMER. *Injection Molding Advanced Troubleshooting Guide* [online]. 1. München: Hanser Publishers, 2018. ISBN 9781569906453; 1569906459;.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

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

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 3. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

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

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá implementací vstřikovacího procesu ve firmě. Pro tuto práci byl zvolen vstřikovaný díl, skládající se ze dvou vstřikovaných částí, který slouží jako aretační prvek kovové přepravní palety pro automobilový průmysl. Tento díl je následně optimalizován pro výrobu na vstřikovacím stroji, který si firma zvolila. Aby bylo možné díl vyrábět, je v práci navržena kompletní konstrukce formy, která je koncipována jakožto univerzální, jelikož dokáže vyrábět obě části dílu pomocí dvou sad vyměnitelných tvarových vložek. Konstrukce formy byla podpořena simulacemi v programu Autodesk Moldflow Synergy, především pro návrh a optimalizaci temperačních okruhů. Pomocí analýz jsou také určeny procesní parametry vstřikovacího procesu. Práce dále porovnává dosavadní technologii nízkotlakého lití polyuretanu a technologii vstřikování z hlediska vhodnosti pro danou aplikaci. Řešeny jsou technicko-ekonomické a environmentální aspekty. V závěrečné kapitole jsou výsledky těchto porovnání zhodnoceny a podle nich je určena výhodnější technologie výroby.

Klíčová slova: vstřikování, nízkotlaké lití, proces, optimalizace, výrobní cyklus

ABSTRACT

This diploma thesis is focused on the implementation of the injection molding process within a company. A two component molded part was selected for the purpose of this thesis. This part serves as a locking element of a metal transportation pallet used in automotive industry. The part is subsequently optimized for production on the selected injection molding machine by the company. In order to make the production possible, the thesis presents a complete mold design, which is conceived as universal, as it is capable of producing both components using two sets of interchangeable mold inserts. The mold design is supported by simulations made in Autodesk Moldflow Synergy software, especially for the design and optimization of cooling circuits. The process parameters for the injection molding process are also determined using these analyses. Furthermore, the thesis compares low-pressure polyurethane casting technology already in use with the injection molding technology in terms of suitability for the given application. Technical-economical and environmental aspects are addressed. In the final chapter, the results of these comparisons are evaluated, and the more beneficial production technology is determined based on the findings.

Keywords: injection molding, low-pressure casting, process, optimization, production cycle

Rád bych poděkoval svému vedoucímu doc. Ing. Ondřeji Bílkovi, PhD. za odborné vedení mé diplomové práce, trpělivost a pohotové reakce, cenné poznatky, svědomitou a důslednou revizi. Mé poděkování také patří firmě SMR Plus s.r.o., ve které mi bylo poskytnuto potřebné zázemí a podpora pro zpracování praktické části práce. Zvláštní poděkování bych chtěl věnovat majiteli firmy Ing. Liboru Vaňkovi, za možnost realizace mé práce v rámci firmy, ochotu a důvěru, kterou jsem během spolupráce obdržel.

OBSAH

ÚVOD	15
I TEORETICKÁ ČÁST	16
1 VSTŘIKOVÁNÍ.....	17
1.1 HISTORIE VSTŘIKOVÁNÍ.....	17
1.2 VSTŘIKOVACÍ PROCES	17
1.3 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS.....	18
1.3.1 Příprava polymerní taveniny	18
1.3.2 Vstřikovací a dotlaková fáze	20
1.3.3 Fáze tuhnutí	22
2 VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	24
2.1 VSTŘIKOVACÍ JEDNOTKA.....	24
2.1.1 Funkce vstřikovací jednotky – příprava taveniny	25
2.1.2 Funkce vstřikovací jednotky – doprava taveniny.....	25
2.1.3 Funkce vstřikovací jednotky – tlakování taveniny.....	25
2.1.4 Šnek	26
2.1.5 Válec a topná tělesa	27
2.1.6 Násypka.....	28
2.1.7 Zpětný ventil	29
2.1.8 Tryska	29
2.2 UZAVÍRACÍ JEDNOTKA.....	31
2.2.1 Mechanické uzavírací systémy.....	31
2.2.2 Hydraulické uzavírací systémy	32
2.2.3 Elektrické uzavírací systémy.....	33
2.2.4 Stroje bez vodících tyčí.....	34
2.2.5 Uzavírací síla.....	34
2.3 TEMPERAČNÍ ZAŘÍZENÍ	35
2.3.1 Systém chlazení vzduchem	35
2.3.2 Systém chlazení vodou	36
2.3.3 Výměníky tepla a chladiče.....	36
3 POLYMERY	37
3.1 TERMOPLASTY	37
3.2 REAKTOPLASTY	38
3.3 VOLBA VHODNÉHO POLYMERU	39
4 ENVIROMENTÁLNÍ A EKONOMICKÉ ASPEKTY	41
4.1 DOPAD POLYMERŮ NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ.....	41
4.2 SPALOVÁNÍ PLASTOVÉHO ODPADU (WASTE-TO-ENERGY).....	42
4.3 RECYKLACE PLASTOVÉHO ODPADU.....	42
4.3.1 Výzvy a limity spojené s recyklací polymerů.....	43

5	INOVACE A TRENDY VE VSTŘIKOVÁNÍ POLYMERŮ	44
5.1	PROTOTYPOVÁ VÝROBA VSTŘIKOVACÍCH FOREM	44
5.1.1	Význam 3D tisku v prototypové výrobě forem	44
5.2	MIKRO-VSTŘIKOVÁNÍ.....	45
5.3	PRVKY PRŮMYSLU 4.0 V PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ.....	46
5.3.1	Robotizace výroby.....	46
5.3.2	Predikce kvality vstřikování	47
5.4	GAS ASSISTED INJECTION MOLDING	47
5.5	BIOLOGICKY ROZLOŽITELNÉ POLYMERY	47
6	SHRNUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI	49
II	PRAKTICKÁ ČÁST	50
7	VSTŘIKOVANÝ DÍL.....	51
7.1	OPTIMALIZACE VSTŘIKOVANÉHO DÍLU.....	53
8	POROVNÁNÍ DOSAVADNÍ TECHNOLOGIE SE VSTŘIKOVACÍM PROCESEM.....	56
8.1	ZVOLENÝ VSTŘIKOVACÍ STROJ	57
8.2	NÁKLADY NA FORMY	58
8.2.1	Cena vstřikovací formy	58
8.2.2	Cena formy pro lití polyuretanu.....	60
8.3	EKONOMICKÉ POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ NÍZKOTLAKÉHO LITÍ A VSTŘIKOVÁNÍ.....	62
8.3.1	Výpočet ceny jednoho kusu pro technologii nízkotlakého lití	62
8.3.2	Výpočet ceny jednoho kusu pro technologii vstřikování	64
8.4	ENVIRONMENTÁLNÍ POROVNÁNÍ NÍZKOTLAKÉHO LITÍ A VSTŘIKOVÁNÍ	65
8.4.1	Materiálové ztráty a recyklace	66
8.4.2	Emisní zátěž vzniklá spotřebou energie	66
9	NÁVRH VSTŘIKOVACÍHO NÁSTROJE	68
9.1	DESKY TĚLESA FORMY	70
9.1.1	Izolační desky	71
9.1.2	Upínací desky.....	72
9.1.3	Tvarové desky	72
9.1.4	Rozpěrné desky	74
9.1.5	Desky vyhazovacího systému	74
9.2	TVAROVÉ VLOŽKY INSERTU.....	75
9.2.1	Tvárník insertu	76
9.2.2	Tvárnice insertu.....	77
9.2.3	Temperace tvárnice a tvárníku insertu	77
9.3	TVAROVÉ VLOŽKY ZÁSTŘIKU	78
9.3.1	Tvárník zástřiku	78

9.3.2	Tvárnice zástřiku	80
9.4	PŘÍSLUŠENSTVÍ A KOMPONENTY	82
9.4.1	Vtoková vložka.....	82
9.4.2	Středící kroužky	83
9.4.3	Vodící čepy	84
9.4.4	Vodící pouzdra	84
9.4.5	Centrovací pouzdro.....	85
9.4.6	Vodící čep vyhazovací.....	85
9.4.7	Pouzdro vyhazovacích čepů.....	86
9.4.8	Dorazová destička pro vyhazovací paket.....	86
9.4.9	Záslepky	87
9.4.10	Přepážky.....	87
9.4.11	Vyhazovače	87
9.4.12	Přípojky.....	88
9.4.13	Spojovací prvky.....	88
10	ANALÝZA MOLDFLOW	89
10.1	NÁVRH TEMPERAČNÍCH OKRUHŮ	89
10.1.1	Prvotní návrh temperačního okruhu pro zástřik.....	89
10.1.2	Výsledky analýzy prvotního okruhu.....	90
10.1.3	Optimalizovaný temperační okruh	90
10.1.4	Výsledky optimalizovaného okruhu.....	92
10.1.5	Návrh temperačního okruhu insertu	96
10.1.6	Výsledky temperačního okruhu insertu	96
10.2	ODVZDUŠNĚNÍ DUTINY FORMY	99
10.2.1	Výsledky Air traps.....	99
10.2.2	Výsledky Fill time	99
10.2.3	Vyhodnocení míst pro odvzdušnění	100
11	NÁVRH PROCESNÍCH PARAMETRŮ VSTŘIKOVÁNÍ	101
11.1	DOBA CHLAZENÍ ZÁSTŘIKU.....	101
11.2	NASTAVENÍ PROCESU VSTŘIKOVÁNÍ.....	103
12	TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ A URČENÍ ENVIRONMENTÁLNÍCH PŘÍNOSŮ	104
12.1	TECHNICKÉ ZHODNOCENÍ	104
12.1.1	Délka výrobního cyklu a kapacita výroby	104
12.1.2	Konstrukce a údržba forem	104
12.2	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	105
12.2.1	Fixní náklady.....	105
12.2.2	Provozní náklady	105
12.2.3	Náklady na jeden kus.....	105
12.3	ENVIRONMENTÁLNÍ ZHODNOCENÍ.....	106
12.4	VYHODNOCENÍ ZVOLENÉ TECHNOLOGIE.....	107
	ZÁVĚR.....	108

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	109
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	116
SEZNAM TABULEK	119
SEZNAM PŘÍLOH.....	120

ÚVOD

Firma SMR Plus s.r.o. se věnuje výrobě kovových palet, převážně pro automobilový, plynárenský a chemický průmysl. Tyto palety slouží k přepravě, uskladnění nebo také robotickou manipulaci s uloženými díly. Součástí palet bývají plastové díly ve formě zástríku kovového insertu, které tvarově kopírují uskladňovaný dílec, určují jeho polohu v paletě a zajišťují jej proti volnému pohybu.

Firma disponuje technologií nízkotlakého lití polyuretanu, kterou vyrábí tyto díly, jedná-li se o malou sérii. V případě velkých sérii firma dosud zajišťovala výrobu plastových dílů formou kooperace u externího dodavatele. Dodavatelská firma pro tyto účely využívá technologii vstřikování termoplastů.

Implementací nové technologie v podobě vstřikování do vlastního výrobního zázemí firmy by bylo dosaženo nezávislosti na dodavateli, snížení nákladů na vyráběné díly, eliminace dodacích lhůt a nákladů na přepravu, zvýšila by se časová efektivita a proces by byl flexibilnější.

Tato práce má prověřit a porovnat možnosti a aspekty výroby konkrétního dílu, sloužícího jako aretační prvek kovové přepravní palety pro automobilový průmysl, technologiemi nízkotlakého lití polyuretanu a vstřikování termoplastů. V rámci několika různých porovnáních, technických, ekonomických a environmentálních, jsou určeny přednosti a nedostatky jednotlivých technologií, dle kterých je v závěrečné kapitole zvolena vhodnější technologie pro výrobu daného dílu. Pro technologii vstřikování bude také navržena kompletní víceúčelová vstřikovací forma, jejímž účelem je schopnost vyrábět obě komponenty zvoleného dílu v jednom tělese formy pomocí dvou vyměnitelných sad tvarových vložek. Konstrukce formy bude podpořena simulacemi v programu Moldflow Synergy, ze kterých budou také určeny procesní parametry vstřikovacího procesu.

I TEORETICKÁ ČÁST

1 VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování se řadí mezi nejrozšířenější technologie zpracování polymerů. Hraje důležitou roli v plastikářském průmyslu, kde jeho hlavní rolí je výroba dílů různých tvarů vysoké kvality. Vyznačuje se svou vysokou produktivitou a efektivitou zvláště pro díly, které by jinou technologií bylo obtížné nebo příliš finančně náročné zhotovit. Přestože je svým objemem výroby na druhém místě hned za extruzí (konkrétně 32 % celkového světového objemu zpracování polymerů), je to právě vstřikování, které v tomto odvětví přináší nejvíce kreativní a komplexní řešení. Dokáže zpracovávat jak reaktoplasty, tak termoplasty. [1]

1.1 Historie vstřikování

Vstřikovací stroj se vyvinul z jednostupňového pístového stroje, již byl patentován v roce 1872 Johnem Wesley Hyattem, do novodobé podoby šnekového stroje (jež pracuje na principu přímočarého vratného pohybu a otočném pohybu kolem své osy) v roce 1951 Williamem H. Willertem. [1]

Tento typ vstřikovacího stroje se šnekem vynalezeným Willertem byl dále modifikován a zlepšován. Z jednostupňového stroje přišel na řadu dvoustupňový. Zajistil tak lepší homogenitu taveniny a objem vstřikovací dávky. Jeho efektivita v procesu tavení materiálu spolu se zlepšenou homogenitou měli za důsledek možnost tavení většího objemu polymeru. To vedlo k výrobě výrazně rozměrnějších dílů. S příchodem vývoje v pokročilém elektrickém inženýrství se vyvíjeli i řídicí systémy vstřikovacích strojů. Vstřikovací stroj tak mohl být komplexněji kontrolován a ovládán. Byly zařazeny více-dávkové vstřikovací stroje, uzavírací jednotky s více polohovatelným nastavením, vylepšené designy šroubů plastikačních jednotek, až po plně elektrické stroje bez využití hydraulických systémů. V současnosti jsou tyto stroje tak komplexní a schopné, že dokážou vyrobit téměř jakoukoliv součást, kterou průmysl požaduje. Dokážou být ovládány online pomocí internetu na dálku, vyrobit mikro-díly pro hodinářství, až po rozměrné díly karoserie v automobilovém průmyslu, a to ve vysoké kvalitě a přesnosti. [1,2]

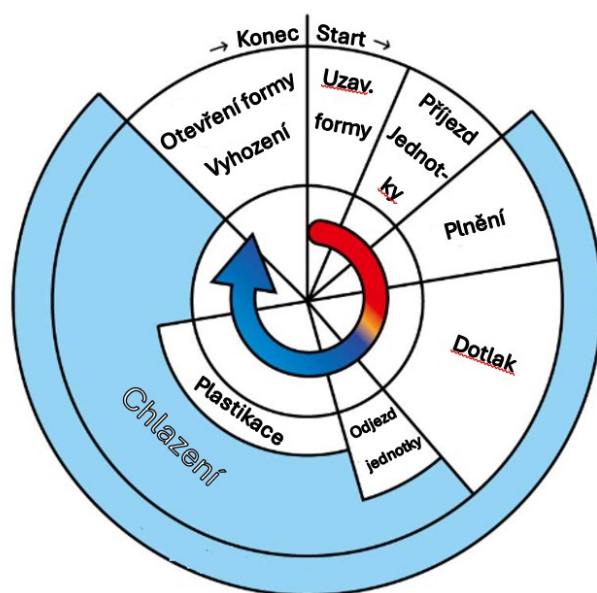
1.2 Vstřikovací proces

Vstřikování polymerních materiálů je definováno jako nestacionární proces vícero proměnných zpracování nelineárně časově závislých materiálu. Jedná se o cyklický proces po sobě jdoucích kroků. Dá se obecně rozdělit do třech hlavních pilířů: tavení materiálu, vstřikování, tuhnutí materiálu.

1.3 Vstřikovací cyklus

Vstřikovací cyklus, jež je souhrnem předešle popsanych úkonů, lze rozdělit následovně podle postupně jdoucích operací:

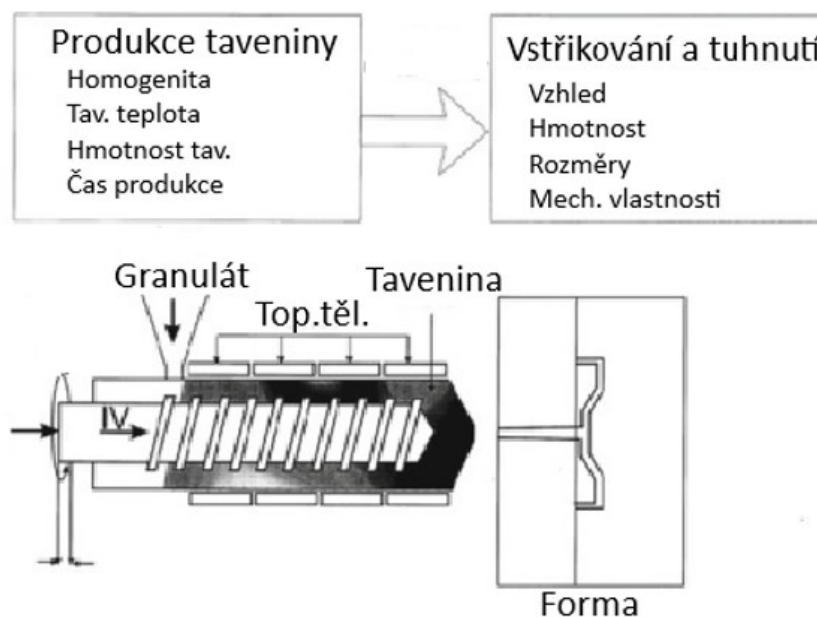
- Uzavření formy
- Vstřik taveniny do dutiny formy
- Přepnutí na dotlak (Fáze dotlaku)
- Chlazení formy + příprava další dávky taveniny
- Otevření formy
- Vyhození dílců z formy



Obr. 1 Znázornění vstřikovacího cyklu [5]

1.3.1 Příprava polymerní taveniny

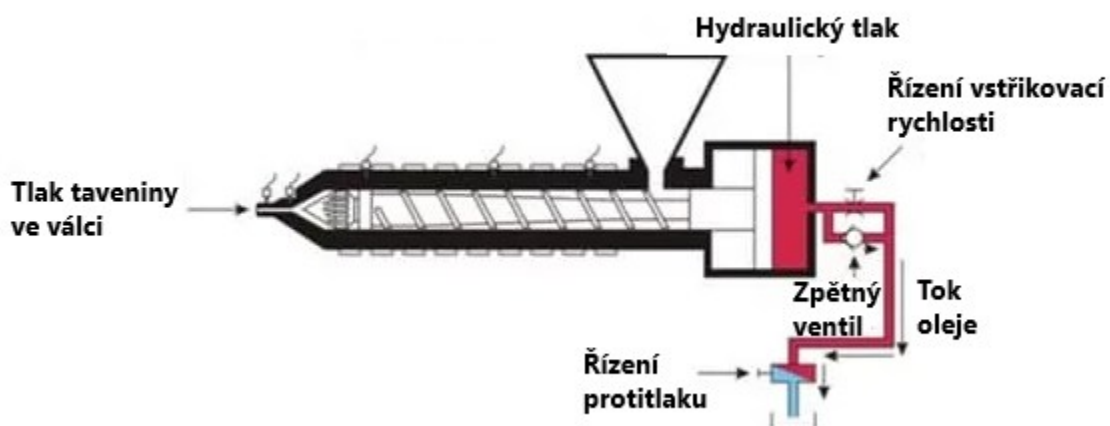
V prvním kroku je taven granulát přiváděn do komory plastikační jednotky. V tomto válci koná šnek otáčivý pohyb a posouvá materiál kupředu, směrem k trysce. Plastifikace neboli tavení je postupná přeměna granulátu na taveninu. Materiál je taven pomocí tepla vyvíjeného elektrickými topnými tělesy nacházejícími se na povrchu válce. Dalším zdrojem tepla je disipace, což znamená přeměna kinetické energie na tepelnou pomocí tření mezi materiálem samotným, tak mezi materiálem a členy plastikační komory.



Obr. 2 Příprava taveniny a faktory ovlivňující výsledný produkt [4]

Dokud je tryska plastikační jednotky u formy uzavřená, dochází k hromadění roztaveného materiálu v předkomoře, což má za následek zpětný tlak působící na šnek. Proti tomuto tlaku působí hydraulicky vyvíjený protitlak, který usměrňuje zpětný pohyb šneku. Objem taveniny potřebný pro zaplnění dutiny je během plastifikace měřen právě podle tlaku působícím na šnek, kde je systémem vyhodnocena z těchto dat optimální dávka. [3,4]

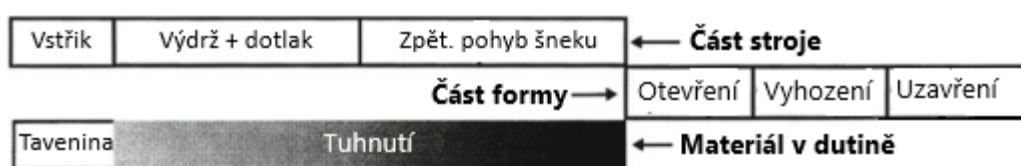
Protitlak



Obr. 3 Systém působení zpětného tlaku a protitlaku [8]

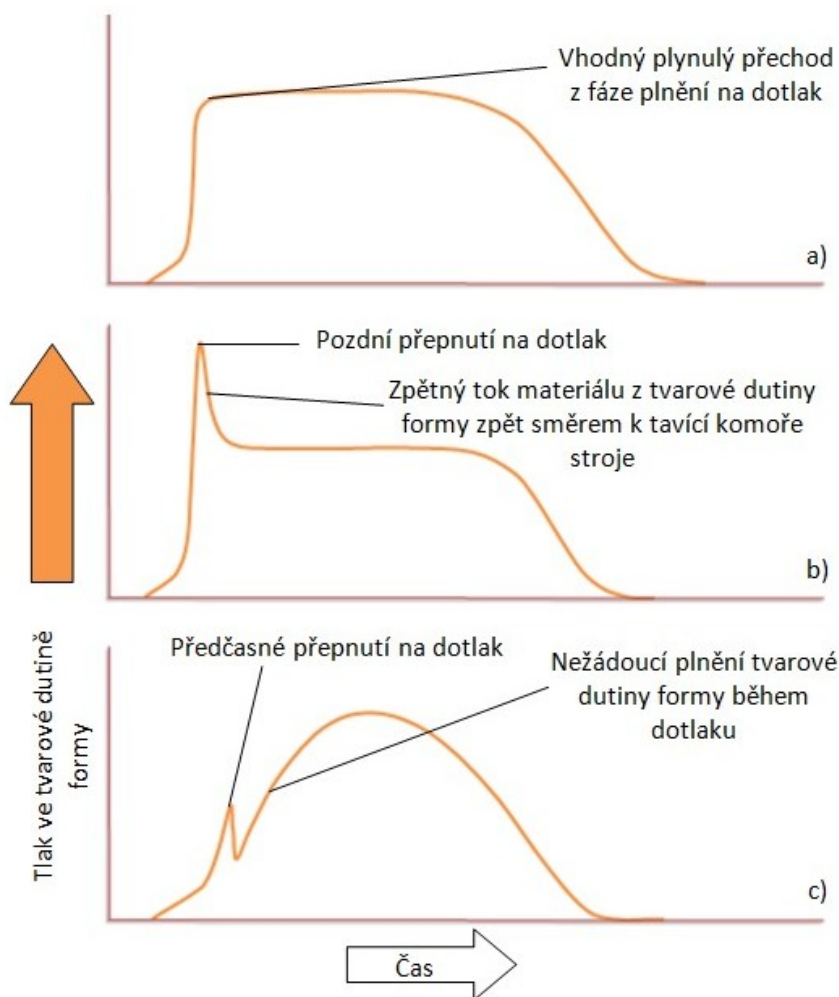
1.3.2 Vstřikovací a dotlaková fáze

Než dojde ke vstříknutí taveniny do dutiny formy, musí být forma nejprve uzavřena vysokou uzavírací silou. Vstřikovací jednotka je poté přesunuta směrem k formě do kontaktu s vtokovou vložkou formy. Tavenina je vstřikována do dutiny formy pomocí šneku již určenou vstřikovací rychlostí. Vstřikovací tlak při tomto procesu pozvolně narůstá. Vstřikovací rychlost a vstřikovací tlak jsou u většiny moderních strojů řízeny strojem, přičemž hodnota vstřikovacího tlaku je stanovena operátorem stroje. Tento tlak je ale pouze omezující tlak, nikoliv skutečný. Ten říká stroji, jakou hodnotu tlaku by neměl překročit. [3]



Obr. 4 Typická stádia vstřikovacího cyklu z hlediska stroje, formy a taveniny [4]

Proces vstřikování je u konce, kdy dojde ke kompletnímu zaplnění dutiny formy taveninou. Od tohoto okamžiku je tavenina tlačena pod udržovacím tlakem, kvůli kompenzaci smrštění při chlazení. Nesmí dojít k překročení uzavírací síly stroje, aby nevznikali nežádoucí přetoky, proto je tento udržovací tlak výrazně nižší než tlak vstřikovací. Přepnutí ze vstřikovacího tlaku na udržovací je obvykle dáno určitým bodem na trajektorii, po které se šnek pohybuje kupředu. Toto přepnutí musí proběhnout tak, aby v dutině formy během plnicí fáze nedošlo k výraznému poklesu nebo navýšení tlaku. To znamená, že na grafu znázorňující průběh vstřikovacího tlaku nesmí být ostrý přechod (tlaková špička), ale pozvolný náběh tlaku do maximální hodnoty, kde následně dojde k plynulému přepnutí na dotlakovou fázi. Tavenina je poté více izotropní a není vystavována nadměrnému vnitřnímu pnutí. Při předčasném přepnutí na dotlak je dutina z části plněna v dotlakové fázi, což způsobuje plnění nevhodnou rychlostí. Při pozdním přepnutí dojde k navýšení anizotropie a k růstu vnitřního napětí. Výsledný výstřik je tak vystavován možnosti defektu přetoky. [3,7]



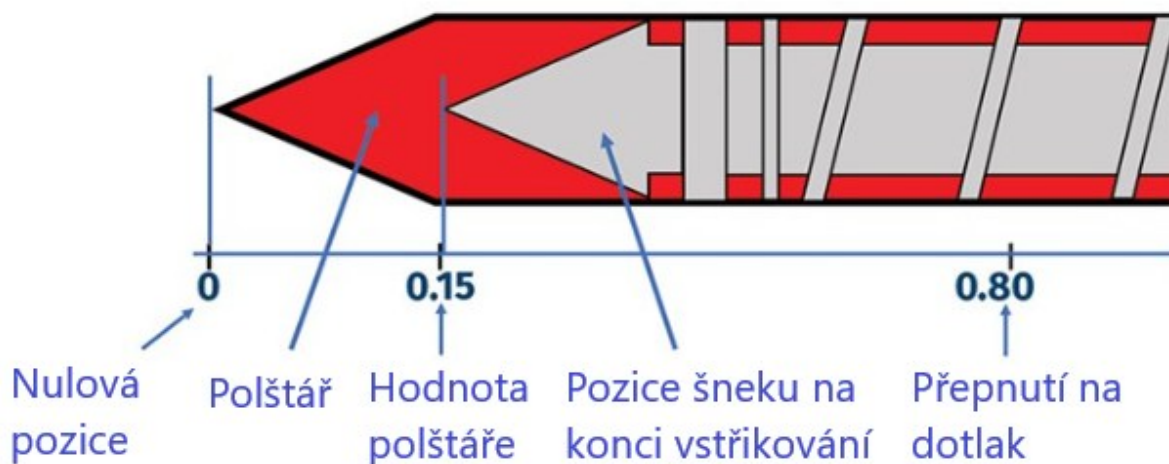
Obr. 5 Vliv přepnutí na dotlak na tlakovou křivku [6]

V konkrétních případech, kdy je požadováno pro zhotovení dílce neobvykle pomalé plnění, je možné využít předčasného přepnutí na dotlak. Rychlosti dosažené při vstřikovací (plnicí fázi) nemusí být dostatečně pomalé, přičemž dotlaková fáze je realizována většinou pomaleji, nežli je minimální rychlost vstřikovací fáze. Toto nízko-rychlostní plnění má pozitivní vliv na odvzdušnění dutiny, naopak má negativní vliv na zdůraznění studených spojení. [7]

Míra dotlaku a délka jeho průběhu má vliv na finální tvar a rozměry součásti a také na její hmotnost. Dotlaková fáze je určena časem, profilem a tlakovou úrovní dotlaku. Tato fáze může být dělena na intervaly, ve kterých se u každého můžou charakterizující hodnoty měnit. V ideálním případě správného nastavení dotlaku dojde ke kompletnímu zaplnění všech částí tvarové dutiny taveninou o stanovené hmotnosti. Při překročení některých z faktorů ovlivňujících kvalitu výstřiku dochází k přetokům v dělicí rovině a nadměrnému napětí uvnitř výstřiku. [7]

Vliv vstřikovacího tlaku a dotlaku je proměnný vzhledem ke vzdálenosti od vtokového ústí, kde s přibývajícím vzdáleností tlak klesá. Zejména u složitých tvarových prvků v dutině je důležité zabránit předčasnému tuhnutí taveniny. Správně zvolené rozměry vtokového ústí tak pomáhají dotlaku tyto místa zaplnit. Dalším nežádoucím jevem je zpětný tok taveniny do vtokového systému. To je řešeno tak, že je vtokové ústí umístěno do místa na výstřiku s největším objemem, tudíž zde dojde k tuhnutí taveniny jako poslední. Účelem dotlakové fáze je zamezit vzniku bublin a propadlin uvnitř výstřiku, ale také zajistit pohledové vlastnosti, kdy je tavenina tlačena na povrch formy, čímž přesně kopíruje strukturu povrchu dutiny. To zajistí požadovanou strukturu povrchu výstřiku, např.: lesklý povrch, matný povrch, drážky a dezén. [9]

Po ukončení dotlaku a ztuhnutí vtoku je v komoře plastikační jednotky určité množství zbylé taveniny před šnekem. Toto množství taveniny je označováno jako polštář. Ke kontrole nastavení vstřikovací a dotlakové fáze je možné porovnávat toto zbylé množství taveniny v rozmezí několika cyklů. Pokud se jeho hodnoty nevychylují z přijatelných mezí, lze tak konstatovat, že i nadále bude zajištěna opakovatelnost procesu s náležitými požadavky na kvalitu výstřiku. [7,9]



Obr. 6 Znázornění polštáře na konci vstřikovací a dotlakové fáze [9]

1.3.3 Fáze tuhnutí

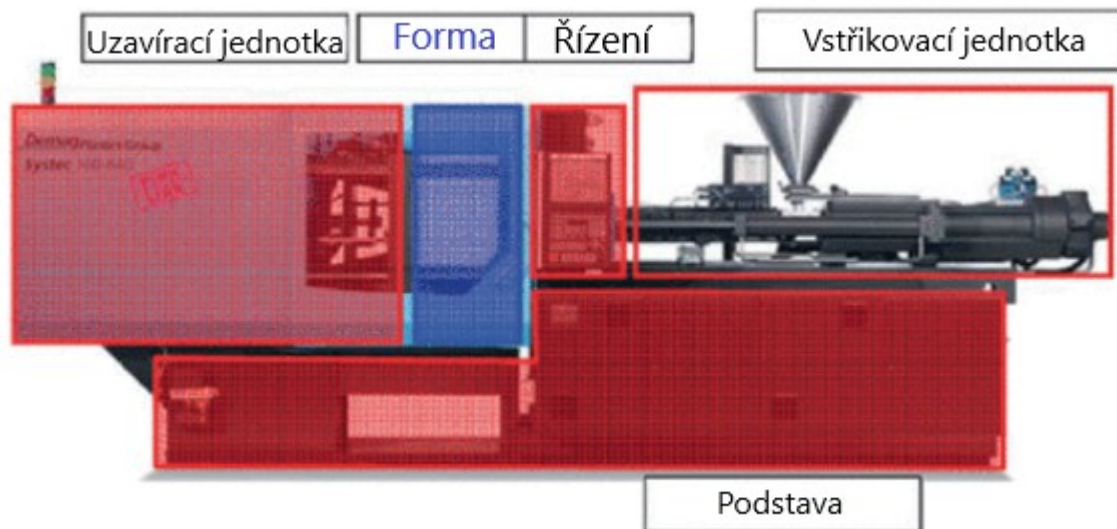
Jedna z primárních funkcí vstřikovací formy je chovat se jako výměník tepla. Teplo je dodáváno formou taveniny v cyklech. Výrazná část tohoto tepla musí být odváděna z dutiny formy, aby mohlo dojít k bezpečnému vyhození součásti. To je většinou zajištěno cirkulací teplotně regulovaného média, za účelem vyvážené teploty formy, vhodné pro chlazení

výstřiků. Tím, jak médium proudí temperačními kanály se postupně ohřívá a důsledkem toho odvádí teplo ze vstřikovaných dílců. [10]

Teplota a rychlost ochlazování má vliv na kvalitativní atributy daného výstřiku. Tím se myslí rozměrová a tvarová přesnost, kvalita povrchu, zbytkové napětí, pevnost, smrštění. Délka chlazení významně ovlivňuje ekonomickou efektivitu výroby dílce, jelikož z celého cyklu procesu vstřikování zpravidla představuje nejdelší část. Je potřeba dbát i na chlazení studeného vtoku, pokud je použit, kde jeho průřez může být větší než průřez samotného výstřiku. Tím by se čas chlazení dále prodlužoval. Vztah mezi tloušťkou (průřezem) daného místa na výstřiku a časem ochlazování není lineární. Čas potřebný pro ochlazení tlustších stěn a průřezů narůstá exponenciálně. Pro kvalitu vstřikovaného dílce by bylo ideální zvolit co nejdelší fáze ochlazování. To však není z ekonomického hlediska přípustné, proto se musí určit kompromis mezi těmito dvěma faktory. [7]

2 VSTŘIKOVACÍ STROJ

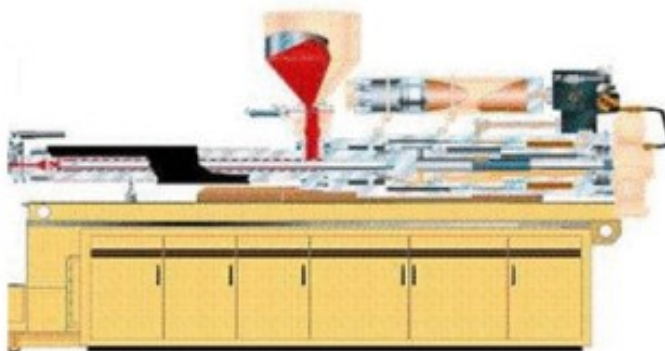
Specifikace a instrukce obsažené v manuálech daného vstřikovacího stroje dodávané výrobcem pomáhají určit, zda je stroj vhodný pro danou aplikaci a vyráběný dílec. Vstřikovací stroj se zpravidla dělí na dvě hlavní části, vstřikovací jednotka a uzavírací jednotka. Dalšími částmi jsou různé pohonné jednotky, řídicí systémy, doplňkové části. [11]



Obr. 7 Zobrazení částí vstřikovacího stroje [11]

2.1 Vstřikovací jednotka

Úkolem vstřikovací jednotky je připravit taveninu a dopravit ji do dutiny formy. [3]



Obr. 8 Vstřikovací jednotka [12]

Vstřikovací jednotka se skládá z následujících hlavních částí:

- Násypka
- Plastikační válec
- Šnek
- Zpětný ventil
- Špička šneku
- Tryska [12]

2.1.1 Funkce vstřikovací jednotky – příprava taveniny

Na začátku samotného procesu vyhřívání je třeba vyhřát válec na požadovanou teplotu. O to se postarají topné pásy na povrchu válce. Poté co je válec dostatečně nahřát i s granulátem (obvykle 30 min.), dojde k spuštění otáčivého pohybu šneku. Topné pásy zajišťují rozložení tepla po celém povrchu válce, aby nedošlo ke styku materiálu se studenými místy válce. Po dosažení potřebné teploty ve válce je teprve možné zahájit vstřikování. Teplo tvořené topnými tělesy tvoří zhruba 30 % celkového tepla. Zbylých 70 % tepla je tvořeno disipací. [12]

2.1.2 Funkce vstřikovací jednotky – doprava taveniny

Hydraulická jednotka a ventily zajišťují tlak a tok oleje nutný pro vstřikování taveniny. Nastavená hodnota vstřikovací rychlosti určuje a udržuje rychlost pohybu pístu směrem dopředu a zároveň zajišťuje potřebný tlak a průtok pro vtlačení taveniny. Aby bylo zajištěno, že nikdy nedojde k překročení bodu maximálního vstřikovacího tlaku, ventil je buď otevřen nebo přiškrcen podle odezvy získané lineárním snímačem na jakou rychlost je kladen požadavek. Důležitým faktorem jsou zde reologické vlastnosti polymerní taveniny, která je charakteristická svým ne-Newtonským chováním. S rostoucí vstřikovací rychlostí nebo prouděním klesá viskozita taveniny, což usnadňuje její tečení. [12]

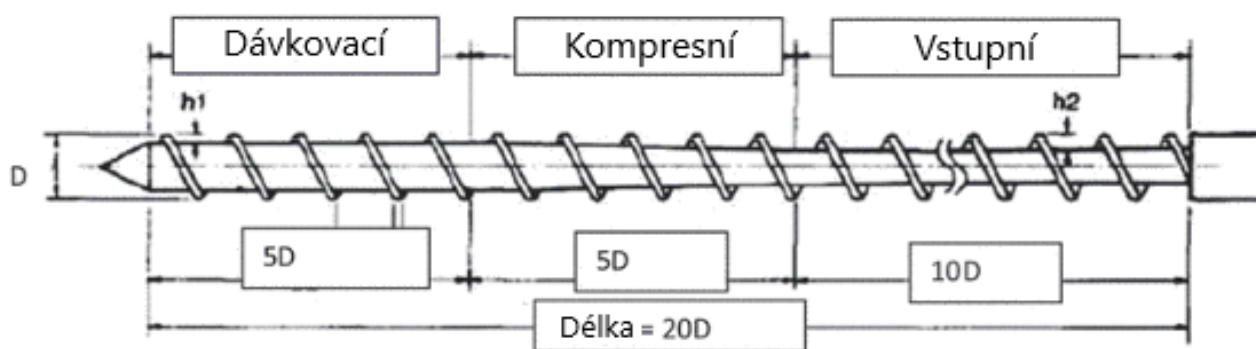
2.1.3 Funkce vstřikovací jednotky – tlakování taveniny

Tlak taveniny je tvořen pomocí zpětného ventilu. Ten tvoří těsnění uvnitř válce pomocí uzavíracího kroužku, kuličkovým ventilem na špičce šneku nebo ventilem typu poppet. Některé vstřikovací stroje používají pístový typ šneku, které mají ventily bez pohyblivých částí. [12]

2.1.4 Šnek

Šneky existují v mnoha provedeních a z různých materiálů. Axiální a rotační pohyb šneku má na starost: dopravu materiálu, ohřev materiálu, stlačení materiálu. [12]

Pásma šneku



Obr. 9 Schéma jednotlivých pásem šneku [11]

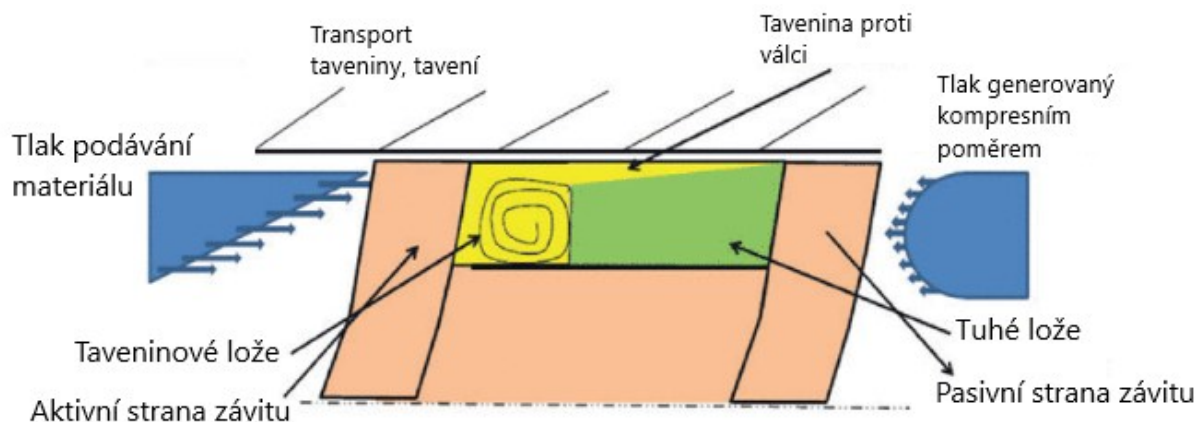
Vstupní pásma šneku se nachází přímo pod násypkou. Jeho úkolem je odebírat materiál od hrdla násypky a začít s jeho zhutněním ve válci. Již zde začíná proces stlačování granulátu a k jeho tření o povrch válce rotací šneku. Délka tohoto pásma může být různá v závislosti na zpracovávaném materiálu. Pro materiály citlivé na smykové napětí nebo materiály s nízkým bodem tavení jsou voleny delší vstupní pásma.

