

Konstrukční návrh vstřikovací formy pro díl motoru včetně simulace funkčnosti

Bc. Miroslav Slezák

Diplomová práce
2021



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Miroslav Slezák**
Osobní číslo: **T19538**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Konstrukční návrh vstřikovací formy pro díl motoru včetně simulace funkčnosti**

Zásady pro vypracování

1. Vypracovat literární studii pro dané téma.
2. Provést 3D konstrukci modelu vstřikované součásti.
3. Navrhnout 3D konstrukci vstřikovací formy pro zadaný díl s ohledem na vyrobiteľnosť.
4. Provést analýzu procesu vstřikování.
5. Nakreslit 2D řez vstřikovací formou spolu s výkresy a kusovníkem.

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

Seznam doporučené literatury:

ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů: teorie a praxe. Praha: Grada Publishing, 2018, 455 s. ISBN 978-80-271-0614-1.

KERKSTRA, Randy a Steve BRAMMER. Injection molding advanced troubleshooting guide. Munich: Hanser Publishers, 2018, 491 s. ISBN 978-1-56990-645-3.

WANG, Maw-Ling, Rong-Yeu CHANG a Chia-Hsiang HSU. Molding simulation: theory and practice. Cincinnati: Hanser Publications, 2018, 513 s. ISBN 978-1-56990-619-4.

YANG, Yi, Xi CHEN, Ningyun LU a Furong GAO. Injection molding process control, monitoring, and optimization. Munich: Hanser, 2016, 397 s. Progress in polymer processing series. ISBN 978-1-56990-592-0.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Martin Ovsík, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **5. ledna 2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **14. května 2021**

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

L.S.

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. dubna 2021

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- 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 autorského zákona 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 diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- Že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné

Ve Zlíně dne: 14.5.2021

Jméno a příjmení studenta: Miroslav Slezák

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na polymerní materiály, vstřikování polymerních materiálů, konstrukci vstřikovaných dílů, konstrukci forem a simulace vstřikovacího procesu.

Teoretická část práce obsahuje přehled polymerních materiálů, jejich využití, popis procesu vstřikování, pravidla pro návrh vstřikovaných dílů a popis konstrukce vstřikovacích forem.

Praktická část práce obsahuje návrh konstrukce formy pro díl motoru automobilu. Součástí návrhu je výběr materiálu součásti, stroje a detailní konstrukce formy v softwaru CATIA V5R20. Funkčnost vstřikovací formy je dále ověřena pomocí simulace v softwaru Moldflow Synergy 2016.

Klíčová slova: polymery, termoplasty, vstřikování, vstřikovací forma, simulace procesu vstřikování

ABSTRACT

The diploma thesis is focused on polymeric materials, injection molding of polymeric materials, design of injection molded parts, injection mold design and simulation of injection molding process.

The theoretical part of the thesis contains of overview of polymeric materials, their using, description of the injection molding process, rules for designing injection molded parts and description of injection molds.

The practical part of the thesis contains injection mold design for car engine part. Parts of the design is choosing of part material, machine and detailed construction of the injection mold in the software CATIA V5R20. The function of the injection mold is verified by simulation in the Moldflow Synergy 2016 software.

Keywords: polymers, thermoplastics, injection molding, injection mold, simulation of injection molding process

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za poskytnutí odborné pomoci, cenných připomínek a rad při vypracování této diplomové práce.

Dále děkuji i ostatním zaměstnancům Fakulty technologické UTB ve Zlíně za znalosti, které mi poskytli za celé období studia.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 POLYMERNÍ MATERIÁLY	12
1.1 POLYMERY A JEJICH ROZDĚLENÍ.....	13
1.1.1 Vlákna.....	13
1.1.2 Plasty.....	14
1.1.3 Reaktoplasty	17
1.1.4 Elastomery	17
1.2 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VÝBĚR MATERIÁLU PRO VSTŘIKOVÁNÍ	18
1.3 REOLOGICKÉ CHOVÁNÍ POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ V OBLASTI VSTŘIKOVÁNÍ	18
1.4 ADITIVA V POLYMERNÍCH MATERIÁLECH A JEJICH VLIV NA VLASTNOSTI	19
1.4.1 Změkčovadla	20
1.4.2 Zpomalovače hoření	20
1.4.3 Stabilizátory	20
1.4.4 Antistatické přísady	20
1.4.5 Plniva	20
1.4.6 Nadouvadla	21
1.4.7 Barviva a pigmenty.....	21
1.5 POLYMERNÍ MATERIÁLY V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU	22
1.5.1 Díly interiéru	23
1.5.2 Díly exteriéru.....	23
1.5.3 Díly karoserie	23
1.5.4 Díly motoru	23
1.5.5 Maximální provozní teploty plastových částí automobilu.....	24
2 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ	25
2.1 VSTŘIKOVACÍ STROJE	26
2.1.1 Plastikační jednotka.....	27
2.1.2 Uzavírací jednotka.....	28
2.1.3 Parametry pro výběr vstřikovacího stroje.....	29
2.1.4 Porovnání hydraulických, elektrických a hybridních vstřikovacích strojů	29
2.2 PRINCIP TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ.....	30
2.3 PROCESNÍ PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ PROCES VSTŘIKOVÁNÍ	33
2.4 BĚŽNÉ VADY U VÝROBKŮ VYROBENÝCH METODOU VSTŘIKOVÁNÍ.....	34
2.4.1 Neúplný výrobek	34
2.4.2 Přetoky	34
2.4.3 Propadliny	35
2.4.4 Deformace.....	35
2.4.5 Barevné vady.....	35
2.4.6 Diesel efekt.....	35

2.4.7	Studené spoje.....	36
2.4.8	Volný proud taveniny	36
2.4.9	Vakuové bubliny	36
3	NÁVRH DÍLU PRO METODU VSTŘIKOVÁNÍ.....	37
3.1	PRAVIDLA KONSTRUKCE VSTŘIKOVANÝCH DÍLŮ.....	37
3.1.1	Tloušťka stěny	37
3.1.2	Tloušťka stěny v závislosti na toku materiálu.....	38
3.1.3	Zaoblení hran.....	39
3.1.4	Žebra	40
3.1.5	Úkosy.....	41
3.1.6	Dělicí rovina.....	41
4	KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY	42
4.1	POSTUP PŘI NÁVRHU VSTŘIKOVACÍ FORMY.....	43
4.2	RÁM FORMY.....	44
4.3	VTOKOVÝ SYSTÉM	45
4.4	TEMPERAČNÍ SYSTÉM	50
4.5	ODVZDUŠŇOVACÍ SYSTÉM.....	52
4.6	BOČNÍ ODFORMOVÁNÍ.....	53
4.7	VYHAZOVACÍ SYSTÉM	54
5	ANALÝZA VSTŘIKOVACÍHO PROCESU.....	56
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	59
6	STANOVENÍ CÍLŮ PRÁCE.....	60
7	POUŽITÉ SOFTWARE	61
8.1	KONSTRUKCE VSTŘIKOVANÉ SOUČÁSTI.....	62
8.2	POVRCH VSTŘIKOVANÉ SOUČÁSTI.....	63
8.3	MATERIÁL VSTŘIKOVANÉ SOUČÁSTI	64
9	NÁVRH KONSTRUKCE FORMY.....	65
9.1	NÁSOBNOST FORMY	65
9.2	VOLBA MÍSTA VTOKOVÉHO ÚSTÍ	65
9.3	VOLBA VTOKOVÉHO SYSTÉMU.....	67
9.4	VOLBA DĚLÍCÍCH ROVIN	69
9.5	KONSTRUKCE FORMY	70
9.5.1	Rám formy	72
9.5.2	Tvarové vložky.....	75
9.5.3	Posuvné čelisti.....	76
9.5.4	Vtokový systém.....	77
9.5.5	Vyhazovací systém	79
9.5.6	Temperační systém	80
9.5.7	Transportní prvky	81

10	VOLBA VSTŘIKOVACÍHO STROJE.....	82
11	ANALÝZA VSTŘIKOVACÍHO PROCESU NAVRŽENÉ FORMY.....	83
11.1	VYTVOŘENÍ SÍTĚ 3D MODELU SOUČÁSTI	83
11.2	NASTAVENÍ PROCESNÍCH PARAMETRŮ.....	84
11.3	VÝSLEDKY ANALÝZY PLNĚNÍ A DOTLAKU	87
11.3.1	Čas plnění (Fill time).....	87
11.3.2	Vstřikovací tlak v místě vtokového ústí (Pressure at injection location)	88
11.3.3	Rychlost smykové deformace (Shear rate)	88
11.3.4	Uzavírací síla (Clamp force)	89
11.3.5	Čas dosažení vyhazovací teploty (Time to reach ejection temperature)	90
11.3.6	Vzduchové kapsy (Air traps)	90
11.3.7	Propadliny (Sink marks)	91
11.4	VÝSLEDKY ANALÝZY TEMPERACE	92
11.4.1	Teplota média v temperačním okruhu (Circuit coolant temperature)	92
11.4.2	Tlak v temperačním okruhu (Circuit pressure)	93
11.4.3	Reynoldsovo číslo (Circuit Reynolds number).....	93
11.4.4	Účinnost temperačního systému (Circuit hear removal efficiency)	94
11.4.5	Teplota dutiny formy (Temperature mold).....	94
11.5	VÝSLEDKY ANALÝZ SMRŠTĚNÍ A DEFORMACE	95
11.5.1	Celková deformace od všech vlivů (Deflection, all efects deflection).....	95
12	DISKUZE VÝSLEDKŮ	96
	ZÁVĚR	97
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	98
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	102
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	104
	SEZNAM TABULEK	106
	SEZNAM PŘÍLOH	107

ÚVOD

Polymerní materiály hrají v každodenním životě již nenahraditelnou roli. Výrobky z polymerního materiálu jsou všude okolo nás, od obalového průmyslu po automobily a stavebnictví. Nejvíce používanou metodou pro výrobu součástí z polymerních materiálů je jednoznačně proces vstřikování. Proces vstřikování umožňuje vyrobit výrobky složitých a členitých geometrií. U malosériové výroby se proces vstřikování příliš nevyplatí z důvodu vysoké pořizovací ceny nástroje neboli vstřikovací formy. Vstřikování polymerních materiálů se používá zejména ve velkosériové výrobě.

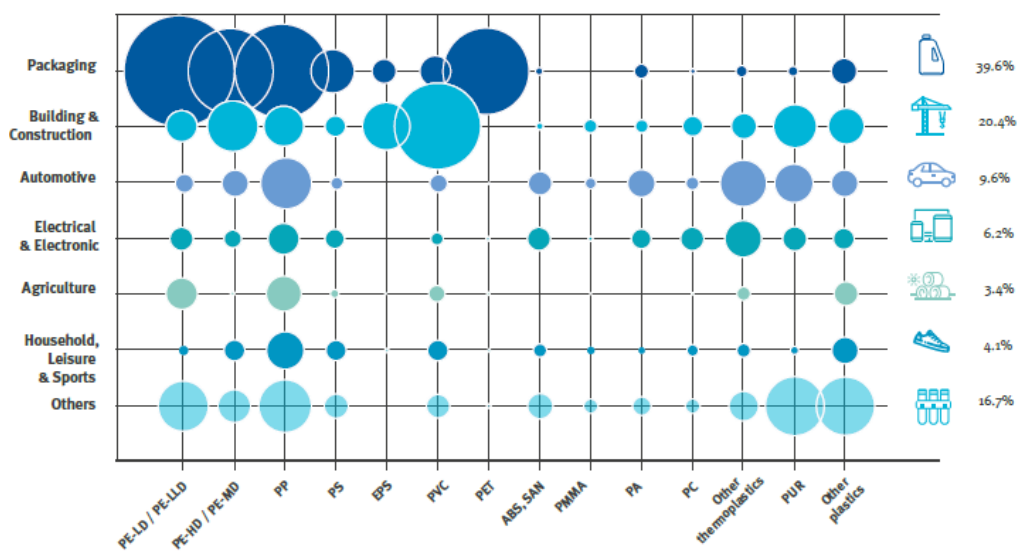
Polymerních materiálů je dnes celá řada a dělí se do několika skupin. Nejpoužívanější skupinou polymerních materiálů používaných pro proces vstřikování jsou termoplasty. Ne všechny termoplasty se však hodí pro všechny aplikace.

Při požadavku zákazníka vyrábět součást procesem vstřikování se musí podstoupit několik základních kroků. Prvním krokem je samotný návrh konstrukce součásti, který zahrnuje její vzhled, funkčnost, vhodný materiál a vyrobitelnost. Dalším krokem je návrh vstřikovací formy. Při návrhu vstřikovací formy se musí brát zřetel na vyrobitelnost součásti, konstrukci formy, použitý stroj a ekonomické náklady na výrobu. V dnešní době je neodmyslitelnou součástí návrhu formy ověření funkčnosti pomocí simulace procesu vstřikování. K tomuto ověření jsou vyvinuty speciální softwary, díky kterým lze zjistit možné vady, problémy a procesní parametry při vstřikování součásti. Ověřením funkčnosti vstřikovací formy tak odpadá možný neúspěch, ekonomický propad a vývoj je mnohanásobně rychlejší. Poslední částí je již samotná výroba vstřikovací formy a její odzkoušení v provozu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERNÍ MATERIÁLY

Dnes jsou polymerní materiály již nenahraditelnou součástí každodenního života. Jsou obsaženy takřka všude kolem nás. Jejich využití je zejména kvůli jejich nenahraditelným vlastnostem jako jsou nízká hmotnost, životnost, dobré mechanické a chemické vlastnosti, a především levná a poměrně snadná výroba. Plastikářský průmysl se široce rozvíjí po celém světě. Konkrétně v Evropě je více než 55 000 společností zabývajících se zpracováním plastů, které zaměstnávají více než 1,5 mil. lidí. Celková produkce plastových výrobků ve světě v roce 2019 činila zhruba 368 mil. tun, z čehož Evropa činí zhruba 50,7 mil. tun. Polymerní materiály se využívají ve všech průmyslových odvětvích. Využití konkrétních polymerních materiálů v daných odvětvích za rok 2019 je zobrazeno na obrázku 1.

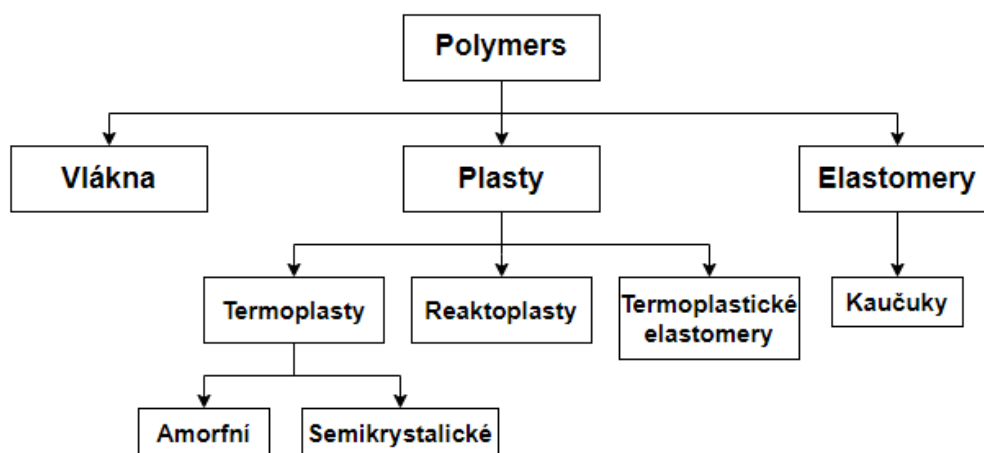


Obrázek 1 Využití jednotlivých typů materiálů v různých odvětvích v Evropě (2019) [1]

Za zmínku stojí i aktuální situace ve světě, tedy dopad pandemie COVID 19 na plastikářskou výrobu. Od roku 2018 výroba v plastikářském průmyslu v Evropě mírně klesá. Avšak pandemie COVID 19 tento pokles v roce 2020 silně zvedla, a to z důvodu menší poptávky zákazníků v průmyslových odvětvích jako je automobilový průmysl nebo stavebnictví. Od poloviny roku 2020 výroba nabrala opět mírný růst. [1]

1.1 Polymery a jejich rozdělení

Polymer je makromolekulární látka, která je složena z desítek až tisíců opakujících se kovalentně vázaných jednotek zvaných mer. Slovo polymer se tedy skládá z dvou řeckých slov poly (mnoho) a mer (opakující se jednotka). Polymerní řetězce mají velmi vysokou molekulovou hmotnost (10 kg/mol až 10 Mg/mol) a skládají se z molekul, které většinou obsahují atomy C (uhlíku), H (vodíku) a O (kyslíku). Délka řetězce neboli molekulová hmotnost udává finální fyzikální vlastnosti polymeru. Základním prvkem pro výrobu polymeru je monomer. Monomer se opět skládá z řeckých slov mono (jedna) a mer. Podle použitého druhu monomeru, druhu kovalentní vazby a počtu merů v řetězci se polymery dělí do třech základních skupin: vlákna, plasty a elastomery. Plasty a elastomery se dále dělí do podskupin, které se liší především chemickými, fyzikálními a zpracovatelskými vlastnostmi. Rozdělení polymerů do skupin je zobrazeno na obrázku 2. [2], [3], [4]



Obrázek 2 Rozdělení polymerních materiálů

1.1.1 Vlákna

U polymerních vláken je nejdůležitější vlastností orientace polymerních řetězců v jednom (podélném) směru. Geometrickou podmínkou pro polymerní vlákna je, že délka vlákna je větší než 100násobek jeho průměru ($L/D \geq 100$). Vlákna se používají například ve formě přízí a vyznačují se především velkou pevností v podélném směru. To je způsobeno orientací polymerních řetězců a krystalů zvlákněním a přitažlivou silou mezi řetězci. Mezi nejčastěji používaná polymerní vlákna patří například vlákna nylonová (PA), polyesterová (PET), polyakrylonitrilová (PAN) atd. [2]

1.1.2 Plasty

Obecně se v populaci používá výraz plasty pro všechny polymerní výrobky. Všechny plasty jsou polymery, avšak zdaleka ne všechny polymery jsou plasty. Mechanické vlastnosti plastů za běžných podmínek se vyznačují především svojí tvrdostí a nízkou elasticitou (křehkostí). Definice plastu je schopnost jej za zvýšené teploty a pomocí tlaku tvarovat do finálního produktu. Podle toho, zda mají plasty schopnost opakovatelného tvarování pomocí zvýšené teploty dělí se na termoplasty a reaktoplasty. Plasty jsou skupinou, která je z hlediska vstřikování nejpoužívanější. [3], [4]

Termoplasty

Termoplasty jsou látky, které za působení tepla měknou a lze je pomocí tlaku tvarovat do různých forem. Ochlazením změkklého termoplastu opětovně vytvrdne do původního stavu. Důležitou vlastností termoplastů je to, že proces měknutí a tuhnutí lze provádět na rozdíl od jiných látek opakovaně. Zahříváním materiálu nedochází k žádné chemické změně struktury. Z fyzikálního hlediska jsou polymerní řetězce u termoplastů v běžných podmínkách pevně vázané a nemají možnost pohybu. Zahřátím na požadovanou teplotu (individuální pro různé typy materiálů) se povolují vazby mezi řetězci a dochází k tzv. plastickému toku. Termoplasty se podle molekulární struktury řetězců dělí dále na: amorfní a semikrystalické. [5]

Amorfní termoplasty

Amorfní termoplasty se vyznačují náhodně uspořádanou molekulovou strukturou řetězců. Polymerní řetězce nejsou seskupeny v nějak definované poloze, ale vzájemně se prolínají. Amorfní termoplasty mají velmi dlouhé a rozvětvené řetězce. Mezi základní vlastnosti amorfních termoplastů patří zejména transparentnost (ne všechny), křehkost, menší smrštění a nižší hmotnost. Amorfní polymery se mohou nacházet ve třech různých stavech. Pro popis těchto stavů je nutností znalost základních charakteristických přechodových teplot jako: teplota skelného přechodu (T_g) a teplota tečení (T_f). Tři stavy, ve kterých se může amorfní termoplast nacházet se nazývají sklovitá oblast, kaučukovitá oblast a viskózní oblast. V běžných podmínkách se amorfní polymery nachází ve sklovité oblasti (pod teplotou skelného přechodu (T_g)) a chovají se jako pevná viskoelastická látka (pevné, křehké). Překročením této teploty se polymer dostává do tzv. kaučukovité oblasti, kde jej lze poměrně snadno deformovat. Toho se využívá především u tvarování za tepla. Pokud však chceme materiál využít pro metodu vstřikování musí se nacházet ve stavu taveniny. Toho lze docílit

zvýšením jeho teploty nad teplotu tečení (T_f). Nad touto teplotou se polymer chová jako viskoelastická kapalina (polymerní tavenina). V následující tabulce 1 jsou uvedeny nejpoužívanější amorfnní termoplasty s jejich charakteristickými teplotami. [5], [6]

Tabulka 1 Nejpoužívanější amorfnní termoplasty a jejich charakteristické teploty [7]

Druh amorfnního termoplastu	T_g [°C]
PS (Polystyren)	95
PVC (Polyvinylchlorid)	85
ABS (Acrylonitilbutadienstyren)	105
SAN (Styren acrylonitril)	105
PMMA (Polymethylmethakrylát)	110
PC (Polykarbonát)	150

Semikrystalické termoplasty

Semikrystalické termoplasty se vyznačují částečně uspořádanou molekulovou strukturou řetězců. Některé oblasti řetězců v molekulové struktuře jsou spolu vzájemně seřazeny a tvoří tzv. krystalické oblasti (krystality). Název semikrystalické termoplasty tedy vychází z toho, že molekulová struktura není čistě krystalická, ale je kombinací amorfnních a krystalických oblastí. Makromolekulární řetězce jsou oproti amorfnním značně méně rozvětvené. Semikrystalické termoplasty se vyznačují především svojí větší hmotností, tuhostí, houževnatostí, chemickou odolností a větším smrštěním. Oproti amorfnním termoplastům nejsou transparentní, ale pouze průsvitné nebo zcela neprůhledné. Semikrystalické polymery se mohou opět nacházet ve třech různých stavech stejně jako u amorfnních termoplastů. Pro přechod mezi těmito stavy je opět nutností znát charakteristické přechodové teploty s tím rozdílem, že u semikrystalických termoplastů to jsou: teplota skelného přechodu (T_g) a teplota tání krystalických složek (T_m). Z tabulky 2 lze vidět, že teplota skelného přechodu u semikrystalických termoplastů je hodně pod 0 °C. Z toho vyplývá, že při běžných podmínkách se tyto materiály nachází ve střední kaučukovité oblasti (kožovitá pevná látka). Se snižující se teplotou pod teplotu skelného přechodu T_g amorfnní oblasti v semikrystalické struktuře tuhnu a materiál se stává křehký. Pokud se semikrystalický materiál zahřeje nad teplotu tání T_m , stane se z něj viskózní látka neboli polymerní tavenina, která je nutná pro výrobu metodou vstřikování. [5], [6]

Tabulka 2 Nejpoužívanější semikrystalické termoplasty a jejich char. teploty [7]

Druh semikrystalického termoplastu	T _g [°C]	T _m [°C]
LDPE (Nízkohustotní polyethylen)	-120	105÷115
HDPE (Vysokohustotní polyethylen)	-120	130÷135
PP (polypropylen)	-15	160÷170
PA (Polyamid)	50	215÷225
POM (Polyoxymethylen)	-50	165÷185
PET (Polyethylentereftalát)	75	250÷260
PBT (Polybutylentereftalát)	75	225÷230

Termoplastů je celá škála. Podle jejich vlastností a použití se dělí do 4 skupin: komoditní termoplasty, speciální termoplasty, inženýrské termoplasty a speciální inženýrské termoplasty.

Komoditní termoplasty

Přibližně 70 % všech používaných termoplastů spadá do kategorie komoditních. Ty se vyznačují především nízkou cenou a jednoduchým zpracováním. Komoditní termoplasty se využívají především v aplikacích, kde nejsou silně mechanicky namáhány. Mezi nejpoužívanější komoditní termoplasty patří např. LDPE, HDPE, PP PS a PVC.

Inženýrské termoplasty

Inženýrské termoplasty se vyznačují především svými vlastnostmi jako jsou: vynikající pevnost, houževnatost, odolnost vůči opotřebení, chemická odolnost a tepelná odolnost. Tyto termoplasty jsou samozřejmě cenově dražší než komoditní a jejich využití je především v mechanických zařízeních jako např. ozubená kola nebo technické díly v automobilech. Nejpoužívanějšími inženýrskými termoplasty jsou např. PA, PET, PC, ABS.

Speciální inženýrské termoplasty

Speciální inženýrské termoplasty se používají pro speciální aplikace, kde je zapotřebí velmi dobrá mechanická odolnost a často použití ve velmi vysokých teplotách (nad 150 °C). Tyto termoplasty jsou logicky nejdražší a patří mezi ně např. PPS, PEI, PEEK, PI. [2], [3]

Termoplastické elastomery

Výrobky z elastomerů se ve většině případů vyrábí pomocí lisování, lze však využít i metodu vstřikování, pro kterou se používá speciální druh elastomerů zvaných termoplastické elastomery. Tyto elastomery se zpracovávají stejným způsobem jako klasické termoplasty a lze je opakovaně tavit. Termoplastické elastomery se často označují zkratkou TPE. Vlastnosti termoplastických elastomerů jsou ve srovnání s běžnými elastomery horší, a to zejména tím, že z velké části se skládají z plastu. Termoplastické elastomery se skládají z termoplastického pojiva, ke kterému je připojen měkký polymer, který může být buď zesíťovaná guma, nezesíťovaná guma nebo měkký termoplastický polymer. Charakteristické teploty termoplastických elastomerů pro jejich zpracování udává druh použitého termoplastu. [8]

1.1.3 Reaktoplasty

Reaktoplasty jsou odlišné od termoplastů především tím, že nejsou opakovaně tavitelné. To je způsobeno tím, že při zahřátí reaktoplastu na požadovanou teplotu nedochází ve struktuře materiálu pouze k fyzikálním změnám, ale i k chemickým. Chemická změna uvnitř struktury materiálu se nazývá vytvrzování. Reaktoplasty se zpracovávají ještě v nezesíťované formě (nevytvrzený). Při působení teploty a tlaku se nezesíťovaný reaktoplast změni v polymerní taveninu a pomocí formy získá finální tvar. Při tuhnutí reaktoplastu dochází k chemické změně uvnitř struktury materiálu, a to vytvářením příčných vazeb mezi řetězci (vytvrzováním). Po úplném ztuhnutí jsou reaktoplasty tepelně odolné, netavitelné a nerecyklovatelné. Tyto materiály lze použít pro výrobu výlisků formou vstřikování. Reaktoplasty jsou také známé pod pojmem pryskyřice. Mezi nejpoužívanější patří např. fenolformaldehydová pryskyřice nebo epoxidová pryskyřice. [2]

1.1.4 Elastomery

Elastomery jsou polymery, které se vyznačují tím, že se při běžné teplotě mohou deformovat až na dvojnásobek svoji původní délky a po odstranění zatížení se vrátí do původního tvaru. Tato vlastnost je způsobena speciální molekulovou strukturou materiálu, která má pružné řetězce, které jsou vzájemně spojeny (zesíťovány) mezimolekulárními a kovalentními vazbami. Zesíťování molekulárních řetězců způsobuje jejich omezený pohyb a nazývá se taky jako vulkanizace. Vulkanizace se provádí za vysokých teplot a tlaku po předem definovaný čas za pomoci síťovacích činidel a jiných látek. Základní surovinou pro elastomery je kaučuk. Kaučuky jsou přírodní a syntetické. Přírodní kaučuk se vyrábí

z latexu, který se získává z kaučukovníku. Syntetické elastomery jsou organické a silikonové. Obecně se využívá pro všechny elastomery název guma. I když ve většině případů je toto pojmenování správné, o gumu se jedná pouze ve složení kaučuk + síťovací činidla a jiné látky. Zvulkanizovaná guma se poté nazývá pryž. [2], [8]

1.2 Faktory ovlivňující výběr materiálu pro vstřikování

Při návrhu polymerního výrobku metodou vstřikování je nedílnou součástí i výběr vhodného druhu materiálu. Materiál musí splňovat celou řadu požadavků pro správný vzhled a funkčnost výrobku. Při výběru je nejsnazší cestou zhodnotit několik základních faktorů pro výběr vhodného materiálu:

1. finanční faktor (nákupní cena, výrobní náklady ...),
2. rozměrový faktor (tvarová stabilita, hmotnost výrobku ...),
3. mechanický faktor (tuhost, houževnatost ...),
4. environmentální faktor (životnost, odolnost okolním vlivům ...),
5. regulátory (Zdravotní nezávadnost, požární odolnost ...),
6. elektrický faktor (el. izolace ...),
7. akustický faktor (pohlcování zvuku),
8. procesní faktor (vhodnost výrobní technologie),
9. další operace (svařování, lepení, lakování ...). [9]

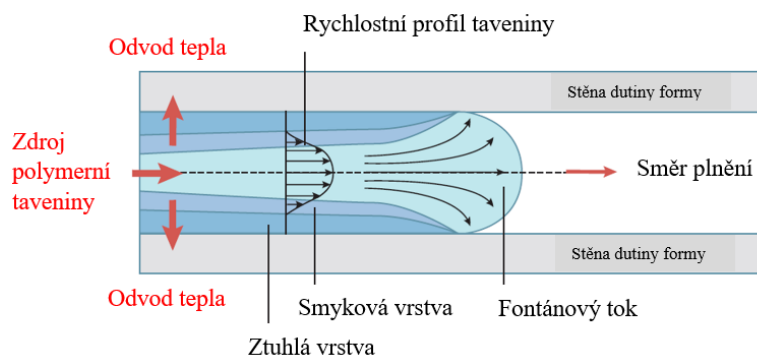
1.3 Reologické chování polymerních materiálů v oblasti vstřikování

Pro správné navržení konstrukce vstřikovací formy je zapotřebí znát princip plnění dutiny formy polymerní taveninou. Touto problematikou se zabývá obor zvaný reologie. Tok polymerní taveniny během plnění dutiny formy je poměrně komplikovaný. Podmínkou pro správné plnění dutiny formy je, aby plnění bylo tzv. laminární. Laminární proudění je, že tavenina se pohybuje v rovnoměrných vrstvách a má radiálně expandující tokový profil (viz. Obr. 3). Jednotlivé vrstvy taveniny musí být ihned po vniknutí do dutiny v kontaktu se stěnou. Pokud není tato podmínka dodržena dochází k jevu nazývaném tryskový tok (viz kapitola 2.3).



Obrázek 3 Plnění dutiny formy [11]

Jelikož jsou stěny dutiny formy několikanásobně chladnější, než je teplota taveniny, dochází při jejich styku k okamžitému ochlazení a ztuhnutí polymerní taveniny. Z důvodu ztuhlého polymeru na stěně je rychlost taveniny na stěně nulová a největší je uprostřed dutiny. To má za následek tvoření speciálního toku taveniny nazývaného fontánový tok. Z důvodu toho, že rychlost taveniny je vyšší ve středu a nižší na stranách, tak v čele taveniny teče střední část taveniny k okraji a vytváří tak čelo taveniny ve tvaru fontány. Při plnění dutiny taveninou se ztuhlá vrstva na stěnách s časem zvětšuje a zmenšuje tak otvor pro plnění. To může mít za následek zatuhnutí a nedotečení výstřiku. Z toho důvodu je nutností správná konstrukce výstřiku, vhodné umístění vtokového ústí a nastavení správných procesních podmínek. Fontánový tok je zobrazen na obrázku 4. [10], [11], [12]



Obrázek 4 Fontánový tok [12]

1.4 Aditiva v polymerních materiálech a jejich vliv na vlastnosti

Polymery se málo používají jako čisté materiály, kvůli jejich špatným vlastnostem. Polymery téměř vždy obsahují několik aditiv (přísad), které ovlivňují zpracovatelnost, odolnost, životnost, vzhled a mechanické vlastnosti. Například Polypropylen by bez přidaných aditiv nebyl jedním z nejpoužívanějších polymerů. Bez aditiv by degradoval během několika týdnů, kvůli špatné tepelně oxidační stabilitě. V této kapitole jsou popsána nejčastěji používaná aditiva v polymerních materiálech. [13]

1.4.1 Změkčovadla

Změkčovadla se přidávají do polymerních materiálů zejména kvůli změně jeho reologických a mechanických vlastností. Změkčovadla mají identickou funkci jako zvyšující se teplota, a to snížení viskozity materiálu. Snížení viskozity zabraňuje degradaci materiálu během zpracování. Použití změkčovadel má za následek i změnu mechanických vlastností jako je tuhost, houževnatost a pevnost. Tuhost lze použitím změkčovadel u PVC snížit až o tři řády a teplotu skelného přechodu až o 35 °C. [14]

1.4.2 Zpomalovače hoření

Polymery jsou organické látky a většina z nich jsou hořlavé. V mnoha aplikacích je to závažný problém zejména kvůli bezpečnosti. Pro snížení hořlavosti polymerních materiálů se proto používají tzv. zpomalovače hoření. Zpomalovače hoření omezují možnost vznícení a šíření plamene. [14]

1.4.3 Stabilizátory

Polymery za působení tepla a kyslíku tepelně degradují. Teplo v kombinaci s kyslíkem způsobují na polymerech žluté nebo hnědé zbarvení. Degradace materiálu se eliminuje přidáním stabilizátorů, jako antioxidanty nebo peroxidové rozkladače. Přidání stabilizátorů však tepelnou degradaci zcela nevyloučí, ale jen ji zpomalí. Tato ochrana není věčná. Jakmile stabilizátor za reakce s kyslíkem z materiálu vyprchá, materiál už není chráněn a dojde k jeho degradaci. [14]

1.4.4 Antistatické přísady

Polymery jsou obecně známy svojí elektrickou nevodivostí. Avšak na jejich povrchu se mohou vytvářet elektrostatické náboje. Antistatické přísady mají za úkol snížit vznik elektrostatických nábojů a zrychlit jejich opuštění do vlhkosti v okolí. [14]

1.4.5 Plniva

Plniva se přidávají do polymerních materiálů z důvodu zlepšení mechanických vlastností, ke snížení množství použitého materiálu, nebo i ke zlepšení jeho elektrické vodivosti. Přítomnost plniv v polymerních materiálech se často označuje na výrobcích přidáním značky za použitý materiál, například PA6/GF30 (polypropylen plněný 30 % skleněnými vlákny). Plniva se dělí do třech základních skupin a to: vyztužující, částicová a nanoplňiva.

Vyztužující plniva se používají především pro zlepšení mechanických vlastností výrobku. Vyztužující plniva zlepšují pevnost, tuhost a tvarovou stálost, ale naopak snižují houževnatost, kluzné vlastnosti a smrštění. Obvykle se tato plniva používají ve formě vláken v délce řádu milimetrů až desítek milimetrů. Mezi nejčastěji používaná vyztužující plniva patří skleněná nebo uhlíková vlákna. Obsah vyztužujících plniv v polymeru se v některých případech může pohybovat až okolo 80 %. Pro zlepšení vazby mezi polymerem a vyztužujícími vlákny se přidávají vazební činidla jako silany a titaničitany.

Částicová plniva se používají pro zlepšení tepelné odolnosti, smrštění, elektrické vodivosti, tvrdosti a tuhosti výstřiku. Také lze částicová plniva použít pro ušetření základního polymeru. Nevýhodou je, že ve většině případů částicová plniva zvyšují viskozitu a snižují houževnatost. Částicové plniva se používají ve formě částic o velikosti jednotek mikronů až po desetiny milimetrů. Obsah částicových plniv v polymeru může být až 60 %. Mezi nejpoužívanější plniva patří skleněná a dřevěná kuličky, práškové kovy, vápenec atd.

Nanoplňiva zlepšují jak mechanické vlastnosti, tak především nepropustnost, chemickou odolnost, vzhled a navlhavost výrobku. Jak vyplývá z názvu nanoplňiva, částice mají velikost v řádu nanometrů a používají se až do 7 % obsahu výstřiku. Jedná se o vyztužení polymerních řetězců v molekulárním měřítku. [9],[14]

1.4.6 Nadouvadla

Funkcí nadouvaladel je tvorba tzv. expandovaných plastů neboli polymerních pěn. Expandované plasty se používají převážně kvůli jejich nízké hmotnosti v porovnání s objemem a pevností, dobrým izolačním a akustickým vlastnostem a vlastností pohlcovat vibrace. Polymerní pěny se vyrábí ve třech krocích: 1. nukleací buněk, 2. expanzí a růstem buněk a 3. stabilizací buněk. Vzduchové buňky uvnitř polymeru mohou být uzavřené nebo propojené. [14]

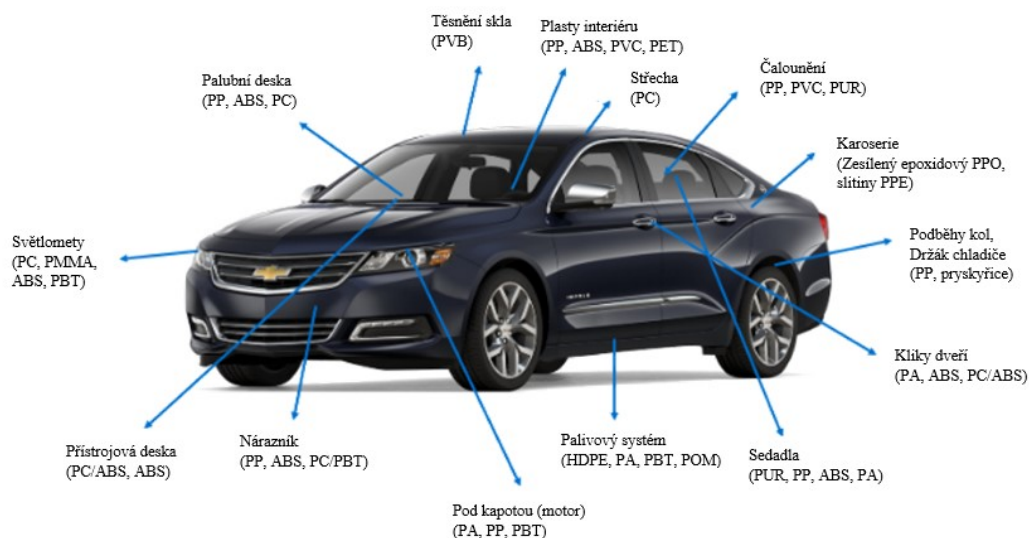
1.4.7 Barviva a pigmenty

Jen málo polymerních výrobků má ve finálním produktu svoji přirozenou barvu. Polymerní materiály lze obarvit takřka libovolně. Často polymery nakupují již obarvené, avšak lze polymer obarvit až při výrobě za pomoci šneku vstřikovacího nebo vytlačovacího stroje. Při barvení polymeru lze využít buď suchou barvu, tekutou barvu nebo barevné koncentráty. Suchá barva se dodává v práškové a tekuté v tekuté formě. Podle rozpustnosti barviva se dělí

na barviva a pigmenty. Barviva jsou rozpustná ve vodě a organických rozpouštědlech, zatímco pigmenty nikoli. [13]

1.5 Polymerní materiály v automobilovém průmyslu

Automobilový průmysl je po obalovém a stavebním nejrozšířenějším v oblasti zpracovávání polymerních materiálů. Nejdůležitějšími faktory pro výběr právě polymerních materiálů oproti jiným je jejich lehká váha, dobré mechanické vlastnosti, jednoduchá a rychlá výroba, ekonomika a v neposlední řadě nižší emise skleníkových plynů. Nižší emise skleníkových plynů souvisí jak s výrobou automobilů, tak i jejich denním použitím. Lehké materiály umožňují menší spotřebu paliva automobilů a snížením 100 kg z váhy automobilu lze ušetřit až 0,4 litrů paliva na 100 km. Polymerní materiály umožňují také mnohem větší svobodu pro konstrukční a návrhové kanceláře. Metodou vstřikování lze vyrobit mnohem složitější a zajímavější díly než například obráběním. V dnešních automobilech hrají polymerní materiály roli také v bezpečnosti a pohodlí posádky. Aktuální moderní automobily se skládají přibližně z 30 tisíc dílů, z čehož je asi jedna třetina z polymerních materiálů. Pro výrobu polymerních dílů automobilu se využívá asi 40 základních druhů plastů, z čehož asi 70 % tvoří materiály jako polypropylen (PP), polyuretan (PU), polyamid (PA) a polyvinylchlorid (PVC). Plastové díly v automobilech lze podle oblasti použití rozdělit do 4 skupin: díly interiéru, exteriéru, karoserie a motoru. Na obrázku 5 je zobrazen automobil s popisem, které materiály se používají v určitých aplikacích. [15], [16], [17]



Obrázek 5 Aplikace plastových dílů v automobilu [15]

1.5.1 Díly interiéru

V interiérech moderních automobilů dominují plastové díly. Důvodem jejich použití není jen nízká váha, ale také vzhled a akustické vlastnosti. Největší plastovou částí v interiéru automobilu je palubní deska osazena přístroji. V luxusních automobilech se využívají i materiály jako je dřevo, kůže atd. Tyto materiály jsou však poměrně drahé a práce s nimi není snadná. Výhodou plastových dílů je, že dokážou napodobit povrch těchto materiálů. V interiérech automobilů jsou dnes plasty již nenahraditelné. A to ne kvůli lehké váze a vzhledu, ale kvůli bezpečnosti posádky. Například bezpečnostním požadavkům na airbagy, bezpečnostní pásy nebo boční kryty dnes odpovídají pouze plastové díly. Mezi nejpoužívanější materiály v interiérech automobilů patří např. PP, ABS, PVC, TPU. [18]

1.5.2 Díly exteriéru

Většina karoserie automobilů je tvořena kovovými díly. Nahrazení částí karoserie plastovými díly je dnes u moderních automobilů zcela běžné. Nahrazování plastovými díly se provádí zejména kvůli nižší hmotnosti. Z plastu jsou například nárazníky, boční prahy, víčka nádrží, světlomety a různé dekorativní prvky. Problémem je, že plastové díly v exteriéru jsou nepřetržitě vystaveny náročným podmínkám. Jedná se především o mechanické poškození (například poletujícími nečistotami za jízdy) a počasí. Plastové díly v exteriéru vozidla musí být odolné povětrnostním vlivům a slunečnímu záření (tepelná odolnost). Mezi nejpoužívanější materiály na díly exteriéru automobilu patří PP, PC, ABS a PBT. [18]

1.5.3 Díly karoserie

Díly základní karoserie a rámu automobilu jsou vyrobeny převážně z kovových materiálů, kvůli jejich extra vysoké pevnosti a tuhosti. Dnes vývoj automobilů silně roste a už i v dílech karoserie lze ojediněle objevit plastové komponenty. Jedním z takových případů je například u automobilu BMW M3 přední nosník nárazníku vyrobený z polyamidu. U takhle vyrobeného nosníku jsou však kladeny velmi vysoké nároky na bezpečnost při nehodě. Využití plastových dílů karoserie se používá zejména kvůli nízké hmotnosti a odolnosti proti korozi. [18]

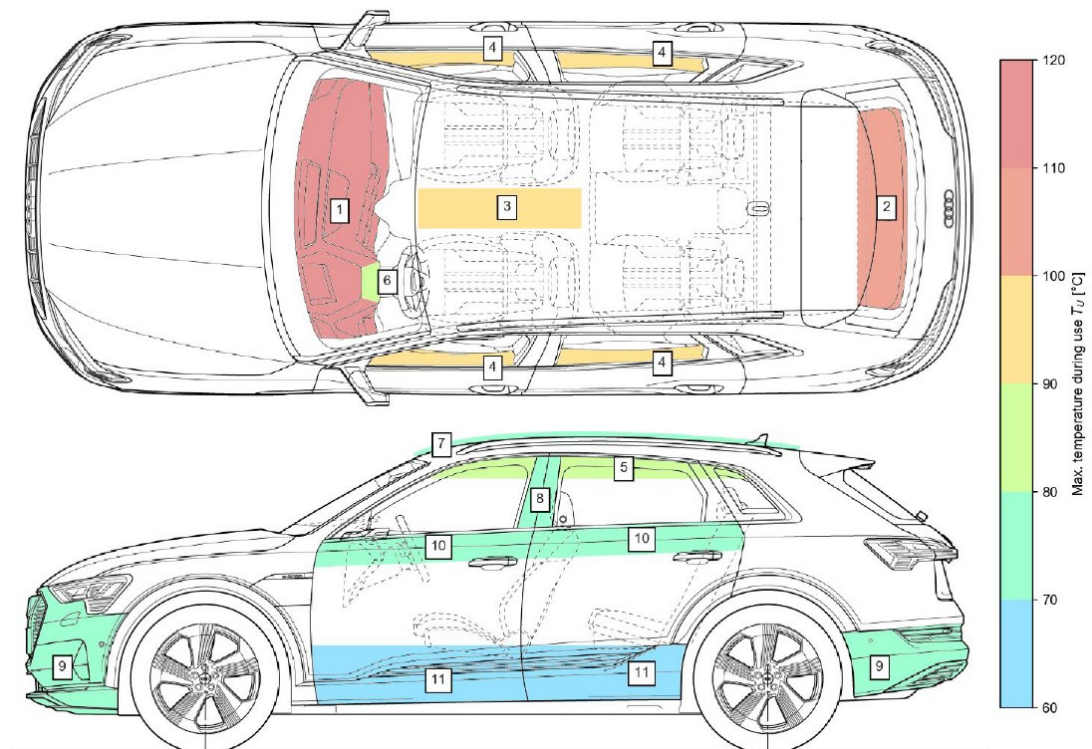
1.5.4 Díly motoru

Po otevření kapoty moderních automobilů jsou k vidění ve většině případů pouze plastové díly. Použití plastových komponent v motorovém prostoru je dnes už běžné. Výhodou je opět nízká váha a také jednoduchost výroby s poměrně malými náklady oproti jiným

technologiím. V motorovém prostoru se plastové díly využívají například na různé kryty, potrubí, sání, chladiče nebo ve speciálním případě i olejové vany. Plastové díly se vyrábí zejména z technických plastů, které odolávají vysokým teplotám a chemikáliím. V motorovém prostoru může v extrémních podmínkách teplota dosahovat až přes 100 °C. Jedním z předních polymerních materiálů využívaných pro komponenty motoru je polyamid (PA). Ten dokáže v upravené podobě vydržet nepřetržitě okolo 130 °C a chvilkově až 200 °C provozní teploty. Také se vyznačuje vynikající houževnatostí, odolností proti nárazu a oděru, vysokou pevností a odolností vůči olejům. Při výrobě potrubí motoru z plastu je také výhodou využití technologie vstřikování GIT a WIT, což eliminuje složitý proces svařování. [18], [19]

1.5.5 Maximální provozní teploty plastových částí automobilu

Důležitou vlastností polymerních materiálů použitých v automobilech je jejich tepelná odolnost. To, že díly v motorovém prostoru automobilu jsou vystaveny vysokým teplotám je zřejmé. Avšak i v interiéru automobilu mohou plastové díly vlivem slunečního záření dosahovat velmi vysokých teplot. Nejpostiženějšími místy jsou palubní deska, kryty kufru a horní panely dveří. To se musí zohlednit při výběru materiálu. Na obrázku 6 jsou zobrazeny maximální teploty plastových částí automobilu při provozu v extrémních podmínkách. [20]



Obrázek 6 Maximální teploty plastových dílů automobilu v extrémních podmínkách [20]

2 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

Pro výrobu plastových výrobků se nejčastěji používá metoda vstřikování. Více než polovina všech zařízení pro zpracování polymerních materiálů jsou vstřikovací stroje. Vstřikování plastů se používá už téměř 150 let, kdy prvním výrobkem vyrobeným metodou vstřikování byla kulečnicková koule z celuloidu v roce 1868. Prvotní vstřikovací stroje byly podle dnešních velice primitivní a polymerní tavenina byla vstřikována dopředným pohybem pístu. Největšího pokroku v metodě vstřikování plastů bylo dosaženo v 60. letech 20. století, kdy byl vyroben vstřikovací stroj se šnekem s vratným pohybem. Tato technologie nebyla překonána a využívá se dodnes. Vstřikováním se zpracovávají především termoplasty, ale za určitých podmínek lze zpracovávat i elastomery a reaktoplasty. Materiál pro vstřikovací stroje je většinou ve formě granulátu nebo prášku. Vstřikování plastů je cyklický proces založený na rychlém plnění dutiny formy roztaveným polymerním materiálem a jeho ochlazení. Materiál je ve vstřikovací stroji roztaven a přeměněn v polymerní taveninu, která je vstřikována do dutiny formy pod vysokým tlakem (500÷1500 barů). Po ochlazení a ztuhnutí materiálu se z formy vyjme hotový výrobek. Největší výhodou metody vstřikování plastů je ekonomika hromadné výroby. Malosériová výroba není pro metodu vstřikování zcela vhodná, kvůli vysoké ceně nástroje (formy). Mezi další výhody patří zejména možnost vyrábět díly se složitou geometrií, s malými tolerancemi a širokou škálou materiálů. V dnešní době, kdy je na vzestupu tzv. Průmysl 4.0 je automatizace nezbytnou součástí většiny výrob. Díky svoji funkci a automatickému chodu je poměrně snadné vstřikovací stroj spojit s dalšími komponenty. Vstřikovací stroje jsou ve většině případů osazeny roboty či jsou kombinací celého automatizovaného zařízení. Při požadavku zákazníka vyrábět produkt metodou vstřikování se musí podstoupit několik základních kroků:

1. návrh výrobku (funkčnost, vzhled, materiál),
2. návrh vstřikovací formy (posouzení vyrobitelnosti dílu, konstrukce formy),
3. ověření funkčnosti formy (Simulace procesu vstřikování v příslušném softwaru a odhalení možných problémů),
4. výroba formy a její odzkoušení v praxi. [12], [14], [21], [22]

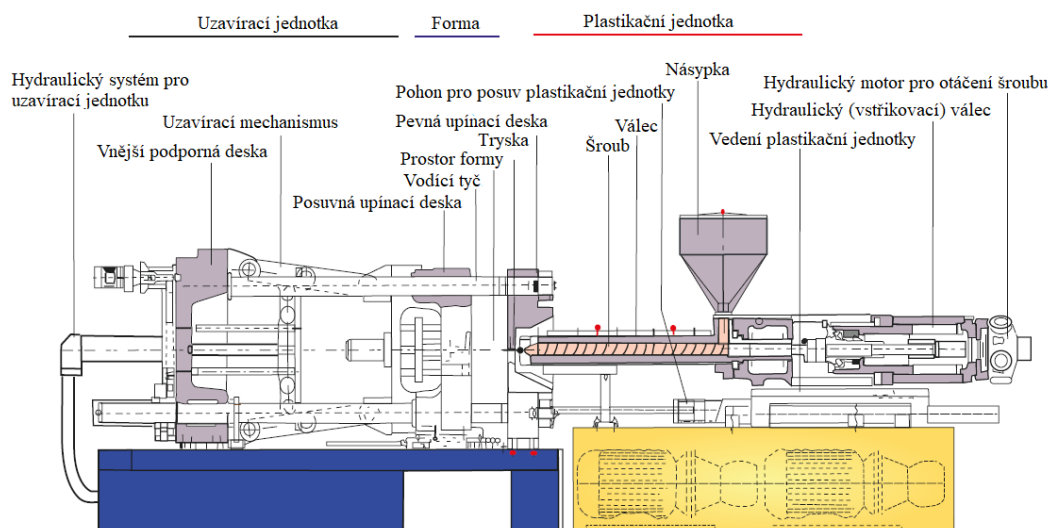
2.1 Vstřikovací stroje

Pro vstřikování plastů se používají tzv. vstřikovací stroje. Výrobou vstřikovacích strojů se zabývá spousta firem po celém světě. Mezi nejznámější a nejpoužívanější vstřikovací stroje patří rozhodně německá společnost ARBURG nebo rakouská společnost ENGEL. Vstřikovací stroje se podle použitého pohonu dělí na: hydraulické, elektrické a hybridní. Dále se dělí podle polohy vstřikovací jednotky na horizontální a vertikální. Vertikální vstřikovací stroje se používají jen zřídka. Jejich stavby se využívá především v operacích, kde dochází k obtříku zálisku. Jejich výhodou je také snadné manuální vkládání zálisků a odebírání hotových výstřiků obsluhou. Na obrázku 7 je zobrazen horizontální a vertikální vstřikovací stroj. [12], [14], [21], [22]



Obrázek 7 Vstřikovací stroj a) horizontální b) vertikální [23]

Konstrukce vstřikovacího stroje se dělí na plastikační jednotku a uzavírací jednotku. Nástrojem vstřikovacího stroje je forma. Na obrázku 8 je zobrazeno schéma hydraulického vstřikovacího stroje s popisem jednotlivých komponent.



Obrázek 8 Schéma hydraulického vstřikovacího stroje [6]

2.1.1 Plastikační jednotka

Plastikační jednotka vstřikovacího stroje má za úkol přeměnit materiál z násypky na polymerní taveninu, naakumulovat taveninu v komoře před šroubem, vstříknout taveninu do dutiny formy a udržet tlak v dutině formy během procesu ochlazování. Existují dva typy plastikačních jednotek: pístové a šnekové.

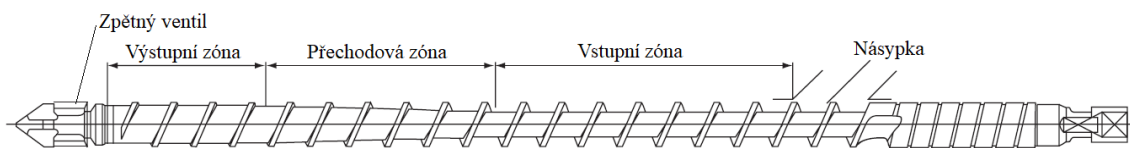
Pístové plastikační jednotky jsou v dnešní době již překonány šroubovými a využívají se jen zřídka. Používají se například u tvarování elastomerů. U pístové plastikační jednotky se přesně odměřená dávka materiálu (např. granulátu) vloží do vyhřívaného válce před píst. Po dosažení požadované teploty materiálu (přeměny v taveninu) se materiál pomocí pístu vstříkuje do dutiny formy. Nevýhodou této plastikační jednotky je především velmi dlouhá doba zdržení materiálu ve vyhřívaném válci, což může způsobit tepelnou degradaci materiálů citlivých na teplo jako je třeba PVC.

Nevýhody pístové plastikační jednotky jsou eliminovány použitím šneku se zpětným pohybem. Ve šnekové plastikační jednotce je materiál současně plastikován a dávkován a umožňuje během plastikace i míchání. Šneková plastikační jednotka je téměř totožná s běžným vytlačovacím strojem jen s tím rozdílem, že šroub vykonává pohyb vpřed a vzad kvůli akumulaci a vstřikování taveniny. Maximální posuv šneku činí až 3násobek jeho průměru. Skládá se ze základních prvků jako: násypky, válce s topnými tělesy, šroubu se zpětným ventilem a trysky.

Materiál (nejčastěji ve formě granulátu) je vložen do násypky. Násypka musí být navržena tak, aby v ní nedocházelo k zadržování materiálu a ten mohl být přiváděn do válce pouze gravitační silou. Součástí násypky bývají například i magnety, které mají za úkol zachytit kovové nečistoty, které by vedly k poškození válce a formy. Dále se u násypek při zpracovávání recyklátu mohou vyskytovat i síta, které zabraňují vniknutí velkých částic do válce, což by vedlo k zablokování dávkování. Často se válec u násypky chladí, a to z důvodu lepší dopravy materiálu a eliminace možného roztavení materiálu již v násypce, což by vedlo k jejímu zalepení.

Po tom, co materiál projde násypkou dostává se do vyhřívaného válce se šnekem. Válec je vyhříván pomocí topných těles, které jsou rozděleny do několika bloků. Teplotu na každém z těchto bloků lze nastavit individuálně. Rotací šroubu a zpětným pohybem je materiál dopravován před čelo šroubu. Během dopravy materiálu od násypky před čelo šroubu je působením tepla a tlaku materiál přeměněn v polymerní taveninu.