Kompresní pásma je charakteristické postupným zmenšením mezery mezi šnekem a válcem. Zde je materiál stlačen a vzrůstá tření se smykovým napětím, což dopomáhá procesu tavení. Toto pásma má majoritní vliv na ohřev materiálu. Přebytečný vzduch v materiálu je vytlačěn zpět do vstupního pásma.

Dávkovací pásma má nejmenší mezeru mezi šnekem a válcem. Dochází zde promíchání a homogenizaci taveniny. Materiál, který dosáhnul tohoto pásma, je již kompletně přeměněn na taveninu a je připraven na průchod zpětným ventilem před šnek. Tam je již připraven ke vstříknutí. Délka tohoto pásma se liší podle materiálu, kde u semi-krystalických polymerů je kratší než u amorfních. [11,12,18]

Princip dopravy taveniny ze vstupního pásma směrem k trysce je založen koeficientech tření materiálu mezi šnekem a válcem. Tření mezi granulátem a šnekem musí být menší než mezi granulátem a válcem. Pro porozumění tomuto dopravnímu efektu si lze představit šnek jako šroub a taveninu (granulát) jako matici. Při otočení šroubem nedojde k pohybu matice podél šroubu. Pokud však zabráníme otáčení matice, navýšením tření mezi taveninou a

válcem, dojde vlivem otáčení šneku k jejímu pohybu v ose šneku kupředu. Proto je důležité, aby šnek byl hladký, zatímco pro vyvinutí vysokého tření byl válec drsný. [11]



Obr. 10 Zobrazení taveniny a tuhého lože mezi závity šneku [11]

2.1.5 Válec a topná tělesa

Válec je vyroben ze zušlechtěné oceli. Z vnější strany je opatřen elektrickými topnými tělesy s příslušnými termočlánky. Topné tělesa lze nezávisle regulovat a tím vytvářet topná pásma různých teplot. Většina válců je uvnitř nitrídována do hloubky 0,4 až 0,5 mm pro snížení opotřebení. [11]

Termočlánky sloužící pro měření teploty jsou rozmístěny v mezerách mezi topnými pásy z důvodu spolehlivějšího měření. [12]



Obr. 11 Topná tělesa na povrchu válce s termočlánky [12]

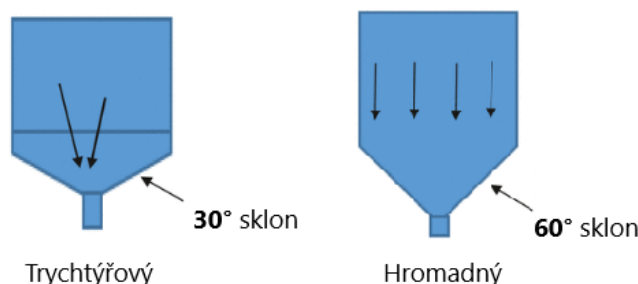
Topná tělesa nesmí mezi sebou být v přímém kontaktu, jelikož může dojít k přehřátí válce a snížení topné efektivity. [12]

Topné pásy musí mít zajištěn kvalitní kontakt s povrchem válce správným utažením a svou velikostí. Jestliže by pás nebyl dostatečně utažen, mohla by se mezi povrchem válce a pásem vytvořit vzduchová mezera. Topný článek by pak zaznamenal snížení teploty a došlo by ke kompenzaci ztráty topného účinku zvýšením dodané energie do pásu. Topný pás by byl touto energií nadměrně vyhříván, čímž by se snížila jeho životnost nebo by mohlo dojít k selhání. V místě vzniklé vzduchové mezery se vyskytují studená místa, která mají negativní vliv na taveninu uvnitř válce. [12]

Součástí válce je také plnicí hrdlo. Teplota v tomto místě je důležitá pro kvalitu granulátu. Zpravidla je ideální teplotou teplota použitá pro sušení materiálu. Při nízké teplotě může dojít k navlhnutí, při vysoké zas k natavování. Hrdlo také slouží jako odvětrávání prostoru válce. Zahříváním a stlačováním materiálu se z něj uvolňují těkavé látky a vzduch. Ty jsou vytlačovány směrem k hrdlu. Prostor hrdla nesmí být studený, aby nedocházelo k zatuhnutí těchto látek a blokování odvětrávaného vzduchu. To je převážně důležité pro kvalitu výstřiku, aby se v něm nenacházeli bublinky. [12]

2.1.6 Násypka

Funkcí násypky je zásobovat vstupní hrdlo válce kontinuální dodávkou materiálu bez přerušení. Násypky ve tvaru trychtýře jsou náchylné k nežádoucímu jevu, kdy materiál proudí středem trychtýře, což způsobuje usazování materiálu na jeho stranách. Problémem je to převážně u materiálů, které vyžadují sušení. Takto usazený materiál může být přesušen. Také tímto vlivem může docházet k nedostatečnému promíchání jednotlivých složek, což má za následek špatné barevné provedení nebo celkovou kvalitu výstřiku. Násypky s trychtýřovitým tokem mají úhel trychtýře 30° . Naopak násypky s hromadným tokem mající úhel trychtýře 60° . Pod tímto úhlem materiál proudí rovnoměrně a lépe se promíchává. Cílem je nemít žádná mrtvá místa, kde by se materiál hromadil a nebyl v pohybu. [12]

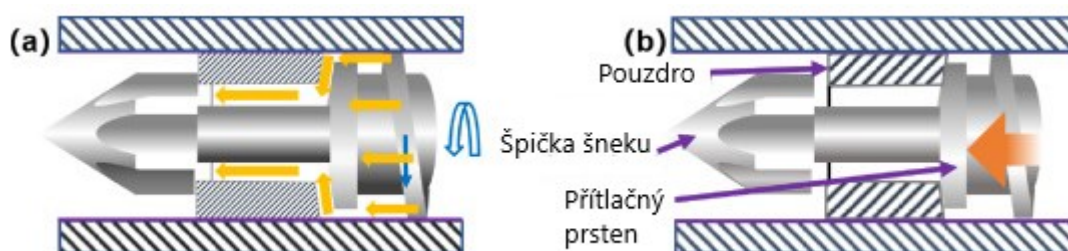


Obr. 12 Vliv sklonu trychtýře násypky na proudění materiálu [12]

2.1.7 Zpětný ventil

Zpětný ventil slouží k zamezení zpětnému proudění taveniny při vstřikovací fázi, kde zajišťuje generaci tlaku. Při plastikaci zase umožňuje tavenině proudit kupředu. Konstrukce ventilu by neměla obsahovat ostré hrany a přechody, kde by mohlo docházet k usazování taveniny. Existuje mnoho druhů zpětných ventilů, z nichž jsou nejrozšířenější následovné:

- Zpětný ventil s pouzdrem (nejrozšířenější, adaptivní přechod mezi materiály, vyhovující vlastnosti toku a těsnění)
 - Kuličkový ventil (odolný, pro úzkou škálu vstřikované hmoty, vhodný pro nízko-rychlostní vstřikování)
 - Ventil s volným proudem (pro plněné materiály, vysoko-rychlostní vstřikování)
- [12,13]



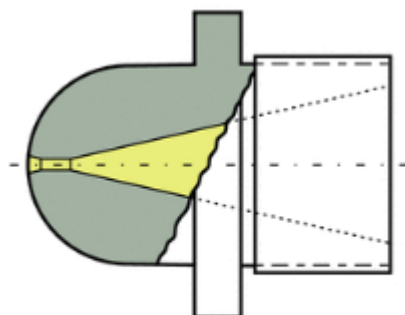
Obr. 13 Funkce zpětného ventilu s pouzdrem; a) při plastikaci, b) při vstřikování [13]

2.1.8 Tryska

Úkol trysky je směřovat taveninu z plastikačního válce do formy. Právě tato součást spojuje formy se vstřikovací jednotkou. Trysky jsou přímo našroubovány ve válcí, čímž se výrazně usnadňuje jejich montáž. Každá tryska má závit upravený právě na jeden typ stroje, kde bude používána. Tryska je poslední místo, kde je tavenina ještě vyhřívána topnými tělesy před vstupem do relativně studených kanálků formy. Regulace teploty v tomto místě musí být velmi přesná, aby nedošlo k tuhnutí nebo tepelné degradaci. Ústí trysky musí být dokonale hladké a jeho průměr musí být lehce menší než průměr ve vtokové vložce. Tryska může mít několik tvarů v místě kontaktu s formou. [11,14,15]

- Plochá tryska – není samo-středící, velké tepelné ztráty
- Kónická tryska – samo-středící, menší plocha kontaktu než u ploché,
- Sférická tryska – samo-středící, minimální plocha kontakt

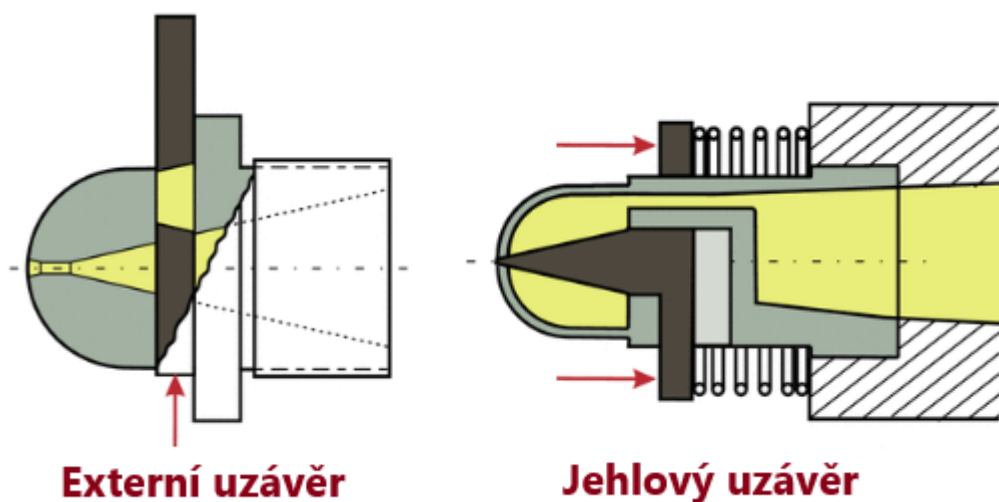
Trysky mohou být jednodílné nebo skládané z vícero dílů. Konstrukčně nejjednodušší je otevřená tryska. Pokud je to možné, tak je vždy nejvhodnější tento typ použít. Je to převážně kvůli faktu, že v ní nejsou místa, která by podporovala hromadění taveniny a následnou degradaci. Také minimalizuje tlakové ztráty. Nevýhodou je únik taveniny, jelikož je tryska permanentně otevřená. Úniky se vyskytují převážně u tavenin s nízkou viskozitou a také u cyklů, kde vstřikovací jednotka odjíždí od formy. [11,14,15]



Otevřená tryska

Obr. 14 Otevřená tryska [14]

Dále existuje mnoho typů trysek s uzavírací funkcí. To je především pro aplikace, kde je nutné, aby vstřikovací jednotka odjížděla od formy. Existuje spousta designů uzavíracích trysek, jako jsou:



Obr. 15 Typy uzavíracích trysek [14]

Externí uzávěr je ovládán pomocí externího. Jehlový uzávěr s pružinou otevírá trysku při dosednutí jehlového sedla na vtokovou vložku. Dále existují pružinové mechanismy

trysky, kde samotný tlak taveniny přetlačí pružinu a dojde k otevření. U všech designů je důležité monitorovat tlak v trysce, aby nedošlo přetlakování s katastrofickými následky. [15]

Dodatečně lze montovat do trysky filtrační prvky. Tyto filtry zadržují kontaminanty, jako jsou neroztavený granulát, kovové částice atd. Nastane navýšení tlaku, jelikož je potřeba většího tlaku pro protlačení taveniny mezi malými otvory ve filtru. Tyto otvory nebo drážky mohou být menších rozměrů než vtoková ústí formy. To chrání vtoková ústí před ucpáním. [14]



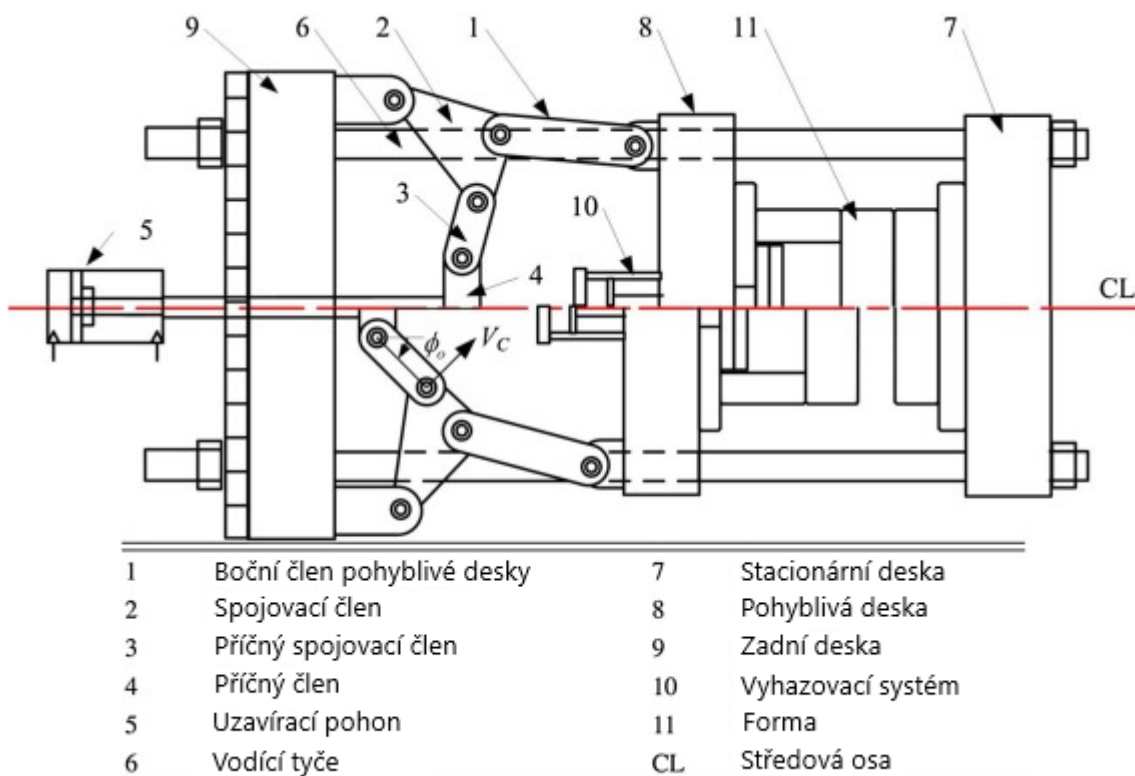
Obr. 16 Tryskové filtry [14]

2.2 Uzavírací jednotka

Uzavírací systém formy je jedním z nejdůležitějších částí vstřikovacího stroje. Slouží k uzavírání a otevírání vstřikovací formy. Přímě ovlivňuje výslednou kvalitu a rozměry vstřikovaného dílu. Uzavírací jednotka působí uzavírací silou na formu oproti silám vyvinutým vstřikovacím tlakem při procesu plnění dutiny formy. Síla, která uzavírá formu je udávána v tunách a je to tak zásadní parametr, že je podle něj často vstřikovací stroj označován. Systém uzavírání musí poskytnout co nejvíce rovnoběžné vedení a co nejpřesnější vycentrování protilehlých stran formy. Při špatném vedení je dělicí rovina nadměrně opotřebována v důsledku dotyku pouze v několika bodech. [3,16,18]

2.2.1 Mechanické uzavírací systémy

Tento typ systému využívá kloubového mechanismu. Podle polohy kloubového mechanismu má systém buďto rychlost nebo sílu. Využívá této vlastnosti vzhledem v jaké fázi se právě nachází. Při uzavírání je v takové poloze, kde je rychlost uzavírání vysoká. Před dovršením formy uzavírací rychlost výrazně poklesne, protože je mechanismus skoro plně natažen a navýší se uzavírací síla. Mechanismus je poháněn jedním menším hydraulickým válcem. Tento válec působí silou na střed mechanismu, ale samotný mechanismus přenáší sílu na okraje upínací desky stroje, čímž oslabuje střed desky. [3,12,16]



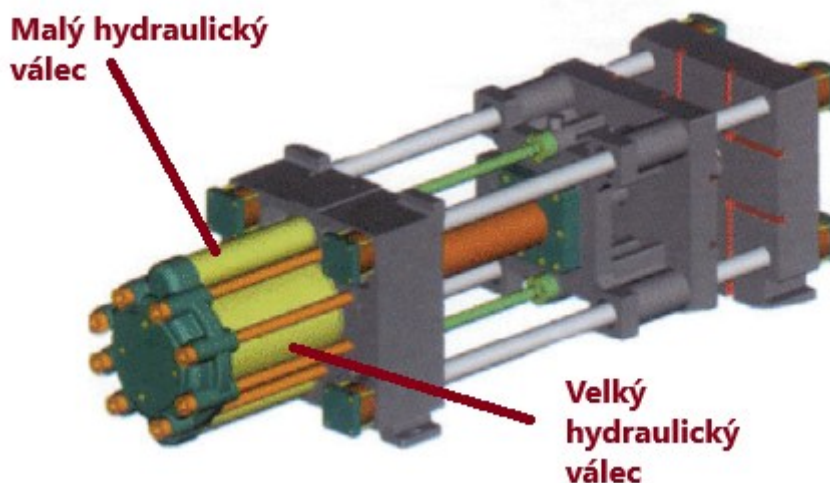
Obr. 17 Schéma mechanického 5-klobového uzavíracího systému [17]

Obrázek č. 17 ukazuje typický uzavírací systém mechanického kloubového mechanismu. Horní polovina nad středovou osou CL zobrazuje fázi uzavření formy s plně propnutým mechanismem. V dolní polovině pod středovou osou CL je mechanismus v otevřené poloze. Když se příčný člen vysune do své maximální pozice, dojde k propnutí bočních a spojovacích členů, což způsobuje natahování vodících tyčí a tím je generována uzavírací síla. Uzavírací síla je udávána mírou protažení mechanismu od prvního kontaktu obou polovin formy do úplného propnutí mechanismu. Je tedy nutné správně upravit pozici zadní desky, aby byla zajištěna požadovaná uzavírací síla. [17]

2.2.2 Hydraulické uzavírací systémy

Hydraulické uzavírací jednotky jsou poháněny systémem pístů. Většinou se o uzavírání a otevírání postará dvojice malých pístů, které vykonávají rychlý přísun a odsun upínací desky stroje. Pro generaci uzavírací síly při konečné fázi uzavírání je použit mnohem větší píst, který vykonává pohyb jen ve vzdálenosti pár milimetrů. Tento dvoudílný systém poskytuje dobrou úroveň ochrany formy. Při nezdařeném odformování výstřiku, kdy zůstal v jedné polovině formy nebo jen částečně, není možné pro malé písty formu uzavřít vzhledem

k jejich malé uzavírací síle. Tyto písty tak detekují závadu a předejde se tak poškození formy rozdrcením výstřiku velkým pístem. [3,11]

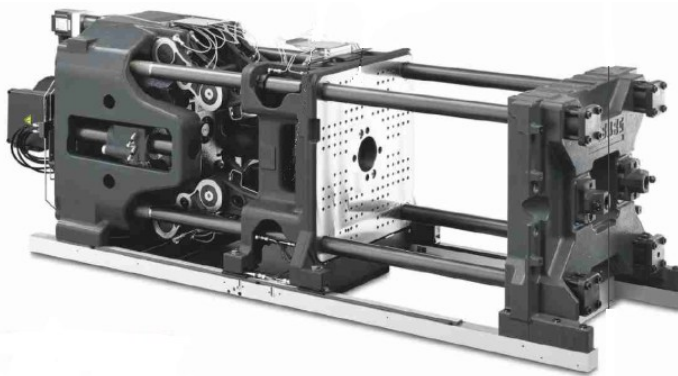


Obr. 18 Hydraulický uzavírací systém [11]

Výhodou hydraulických uzavíracích jednotek je jednoduché seřízení uzavírání a uzavírací síly. Jsou tedy vhodné pro přecházení mezi jednotlivými formami odlišných rozměrů. Používají se pro přesnější výrobky. Oproti mechanickým kloubovým systémům se u nich nevyskytuje risk deformace vodících tyčí a formy vlivem neoptimálního seřízení. Avšak jsou energeticky náročnější a jejich uzavírací cyklus je delší. [20]

2.2.3 Elektrické uzavírací systémy

Existují vstřikovací stroje, které jsou plně elektrické. Jejich uzavírací jednotka většinou využívá mechanického kloubového mechanismu poháněného elektrickým servomotorem. Jsou dražší než předešlé dva typy a nejsou tak obvyklé. Mezi výhody těchto jednotek patří snadné nastavení uzavírací pozice, regulace uzavírací síly, rychlost uzavírání, energetická efektivita, přesnost a nízká hlučnost. [21,22]



Obr. 19 Elektrická uzavírací jednotka s kloubovým mechanismem [21]

2.2.4 Stroje bez vodících tyčí

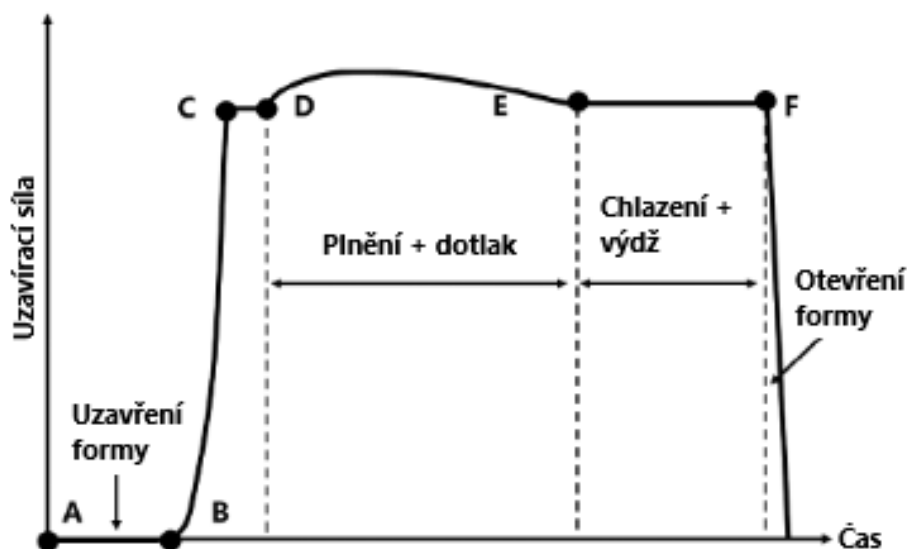
Tyto systémy nemají vodící tyče. Místo toho se pohyblivá deska posouvá po lineárních kolejnicích v rámu stroje. Desky těchto strojů jsou tužší, aby zabránily ztrátě tlaku. Nevýhodou tohoto řešení je použití pouze nižších tonáží uzavírací síly. Výhodou je, že prostor pro upevnění formy není limitován vodícími sloupy a je tím pádem možné vstříkovat na rozměrnějších formách. [12]

2.2.5 Uzavírací síla

Uzavírací síla má výrazný vliv na kvalitu výstřiku, převážně pak u tenkostěnných součástí. Příliš nízká uzavírací síla může způsobovat přetoky, příliš vysoká pak zabraňuje optimálnímu odvětrávání dutiny formy, což má za následek její špatné plnění, vznik studených spojů a spálenin. Obecně se dá síla odhadnout z celkové plochy dutiny a vtokového systému v rovině kolmé na osu působení uzavírací síly násobenou předpokládaným tlakem v dutině. Jde o hrubý odhad, a proto se v praxi často používá maximální hodnota daného stroje. Tím je ale stroj nadměrně zatěžován. To se projeví nedostatky na výstřiku, zvýšenou spotřebou energie a úbytkem na životnosti formy. Vyvíjená síla může být monitorována pomocí tenzometrického senzoru umístěného na vodících tyčích stroje. [23]

Průběh uzavírací síly je znázorněn na obr. 20. Tento graf je obdobný jak pro hydraulické, tak elektrické jednotky. Mezi body A a B je forma uzavírána jednotkou. Síla zde není žádná, jelikož poloviny formy se k sobě teprve přibližují. Ke kompletnímu uzavření formy dojde v bodě D, kde je daná hodnota síly považována za počáteční. Následuje fáze plnění a dotlaku. V této fázi dochází k výraznému nárůstu uzavírací síly až po její maximální hodnotu. Síla není konstantní, jelikož plní funkci protitlaku proti tlaku v dutině vzniklém

vstřikováním a dotlakem. Udrží tak formu neustále uzavřenou při této fázi. Uzavírací síla v průběhu této fáze může kolísat mezi jednotlivými cykly vlivem teploty a viskozity taveniny. Tavenina je dotlačena do dutiny pro kompenzaci smrštění a zajištění dokonalého vyplnění dutiny, dokud neztuhnou vtoky a tavenina dále nemůže proudit do dutiny. V bodě E dojde k ztuhnutí taveniny a uzavírací síla nabírá ustáleného průběhu. Chladicí fáze je ukončena v bodě F, který představuje konečnou uzavírací sílu. [24]



Obr. 20 Graf průběhu uzavírací síly [24]

2.3 Temperační zařízení

Temperace patří k nejdůležitějším aspektům vstřikovacího procesu, kdy přímo ovlivňuje kvalitu, rozměrovou stabilitu, povrch výstřiku a efektivitu procesu jako takového. Fáze chlazení (tuhnutí) zabírá nejvíce času ze vstřikovacího cyklu, zpravidla 60-70 %. Čas chladicí fáze je potřeba minimalizovat pro co největší efektivitu výroby. Pro dosažení tohoto cíle je potřeba správně určit dva parametry: metodu chlazení a systém chlazení. [25,27]

2.3.1 Systém chlazení vzduchem

Systém vzduchového chlazení zahrnuje výparník, který odvádí teplo od vstřikovacího systému. Teplo z výparníku je odváděno vzduchem chlazeným kondenzátorem. V systému jsou zařazeny dva ventilátory. Jeden přivádí studený vzduch k formě, druhý odsává teplý vzduch od formy. Tento způsob chlazení je vhodný pro jednoduché formy a materiály s nízkou senzitivitou na kolísavé teploty. Přestože jde o nízko-nákladový a lehce zařaditelný

způsob chlazení, jeho nevýhodou je nízká efektivita odvádění tepla a absence možnosti přesně kontrolovat teplotu formy. [25,26]

2.3.2 Systém chlazení vodou

Princip vodního chlazení spočívá v cirkulaci vody v kanálcích formy. Nejedná se o čistou vodu, ale o médium většinou složeného z vody a ethylen glykolu. Voda absorbuje teplo formy a odvádí jej mimo formu, kde je opět ochlazená. Voda může v okruhu proudit dvěma způsoby, laminárně a turbulentně. Laminární proudění má směr proudění v přímém směru. Voda ve středu proudu se tedy nedostane ke kontaktu s povrchem kanálku. Naopak u turbulentního proudění se větší část vody dostane na stěnu kanálku a tím je zvýšena jeho účinnost odvodu tepla. [25,27]

2.3.3 Výměníky tepla a chladiče

Tyto zařízení se starají o chlazení cirkulujícího média. Teplo přivedené z formy chladícím médiem je v nich efektivně odváděno a médium tak má opět požadovanou vstupní teplotu. [27]

3 POLYMERY

Průmyslové plasty jsou polymerní materiály, složené z velmi velkých molekul z opakujících se chemických struktur vázanými chemickými kovalentními vazbami. Většina polymerů je na bázi uhlíku a vodíku. Jejich syntéza a chemická struktura spadá pod organickou chemii. K porozumění polymerním materiálům je potřeba znát jejich chemickou strukturu a chování velmi velkých molekul. Malé molekuly, které tvoří základ těchto velkých molekul se nazývají monomery. Opakovaná část polymeru většinou odpovídá monomeru, ze kterého byl polymer vytvořen. Například polyvinylchlorid byl vytvořen z monomeru vinylchloridu. Existují však i výjimky. Velikost polymerní molekuly je určena její hmotností nebo počtem opakujících se jednotek, označovaným jako stupeň polymerace. Relativní molární hmotnost je tedy součin stupně polymerace a relativní molární hmotnosti opakující se jednotky. Molekuly polymerů jsou kromě primárních valenčních sil také ovlivňovány sekundárními mezimolekulárními silami. Mezi ně se řadí dipólové síly a disperzní síly. Silné dipóly spojené s atomy vodíku, které jsou navázány na elektronegativní prvky typu kyslík, tvoří vodíkové vazby. Tyto síly v některých typech polymerů (např. proteinů) fixují orientaci molekuly, což je nezbytné pro plnění jejich funkce u biochemických procesů. [28,29]

Polymery lze klasifikovat dvěma způsoby. První způsob je dělení podle jejich reakce na tepelné zpracování na termoplasty a reaktoplasty. Termoplasty se při zahřívání taví a při ochlazení tuhnou. Reaktoplasty se při vysokých teplotách nevratně rozkládají. Toto dělení je vhodné, jelikož mezi těmito skupinami existuje významný chemický rozdíl. Termoplasty jsou většinou tvořeny lineárními nebo lehce rozvětvenými řetězci, zatím co reaktoplasty tvoří rozsáhlé trojrozměrné zesítení s pevnými kovalentními vazbami mezi molekulami.

Druhým způsobem rozdělení polymerů je povaha chemické reakce při polymeraci. Hlavní dva typy jsou aditivní polymery a kondenzační polymery. Kondenzační polymery vznikají z monomerů při ztrátě malé molekuly, kterou je obvykle voda. Aditivní vznikají adicí nenasyčeného monomeru. [28,29]

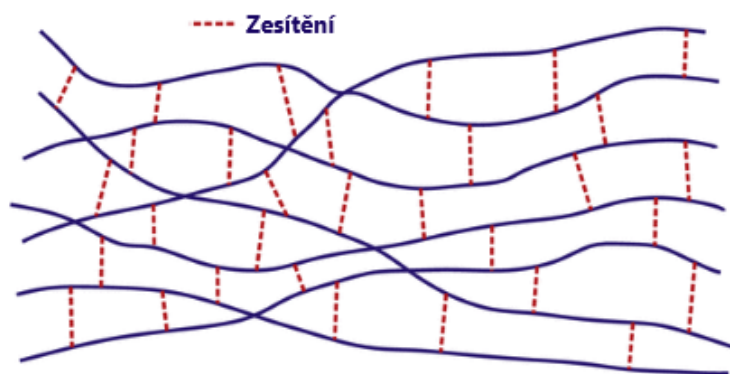
3.1 Termoplasty

Termoplasty jsou materiály s velmi dlouhými řetězci drženými pohromadě relativně slabými van der Waalsovými silami. Jak je termoplastický materiál zahříván, mezimolekulární síly slábnou a tím začíná být měkký a poddajný. Nakonec se z něj při vysokých teplotách stane viskózní tavenina. Při ochlazení pak materiál opět ztuhne. Cyklus tavení a tuhnutí se může víceméně opakovat nekonečně. To představuje velkou výhodu, jelikož je to základní princip

zpracovatelských technologií pro tyto materiály. Tato vlastnost však také znamená, že atributy těchto materiálů jsou citlivé na teplotu. Vlastnosti termoplastů jsou silně závislé na délce jednotlivých polymerních řetězců a přítomnosti postranních větví. Délky řetězců jsou obvykle měřeny pomocí molekulové hmotnosti a její distribuce. Během procesu polymerace je možné upravit délky rostoucích řetězců a podpořit vznik postranních větví. To umožňuje, aby materiály se stejným chemickým složením měly různé molekulární uspořádání, což vede k odlišným vlastnostem. Tento jev je známý jako isomerismus. Příkladem takového materiálu je třeba nízko-hustotní polyethylen a vysoko-hustotní polyethylen. Další důležité rozdělení je podle jejich struktury. Ta může být uspořádaná semi-krystalická nebo náhodná amorfnní. Semi-krystalická z toho důvodu, že není možné dosáhnout zcela uspořádané struktury a vždy se v ní bude nacházet oblast s nahodilým uspořádáním. Druh struktury má vliv na její mechanické a fyzikální vlastnosti. Obecně platí, že polymery, které krystalizují mají větší hustotu kvůli těsnějšímu uspořádání molekul. [14,29]

3.2 Reaktoplasty

Tento druh polymerů je produktem dvoustupňové chemické reakce. První fáze produkuje dlouhé molekulové řetězce podobné těm u termoplastů, které však mohou dále reagovat. Druhá fáze se nazývá „zesítování“. K tomu dochází při působení tepla, tlaku nebo v ojedinělých případech i UV světla. Finální výrobek je pevný a má hustou síťovou strukturu. Dlouhé molekulární řetězce jsou propleteny a mají mezi sebou silné vazby. Materiál již nemůže být změkčen nebo roztaven do původní formy pomocí tepla. Při nadměrném zahřívání u nich dojde k degradaci a spáleninám. Vzhledem k jejich silné síťové struktuře jsou tyto materiály většinou pevné a jejich mechanické vlastnosti nejsou tak citlivé na teplotu. [14]

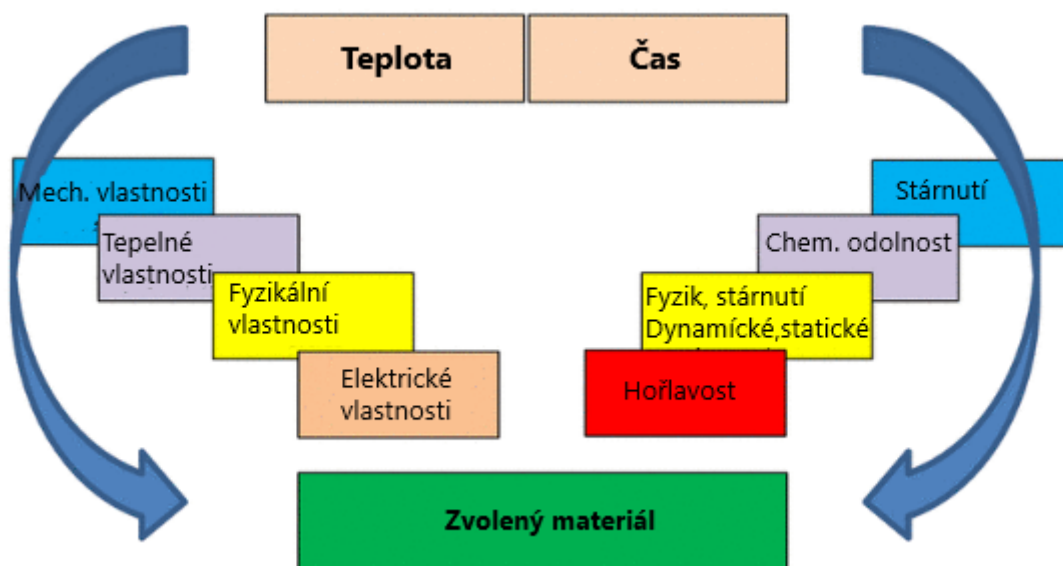


Obr. 21 Zesítovaná struktura typického reaktoplastu [14]

3.3 Volba vhodného polymeru

Plasty stejně jako kterýkoliv konstrukční materiál poskytují širokou škálu vlastností, které je potřeba brát v úvahu při konstrukci dílu. Není však zaručeno, že bude existovat plast s vlastnostmi dokonale vyhovujícími dané aplikaci. Při návrhu je tedy důležité mít povědomí o různých polymerních materiálech a jejich attributech. Jednou z nejběžnějších chyb v návrhu je nechat se vést předem vytvořenými názory. Dobrý design součásti vždy spočívá ve zvážení všech dostupných materiálů včetně těch nepolymerních. [14]

Studie ukazují, že zhruba 60 % selhání součástí z plastu je následkem špatně zvoleného materiálu. To je důkazem obtížnosti výběru specifického polymerního materiálu v závislosti na široké spektrum požadavků na danou součást. [14]



Obr. 22 Schéma procesu volby vhodného materiálu [14]

Kromě obecných faktorů návrhů musí plastové součásti splňovat i specifické požadavky:

- Geometrie součásti
- Technické požadavky
- Požadavky na estetiku a senzorické vlastnosti
- Ekonomické požadavky
- Zdravotní, bezpečnostní a enviromentální faktory

Proces výběru materiálu je u většiny konstruktérů zahájen studiem technických listů polymerních materiálů poskytnutými dodavateli. Častým důsledkem špatného výběru materiálu je právě nesprávná interpretace těchto dat. Význam těchto dokumentů spočívá především v poskytnutí prvotních dat pro následné porovnání nebo vyřazení materiálu. Tyto dokumenty však neslouží jako soubor dat pro finální konstrukční řešení, jelikož data v nich obsažená mají původ v krátkodobých testech, což neudává přesný charakter chování materiálu v dlouhodobém časovém horizontu. Například hodnota závislosti napětí na deformaci nedokáže podrobně popsat chování materiálu v širším spektru podmínek. Pro přesnější pochopení dat udávaných v materiálových listech je potřebné, aby konstruktér chápal principy těchto zkoušek a bral je na vědomí. Volba materiálu by neměla být vždy primárně závislá na ceně. Materiál by měl být volen systematicky a brát potaz na všechny definované parametry součásti. Například zvolení dražšího materiálu, ale zúžení tloušťky stěny součásti, kdy bude naplno využitý poměr mezi tuhostí a hmotností. Pro tyto případy existuje mnoho simulačních počítačových programů. [31]

4 ENVIROMENTÁLNÍ A EKONOMICKÉ ASPEKTY

Dopad industrializovaných zemí na prostředí světa je tématem rostoucích obav. Spotřeba různých surových materiálů stále roste a je spjatá s širokou škálou znečišťování. Plasty jsou významná část tohoto znečištění. Jejich petrochemický původ a také používané energie při jejich výrobě značně přispívají k tomuto faktu. Avšak využití polymerů v tomto světě je velmi významné. Běžně se používají v každodenním životě například v zemědělství, obalových materiálech, kuchyňských potřebách, solárních článcích, ve všech druhů elektrických zařízení, ale také mají své místo ve vesmírném vývoji nebo v oblasti čištění vody, kde fungují jako absorbenty těžkých kovů a toxinů. V automobilovém průmyslu přináší svou nízkou hmotností snižování spotřeby vozidel. Při údajném snížení hmotnosti vozidla o 10 % je jeho spotřeba snížena o 5–7 %. [29,30]

4.1 Dopad polymerů na životní prostředí

Znečišťování životního prostředí je definováno jako zavádění látek člověkem do okolního prostředí, přičemž tyto látky mají negativní dopad na lidské zdraví, poškozují přírodní zdroje a ekologické systémy, narušují struktury nebo vlastnosti prostředí a brání jejich legitimnímu využití. Pod touto definicí je zahrnuto použití polymerů jako vstupních surovin (např. granulátu), až po finální výrobky na konci své fáze využití. Plastové částice se nachází po celém světě. Často právě na plážích a pobřežích v hustě obydlených oblastech. Současně nadále roste i jejich výskyt na otevřených mořích. To je důsledkem ztrát během přepravy, kde je tento odpad ve formě průmyslově nezpracovaných formách. Místní živočichové výrazně trpí přítomností tohoto odpadu, kde si můžou pomýlit plastové částice s potravou, což má pro jejich organismus fatální následky. Vyplavený plastový odpad také snižuje atraktivitu pobřežních rekreačních oblastí. K polymerům se často přistupuje tak, jako by byly snadno likvidovatelné. Avšak polymery se vyznačují svojí vysokou stabilitou dlouhou dobou rozkladu. To je převážně problémem u jednorázových obalů. S plastovým odpadem se většinou nakládá dvěma způsoby, skladováním nebo spalováním. Ne všechny plasty je možné spalovat, jelikož se z nich uvolňují toxické látky do ovzduší. Skládky byly hojně využívány městy jako možnost nakládání s odpadem. Princip skládky je jednoduše odpad zahrabat do země. Tento způsob však není udržitelný, jelikož místa k uložení odpadu postupně ubývá. Přibývají právní restrikce pro tvoření těchto skládek kvůli obavám ze znečištění půdy. Dále také samotné státy omezují tvorbu skládek vzhledem k jejich závazkům pro snížení pevného odpadu. [29,30,32]

Skládky také přispívají k znečišťování ovzduší, i když u plastů není obvyklý výskyt biologicky rozložitelného uhlíku, který by dále produkoval skleníkové plyny (metan), tak k produkci dochází samotným transportem a manipulací na skládku. Avšak v současnosti existují také rozkladatelné plasty používané především pro obalový materiál. Ty jsou schopné se během relativně krátké doby rozložit na minimum odpadu, jenže při procesu rozkladu produkují skleníkové plyny. To je zapříčiněno tím, že na jejich rozkladu se podílí zpočátku bakterie a následně se rozkládají fermentací na plyny a organické substráty. Bakterie přetváří produkty fermentace na bioplyn obsahující oxid uhličitý a metan. Prozatím má tento jev minimální podíl na celkové produkci skleníkových plynů, avšak v budoucnu by mohl představovat větší problém. [32,33]

4.2 Spalování plastového odpadu (Waste-to-Energy)

Zhruba 16,4 % plastového odpadu je spalováno za využitím jeho energie. Spalovací zařízení spalují odpad včetně plastového odpadu pro výrobu elektřiny. Spalování vede k ekologicky významnému snížení plastového odpadu. Z odpadu zbude relativně bezpečný popel, jehož hmotnost tvoří 25 % původní hmotnosti a objem 10 % původního objemu. Zejména redukce objemu má velký význam vzhledem k tomu, že místa pro skladování odpadu není nekonečné. V porovnání se skládkou spalovací zařízení zpracuje za svou třicetiletou životnost 30 mega tun odpadu na 10 hektarů plochy. Skládka by pro stejný objem odpadu potřebovala plochu o rozloze 300 hektarů. Vytváření popela však také není ideální řešení. Doposud jeho vliv na životní prostředí není zcela známý. Zároveň jde také o zneškodňování cenných zdrojů jako je ropa potřebná pro výrobu plastu. Dalším negativním faktorem je hluk z provozu spaloven, ale také hluk způsobený přepravou a manipulací s odpadem. Absolutně nejzávažnějším problémem spalování je jednoznačně produkce emisí CO₂. Plasty jsou totiž vyráběny z fosilních paliv a jejich spalování je tedy považováno za antropogenní zdroj uhlíkových emisí. Spalovny sice vyrábí elektřinu jako ostatní druhy tepelných elektráren, jejich negativní dopad na životní prostředí je však ze všech největší. [33,34,35]

4.3 Recyklace plastového odpadu

Obnova a opětovné použití syntetických polymerů je zdaleka nepříjemnější způsob vypořádání se s odpadem. Výrobky se jen zřídka dají opětovně použít, ale polymer, ze kterého jsou vyrobeny ano. Při recyklaci u nich nedochází k významnému poklesu kvality jejich vlastností. Aktuální problém s recyklací je převážně ekonomičnost. Recyklace není

ekonomicky výhodná pro běžné spotřební polymery. To je zapříčiněno tím, že předností těchto polymerů je jednoduchost výroby a její nízké náklady. [29]

4.3.1 Výzvy a limity spojené s recyklací polymerů

Jedním z problémů recyklace je smíšení mnoha druhů polymerů v daném odpadu. Směsné plasty mají výrazně špatné mechanické vlastnosti vzhledem k jejich slabé mezifázové adhezi. Při jejich míchání má směs různých polymerů nízkou entropii a nedochází tak k požadovanému propojení. Při procesu tavení dochází k jejich vrstvení vlivem oddělení fází. Propojení mezi fázemi není dostatečně soudržné, tudíž i výsledný materiál je mechanicky nedostačující. Z tohoto důvodu jsou směsné polymerní směsi používány jen zřídka. Recyklační průmysl se raději věnuje postindustriálnímu odpadu, jako jsou například vtokové systémy, kde jsou největší finanční přínosy. Materiál vtoků je celistvý, relativně nový a jeho složení je dohledatelné. Postkonsumní recyklace se také zabývá těmi nejjednodušeji identifikovatelnými polymery ve velkém množství. Polymery se často využívají jako obalový materiál. To může představovat problém z hlediska recyklace, především pokud se jedná o obaly potravin nebo jiných látek, které je kontaminují. Materiál také po recyklaci nemusí vyhovovat jeho původní aplikaci, a tudíž je sice znovu použit, ale pro jiný účel s nižšími kvalitativními požadavky. Tomuto procesu se říká downcycling. Recyklované materiály jsou všeobecně vnímány jako méně kvalitní, což ovlivňuje jejich poptávku. [18,29,36]

5 INOVACE A TRENDY VE VSTŘIKOVÁNÍ POLYMERŮ

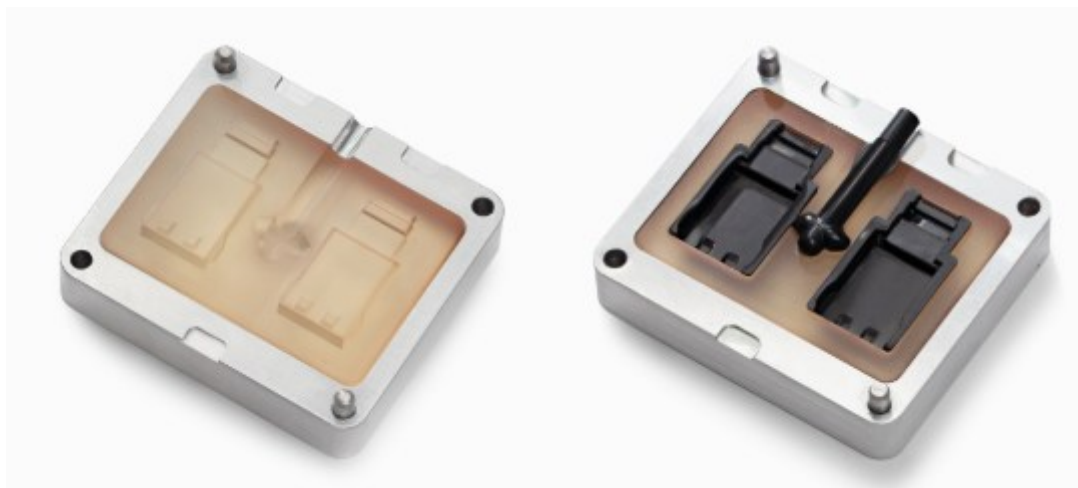
Moderní technologie nebo procesy ve vstřikování zvyšují jeho efektivitu, kvalitu, nebo umožňují vyrábět nové typy polymerních výrobků.

5.1 Prototypová výroba vstřikovacích forem

Počátečním faktorem před zahájením výroby pro kvalitní a odpovídající výstřik jsou zkušenosti daných pracovníků a analýzy v simulačních programech. To ovšem někdy nebývá dostačující a je potřeba ověřit daný design fyzicky, především v případech implementace inovací nebo u složitých designů. Pro prototypovou formu platí, že by se měla co nejvíce podobat té sériové ve smyslu použitých materiálů, stejných vtokových systémů a vyhazovacích systémů, temperací a celkovou konstrukcí. Jedná se o zjednodušené formy pro velmi malé série. Zjednodušení se na formě projeví například výměnou hydraulických nebo pneumatických, či tvarově ovládaných tvarových čelistí za jednoduché tvarové vložky, které jsou ručně odnímatelné pracovníkem. Také lze třeba vyměnit prvky vyhazovacího systému, jako jsou vyhazovací jádra, za jednoduché tvarové vložky, které zůstávají po odformování ve výstřiku a jsou pak vyjmuty manuálně a opětovně zasazeny do tvarové dutiny. Často se v prototypové výrobě využívá univerzálních rámců forem, do kterých se následně vkládají tvarové vložky. Používají se lehce obrobitelné materiály jako jsou slitiny hliníku a oceli bez zušlechtní. [7,37,38]

5.1.1 Význam 3D tisku v prototypové výrobě forem

Při dostupnosti profesionálních 3D tiskáren, teplotně odolných materiálů pro tisk a vstřikovacích strojů je možné přímo ve firmě zhotovit prototypovou formu pro malou sérii výrobků. 3D tisk výrazně zkracuje výrobu formy a snižuje její cenu. Velmi významnou výhodou 3D tisku pro prototypovou výrobu je možnost jednoduché modifikace formy, což umožňuje testování různých konfigurací při nízkých nákladech. Nejčastěji se pomocí 3D tisku vyrábí tvarové vložky, které jsou obvykle tvarově složité a jejich povrch musí mít požadovanou kvalitu. Právě tam nejvíce vynikají výhody 3D tištění oproti běžnému obrábění tvarových vložek, které je časově i finančně náročné. Tyto vložky jsou pak vkládány do univerzálních rámců z hliníkových slitin. Nejvhodnější aditivní technologie pro tyto aplikace jsou stereolitografický tisk (SLA) a tryskání materiálu (material jetting). [39,40]



Obr. 23 3D tištěná tvarová vložka v hliníkovém rámu [39]

5.2 Mikro-vstřikování

Mikro vstřikování je vysoce specializovaná forma vstřikování zaměřená na extrémně malé komponenty. Tolerance tvarové dutiny se pohybují v rámci mikronů, ale také pod úrovní mikronu. Za mikro-vstřikovanou součást lze považovat výstřik pod hmotností jednoho gramu a s rozměry v rámci několika milimetrů. Používají se speciální vstřikovací stroje schopné připravit malé dávky taveniny. Nastavení vstřikované dávky je velmi přesné, konkrétně lze regulovat dávku ve frakcích jednoho gramu. Výroba forem je realizována pomocí precizních CNC strojů a technologiemi elektro-erozivního obrábění. Využívá se především vysoko-výkonnostních polymerů. Mikro-vstřikování dodává součásti pro automobilový, lékařský a elektronický průmysl. [41]



Obr. 24 Mikro-vstřikované součásti [41]

5.3 Prvky průmyslu 4.0 v procesu vstřikování

5.3.1 Robotizace výroby

Využití průmyslových robotů u technologie vstřikování přináší výrobcům větší konkurenceschopnost skrz zvýšení produktivity a eliminaci potřebných operátorů. Vstřikovací proces je známý výrobou velkého objemu totožných součástí. Proto je velmi výhodné do výroby implementovat roboty konající repetitivní úkony. Nejčastěji pro manipulaci s výstřiky jako je vyjmutí výstřiku z formy. Běžně tuto práci vykonává obsluha stroje. Tato práce je pro operátora fyzicky vyčerpávající, přičemž se operátor pohybuje v prostoru se zvýšenou teplotou a manipuluje s horkým výstřikem, což může zvyšovat šanci úrazu. Použití robotického manipulátoru nejen zvyšuje produktivitu, ale také šetrnost při zacházení se součástmi, jelikož roboty používají podtlakové nebo pneumatické úchopy.

Roboty mohou provádět nejen vyjmutí, ale i založení součástí do lisu, jako jsou kovové inserty při zastřikování. Robot oproti člověku dokáže založit insert do formy přesněji a opakovaně. Pokud je insert také plastový, může být vstřikován na jednom stroji a pomocí robotického manipulátoru být vyjmut a založen do druhého stroje na zástřik.

Existují také robotické manipulátory, které se soustředí na oddělování a sbírání zatuhlých vtokových systémů. Tento odpad poté posílají přímo do granulačních zařízení k recyklaci.

Využití robotů se netýká pouze procesu vstřikování, ale i následujících operací jako je balení, laserové gravírování, montáž, lepení, svařování nebo inspekce kvality. [42,43]



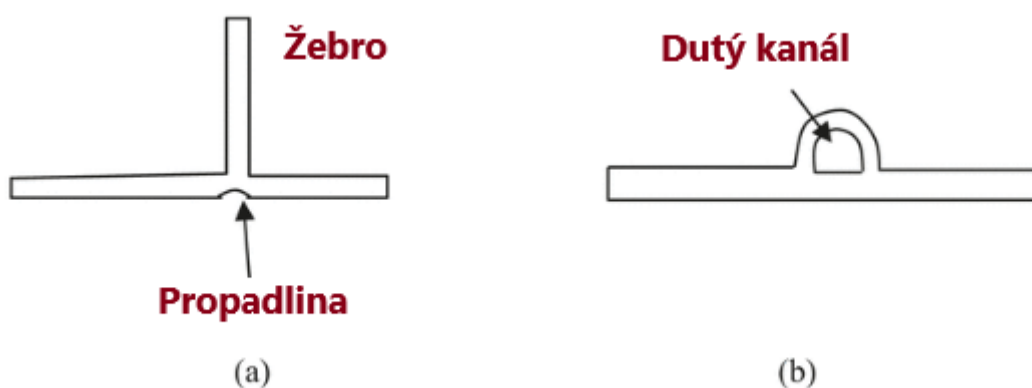
Obr. 25 Robotický manipulátor zakládající insert do vstřikovacího stroje [42,43]

5.3.2 Predikce kvality vstřikování

Nejvíce relevantní data zajišťující finální kvality výstřiku jsou hodnoty ze vstřikovací dutiny, jako je teplota a tlak. Tyto data se dají sbírat pomocí senzorů zakomponovaných přímo do dutiny formy. Výstupem měření je obrovské množství informací, které jsou dále zpracovávány algoritmy v rámci strojového učení. Postupným učením algoritmu stoupá jeho schopnost predikovat procesní podmínky pro následné vstřikování, čímž zkracuje proces nastavování parametrů a zvyšuje tak efektivitu procesu. [44,45,46]

5.4 Gas assisted injection molding

Vstřikování za pomoci plynu je proces produkující duté plastové součásti. Po vstříknutí polymerní taveniny je do dutiny ještě dodáván vysokotlaký plyn. Výhody oproti konvenčnímu typu vstřikování jsou: snížení hmotnosti a spotřeby materiálu, rychlejší doba chlazení a tím pádem zvýšená produktivita, snížené reziduální pnutí. Vliv smrštění při chlazení je také menší, jelikož proti němu působí natlakovaný plyn v dutině. Nevýhodou je komplexnost vstřikovacího zařízení a finální rozměrová stabilita výstřiku. Tento typ vstřikování se používá také při realizaci žebířů na součásti, kde je potřeba zamezit propadlinám pod žebíř. Tyto propadliny jsou eliminovány použitím žebířu typu omega, ve kterém je stlačeným plynem propadlina kompenzována. [47,48]

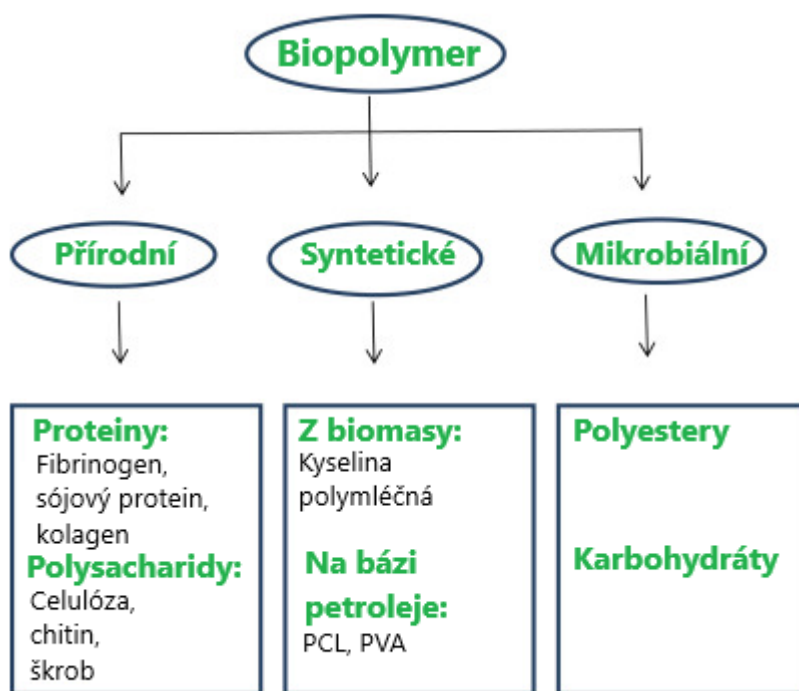


Obr. 26 Znáznornění a) klasického žebířu, b) žebířu typu Ω [48]

5.5 Biologicky rozložitelné polymery

Rozložitelné polymery jsou čím dál více žádané kvůli jejich potenciálu snížit dopad plastového odpadu a vést jej k cirkulární ekonomice. Největší překážkou při implementaci biopolymerů je sjednocení konkurence schopných vlastností s ekologickou šetrností. Předními vlastnostmi biopolymerů z environmentálního hlediska jsou nízká produkce

skleníkových plynů, rozložitelnost a monomerní obnovitelnost. Avšak je stále potřeba výzkumu v tomto odvětví, aby byly zlepšovány vlastnosti biopolymerů na porovnatelnou úroveň s petrochemickými polymery. Biopolymery mohou být získávány naturálně nebo mohou být synteticky vyráběny. [49,50,51,52]



Obr. 27 Rozdělení biopolymerů podle jejich původu [54]

Je potřeba rozlišovat termíny rozložitelných (bio-degradable) a biologicky založených (bio-based) polymerů. Biologicky založené polymery popisují původ daného polymeru, jako jsou například rostliny. To ovšem nesouvisí s koncem jeho životnosti, konkrétně jak s ním má být nakládáno. Biologicky rozložitelné polymery určují vlastnosti polymeru na konci jeho životnosti. Takto označené produkty zaručují, že materiál je rozložitelný pomocí mikroorganismů na základní prvky ve specifickém prostředí. [52,53,54]

6 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

Teoretická část této práce se převážně zabývá procesem vstřikování polymerů. Na počátku je představena historie a vznik této technologie. Následně je popsán princip vstřikovacího procesu a rozvedeny jeho jednotlivé fáze jako je příprava taveniny, vstřikování, fáze dotlaku i následné tuhnutí polymerní taveniny.

Kapitola o vstřikovacím stroji rozebírá jeho konstrukci a principy fungování. Je rozdělena na uzavírací a vstřikovací jednotku. U vstřikovací jednotky jsou detailněji popsány její hlavní části jako je šnek, válec nebo tryska. Uzavírací jednotka je rozdělena podle typu provedení na mechanické, hydraulické a elektrické. Důraz je také kladen na popis a vliv uzavírací síly těchto mechanismů. Kapitola se také věnuje chladícím systémům a jejich příslušenství.

V další kapitole jsou obecně rozděleny polymery na termoplasty a reaktoplasty a popsány jejich charakteristické vlastnosti. Dále je zmíněn i proces výběru vhodného polymeru pro danou aplikaci a jeho kritéria.

Část se zaměřením na environmentální a ekonomické aspekty diskutuje dopad výroby plastů na životní prostředí. Kapitola také nabízí řešení nakládání s plastovým odpadem, ale také upozorňuje na komplikace s tím spojené.

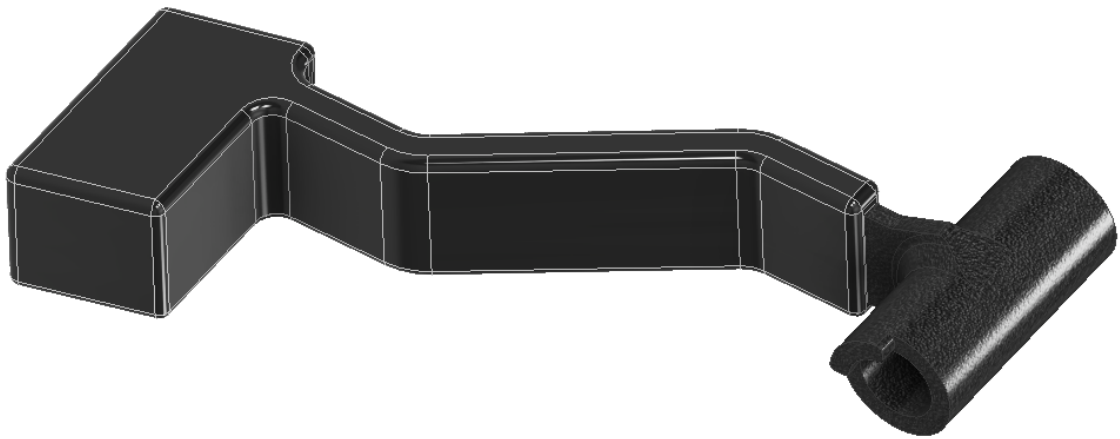
Poslední kapitola prezentuje aktuální inovace a trendy v oblasti vstřikování. Je zde popsáno využití 3D tisku v prototypové výrobě forem, mikro-vstřikování kvalitativně náročných dílů, prvky průmyslu 4.0 (robotizace a strojové učení) a alternativní varianta k běžným polymerům v podobě biopolymerů.

Teoretická část jako celek tedy prezentuje komplexně technologii vstřikování polymerů se zaměřením na technické principy procesu i samotného vstřikovacího stroje. Věnuje se také polymerním materiálům jako takovým a rozvádí problematiku jejich environmentálních dopadů. Je zde popsána řada inovací v odvětví vstřikování plastů.

II PRAKTICKÁ ČÁST

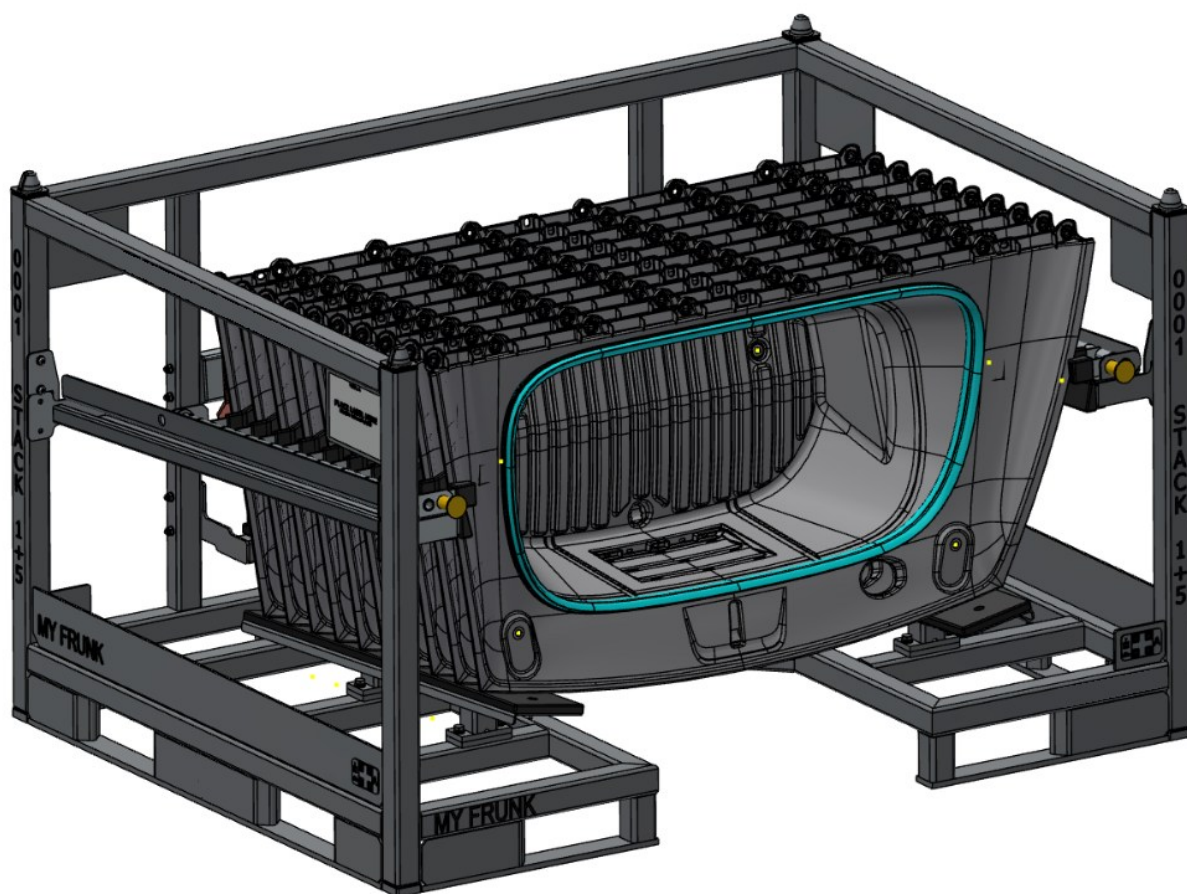
7 VSTŘIKOVANÝ DÍL

Pro tuto diplomovou práci byl firmou zvolen díl, od kterého se odvíjí všechny následující kapitoly. Tato součást, také nazývaná jako vymezovací či separační díl, je součástí konstrukce svařované kovové přepravní palety.



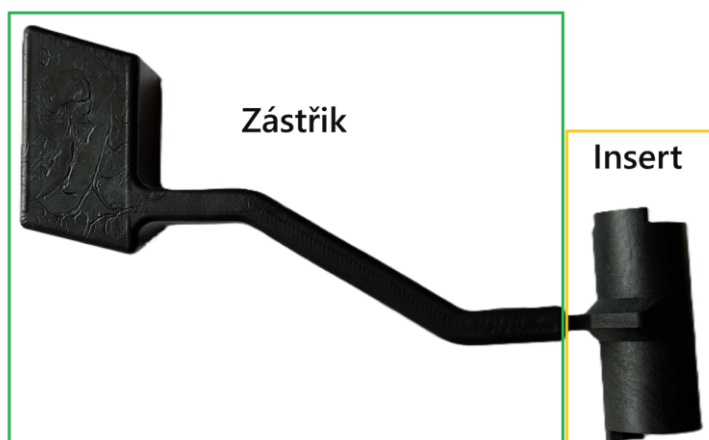
Obr. 28 Plastový separační díl přepravní palety

Tyto palety slouží k bezpečné a organizované přepravě automobilového dílu z výrobního závodu externího dodavatele k montážní lince automobilky. Převázaným dílem je plastový kufr, nacházející se v přední části elektromobilu pod kapotou, kde se u běžných aut nachází spalovací motor. Účelem zvoleného separačního dílu v sestavě palety je zajistit uložení dílu v paletě, zabránit jeho volnému pohybu a vymezit mezi díly prostor, aby nedocházelo k jejich poškození.



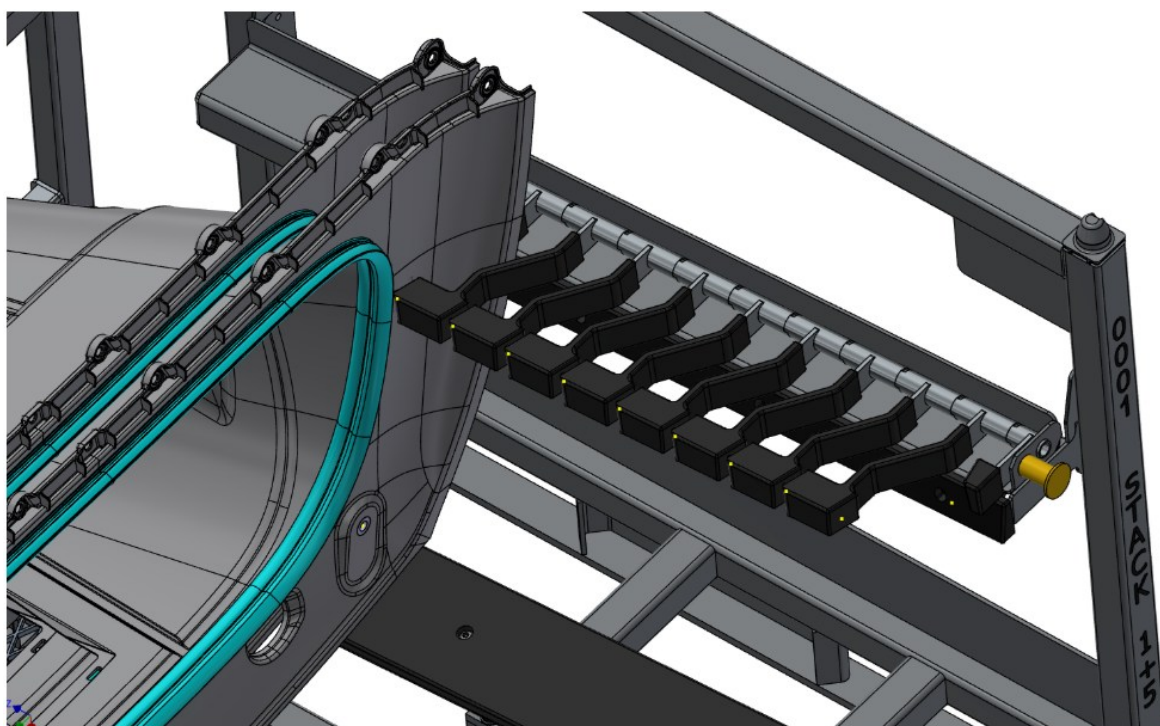
Obr. 29 Přepravní kovová paleta

Tento separační díl se skládá z PVC zástříku a polyamidového insertu plněného skelnými vlákny.



Obr. 30 Části separačního dílu

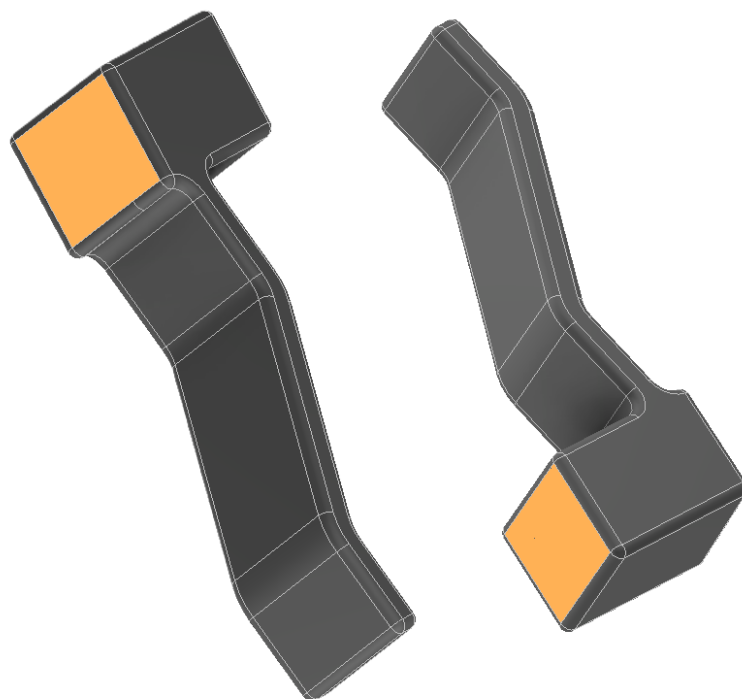
PVC část je v přímém kontaktu s přepravovaným dílem. Svým tvarem kopíruje dosedací plochu a drží díly na svém místě. Je lehce pružný, čímž kompenzuje rozměrové nepřesnosti a tlumí rázy při pohybu. Inserty jsou za sebou navlečeny na trubce, po které se mohou volně otáčet z horizontální do vertikální polohy v intervalu 90°. Tento prostor je vymezen plechovým štítem v blízkosti nosné trubky. Na insertu se nachází výběžky čtvrtkruhového tvaru. Ty zajišťují vzájemnou polohu předešlého a následujícího separačního dílu v řadě. Při pohledu do palety, kdy je první separační díl ve vertikální otevřené poloze, může být v této poloze i díl následující. Avšak pokud je v uzavřené horizontální poloze, tak tímto tvarovým prvkem brání otevření následujícího separačního dílu.



Obr. 31 Systém a funkce řady separačních dílů

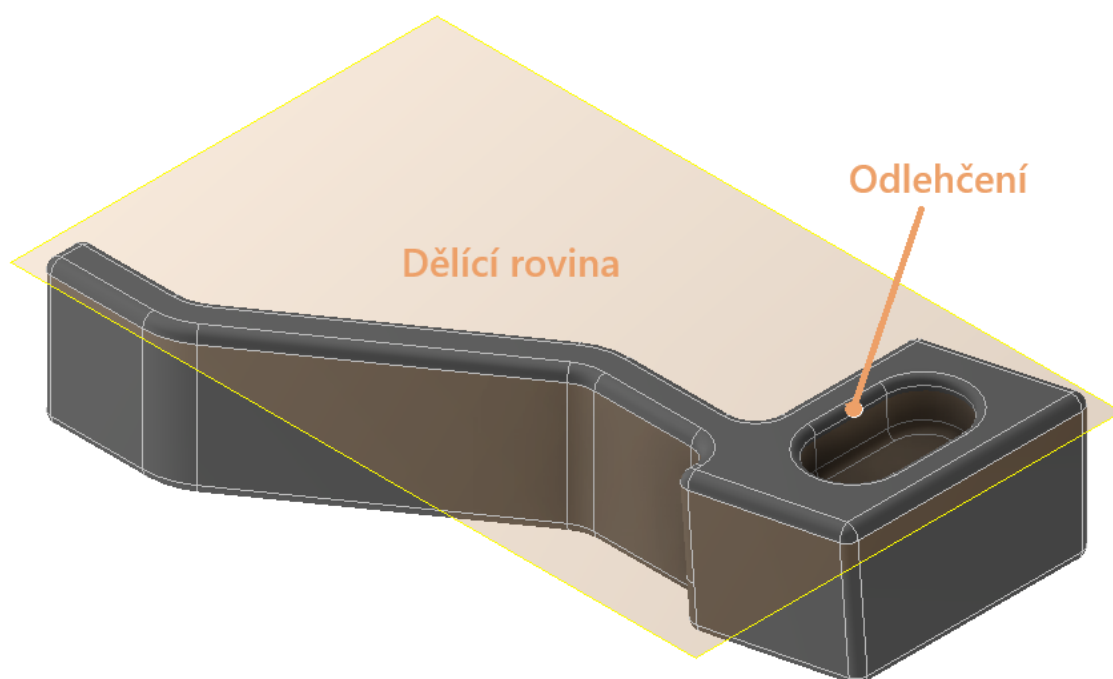
7.1 Optimalizace vstřikovaného dílu

Původní objem PVC zástřiku dílu byl $176,5 \text{ cm}^3$. Maximální vstřikovaný objem taveniny stroje je $173,2 \text{ cm}^3$. Objem zástřiku je tedy větší než kapacita zvoleného vstřikovacího stroje a také nepočítá s vtokovým systémem. Bylo potřeba upravit geometrii zástřiku tak, aby bylo možné jej vstřikovat, tedy objem celé vstřikované části musí být menší než maximální teoretický objem dávky taveniny stroje. Výběr místa pro následnou úpravu a odlehčení komplikují funkční plochy, zobrazeny na obrázku 32 oranžově, které nesmí být měněny.



Obr. 32 Znázornění funkčních ploch

Bylo navrženo odlehčení v podobě vybrání po bocích kvádrového prvku dílce. To je však možné zhotovit v případě původní dělicí roviny pouze za pomoci bočního odformování. Boční odformování by komplikovalo konstrukci formy a navyšovalo její cenu, tudíž byla dělicí rovina otočena o 90° a umístěna pod rádius zaoblení hrany, protože jedna z funkčních ploch zástříku je zkosená a nebylo by jej jinak možné vyjmout z formy.



Obr. 33 Zobrazení optimalizace dělicí roviny a odlehčení

Po optimalizaci zástříku je jeho objem **158,82 cm³**. Pro zástřík byl vytvořen jednoduchý přímý vtok přiměřeně na střed součásti. Vtok je složen z kónické části vtokové vložky a následně je napojen na kruhový kanál v tvarové vložce. Objem tohoto vtoku je **1,73 cm³**. Celkový objem dutiny a vtokového systému je tedy **160,55 cm³**, což je přibližně **93 %** maximální teoretické dávky taveniny stroje. Optimalizovaný zástřík je možné zhotovit na daném stroji.