Přeměnu granulátu v polymerní taveninu má za vinu působení válce a šneku. Šnek vstřikovacího stroje je velmi důležitou součástí a na jeho výrobu je kladen velký důraz. Povrch šneku je vysoce leštěný, kvůli lepší dopravní schopnosti. Konstrukce šneku po jeho délce není konstantní. Obecně se šnek dělí na 3 zóny: vstupní, přechodová a výstupní. Vstupní zóna má pouze funkci dopravy granulátu do přechodové zóny. V přechodové zóně dochází k roztavení granulátu v polymerní taveninu a její promíchání. V poslední zóně dochází opět pouze k dopravě taveniny před čelo šneku. Správně navržený šnek musí splňovat pravidlo, že k tavení materiálu dochází pouze v prostřední (přechodové) zóně. Nejdůležitější specifikací šroubu je poměr jeho délky a průměru (L/D). U běžných termoplastů je tento průměr minimálně asi 20:1. Šnek vstřikovacího stroje je na konci opatřen tzv. zpětným ventilem. Jeho funkce je uvolnění možnosti akumulace materiálu před čelo šroubu a při vstřikování zamezení úniku taveniny zpět do šroubu. Správně fungující zpětný ventil umožní při vstřikování maximálně 5 % úniku taveniny zpět do šroubu. Na obrázku 9 je zobrazen běžně používaný šroub ze vstřikovacího stroje. [14], [21], [22]



Obrázek 9 Šroub vstřikovacího stroje [21]

Posledním prvkem plastikační jednotky je tryska. Tryska slouží k těsnému spojení plastikační jednotky s formou. Existuje několik druhů trysek podle zpracovávaného materiálu. Základní rozdělení je na otevřené a uzavíratelné. Otevřené trysky se vyznačují jednodušší konstrukcí a nižšími pořizovacími náklady. Nevýhodou otevřených trysek je samovolné vytékání taveniny z plastikační jednotky během její akumulace před čelo šneku. Uzavíratelné trysky se využívají naopak tam, kde je nežádoucí samovolné vytékání taveniny z plastikační jednotky. Jednoduché uzavíratelné trysky jsou otevírány a zavírány tlakem taveniny. Složitější jsou ovládány samostatně hydraulicky nebo mechanicky. [14], [21], [24]

2.1.2 Uzavírací jednotka

Uzavírací jednotka má za činnost uchycení formy, otevírání a zavírání formy, držení dostatečné uzavírací síly během vstřikování a vyhození výstřiku. Základními prvky uzavírací jednotky jsou uzavírací mechanismus, upínací desky, vodící tyče a vyhazovací mechanismus. Uzavírací mechanismus může být podle použitého stroje buď čistě hydraulický, elektrický nebo jejich kombinací. Forma je upevněna mezi upínací desky,

z čehož levá deska je pohyblivá. Při vstřikování hydraulický pohon tlačí pohyblivou desku směrem k pevné a drží formu bezpečně uzavřenou. Po ochlazení výstřiku na vyhazovací teplotu hydraulický pohon odjede s pohyblivou upínací deskou a forma se otevře. Poslední činností uzavírací jednotky je vyhození výstřiku vyhazovacím systémem upevněným na pohyblivé straně formy.

2.1.3 Parametry pro výběr vstřikovacího stroje

Před výběrem vstřikovacího stroje je nutností znalost určitých technických parametrů. Tyto parametry se volí dle vyráběného dílce, násobnosti a velikosti formy a použitého materiálu. Mezi základní parametry pro výběr stroje patří: vstřikovací kapacita, uzavírací síla, vstřikovací tlak a rychlost, velikost formy a maximální zdvih.

Vstřikovací kapacita je definována jako maximální hmotnost materiálu, který je stroj schopen během jednoho cyklu vstříknout do dutiny formy. Tato hodnota se liší pro různé materiály, kvůli jejich odlišné hustotě. Určuje se dle hmotnosti výrobku, násobnosti formy a použitého vtokového systému.

Uzavírací síla je definována jako maximální síla potřebná k uzavření formy během vstřikování. Tato hodnota se určuje z průměrného tlaku uvnitř dutiny formy a plochy dutiny formy. Uzavírací síla běžných vstřikovacích strojů se pohybuje od 280 kN až do 55 000 kN.

Vstřikovací tlak je definován jako maximální hodnota tlaku při vstřikování taveniny do dutiny formy. Se vstřikovacím tlakem také souvisí vstřikovací rychlost. Ta je definována jako množství materiálu vstříknutého do dutiny formy za jednotku času.

Při výběru vstřikovacího stroje je zapotřebí brát v úvahu i velikost formy. Maximální velikost formy, kterou lze do stroje umístit je určena rozměrem mezi vodícími tyčemi. Dalším parametrem je maximální zdvih stroje. Ten je důležité znát kvůli maximálnímu možnému otevření formy pro vyhození výstřiku. Posledním parametrem souvisejícím s upevněním formy je středící kroužek. Ten musí být stejný jak na vstřikovacím stroji, tak formě. [26]

2.1.4 Porovnání hydraulických, elektrických a hybridních vstřikovacích strojů

Vstřikovací stroje mohou mít pohon čistě hydraulický, elektrický nebo hybridní (kombinovaný). Tyto pohony poskytují u vstřikovacích strojů pohyby uzavírací a plastikační jednotky. Pro určité aplikace může být jeden pohonný systém výhodnější než jiný. Nejpoužívanějším a nejstarším typem vstřikovacích strojů jsou bezpochyby stroje

hydraulické. Při dnešním rozvoji elektroniky se však čím dál více rozšiřují i stroje elektrické, kterým v některých vlastnostech nemohou hydraulické stroje konkurovat.

Hydraulické vstřikovací stroje se vyznačují především svými vysokými vstřikovacími rychlostmi, vysokými uzavíracími silami a možností dlouhého působení dotlakové fáze. Poruchovost hydraulických strojů je oproti elektrickým mnohem menší. To je způsobeno zejména tím, že hydraulické stroje jsou poháněny pouze jedním nebo dvěma elektrohydraulickými pohony. Elektrické stroje jsou osazeny mnohem větším počtem pohonů a prvků a jejich náchylnost na poruchy je mnohanásobně větší. Poslední výhodou hydraulických strojů je jejich dostupnost v nemalé řadě velikostí a výrobců s nižší pořizovací cenou (až o 20 %) na rozdíl od plně elektrických.

Elektrické vstřikovací stroje se vyznačují především svojí vysokou přesností a energetickou úsporou. Oproti hydraulickým strojům, kde je hydraulické čerpadlo neustále v chodu, u elektrických strojů jsou servopohony v chodu jen při dané operaci. Z pohledu ekologie jsou elektrické stroje také výhodnější. Další výhodou těchto strojů oproti hydraulickým je tišší a rychlejší chod.

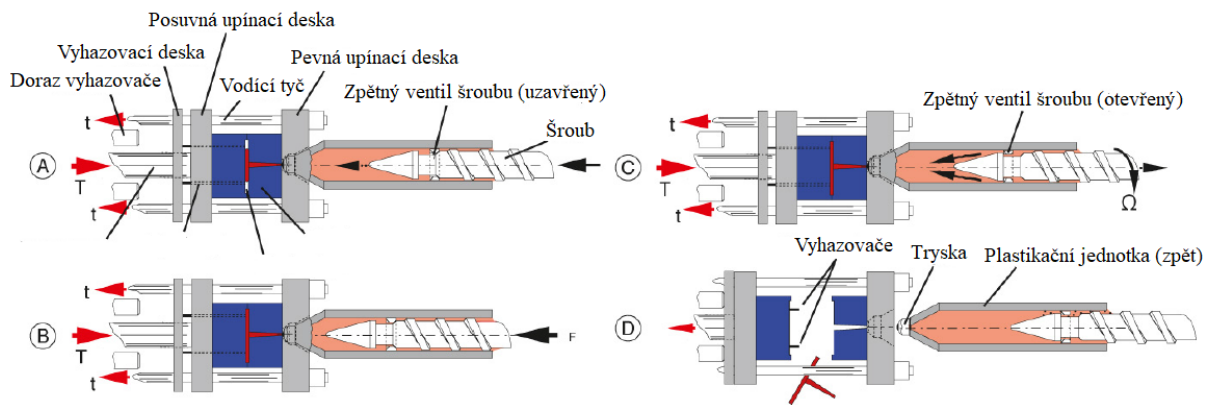
V konkrétních aplikacích je výhodnější hydraulický nebo elektrický stroj. Avšak ani jeden není výhodný pro všechny aplikace. Proto existují tzv hybridní stroje, které kombinují výhody těchto dvou systémů. Hybridní vstřikovací stroje kombinují elektrickou uzavírací jednotku a dávkování materiálu s hydraulickým vstřikováním. [23], [24], [25]

2.2 Princip technologie vstřikování

Typický cyklus vstřikovacího stroje je zobrazen na obrázku 10. Skládá se ze 4 základních částí.

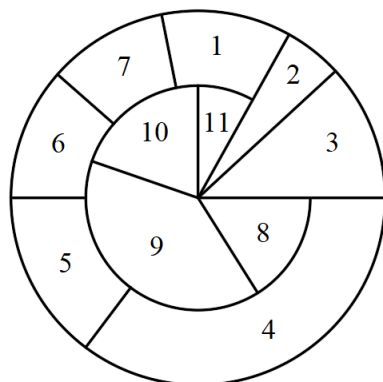
- A. Je-li polymerní tavenina naakumulována před čelem šroubu a forma uzavřena dochází ke vstříknutí taveniny do dutiny formy dopředným pohybem šroubu. Při tomto pohybu se šroub neotáčí a zpětný ventil šroubu je uzavřený. Vzduch z formy je vytlačen taveninou skrze odvzdušňovací kanály a dělicí rovinu.
- B. Pokud je dutina formy naplněna, šroub neustále vykonává dopředný pohyb a tlačí taveninu. Tato fáze se nazývá dotlak. Dotlak je ve vstřikovacím cyklu zahrnut z důvodu doplnění materiálu, který v dutině chybí vlivem smrštění. Dotlak působí do té doby, než zatuhne materiál ve vtokovém ústí.

- C. Po zatuhnutí materiálu ve vtokovém ústí, už není možnost do dutiny materiál vtlačit, a tak dotlaková fáze končí. V tento okamžik se začíná šroub stroje otáčet a zároveň vykonává pohyb vzad. Těmito pohyby plastifikuje materiál z násypky a akumuluje ho před čelo šroubu pro další cyklus. Během těchto pohybů je zpětný ventil šroubu otevřen. Po naakumulování předem nastaveného množství taveniny před čelo šroubu se pohyby šroubu zastaví a čeká se na ochlazení výstřiku na vyhazovací teplotu.
- D. Po ochlazení výstřiku na vyhazovací teplotu se forma otevře a pomocí vyhazovacího systému se výstřik vyhodí ven z formy. Forma se opět uzavře a celý cyklus se opakuje. [14], [21]



Obrázek 10 Cyklus vstřikovacího stroje [14]

Délka jednoho cyklu vstřikovacího stroje je odlišná podle vyráběného produktu. Poměry délek jednotlivých operací se však neliší. Na obrázku 11 je zobrazen koláčový graf, který zobrazuje přibližně délky jednotlivých operací. Tento graf je rozdělen na operace plastikační jednotky a uzavírací jednotky, protože některé operace probíhají současně. Z grafu je patrné, že nejdelší fází vstřikovacího cyklu je chlazení.



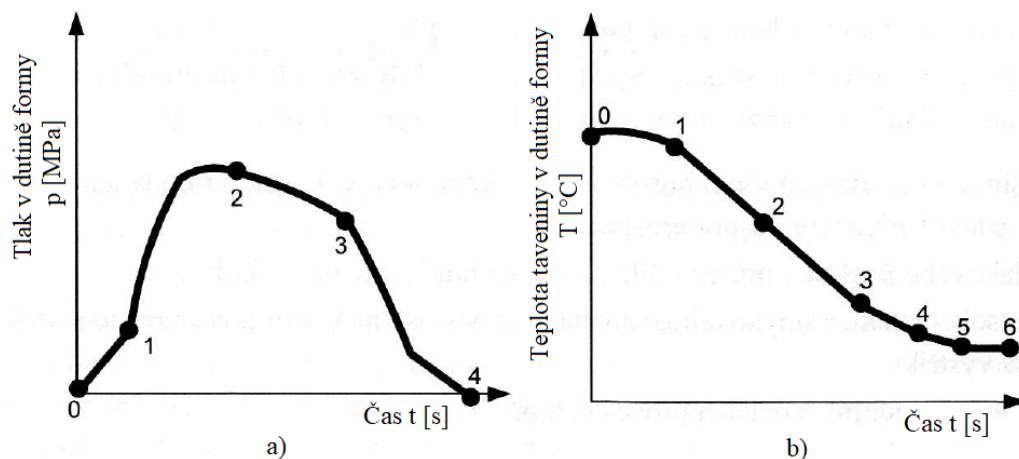
- | | |
|---------------------|------------------------------|
| Uzavírací jednotka: | Plastikační jednotka: |
| 1 - uzavření formy | 2 - vstřikování |
| 2 - vstřikování | 3 - dotlak |
| 3 - dotlak | 8 - odjezd plast. jednotky |
| 4 - chlazení | 9 - plastikace |
| 5 - otevření formy | 10 - prodleva |
| 6 - vyhození | 11 - příjezd plast. jednotky |
| 7 - úprava formy | |

Obrázek 11 Vstřikovací cyklus

Největší vliv na správný průběh vstřikovacího cyklu mají hodnoty tlaku a teploty. Tyto hodnoty je nutné na stroji nastavit a vybalancovat tak, aby výsledný produkt měl požadovanou kvalitu. Průběhy tlaku a teploty uvnitř dutiny formy jsou zobrazeny na obrázku 12 a) a b).

Na obrázku 12 a) je zobrazen průběh tlaku v dutině formy během vstřikovacího cyklu. V bodě 0 je zahájen proces vstřikování taveniny do dutiny formy a tlak v dutině roste. V bodě 1 je dutina zcela naplněna materiálem a až do bodu 2 je stlačována. Od bodu 2 (maxima tlaku v dutině formy) se přepíná fáze na dotlakovou, která trvá až do bodu 3, dokud není materiál v místě vtokového ústí dostatečně ochlazen. Hodnota dotlaku je vždy menší než vstřikovací tlak a ve většině případů se s časem snižuje. Od bodu 3 už nepůsobí žádný tlak od plastikační jednotky a tlak v dutině se ochlazováním materiálu snižuje až na nulovou hodnotu.

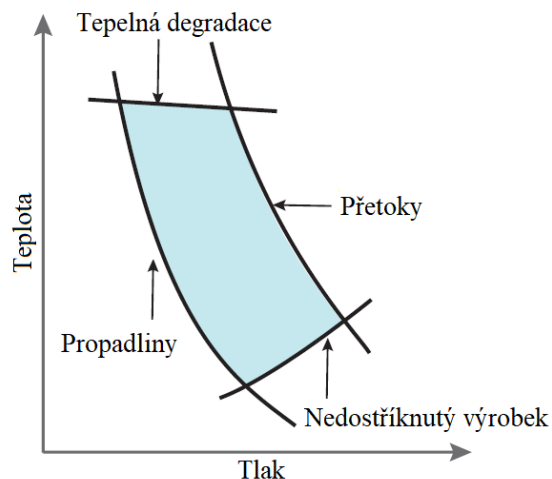
Na obrázku 12 b) je zobrazen průběh teploty v dutině formy během vstřikovacího cyklu. Teplota v dutině formy je nejvyšší v okamžiku vstřikování taveniny, kdy tavenina má nejvyšší teplotu (rozmezí bodů 0 a 1). Při dalších operacích teplota v dutině formy jen klesá z důvodu ochlazování materiálu. Od bodu 4 dochází k ochlazování výstřiku za konstantního tlaku až dosáhne vyhazovací teploty (bod 5). V bodě 5 je výstřik vyhozen a dochází k jeho ochlazování mimo formu. [9]



Obrázek 12 Průběh a) tlaku a b) teploty v dutině formy během procesu vstřikování [9]

2.3 Procesní parametry ovlivňující proces vstřikování

Nejdůležitějšími veličinami při nastavení procesu vstřikování jsou tlak a teplota. Tyto dvě veličiny se musí vybalancovat tak, aby výsledný výrobek měl požadovanou kvalitu. Pro popis vybalancování tlaku a teploty lze použít tzv. zpracovatelské okno. Na obrázku 13 je zobrazeno zpracovatelské okno pro technologii vstřikování se všemi mezními stavy. Pro správný vstřikovací cyklus se musí závislost teploty a tlaku nacházet uvnitř zpracovatelského okna. Pokud bude teplota taveniny příliš vysoká hrozí tepelná degradace materiálu (spálení). Naopak při příliš nízké teplotě taveniny hrozí nedostříknutí výstřiku, z důvodu příliš rychlého ztuhnutí taveniny. V případě příliš nízkého vstřikovacího tlaku nebude dutina formy zcela naplněna a na povrchu se mohou objevit propadliny. Naopak u příliš vysokého tlaku hrozí tzv. přetoky. Přetoky jsou způsobeny tím, že uzavírací síla není pro vstřikovací tlak dostatečná a tavenina zateče do dělicí roviny formy. Nalezení správných hodnot tlaku a teploty se provádí na stroji metodou pokus omyl, nebo lze využít simulačních softwarů (kapitola 5). Zpracovatelské okno je individuální pro všechny typy materiálů. Nejdelší částí vstřikovacího cyklu je chlazení. To je nejvíce ovlivněno teplotou formy. Vstřikovací formy se běžně temperují, na konstantní teplotu. Termoplastické elastomery a reaktoplasty se běžně vstřikují do mnohanásobně teplejších forem, kvůli jejich zesíťování. [12]



Obrázek 13 Zpracovatelské okno [12]

2.4 Běžné vady u výrobků vyrobených metodou vstřikování

Při vstřikování plastů se musí dodržovat předepsaná pravidla. Při špatně nastavených procesních parametrech nebo nevhodnou konstrukcí formy či výrobku může dojít k řadě nežádoucích jevů (vad). I když jsou dnes k dispozici simulační softwary na odhalení možných vad a určení správných procesních parametrů, vady výstřiků jsou v praxi zcela běžné. Vadou vstřikovaného výrobku je odlišnost vzhledu, tvaru, rozměru a dalších vlastností od předem určeného standardu, který je dán výkresem či vzorkem. Vady výstřiků se týkají jejich vzhledu nebo mechanických vlastností, dělí se na vady zjevné a skryté. Zjevné vady jsou povrchové vady, které lze odhalit pouhým okem nebo optickými zařízeními. Do skupiny zjevných vad patří vady tvaru a povrchu. Vady skryté ovlivňují především mechanické vlastnosti výstřiku. Nelze je odhalit pouze vizuální kontrolou, ale objeví se například v řezu výstřiku. Dále jsou uvedeny některé z nejčastějších vad vznikajících při procesu vstřikování a jejich odstranění.

2.4.1 Neúplný výrobek

Vada neúplného výrobku neboli nedotečeného výrobku je vadou zjevnou. Projeví se ve výsledném tvaru výstřiku, kdy jeho tvar není úplný. To je způsobeno nedotečením taveniny do všech míst dutiny formy. Nedotečení taveniny se vyskytuje především u výrobků s tenkou stěnou s dlouhými drahami tečení. Tavenina ve většině případů během plnění dutiny ztuhne dříve, než je dutina zcela naplněna. Neúplný výstřik může být způsoben také špatným odvodušněním dutiny formy, malou dávkou materiálu, malým vstřikovacím tlakem, špatnou tekutostí materiálu nebo špatnou konstrukcí výstřiku. Podle příčiny vzniku vady může být řešením úprava zmíněných parametrů.

2.4.2 Přetoky

Přetoky jsou zjevnou vadou, při které dochází k zatečení materiálu mimo dutinu formy. K zatečení dochází převážně v dělicí rovině formy, ale také v odvodušňovacích kanálech nebo vyhazovačích. Nejčastějším problémem, který vede k přetokům je příliš vysoký tlak uvnitř dutiny formy nebo znečištěná dělicí rovina. Řešením této vady je zvýšení uzavírací síly stroje, očištění dělicí roviny, zmenšení vůlí na vyhazovačích, snížení teploty taveniny nebo použití materiálu s nižším indexem toku.

2.4.3 Propadliny

Propadliny neboli vstaženiny jsou zjevnou vadou a projevují se zejména na výrobcích s nerovnoměrnou tloušťkou stěn. Tato vada ovlivňuje optické i mechanické vlastnosti výstřiku. Propadliny vznikají v místech s větším množstvím materiálu, v zesílených oblastech nebo v napojení žeber. Tavenina na povrchu formy není ještě dostatečně ztuhlá a vlivem smrštění materiálu uvnitř výstřiku je vtahována dovnitř. Eliminace propadlin je možná vyšší a delší dotlakovou fází nebo nižší teplotou taveniny a formy.

2.4.4 Deformace

Deformace je zjevná vada, která je definována jako tvarový rozdíl výstřiku od předepsaného výkresu či vzorku. Deformace mohou být způsobeny mnoha faktory. Nejčastějším faktorem vyvolávajícím deformace je smrštění materiálu a špatně navržená vstřikovací forma. Při ochlazování materiálu v dutině formy dochází k jeho smrštění. Smrštění se dělí na výrobní a dodatečné. Výrobní smrštění probíhá uvnitř dutiny formy a činí asi 90 %. Dodatečné smrštění probíhá po vyhození mimo formu. Obecně platí, že smrštění je větší v místech s větším výskytem materiálu. Deformace jsou často způsobovány i vyhazovacím systémem, který zanechává na výstřiku stopy po vyhození. Řešením nežádoucích deformací výstřiku je celá škála možností. Zejména se týká konstrukcí výrobku a formy, dotlaku a chlazení.

2.4.5 Barevné vady

Většina plastových výrobků je obarvena. Přítomnost pigmentů a barviv v materiálu má za následek vznik barevných vad. Barevné vady jsou pouze vadou zjevnou a neovlivňují mechanické vlastnosti výrobku. Mezi barevné vady patří šmouhy, pruhy, odlišné barvy nebo odstíny. Vznik těchto vad je způsoben špatným promícháním pigmentů a barviv v tavenině. Částičky pigmentu se zachycují v tavenině a vlivem proudění taveniny se rozmazávají. Chybné promíchání pigmentů a barviv v tavenině je způsobeno nevhodným šnekem bez míchacích elementů, nízkými otáčkami šneku, velkými částicemi pigmentu nebo masterbatchem s odlišným indexem toku.

2.4.6 Diesel efekt

Diesel efekt je zjevná vada související s odvzdušněním dutiny formy. Projevuje se černými spálenými místy často nedotečenými v nejbližších místech od vtokového ústí. Pokud jsou odvzdušňovací kanály nedostatečné nebo ucpané, vzduch, který tlačí tavenina před sebou, je silně stlačován, zahříván, a materiál v tomto místě tepelně degraduje. Řešením této

vady je úprava odvzdušňovacího systému, snížení uzavírací síly a vstřikovacího tlaku a nižší teplota taveniny.

2.4.7 Studené spoje

Studené spoje mohou být vadou zjevnou nebo nikoli, avšak silně ovlivňují mechanické vlastnosti výstřiku. Pokud tavenina obtéká nějakou překážku (jádro) a čelo taveniny se rozdělí, při jejich opětovném spojení vzniká studený spoj. Čela taveniny jsou při toku ve formě ochlazená a jejich spojení není ideální. Studené spoje vznikají také při použití více vtoků a jsou nebezpečné zejména z důvodu nízké pevnosti a následnou tvorbou trhlin. Lepší spojení čel taveniny se docílí vyšší teplotou taveniny, vyšší vstřikovací rychlostí, vyšším dotlakem nebo lepším umístěním vtokového ústí.

2.4.8 Volný proud taveniny

Volný proud taveniny je zjevnou vadou, která ovlivňuje jak vzhled, tak i mechanické vlastnosti výstřiku. Tavenina při plnění dutiny nevykazuje dostatečné narůstání k vytvoření kontaktu se stěnou formy, což vede k matné hadovité čáře na povrchu výstřiku. To vede k vytvoření mnoha studených spojů a silnému ovlivnění pevnosti. Volný proud taveniny je typický pro vysoce plněné materiály, které vykazují menší stupeň narůstání. Pro eliminaci volného proudu taveniny v dutině formy je zapotřebí snížit vstřikovací rychlost a tlak, zvýšit teplotu taveniny nebo upravit vtokové ústí.

2.4.9 Vakuové bubliny

Vakuové bubliny neboli lunkry jsou skrytou vadou, kterou lze odhalit buď rozříznutím výstřiku nebo rentgenovou a ultrazvukovou zkouškou. Lunkry ovlivňují mechanické vlastnosti výstřiku. Při příliš rychlém zatuhnutí taveniny na povrchu formy dojde k tomu, že působením smrštění materiálu nedojde k propadlinám, ale ke vzniku vakuových bublin uvnitř výstřiku. Řešením přítomnosti vakuových bublin uvnitř výstřiku je zvýšení teploty formy, vyšší a déle trvající dotlak nebo nižší teplota taveniny. [9], [12], [21]

3 NÁVRH DÍLU PRO METODU VSTŘIKOVÁNÍ

U výrobků z termoplastických materiálů je zapotřebí při jejich konstrukci dodržet několik základních pravidel. Ve srovnání s kovovými díly se termoplastické materiály chovají odlišně a vyžadují tak specifický přístup při jejich návrhu. Výrobky z termoplastických materiálů se musí také přizpůsobit technologii výroby vstřikováním. Pro správný návrh plastového výrobku je nutností znalost chování polymerních materiálů a principu technologie vstřikování. Konstrukce výrobku má vliv na celkovou rozměrovou přesnost, vzhled, pevnost, výskyt vad a vyrobiteľnosť.

3.1 Pravidla konstrukce vstřikovaných dílů

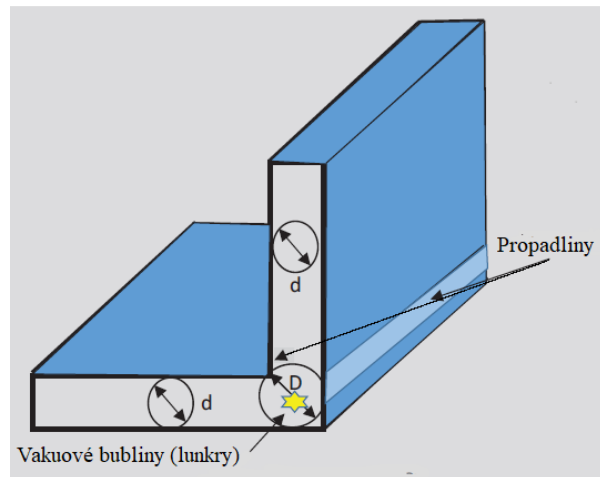
Při návrhu výrobků z termoplastických materiálů je zapotřebí dodržet několik základních pravidel, které zohledňují následující parametry:

1. tloušťku stěny,
2. tloušťku stěny v závislosti na toku materiálu,
3. zaoblení a rádiusy,
4. správný návrh žeber,
5. úkosy,
6. dělicí rovina.

3.1.1 Tloušťka stěny

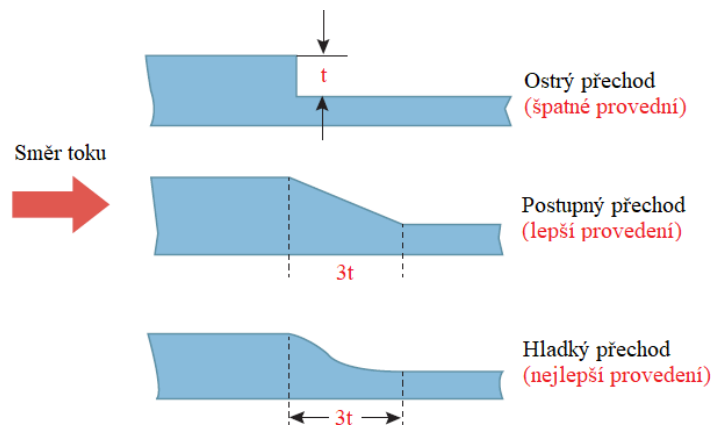
Tloušťka stěny hraje při návrhu výrobku zásadní roli. Konstantní tloušťka stěny zajišťuje menší deformace a menší vnitřní pnutí. Všechny výrobky však nelze navrhnout s jednotnou tloušťkou stěny, a to z důvodu vzhledu, funkčnosti a pevnosti. Proto je zapotřebí při změně tloušťky stěny dodržet základní pravidla.