8 POROVNÁNÍ DOSAVADNÍ TECHNOLOGIE SE VSTŘIKOVACÍM PROCESEM

Firma doposud využívá nízkotlakého lití polyuretanu na výrobu plastových dílů menších sérií v rozmezích desítek až stovek kusů. Vstupním materiálem pro lití je polyuretanová pryskyřice a tužidlo. Tyto složky jsou separátně uskladněny v zásobnících, ze kterých jsou následně přečerpávány do míchačky, kde dojde k jejich smíšení. Podle daného materiálu nebo poměru pryskyřice a tužidla se převážně upravuje výsledná tvrdost výrobku. Lze použít pigmenty pro požadované zabarvení. Směs se lije tryskou pod nízkým tlakem do otevřené či uzavřené formy, která je také vyrobena z polymerních materiálů. Forma je poté umístěna do vyhřívané komory, nejčastěji od 40 do 80 °C, kde dochází k vytvrzení do několika minut nebo desítek sekund. Tyto formy jsou vyráběny přímo ve firmě a jejich cena se pohybuje ve stovkách korun.

Proces vstřikování byl již detailně popsán v teoretické části. Firma také využívá vstřikovaných dílců. Ty jsou ale vyráběny a importovány externím dodavatelem ze Španělska. Jsou to především zástřiky ve větších sériích (600-10000 ks). Vstřikované díly jsou také přesnější a nejsou limitovány na použití jednoho druhu materiálu, polyuretanu. Využívá se širší škála výhradně termoplastických materiálů, jako je např.: TPU, PVC, PP a PA6.

Využití stroje by ve firmě bylo stejné jako u dodavatelské firmy, přičemž by byly eliminovány náklady spojené s transportem výrobků a snížila by se i výrobní cena. Návrh forem i dílců by byl flexibilnější a časově úspornější.

8.1 Zvolený vstřikovací stroj

Pro implementaci vstřikovacího procesu byl firmou zvolen stroj BOY 60 E VV od německého výrobce BOY GmbH & Co. KG. Jedná se o vertikální vstřikovací stroj kompaktních rozměrů, který je především vhodný pro tvorbu zástříků insertů. Vstřikovací jednotka s horní upínací deskou jsou pohyblivé, spodní deska je fixní. Koncepce vertikálního stroje vyžaduje zásah obsluhy při vyhazování. Stroj disponuje maximální uzavírací silou 600 kN a průměrem šneku vstřikovací jednotky 42 mm. Obsluha stroje je řešena přes řídicí systém Procan ALPHA 4. Maximální vstřikovací dávka taveniny je 173,2 cm³ a maximální rozměr mezi vodičimi tyčemi je 360x335 mm. Všechna použitá data pro následné výpočty jsou uvedeny v příloze P I a rozměry pro konstrukci formy v přílohách P II a P III.



Obr. 34 Vertikální vstřikovací stroj BOY 60 E VV

8.2 Náklady na formy

Ekonomika je při volbě technologie rozhodující faktor. Výsledná cena za kus výrazně ovlivňuje preferenci použití dané technologie. V této kapitole bude porovnána ekonomika výroby zástríku separačního dílu nízkotlakým litím polyuretanu a vstřikováním. Kritéria pro porovnávání jsou investiční náklady, provozní náklady a výrobní parametry.

8.2.1 Cena vstřikovací formy

Pro výpočet nákladů výroby vstřikováním je důležitým parametrem celková cena vstřikovacího nástroje. Pro orientační výpočet ceny formy jsou v ní zahrnuty tyto parametry:

- Cena materiálu desek a tvarových vložek formy
- Cena obrábění
- Cena normálií

Pro výpočet ceny vyráběných desek byly použity rozměry jejich polotovarů a dopočítána hmotnost. Materiálem všech desek tělesa formy je hliníková slitina Alumec 89 (příloha P IV), vhodná pro výrobu vstřikovacích forem malých sérií. Použití hliníku je v této aplikaci vhodné, jelikož jsou požadovány co nejnižší náklady na formu. Vzhledem k malé velikosti série není nutné, aby forma byla vyráběna z oceli, která je používána pro formy pracující v statisících až milionu cyklů. Jednoduchost vstřikovaného dílu také zajišťuje, že forma nebude zatěžována vysokými vstřikovacími tlaky a uzavírací silou. Náklady na obrábění jsou u hliníku znatelně nižší než u oceli díky jeho obrobiteľnosti. Je bráno v potaz, že cena hliníkových slitin se obecně pohybuje mezi 250 až 350 Kč za kilogram. Pro výpočty byla zvolena horní hranice 350 Kč/kg, jelikož se jedná o blok materiálu, který je z pravidla dražší než například plech. Ve výpočtech je započítáno i eloxování tvarových vložek a celkové obrábění všech desek. Obráběcí čas byl odhadnut pomocí programu Siemens NX. Výsledný čas pro obrobení všech desek činí 5 h. Z důvodu zachování interních údajů firmy byla hodinová sazba obráběcího centra naceněna dle obecně používané hodinové sazby 1000 Kč/h. Stejně tak u mzdy operátorů byla použita odhadovaná hodinová sazba 300 Kč/h.

Tabulka 1 Náklady na desky vstřikovací formy

Ceny desek/vložek					
Název	Materiál	Rozměry [mm]	Hmotnost [kg]	Cena za kg [Kč]	Celková cena [Kč]
Upínací deska horní	Alumec 89	350x350x30	9,9	350	3465
Upínací deska spodní	Alumec 89	350x350x30	9,9		3465
Tvarová deska horní	Alumec 89	350x300x80	22,68		7938
Tvarová deska spodní	Alumec 89	350x300x90	25,52		8932
Rozpěrná deska	Alumec 89	350x48x90	4,08		1428
Rozpěrná deska	Alumec 89	350x48x90	4,08		1428
Vyhazovací deska opěrná	Alumec 89	350x210x25	4,96		1736
Vyhazovací deska kotevní	Alumec 89	350x210x20	3,97		1389,5
Tvárník	Alumec 89	284x184x74	10,44		3654
Tvárnice	Alumec 89	284x184x64	9,02		3157
Eloxování vložek			19,46	100	1946
Obrábění					5000
Celkem					43538,5

Pozn.: Z tabulky vyplývá, že nejdražší položkou jsou tvarové desky, protože jejich rozměry jsou mezi všemi největší. Další výraznou položkou je cena za obrábění.

V tabulce 2 jsou uvedeny ceny jednotlivých normálů. Je zde vždy uvedena pouze jednotná cena pro dva téměř totožné produkty, například středící kroužky. Forma využívá dva druhy středících kroužků, avšak jejich cena se liší pouze o 0,5 EUR. Pro zjednodušení tabulky jsou tyto cenové rozdíly zanedbány a je určena jednotná cena.

Tabulka 2 Náklady na normálie

Ceny normálií			
Název	Množství [ks]	Cena za kus [EUR]	Celková cena [Kč]
Středící kroužek	2	63	3150
Vodící pouzdro	4	42,7	4270
Vodící čep	4	27,4	2740
Pouzdro vyhazovacího paketu	2	28	1400
Čep vyhazovacího paketu	2	10	500
Přepážky	5	16	2000
Ucpávky	7	2,75	481,25
Vtoková vložka	1	76	1900
Středící trubka	4	9,75	975
Dorazová destička	4	2,8	280
Vyhazovač $\varnothing$ 8 mm	4	7,95	795
Vyhazovač $\varnothing$ 6 mm	3	5,9	442,5
Izolační deska	2	109	5450
Přípojka	4	1,43	143
Celková cena normálií			24526,75

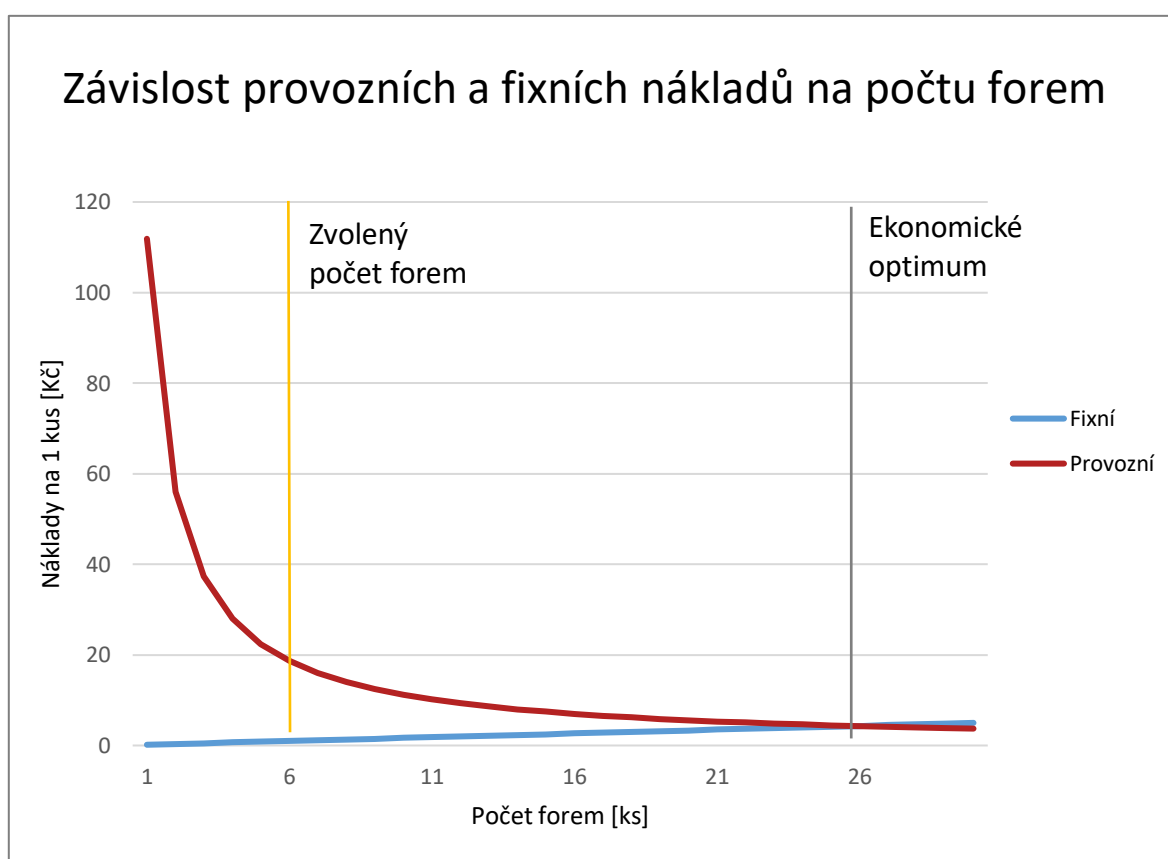
Celkové náklady na vstřikovací formu činí **67 922 Kč**.

8.2.2 Cena formy pro lití polyuretanu

Vzhledem k množství vyráběných kusů v zakázce není možné použít běžně používaný materiál pro výrobu licích forem, a to polymerní recyklát. Stejně jako u vstřikování by byl použit hliník s eloxovanou vrstvou. Forma pro lití by byla velmi podobná tvárníku formy vstřikovací, proto lze počítat s přibližně stejnými náklady. Cena za obrábění by na takové formě byla však nižší než u tvárníku pro vstřikování. Jediným funkčním prvkem formy pro lití je její dutina, neobsahuje žádné upínací prvky, temperační kanály, díry pro vyhazovače

a tolerance vnějších rozměrů. Čas obrábění bude výrazně nižší. Celková cena licí formy je odhadována na 4000 Kč.

U procesu lití je možné použít vícero forem, jelikož násobnost je zde limitována pouze prostorem vyhřívací komory a časovou náročností obsluhy procesu operátora. Čím více forem bude v provozu, tím menší budou variabilní provozní náklady, avšak narůstají náklady na formy. V tomto případě je vhodné najít ekonomické optimum mezi těmito dvěma parametry, které určí počet použitých forem. Na obrázku 35 je znázorněn vztah mezi počtem používaných forem a náklady na jeden kus z hlediska provozních a fixních nákladů. Fixními náklady se rozumí cena forem podělena počtem vyrobených kusů.



Obr. 35 Závislost provozních a fixních nákladů na počtu použitých forem

V grafu je znázorněné ekonomické optimum, což je minimum celkových nákladů na 1 kus. Ekonomické optimum se nachází v místě protnutí křivek provozních a fixních nákladů. Aby bylo možné tohoto optima dosáhnout, je dle grafu potřeba celkem 26 forem ve výrobě. To však není možné, jelikož pracovní prostory a prostor ve vyhřívané komoře není schopen pojmout takové množství forem. Také operátor výroby nedokáže stíhat obsluhovat 26 forem. Průběh fixních nákladů je lineární, zatímco křivka provozních nákladů klesá exponenciálně. Aby byl operátor schopen plnit, odformovat a provádět veškerou manipulaci, je zvolený

počet forem v blízkosti bodu zlomu křivky provozních nákladů, a to 6 kusů forem. V tomto místě se průběh křivky mění z rapidního poklesu do pozvolného. Představuje tak kompromis splňující výraznou úsporu bez vysokých počátečních investic za formy.

Při počtu 6 kusů forem a odhadované ceně za kus 4000 Kč tvoří celkové náklady za formy 24 000 Kč.

8.3 Ekonomické porovnání technologií nízkotlakého lití a vstřikování

Technologie jsou porovnávány na základě ceny za 1 kus. Technologie s nižší cenou za kus je ekonomicky výhodnější. Cena za kus je spočítána součtem variabilních provozních nákladů (mzdy, materiál, energie) a fixních (formy).

8.3.1 Výpočet ceny jednoho kusu pro technologii nízkotlakého lití

Pro výpočet ceny za kus je potřeba znát vícero parametrů z výroby. Cena polyuretanové směsi, kterou firma využívá, se pohybuje okolo 100 Kč/kg. Hodinová mzda operátora byla kvůli zachování citlivých údajů určena na základě běžných tržních mezd za daný typ práce. To platí i u cen elektřiny. Příkon stroje byl uveden na typovém štítku a je součtem všech částí stroje jako jsou dva míchací zásobníky, dávkovací jednotka, ohřev zásobníků a dopravní čerpadla. Vyhřívací komora (stůl) neobsahovala údaj o příkonu, proto musel být odhadnut podle podobných zařízení na 1,5 kW. Při každém plnicím cyklu je nutné propláchnout a vyčistit licí hubici a příváděcí hadici, čím se zpravidla odstraní 250 g nevyužitého materiálu. Tudíž na každých 6 kusů spadá 250 g odpadu.

Tabulka 3 Variabilní provozní náklady nízkotlakého lití na jeden kus

Variabilní provozní náklady		
Položka	Jednotka	Hodnota
Počet kusů ve výrobě (forem)	ks	6
Cena PUR směsi (A+B)	Kč/kg	100
Spotřeba suroviny	g	206
Náklady na 1 kus (materiál)	Kč	20,6
Doba odlévání + manipulace	s	60
Doba vytvrzení	s	900
Celkový čas cyklu	s	960
Efektivní cyklus	s	150
Mzda operátora	Kč/h	300
Mzda na 1 kus	Kč	12,5
Příkon míchací a dávkovací jednotky	kW	28
Příkon vyhřívací komory	kW	1,5
Cena elektřiny	Kč/kWh	5
Energetické náklady na 1 kus	Kč	6,145833333
Nevyužitelný odpad na jedno plnění	g	250
Cena odpadu na 1 kus	Kč	4,166666667
Celkové provozní náklady na 1 kus	Kč	43,4125

Provozní náklady na výrobu jednoho kusu činí **43,4 Kč**. Fixní náklady na jeden kus jsou získány podílem celkové ceny za formy a počtu kusů v zakázce.

Tabulka 4 Fixní náklady nízkotlakého lití na jeden kus

Fixní náklady		
Položka	Jednotka	Hodnota
Počet kusů v zakázce	Ks	24000
Cena formy	Kč	4000
Cena všech forem	Kč	24000
Cena formy na 1 kus	Kč	1

Součtem fixních a provozních nákladů je finální cena výroby jednoho kusu danou technologií.

Tabulka 5 Celkové náklady nízkotlakého lití na jeden kus

Celkové náklady na 1 kus		
Položka	Jednotka	Hodnota
Variabilní provozní náklady	Kč	43,4125
Fixní náklady	Kč	1
Celkové náklady na 1 kus	Kč	44,4125

Výsledná cena jednoho kusu vyráběného technologií nízkotlakého lití polyuretanu činí **44,4 Kč**.

8.3.2 Výpočet ceny jednoho kusu pro technologii vstřikování

Ceny elektrické energie a mzdové náklady jsou použity stejné jako u technologie nízkotlakého lití. Délka cyklu vyplývá z kapitoly nastavení procesních parametrů. Cena kilogramu PVC granulátu je určena podle aktuálních tržních hodnot na 33 Kč.

Tabulka 6 Variabilní provozní náklady vstřikování na jeden kus

Variabilní provozní náklady		
Položka	Jednotka	Hodnota
Cyklus (čas na jeden kus)	s	160,00
Kusů za hodinu	ks/h	22,50
Příkon stroje	kW	18,70
Energetické náklady na 1 kus	Kč	4,16
Cena elektřiny	Kč/kWh	5,00
Náklady na 1 kus (materiál)	Kč	7,21
Spotřeba suroviny (hmotnost)	g	206,00
Cena materiálu	Kč/kg	35,00
Mzda operátora	Kč/h	300,00
Mzda na 1 kus	Kč	13,33
Celkové náklady na 1 kus	Kč	24,70

Variabilní provozní náklady pro vstřikovací proces činí **24,7** Kč na jeden kus.

Fixní náklady jsou podílem ceny formy a počtem kusů v zakázce.

Tabulka 7 Fixní náklady vstřikování na jeden kus

Forma		
Položka	Jednotka	Hodnota
Cena formy	Kč	67922
Počet kusů v zakázce	ks	24000
Cena formy na 1 kus	Kč	2,83

Pro jeden kus připadají náklady na vstřikovací formu ve výši **2,83** Kč.

Tabulka 8 Celkové náklady vstřikování na jeden kus

Celkové náklady na 1 kus		
Položka	Jednotka	Hodnota
Variabilní provozní náklady	Kč	24,70
Náklady na formu (fixní)	Kč	2,83
Celkové náklady na 1 kus	Kč	27,53

Výsledná cena jednoho kusu vyráběného technologií vstřikování činí **27,53** Kč.

8.4 Environmentální porovnání nízkotlakého lití a vstřikování

Tato kapitola popisuje environmentální zátěž obou technologií. Jsou zde popsány aspekty, jako jsou materiálové ztráty, tvorba výparů při zpracování a možnosti recyklace. Z údajů o spotřebě elektrické energie na výrobu jednoho kusu je spočítána i uhlíková stopa procesu.

8.4.1 Materiálové ztráty a recyklace

Obě technologie produkují nevyužitý materiál, odpad. Cílem je určit, která z těchto technologií produkuje méně odpadu, a zda je možné jej recyklovat.

Vstřikování

Forma zástřiku je konstruována se studeným vtokovým systémem, tím pádem na zástřiku vzniká nálitek – ztuhlý materiál z vtokové vložky. Tento vtokový kanál je po odformování a odřezávání. Jeho hmotnost je 2,42 g, tedy na každý cyklus připadá toto množství odpadu. PVC jakožto termoplastický polymer je možné opakovaně zpracovávat do formy regranulátu. Ze stejného regranulátu lze dále vstřikovat další zástřiky, protože zhoršené mechanické a optické vlastnosti jsou pro tento dílec stále přijatelné. Lze tedy konstatovat, že vstřikovací proces neprodukuje výrazné materiálové ztráty. Vstřikovací proces neprodukuje nijak nebezpečné výpary.

Nízkotlaké lití polyuretanu

Polyuretan je reaktoplast, což znamená, že jej po vytvrzení není možné opakovaně tavit a zpracovávat. To výrazně ovlivňuje tvorbu odpadu, a hlavně následné nakládání s odpadem. Jak již bylo zmíněno v kapitole o kalkulaci ceny jednoho kusu, dávkovací zařízení je nutné po každém cyklu čistit. Na každých 6 kusů zástřiku tak spadá 250 g dvousložkové pryskyřice jako odpad. Tento druh odpadu nelze recyklovat a řadí se do kategorie nebezpečného odpadu určeného pro ekologickou likvidaci. Stejně jako samotná pryskyřice, tak kontejnery, sudy a jiné obaly, ve kterých je materiál dodáván, spadají do kategorie nebezpečného odpadu.

Dále při odlévání dochází ke vzniku různých výparů nebo těkavých látek. Tyto výpary jsou vedlejším produktem exotermické reakce polyolové a isokyanátové složky při které vzniká polyuretan. Do ovzduší se uvolňuje část nezreagovaných diisokyanátů nebo jiné těkavé látky v případě, že byly použity různá aditiva.

8.4.2 Emisní zátěž vzniklá spotřebou energie

V této kapitole je popsána environmentální zátěž, zapříčiněná spotřebou elektrické energie na jeden kus zástřiku. Podle energetické náročnosti obou technologií je vypočítána přibližná produkce oxidu uhličitého CO₂, který vzniká při výrobě potřebné elektrické energie. Jelikož je původ elektrické energie neznámý, musí se použít tzv. emisní faktor zbytkového energetického mixu. Poslední dohledatelný emisní faktor je z roku 2023 a je zveřejněn

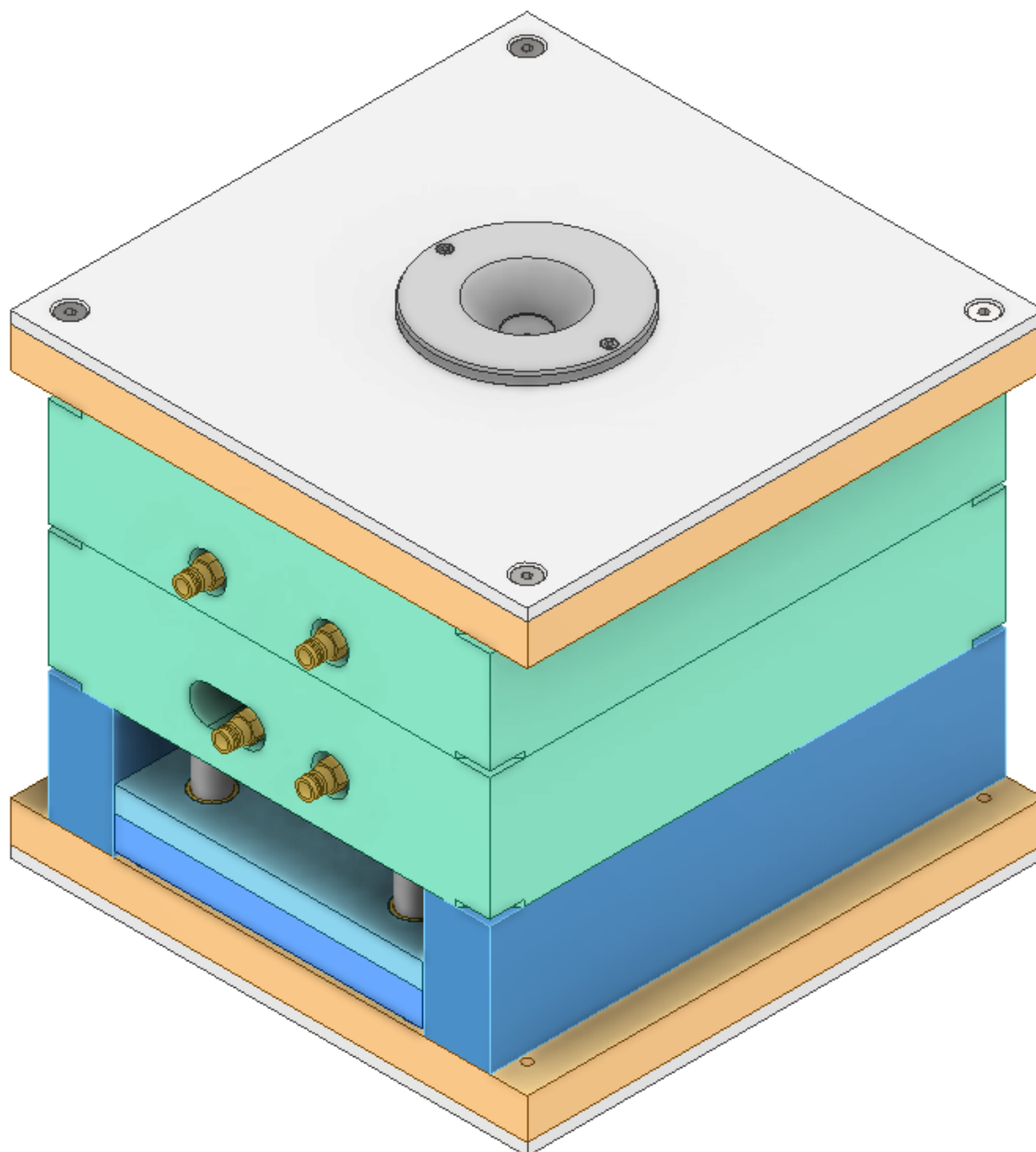
Oddělením analýz a datové podpory koncepcí Ministerstva průmyslu a obchodu. Jeho hodnota je 0,47 tCO₂/MWh.

Tabulka 9 Emise CO₂ spotřeby elektrické energie na výrobu jednoho kusu

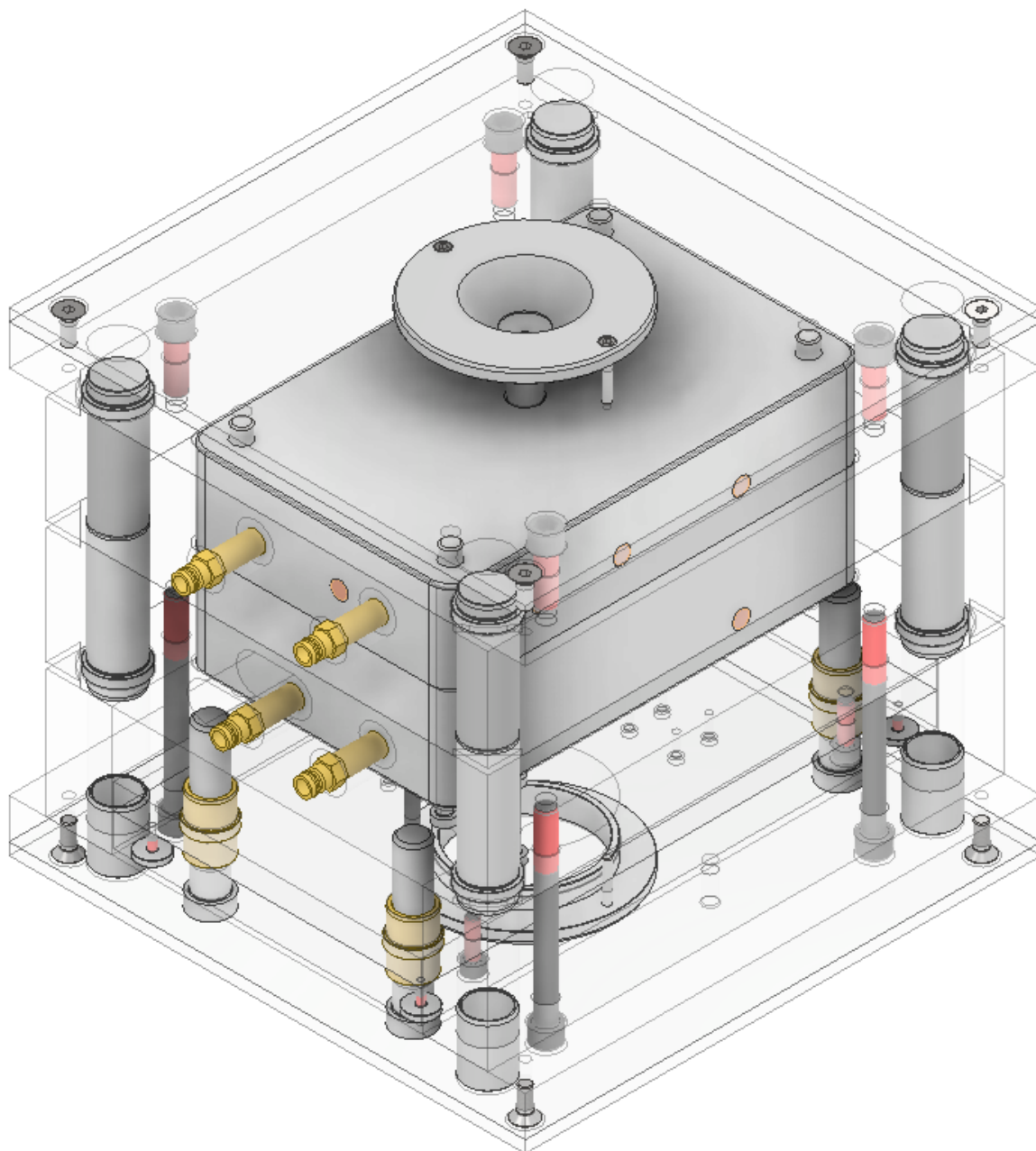
Emise CO ₂ na jeden kus			
Proces	Spotřeba energie na 1 kus [kWh]	Emisní faktor [kg/kWh]	Emise CO ₂ na 1 kus [kg]
Lití	1,23	0,47	0,5781
Vstřikování	0,83		0,3901

9 NÁVRH VSTŘIKOVACÍHO NÁSTROJE

Pro zvolený díl je navržena vstřikovací forma. Požadavkem je, aby bylo možné zhotovit daný dílec pomocí jednoho nástroje (formy). Tudíž je forma řešena pomocí univerzálního rámu (tělesa formy) a tvarových vložek pro danou součást dílce. Je dbán důraz na jednoduchost výměny tvarových vložek. Vstřikovací forma je zobrazena na obrázku 36 ve stejné orientaci, jako by byla upevněna ve vstřikovacím stroji. Na obrázcích 37 a 38 je díky transparentnosti desek možné vidět její vnitřní komponenty.

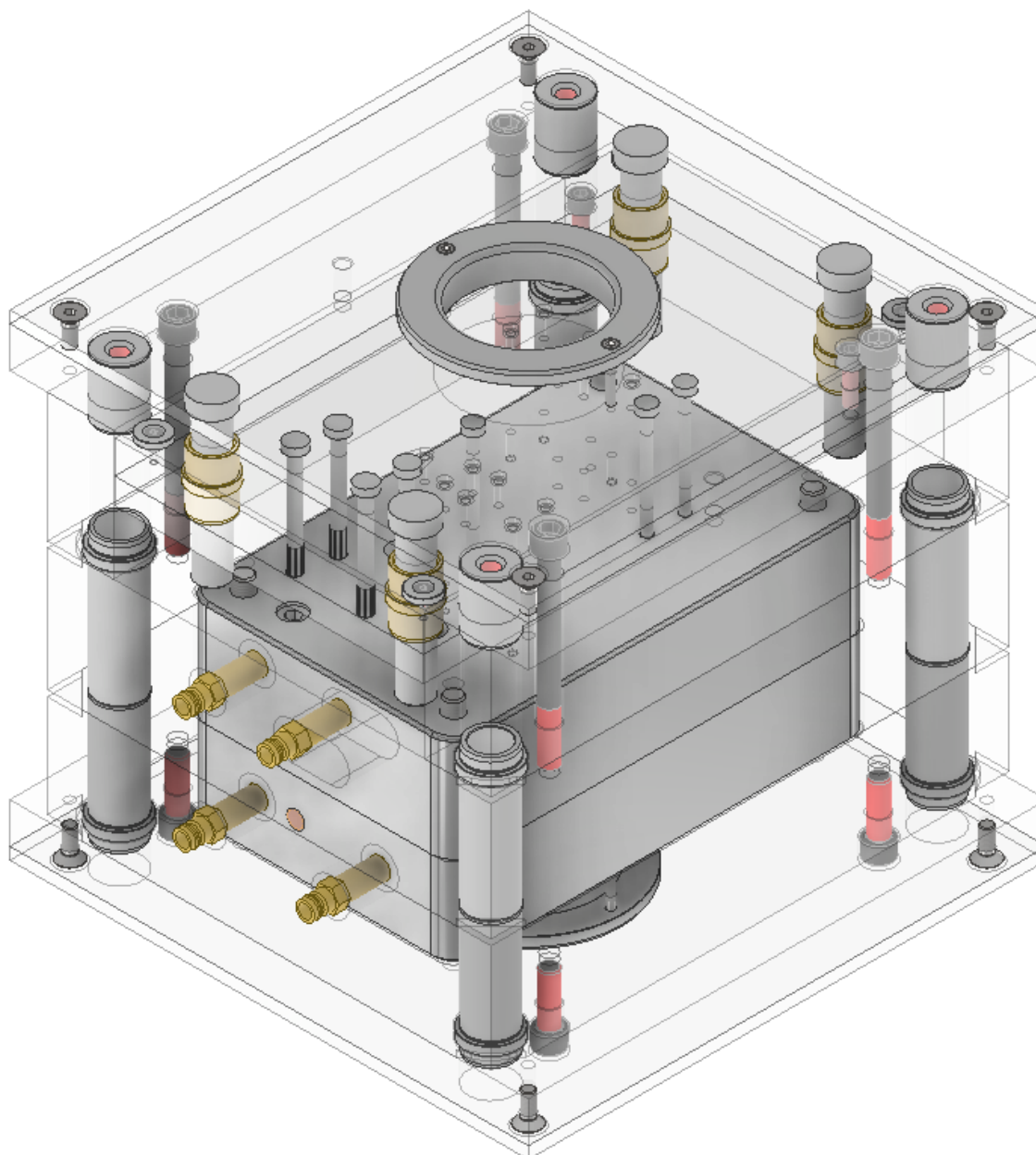


Obr. 36 Vstřikovací forma



Obr. 37 ISO pohled na vstřikovací formu s transparentními deskami shora

Obrázek 37 odhaluje vnitřní komponenty, jako jsou vodící čepy, pouzdra, spojovací materiál a tvarové vložky. Obrázek 38 zobrazuje pohled na formu a komponenty zespod, kde lze vidět vyhazovače a středící kroužek.



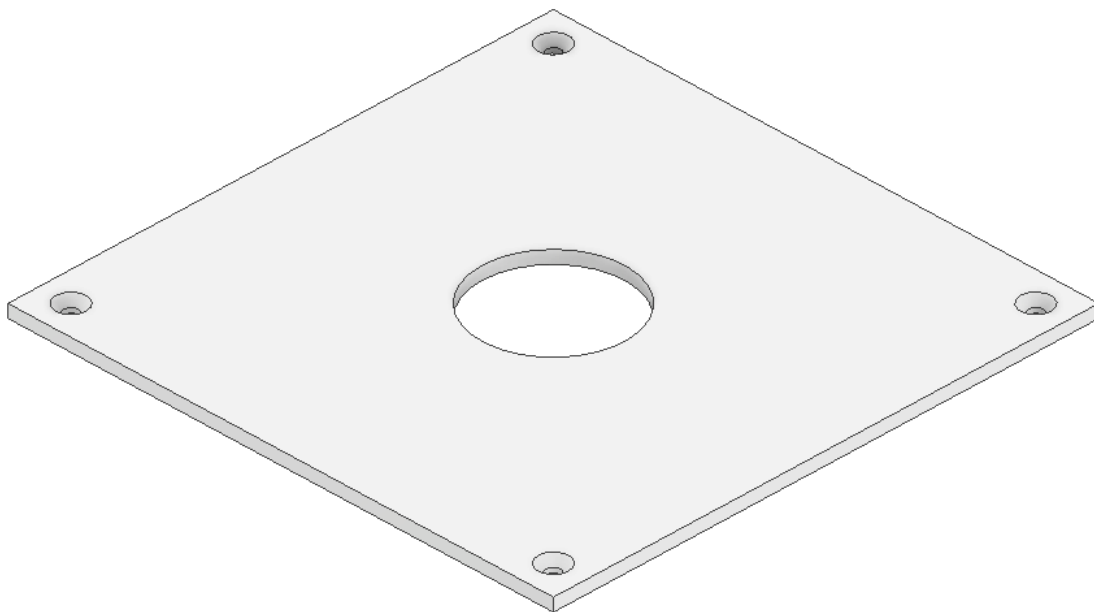
Obr. 38 ISO pohled na vstřikovací formu s transparentními deskami zespod

9.1 Desky tělesa formy

Všechny kovové desky formy jsou vyrobeny z vysokopevnostní hliníkové slitiny Alumec 89 (příloha P IV), která je vhodná pro menší série a zatížení. Dále je charakterizována svou výbornou obrobitelností.

9.1.1 Izolační desky

Desky ze syntetické pryskyřice plněné skelnými vlákny izolují těleso formy od upínacích ploch stroje. Rozměr desky je 346x346 mm o tloušťce 8 mm. Desky mají uprostřed kruhový výběr pro středící kroužek a v jejich rozích se nachází zhloubení pro zápusťné šrouby spojující izolační desku s deskou upínací.



Obr. 39 Izolační deska

9.1.2 Upínací desky

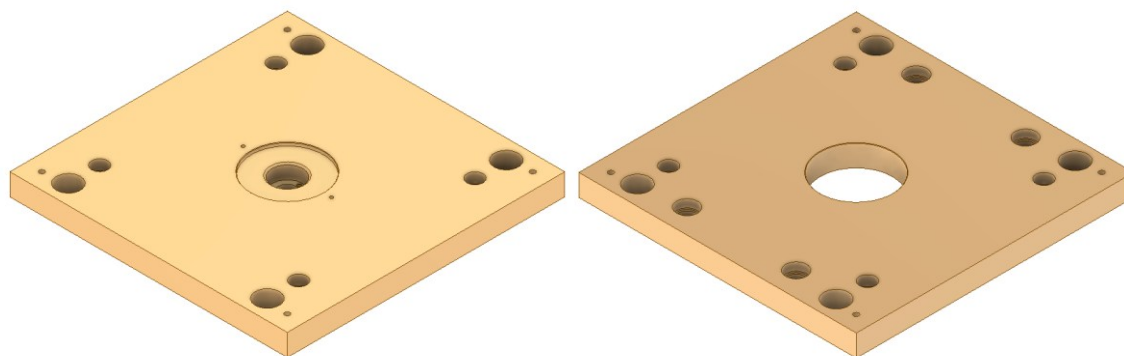
Upínací desky slouží k zajištění formy k deskám uzavírací jednotky stroje. Desky obsahují vícero otvorů pro středící nebo spojovací prvky. Jedná se o největší desky formy. Rozměr desky je 346x346 mm tloušťka je 27 mm.

Upínací deska pravá (horní)

Ve středu desky se nachází kruhový výběr $\varnothing 90$ mm pro středící kroužek. Dále je v jejím středu otvor pro uložení vtokové vložky a dírou pro kolík proti pootočení. Pro uchycení středícího kroužku pomocí šroubů má deska dvě závitové díry. V rozích desky jsou otvory pro středící čepy, spojovací šrouby a závitové díry šroubů přidržujících izolační desku.

Upínací deska levá (spodní)

Střed desky je opatřen průchozím otvorem $\varnothing 90$ mm. Na krajích desky jsou zhotoveny díry se zahloubením pro vodící čepy vyhazovacího paketu. Vedle děr pro vodící čepy jsou otvory středících trubek a spojovacích šroubů.



Obr. 40 Upínací deska pravá (horní) a levá (spodní)

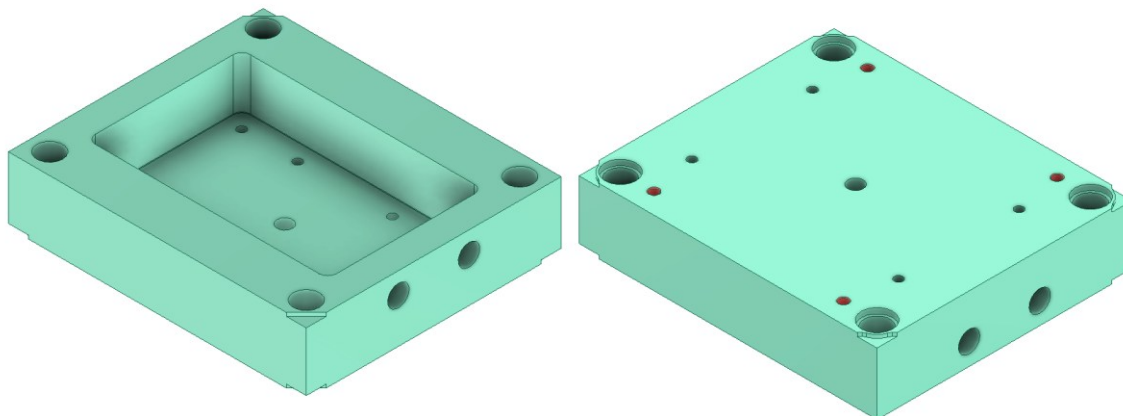
9.1.3 Tvarové desky

Tvarové desky jsou základní komponentou vstřikovací formy. Desky se dotýkají v dělicí rovině, kdy na straně vyhazovacího systému je polovina levá (spodní) a na straně vstřikovací jednotky je polovina pravá (horní). Desky slouží k upevnění tvarových vložek pro insert a zástřík, mají totiž univerzální dutinu a otvory pro temperační přípojky. Na rozích se nachází tvarové prvky pro usnadnění demontáže desek.

Tvarová deska pravá

Pravá (horní) deska slouží pro upevnění tvárnice, je to tedy situována na straně vstřikovací jednotky. Jsou v ní vedeny středící čepy a vtoková vložka. Deska má několik závitových

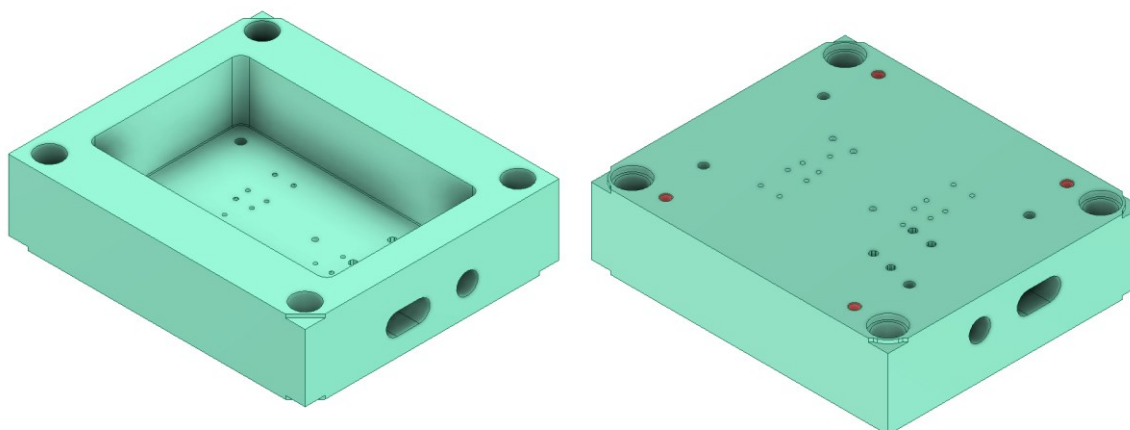
otvorů, slepé díry pro spojovací šrouby s upínací deskou a průchozí závitové díry pro montáž jednotlivých tvarových vložek.



Obr. 41 Tvarová deska pravá (horní)

Tvarová deska levá

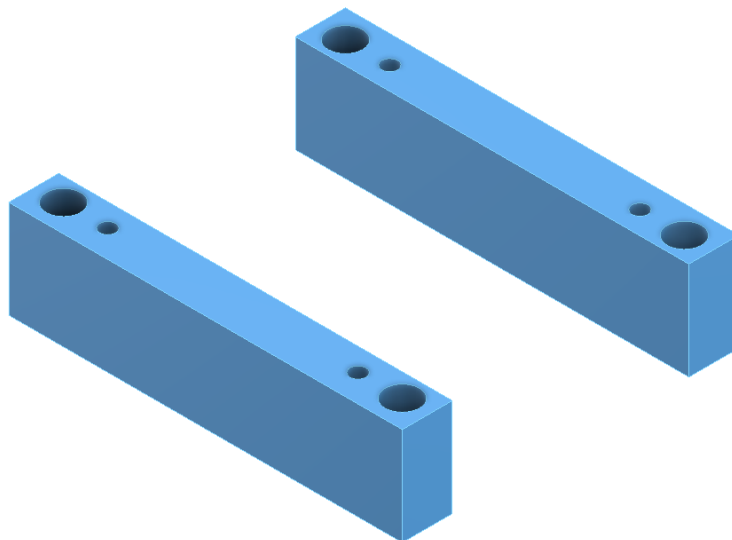
Levá (spodní) deska má dutinu pro montáž tvárníků uchycených šrouby do závitových děr na dně dutiny. V rozích obsahuje otvory pro pouzdra vodících čepů a také jsou zde zhotoveny demontážní tvarové prvky. Na jejím boku je vyfrézovaná drážka a kruhový otvor přípojky temperace. Ve spodní části jsou závitové otvory spojovacích šroubů, které drží celou levou stranu pohromadě. Na dně dutiny jsou rozprostřeny průchozí otvory všech vyhazovačů obou tvarových vložek.



Obr. 42 Tvarová deska levá (spodní)

9.1.4 Rozpěrné desky

Dvě rozpěrné desky vymezují prostor pro pohyb vyhazovacího systému. Obsahují otvory pro vedení středících trubek, spojovacích šroubů a pouzder středících čepů. Výška desky je 86 mm, délka 346 mm a šířka 44 mm.



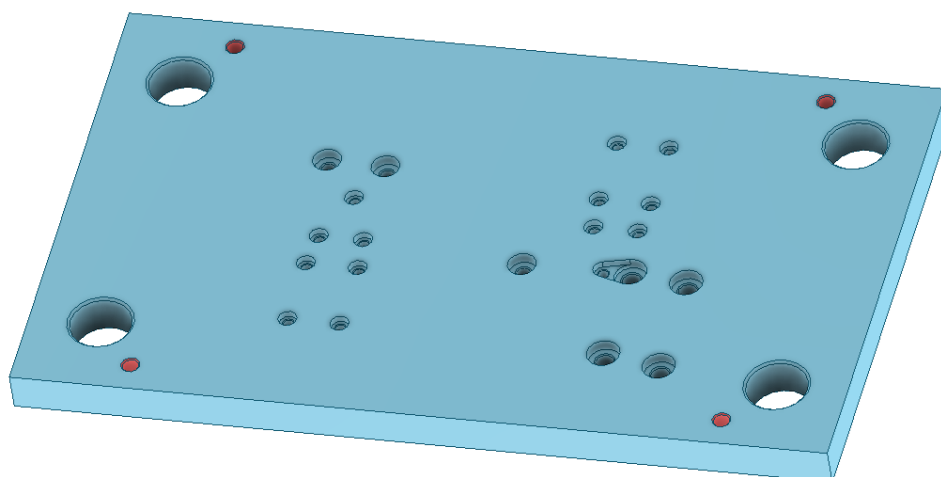
Obr. 43 Rozpěrné desky

9.1.5 Desky vyhazovacího systému

Desky vyhazovacího systému ukotvují jednotlivé vyhazovače a přenášejí pohyb vyhazovací jednotky. Jsou opatřeny otvory pro pouzdra, která jezdí po vodících čepech upevněných v upínací desce.

Vyhazovací deska kotevní

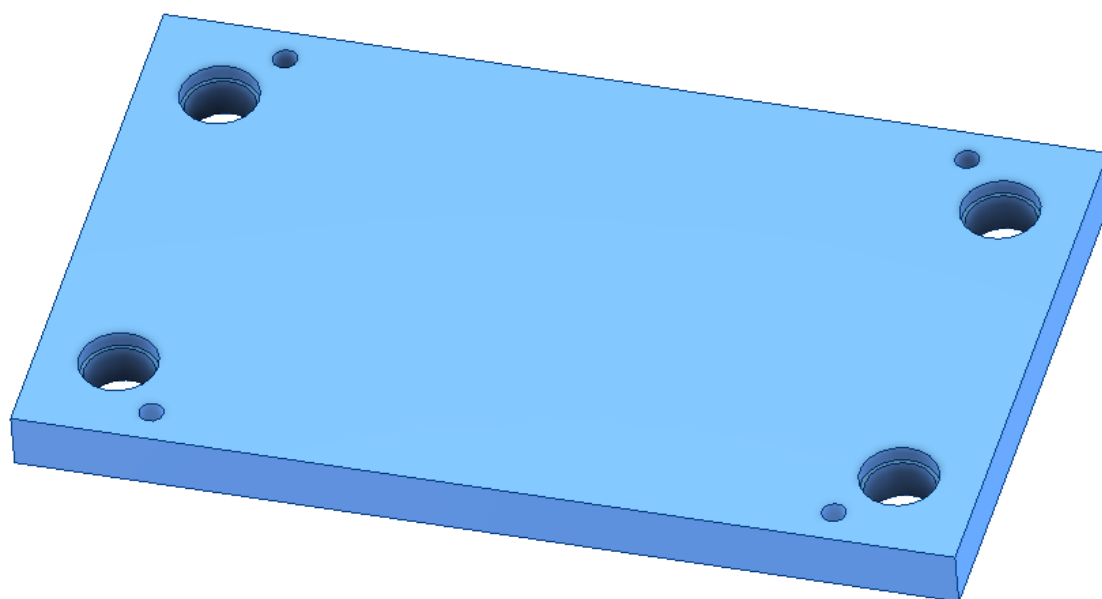
Kotevní vyhazovací deska má vybrání pro vložení jednotlivých vyhazovačů. V desce se nachází otvory jak pro vyhazovače insertu, tak pro vyhazovače zástříku. Je tedy možné pouze vyměnit vyhazovače při přechodu na jinou tvarovou vložku. Závitové díry v rozích desky slouží k přišroubování opěrné desky.



Obr. 44 Vyhazovací deska kotevní

Vyhazovací deska opěrná

Opěrná deska vyhazovacího systému slouží jako pevná základna pro vyhazovače a brání jejich vypadnutí. Jsou v ní vedeny vodící čepy a jsou na ní namontovány dorazy vyhazovacího systému.



Obr. 45 Vyhazovací deska opěrná

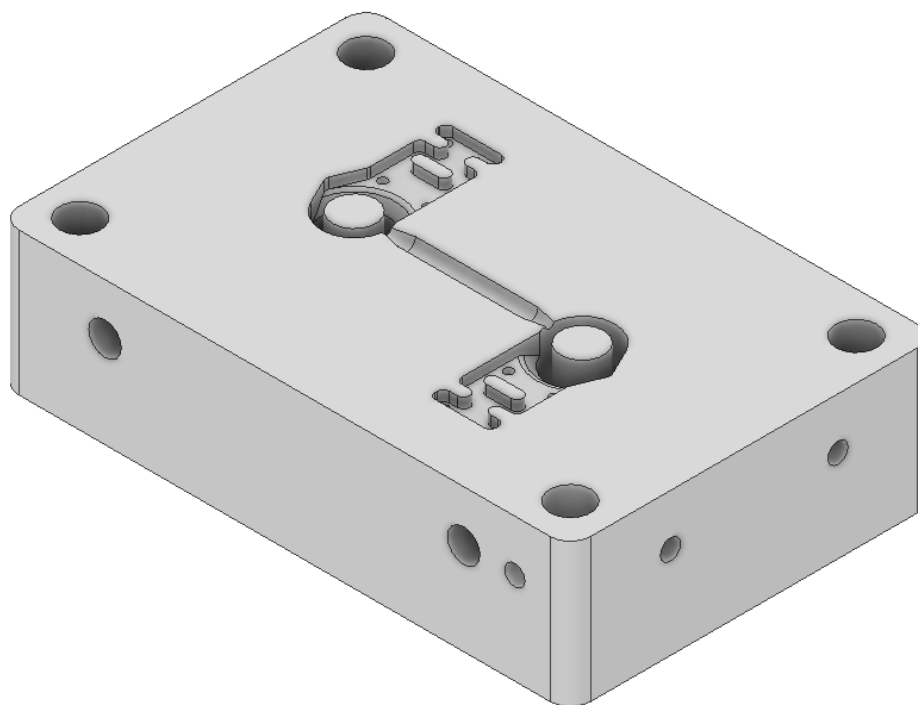
9.2 Tvarové vložky insertu

Plastovým insertem je trubkovitý tvar s plochým výběžkem z jeho středu pro následné zastříknutí. Insert je vyroben z PA6 a je plněný 30 % skelných vláken (viz příloha P VI).

Z CAD modelu insertu je vypočítán jeho objem v programu Inventor Professional 2025, který činí **40,55 cm³**. V technických parametrech vstřikovacího stroje je uváděn maximální teoretický objem vstřikované dávky taveniny **173,2 cm³**. Je patrné, že stroj by měl kapacitu na vstřikování čtyř dílů najednou, což činí **162,2 cm³**. To však rozměrově nevychází do zvoleného bloku a nepočítá s vtokovým systémem. Trojnásobná vložka také nevyhovuje rozměru bloku, tudíž byla zvolena vložka dvojnásobná. Objem dvou dílců s příslušným studeným vtokovým systémem dle CAD modelu činí **86,85 cm³**. Vložky jsou vyrobeny z nástrojové oceli 1.2343 (ČSN 19 552), která se běžně používá v těchto aplikacích. Pro zvýšení životnosti a ořezuvzdornosti jsou vložky kaleny a následně popouštěny. Vzhledem k složitosti a hloubce tvarových dutin je potřeba elektrojiskrového obrábění.

9.2.1 Tvárník insertu

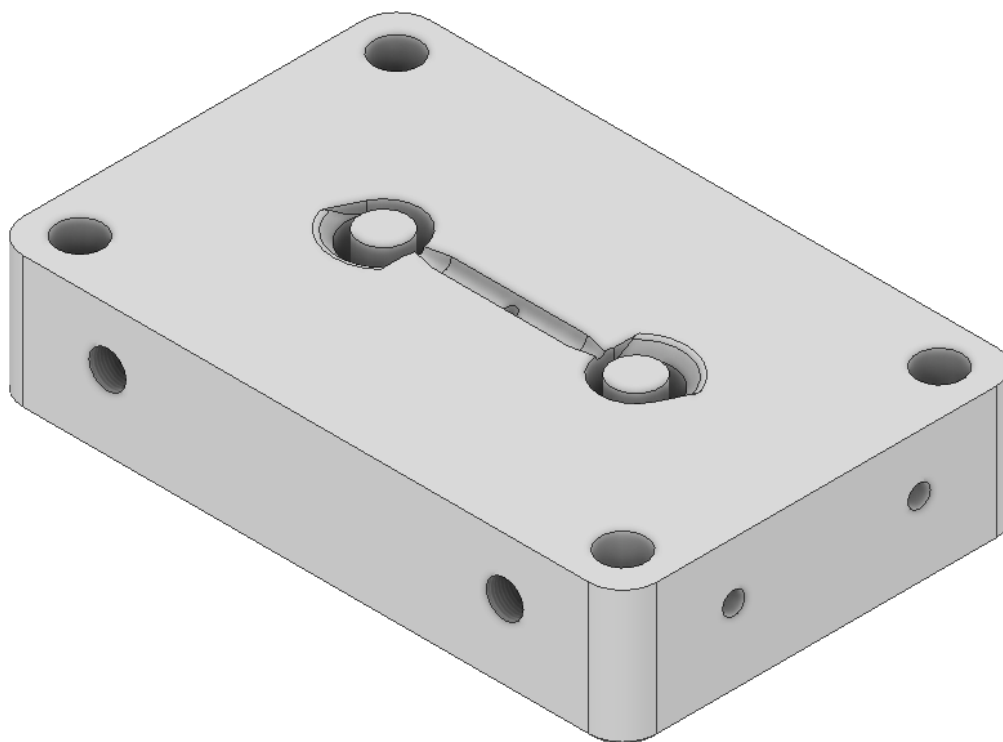
Tvárník má tvar bloku o rozměrech 280x180x70 mm. Středem tvárníku je veden půlkruhový rozvodný kanál navazující na dvě dutiny trubkovitého tvaru, přičemž součástí tvárníku je i část dutiny, formující plochou packu pro následné zastříknutí. Na dutinu je celkem napojeno 14 otvorů pro vyhazovače. V rozích bloku se nachází díry pro upevňující šrouby. Temperace tvárníku je identická s okruhem ve tvárnici.



Obr. 46 Tvárník insertu

9.2.2 Tvárnice insertu

V bloku 280x180x60 mm je uprostřed vyfrézovaná díra pro vtokovou vložku, na kterou navazuje kanál průměru 5,5 mm pokračující do rozvodného kanálu vtokového systému. V tvárnici je vyfrézována polovina kruhového rozvodného kanálu o průměru 8,5 mm. Vtokové ústí se zužuje do 4 mm otvoru po délce 10 mm do tvarové dutiny. Celkem se v tvárnici nachází dvě tvarové dutiny, formující trubkovou část a náběh na zastříkávanou část insertu. Pro upevnění tvárnice do tvarové desky jsou zde zhotoveny díry pro šrouby s válcovou hlavou. Jeden otvor pro šroub se kryje s temperačním kanálem, což by nemělo být problémem, jelikož touto částí neproudí médium a pouze je zde umístěna záslepka.

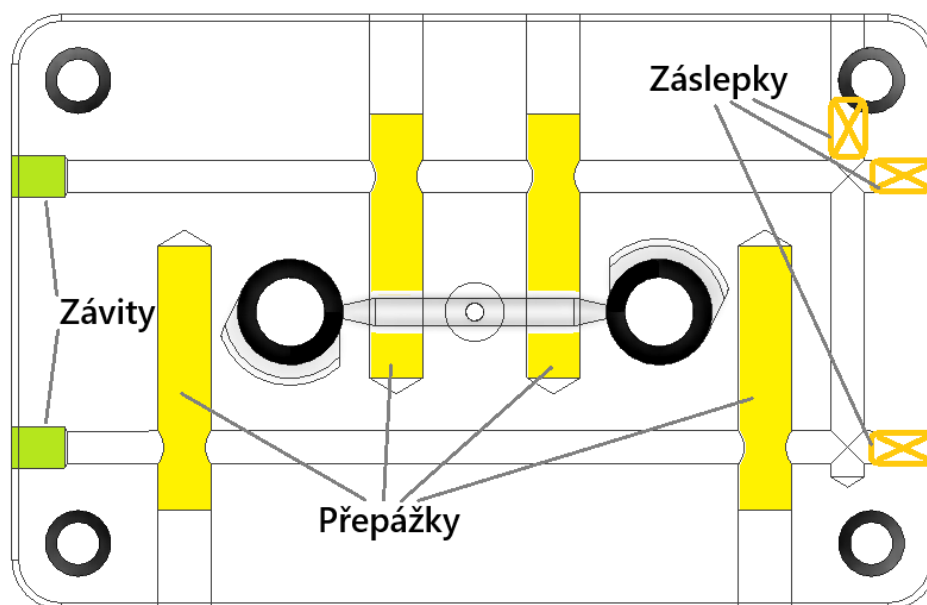


Obr. 47 Tvárnice insertu

9.2.3 Temperace tvárnice a tvárníku insertu

Temperace obou tvarových vložek je identická. Je to systém rozvodných kanálů, na kterých leží horizontální kanály s přepážkami. Tyto přepážky odebírají teplo od stěn tvarových dutin. Průměr kanálů je 10 mm a otvorů pro přepážky 16 mm. Vrtané díry pro přepážky jsou hluboké 110 mm a je v nich zhotoven závit M18x1,5 v délce 30 mm od počátku díry. Okruhy se nachází v jedné rovině a to 25 mm směrem od dělicí roviny. Vstup a výstup okruhu je

opatřen závity M14x1,5 do hloubky 10 mm s přeběhem 6 mm. Pro uzavření okruhu je třeba tří záslepek E20725/10 a čtyř přepážek E21000/18/150.



Obr. 48 Grafické znázornění temperace tvarových vložek insertu

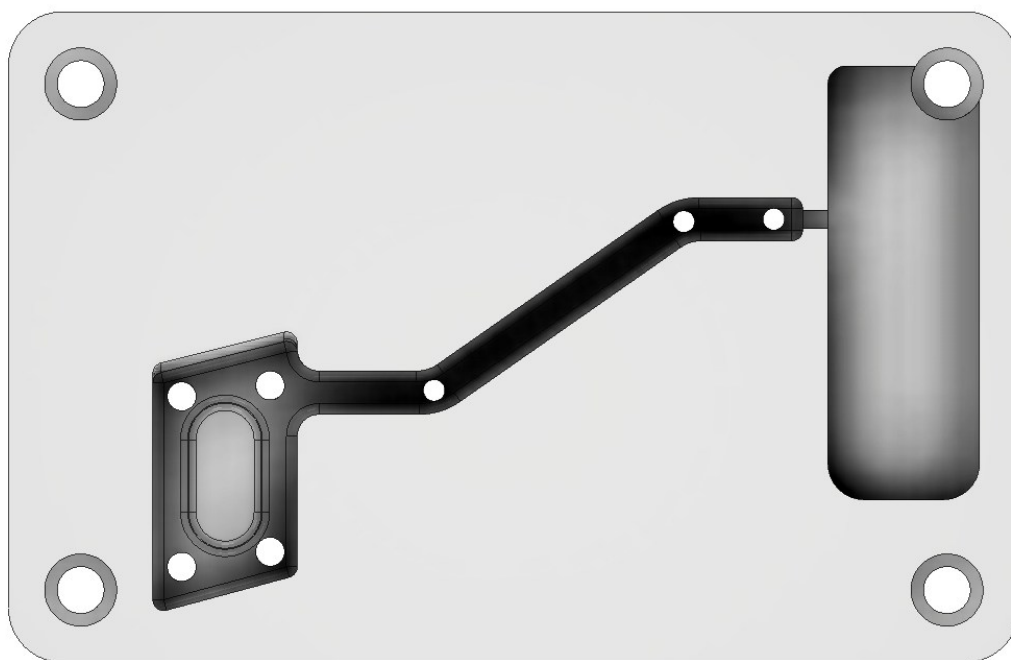
9.3 Tvarové vložky zástříku

Vložky pro zastříknutí insertu do PVC (viz příloha P V) jsou navrženy s důrazem na jednoduchost konstrukce, montáže a obsluhy. Vzhledem ke kapacitě stroje a maximálním rozměrům formy obsahují pouze jednu tvarovou dutinu. Vložky jsou vyrobeny z hliníku Alumec 89 a kvůli korozivním a leptacím vlastnostem PVC jsou tvrdě eloxovány, což zvyšuje jejich životnost.

9.3.1 Tvárník zástříku

Tvárník je zhotoven z hliníkového bloku o rozměrech 280x180x70 mm. Tvarová dutina je přibližně vystředěna na střed bloku. Dutina sahá do hloubky 37 mm po celé ploše. V tvárníku je vyfrézována kapsa pro uložení insertu, zvětšena o prostor pro manipulaci o rozměrech 120x42x33 mm. V rozích tvárníku jsou umístěny otvory pro zajišťovací šrouby sloužící pro uchycení tvárníku do tvarové desky skrze dělicí rovinu.

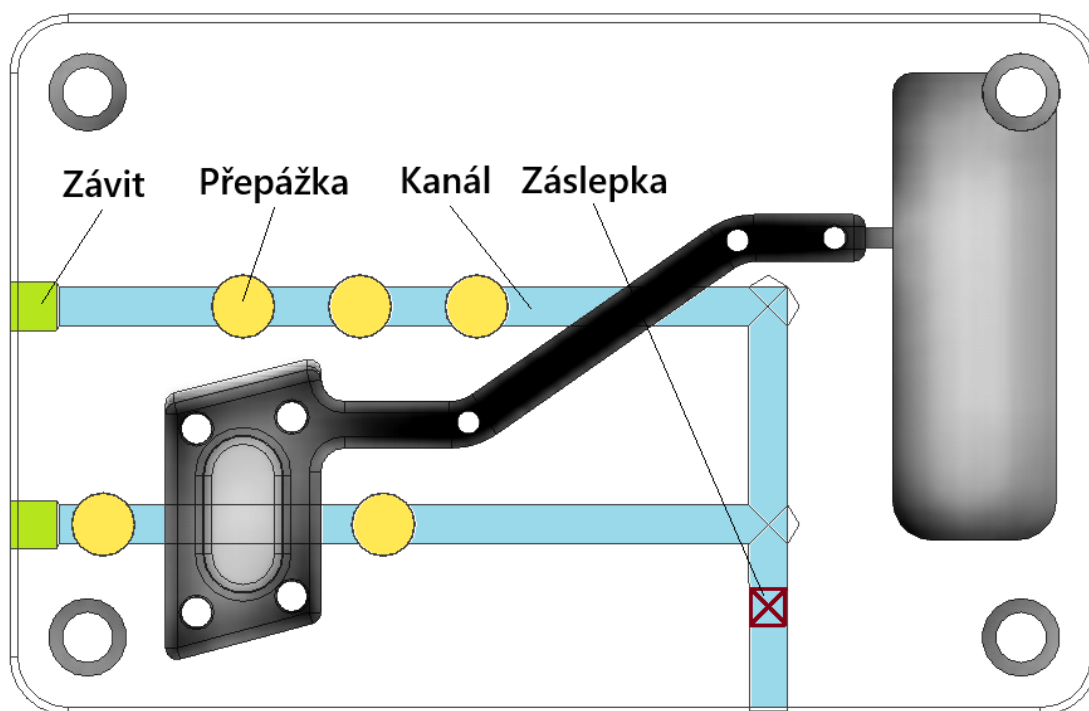
V tvárníku se nachází 4 otvory pro vyhazovače $\varnothing 8$ mm. Otvory jsou situovány v rozích dutiny, které poskytují nejvíce prostoru pro maximální plochu vyhazovače, která je potřebná pro vyhození zástříku bez poškození jeho povrchu. Spojovací část dutiny s insertem obsahuje otvory pro vyhazovače $\varnothing 6$ mm.



Obr. 49 Pohled na tvárník zástříku

Temperace tvárníku zástříku

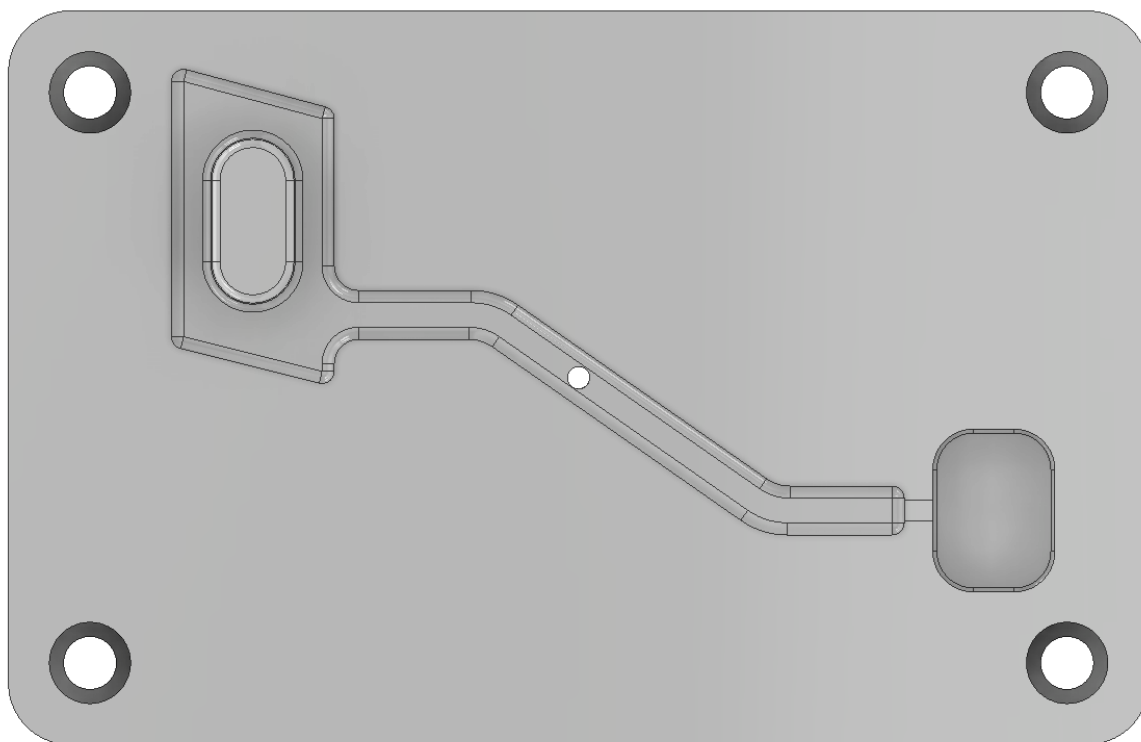
Temperace tvárníku zástříku je navržena tak, aby maximalizovala lokální odvod tepla v prostoru u nejtlustší části dutiny při minimalizaci výrobních nákladů a složitosti kanálů. Hlavní částí okruhu jsou 3 vrtané kanály, které jsou vedeny pod dutinou. Na kanály je napojeno celkem 5 přepážek, které zintenzivňují lokální chlazení v místech, kde dochází k nejpomalejšímu chlazení dle simulací. Průměr temperačních kanálů je 10 mm a průměr dutiny pro přepážku je 16 mm. Hloubka dutin pro přepážky je 60 mm a na vstupu jsou opatřeny závitem M18x1,5. Přepážky typu E21000/18/150 jsou upraveny, aby vyhovovali hloubce dutiny. Vstup a výstup temperace je opatřen závitem M14x1,5 pro přípojky typu E2016D/13/14/60. Příčný kanál je zaslepen měděnou zásepkou typu E20725/10.



Obr. 50 Grafické znázornění temperačního okruhu tvárníku zástříku

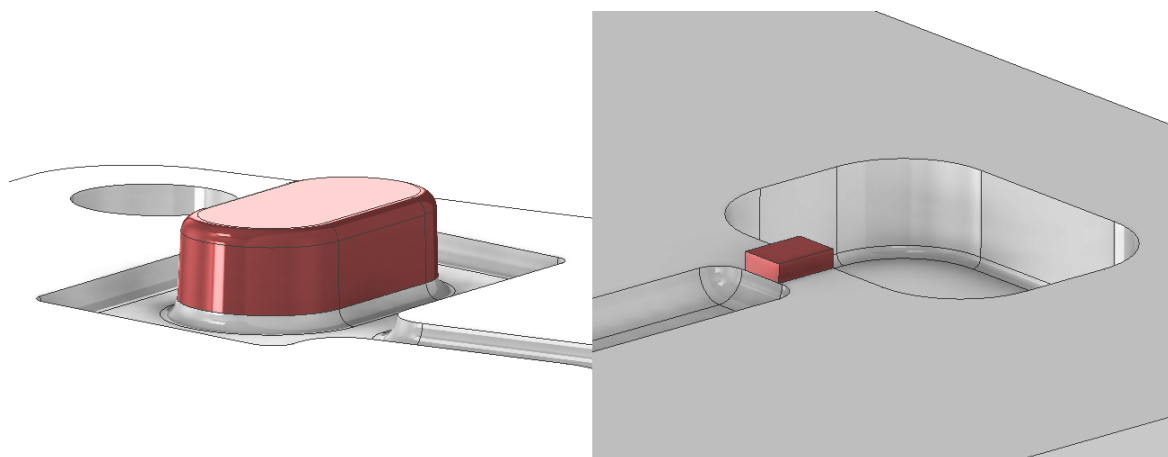
9.3.2 Tvárnice zástříku

Hlavní rozměr hliníkového bloku tvárnice je 280x180x60 mm, ale vzhledem k tomu, že tvarový prvek v dutině tvárnice formující odlehčení zástříku převyšuje plochu dělicí roviny o 9 mm, je nutné vycházet z bloku o výšce minimálně 70 mm. Tvárnice je ve svých rozích opatřena otvory pro zajišťovací šrouby do tvarové desky. Ve středu tvárnice je zhotoven otvor pro vtokovou vložku $\varnothing 18$ mm. Otvor je propojen s dutinou kanálem o průměru 5,5 mm.



Obr. 51 Pohled na tvárnici zástřiku

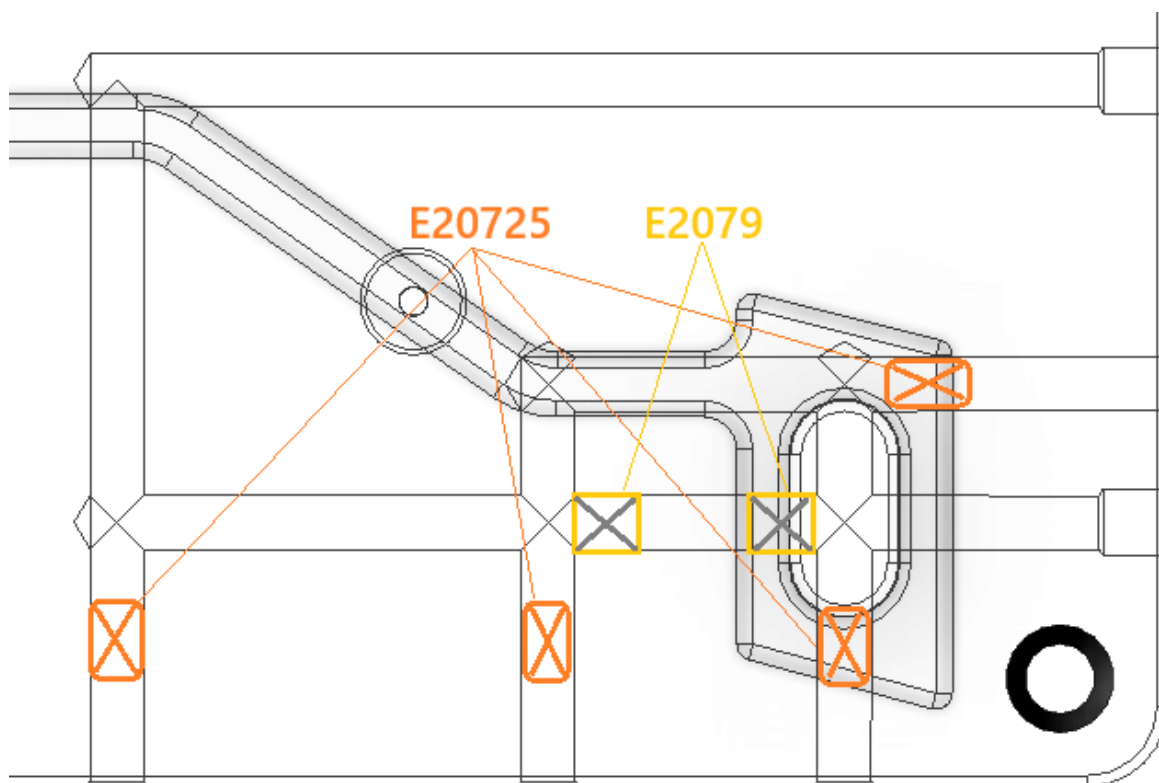
V pravé části tvárnice na obrázku 39 lze vidět kapsu, která tvoří prostor pro převyšující část insertu. Mezi kapsou a tvarovou dutinou se nachází tvarový prvek kvádrového tvaru, jehož funkcí je přidržení insertu při uzavření formy a utěsnění formy. Na obrázku níže jsou zobrazeny tvarové prvky převyšující dělicí rovinu.



Obr. 52 Detailní pohled na tvarové prvky převyšující dělicí rovinu

Temperace tvárnice zástříku

Temperační okruh tvárnice se nachází nad tvarovou dutinou v dostatečné vzdálenosti. Snaží se kopírovat tvar dutiny pro zefektivnění chladicího účinku v místech s vysokým objemem taveniny, a přitom dbá na jednoduchost. Průměr kanálů je 10 mm. Vstup a výstup temperačního média zajišťují přípojky E2000D/13/14. Okruh je utěsněn záplečkami E2079 a E20725.



Obr. 53 Schéma rozmístění ucpávek v temperačním okruhu tvárnice zástříku

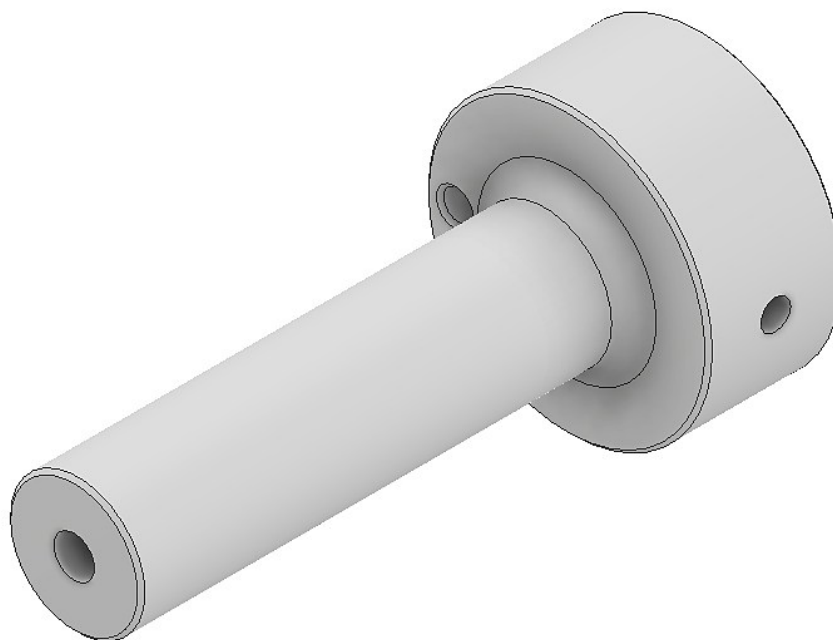
9.4 Příslušenství a komponenty

V této kapitole jsou rozvedeny a seřazeny jednotlivé komponenty formy. Jedná se především o normálie od firmy Meusburger.