Rozdílné tloušťky stěn hrají roli zejména kvůli vzniku deformací vlivem smrštění. Náhlé změny tloušťky stěny silně ovlivňují teplotní pole uvnitř dutiny formy. Oblasti výrobku, kde je větší množství materiálu chladnou déle a vykazují mnohem větší smrštění než oblasti s menším množstvím materiálu. To vede k deformacím výstřiku a tvorbě vakuových bublin a jiných vad. Změny tloušťky se projevují zejména v rozích a větších plochách výstřiku. Na obrázku 14 jsou zobrazeny místa vzniku vad způsobených rozdílnou tloušťkou stěny v rohu výstřiku. [5], [12], [28]



Obrázek 14 Místa vzniku vad vlivem rozdílné tloušťky stěny v rohu výstříku []

Pokud se u konstrukce výstříku nelze vyhnout změně tloušťky stěny musí být provedeny postupně. Délka přechodu tloušťky stěny by neměla být menší než trojnásobek rozdílu v tloušťkách stěn. Rohy u přechodové oblasti musí být opatřeny rádiusy kvůli koncentraci napětí. Na obrázku 15 je zobrazena správná změna tloušťky stěny výstříku. Při výběru místa vtokového ústí výstříku se volí místo s největší tloušťkou stěny. [5], [12]



Obrázek 15 Návrh přechodu tloušťky stěny výstříku [12]

3.1.2 Tloušťka stěny v závislosti na toku materiálu

Tloušťka stěny výstříku úzce souvisí s tekutostí materiálu. Vzdálenost od vtokového ústí po konec dutiny formy může být dlouhá a odpor působící na proudící taveninu může být tak velký, že materiál nedoteče do všech oblastí. Tekutost ovlivňují tloušťka stěny t a délka toku L . Proto se musí před návrhem výstříku posoudit vybraný materiál s těmito parametry. Ke kontrole správnosti se proto využívá vztah poměru délky toku a tloušťky stěny (L/t).

$$\frac{L}{t} = \frac{\text{délka toku od vtokového ústí po nejvzdálenější bod}}{\text{průměrná tloušťka stěny}}$$

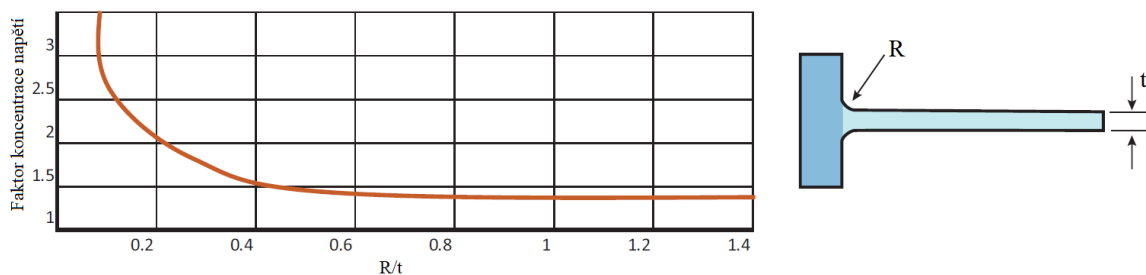
Poměr L/t je individuální pro každý materiál a je tabulkovou hodnotou. Ve většině případů se pohybuje okolo $100 \div 200$. Pokud je poměr L/t menší jak 100 je vyplnění dutiny formy taveninou snadné. V tomto případě se jedná spíše o tlustostěnné výrobky. Pokud je však výstřik tenkostěnný a poměr L/t překročí hodnotu 200, je zapotřebí zhodnotit situaci a případně navrhnout řešení. Překročí-li poměr L/t dokonce hodnotu 300, plnění dutiny je silně obtížné. V tomto případě se musí buď upravit konstrukce výstřiku nebo použít speciální materiály s vysokou tekutostí a vysokorychlostní vstřikovací stroje. Minimální tloušťka stěny výstřiků bývá asi 0,8 mm. V tabulce 3 jsou zobrazeny doporučené hodnoty poměru L/t u některých materiálů. [5], [12]

Tabulka 3 Doporučené rozmezí poměru L/t u jednotlivých materiálů [12]

Materiál	Poměr L/t
ABS	$100 \div 200$
HDPE	$200 \div 270$
LDPE	$200 \div 300$
PA6	$160 \div 300$
PC	$30 \div 110$
POM	$200 \div 250$
PP	$230 \div 340$
PS	$150 \div 200$
SAN	$170 \div 200$

3.1.3 Zaoblení hran

Zaoblení ostrých hran je u plastových výrobků velmi důležité ze dvou hledisek. Prvním je snazší tok taveniny při plnění dutiny formy a druhým je vliv na koncentraci napětí. V ostrých hranách výstřiku dochází při mechanickém namáhání ke koncentraci napětí, což způsobuje menší odolnost proti ohybu. Velikost koncentrace napětí v rozích výstřiku je definováno faktorem koncentrace napětí. Čím menší je poloměr zaoblení tím vyšší je koncentrace napětí. Faktor koncentrace napětí je závislý na poměru poloměru zaoblení R a tloušťky stěny t výstřiku. Na obrázku 16 je zobrazen růst faktoru koncentrace napětí v závislosti na poměru R/t . [5], [12]

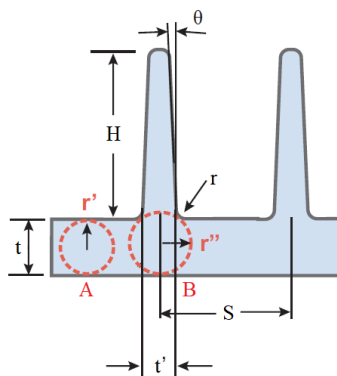


Obrázek 16 Závislost faktoru koncentrace napětí na poměru R/t [5], [12]

U plněných materiálů jako je PA nebo PC je doporučený minimální vnitřní poloměr zaoblení 1,5 mm, materiály jako PS, PC, PMMA, PVC 0,6÷1 mm a PE, PP, POM, PA, ABS 0,5 mm. Minimální vnější poloměr zaoblení je dán jako součet minimálního vnitřního poloměru a tloušťky stěny výstřiku. [28]

3.1.4 Žebra

Žebra u plastových výrobků mají za úkol vylepšit mechanickou pevnost, tuhost a odolnost, zlepšit plnění dutiny formy nebo eliminovat povrchové vady výstřiku. Při návrhu žebířek je zapotřebí dodržet několik základních pravidel, která se odvíjí od tloušťky základní stěny t , na které jsou žebra uchycena. Tloušťka žebířek t' by neměla překročit hodnotu větší jak 50 % tloušťky základní stěny, a výška žebířek H by neměla překročit hodnotu 3násobku tloušťky základní stěny t . Obecně platí pravidlo, že se volí větší počet tenkých žebířek než menší počet silných žebířek. Poloměr zaoblení hrany napojení žebířek r se volí přibližně 0,25 ÷ 0,4 tloušťky základní stěny t a vzdálenost mezi žebířky S nejméně 2násobek tloušťky základní desky t . U plastových výrobků s žebířkami často hrozí vznik propadlin na opačné straně žebířek, z důvodu změny tloušťky výstřiku. Pokud je objemový poměr dvou koulí A a B (obr. 17) větší než 1,34, je vysoká pravděpodobnost, že dojde ke vzniku propadlin. Zkosení žebířek θ se volí nejméně 0,5°. Na obrázku 17 je popis všech parametrů žebířek pro jeho správný návrh. [5], [9], [12], [28]



Obrázek 17 Parametry žebířek [12]

3.1.5 Úkosy

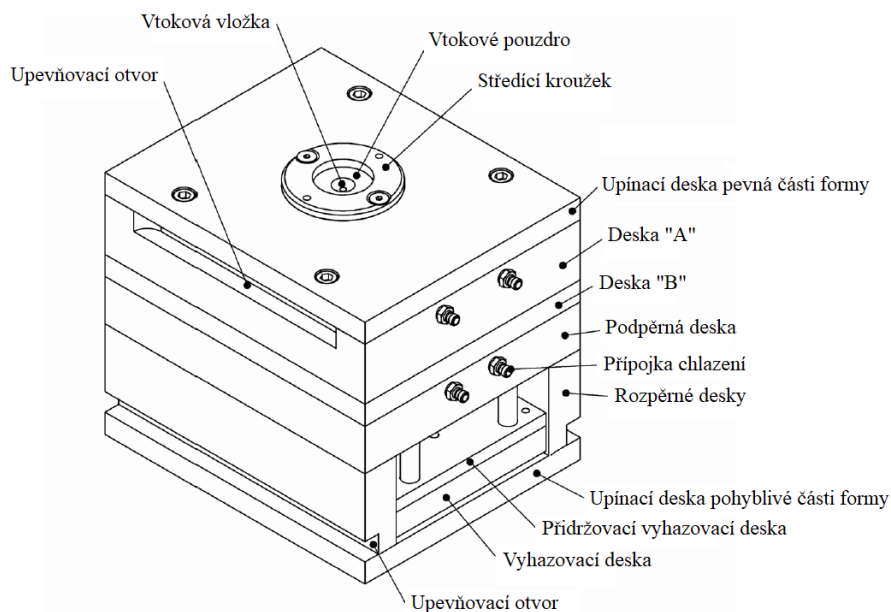
Úkosy jsou na výstřiku přítomny kvůli snadnému a bezproblémovému vyhození z formy. Pro vnější stěny se doporučuje úkos přibližně mezi $0,5^\circ \div 1^\circ$ a u vnitřních stěn přibližně $1^\circ \div 2^\circ$. [9]

3.1.6 Dělicí rovina

Dělicí rovina je místo styku pravé a levé části formy. Správný návrh místa dělicí roviny na výstřiku je zapotřebí zejména kvůli vyrobiteľnosti. Dělicí rovina zanechá na výstřiku stopu (čáru), která má na výstřik pouze optický vliv. Proto je vhodné dělicí rovinu umístit tak aby nenarušovala celkový vzhled výstřiku. [12]

4 KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY

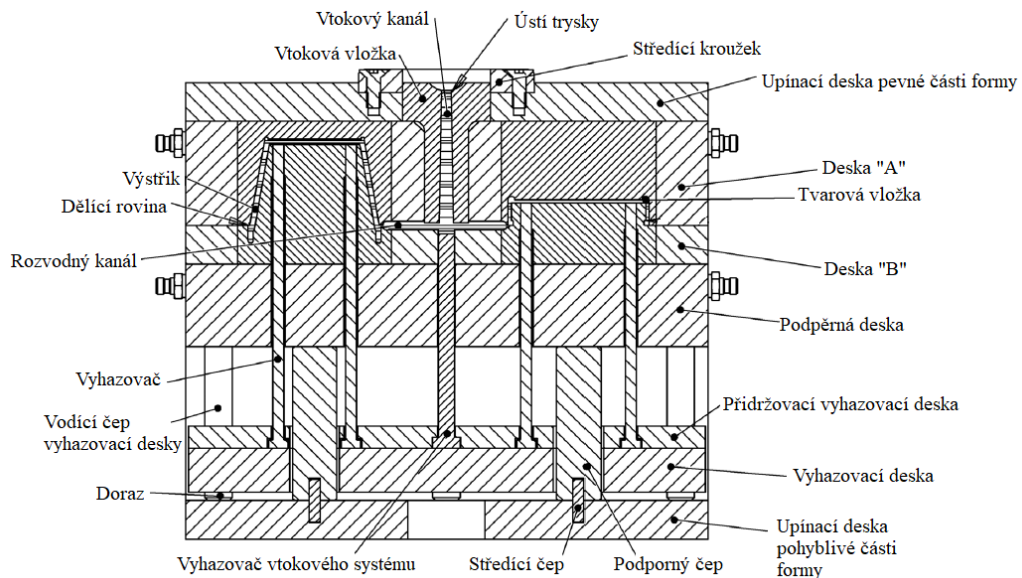
Plastové výrobky se vyrábí pomocí vstřikovacích strojů. Nástrojem těchto strojů je vstřikovací forma. Funkci vstřikovací formy lze rozdělit do třech částí. Prvním funkcí je umožnění naplnění dutiny polymerní taveninou, která dá finální rozměr vyráběného dílu. Druhou funkcí je přenášení tepla z polymerní taveniny do chladicí kapaliny v kanálech formy, což způsobí ochlazení a ztuhnutí polymeru v dutině. Poslední funkcí formy je opatrné vyhození výstřiku z dutiny formy, aniž by byl poškozen. Vstřikovací forma se skládá z několika desek spojenými šrouby a vodícími čepy. Forma se dělí na dvě půlky z čehož jedna je pevná a druhá pohyblivá. Vstřikovací forma se skládá z několika základních komponentů, které jsou zobrazeny na obrázku 18. [30], [31], [32]



Obrázek 18 Vstřikovací forma [30]

Při návrhu vstřikovací formy je nutností znalost funkce všech komponentů formy. Při vstřikování je plastikační jednotka s tryskou těsně přiražena k vtokové vložce formy. Polymerní tavenina je dopředným pohybem šroubu vtlačována do formy přes vtokovou vložku do dutiny formy. Při plnění dutiny taveninou je zapotřebí vytlačit z dutiny vzduch. Ten je vytlačen skrze netěsnosti v dělicí rovině formy a vyhazovačích a případně odvzdušňovacími kanály. Po úplném naplnění dutiny formy dochází k fázi ochlazování. V tomto procesu hraje zásadní roli temperační systém formy. Skrze desky formy jsou vyvrtány kanály, kde proudí chladicí médium. To slouží jak ke chlazení taveniny v dutině formy, tak i k temperaci formy na požadovanou provozní teplotu. Po ochlazení materiálu na

vyhazovací teplotu se pohyblivá část formy odsune a forma se otevře v dělicí rovině. Výstřík se po otevření formy drží na pohyblivé straně formy. Po otevření formy je vyhazovací deska vstříkovacím strojem vysunuta a vyhazovače vytlačí výstřík z dutiny formy. Výstřík může buď vypadnout nebo může být odebrán robotickým zařízením. Po vyhození je vyhazovací deska opět zasunuta forma uzavřena a celý cyklus se opakuje. Všechny pohyby vstříkovací formy jsou vedeny vodícími čepy s pouzdry s vysokou přesností a tuhostí, které jsou ovládány vstříkovacím strojem. Na obrázku 19 je zobrazena vstříkovací forma v řezu s popisem jednotlivých komponentů. [30], [32]



Obrázek 19 Vstříkovací forma v řezu [30]

4.1 Postup při návrhu vstříkovací formy

Návrh vstříkovací formy vychází z návrhu vyráběného dílce. Konstruktor forem vychází z 3D modelu dílu s výkresovou dokumentací.

Prvním bodem při návrhu vstříkovací formy je posouzení výrobitelnosti zadané součásti a posouzení provedení vzhledem k její funkci. Sem spadá přesnost, tolerance, možný výskyt vad (viz. kapitola 2) a celkově vhodnost dílu pro výrobu metodou vstříkování (viz. kapitola 3). Po vyhodnocení konstrukce vyráběného dílu následuje základní náčrt konstrukce vstříkovací formy. Ten obsahuje zejména zvolení vhodného materiálu, dělicí roviny a místa vtokového ústí. Důležitým faktorem při návrhu je také násobnost formy. Ta určuje množství vyrobených výstříků za jeden cyklus. Tento parametr se musí volit s ohledem na kapacitu a velikost použitého stroje. Po základním návrhu konstrukce formy následuje simulace plnění

dutiny formy (viz. kapitola 5.). Po ověření správného plnění dutiny formy následuje detailní 3D konstrukce formy. Sem spadá návrh vhodného rozmístění tvarových dutin, typ vtokového systému, temperačního systému, odformování a vyhazovacího systému. Před samotnou výrobou vstříkovací formy se provede ještě podrobná analýza procesu vstříkování, která by mohla odhalit možné nedokonalosti a vady. Pokud vstříkovací forma splňuje všechny požadavky, vytvoří se výkresová dokumentace a forma se zadá do výroby. [28], [29]

4.2 Rám formy

Rámy forem jsou složeny z několika desek a jejich počet se může lišit podle složitosti a konstrukce formy. Nejčastěji používanou formou je dvou desková forma. To znamená, že při otevření formy se forma otevře pouze v jedné dělicí rovině. Forma se dělí na pevnou (pravou) a pohyblivou (levou) polovinu formy.

Pevná polovina formy je pevně uchycena k desce vstříkovacího stroje a skládá se z upínací desky a desky dutiny (deska "A"). Součástí těchto desek je vtoková vložka, vtokový systém a dutina formy. Dutina formy udává tvar výstřiku a může být vyfrézována přímo v desce formy. Častější formou provedení dutiny je tzv. tvarová vložka. Ta je zasazena do desky "A" a ukotvena pomocí upínací desky. Tvarová vložka pevné části formy se také nazývá tvárnice. Výhodou použití tvarové vložky je snadnější výroba díky menším rozměrům, lepší údržba a možnost použití dražších a lepších materiálů, aniž by musela být celá deska formy z téhož materiálu. Často se u forem využívá horkého vtokového systému. V takovém případě se mezi upínací desku a desku dutiny přidává další deska. Mezi upínací desky formy a vstříkovací stroj se většinou umísťuje tepelně izolační deska z důvodu zabránění úniku tepla z formy do stroje.

Pohyblivá polovina formy se skládá z desky dutiny (deska "B"), podpěrné desky, rozpěrných desek, upínací desky, vyhazovací desky a přídržovací vyhazovací desky. V desce "B" se nachází druhá polovina dutiny formy také zvaná jako tvárník. Podpěrná deska slouží opět k přidržení tvarových vložek a dalších možných komponentů jako kolíky, vodící pouzdra atd. Důležitým prvkem této části formy je vyhazovací systém. Vyhazovače jsou umístěny mezi vyhazovací a přídržovací vyhazovací desku.

Všechny desky vstříkovací formy jsou spojeny šrouby a vodícími prvky. Vodící prvky slouží k vycentrování obou polovin formy a jejich plynulému otevírání a zavírání. Vodící sloupky

formy jsou součástí pevné a vodící pouzdra pohyblivé poloviny formy. Vodící prvky bývají kalené a vyměnitelné z důvodu opotřebení.

Rámy forem nabízí celá řada výrobců s libovolnou jakostí materiálů a rozměry. Standardní normalizované velikosti desek forem se dodávají až v rozměrech 796 x 996 mm s tloušťkami od 10 do 196 mm. Všechny desky jsou broušeny z obou stran. Tolerance tloušťky desek je v rozmezí 0,05 ÷ 0,25 mm. Ke všem možným konfiguracím rámu forem výrobci dodávají i vodící prvky, spojovací materiál, středící kroužky, tepelně izolační desky a spoustu dalších komponentů. [29], [30], [31]



Obrázek 20 Standardní prvky rámu formy [29]

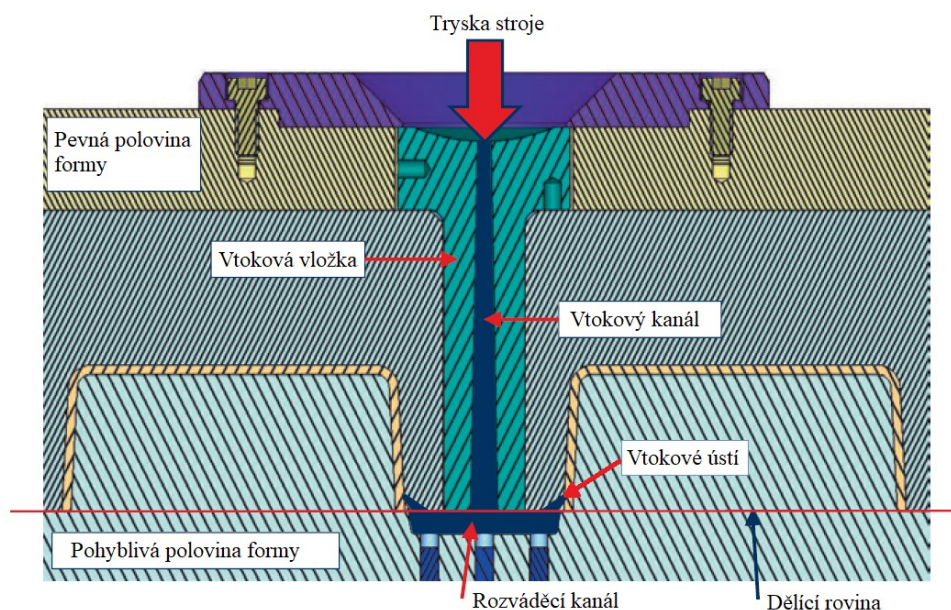
4.3 Vtokový systém

Vtokový systém má ve vstříkovací formě za úkol dopravit polymerní taveninu z trysky stroje do dutiny formy a zcela ji naplnit v co nejkratším čase a s co nejmenším odporem. Rozměry a typ vtokového systému záleží především na optimálním vyplnění dutiny. Pokud je vstříkovací forma vícenásobná (obsahuje více dutin), je zapotřebí vtokový systém vybalancovat tak, aby všechny dutiny byly zaplněny ve stejný okamžik bez ohledu na to, kde se ve formě nachází. Při návrhu vtokového systému je zapotřebí dodržet, aby dráha toku taveniny byla co nejkratší, bez velkých tlakových a časových ztrát a průřez kanálů byl dostatečný pro naplnění celé dutiny formy. Vtokové systémy se dělí na studené a vyhřívané. [28], [31]

4.3.1 Studený vtokový systém

Asi 70 % všech vstříkovacích forem jsou formy se studeným vtokovým systémem. U studeného vtokového systému je tavenina vstříknuta z vyhřívané trysky stroje do formy, kde už je pouze ochlazována. Po naplnění dutiny formy se tavenina ochladí a ztuhne jak v dutině formy, tak i ve vtokovém systému. Při otevření formy se vysune výstřik i s vtokovým systémem. Studený vtokový systém se skládá z vtokového kanálu, rozváděcího kanálu a vtokového ústí. Výhodami studeného vtokového systému oproti vyhřívanému jsou především jednoduchost, nižší náklady a snazší údržba. To souvisí s tím, že studené vtokové systémy neobsahují žádné topné články, regulátory, termočlánky a další součásti. Provoz je také mnohem jednodušší, protože odpadá starost nastavení regulátorů a výskyt možných problémů jako degradace, zamrznutí, netěsnost atd. Největší nevýhodou studených vtokových systémů je nutné oddělení vtokového systému od výstřiku a vysoká spotřeba materiálu. Oddělený vtok se může po rozemletí ve většině případů opět použít, ale pouze v určitém poměru s nepoužitým materiálem. Přetavování materiálu totiž zhoršuje jejich vlastnosti.

U forem s jednou dutinou je vtok většinou umístěn ve středu formy a tavenina je přiváděna skrze vtokový kanál (vtokovou vložku) přímo do středu dutiny. U forem s více dutinami je zapotřebí rozvod taveniny do všech dutin. Na obrázku 21 je zobrazen studený vtokový systém u dvojnásobné formy. [31], [33]



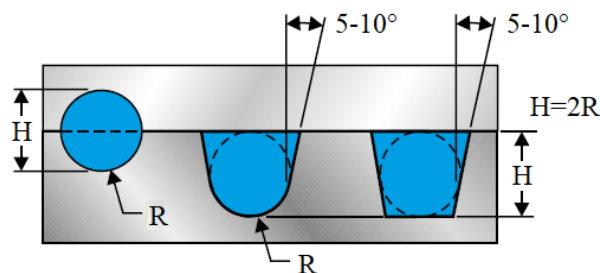
Obrázek 21 Studený vtokový systém dvojnásobné formy [31]

Vtokový kanál

Vtokový kanál je součástí vtokové vložky formy. Jeho úkolem je dodávání taveniny z trysky stroje buď přímo do dutiny formy (jednonásobné formy) nebo do rozváděcího kanálu. Vtokový kanál má kuželovitý tvar a jeho průměr se zvětšuje se vzdáleností od trysky stroje. Kuželovitý tvar je použit z důvodu snadnějšího vyjmutí vtoku při otevírání formy. Vtokové kanály se vyrábí i jako vyhřívané. Výběr velikosti vtokového kanálu vychází z objemu výstřiku, násobnosti formy a použitého materiálu. [33]

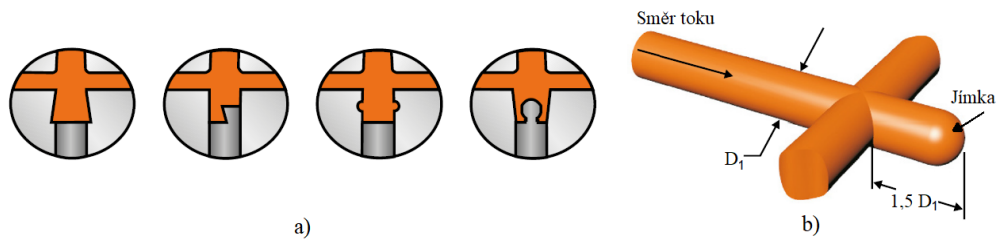
Rozváděcí kanál

U studených vtokových systémů u vícenásobných forem je rozváděcí kanál umístěn v dělicí rovině, nejčastěji v pohyblivé části formy. Jeho úkolem je doprava taveniny z vtokového kanálu do místa, kde vstupuje do dutiny formy. Zásadním úkolem rozváděcího kanálu je, aby všechny dutiny formy byly naplněny ve stejný okamžik se stejným tlakem. Ideální rozváděcí kanál má průřez ve tvaru kruhu. Nevýhodou kruhového rozváděcího kanálu je nutnost pracného obrábění obou polovin formy. Proto se využívají alternativy jako lichoběžníkový, parabolický nebo půlkulatý rozváděcí kanál. Ty jsou mnohem snazší na výrobu a jsou dostatečně účinné. U rozváděcích kanálů se využívá úkosů $5-10^\circ$ kvůli snazšímu vyhození. Na obrázku 22 jsou zobrazeny možné druhy rozváděcích kanálů. [28], [33]



Obrázek 22 Druhy rozváděcích kanálů [33]

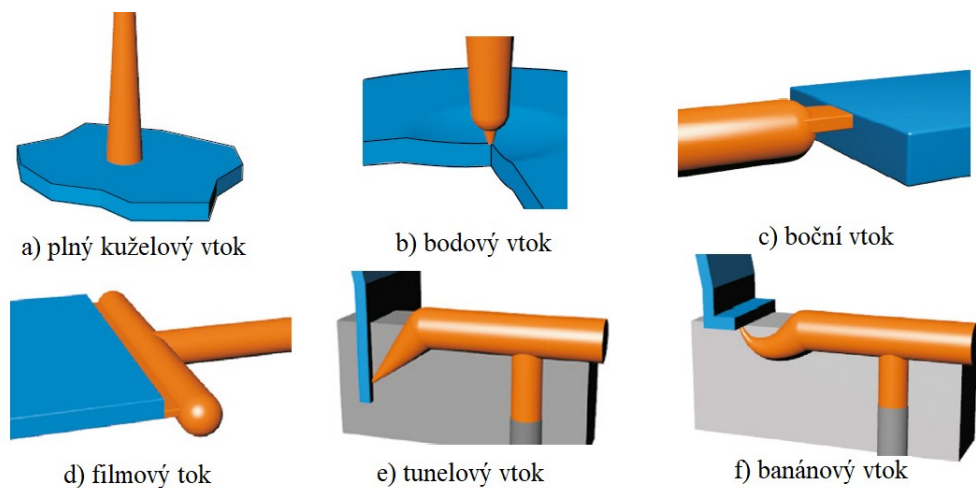
Součástí rozváděcího kanálu je i přidržovač vtoku a jímky. Přidržovač vtoku slouží k přidržení vtokového systému na pohyblivé polovině formy při jejím otevírání. V místě přidržovače vtoku je umístěn vyhazovač pro vyhození vtoku. Při toku taveniny vtokovým systémem je čelo taveniny ochlazováno a mohlo by dojít k proniknutí studeného čela taveniny do dutiny formy. To by mohlo způsobit pohledové vady na výstřiku. Pro zabránění vniknutí studeného čela taveniny do dutiny formy se v rozvodném systému vytváří tzv. jímky. Na obrázku 23 jsou zobrazeny a) přidržovače vtoku a b) jímka. [33]



Obrázek 23 Přidržovače vtoku a), jímka b) [33]

Vtokové ústí

Vtokové ústí je místo, kde vtéká tavenina do dutiny formy. Podle použité technologie vtokového ústí se po vyhození výstřík od vtoku sám oddělí, nebo zůstane jeho součástí. V takovém případě se musí dále mechanicky odstranit, např. odlomením nebo řezáním. Na obrázku 24 jsou zobrazeny některé druhy vtokových ústí. [28], [33]