9.4.1 Vtoková vložka

Pro obě tvárnice je použita vtoková vložka E1630/18x66/4. Tato vložka je převážně zvolena z důvodu většího počátečního průměru 4 mm, který je potřebný při vstřikování plněných materiálů, jako je použit u insertu. Výstupní průměr vložkového kanálu je 5,5 mm, který byl potřebný pro vstřikování do dutiny zástříku. Maximální možný průměr mohl být 6 mm,

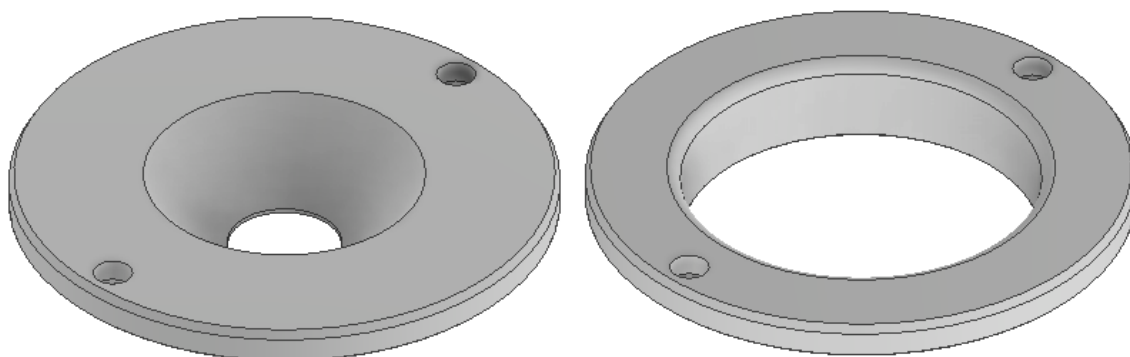
protože je to šířka plochy, na kterou je vtok umístěn. Tato vložka tedy splňuje požadavky jak pro vstřikování insertu, tak pro vstřikování zástríku.



Obr. 54 Vtoková vložka

9.4.2 Středící kroužky

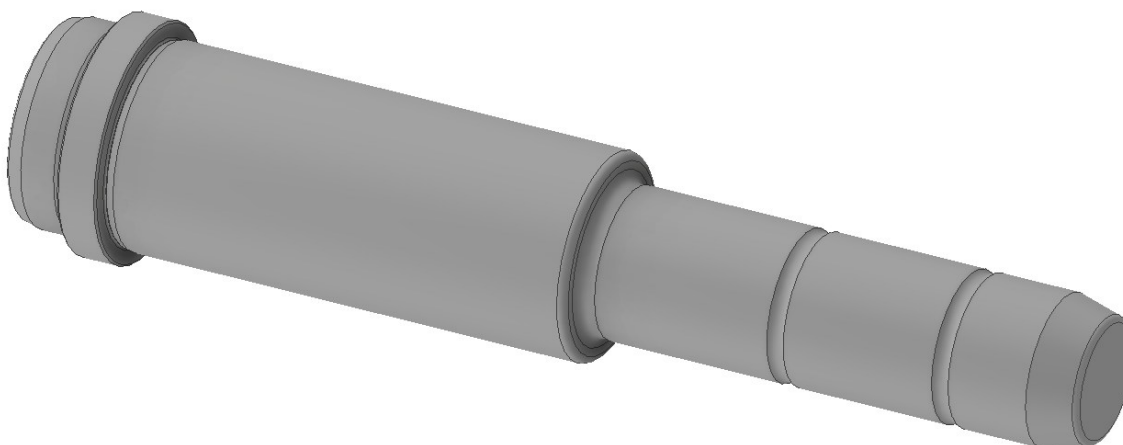
V horní upínací desce je usazen středící kroužek E1360/125/90/26x20 s vnitřním kónusem, který umožňuje přístup vstřikovací trysce a zároveň zajišťuje vtokovou vložku. Ve spodní upínací desce je pak usazen středící kroužek E1365/125/9x20 s otvorem pro přístup k vyhazovacímu paketu. Oba kroužky jsou přišroubovány do upínacích desek pomocí dvou šroubů s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem M5x30 ISO 4762.



Obr. 55 Středící kroužky

9.4.3 Vodící čepy

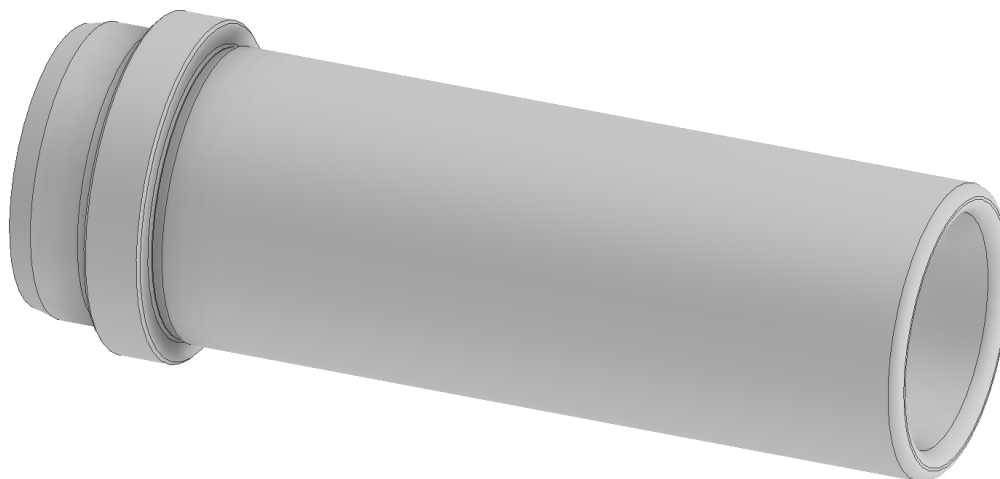
Vodící čepy neboli sloupky, středí obě poloviny vůči sobě, aby byla opakovatelně zajištěna souosost při každém cyklu. Čepy leží v horní tvarové desce a opírají se o horní upínací desku, což vytváří více prostoru pro manipulaci a vyjmutí zástřiku, jelikož se jedná o vertikální vstřikovací stroj. Jsou použity dva druhy čepů lišících se průměry E1000/22-22/75 a E1000/24-22/75, 3x průměr 24 mm a 1x průměr 22 mm. To proto, aby nedošlo k chybnému sestavení formy, jelikož ji lze správně složit jen jedním způsobem.



Obr. 56 Vodící čep formy

9.4.4 Vodící pouzdra

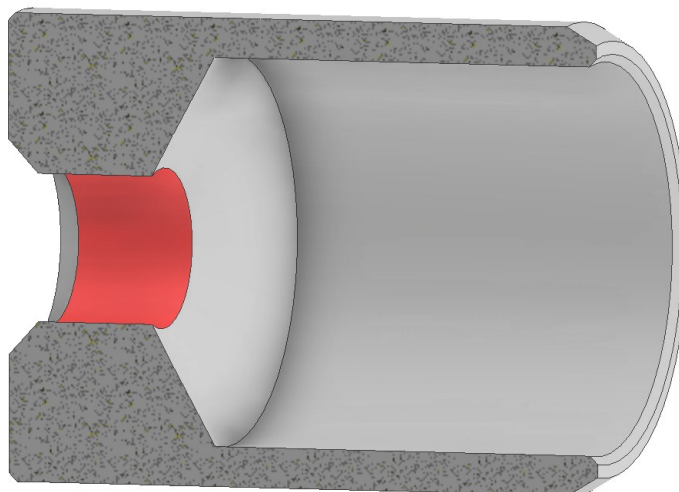
Pro oba druhy čepů jsou ve spodní tvarové desce umístěny odpovídající vodící pouzdra (1x E1100/22-86 a 3x E1100/24-86). Pouzdra jsou protikus vodících čepů a tím tvoří středící systém.



Obr. 57 Vodící pouzdro

9.4.5 Centrovací pouzdro

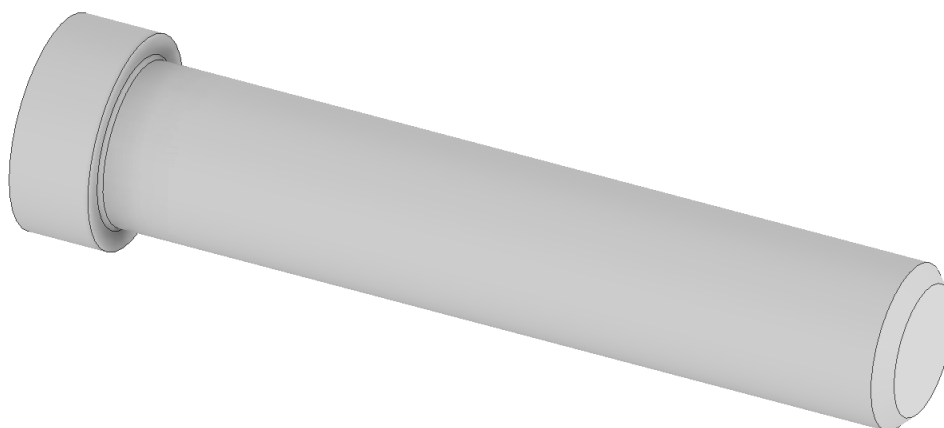
Centrovací pouzdro (E1160/30x40), také nazýváno středící trubkou, prochází spodní upínací deskou a deskami rozpěrnými. Zajišťuje jejich vzájemnou polohu. Je opatřeno závitem M12 pro případnou demontáž.



Obr. 58 Centrovací pouzdro (zobrazeno v řezu)

9.4.6 Vodící čep vyhazovací

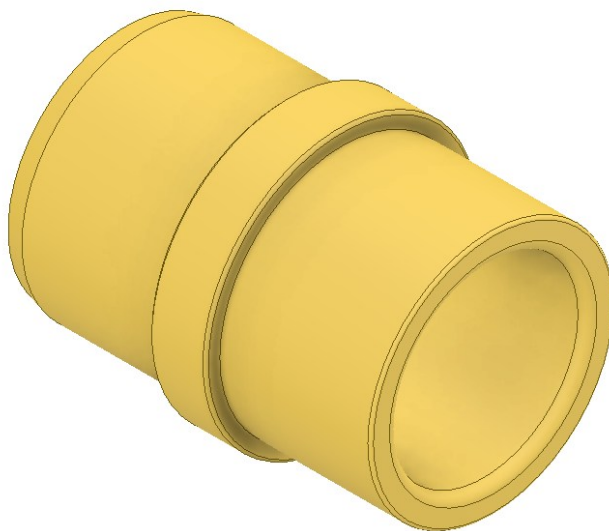
Ve spodní upínací desce jsou ukotveny 4 vodící čepy vyhazovacího paketu průměru 20 mm. Čepy zajišťují polohu a dráhu pohybu vyhazovacích desek.



Obr. 59 Vodící čep vyhazovací

9.4.7 Pouzdro vyhazovacích čepů

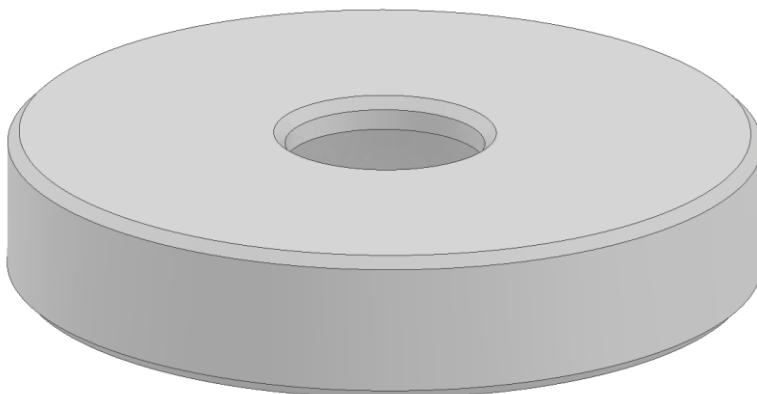
Desky vyhazovacího paketu jsou opatřeny mosaznými pouzdry E1120/20-17/22, které jezdí po vodících čepích. Pouzdra jsou ukotvena ve vyhazovací desce opěrné a opírají se o vyhazovací desku kotevní.



Obr. 60 Pouzdro vyhazovacích čepů

9.4.8 Dorazová destička pro vyhazovací paket

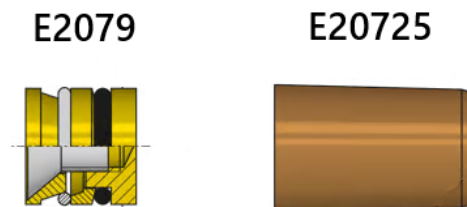
Vyhazovací paket se ve výchozí poloze opírá o upínací desku přes čtyři vyhazovací destičky E1500/20x4. Mezi těmito dvěma deskami vymezují destičky 4 mm vysokou mezeru a mají průměr 20 mm.



Obr. 61 Dorazová destička vyhazovacího paketu

9.4.9 Záslepky

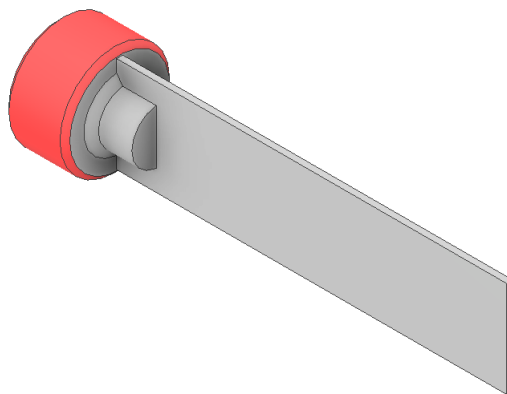
Pro obě dvojice tvarových vložek je použito 11 kusů měděných ucpávek E20725/10. V okruhu tvárnice zástříku se nachází dva kusy ucpávek E2079/10.



Obr. 62 Záslepky

9.4.10 Přepážky

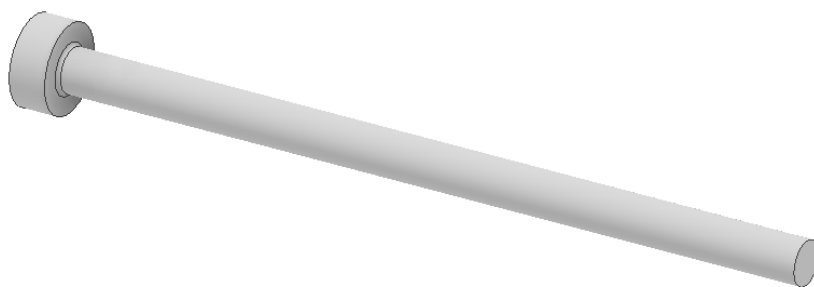
Tvárník zástříku a obě tvarové vložky insertu obsahují záslepky typu E21000/18/150. Pět kusů těchto přepážek je zkráceno na délku přepážky 32 mm pro okruh tvárníku zástříku. Osm přepážek pak na délku 64 mm pro obě tvarové vložky insertu.



Obr. 63 Přepážka rovná

9.4.11 Vyhazovače

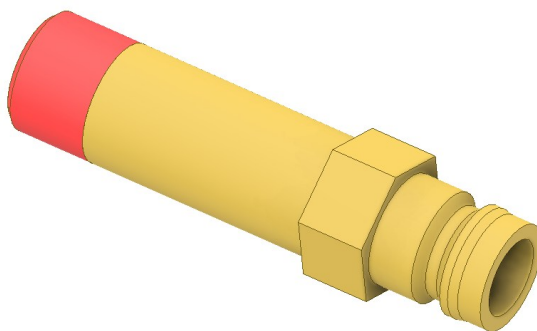
Sestava formy obsahuje 3 typy 4 typy vyhazovačů. Pro tvárník zástříku jsou to vyhazovače E1710, kde jsou 3 kusy o průměru 8 mm a 3 kusy s průměrem 6 mm. Jeden vyhazovač pro odvzdušnění E1770 průměru 8 mm. Pro tvárník insertu je zde 14 kusů vyhazovačů E1710 průměru 4,5 mm různých délek.



Obr. 64 Kruhový vyhazovač

9.4.12 Přípojky

Přípojky slouží k propojení temperačních hadic s tvarovými vložkami. Každá vložka je osazena dvěma prodlouženými přípojkami E2016/13/14/60.



Obr. 65 Přípojka

9.4.13 Spojovací prvky

Komponenty formy jsou navzájem sestaveny pomocí spojovacího materiálu.

Šrouby s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem ISO 4762

M12x35-Čtyři šrouby spojující horní upínací desku s horní tvarovou deskou.

M12x125-Čtyři šrouby držící spodní polovinu formy, ukotveny v upínací desce spodní, vedoucí skrz rozpěrné desky a následně našroubovány do spodní tvarové desky.

M8x25-Čtyři šrouby spojující vyhazovací desku kotevní s vyhazovací deskou opěrnou.

M5x30-Dva šrouby pro každý středící kroužek, zajišťující jeho pozici.

M12x30-Osm šroubů upevňující tvarové vložky v tvarových deskách.

Šrouby se zápusťnou hlavou a vnitřním šestihranem ISO 10642 (DIN 7991)

M8x20-Osm šroubů pro montáž izolačních desek na upínací desky.

10 ANALÝZA MOLDFLOW

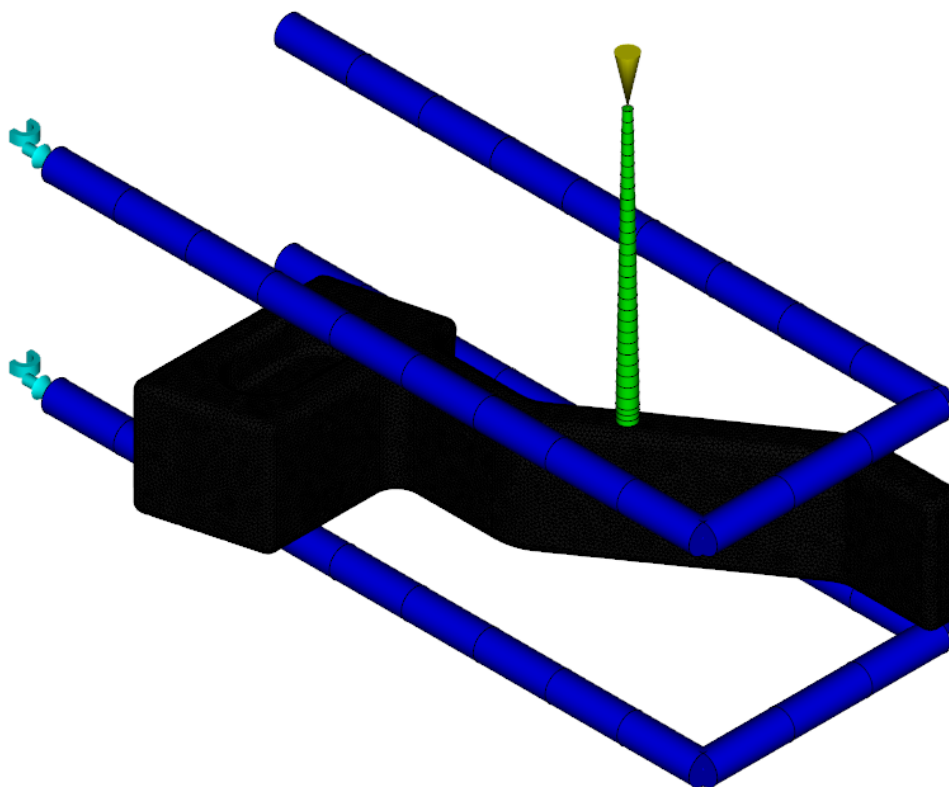
Cílem simulací je ověřit funkci temperačních okruhů a získání informací pro nastavení procesu. Byl použit program Moldflow Synergy 2024 od firmy Autodesk.

10.1 Návrh temperačních okruhů

Temperační okruhy jednotlivých tvarových vložek byly původně navrženy čistě intuitivně. Tyto okruhy bylo třeba ověřit simulací v programu Autodesk Moldflow Synergy 2024. Požadavkem temperačních okruhů byla jednoduchost jejich výroby a přijatelná efektivita chlazení. Ta je určena časem potřebným pro dosažení vyhazovací teploty a procentem zatuhnutí vrstvy.

10.1.1 Prvotní návrh temperačního okruhu pro zástřík

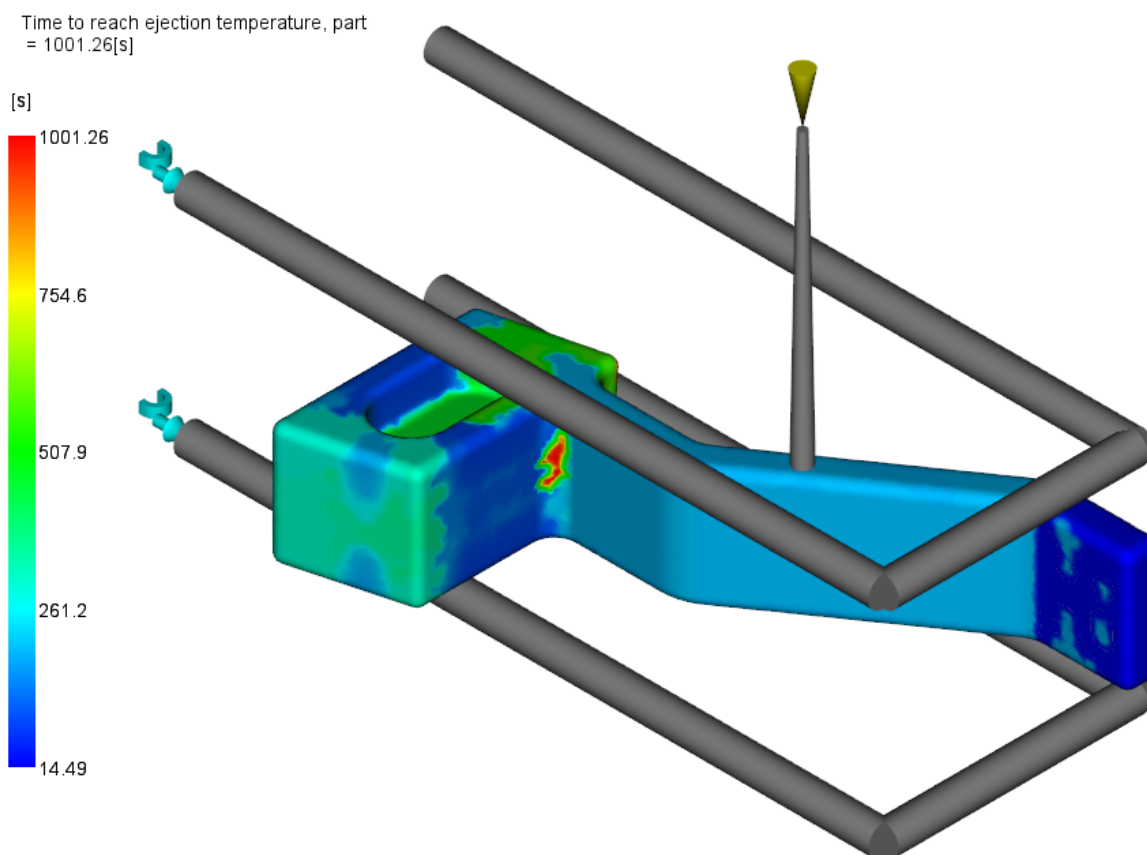
Nejprve byl navržen jednoduchý temperační okruh, skládající se ze dvou podélných a jednoho příčného kanálu. Tento okruh byl identický v obou tvarových vložkách. Jeho cílem bylo pokrýt obě tvarové vložky polem odebírající teplo pod a nad tvarovou dutinou, přičemž by splňoval jednoduchost výroby.



Obr. 66 Prvotní návrh temperačního okruhu zástříku

10.1.2 Výsledky analýzy prvotního okruhu

Po zhotovení analýzy cool + fill + pack + warp byly analyzovány výsledky. Bylo zjištěno, že okruh neposkytuje dostatečně rychlý odvod tepla, a to podle analýzy time to reach ejection temperature, kde je pro vyhození zástříku požadována časová prodleva 1001 s.



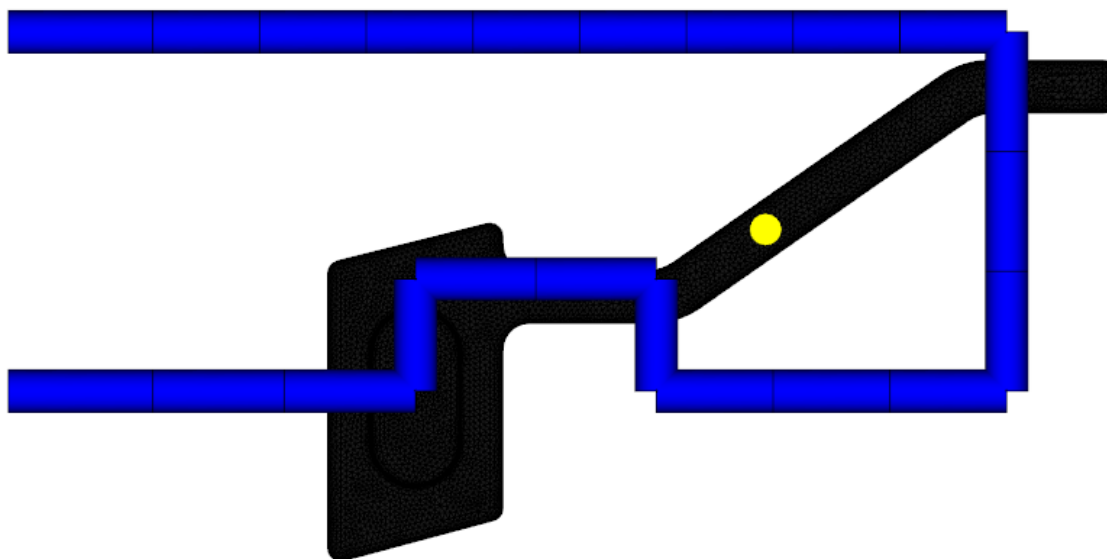
Obr. 67 Čas pro dosažení vyhazovací teploty zástříku u prvotního okruhu

Výsledky ukazují, že důvodem takto vysokého času jsou místa, kde je nahromaděno nejvíce materiálu. Takto dlouhá doba chlazení není ekonomická a ani vhodná pro proces vstřikování. Je proto nutné temperační okruh optimalizovat a zavést lokální chlazení v červeně vyznačených místech na obrázku výše.

10.1.3 Optimalizovaný temperační okruh

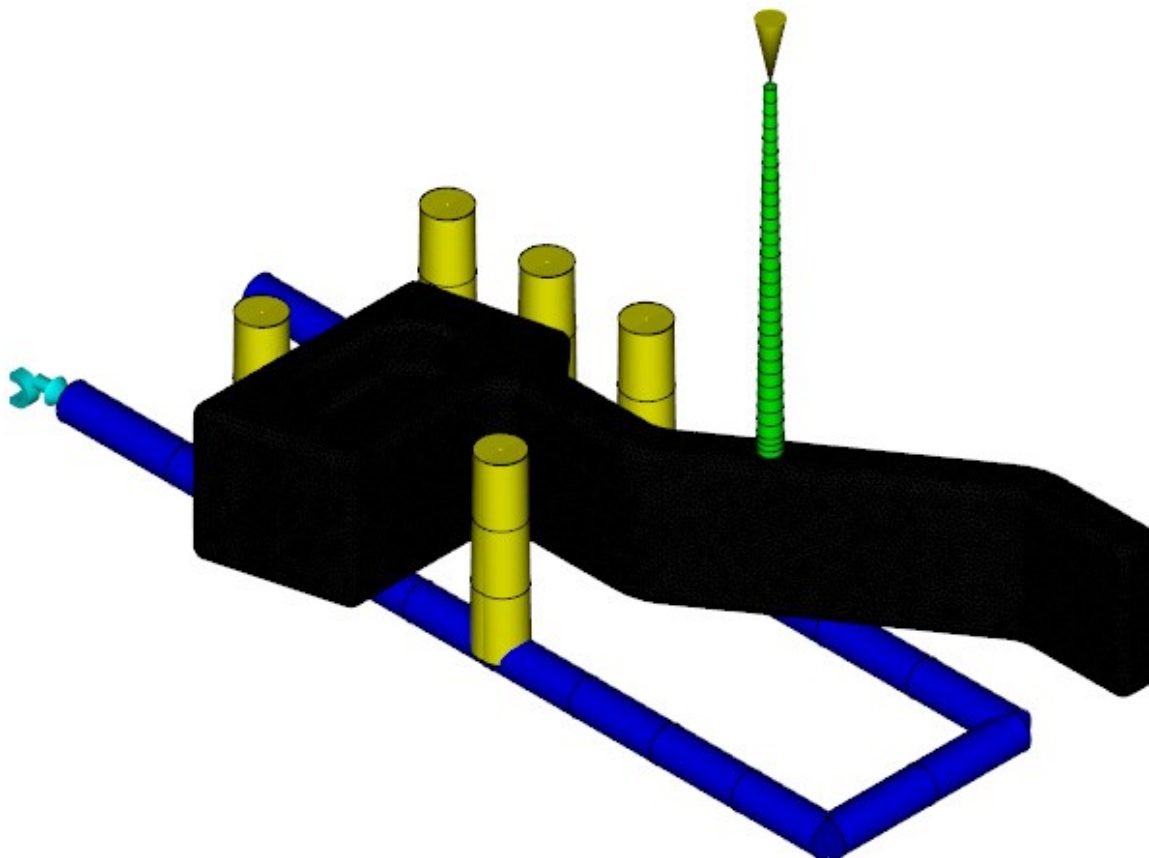
Po získání a vyhodnocení výsledků z prvotní analýzy bylo nutné okruh optimalizovat a re-designovat, protože čas pro vyhození dílce byl nepříjemně vysoký. Výsledky odhalily problematická místa v dutině, kde chlazení není efektivní a čas potřebný pro vyhození dílce dosahuje hodnot tisíce sekund.

Okruh vedený v tvárnici byl zachován, avšak došlo k implementaci krátkého kanálkového vychýlení, vedeného nad problematickými místy dutiny z důvodu maximalizace teplosměnné plochy. Tvárnice má otvory pro montážní šrouby a je v ní zasazena vtoková vložka, tudíž bylo třeba respektovat minimální vzdálenost mezi stěnou kanálu a těmito prvky. Minimální vzdálenost pro kanál o průměru 10 mm činí 8 mm mezi stěnami.



Obr. 68 Temperační okruh tvárnice zástříku

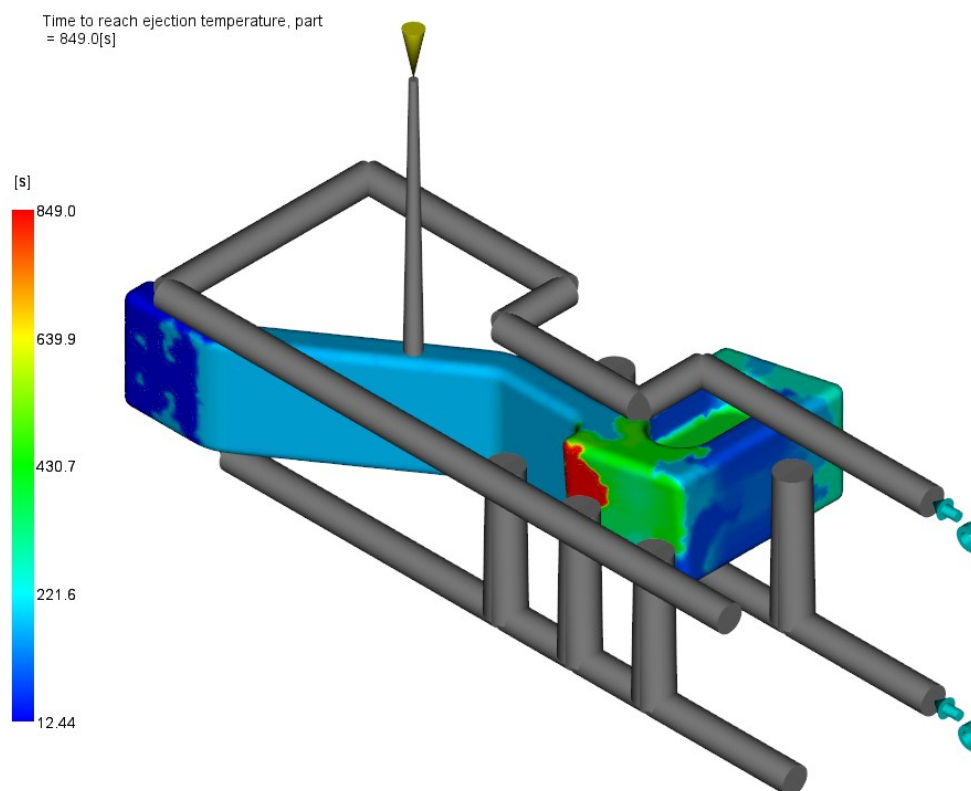
Optimalizace okruhu tvárníku byla provedena převážně rozmístěním vertikálních přepážek do blízkosti kritických míst jakožto lokální chlazení. Průměr kanálu je 10 mm a průměr přepážky 16 mm. Přepážka má oproti kanálu větší průměr, jelikož funguje jako dva kanály vedle sebe. Prostor, kterým médium přepážkou protéká tak musí být co nejvíce velikostně podobný kanálům, aby byl pro médium zajištěn co nejsnadnější průtok. Také zde platí pravidlo o minimální vzdálenosti stěn dutin. Vedení okruhu je značně omezeno rozmístěním vyhazovačů a děr montážních šroubů. Výstupní podélný kanál byl směrem ku středu pro přiblížení třech po sobě jdoucích přepážek k dutině.



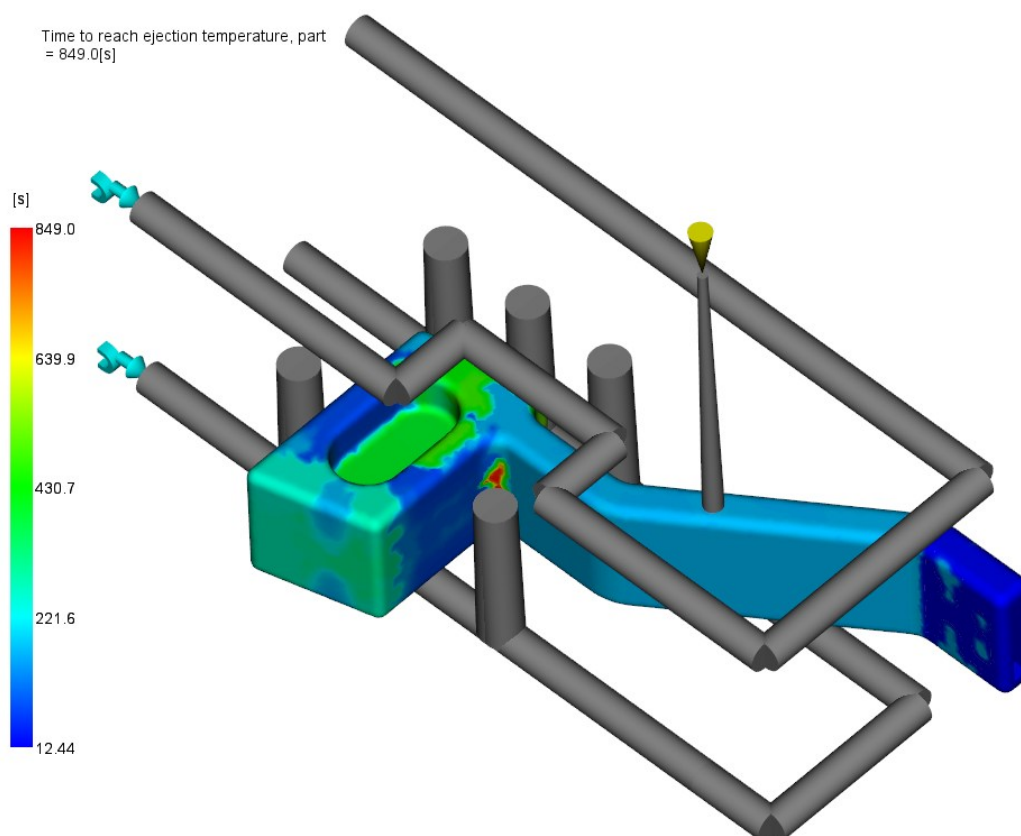
Obr. 69 Temperační okruh tvárníku zástříku

10.1.4 Výsledky optimalizovaného okruhu

Pro tento okruh byla vyhodnocena analýza cool + fill + pack + warp. Cílem analýzy bylo ověřit, zda optimalizovaný temperační okruh přináší vhodnější chladicí účinek a jaký je efekt přidání přepážek v místech s nejtlustší stěnou. V ideálním případě by byl výrazně snížen čas pro dosažení vyhazovací teploty zástříku, tudíž 62°C.