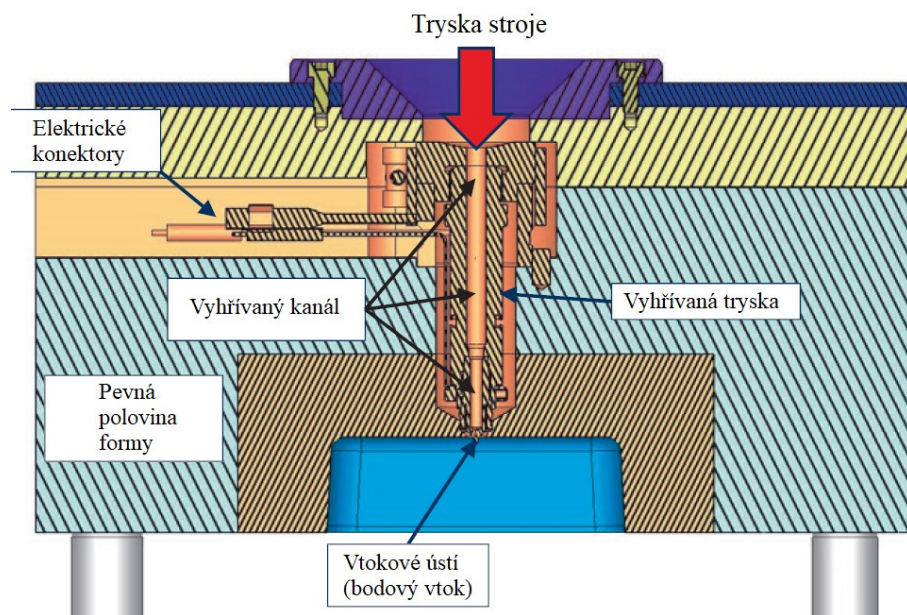


Obrázek 24 Druhy vtokových ústí [33]

4.3.2 Vyhříváný vtokový systém

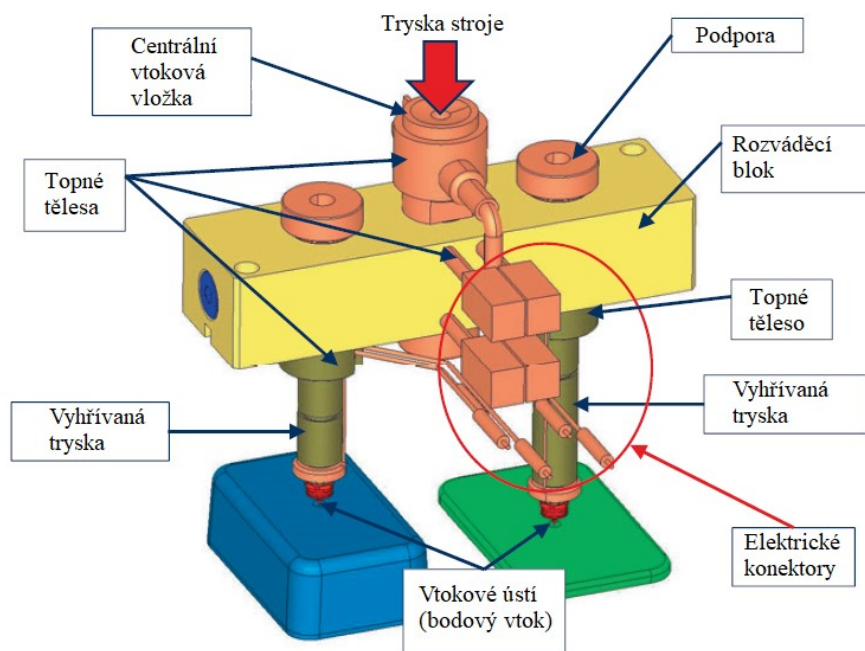
Pro odstranění problémů se studeným vtokovým systémem se využívají vyhříváné vtokové systémy, také nazývané jako horké vtoky. U vyhříváného vtokového systému je tavenina z trysky stroje vstříknuta do vyhříváné vtokové vložky (trysky), ze které teče přímo do dutiny formy. Největším rozdílem oproti studenému vtokovému systému je, že materiál ve vyhříváné vtokové vložce je neustále ve formě taveniny. Největším přínosem vyhříváného vtokového systému je nulový odpad, dobrá kvalita místa vstříku, symetrické plnění dutiny formy a rychlejší vstřikovací cyklus. Symetrické plnění dutiny formy znamená, že vtokové ústí je ve středu součásti a ta se plní symetricky. Rychlejší vstřikovací cyklus souvisí především s dobou chlazení a menším zdvihem pro vyhození výstříku. Díky vyhřívánému

vtokovému systému lze vyrábět formy s mnohanásobně větším počtem dutin. Mezi nevýhody vyhřívaných vtokových systémů patří vyšší pořizovací náklady, složitější řízení a údržba. Nevýhodou vyhřívaných vtokových systémů může být samovolné vytékání taveniny v době vyhazování výstřiku. Tento jev lze eliminovat použitím uzavíratelných horkých trysek s jehlou. Teploty a doby otevření lze regulovat na každé trysce individuálně, proto je možné nastavení rozdílných teplot a časového zpoždění otevírání trysek. Vyhřívané vtokové systémy je možné kombinovat se studenými. Na obrázku 25 je zobrazen vyhřívaný vtokový systém v řezu formy. [28], [31], [33]



Obrázek 25 vyhřívaný vtokový systém v řezu formy [31]

Výrobou vyhřívaných vtokových systémů se zabývá mnoho společností. Tyto systémy se nakupují v blocích, které je možné si libovolně nakonfigurovat podle počtu trysek, druhu trysek, vtokové vložky atd. Vyhřívané vtokové systémy se skládají ze základního rozváděcího bloku obsahujícího rozvodné kanály, centrální vtokové vložky, horkých trysek, topnými tělesy a kabely s konektory pro připojení. Na obrázku 26 je zobrazen blok vyhřívaného vtokového systému s popisem jednotlivých komponentů. [28], [31], [33]

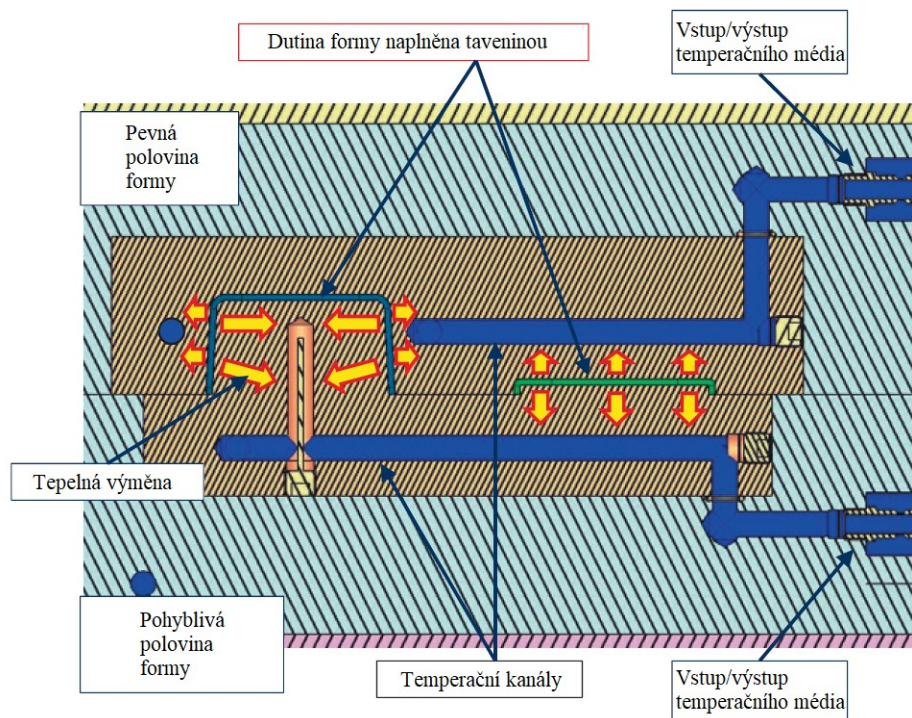


Obrázek 26 Blok vyhřívání vtokového systému [31]

4.4 Temperační systém

Temperování forem se využívá za účelem udržení konstantní teploty formy během cyklu. Pokud by forma nebyla temperována její teplota by se odvíjela od okolního prostředí a teploty taveniny uvnitř formy. To by mělo za následek proměnlivou teplotu formy a chybně vyrobené díly. Běžně se teplota formy reguluje z důvodu dosažení co nejkratší délky cyklu s požadovanými parametry výstřiku. Teplota formy totiž silně ovlivňuje tuhnutí a smrštění materiálu. Často má tedy temperační systém za úkol chlazení formy. Naopak například termoplastické elastomery se vstříkují do vysoce vyhříváných forem, kde temperační systém plní funkci ohřevu formy. Temperační kanály se provádí zejména vrtáním a mají kruhový průřez. Průměry a množství temperačních kanálů se odvíjí od tloušťky stěny výstřiku a jeho objemu. Průměry temperačních kanálů se běžně pohybují mezi 6÷14 mm ve vzdálenosti od dutiny od 6 mm. Menší průměry kanálů se nepoužívají z důvodu snadného zanesení nečistotami a voním kamenem. Temperační kanály se umísťují do nejteplejších míst formy, což je těsné okolí dutiny formy tak, aby nebyla ovlivněna její tuhost. Při návrhu temperačního systému platí pravidlo, že je efektivnější použití více kanálů s menším průměrem jak méně kanálů s větším průměrem a rozdíl v teplotě média na vstupu a výstupu by neměl být větší jak 5 °C. Temperační kanály mohou být vedeny i přes tvarové vložky. V tomto případě je mezi přechodem z desky formy do tvarové vložky použito těsnění (O

kroužek). Temperace slepých míst dutiny formy se provádí pomocí přepážek nebo spirálových trnů, jak je vidět na obrázku 27. Proudící médium se připojuje k formám přes hadice a hadicové rychlospojky. Temperační systém je u návrhu formy velmi důležitý a vyžaduje zvláštní pozornost. Pro ověření správně navrženého temperačního systému se využívají simulační softwary (viz. kapitola 5). Na obrázku 27 je zobrazen temperační kanál v řezu formy s naznačenou výměnou tepla mezi taveninou a chladicím médiem. [28], [29], [30], [31]



Obrázek 27 Temperační kanály v řezu formy [31]

Jako proudící médium v temperačních kanálech se využívá nejčastěji voda, ale i olej, glykoly nebo jejich kombinace. Voda má výhodu nízké ceny, viskozity, ekologičnosti a dobrého přestupu tepla. Nevýhodou využití vody jako temperačního média je omezená teplotní použitelnost (do 90 °C), koroze a usazování vodního kamene. Oleje se využívají pro temperování forem na vysoké teploty i nad 100 °C, ale mají horší přestup tepla jako voda. Glykoly mají výhodu, že nezpůsobují korozi a ucpávání temperačního systému. Naopak jsou ale neekologické a časem se musí měnit z důvodu stárnutí. [33]

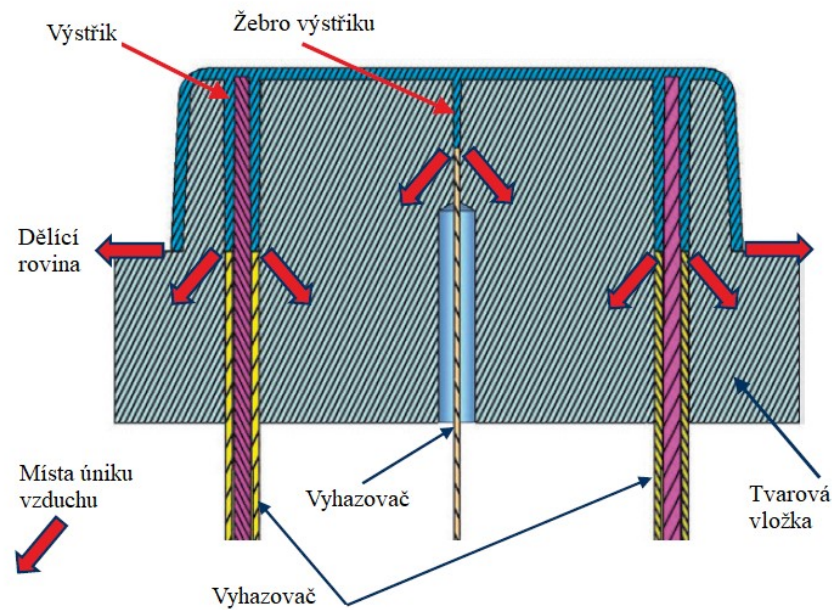
V tabulce 4 jsou uvedeny doporučené teploty forem pro některé materiály.

Tabulka 4 Doporučené teploty formy [33]

Materiál	Teplota formy [°C]
ABS	50 ÷ 85
HDPE, LDPE	20 ÷ 60
PA6	40 ÷ 120
PC	85 ÷ 120
PP	20 ÷ 100
PS	55 ÷ 80
PVC	30 ÷ 60
POM	50 ÷ 120
PMMA	50 ÷ 80

4.5 Odvzdušňovací systém

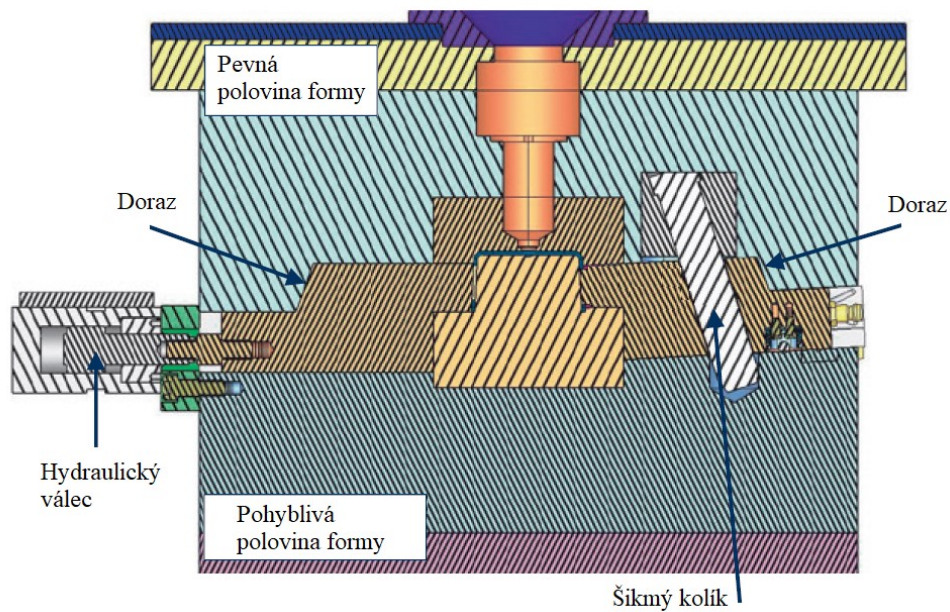
Před vstřikováním taveniny do dutiny formy je dutina naplněna vzduchem. Při plnění dutiny taveninou by vzduch měl unikat přímo úměrně s plnicí se taveninou. To se často neděje a vzduch je při plnění dutiny silně stlačován a zahříván. To vede k tvorbě vad jako je dieslův efekt nebo nedotečení výstřiku. Při návrhu vstřikovací formy je dobré tomuto problému předejít nalezením kritických míst pomocí simulace plnění. Obecně tato místa bývají ve slepých místech a nejvzdálenějším místě od vtokového ústí. Odvod vzduchu z dutiny formy je prováděn především netěsnostmi v dělicí rovině, vůlemi v bočním odformování a vyhazovačích. Proto je vhodné v kritickém místě umístit např. vyhazovač. Pokud i tyto prvky nestačí k dostatečnému odvzdušnění dutiny je nutné využití tzv. odvzdušňovacích kanálů. Odvzdušňovací kanály se frézují pouze do dělicí roviny pohyblivé poloviny formy, a to ve vzdálenosti asi 3-5 mm od dutiny. Odvzdušňovací kanály mají obvykle šířku 4-6 mm a hloubku 0,01-0,03 mm v okolí dutiny. Tyto kanály jsou vyvedeny až na okraj formy. Na obrázku 28 je zobrazena tvarová vložka s naznačenými místy úniku vzduchu z dutiny formy. [31], [34]



Obrázek 28 Odvzdušnění dutiny formy [31]

4.6 Boční odformování

Pokud výstříky obsahují otvory nebo výstupky kolmo na osu formy a nelze je vyrobit skrze pouze jednu dělicí rovinu, využívá se bočního odformování. To se provádí pomocí pohyblivých čelistí. Pohyblivé čelisti jsou umístěny na pohyblivé polovině formy, protože odjezd čelistí probíhá současně s otevíráním formy. Jejich pohyb je uskutečňován pomocí šikmých a lomených kolíků nebo hydraulickým válcem. Použití šikmého kolíku je nejčastější variantou pohybu čelistí. V posuvné čelisti (kostce) je vyvrtán otvor se sklonem od 15-20°. Šikmý kolík je umístěn v pevné polovině formy. Při otevírání a zavírání formy posuvná čelist jezdí po kolíku a tím vykonává pohyb. Výhodou šikmých kolíků je jejich jednoduchost a levná výroba. Hydraulický pohon se využívá především u vysokých zdvihů nebo u postupného vysouvání čelistí. Jeho výhodou je vysoký zdvih podle typu hydraulického válce, pohyb s velmi těžkými čelistmi a jádry a nezávislé řízení posuvu vzhledem k otevírání a zavírání formy. Mezi nevýhody patří velké rozměry formy, vyšší pořizovací náklady, řízení hydrauliky s čidly a údržba. Důležitým požadavkem u pohyblivých čelistí je jejich přesnost vodících drah a tuhost v koncových polohách. Na obrázku 29 je zobrazeno boční odformování provedeno šikmým kolíkem (napravo) a hydraulickým válcem (nalevo) v řezu formy. [31], [34]



Obrázek 29 Boční odformování [31]

4.7 Vyhazovací systém

Vyhazovací systém má za úkol bez znatelného poškození vyhodit výstřik ven z formy. Funkční částí vyhazovacího systému jsou vyhazovače. Existuje celá řada vyhazovačů např.: kruhové pro rovné plochy, obdelníkové pro žebra a tenké stěny, objímkové pro kruhové tenkostěnné výrobky a další. Pokud není možné vyhození přes rovnou plochu výstřiku, lze vyhazovač přizpůsobit přímo tvaru dutiny formy. Vyhazovače bývají obvykle kalené. Vyhazování se obecně provádí na nepohledové straně výstřiku z důvodu zanechání patrné stopy po vyhození. Vyhazovače jsou umístěny mezi vyhazovací a přidržovací vyhazovací deskou, které jsou ovládány hydraulickým mechanismem vstřikovacího stroje. Síla, zdvih a čas vyhození jsou parametry libovolně nastavitelné na řídicí jednotce vstřikovacího stroje. Vyhazovací síla závisí na velikosti smrštění výstřiku, složitosti výrobku a procesních podmínkách vstřikování.

Vyhazování výstřiku z dutiny formy se dělí podle pohonu na mechanické, hydraulické a pneumatické. Mechanický systém vyhazování je nejpoužívanějším a podle konstrukce se dělí na: vyhazování vyhazovacími kolíky, stírací deskou, trubkovými vyhazovači, šikmém vyhazování a postupným vyhazováním. Nejpoužívanějším způsobem mechanického vyhazování je vyhazování pomocí vyhazovacích kolíku, zejména kvůli jednoduchosti, dostupnosti a ceně. To je vidět na obr. 19. Hydraulické vyhazování se používá jen zřídka.

Hydraulický pohon se ve formách používá spíše k bočnímu odformování čelistí a k pohonu mechanického vyhazování výstříků. Vzduchové vyhazování se využívá u velkých a tenkých výstříků, kde by mechanické vyhazovače mohli způsobit značné deformace. Stlačený vzduch je přiveden mezi dutinu formy a výstřík na který působí plošně. To zaručí hladké vyhození bez deformací a stop po vyhazování. [31], [33]

5 ANALÝZA VSTŘIKOVACÍHO PROCESU

Při návrhu vstřikovacích forem jsou dnes nenahraditelnou součástí simulační softwary pro analýzu procesu vstřikování plastů. Mezi nejpoužívanější simulační softwary patří Moldflow Synergy, Cadmould nebo Moldex3D. Počítačové analýzy procesu vstřikování mnohanásobně zkracují dobu vývoje vstřikovací formy a její náklady. Díky simulacím odpadá výroba prototypů forem a jejich odzkoušení až v provozu. Konstruktor může odzkoušet formu ještě před zahájením výroby, což šetří čas, peníze a materiál. Správnou optimalizací formy a vstřikovacího procesu lze snížit hmotnost výrobku, spotřebu materiálu, dobu vstřikovacího cyklu a zvýšit kvalitu výstřiku.

Potup analýzy vstřikovacího procesu

Simulační software se nepoužívá jen pro kontrolu funkčnosti celé formy jako celku, ale už při jednotlivých fázích návrhu. Tyto softwary umožňují několik typů analýz pro: vhodnost umístění vtokového ústí, plnění a dotlaku, temperaturaci a smrštění/deformaci výstřiku.

Při návrhu formy hraje počítačová analýza první roli už při návrhu místa vtokového ústí. Analýza vhodnosti umístění vtokového ústí procentuálně vyhodnotí vhodnost umístění vtoku na povrchu celé součásti. Výsledkem této analýzy je také procentuální vyhodnocení odporu toku v celém objemu součásti, což slouží k návrhu počtu vtoků.

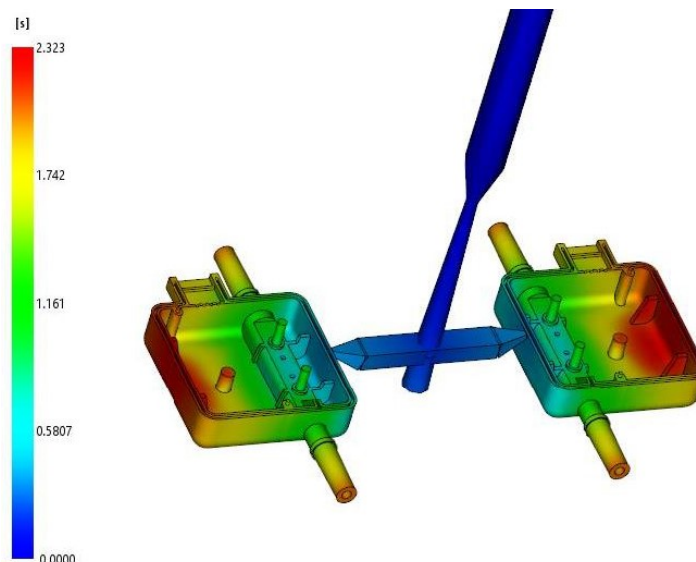
S předchozím krokem analýzy úzce souvisí i analýza plnění. Simulační softwary jsou vybaveny rozsáhlými knihovnamy materiálů, strojů, materiálů forem a temperačními médii. Po zvolení vstřikovaného materiálu a základních vstřikovacích parametrů stroje software provede výpočet. Výsledek této analýzy slouží k vyhodnocení správnosti umístění vtokového ústí a odhalení možných komplikací jako je nedotečení materiálu, místa pro odvzdušnění, místa studených spojů, tlak v dutině nebo správnost vtokového systému. Tlak uvnitř dutiny formy by neměl být větší jak 75 % maximálního tlaku stroje. Součástí analýzy plnění je i návrh vtokového systému. V případě plněných materiálů je součástí výsledků i orientace plniv, z čehož lze usoudit mechanickou pevnost výstřiku. S těmito výsledky je konstruktor schopen dále pokračovat v návrhu vstřikovací formy bez obav možných problémů s tokem taveniny.

Dalším krokem při návrhu formy je konstrukce temperačního systému. Simulační softwary umožňují libovolný návrh temperačních kanálů s libovolným médiem, teploty, průtoky a

dalšími parametry. Optimalizace temperačního systému je důležitá pro správný odvod tepla z dutiny formy, snížení doby cyklu vstřikování a silně ovlivňuje smrštění materiálu. Výsledkem analýzy temperace je sledování účinnosti a správnosti temperačního systému.

Posledním krokem v procesu analýzy je analýza smrštění a deformace výstřiku. Smrštění materiálu je tabulkovou hodnotou, na kterou se však nelze zcela spolehnout. Jelikož je smrštění a deformace výstřiku závislá na několika okolních faktorech (temperace formy, teplota a druh materiálu, konstrukcí dílu, a technologickými podmínkami vstřikování) je častým problémem tuto hodnotu předvídat. Na výstřiky je často kladena vysoká rozměrová přesnost, což vede k řadě problémům. Tyto problémy se řeší analýzou smrštění a deformace. Pokud je správně optimalizovaný návrh dílu, plnění, chlazení a technologické podmínky vstřikování touto analýzou výsledky ověříme. Pokud je však deformace a smrštění mimo tolerovanou přesnost je zapotřebí další optimalizace již zmíněných částí. Výsledkem této analýzy je smrštění a deformace ve všech směrech výstřiku ovlivněné všemi okolními faktory. [12], [14], [34], [35]

Na obrázku 30 je zobrazena analýza plnění v softwaru Moldflow Synergy 2016, kde je zobrazen čas plnění dutiny formy.



Obrázek 30 Analýza plnění v Moldflow Synergy 2016

Simulační softwary umožňují i analýzy více komponentního vstřikování nebo vstřikování s pomocí plynu (GIT) a vody (WIT). Tyto softwary neslouží pouze k návrhu konstrukce vstřikovací formy, ale také ke zjištění správných technologických parametrů vstřikování. Simulačními softwary lze vybalancovat vtokový systém s rozdílným objemem dutin formy.

Vstupním prvkem pro simulační software je 3D model součásti. Aby bylo možné analýzu spustit musí mít na sobě model vytvořenou síť konečných prvků. Síť je rozdělena do několika elementů spojených uzly, které vyplňují objem modelu. Podle typu sítě je určena přesnost výpočtu analýzy. U simulačních softwarů se rozlišují 3 typy sítí: Midplain, Dual domain a 3D. [34]

Síť Midplain

Síť Midplain se označuje jako 2D síť. Elementy 2D sítě jsou trojúhelníky, které tvoří jednorozměrnou síť definovanou ve středové rovině průřezu součásti. Tato síť je nejméně přesná a používá se k analýzám tenkostěnných výrobků s rovnoměrnou tloušťkou stěny nebo u vtokových a temperačních okruhů.

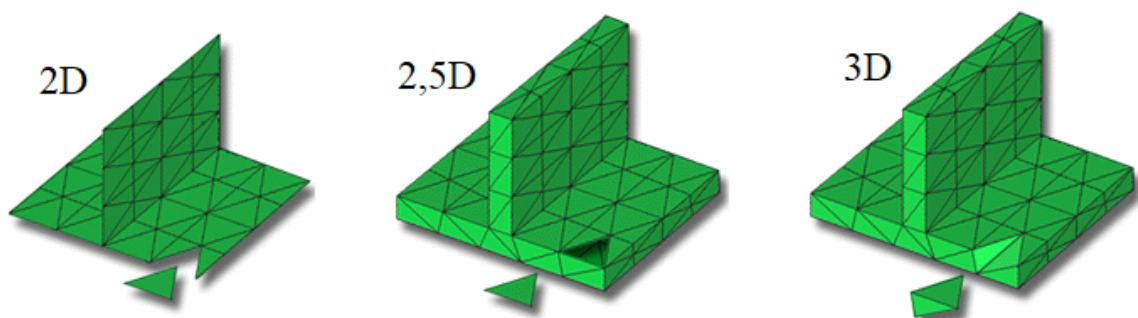
Síť Dual domain

Síť Dual domain se označuje jako 2,5D síť. Elementy sítě tvoří opět trojúhelníky, které tvoří jednorozměrné plochy na povrchu součásti. Tloušťka dílu je určena vzdáleností mezi protilehlými plochami. Součást s vygenerovanou 2,5D sítí tak připomíná duté těleso. Dual domain síť je kompromisem v přesnosti analýzy v závislosti na čase výpočtu. Používá se spíše pro součásti s rovnoměrnou tloušťkou stěn.