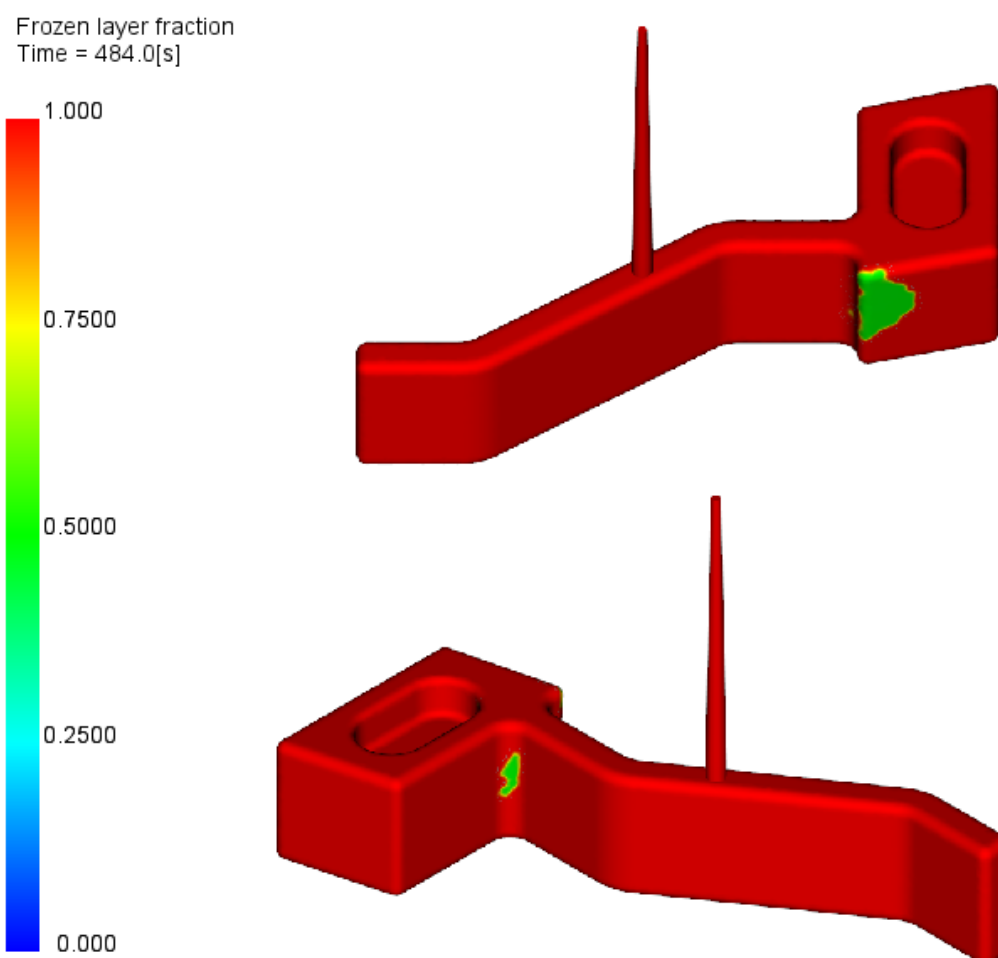
Obr. 70 Zobrazení výsledku času pro dosažení vyhazovací teploty zástříku (zadní část)



Obr. 71 Zobrazení výsledku času pro dosažení vyhazovací teploty zástříku (přední část)

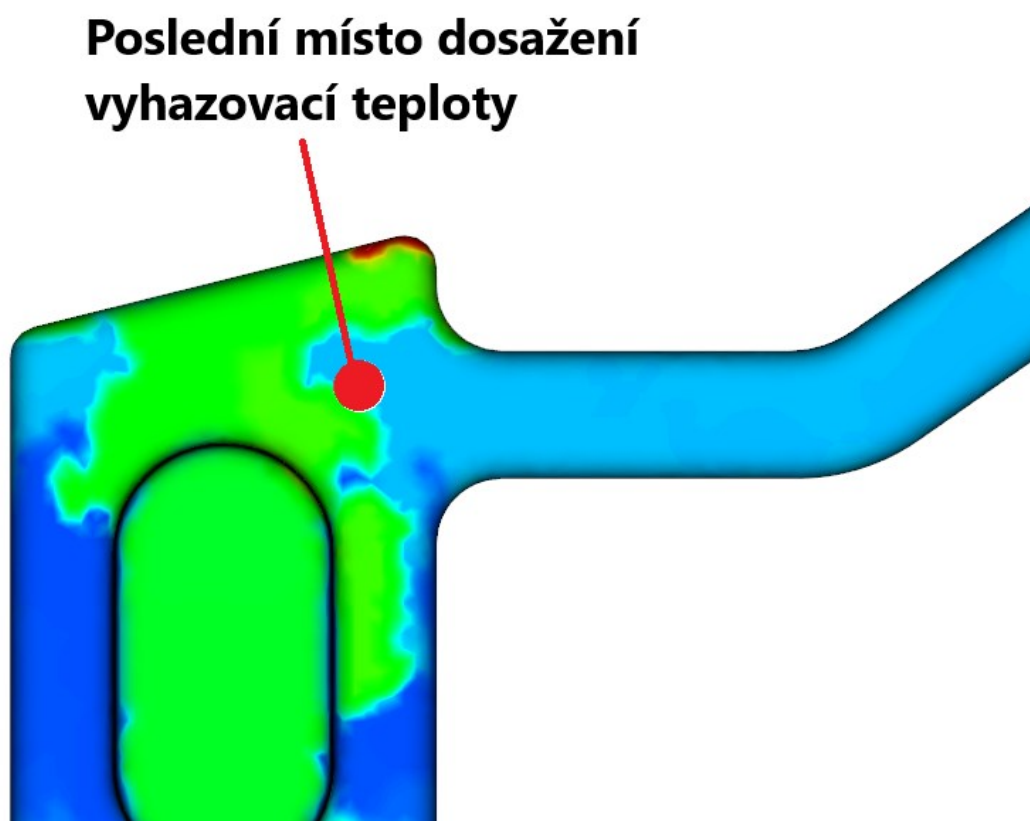
Z výsledků času pro dosažení vyhazovací teploty je patrné, že umístění přepážek do míst s největším množstvím materiálu za účelem jejich rapidnějšímu chlazení, nemělo požadovaný efekt. To však nemusí být zcela pravda, jelikož přepážky tvoří pole, které odebírá teplo z širšího okolí, tudíž došlo k výraznějšímu chlazení celého objemu, nežli pouze chlazení požadovaných míst. Tento fakt je podpořen i výsledkem samotného času, kdy poklesl o zhruba 150 s. Optimalizovaný temperační okruh tedy odvádí teplo výrazně efektivněji. V místech s největším množstvím materiálu je potřeba 849 s pro dosažení vyhazovací teploty, což je stále v rámci vstřikovacího procesu nepřijatelná hodnota.

Výsledek frozen layer fraction zobrazuje procento zatuhlé tloušťky stěny v daném místě. Na obrázku zobrazeném níže lze vidět, že již v čase 484 s je celý objem součásti zatuhlý, až na kritická místa (zeleně vyznačená).



Obr. 72 Zobrazení procenta zatuhlé vrstvy na zástřiku

V porovnání s výsledkem času potřebného pro vyhození se časy liší o 365 sekund. Lze tedy říct, že příčinou dlouhého času pro vyhození jsou právě tato místa. Výpočet analýzy Time to reach ejection temperature bere v potaz zvolenou vyhazovací teplotu zadanou pro daný materiál. V případě PVC je to 62°C. Výsledek tedy zobrazuje čas, ve kterém dojde k dosažení této teploty posledního místa v objemu dutiny. V tomto případě je to místo ve středu objemu nejtlustší stěny.



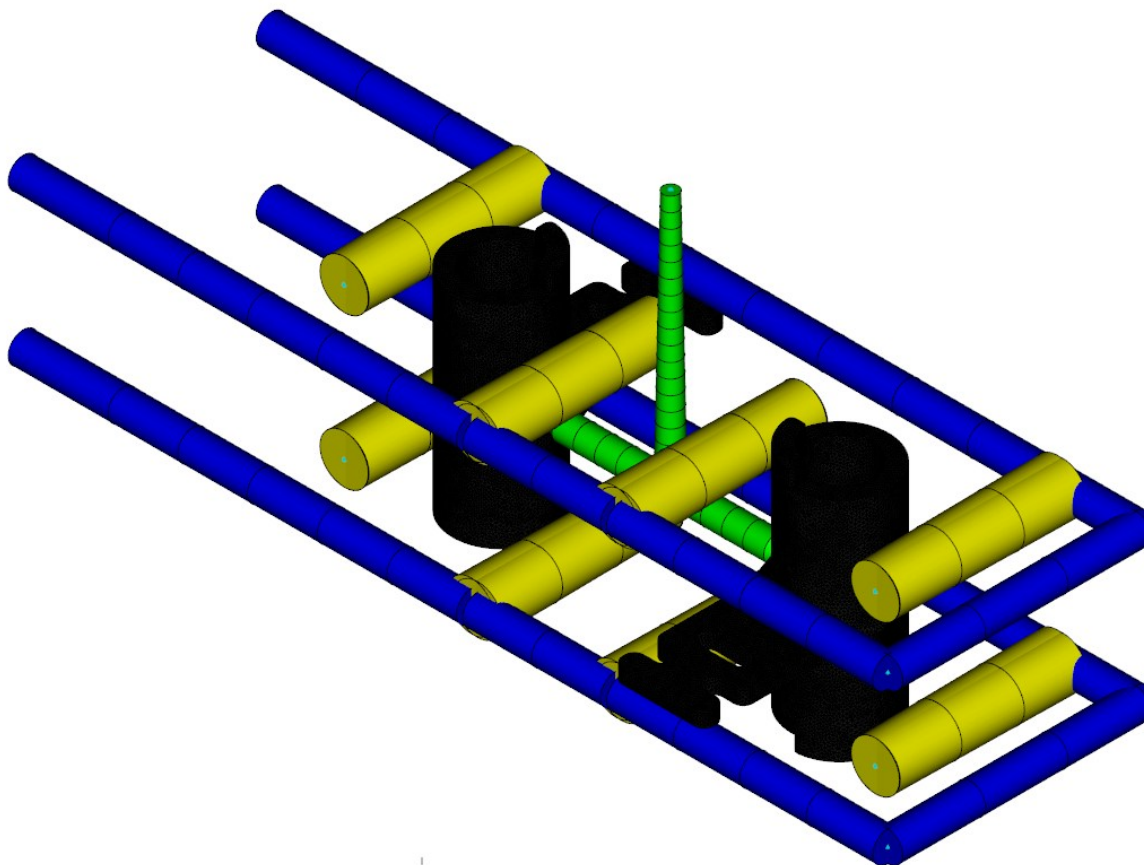
Obr. 73 Poslední místo dosažení vyhazovací teploty v objemu dutiny

Tento jev je nejspíše zapříčiněn zatuhnutím počáteční tloušťky stěny, která se při pokračujícím tuhnutí směrem do středu stěny chová jako izolační vrstva. To by vysvětlovalo výraznou prodlevu mezi zatuhnutím tohoto kritického místa a zbytkem objemu dílce.

Výsledné časy pohybující se ve stovkách sekund nejsou pro proces vstřikování z ekonomického hlediska přijatelné.

10.1.5 Návrh temperačního okruhu insertu

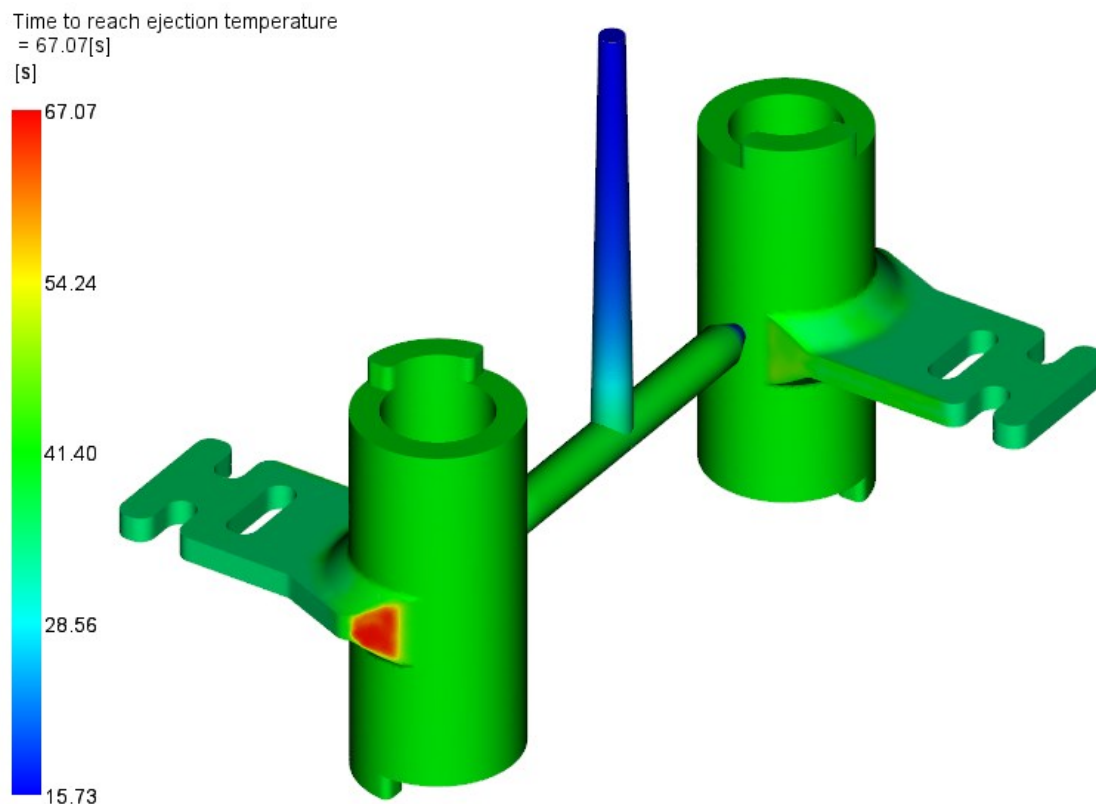
Insert je válcová součást, v jejímž středu je plochý tvarový prvek pro zástřík. Kanály jsou navrženy tak, aby co nejlépe kopírovaly kruhový tvar dutiny a tím pádem efektivně odváděly teplo. Tomu dopomáhají horizontálně položené přepážky, zasahující směrem do středu tvarových vložek. Okruh je jak v tvárnici, tak tvárníku totožný, protože dělicí rovina je umístěna téměř v polovině insertu. Dutiny v obou vložkách jsou přibližně symetrické.



Obr. 74 Temperační okruh insertu

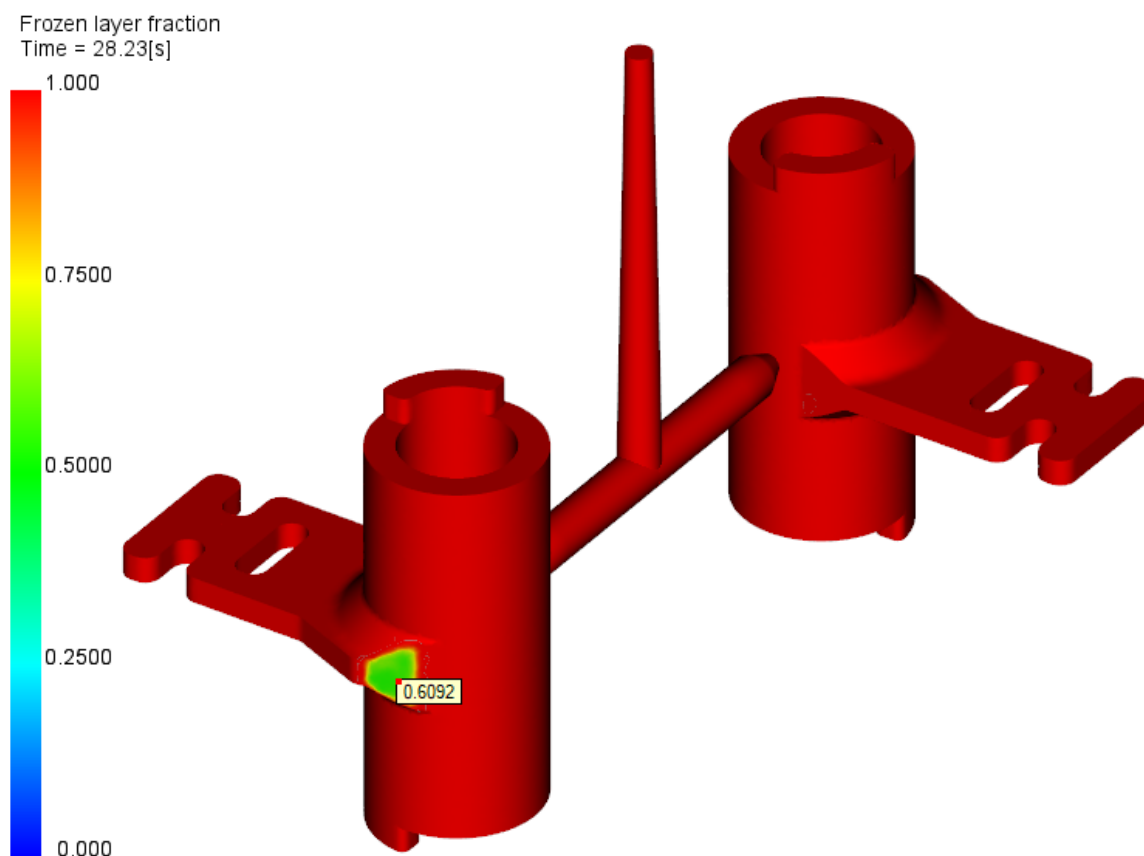
10.1.6 Výsledky temperačního okruhu insertu

Opět bylo nutné ověřit správnost navrženého okruhu z analýzy pro čas dosažení vyhazovací teploty, aby byl cyklus co nejkratší.



Obr. 75 Zobrazení času pro dosažení vyhazovací teploty insertu

Potřebný čas pro vyhození je 67,07 s. Jedná se tedy o přijatelnou délku cyklu, avšak i zde je vidět, že čas je výrazně ovlivněn jedním místem, kde se hromadí největší objem materiálu. Je tedy vhodné čas dále optimalizovat pomocí informací z výsledků analýzy procenta zatuhlé vrstvy neboli frozen layer fraction.



Obr. 76 Zobrazení procenta zatuhlé vrstvy insertu

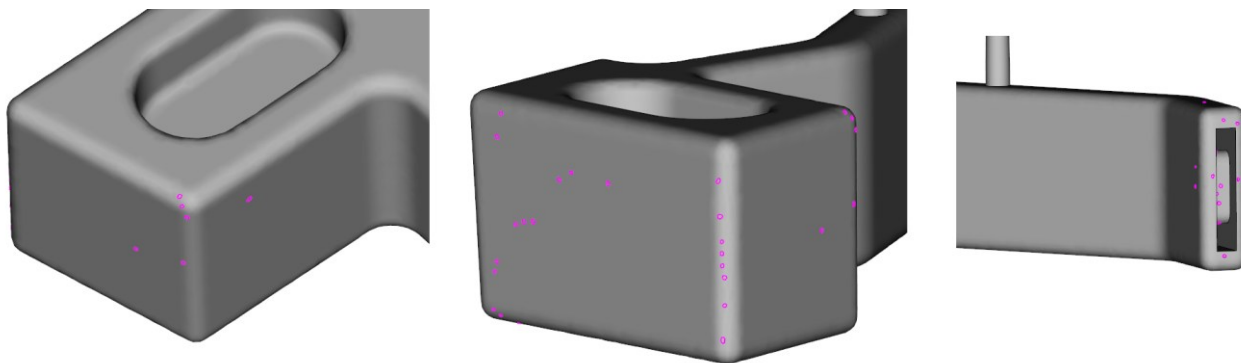
Podle očekávání je již v čase 28,23 s ztuhlý všechen materiál v dutinách, až na již zmiňovanou oblast, kde v tomto čase ztuhlých 60 % tloušťky. Je tedy možné inserty vyhodit předčasně, přibližně v čase 30 s, avšak je potřeba brát v potaz teplotu v tomto místě, která činí přibližně 135 °C.

10.2 Odvzdušnění dutiny formy

Majoritní část zástříku je formována právě tvárníkem. V tvárníku se nachází hluboká dutina výrazného objemu, což inklinuje zachytávání vzduchu. Je vhodné alespoň částečně tyto místa eliminovat odvzdušněním formy. K tomuto účelu budou použity odvzdušňovací vyhazovače, avšak jejich cena se pohybuje v násobcích ceny běžných vyhazovačů. Tím pádem budou odvzdušňovací vyhazovače umístěny pouze v nejkritičtějších místech dutiny. Tyto místa byla identifikována pomocí výsledků Moldflow analýzy.

10.2.1 Výsledky Air traps

Analýza výskytu vzduchových bublin neboli air traps, znázorňuje fialově místa, ve kterých se hromadí vzduch při plnění dutiny a tvoří vzduchové mezery.

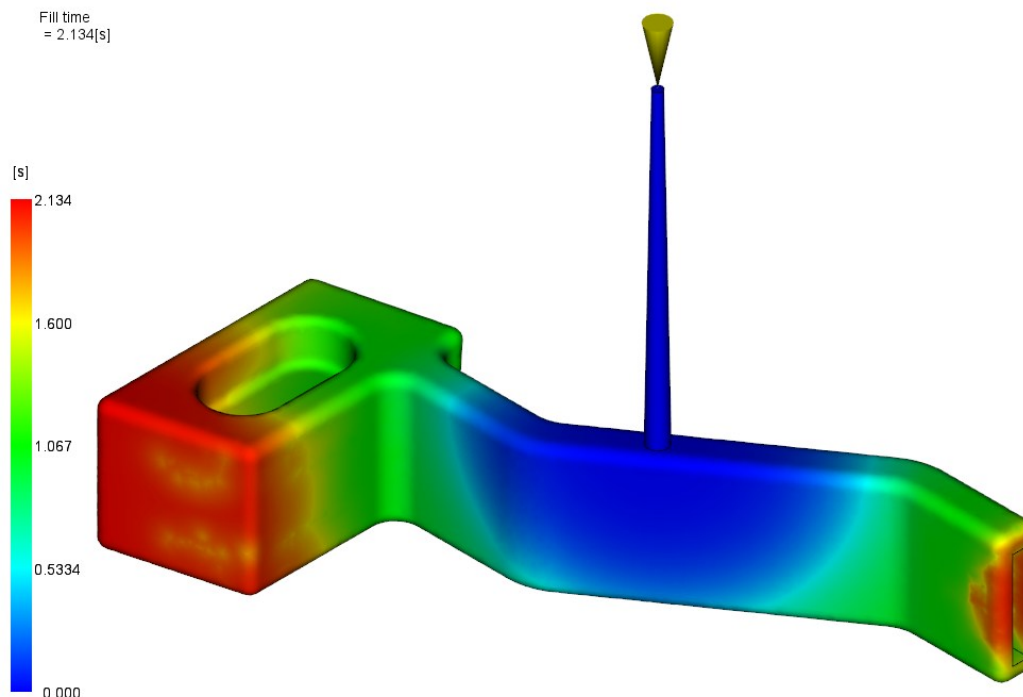


Obr. 77 Znázornění vzduchových mezer v dutině formy (fialově)

Z výsledků je patrné, že nejvíce míst se nachází na hranách dutiny nejvíce vzdálených od vtoku. V pravé části obrázku je vidět, že spousta vzduchu se hromadí v místě umístění insertu.

10.2.2 Výsledky Fill time

Čas zaplnění dutiny neboli fill time, barevně znázorňuje čas potřebný pro zaplnění jednotlivých míst dutiny. Do červeně vybarvených oblastí doteče tavenina jako poslední. Tyto místa jsou náchylné na hromadění vzduchu.

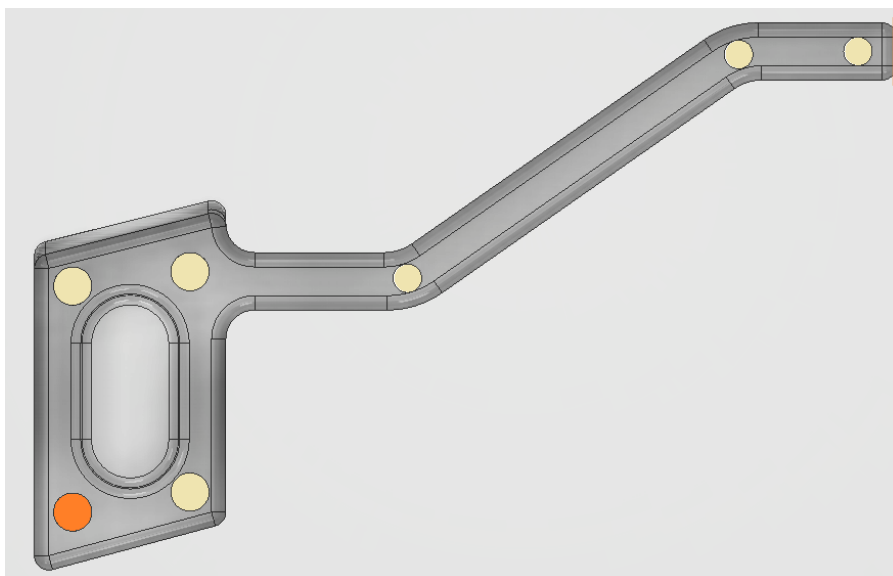


Obr. 78 Znázornění výsledků času pro zaplnění dutiny

10.2.3 Vyhodnocení míst pro odvzdušnění

V místě, kde se nachází část insertu je možné odvzdušnění provést pomocí vůle mezi insertem a stěnou formy, tudíž bude v tomto místě použit klasický kruhový vyhazovač (znázorněno oranžově na obrázku níže).

V tvarové dutině na levé straně bude použit jeden odvzdušňovací vyhazovač, a to v místě, do kterého doteče tavenina nejpozději (znázorněno oranžově na obrázku níže).



Obr. 79 Rozmístění vyhazovačů (žlutě) a odvzdušnění (oranžově)

11 NÁVRH PROCESNÍCH PARAMETRŮ VSTŘIKOVÁNÍ

Pro realizaci vstřikovacího procesu je potřeba nastavit procesní parametry stroje, podle kterých bude proces probíhat. Parametry se týkají všech fází cyklu, např.: fáze vstřikování a dotlaku, fáze chlazení a vyhození hotového dílce. Při volbě jednotlivých hodnot je potřeba brát v potaz omezující faktory, jako je třeba použitý materiál, možnosti stroje a temperační jednotky.

Procesní parametry vychází z hodnot nastavení ze simulací Moldflow. Hodnoty jsou tedy získány ještě před samotnou zkušební výrobou na stroji. Jedná se tím pádem o jistou predikci optimálního nastavení procesních podmínek pro dosažení kvalitativně identického výrobku jako je ve výsledku analýzy.

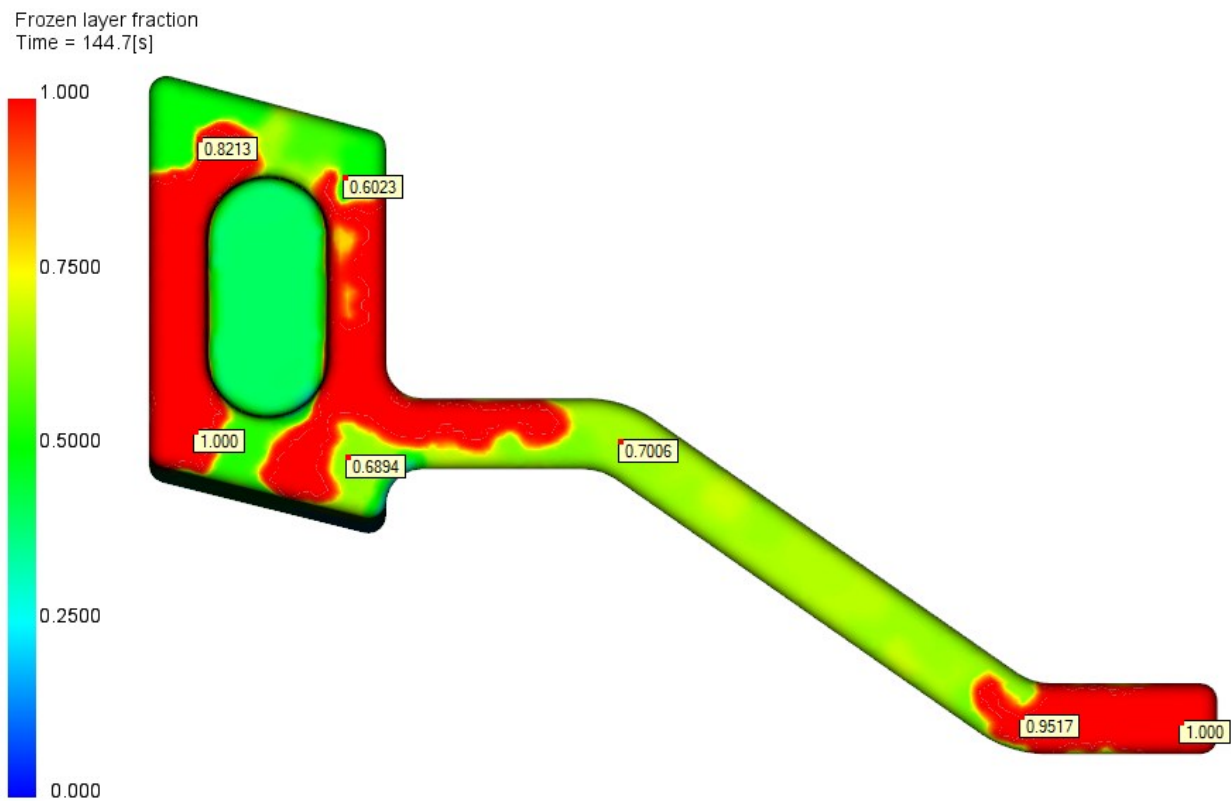
11.1 Doba chlazení zástříku

V kapitole Výsledky optimalizovaného okruhu vyhodnotili čas potřebný pro dosažení vyhazovací teploty 849 s. Byly zde popsány možné příčiny takto vysokého času. Dále je zde prezentován výsledek zobrazující procento zatuhlé vrstvy, kde v čase 484 s je valná většina objemu tělesa zatuhlá. Pomocí těchto dat lze navrhnout alternativní řešení pro snížení celkového času chlazení a snížení délky cyklu.

Na zástřík nejsou kladeny výrazné požadavky na kvalitu povrchu, rozměrovou stabilitu a přesnost. Proto je přípustné zvážit předběžné vyhození pro výrazné snížení času cyklu. Aby bylo možné zástřík předběžně vyhazovat, je nutné zajistit, aby v oblastech, v nichž na zástřík působí vyhazovače, byla dostatečně zatuhlá vrstva. Vyhazovač nesmí penetrovat povrchovou vrstvu a zasunout se do tělesa nebo ho nijak poškodit. Zda je vrstva pod vyhazovači dostatečně zatuhlá a v jakém čase lze určit z výsledků analýzy frozen layer fraction. Konkrétně jsou na obrázcích níže prezentovány výsledky v časech 96,49 s a 144,7 s. Procento zatuhnutí vrstvy je znázorněno barevně a také relativně v konkrétních místech umístění vyhazovačů.



Obr. 80 Zobrazení procenta zatuhlé vrstvy na zástříku v čase 96,49 s



Obr. 81 Zobrazení procenta zatuhlé vrstvy na zástříku v čase 144 s

V čase 96,49 s je minimální zatuhnutí tloušťky nad vyhazovačem zhruba 22 %. V tomto případě je stále možné, že by vyhazovač mohl prorazit stěnu nebo výrazně deformovat povrch dílce. Ideální hodnota zatuhlé vrstvy by se pohybovala okolo 70 %, aby se předešlo poškození. V čase 144,7 s je ve stejném místě zatuhlé 60 % tloušťky vrstvy. V tomto případě může docházet k pohledovým nedokonalostem na povrchu, avšak oblast je již dostatečně pevná pro kompletní vyhození z formy. Na povrch dílce v rovině působení vyhazovačů nejsou kladeny žádné estetické či rozměrové požadavky. Zástřík bude tak předčasně vyhozen z formy, a to v časech od 140 do 160 s. Oproti původnímu výsledku analýzy pro čas dosažení vyhazovací teploty je dosaženo markantního snížení času cyklu. Fáze chlazení je tímto alternativním řešením zredukována o zhruba 82 %.

11.2 Nastavení procesu vstřikování

Nastavované parametry vychází z doporučených hodnot v materiálovém listu použitého granulátu (viz příloha P V, P VI) a také z technických údajů vstřikovacího stroje. Tyto parametry byly získány a ověřeny pomocí analýzy Moldflow.

Tabulka 10 Parametry nastavení procesu vstřikování pro zástřík

Nastavení parametrů pro zástřík	
Teplota povrchu formy [°C]	49
Teplota taveniny [°C]	170
Vyhazovací teplota [°C]	62
Teplota chladicího média [°C]	25
Max. tlak chlad. média [bar]	2,5
Čas vyhození dílu [s]	160

Tabulka 11 Parametry nastavení procesu vstřikování pro insert

Nastavení parametrů pro insert	
Teplota povrchu formy [°C]	90
Teplota taveniny [°C]	265
Vyhazovací teplota [°C]	133
Teplota chladicího média [°C]	60
Max. tlak chlad. média [bar]	2,5
Čas vyhození dílu [s]	30

12 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ A URČENÍ ENVIRONMENTÁLNÍCH PŘÍNOSŮ

V této kapitole jsou shrnuty a porovnány výsledky a vlastnosti technologií nízkotlakého lití polyuretanu a vstřikování z hlediska technického, ekonomického a environmentálního.

12.1 Technické zhodnocení

Technické porovnání popisuje rozdíly mezi technologiemi z hlediska principu fungování, časové efektivity, konstrukčního řešení a vhodnosti použití dané technologie.

12.1.1 Délka výrobního cyklu a kapacita výroby

Vstřikovací cyklus je výrazně kratší, vzhledem k faktu, že bylo pomocí analýz rozhodnuto o předčasném vyhození zástříku. Cyklus se tak pohybuje okolo 160 sekund, avšak prostorové limity stroje mezi sloupky neumožňují formu s více jak jednou tvarovou dutinou.

Na rozdíl u nízkotlakého lití, kde cyklus trvá přibližně 960 sekund, je díky kapacitě vyhřívací komory možné využívat více forem zároveň. Efektivní cyklus při použití 6 forem je tedy 150 s. Avšak tento čas není tak přesně určen, jako čas cyklu u vstřikování, jelikož v procesu lití, které obsahuje spoustu ruční manipulace a proměnných, nelze bez měření v praxi tuto dobu vypočítat. Časy cyklu u vstřikování jsou přesně známy z analýz, přičemž veškerou práci koná stroj, až na zasazení insertu a vyjmutí zástříku.

12.1.2 Konstrukce a údržba forem

Forma pro nízkotlaké lití je zjednodušeně jeden hliníkový blok s tvarovou dutinou. Neobsahuje pohyblivé části, ale i tak je potřeba je čistit od zbytků zatuhlé pryskyřice. Náklady na lící formu jsou nízké, avšak časovou neefektivitou cyklu je nutné jich použít větší množství.

Vstřikovací forma je konstrukčně složitější a tím také dražší. Formy obecně vyžadují přesné provedení, odolnější materiály a údržbu. V této aplikaci není nutné klást takový důraz na přesnost a odolnost nástroje, jelikož v poměru výroby dílů vstřikováním se jedná o menší sérii, u které nejsou požadovány vysoké kvalitativní nároky.

12.2 Ekonomické zhodnocení

Ekonomické zhodnocení porovnává fixní a provozní náklady pro dané technologie. Nejdůležitějším výstupním parametrem porovnání je cena za jeden kus zástříku. Fixní náklady jsou náklady na formy, nezahrnují ceny strojů, protože se jedná o interní informace firmy. Variabilní provozní náklady zahrnují všechny kritéria týkající se samotného výrobního procesu.

12.2.1 Fixní náklady

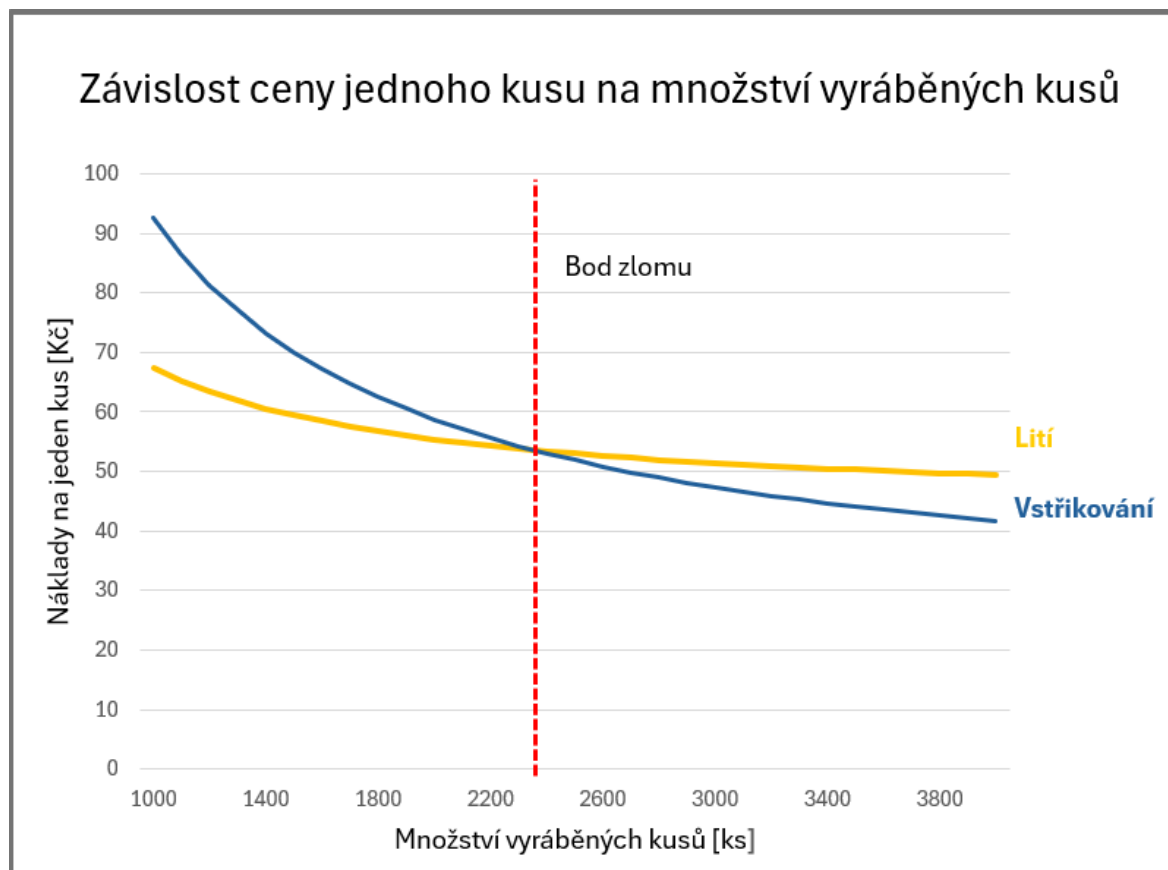
Jak již bylo zmíněné v technickém zhodnocení, vstřikovací forma je násobně dražší než forma pro odlévání. Investice do vstřikovací formy je 67 922 Kč, do odlévací pouze 4 000 Kč. Aby mohl proces lití konkurovat procesu vstřikování v době cyklů, musí využívat vícero forem zároveň. To při počtu šesti forem tvoří celkovou počáteční investici 24 000 Kč.

12.2.2 Provozní náklady

Vstřikování spotřebovává méně elektrické energie než lití. Provozní náklady nezávisí na počtu vyrobených kusů, ale převážně na délce cyklu, ceny materiálu a spotřeby stroje.

12.2.3 Náklady na jeden kus

Lití je při nižších množstvích vyráběných kusů výhodnější, jelikož počáteční investice do forem není tak nákladná. S rostoucím počtem kusů se cena za kus vyrobený vstřikováním snižuje až do bodu zlomu, kde se nákladové křivky protínají. Z grafu znázorňující závislost nákladů na jeden kus na počtu vyrobených kusů lze určit, že k protnutí křivek dochází u série o velikosti 2600 kusů. Nad touto hranicí je vždy výhodnější technologie vstřikování.



Obr. 82 Závislost nákladů na jeden kus na velikosti série

V případě výroby celé zakázky technologií nízkotlakého lití by náklady za kus činily **44,4** Kč. Pro technologii vstřikování jsou náklady na jeden kus **27,53** Kč.

12.3 Environmentální zhodnocení

Diskutované environmentální parametry tohoto zhodnocení jsou materiálové ztráty, emise a výpary při výrobě a energetická náročnost procesu.

Technologie nízkotlakého lití ve všech těchto aspektech zaostává za vstřikováním. Z materiálové hlediska zde dochází k produkci odpadu, který nelze dále využívat a je nutné jej kategorizovat jako nebezpečný odpad a podle toho jej likvidovat. V tomto konkrétním případě připadá na každých 6 kusů zástřiku 250 g nevyužité pryskyřice. Do odpadu se řadí také hadice vedoucí pryskyřici, kterou je nutné po určitém množství cyklů kompletně vyměnit.