Síť 3D

Základem 3D sítě je kompletně objemová síť. Elementem 3D sítě je prostorový prvek se čtyřmi trojúhelníkovými stranami a 6 hranami (tetrahedral). 3D síť se vyznačuje vysokou přesností výsledků na úkor doby výpočtu. 3D síť se používá pro členité díly se silnými a proměnlivými tloušťkami stěn. [34], [36]

Na obrázku 31 jsou zobrazeny typy sítí používané u simulačních softwarů.



Obrázek 31 Druhy sítí [36]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 STANOVENÍ CÍLŮ PRÁCE

U diplomové práce byly stanoveny následující cíle práce:

1. Vypracovat literární studii pro dané téma,
2. Provést 3D konstrukci modelu vstřikované součásti,
3. Navrhnout 3D konstrukci vstřikovací formy pro zadaný díl s ohledem na vyrobiteľnosť,
4. Provést analýzu procesu vstřikování,
5. Nakreslit 2D řez vstřikovací formou spolu s výkresy a kusovníkem.

Literární studie v teoretické části diplomové práce je rozdělena do 5 základních kapitol. První kapitola se zabývá naukou o polymerních materiálech, jejich druhy, složení a použití zejména v automobilovém průmyslu a druhá kapitola se zabývá popisem technologie vstřikování plastů a vstřikovacích strojů. Další kapitoly se zabývají pravidly konstrukce dílu pro metodu vstřikování a konstrukcí vstřikovací formy se všemi jejími náležitostmi. Na konci teoretické části práce je popsáno využití a princip analýz vstřikovacího procesu.

Praktická část diplomové práce je rozdělena do 3 základních částí. První částí je vytvoření 3D modelu zadaného dílu dle pravidel z teoretické části práce a zvolení vhodného materiálu. Zadaný díl je součástí motoru osobního automobilu. Druhá část je zaměřena na kompletní 3D konstrukci vstřikovací formy pro navržený výrobek. Součástí konstrukce vstřikovací formy jsou i výkresy s kusovníkem. V poslední části je provedena analýza vstřikovacího procesu, která slouží k ověření funkčnosti formy a zvolení vhodných procesních parametrů. Pro 3D modely je využit software CATIA V5R20 a knihovna dílů společnosti MEUSBURGER. Analýza vstřikovacího procesu je provedena v softwaru Moldflow Synergy 2016.

7 POUŽITÉ SOFTWARE

Při vytvoření 3D modelů a analýzy vstřikovacího procesu byly použité následující softwary:

CATIA V5R20

CATIA celým názvem Computer-Aided Three-Dimensional Interactive Application je 3D modelační software vyvinutý francouzskou společností Dassault Systemes. CATIA se řadí mezi světovou špičku v oblastech návrhu designu (CAD), výroby (CAM) a engineeringu (CAE). Verze V5 je nejpoužívanější verzí zejména kvůli její všestrannosti, která pokrývá návrh výrobku skrze konstrukci, simulaci, optimalizaci, tvorbu výkresové dokumentace až po generaci kódu pro NC obrábění. Při tvorbě 3D modelu vstřikovaného dílu a vstřikovací formy byly v CATII použity tyto nástroje: Part Design (pro tvorbu a návrh těles), Assembly Design (pro tvorbu sestav), Core & Cavity Design (pro tvorbu tvárníku a tvárnice), Generative Shape design (pro práci s plochami) a Mold Tooling Design (pro práci se vstřikovací formou). [37]

Při návrhu vstřikovací formy byly použity normalizované díly z katalogu společnosti Meusburger. V online katalogu jsou k dispozici všechny díly ve 3D, které lze v příslušném formátu importovat přímo do prostředí CATIA.

Moldflow Synergy 2016

Moldflow Synergy je simulační (CAE) software vyvinutý společností Autodesk. Tento software umožňuje řešení problémů procesu vstřikování plastů. Dnes je již nezbytnou součástí návrhu vstřikovaných dílů, forem a jejich optimalizace. Simulační software Moldflow Synergy je schopen řešit hned několik druhů simulací jako například: vhodné umístění vtokového ústí, plnění dutiny formy, působení dotlakové fáze, deformace výrobku a temperace formy.

8 VSTŘIKOVANÁ SOUČÁST

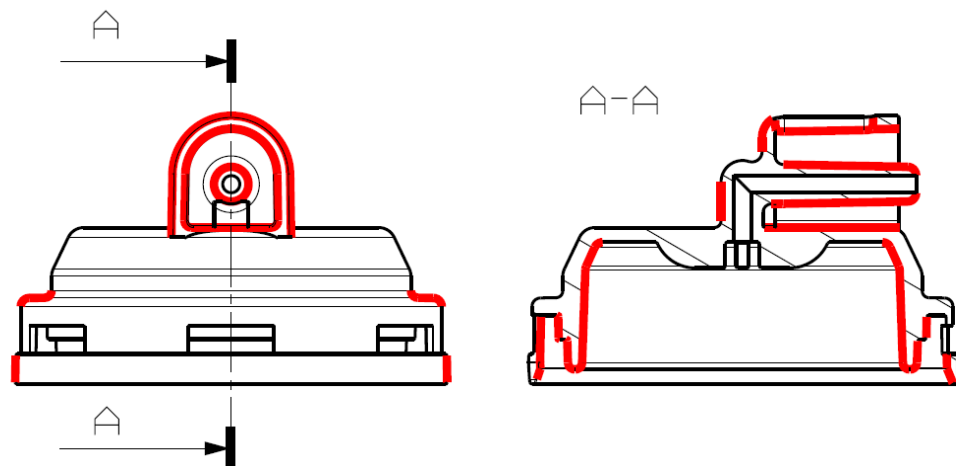
Vstřikovaná součást je součástí podtlakového systému automobilu. Konkrétně se jedná o vršek nádoby podtlaku z automobilu Škoda. Protikus k víčku obsahuje gumovou membránu a nádobka jako celek má funkci ovládání škrtící klapky. Na víčku jsou po obvodu otvory pro zacvaknutí háčků na protilehlém kusu. Podmínkou tedy je, aby materiál byl dostatečně pružný pro kompletaci a ve složeném stavu musí být spoj obou částí dostatečně těsný. Výrobek je umístěn v motorovém prostoru v těsné blízkosti motoru a jedná se o nepohledový díl. Součástí víčka je průchozí otvor pro proudění vzduchu. Rozměry výrobku jsou přibližně 50 x 50 x 31 mm a objem 9,483 cm³. 3D model součásti je vytvořen pomocí odměření reálné součásti a je proveden v softwaru CATIA V5R20. Na obrázku 32 je zobrazen vstřikovaný výrobek.



Obrázek 32 Vstřikovaný výrobek

8.1 Konstrukce vstřikované součásti

Při návrhu vstřikované součásti byly dodrženy předepsaná pravidla (viz. kapitola 3). Součást je zkonstruována tak, aby se tloušťka stěny měnila jen minimálně a všechny přechody a ostré hrany jsou opatřeny rádiusy. Pro zvýšení pevnosti velké plochy jsou použity žebra. Všechny potřebné plochy na výrobku jsou opatřeny patřičnými úkosy pro snadné vyhození. Na obrázku 33 je zobrazen výrobek v řezu, kde jsou zvýrazněny všechny plochy opatřeny úkosy.



Obrázek 33 Úkosity na vstříkované součásti

8.2 Povrch vstříkované součásti

Povrch vstříkované součásti je rozdělen na stranu A (pohledovou) a stranu B (nepohledovou). Povrch součásti hraje významnou roli při její konstrukci, z toho důvodu, že čím větší je drsnost povrchu, tím větší musí být úkosity pro snadné odformování a vyhození výstřiku z formy. U zvolené součásti nepohledová strana B nepodléhá vysokým nárokům na kvalitu povrchu, ale nesmí omezovat vyhození součásti z formy. Většina povrchů vstříkovaných součástí se vytváří metodou EDM (Electrical Discharge machining), kde drsnost povrchu je definována ve standartu VDI 3400. Strana A vstříkované součásti má podle tabulek zvolený povrch VDI 26, kterému odpovídá drsnost Ra2 a úhel úkosu pro materiál PA min. $0,5^\circ$. [38]

8.3 Materiál vstříkované součásti

Materiálem, z kterého bude vyrobena vstříkovaná součást, je Polyamid 6 plněný skleněnými vlákny. Zvolený materiál je dodáván německou společností BASF a má obchodní název Ultramid B3WG6. Obsah skleněných vláken činí 30 %. Jelikož je součást součástí motorového prostoru automobilu, kde může v extrémních podmínkách docházet k teplotám až přes 100 °C a styku s různými chemikáliemi, musí být materiál vůči těmto vlivům odolný. Materiál Ultramid B3WG6 se vyznačuje vysokou odolností proti vysokým teplotám a chemikáliím a často je využíván právě v automobilovém průmyslu jako součásti motoru a potrubí. Materiál je odolný vůči celé řadě chemikáliím jako je např. isopropyl alkohol, methanol, ethanol, acetone, minerální oleje a nafta. Ultramid B3WG6 se vyznačuje také velmi vysokou tuhostí, pevností, rozměrovou stabilitou a odolností proti opotřebení. Polyamidy jsou obecně silně nasákové materiály, a proto je nutné je před použitím sušit. Materiál je dodáván v obalech odolných proti vlhkosti ve formě granulátu buď ve 25 kg pytlech nebo 1000 kg kontejnerech. Běžná cena materiálu Ultramid B3WG6 je 2,80 ÷ 3,00 eur. Výběr některých charakteristických parametrů materiálu jsou uvedeny v tabulce 5. Kompletní materiálový list je v příloze.

Tabulka 5 Parametry materiálu Ultramid B3WG6

Parametr	Jednotka	Hodnota
Zkratka polymeru		PA6-GF30
Hustota	kg/m ³	1360
Teplota taveniny	°C	270 ÷ 290
Teplota formy	°C	80 ÷ 90
Vyhazovací teplota	°C	184
Max. smykové napětí	MPa	0,5
Max. rychlost smykové deformace	s ⁻¹	60000
Index toku taveniny MFR	g/10 min	35
Modul pružnosti v tahu	MPa	9500
Smrštění ve směru toku	%	0,74
Smrštění kolmo ke směru toku	%	0,25
Sušicí teplota	°C	80
Čas sušení	h	4

9 NÁVRH KONSTRUKCE FORMY

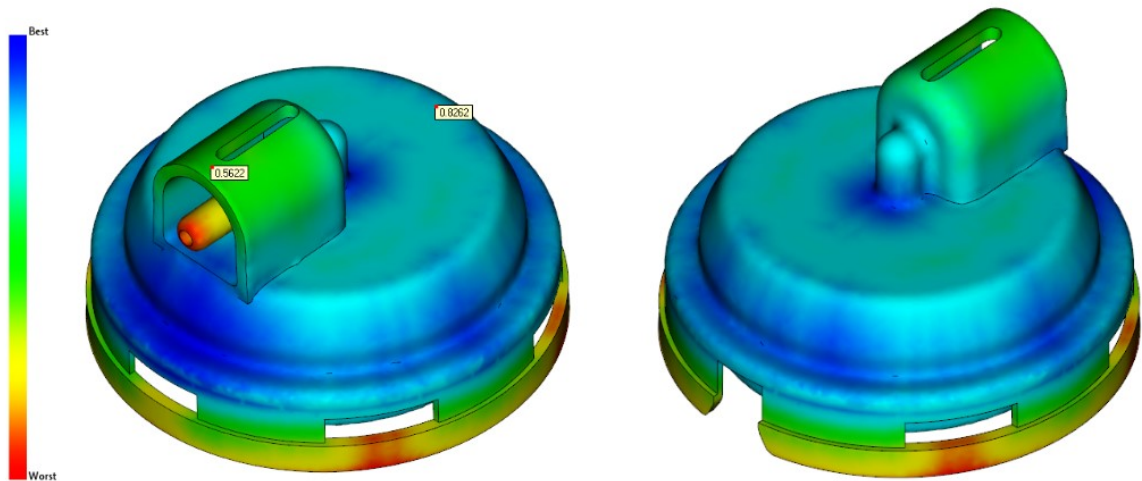
Návrh vstřikovací formy je proveden v softwaru CATIA V5R20. Při návrhu vstřikovací formy jsou dodržena obecná pravidla uvedená v kapitole 4. Návrh konstrukce vstřikovací formy je rozdělen do několika po sobě jdoucích úkonů, které jsou: volba násobnosti formy, volba místa vtokového ústí, volba vtokového systému, návrh zaformování výstřiku a kompletní konstrukce formy.

9.1 Násobnost formy

Při volbě vtokového systému hraje významnou roli násobnost formy. Vstřikovaná součást je poměrně malých rozměrů se členitou geometrií. Proto bude zapotřebí využití bočního odformování takřka po celém jejím obvodu a pro výrobu jednoho dílu bude zapotřebí poměrně velký prostor formy. Po zvážení všech faktorů je návrh násobnosti formy 2 a to především z důvodu velikosti formy. Při dvojnásobné formě bude mít forma pořád přiměřenou velikost a nebude k výrobě zapotřebí příliš velký vstřikovací stroj. To umožní ve výrobním podniku větší univerzálnost a možnost použití formy na většině strojích.

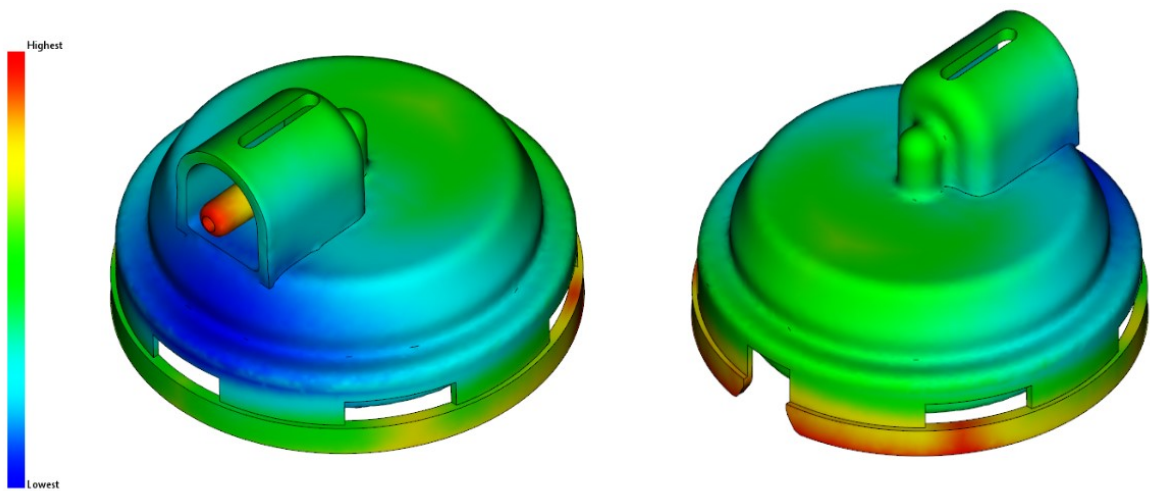
9.2 Volba místa vtokového ústí

Před návrhem vtokového systému formy byla provedena analýza vhodnosti umístění vtokového ústí v softwaru Moldflow Synergy 2016. Tato analýza obsahuje celkem dva výsledky. Na obrázku 34 je zobrazen výsledek nejvhodnějšího umístění vtokového ústí na vstřikované součásti. Modrou barvou jsou zobrazeny oblasti s nejlepší vhodností umístění vtokového ústí a červenou nejmenší. Jelikož je geometrie vstřikované součásti poměrně komplikovaná a pro odformování musí být využity posuvné čelisti takřka po celém jejím obvodu, je volba umístění vtokového ústí silně omezena. Při volbě místa vtokového ústí se musí brát v úvahu násobnost formy, poloha dělicí roviny, boční odformování a druh vtokového systému. Na obrázku 34 lze vidět, že vhodnost zvoleného umístění vtokového ústí je asi 82 %.



Obrázek 34 Výsledek vhodnosti umístění vtokového ústí

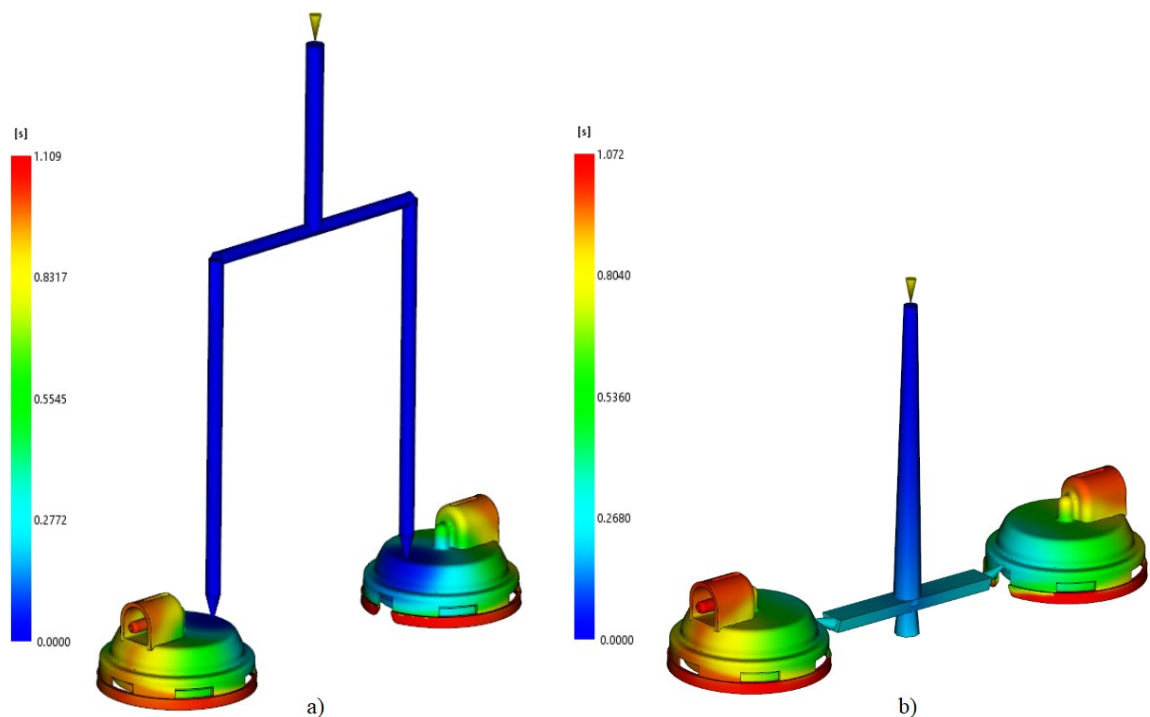
Druhým výsledkem analýzy je tzv. indikace odporu vůči toku taveniny. Výsledkem této analýzy je odhalení míst s velkým odporem vůči toku taveniny, což může mít za následek nedotečení do všech míst dutiny formy. Na obrázku 35 je zobrazen výsledek analýzy, kde červenou barvou jsou zobrazeny místa s největším odporem vůči toku taveniny a modrou s nejmenším. Ve zvoleném místě vtokového ústí je odpor vůči toku taveniny zhruba 50 %.



Obrázek 35 Výsledek indikace odporu vůči toku taveniny

9.3 Volba vtokového systému

Volba vtokového systému je základní částí návrhu před samotnou konstrukcí formy. Odvíjí se od konstrukce dílu, násobnosti formy, ceny formy a materiálu. Rozdíly mezi studeným a vyhřívaným vtokovým systémem jsou podrobně popsány v kapitole 4.3. Před volbou vtokového systému byla provedena analýza plnění v softwaru Moldflow Synergy 2016 pro vyhřívaný i studený vtokový systém. Studený i vyhřívaný vtokový systém byl navrhnout dle dostupných komponentů, navržené velikosti formy, zvoleného materiálu, velikosti výstřiku a obecných pravidel. Na obrázku 35 je zobrazen výsledek plnění u vyhřívaného a studeného vtokového systému.



Obrázek 36 Výsledek analýzy plnění a) u vyhřívaného b) studeného vtok. systému

U obou vtokových systémů byl nastaven čas plnění 1 s a velikost vtokového ústí 1 mm. Všechny ostatní procesní parametry jako dotlak, teplota taveniny, teplota formy, materiál, vstřikovací stroj atd. jsou u obou analýz totožné. V následující tabulce 6 jsou porovnány důležité hodnoty získané z vypočtených analýz dvou vtokových systémů, díky kterým je dále vybrán vhodný vtokový systém pro navrhovanou formu.

Tabulka 6 Srovnání studeného a vyhřívaného vtokového systému

Parametr	Jednotka	Studený VS	Vyhřívaný VS
Čas plnění	s	1,072	1,109
Vstřikovací tlak	MPa	58,8	62,4
Čas ochlazení na vyhazovací teplotu včetně VS	s	31,79	13,31
Uzavírací síla	t	22,43	24,71
Max. rychlost smykové deformace	1/s	70954	21345
Hmotnost výstřiku včetně VS (1 cyklus)	g	34	26

Z tabulky 6 lze vyčíst, že parametry jako je čas plnění, vstřikovací tlak nebo uzavírací síla se v případě studeného a vyhřívaného vtokového systému příliš nemění. Velké rozdíly jsou naopak u času chlazení na vyhazovací teplotu, maximální rychlosti smykové deformace a hmotnosti spotřebovaného materiálu na jeden cyklus. V těchto parametrech silně vede volba vyhřívaného vtokového systému. Čas ochlazení 100 % součásti u vyhřívaného vtokového systému je 13,31 s a v místě vyhazovačů 4,3 s. U studeného vtokového systému je ochlazení 100 % součásti včetně vtokového systému až 31,79 s a v místě vyhazovačů 4,8 s. Výstřik však není možné odformovat a vyhodit v čase 4,8 s, protože vtokový systém není dostatečně ochlazen a pravděpodobně by došlo k tahání vlákna od trysky stroje a špatnému vyhození vtokového systému. Při použití stejného rozměru vtokového ústí hodnota rychlosti smykové deformace u studeného vtokového systému dosahuje hodnot až 70954 s^{-1} . Maximální dovolená hodnota rychlosti smykové deformace u materiálu Ultramid B3WG6 je 60000 s^{-1} . Tato hodnota je v případě studeného vtokového systému překročena a mohlo by dojít k degradaci polymeru a viditelných vad na výstřiku. Řešením je zvětšení vtokového ústí, což by mělo za následek viditelnější místo vtoku na součásti, nebo snížení vstřikovací rychlosti. Posledním a nejdůležitějším problémem při výběru vtokového systému je spotřeba vstřikovaného materiálu, kde rozdíl je 8 g. I když má vyhřívaný vtokový systém mnoho výhod je výrazně dražší než studený, a to zejména kvůli ceně vyhřívaného vtokového systému, nutnosti další desky formy, kabeláže a zásuvky pro napájení a regulaci. Návratnost těchto investic je však poměrně rychlá. Nižší provozní náklady při použití vyhřívaných vtokových systémů nejsou jen úspora materiálu, ale i absence provozu odnímače vtoků a provoz drtiče.

Dále je uveden přibližný výpočet spotřeby materiálu a čas návratnosti investic vyhřívaného vtokového systému.

Cena materiálu	3 eur
Cena vyhřívaného VS.....	750 eur
Cena rozvodné desky formy	250 eur
Cena zásuvky	55 eur
Čas cyklu	15 s
Směna	7,5 hod

Studený VS: (spotřeba na 1 cyklus) 0,034 kg..... (3 směny) 183,6 kg = 550,8 eur

Vyhříváný VS: (spotřeba na 1 cyklus) 0,026 kg..... (3 směny) 140,4 kg = 421,2 eur

Za 1 den ušetřím 43,2 kg materiálu = 129,6 eur

Návratnost investic vyhřívaného VS je 8,14 dní nepřetržitého provozu.

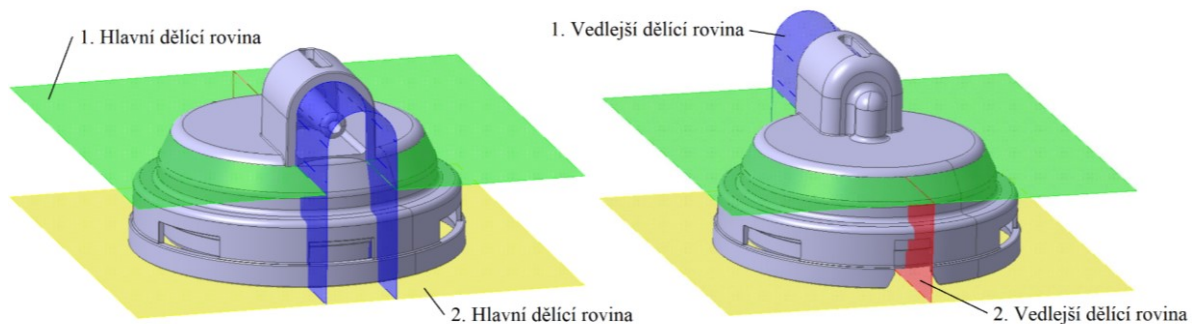
Návratnost investic na vyhříváný vtokový systém je zhruba 8 dní nepřetržitého provozu. Rozdrcený materiál ze vtokových zbytků se často v určité míře dá použít znovu, ale v mnoha případech zejména v automobilovém průmyslu to není možné, kvůli ztrátě některých vlastností. Nejlepší volbou vtokového systému pro navrhovanou vstřikovací formu bude z výše uvedených důvodů a konstrukce součásti vyhříváný vtokový systém, u kterého odpadají vtokové zbytky, provoz drtiče a odnímače vtoků.

9.4 Volba dělicích rovin

Součástí návrhu vstřikovací formy je volba dělicích rovin vstřikované součásti. Tyto roviny určují zaformování součásti, její vyrobiteľnost a konstrukci formy. Při volbě dělicích rovin se musí brát v úvahu geometrie součásti a její vzhled. Dělicí rovina vytvoří na součásti pohledové stopy, které by se měli, pokud je to možné, umístit do méně viditelných míst.

Kvůli členitosti vyráběné součásti jsou zvoleny 2 hlavní a 2 vedlejší dělicí roviny. Obě hlavní dělicí roviny jsou rovnoběžné s deskami vstřikovací formy. První hlavní dělicí rovina je tvořena tvarovou vložkou v pravé (pevné) a druhá tvarovou vložkou v levé (pohyblivé) části

formy. Po otevření formy zůstane výrobek v levé části formy. Vedlejší dělicí roviny jsou tvořeny posuvnými čelistmi. Z důvodu komplikované geometrie vyráběné součásti je zapotřebí použít celkem 3 boční posuvné čelisti, které jsou rozděleny vedlejšími dělicími rovinami. Na obrázku 37 jsou zobrazeny navržené dělicí roviny na vyráběné součásti.