Při lití dochází během exotermické reakce k tvorbě nežádoucích výparů, které negativně ovlivňují kvalitu ovzduší. Je třeba dbát na dostatečné větrání pracovních prostor.

Environmentální zátěž v podobě emisí CO_2 z vyrobené energie, kterou proces spotřebuje na výrobu jednoho zástřiku je u lití také znatelnější. Vstřikovací stroj je z hlediska spotřeby energie podstatně úspornější. Spotřebovaná energie na výrobu jednoho kusu tak nese nižší emisní stopu a to 0,39 kg CO_2 . Proces lití produkuje 0,578 kg CO_2 na jeden kus zástřiku. V kontextu celé zakázky je spotřebou energie vyprodukováno o 4,5 t emisí více procesem lití nežli procesem vstřikování.

Vstřikovací proces zcela jasně podle sledovaných aspektů dosahuje lepších výsledků a je tedy environmentálně vhodnější variantou.

12.4 Vyhodnocení zvolené technologie

Z technického, ekonomického a environmentálního zhodnocení vyplývá, že technologie vstřikování je pro výrobu daného dílce výhodnější ve všech sledovaných kategoriích. Dosahuje lepších výsledků z hlediska nákladů na výrobu jednoho kusu a také méně zatěžuje životní prostředí svou produkcí.

ZÁVĚR

Smyslem této diplomové práce byla implementace vstřikovacího procesu ve firmě SMR Plus s.r.o.

Teoretická část je zaměřena na technologii vstřikování polymerů. Detailně popisuje vstřikovací proces a jednotlivé fáze jeho cyklu. Jsou zde rozebírány principy fungování vstřikovacího stroje a jeho jednotlivé komponenty. Obecně jsou zde uvedeny charakteristické vlastnosti polymerů a postupy jejich volby pro danou konstrukční aplikaci. V kapitole o environmentálních a ekonomických aspektech jsou diskutovány dopady využívání polymerů, způsoby nakládání s plastovým odpadem a s tím spjaté faktory. Poslední kapitola teoretické části představuje moderní inovace v technologii vstřikování, zahrnující různé typy vstřikovacích procesů nebo implementaci prvků průmyslu 4.0.

V úvodu praktické části byl představen díl, od kterého se odvíjí celá praktická část. Cílem praktické části bylo určit vhodnou technologii pro výrobu tohoto dílu. Porovnávány byly technologie nízkotlakého lití polyuretanu, kterou již firma několik let využívá, a technologie vstřikování termoplastů, která je ve fázi implementace. Parametry tohoto porovnávání byly technické, ekonomické a environmentální aspekty. Nejdůležitějším kritériem z těchto odvětví byly náklady na výrobu jednoho kusu dílu. Podle tohoto parametru jednoznačně lépe vychází technologie vstřikování.

Pro technologii vstřikování byla navržena kompletní vstřikovací forma, jež byla konstruována jako univerzální rám, schopen operovat s dvěma sadami tvarových vložek. Tím bylo docíleno možnosti vyrábět obě části dílu pomocí pouze jedné formy. Konstrukce formy byla podpořena analýzami simulačního programu Moldflow Synergy, dle kterého byly navrženy a optimalizovány temperační okruhy. Z výsledků analýz byl také stanoven alternativní způsob odformování zástřiku v podobě předčasného vyhození, který výrazně zkracuje vstřikovací cyklus a tím pádem i výrobní náklady. Na základě vstupních dat simulace byly určeny procesní parametry pro nastavení vstřikovacího procesu.

Poslední kapitola diskutuje a rozvádí výsledky porovnání technologií nízkotlakého lití polyuretanu a vstřikování. Vyhodnocením těchto výsledků bylo zjištěno, že technologie vstřikování termoplastů je pro výrobu daného dílu vhodnější ve všech aspektech.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] YANG, Yi; CHEN, Xi; LU, Ningyun a GAO, Furong. *Injection Molding Process Control, Monitoring, and Optimization*. Hanser Publishers, 2016. ISBN 978-1-56990-592-0.
- [2] KULKARNI, Suhas. *Robust Process Development and Scientific Molding - Theory and Practice*. 2. Vydání. Hanser Publishers, 2017. ISBN 978-1-56990-586-9.
- [3] JAROSCHEK, Christoph. *Injection Molding for Practitioners*. Hanser Publishers, 2024. ISBN 978-1-56990-178-6.
- [4] MOAYYEDIAN, Mehdi. *Intelligent Optimization of Mold Design and Process Parameters in Injection Molding*. Springer, 2019. ISBN 978-3-030-03355-2.
- [5] JIN HUI COOLING MACHINE CO., LTD. *Injection molding working principle*. Online. 2020. Dostupné z: <https://cooling-tower.my/en/information/application/145-injection>. [cit. 2025-02-21].
- [6] SEIDL, Martin. *Stroje pro zpracování polymerních materiálů*. Publi.cz, 2016. ISBN 978-80-88058-71-7.
- [7] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů 2: simulace, analýzy, odstraňování vad, 3D tisk - teorie a praxe*. Grada, 2021. ISBN 978-80-271-1294-4.
- [8] TANG, Mike. *What pressures are involved in injection molding?* Online. 2023. Dostupné z: <https://zetarmold.com/pressures-injection-molding/#2-clamping-pressure>. [cit. 2025-01-22].
- [9] KULKARNI, Suhas. *Consider the Cushion When Seeking Shot-to-Shot Consistency*. Online. *Plastics Technology*. 2021. Dostupné z: <https://www.ptonline.com/articles/consider-the-cushion-when-seeking-shot-to-shot-consistency>. [cit. 2025-01-23].
- [10] BURGER, Philip. *Improve The Cooling Performance Of Your Molds*. Online. *Plastics Technology*. 2015, 25.6.2022. Dostupné z: <https://www.ptonline.com/articles/improve-the-cooling-performance-of-your-molds>. [cit. 2025-01-27].

- [11] VALERO, José R. Lerma. *Plastics Injection Molding - Scientific Molding, Recommendations, and Best Practices*. Hanser Publishers, 2020. ISBN 978-1-56990-689-7.
- [12] SCHILLER, Gary F. *Practical Approach to Scientific Molding*. 2. Vydání. Hanser Publishers, 2024. ISBN 978-1-56990-203-5.
- [13] XINMING, Wang; YITAO, Ma; KAIFANG, Dang; BING, Zhao; ANMIN, Chen et al. Fault diagnosis of injection molding machine non-return valve based on data-driven model. Online. 2024, s. 145-153. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.03.019>. [cit. 2025-02-02].
- [14] CRAWFORD, Roy J. a MARTIN, Peter J. *Plastics Engineering*. 4th Edition. Elsevier, 2020. ISBN 978-0-08-100709-9.
- [15] AZZOPARDI, Chuck. *Know Your Options in Injection Machine Nozzles*. Online. Plastics Technology. 2015, 20.5.2023. Dostupné z: <https://www.ptonline.com/articles/know-your-options-in-injection-machine-nozzles>. [cit. 2025-02-04].
- [16] LE, Van-Duong; HOANG, Van-Thanh; TAO, Quang-Bang; BENABOU, Lahouari; TRAN, Ngoc-Hai et al. Computational study on the clamping mechanism in the injection molding machine. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022, roč. 121, č. 11, s. 7247-7261. ISSN 1433-3015. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09817-6>.
- [17] HUANG, Ming-Shyan; NIAN, Shih-Chih; CHEN, Jian-Yu a LIN, Cheng-You. Influence of clamping force on tie-bar elongation, mold separation, and part dimensions in injection molding. *Precision Engineering*. 2018, roč. 51, s. 647-658. ISSN 0141-6359. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.11.007>.
- [18] KUTZ, Myer. *Applied Plastics Engineering Handbook - Processing, Materials, and Applications*. 2. Vydání. Elsevier, 2017. ISBN 978-0-323-39040-8. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpAPEHPMA5/applied-plastics-engineering/applied-plastics-engineering>.
- [19] OSSWALD, Tim A. *Understanding Polymer Processing - Processes and Governing Equations*. 2. Vydání. Hanser Publishers, 2017. ISBN 978-1-56990-647-7. Dostupné také

- z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpUPPPGEE4/understanding-polymer/understanding-polymer>.
- [20] HOPMANN, Christian; GREIF, Helmut a WOLTERS, Leo. *Training in Plastics Technology*. 3. Vydání. Hanser Publishers, 2024. ISBN 978-1-56990-910-2. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpTPT00008/training-in-plastics/training-in-plastics>.
- [21] ARBURG. *Electric machines*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.arburg.com/en/product-world/injection-moulding-machines/electric-machines/>. [cit. 2025-02-06].
- [22] BAUR, Erwin; OSSWALD, Tim A. a RUDOLPH, Natalie. *Plastics Handbook - The Resource for Plastics Engineers*. 5. Vydání. Hanser Publishers, 2019. ISBN 978-1-56990-559-3. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPHTRPEE2/plastics-handbook-resource/plastics-handbook-resource>.
- [23] HUANG, Ming-Shyan a LIN, Cheng-You. A novel clamping force searching method based on sensing tie-bar elongation for injection molding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017, roč. 109, s. 223-230. ISSN 0017-9310. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.02.004>.
- [24] XU, Yuxuan; LIU, Gang; DANG, Kaifang; FU, Nanhong; JIAO, Xiaolong et al. A novel strategy to determine the optimal clamping force based on the clamping force change during injection molding. *Polymer Engineering & Science*. 2021/12/01, roč. 61, č. 12, s. 3170-3178. ISSN 0032-3888. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/pen.25829>.
- [25] ZHONDGE. *Injection Molding Cooling Systems, Cooling Methods and Design*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.zdcpu.com/knowledge-hub/injection-molding-cooling-systems/>. [cit. 2025-02-09].
- [26] RJC AMERICAN INC. *What Is Cooling System In Injection Molding*. Online. 2020. Dostupné z: <https://rjcmold.com/what-is-cooling-system-in-injection-molding/>. [cit. 2025-02-09].

- [27] HONGJU SILICONE. *Cooling System in Injection Molding: The Definitive Guide*. Online. 2023. Dostupné z: https://hongjusilicone.com/cooling-system-in-injection-molding/#elementor-toc_heading-anchor-1. [cit. 2025-02-09].
- [28] STOKES, Vijay K. *Introduction to Plastics Engineering*. John Wiley, 2020. ISBN 978-1-119-53657-4. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpIPE0003L/introduction-plastics/introduction-plastics>.
- [29] NICHOLSON, John W. *Chemistry of Polymers*. 5. Vydání. Royal Society of Chemistry (RSC), 2017. ISBN 978-1-78262-832-3.
- [30] ALMAADEED, Mariam Al Ali; PONNAMMA, Deepalekshmi a CARIGNANO, Marcelo A. *Polymer Science and Innovative Applications - Materials, Techniques, and Future Developments*. Elsevier, 2020. ISBN 978-0-12-816808-0.
- [31] KING PLASTIC CORPORATION. *SELECTING THE PROPER POLYMER MATERIAL*. Online. 2019. Dostupné z: <https://www.kingplastic.com/selecting-the-polymer-proper-material/>. [cit. 2025-02-12].
- [32] KHARE, Richa a KHARE, Smriti. Polymer and its effect on environment. *Journal of the Indian Chemical Society*. 2023, roč. 100, č. 1, s. 100821. ISSN 0019-4522. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100821>.
- [33] RUDOLPH, Natalie; KIESEL, Raphael a AUMNATE, Chuanchom. *Understanding Plastics Recycling - Economic, Ecological, and Technical Aspects of Plastic Waste Handling*. 2. Vydání. Hanser Publishers, 2020. ISBN 978-1-56990-846-4
- [34] GOMSTYN, Alice a JONKER, Alexandra. *What is waste-to-energy?* Online. IBM. 2024. Dostupné z: <https://www.ibm.com/think/topics/waste-to-energy>. [cit. 2025-02-14].
- [35] PAULILLO, Andrea; SEBASTIANI, Alex; LETTIERI, Paola a MATERAZZI, Massimiliano. Decarbonising waste-to-energy: A life cycle assessment study. *Resources, Conservation and Recycling*. 2024, roč. 209, s. 107812. ISSN 0921-3449. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107812>.
- [36] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. *Plastics recycling in Europe: obstacles and options (Signal)*. Online. 2024. Dostupné

- z: <https://www.eea.europa.eu/en/european-zero-pollution-dashboards/indicators/plastics-recycling-in-europe-obstacles-and-options>. [cit. 2025-02-14].
- [37] MELITO, Steve. *Rapid Injection Molding: The Ultimate Guide*. Online. Fictiv. 2023. Dostupné z: <https://www.fictiv.com/articles/rapid-injection-molding-the-ultimate-guide>. [cit. 2025-02-18].
- [38] GOHN, Anne M.; BROWN, Dylan; MENDIS, Gamini; FORSTER, Seth; RUDD, Nathan et al. Mold inserts for injection molding prototype applications fabricated via material extrusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2022, roč. 51, s. 102595. ISSN 2214-8604. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102595>.
- [39] PROTO LABS NETWORK. *3D printing low-run injection molds*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/3d-printing-low-run-injection-molds/>. [cit. 2025-02-18].
- [40] FORM LABS. *How to Use 3D Printing for Injection Molding*. Online. 2020. Dostupné z: https://formlabs.com/eu/blog/3d-printing-for-injection-molding/?srsltid=AfmBOoqT5VqOVUclpXDScZtw3r7dYIgLuUINP_Vm49xAT3q0jTyL8yih. [cit. 2025-02-18].
- [41] BENNETT, Lucas. *Micro Injection Molding: Principle, Benefits, and Applications*. Online. Rapid Direct. 2023. Dostupné z: <https://www.rapidirect.com/blog/what-is-micro-injection-molding/>. [cit. 2025-02-18].
- [42] HALLIFAX, Mathew. *Robotics in Injection Moulding*. Online. RNA. 2021. Dostupné z: <https://www.rnaautomation.com/insight/robotics-in-injection-moulding/>. [cit. 2025-02-19].
- [43] SYBRIDGE TECHNOLOGIES. *How Automation in Injection Molding Improves Efficiency*. Online. 2021. Dostupné z: <https://sybridge.com/injection-molding-automation/>. [cit. 2025-02-19].
- [44] PÁRIZS, Richárd Dominik a TÖRÖK, Dániel. How to use prior knowledge for injection molding in industry 4.0. *Results in Engineering*. 2024, roč. 23, s. 102667. ISSN 2590-1230. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102667>.

- [45] AGEYEVA, Tatyana; HORVÁTH, Szabolcs a KOVÁCS, József G. In-Mold Sensors for Injection Molding: On the Way to Industry 4.0: On the Way to Industry 4.0. Online. *Sensors*. 2019, roč. 19, č. 16. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s19163551>. [cit. 2025-02-19].
- [46] PÁRIZS, Richárd D.; TÖRÖK, Dániel; AGEYEVA, Tatyana a KOVÁCS, József G. Machine Learning in Injection Molding: An Industry 4.0 Method of Quality Prediction: An Industry 4.0 Method of Quality Prediction. Online. *Sensors*. 2022, roč. 22, č. 7. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s22072704>. [cit. 2025-02-19].
- [47] OLLEY, P. An approximation to the PTT viscoelastic model for gas assisted injection moulding simulation. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2020, roč. 278, s. 104246. ISSN 0377-0257. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2020.104246>.
- [48] AGASSANT, Jean-François; AVENAS, Pierre; CARREAU, Pierre J.; VERGNES, Bruno a VINCENT, Michel. *Polymer Processing - Principles and Modeling (2nd Edition)*. Hanser Publishers, 2017. ISBN 978-1-56990-605-7.
- [49] MAURYA, Atul Kumar; DE SOUZA, Felipe Martins; DAWSEY, Tim a GUPTA, Ram K. Biodegradable polymers and composites: Recent development and challenges: Recent development and challenges. *Polymer Composites*. 2024/03/10, roč. 45, č. 4, s. 2896-2918. ISSN 0272-8397. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/pc.28023>.
- [50] RAMKUMAR, PL.; GUPTA, Nikita; SHUKLA, Aman a KUMAR, Akshay. Bio-polymer selection for injection molding process using Multi Objective Optimization by Ratio Analysis method. *Materials Today: Proceedings*. 2021, roč. 45, s. 4447-4450. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.820>.
- [51] PAVIA, F. C.; BRUCATO, V.; MISTRETTA, M. C.; BOTTA, L. a LA MANTIA, F. P. A Biodegradable, Bio-Based Polymer for the Production of Tools for Aquaculture: Processing, Properties and Biodegradation in Sea Water: Processing, Properties and Biodegradation in Sea Water. Online. *Polymers*. 2023, roč. 15, č. 4. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym15040927>. [cit. 2025-02-21].

- [52] KUANG, Tairong; ESMAEILI, Amin a EHSANI, Morteza. Eco-friendly biodegradable polymers: Sustainable future: Sustainable future. *Polymers from Renewable Resources*. 2022/02/01, roč. 13, č. 1-2, s. 71-79. ISSN 2041-2479. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/20412479221109875>.
- [53] FISHER, Chloe. *Tomorrow's packaging problem – Bio-based vs. biodegradable vs. compostable*. Online. Recycle Track Systems. 2020. Dostupné z: <https://www.rts.com/blog/bio-based-vs-biodegradable-vs-compostable-packaging/>. [cit. 2025-02-21].
- [54] IBRAHIM, Suriani; RIAHI, Oussama; SAID, Suhana M.; SABRI, Mohd F.M. a ROZALI, Shaifulazuar. Biopolymers From Crop Plants. In: . Elsevier, 2019. ISBN 978-0-12-803581-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11573-5>.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Znázornění vstřikovacího cyklu [5]	18
Obr. 2 Příprava taveniny a faktory ovlivňující výsledný produkt [4]	19
Obr. 3 Systém působení zpětného tlaku a protitlaku [8]	19
Obr. 4 Typická stádia vstřikovacího cyklu z hlediska stroje, formy a taveniny [4]	20
Obr. 5 Vliv přepnutí na dotlak na tlakovou křivku [6]	21
Obr. 6 Znázornění polštáře na konci vstřikovací a dotlakové fáze [9]	22
Obr. 7 Zobrazení částí vstřikovacího stroje [11]	24
Obr. 8 Vstřikovací jednotka [12]	24
Obr. 9 Schéma jednotlivých pásem šneku [11]	26
Obr. 10 Zobrazení taveniny a tuhého lože mezi závity šneku [11]	27
Obr. 11 Topná tělesa na povrchu válce s termočlánky [12]	27
Obr. 12 Vliv sklonu trychtýře násypky na proudění materiálu [12]	28
Obr. 13 Funkce zpětného ventilu s pouzdem; a) při plastikaci, b) při vstřikování [13]	29
Obr. 14 Otevřená tryska [14]	30
Obr. 15 Typy uzavíracích trysek [14]	30
Obr. 16 Tryskové filtry [14]	31
Obr. 17 Schéma mechanického 5-klobového uzavíracího systému [17]	32
Obr. 18 Hydraulický uzavírací systém [11]	33
Obr. 19 Elektrická uzavírací jednotka s kloubovým mechanismem [21]	34
Obr. 20 Graf průběhu uzavírací síly [24]	35
Obr. 21 Zesíťovaná struktura typického reaktoplastu [14]	38
Obr. 22 Schéma procesu volby vhodného materiálu [14]	39
Obr. 23 3D tištěná tvarová vložka v hliníkovém rámu [39]	45
Obr. 24 Mikro-vstřikované součásti [41]	45
Obr. 25 Robotický manipulátor zakládající insert do vstřikovacího stroje [42,43]	46
Obr. 26 Znázornění a) klasického žebra, b) žebra typu Ω [48]	47
Obr. 27 Rozdělení biopolymerů podle jejich původu [54]	48
Obr. 28 Plastový separační díl přepravní palety	51
Obr. 29 Přepravní kovová paleta	52
Obr. 30 Části separačního dílu	52
Obr. 31 Systém a funkce řady separačních dílů	53
Obr. 32 Znázornění funkčních ploch	54
Obr. 33 Zobrazení optimalizace dělicí roviny a odlehčení	55
Obr. 34 Vertikální vstřikovací stroj BOY 60 E VV	57

Obr. 35 Závislost provozních a fixních nákladů na počtu použitých forem.....	61
Obr. 36 Vstřikovací forma.....	68
Obr. 37 ISO pohled na vstřikovací formu s transparentními deskami shora.....	69
Obr. 38 ISO pohled na vstřikovací formu s transparentními deskami zespod	70
Obr. 39 Izolační deska.....	71
Obr. 40 Upínací deska pravá (horní) a levá (spodní)	72
Obr. 41 Tvarová deska pravá (horní)	73
Obr. 42 Tvarová deska levá (spodní)	73
Obr. 43 Rozpěrné desky	74
Obr. 44 Vyhazovací deska kotevní	75
Obr. 45 Vyhazovací deska opěrná	75
Obr. 46 Tvárník insertu	76
Obr. 47 Tvárnice insertu.....	77
Obr. 48 Grafické znázornění temperace tvarových vložek insertu	78
Obr. 49 Pohled na tvárník zástříku.....	79
Obr. 50 Grafické znázornění temperačního okruhu tvárníku zástříku	80
Obr. 51 Pohled na tvárnici zástříku.....	81
Obr. 52 Detailní pohled na tvarové prvky převyšující dělicí rovinu.....	81
Obr. 53 Schéma rozmístění ucpávek v temperačním okruhu tvárnice zástříku.....	82
Obr. 54 Vtoková vložka.....	83
Obr. 55 Středící kroužky	83
Obr. 56 Vodící čep formy.....	84
Obr. 57 Vodící pouzdro.....	84
Obr. 58 Centrovací pouzdro (zobrazeno v řezu).....	85
Obr. 59 Vodící čep vyhazovací.....	85
Obr. 60 Pouzdro vyhazovacích čepů.....	86
Obr. 61 Dorazová destička vyhazovacího paketu	86
Obr. 62 Záslepky.....	87
Obr. 63 Přepážka rovná	87
Obr. 64 Kruhový vyhazovač	88
Obr. 65 Přípojka.....	88
Obr. 66 Prvotní návrh temperačního okruhu zástříku	89
Obr. 67 Čas pro dosažení vyhazovací teploty zástříku u prvotního okruhu.....	90
Obr. 68 Temperační okruh tvárnice zástříku	91
Obr. 69 Temperační okruh tvárníku zástříku.....	92

Obr. 70 Zobrazení výsledku času pro dosažení vyhazovací teploty zástříku (zadní část) ...	93
Obr. 71 Zobrazení výsledku času pro dosažení vyhazovací teploty zástříku (přední část) .	93
Obr. 72 Zobrazení procenta zatuhlé vrstvy na zástříku.....	94
Obr. 73 Poslední místo dosažení vyhazovací teploty v objemu dutiny	95
Obr. 74 Temperační okruh insertu	96
Obr. 75 Zobrazení času pro dosažení vyhazovací teploty insertu	97
Obr. 76 Zobrazení procenta zatuhlé vrstvy insertu.....	98
Obr. 77 Znázornění vzduchových mezer v dutině formy (fialově)	99
Obr. 78 Znázornění výsledků času pro zaplnění dutiny.....	100
Obr. 79 Rozmístění vyhazovačů (žlutě) a odvzdušnění (oranžově)	100
Obr. 80 Zobrazení procenta zatuhlé vrstvy na zástříku v čase 96,49 s	102
Obr. 81 Zobrazení procenta zatuhlé vrstvy na zástříku v čase 144 s.....	102
Obr. 82 Závislost nákladů na jeden kus na velikosti série	106

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Náklady na desky vstřikovací formy	59
Tabulka 2 Náklady na normálie	60
Tabulka 3 Variabilní provozní náklady nízkotlakého lití na jeden kus.....	63
Tabulka 4 Fixní náklady nízkotlakého lití na jeden kus.....	63
Tabulka 5 Celkové náklady nízkotlakého lití na jeden kus	64
Tabulka 6 Variabilní provozní náklady vstřikování na jeden kus	64
Tabulka 7 Fixní náklady vstřikování na jeden kus.....	65
Tabulka 8 Celkové náklady vstřikování na jeden kus.....	65
Tabulka 9 Emise CO ₂ spotřeby elektrické energie na výrobu jednoho kusu	67
Tabulka 10 Parametry nastavení procesu vstřikování pro zástřík.....	103
Tabulka 11 Parametry nastavení procesu vstřikování pro insert	103

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: TECHNICKÁ DATA VSTŘIKOVACÍHO STROJE

Příloha P II: VÝKRES UPÍNACÍCH DESEK STROJE

Příloha P III: SCHÉMA UZAVÍRACÍ JEDNOTKY STROJE

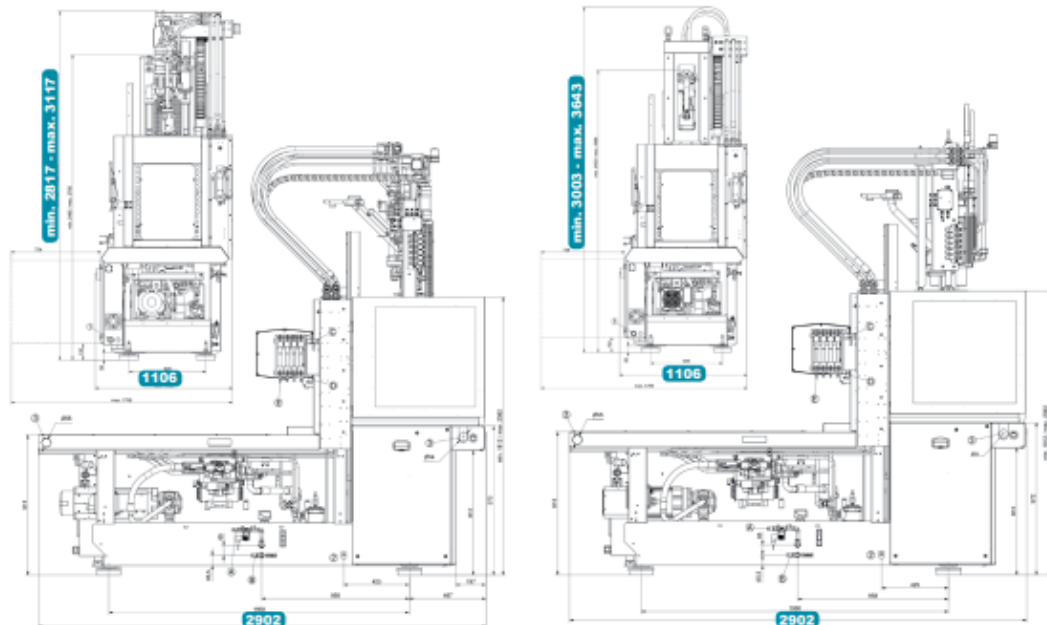
Příloha P IV: MATERIÁLOVÝ LIST HLINÍKOVÉ SLITINY ALUMEC 89

Příloha P V: MATERIÁLOVÝ LIST PVC

Příloha P VI: MATERIÁLOVÝ LIST PA6 + 30 %GF

PŘÍLOHA P I: TECHNICKÁ DATA VSTŘIKOVACÍHO STROJE

Innovativ in die Zukunft – BOY-Injectioneering



Technische Daten – Standardausführung¹⁾

Spritzeinheit für Thermoplastverarbeitung		SP 56	SP 69	SP 82	SP 215 (Standard)					
Schneckendurchmesser	mm	18	22	24	28	32	28	32	38	42
Schnecken-L/D-Verhältnis		20	17,5	22	18,6	16,3	22,7	20	16,7	15
Max. Hubvolumen (theoretisch)	cm³	20,4	30,4	43	58,5	76,5	76,9	100,5	141,8	173,2
Max. Spritzgewicht in PS (theoretisch)	g	18,6	27,7	39,1	53,2	69,5	70,0	91,4	129,0	157,6
Einspritzkraft	kN	86,5	86,5	86,5	86,5	86,5	172	172	172	172
Einspritzvolumenstrom	cm³/s	71,3	106,4	126,7	172,4	225,2	92,4	120,6	170,1	207,8
Max. spez. Spritzdruck	bar	2739	2276	1913	1405	1076	2798	2142	1519	1244
Max. Schneckenhub	mm	80	80		95		125	125	125	125
Düsenanlagekraft	kN			48					66	
Düsenabhebeweg	mm			205					215	
Schneckendrehmoment	Nm	130 (120 bar)		180¹ / 300²					390² / 490³	
Schneckendrehzahl (stufenlos einstellbar)	U / min.	500		400¹ / 250²					410² / 325²	
Schneckenrückzugskraft	kN			38					29,7	
Heizleistung (Düse + Zylinder)	W	3250	3550		5800				7700	
Trichterinhalt	Liter			-					-	
Einspritzgeschwindigkeit	mm/s			280					150	
Schließeinheit										
Schließkraft	kN				600					
Lichte Weite zwischen d. Holmen	mm (h x v)				360 x 335					
Max. Plattenabstand	mm				550⁴					
Max. Öffnungsweg (einstellbar)	mm				300					
Min. Werkzeugeinbauhöhe	mm				250⁴					
Max. Werkzeuggewicht bewegte Schließseite	kg				400					
Formöffnungskraft	kN				38					
Formzufuhrkraft	kN				24,4					
Auswerferhub (max.)	mm				80 (130)					
Auswerferkraft stoßend / ziehend	kN				20,4 / 13,5					
Allgemeines										
Installierte Antriebs- / Gesamtleistung	kW	11/14,3 (400 V)	11/14,6 (400 V)		11/16,8 (400 V)				11/18,7 (400 V)	
Trockenlaufzeit (gem. EUROMAP 6) – Hub	s – mm			2,3 – 252					1,9 – 252	
Hydrauliksystemdruck	bar			180					195	
Öltankinhalt	Liter			200					200	
Maße und Gewichte										
Abmessungen (LxBxH) / Aufstellfläche	mm / m²			2902 x 1106 x 2817² / 3,21					2902 x 1106 x 3003³ / 3,21	
Gesamtgewicht netto (o. Öltüllung)	kg				2520					
Gesamtgew. brutto (Palette & Folie / Holzkiste)	kg				2620 / 2940					
Transportabmessungen / Kiste (LxBxH) ca.	m				3,1 x 1,35 x 2,5 / 3,1 x 1,35 x 2,25					

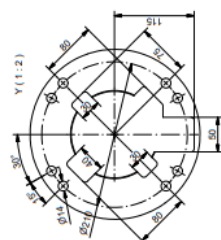
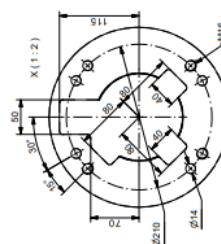
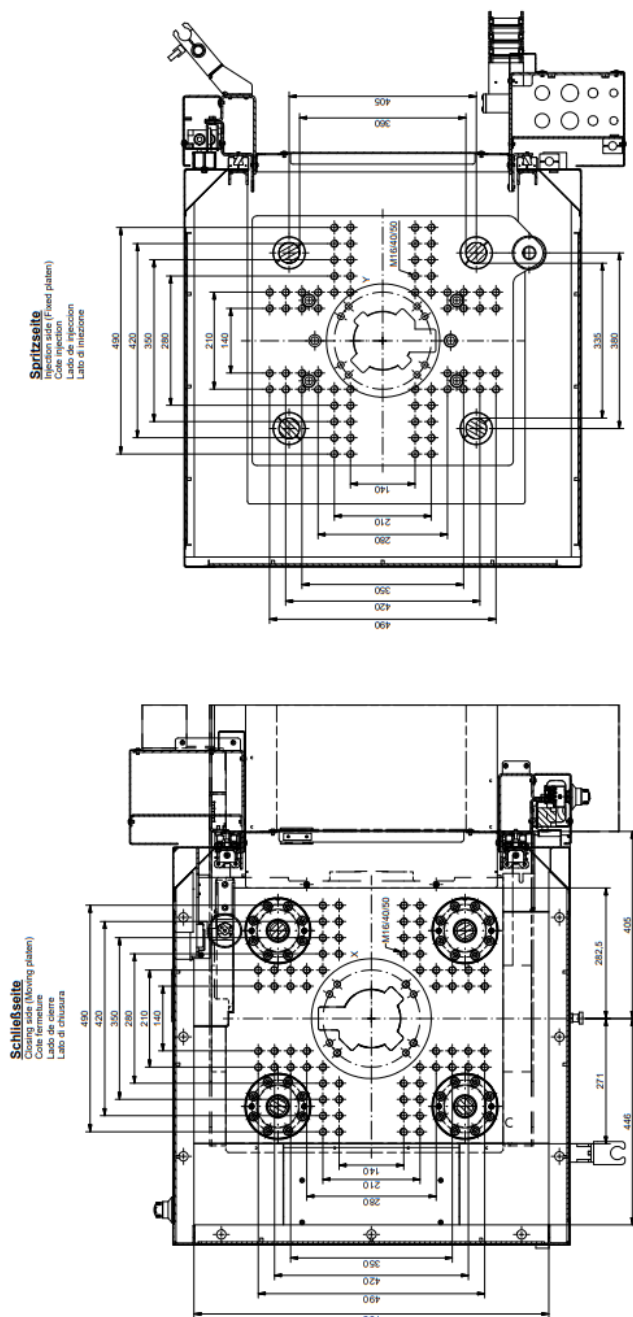
1) weitere Spritzeinheiten siehe Technische Daten und Ausstattung 2) Hydromotor mit 162 cm³ Hubvolumen 3) Hydromotor mit 204 cm³ Hubvolumen 4) optional 100 mm größer 5) max. 3117 mm

BOY 60 E VW

Einbaumaße / Platen Dimensions / Montage de moules / Montaje del molde



Spritzgiessautomaten



Dr. Boy GmbH & Co. KG
Industriegebiet Neustadt/Wied
Neschener Str. 6
53577 Neustadt-Fernthal
Germany

Telefon +49 / 2683 307-0
Telefax +49 / 2683 / 32771
E-Mail info@dr-boy.de
Internet www.dr-boy.de

A 01/2020 • R_0002_449_01 • Konstruktions- und Ausstattungsänderungen vorbehalten • Modification in design and equipment reserved
 Sour reserve de modification et le l'équipement • Se reservan modificaciones de construcción y equipo

BOY
Spritzgiessautomaten

Einbaumaße / Platen Dimensions / Montage de moules / Montaje del molde



Telefon +49 / 2683 307-0
Telefax +49 / 2683 / 32771
E-Mail info@dr-boy.de
Internet www.dr-boy.de

A 01/2020 • R_0002_449_01 • Konstruktions- und Ausstattungsänderungen vorbehalten • Modification in design and equipment reserved
Sour reserve de modification et le équipement • Se reservan modificaciones de construcción y equipo

PŘÍLOHA P V: MATERIÁLOVÝ LIST PVC

Thermoplastics material - PVC

Optical Properties		Environmental Impact		Quality Indicators		Crystallization Morphology		Stress - Strain (Tension)		Stress - Strain (Compression)		
Description	Recommended Processing	Rheological Properties		Thermal Properties		pvT Properties		Mechanical Properties		Shrinkage Properties		Filler / Fiber
Mold surface temperature		45	C									
Melt temperature		188	C									
Mold temperature range (recommended)												
Minimum		40	C									
Maximum		57	C									
Melt temperature range (recommended)												
Minimum		170	C									
Maximum		205	C									
Absolute maximum melt temperature		245	C									
Ejection temperature		62	C									
View test information for ejection temperature...												
Maximum shear stress		0.2	MPa									
Maximum shear rate		32000	1/s									
Mechanical properties data												
Elastic modulus, 1st principal direction (E1)		1590	MPa									
Elastic modulus, 2nd principal direction (E2)		1590	MPa									
Poissons ratio (v12)		0.38										
Poissons ratio (v23)		0.38										
Shear modulus (G12)		576.1	MPa									
Transversely isotropic coefficient of thermal expansion (CTE) data												
Alpha1		0.000244	1/C									
Alpha2		0.000244	1/C									
View test information...												
Do not use matrix properties												
Weld Line Strength												
wLSC1			1/K-s									
wLSC2			1/K^2-s									
Phi Critical			rad									
Melt density	1.0559	g/cm^3										
Solid density	1.1981	g/cm^3										
2-domain modified Tait pvT model coefficients												
b5	403.15	K										
b6	6.562e-08	K/Pa										
b1m	0.0009023	m^3/kg										
b2m	7.72e-07	m^3/kg.K										
b3m	1.14985e+08	Pa										
b4m	0.005363	1/K										
b1s	0.0009005	m^3/kg										
b2s	6.277e-07	m^3/kg.K										
b3s	1.14632e+08	Pa										
b4s	0.005029	1/K										
b7	0	m^3/kg										
b8	0	1/K										
b9	0	1/Pa										
Plot pvT data...												

PŘÍLOHA P VI: MATERIÁLOVÝ LIST PA6 + 30 %GF

Thermoplastics material PA6 + 30%GF

Optical Properties	Environmental Impact	Quality Indicators	Crystallization Morphology	Stress - Strain (Tension)	Stress - Strain (Compression)		
Description	Recommended Processing	Rheological Properties	Thermal Properties	pvT Properties	Mechanical Properties	Shrinkage Properties	Filler / Fiber
Mold surface temperature		50 C					
Melt temperature		265 C					
Mold temperature range (recommended)							
Minimum		70 C					
Maximum		110 C					
Melt temperature range (recommended)							
Minimum		230 C					
Maximum		300 C					
Absolute maximum melt temperature		340 C					
Ejection temperature		133 C					
View test information for ejection temperature...							
Maximum shear stress		0.31 MPa					
Maximum shear rate		100000 1/s					
Transition temperature		185 C					
View test information...							
Specific heat data							
	Temperature (T) C	Specific heat (Cp) J/kg·C	Heating/cooling rate C/s				
1	270.5	2123	-0.3333				
Thermal conductivity data							
	Temperature (T) C	Thermal conductivity (k) W/m·C	Heating/cooling rate C/s				
1	270	0.276	0				
Melt density	1.1785 g/cm ³						
Solid density	1.3358 g/cm ³						
2-domain modified Tait pvT model coefficients							
b5	497.15 K						
b6	2.5e-08 K/Pa						
b1m	0.0008274 m ³ /kg						
b2m	5.144e-07 m ³ /kg·K						
b3m	1.9423e+08 Pa						
b4m	0.004849 1/K						
b1s	0.0007875 m ³ /kg						
b2s	1.953e-07 m ³ /kg·K						
b3s	2.11341e+08 Pa						
b4s	0.003293 1/K						
b7	3.997e-05 m ³ /kg						
b8	0.04575 1/K						
b9	5.003e-09 1/Pa						
Plot pvT data...							
Mechanical properties data							
Elastic modulus, 1st principal direction (E1)				8651.13 MPa			
Elastic modulus, 2nd principal direction (E2)				5310.16 MPa			
Poissons ratio (v12)				0.4058			
Poissons ratio (v23)				0.449			
Shear modulus (G12)				2255.24 MPa			
Transversely isotropic coefficient of thermal expansion (CTE) data							
Alpha1				2.807e-05 1/C			
Alpha2				5.82e-05 1/C			