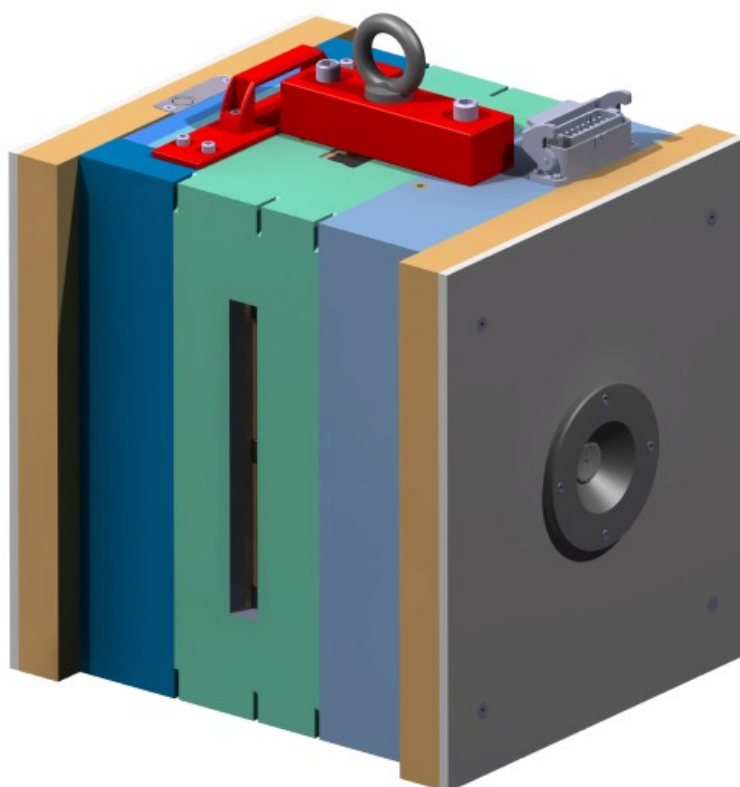


Obrázek 37 Dělicí roviny na vstříkované součásti

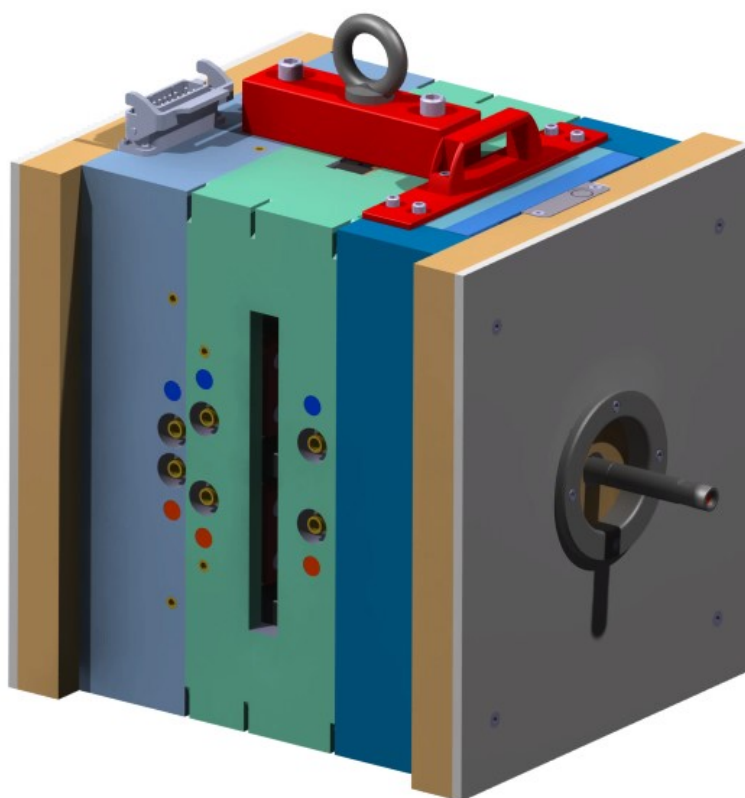
9.5 Konstrukce formy

Dalším krokem návrhu vstříkovací formy je již samotná 3D konstrukce v příslušném softwaru (CATIA V5). Při návrhu vstříkovací formy, byly využity normalizované díly z knihovny společnosti Meusburger. Tato společnost se zabývá výrobou všech komponentů týkajících se výroby vstříkovacích forem. Použití normalizovaných dílů vede ke zkrácení času konstrukce i samotné výroby.

Navržená forma se skládá ze 3 základních částí: pravá pevná část formy, levá pohyblivá část formy a vyhazovací paket. Navržená forma je dvojnásobná a na jeden cyklus jsou vyrobeny 2 součásti. Zaformování výstřiku je provedeno pomocí tvarových vložek vsazených do desek formy a posuvných čelistí uchycených na levé pohyblivé straně formy. Posuvné čelisti jsou ovládány šikmými kolíky a po otevření formy zůstávají výstřiky v levé pohyblivé části formy. Vtokový systém je řešen pomocí vyhřívaných trysek, které jsou napájeny a ovládány skrze zásuvku v horní části formy. Temperace formy je sestavena ze 3 samostatných okruhů a je řešena skrze vrtané kanály. Všechny detailnější komponenty formy a jejich funkce jsou popsány v následujících kapitolách. Na obrázku 38 a 39 je pohled na kompletní sestavu vstříkovací formy.



Obrázek 38 Kompletní sestava vstřikovací formy 1

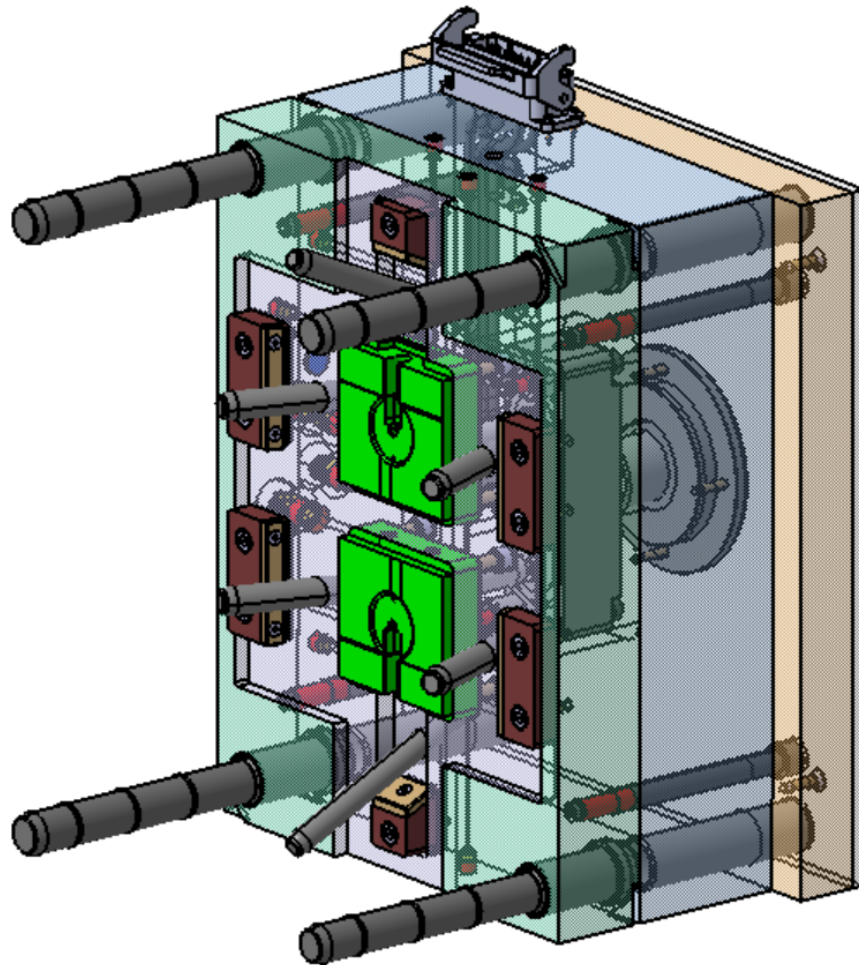


Obrázek 39 Kompletní sestava vstřikovací formy 2

9.5.1 Rám formy

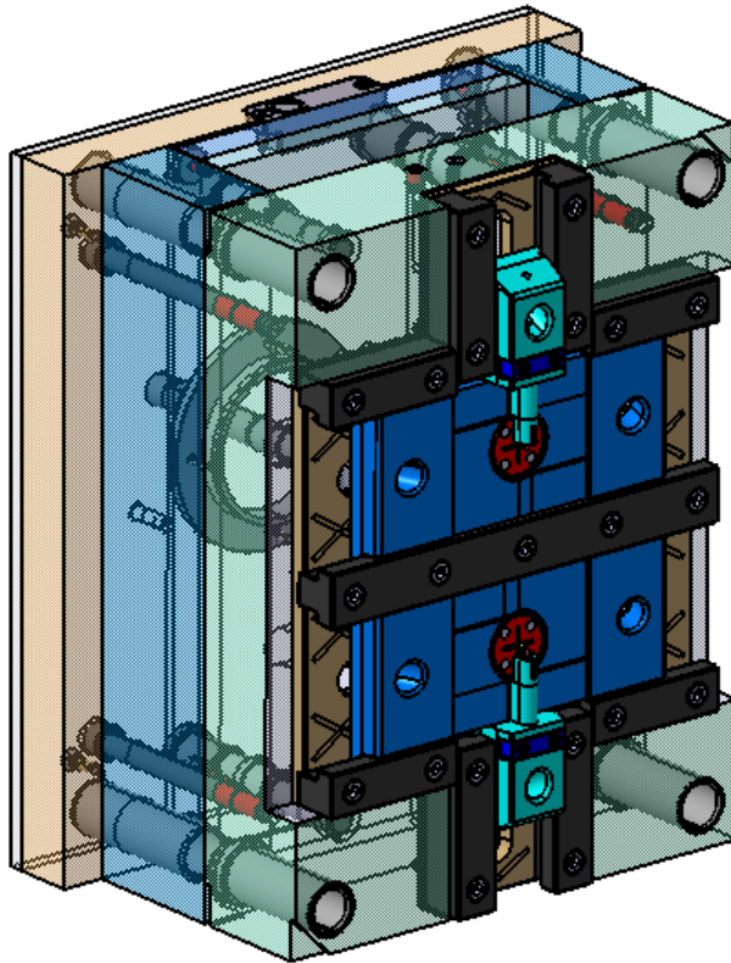
Při konstrukci rámu byla využita knihovna komponentů společnosti Meusburger, která umožňuje návrh vstřikovací formy dle zvolených rozměrů a požadavků. Vstřikovací forma je dvojnásobná. Orientace a umístění dutin formy je vertikální, a to z důvodu lepší manipulace pro obsluhu. Obsluha stroje je schopna vstřikovací formu umístit do stroje i z boční strany, avšak je tento proces komplikovaný a zdlouhavý. Vertikální umístění dutin dovoluje menší šířku formy, kterou lze do stroje jednoduše umístit pomocí jeřábu ze shora, což obsluha ocení. Velikost formy je navržena co nejmenší možná k příslušnému výrobku a její násobnosti, kvůli možnosti výroby na širší škále strojů od malých po velké. Finální rozměry vstřikovací formy jsou: (délka x šířka x výška) 396 x 346 x 399 mm. Všechny desky formy jsou vyrobeny z oceli 1.2085. Tato ocel se vyznačuje dobrou obrobiteľností, odolností proti opotřebením a dobrou leštitelností a velmi často se využívá právě k výrobě rámu vstřikovacích forem. Desky vstřikovací formy jsou v rozích opatřeny drážkami, které slouží při údržbě ke snadnějšímu oddělení desek od sebe. Rám navržené formy se skládá z celkem 7 desek a dělí se na pravou pevnou a levou pohyblivou část.

Pravá část formy se skládá z upínací desky, rozvodné desky a desky s tvarovými vložkami (tvarové). Upínací deska slouží k uchycení formy ke vstřikovacímu stroji. Rozvodná deska je zapotřebí kvůli přítomnosti vyhřívaného vtokového systému, který je tvořen rozvodným blokem s tryskami, kabely a zásuvkou. Poslední deskou formy je deska obsahující tvarové vložky, které tvoří finální rozměry výstřiku. Pravá část formy obsahuje vodící elementy jako: centrovací pouzdra a vodící sloupky, které slouží k vycentrování desek a přesnému vedení při otevírání a zavírání formy. Délka vodících sloupků je 155 mm. Tato délka je přizpůsobena max. otevření stroje, které je 600 mm. Předpokládané otevření formy při vyhození je 150 mm. Jednotlivé desky pravé poloviny formy jsou spojeny pomocí šroubů. Na obrázku 40 je zobrazena pravá (pevná) polovina formy.



Obrázek 40 Pravá (pevná) polovina vstřikovací formy

Levá část formy se skládá z desky s tvarovými vložkami, dvou rozpěrných desek, upínací desky a vyhazovacího paketu. Upínací deska slouží k uchycení formy ke vstřikovacímu stroji, dvě rozpěrné desky slouží k tvorbě prostoru pro vyhazovací paket a upínací deska slouží k uchycení formy ke vstřikovacímu stroji. Ve tvarové desce jsou zasazeny tvarové vložky, okolo kterých jsou umístěny posuvné čelisti s vedením. Jednotlivé desky formy jsou spojeny pomocí šroubů a vycentrovány pomocí centrovacích a vodících pouzder. Spojení desek je provedeno pomocí šroubů. Vyhazovací paket se skládá ze dvou samostatných desek, mezi kterými jsou uchyceny vyhazovače a vodící čep pro ovládání pohybu vyhazovačů. Pohyb vyhazovacích desek je veden pomocí vodících sloupků a vodících pouzder. Na obrázku 41 je zobrazena levá (pohyblivá) polovina formy.

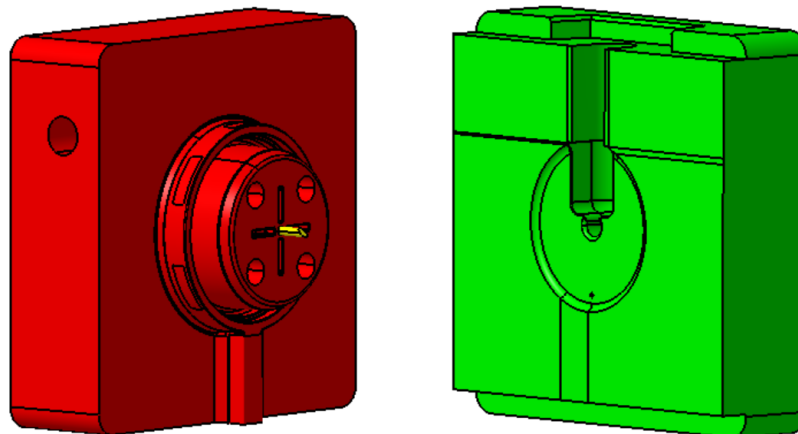


Obrázek 41 Levá (pohyblivá) polovina vstříkovací formy

Obě upínací desky formy jsou opatřeny izolačními deskami o tloušťce 8 mm, kvůli zamezení přenosu tepla z formy do upínacích desek vstříkovacího stroje. Izolační desky jsou vyrobeny z kompozitního materiálu, který odolává teplotám až 230 °C. Na upínacích deskách se nachází také středící kroužky. Ty mají funkci vystředění vstříkovací formy na střed stroje. Průměr středícího kroužku je 125 mm, což je normalizovaný rozměr pro běžné vstříkovací stroje. Tento průměr středícího kroužku mají stroje až do velikosti 570 mm vzdálenosti mezi vodícími sloupky, což udává možnost použití formy na stroje od velikosti 370 do 570 mm. Vstříkovací forma je opatřena vodícími prvky (vodící sloupky, vodící pouzdra), které slouží k vycentrování desek a přesnému chodu při otevírání a zavírání formy.

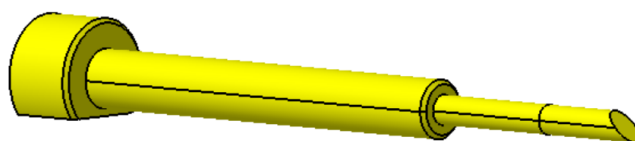
9.5.2 Tvarové vložky

Tvarové vložky udávají finální tvar dutiny vstříkovací formy a často se nazývají jako tvárník a tvárnice. U navržené formy jsou tvárník a tvárnice řešeny právě tvarovými vložkami, které jsou zasazeny do desek formy. Skrze obě tvarové vložky vedou vrtané temperační kanály, které mají vstupy i výstupy ze zadní strany vložky. Tvarové vložky jsou uchyceny ze zadní strany skrze desku formy pomocí 4 šroubů. Tento způsob uchycení a orientace vstupů a výstupů temperačních kanálů je zvolen kvůli jednodušší montáži tvarových vložek do desek formy. Pokud by byly vstupy a výstupy temperačních kanálů z boku tvarových vložek, mohlo by při zasazování tvarových vložek do desky formy dojít k poškození těsnících O-kroužků. Zvoleným typem tvarových vložek toto nebezpečí odpadá a montáž bude jednodušší. Materiál tvarových vložek je 1.2311 a ploch, které tvoří dutinu formy jsou opracovány na předepsané drsnosti viz. kapitola 8.2. Na obrázku 42 jsou zobrazeny tvarové vložky formy.



Obrázek 42 Tvarové vložky

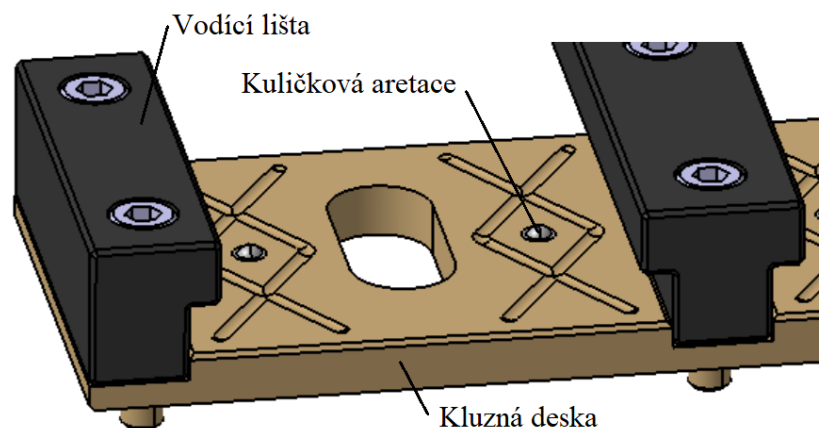
Jelikož vyráběná součást obsahuje průchozí otvor, který má průměr pouze 2 mm, je zapotřebí tomu přizpůsobit i tvarovou vložku. Trn tvořící průchozí otvor na vyráběné součásti je ve tvarové vložce zasazen jako výměnný díl, protože se předpokládá, že tento díl bude silně namáhán a opotřebováván. Výměnný trn je kalený a ve tvarové vložce je zasazen ze zadní strany. Na obrázku 43 je zobrazen výměnný trn tvarové vložky.



Obrázek 43 Výměnný trn tvarové vložky

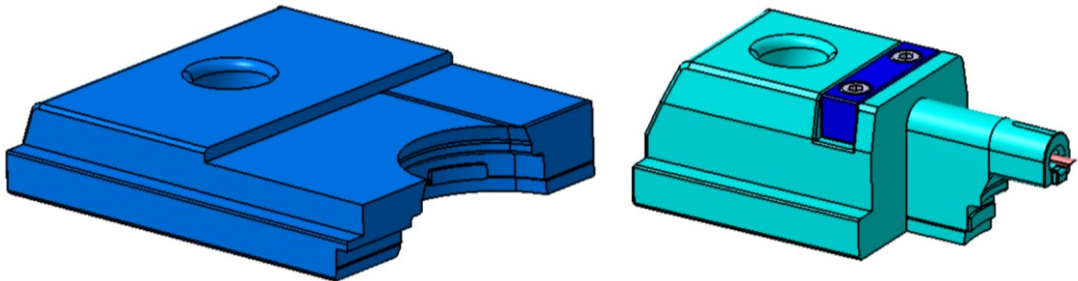
9.5.3 Posuvné čelisti

Posuvné čelisti se u vstříkovacích forem využívají u složitých výrobků, které by nebylo po vyplnění dutiny formy možné odformovat. Odsunutím posuvných čelistí je vstřík uvolněn a může být vyhozen. U navržené součásti je nutné použití celkem 3 posuvných čelistí pro každý vstřík. Kompletní sestava posuvných jednotek se všemi komponenty je zobrazena na obrázcích 40 a 41. Posuvný systém se skládá z posuvných dílů, vodících lišt, kluzných desek, kuličkových aretací, šikmých kolíků a dorazů. Pohyb posuvných dílů je prováděn šikmými kolíky umístěnými v pravé polovině formy, kde se nachází i dorazy pro držení přesné polohy posuvné jednotky při vstříkování polymeru do dutiny formy. Dorazy jsou vytvořeny tak, aby byla možná jejich výměna při větším opotřebení. Další prvky posuvného systému jsou umístěny na levé polovině formy. Posuvné díly se pohybují mezi vodícími lištami po kluzných deskách, které jsou opatřeny mazacími drážkami kvůli plynulejšímu pohybu a větší životnosti součástí. Součástí kluzných desek jsou i kuličkové aretace, které slouží k držení polohy posuvných dílů v dané pozici při otevření formy. Tyto aretace hrají největší roli u svislých posuvů, kde by došlo při otevření formy a vyjetí šikmých kolíků ke spadnutí posuvných dílů. Kuličkové aretace jsou použity i u vodorovných posuvů, a to zejména kvůli údržbě formy. Pokud bude obsluha provádět údržbu přímo na stroji a dojde ke vyjmutí posuvného dílce, kuličková aretace poslouží k nalezení správné polohy dílu tak, aby nedošlo při zavření formy ke kolizi a jejímu zničení. Vodící lišty i kluzné desky jsou k desce formy ukotveny pomocí šroubů. Na obrázku 44 jsou zobrazeny vodící prvky posuvného systému formy.



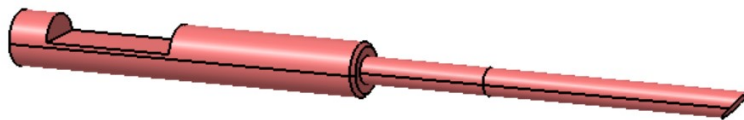
Obrázek 44 Vodící prvky posuvných čelistí

Posuvné čelisti jsou vyrobeny z materiálu 1.2311 a povrch ploch tvořících dutinu formy je opracován podle předepsané drsnosti. Sklon šikmých kolíků je podle délky dráhy u horizontálních čelistí 20° a u vertikálních čelistí 25° . Na obrázku 45 jsou zobrazeny posuvné čelisti vstřikovací formy.



Obrázek 45 Posuvné čelisti

Jelikož vyráběná součást obsahuje průchozí otvor, je trn ze stejných důvodů jako u tvarové vložky opět výměnný. Trn je kalený a do posuvné čelisti je zasazen ze zadní strany. Proti pohybu je trn zajištěn kostkou v horní části uchycenou dvěma šrouby. Výměnný trn posuvné čelisti je zobrazen na obrázku 46.

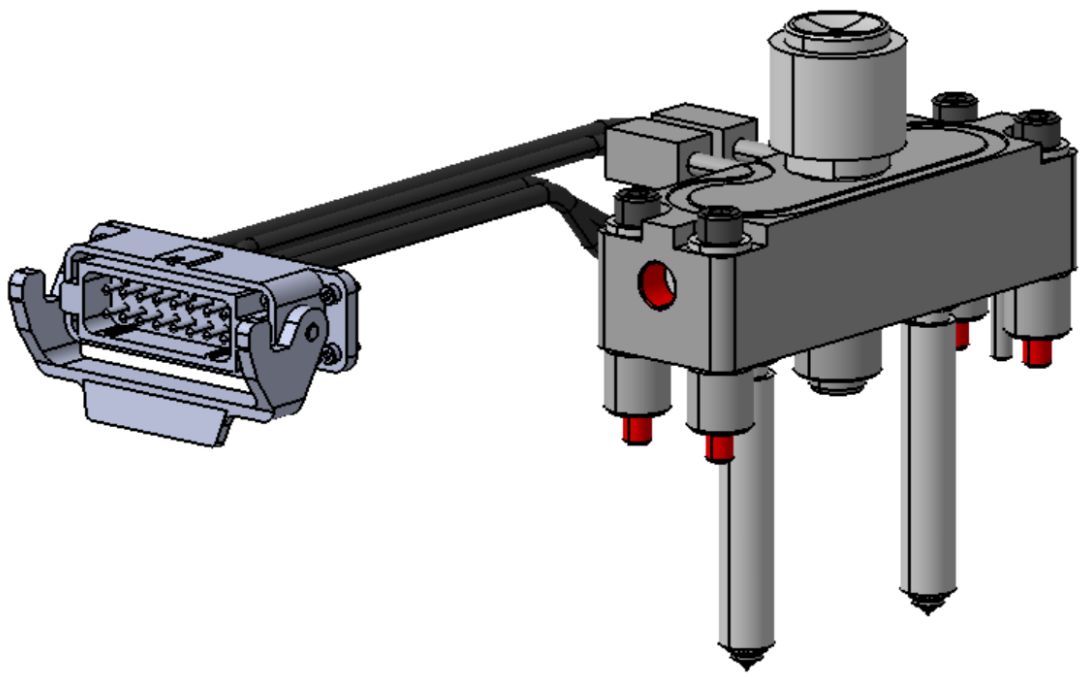


Obrázek 46 Trn posuvné čelisti

9.5.4 Vtokový systém

Výběr vtokového systému pro vstřikovací formu je podrobně popsán v kapitole 9.3. Pro navrženou formu byl zvolen vyhřívaný vtokový systém. Kompletní vyhřívaný vtokový systém je dodáván společností Meusburger a skládá se z rozvodného bloku, centrální vtokové vložky a vyhřívaných trysek. Vyhřívaný vtokový systém je připevněn v rozvodné desce pomocí šroubů a středících prvků. Společnost Meusburger umožňuje sestavení vyhřívaného vtokového systému na klíč podle použitého materiálu, násobnosti formy, velikosti vstřikované součásti a druhu trysek. Při použití materiálu Ultramid B3WG6 (PA6) je hmotnost jednoho výstřiku přibližně 13 g. Od těchto údajů se odvíjí návrh vyhřívaného vtokového systému, kde kanál v centrální vtokové vložce má průměr 6 mm a kanál v rozvodném bloku a tryskách 5 mm. Průměr vtokového ústí je 1 mm. Materiál rozvodného

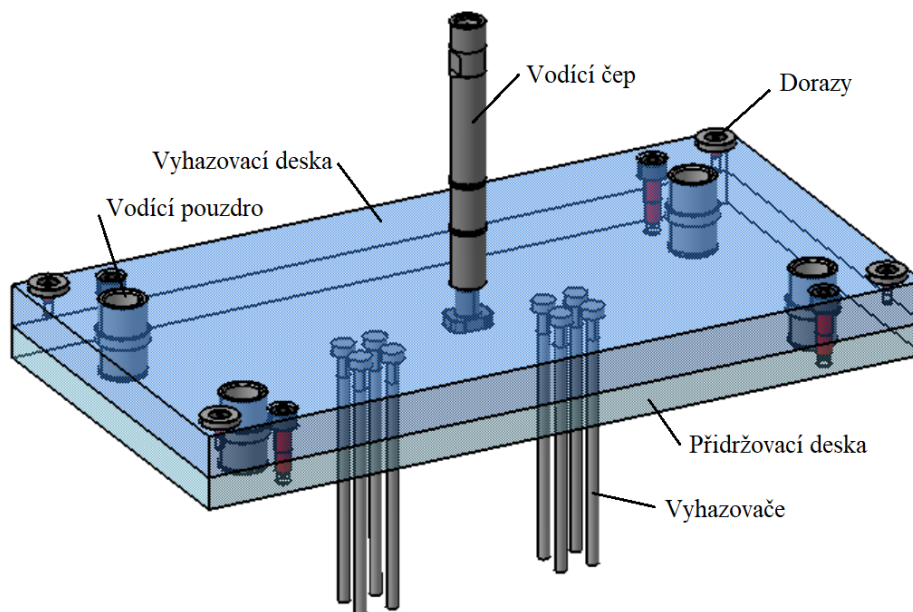
bloku je 1.2316 a vzdálenost mezi tryskami je 80 mm. Typ použitého rozváděcího bloku je IMT2 a centrální vtokové vložky E 400 RG. Vyhřívané trysky šroubované do rozvodného bloku mají označení E 4010, průměr 19 mm a délku 99 mm. Aby mohl vyhřívaný vtokový systém pracovat je zapotřebí jej připojit k napájecímu napětí a řídicímu softwaru. Z rozvodného bloku vyhřívaného vtokového systému jsou vyvedeny konektory pro zapojení napájecího napětí sloužícího k vyhřívání topných těles a kabely pro snímání dat z teplotních čidel. Podle informací z teplotních čidel je teplota topných těles regulována. Tyto kabely jsou zapojeny do 16 pólové zásuvky připevněné v horní části formy, která je opatřena bezpečnostní podélnou pákou. Tavenina je z trysky vyhřívaného vtokového systému vstříkována přímo do dutiny formy. Na obrázku 47 je zobrazen kompletní vyhřívaný vtokový systém se zásuvkou a kabely.



Obrázek 47 Vyhřívaný vtokový systém Meusburger

9.5.5 Vyhazovací systém

Vyhazovací systém se skládá ze 2 desek (vyhazovací a přidržovací), mezi kterými je umístěno celkem 8 válcových vyhazovačů o průměru 6 mm. Použité vyhazovače jsou od firmy Meusburger a jejich označení je E1710. Nakoupený vyhazovač má délku 160 mm, který je zkrácen na požadovanou délku dle dutiny formy. Na každý výstřik přísluší celkem 4 vyhazovače, které jsou umístěny ze spodní strany vyráběné součásti. Pohledové stopy od vyhazovačů proto nejsou patrné a nenarušují finální vzhled součásti. Materiál vyhazovačů je 1.2210 a je kalený až na 60 HRC. Součástí vyhazovacího systému je vodící čep pro vedení vyhazování. Ten vystupuje ven z formy v levé části a slouží pro připojení hydraulického ovládání vyhazování vstřikovacího stroje. Pohyb vyhazovacích desek je veden vodícími pouzdry a sloupky, které slouží zároveň k vycentrování desek vůči sobě. Na zadní straně vyhazovacího systému jsou dorazy, které slouží k tlumení nárazu při zpětném chodu desek. Desky vyhazovacího systému jsou spojeny šrouby. Na obrázku 48 je zobrazen kompletní vyhazovací systém.



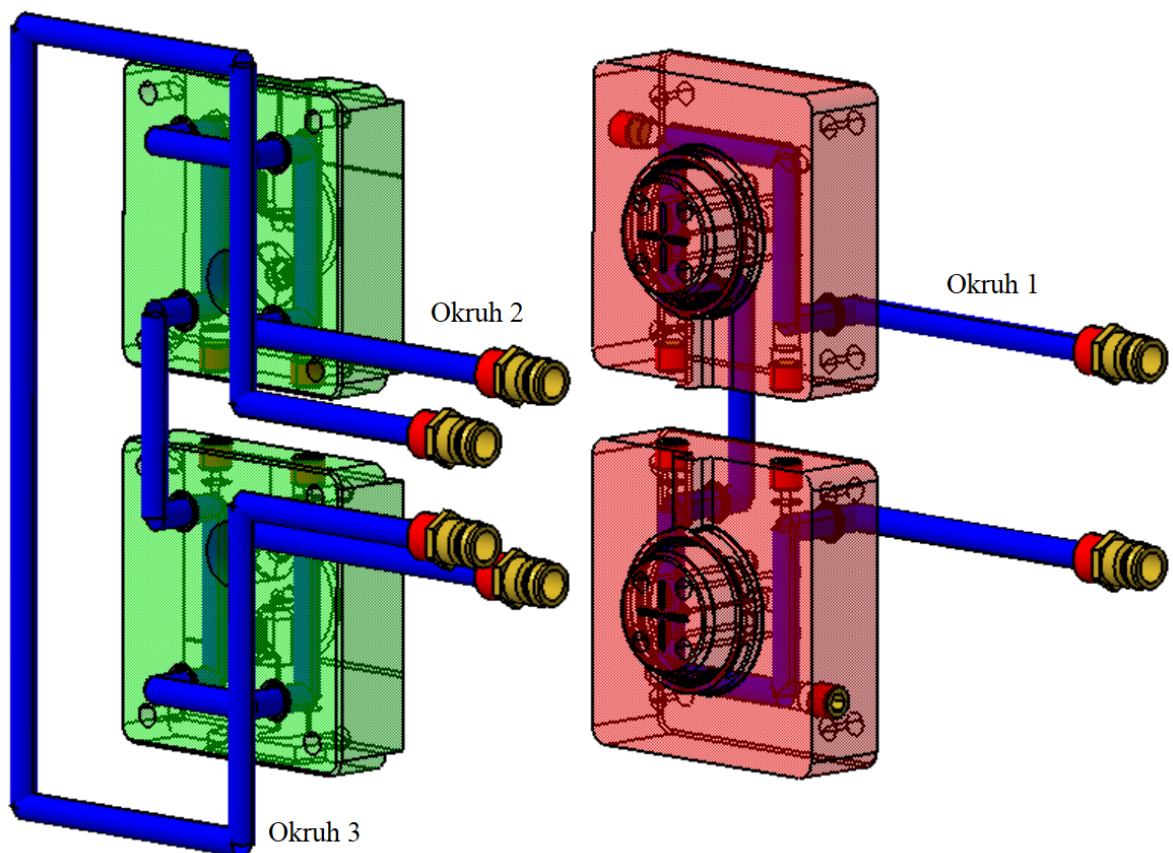
Obrázek 48 Vyhazovací systém

Jelikož součástí vyhazovacího systému nejsou vratné čepy, je nutné zajistit ochranu proti poškození jiným způsobem. Jako ochrana proti zavření formy s vysunutými vyhazovači slouží koncový spínač umístěný v upínací desce. Spínač se propojí pomocí konektoru se vstřikovacím strojem a systém nedovolí zavření formy, pokud jsou vyhazovače vysunuty.

9.5.6 Temperační systém

Temperační systém se skládá celkem ze 3 samostatných okruhů. Všechny kanály jsou vrtané a jejich průměr je 8 mm. Temperační kanály jsou dle doporučených hodnot umístěny co nejbližší dutiny vstřikovací formy ve vzdálenosti minimálně 8 mm. Vyráběná součást je tvarově velmi členitá a poměrně malá, proto je temperační systém navržen v souladu s vyrobiteľností součásti. Přechod kanálů z desek formy do tvarových vložek je utěsněn pomocí O-kroužků.

V levé polovině formy je pouze 1 temperační okruh (Okruh 1), který je ve tvarové desce a prochází skrze tvarové vložky. V pravé polovině formy jsou dva samostatné okruhy, kde okruh 1 je ve tvarové desce a prochází skrze tvarové vložky. Okruhy 1 a 2 mají funkci udržování konstantní teploty na povrchu dutiny formy. Okruh 3 je v rozvodné desce formy a slouží k odvodu přebytečného tepla vyzařujícího z vyhřívaného vtokového systému. Jelikož každý samostatný okruh potřebuje svoji temperační jednotku, Okruh 2 a 3 jsou propojeny hadicí a tvoří jeden okruh, kde temperační médium proudí nejprve v okruhu 2 a poté okruhu 3. Na obrázku 49 je zobrazen temperační systém vstřikovací formy.



Obrázek 49 Temperační systém

Vstupy a výstupy temperačního okruhu jsou řešeny pomocí hadicových přípojek, které jsou v desce upevněny pomocí závitů. Hadicové přípojky jsou zapuštěny v deskách formy, aby nedošlo při manipulaci k jejich poškození a nezvětšovali rozměry formy. Každá hadicová přípojka je označena štítkem, zda se jedná o vstup nebo výstup temperačního okruhu. Směr proudění temperačního média v kanálech je řešen pomocí záslepek a zátek se závitem. Na obrázku 50 jsou zobrazeny použité prvky temperačního systému.

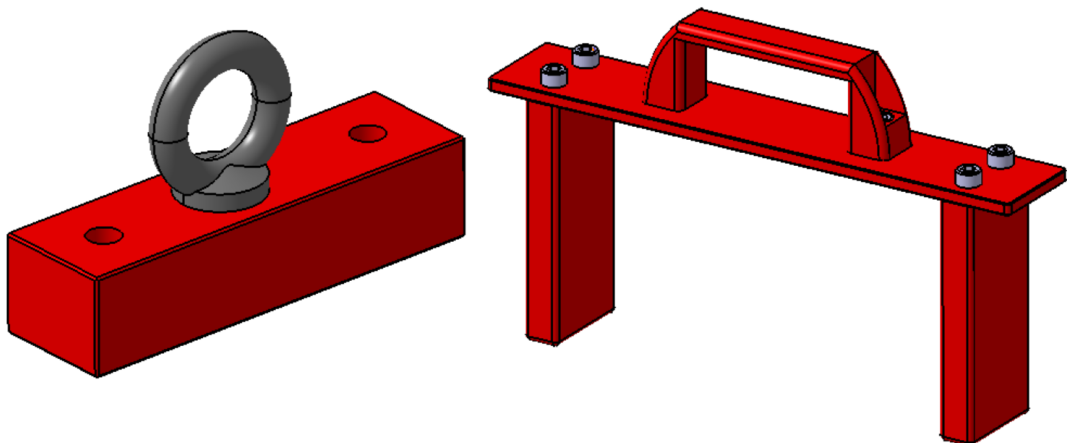


Obrázek 50 Prvky temperačního systému

Jako temperační médium je zvolena voda vyhřátá na teplotu 75 °C a rychlost proudění je nastavena na hodnotu 10 l/min.

9.5.7 Transportní prvky

Pro transport a manipulaci formy je v horní části transportní lišta se závěsným okem, která je k formě připevněna dvěma šrouby. Transportní lišta slouží zároveň jako zámek dělicí roviny. Pro zajištění polohy vyhazovacích desek při manipulaci s formou je k formě přidána zajišťovací deska. Všechny tyto komponenty jsou natřeny červenou barvou proto, aby je obsluha při výrobě nezapomněla odstranit. Na obrázku 51 jsou zobrazeny transportní prvky formy.



Obrázek 51 Transportní prvky

10 VOLBA VSTŘIKOVACÍHO STROJE

Volba vstřikovacího stroje vychází z výsledků analýzy vstřikovacího procesu. Objem potřebný pro naplnění dutin formy je z důvodu naddimenzování stroje zvětšen o 10 %, vstřikovací tlak o 10 % a uzavírací síla o 20 %. Zadané parametry a parametry zvoleného stroje jsou uvedeny v tabulce 7. Zvolený stroj je Arburg Allrounder 370 S–500–100 (25).

Tabulka 7 Parametry stroje

Parametr	Zadáno	Zvolený stroj
Uzavírací síla [t]	30	51
Vstřikovací tlak [MPa]	68,64	250
Celkový objem dávky [cm ³]	20,8626	31
Výška formy [mm]	399	min. 200 max. 600
Šířka formy [mm]	346	370
Délka formy [mm]	396	510
Vstřikovací jednotka [mm]	-	100
Průměr šneku [mm]	-	25
Průměr středícího kroužku [mm]	-	125

11 ANALÝZA VSTŘIKOVACÍHO PROCESU NAVRŽENÉ FORMY

Funkčnost navržené vstřikovací formy je odzkoušena v simulačním softwaru Moldflow Synergy 2016. Výsledky analýzy vstřikovacího procesu jsou rozděleny do 3 částí: výsledky plnění a dotlaku, teploty a deformací. Procesní parametry, nastavení a výsledky analýzy vstřikovacího procesu jsou rozebrány v následujících kapitolách.

11.1 Vytvoření sítě 3D modelu součásti

Prvotním krokem při nastavení analýzy vstřikovacího procesu je vytvoření 3D sítě navržené součásti. Součást je před vložením do simulačního softwaru zvětšena o výrobní smrštění uvedeného v materiálovém listu. Zvolený typ sítě je Dual Domain (2,5D síť), která se používá zejména pro výrobky s rovnoměrnou tloušťkou stěny, což navržený výrobek splňuje. Tento typ sítě je střední cestou v přesnosti výsledků, avšak pro ověření funkčnosti formy je zcela dostatečný. Správnost navržené sítě je zkontrolována skrze její parametry. Síť se statistikou sítě je zobrazena na obrázku 52.



Triangles			

Entity counts:			
Triangles			67034
Connected nodes			33505
Connectivity regions			1
Invisible triangles			0
Area:			
(Mold blocks and cooling channels are not included)			
Surface Area:			110.301 cm ²
Volume by element types:			
Triangle:			9.6113 cm ³
Aspect Ratio:			
	Maximum	Average	Minimum
	5.86	1.55	1.16
Edge details:			
Free edges			0
Manifold edges			100551
Non-manifold edges			0
Orientation details:			
Elements not oriented			0
Intersection details:			
Element intersections			0
Fully overlapping elements			0
Match percentage:			
Match percentage			89.4%
Reciprocal percentage			87.3%

Obrázek 52 Součást s navrženou sítí a její parametry

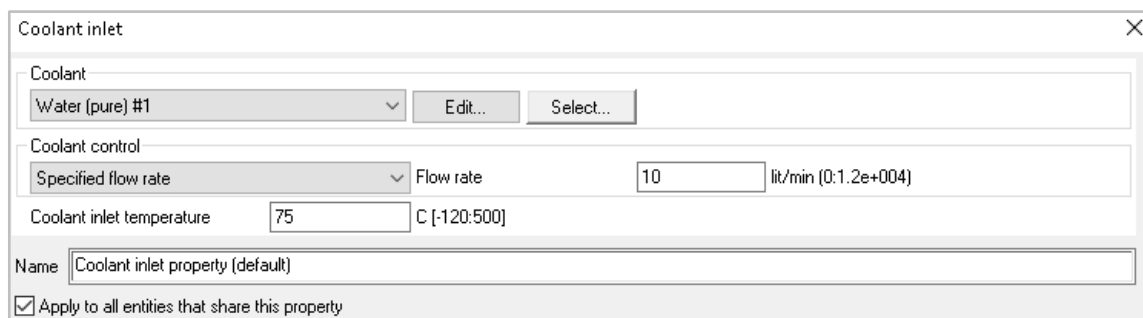
Přesnost výsledků analýzy vstřikovacího procesu je ve statistice sítě dána především procentuální hodnotou „Match percentage“. Tato hodnota je u zvolené sítě 89,4 %, což vede k velmi přesným výsledkům. Po vygenerování sítě navržené součásti následuje import

geometrie navrženého vtokového a temperačního systému. Vtokovému a temperačnímu systému jsou přiřazeny rozměrové parametry, které udávají průměry kanálů a posléze je u nich také vygenerovaná vhodná síť. Dalším krokem je označení míst vstupu polymerní taveniny a temperačního média.

11.2 Nastavení procesních parametrů

Po nastavení sítě navržené součásti, vtokového a temperačního systému přichází nastavení procesních parametrů analýzy. U kompletní analýzy, která zahrnuje plnění, dotlak, temperaci a deformace je zapotřebí nastavit hned několik parametrů.

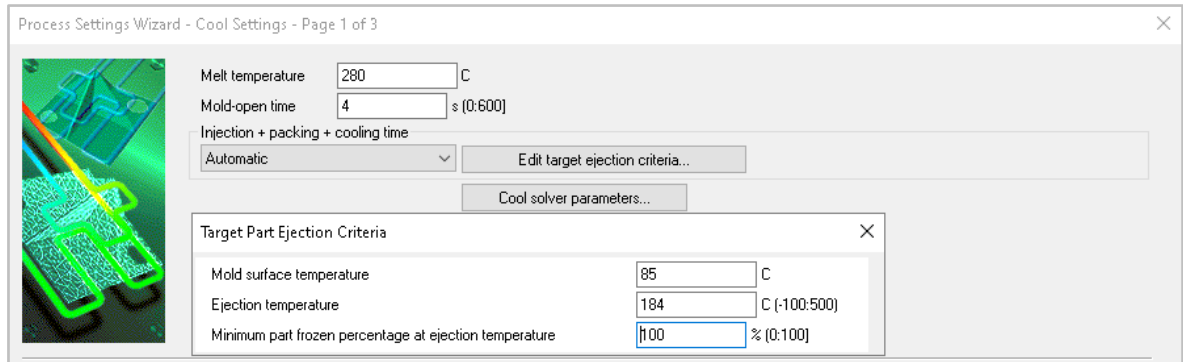
Prvním parametrem je zvolení vstřikovaného materiálu, který je Ultramid B3WG6 (viz. kapitola 8.3). Dalším parametrem je nastavení teploty vstřikovací formy. U navržené formy je zvolené temperační médium čistá voda, která je temperační jednotkou vyhřátá na 75 °C. Proudění temperačního média je nastaveno na hodnotu 10 l/min. Nastavené parametry teploty jsou zobrazeny na obrázku 53.



Obrázek 53 Parametry teploty formy

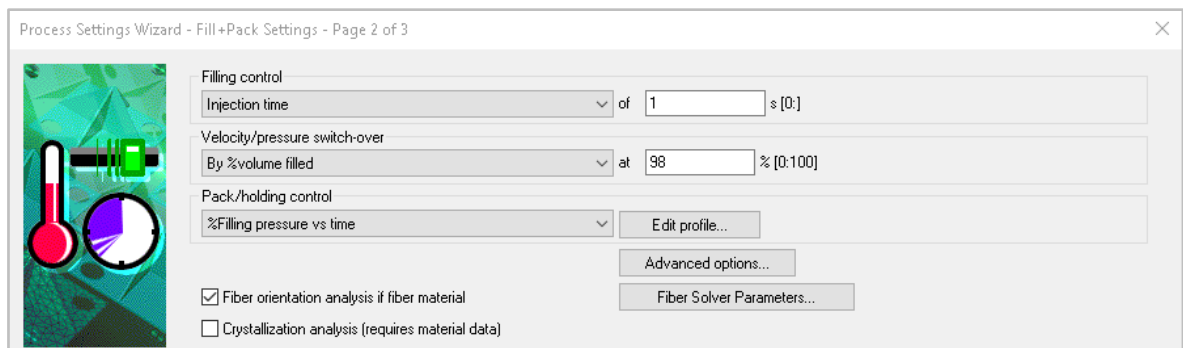
V další fázi nastavení procesních parametrů analýzy vstřikovacího procesu je kompletní nastavení parametrů týkajících se vstřikování, stroje a formy. Nastavené hodnoty jsou navrženy dle doporučených hodnot a praktických zkušeností. Detailnější nastavení je provedeno technologií a seřizovači až při samotné výrobě.

V prvním kroku nastavení procesních parametrů je nastavení teploty taveniny, které je 280 °C, čas otevření formy 4 s, teplota formy 85 °C, vyhazovací teplota 184 °C a minimální procento zatuhnutí taveniny v dutině formy před vyhozením 100 %. Nastavené parametry v softwaru Moldflow Synergy 2016 jsou zobrazeny na obrázku 54.



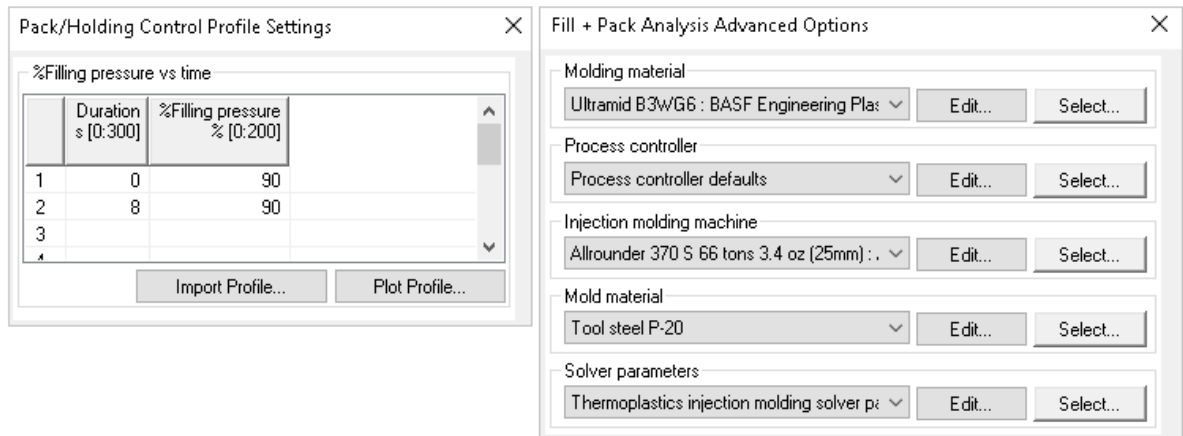
Obrázek 54 Procesní parametry 1

V další části nastavení procesních parametrů dochází k nastavení parametru, dle kterého dochází ke kontrole plnění dutiny formy. Kontrola plnění dutiny je dle vstřikovacího času, který je 1 s. Další položkou je nastavení parametru, dle kterého bude určen bod přepnutí vstřikovací fáze na fázi dotlakovou. Tento bod je určen procentuálním zaplnění dutiny formy, které je 98 %. Dotlak je řízen podle velikosti vstřikovacího tlaku a času. Součástí výpočtu je i orientace skelných vláken uvnitř vstřikované součásti. Nastavené parametry jsou zobrazeny na obrázku 55.



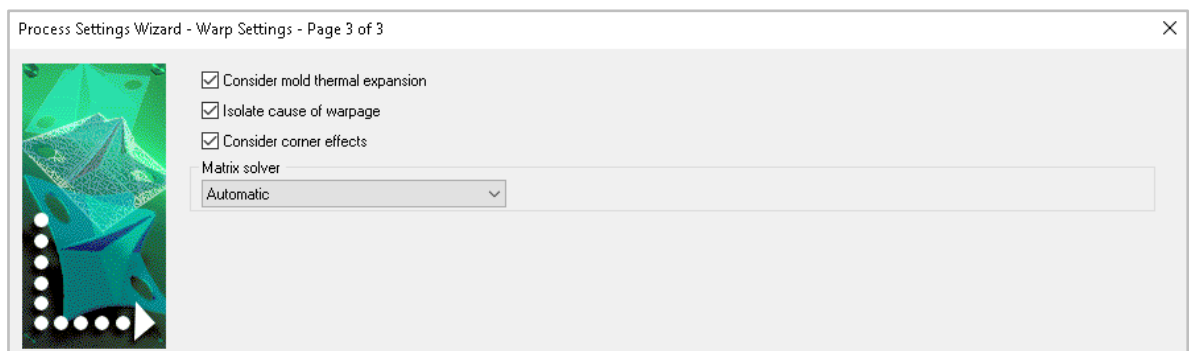
Obrázek 55 Procesní parametry 2

Dotlak působí po vstřikování 8 s a jeho velikost je dána jako 90 % vstřikovacího tlaku. Zvolený vstřikovací stroj je hydraulický stroj ARBURG Allrounder 370 S 66 tun 3,4 oz s průměrem šneku 25 mm. Pro analýzu je nastaven univerzální materiál formy P-20. Tyto údaje jsou zobrazeny na obrázku 56.



Obrázek 56 Procesní parametry 3

Poslední fází nastavení analýzy je zvolení parametrů výpočtu, kde je zahrnuta teplotní roztažnost formy, rozdělení vlivů deformace a rohové efekty. Toto nastavení je zobrazeno na obrázku 57.



Obrázek 57 procesní parametry 4

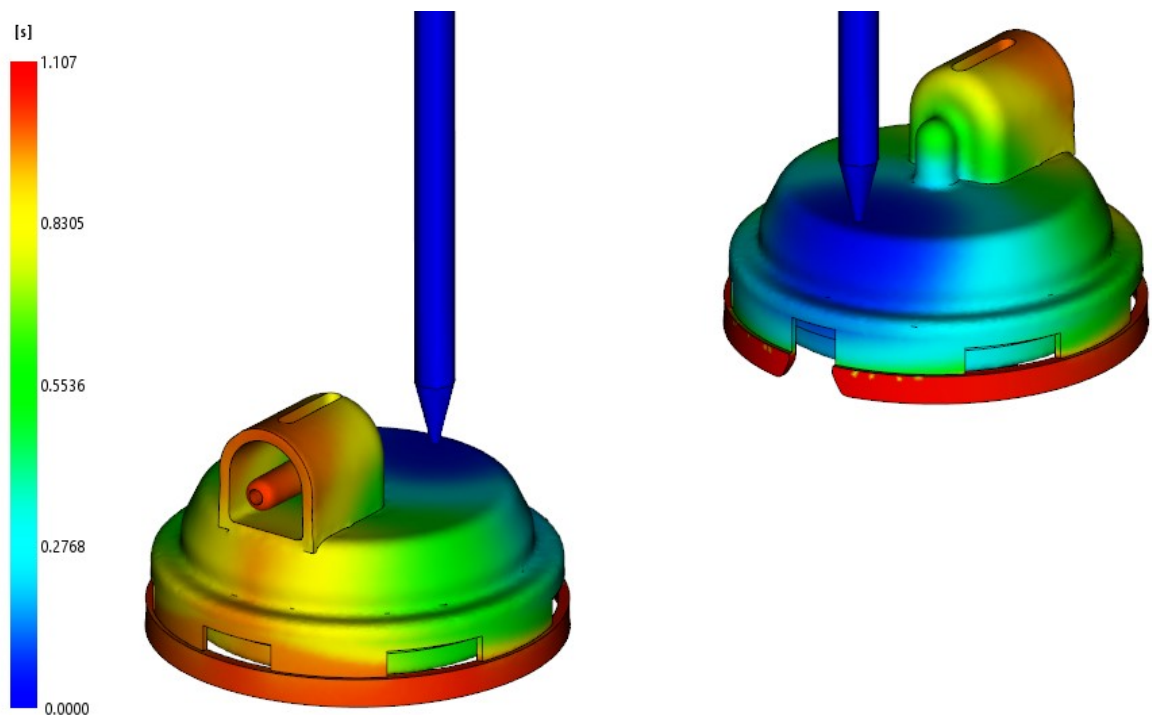
Pro možnost provedení výpočtu analýzy vstřikovacího procesu je ještě nutností nastavení velikosti bloku formy, který vyplívá z návrhu formy a je 396 x 346 x 399.

11.3 Výsledky analýzy plnění a dotlaku

V této podkapitole jsou podrobně popsány výsledky analýzy plnění a dotlaku jako: čas plnění dutiny formy, vstřikovací tlak v místě vtokového ústí, rychlost smykové deformace, uzavírací síla, čas pro dosažení vyhazovací teploty, vzduchové kapsy a propadliny.

11.3.1 Čas plnění (Fill time)

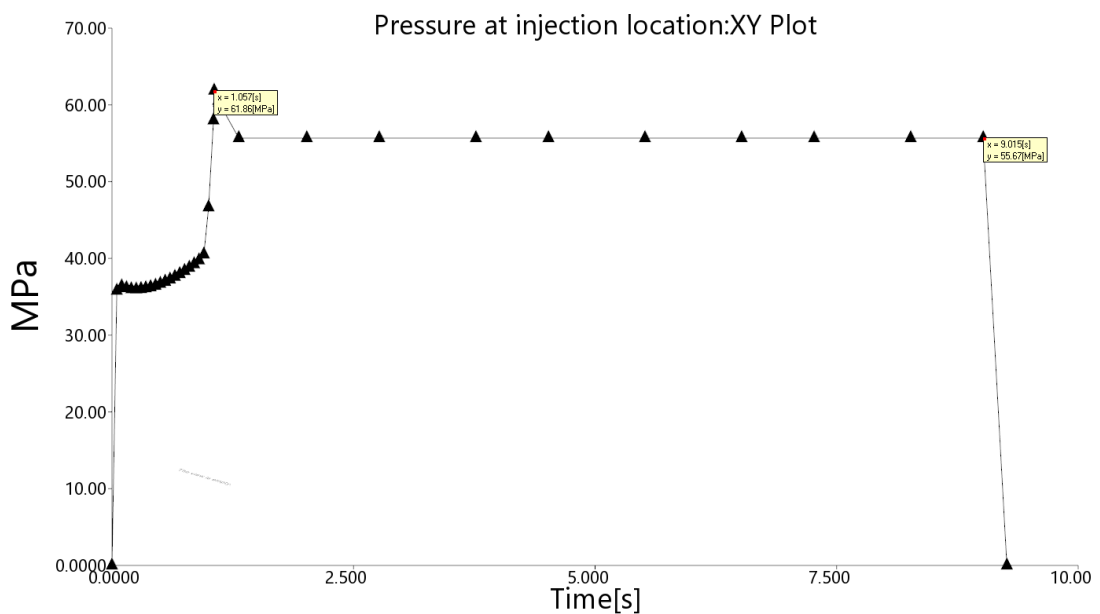
Výsledkem této analýzy je časový průběh zaplnění dutiny formy taveninou. Na obrázku 58 je zobrazena doba potřebná pro naplnění celé dutiny formy, což je 1,107 s. Červená místa na obrázku značí oblasti, které jsou při vstřikování zaplněny jako poslední. To jsou místa nejvíce vzdálená od vtokového ústí. Modrá barva naopak značí místa, která jsou zaplněna nejdříve. Díky použití vyhřívaného vtokového systému není zapotřebí před plněním dutiny formy zaplnit vtokový systém, a proto je proces plnění rychlejší. Z výsledku lze vyčíst, že celá dutina formy byla zaplněna, a plnění proběhlo v pořádku.



Obrázek 58 Čas plnění

11.3.2 Vstřikovací tlak v místě vtokového ústí (Pressure at injection location)

Tento výsledek zahrnuje graf závislosti vstřikovacího tlaku na době vstřikovacího cyklu v místě vtokového ústí. Z grafu na obrázku 59 lze vyčíst, jak tlak během vstřikování roste, a kdy byl přepnut na dotlak. Čas vstřikování taveniny byl nastaven na 1 s. Maximální hodnota vstřikovacího tlaku je 61,86 MPa v čase 1,057 s. V tomto okamžiku dochází k přepnutí na dotlakovou fázi, kde tlak činí 55,67 MPa po dobu 8 s. Po uplynutí doby 8 s po přepnutí na dotlakovou fázi je výstřik v místě vtokového ústí zatuhlý, tlak klesá na nulovou hodnotu a následuje proces chlazení. Maximální hodnota vstřikovacího tlaku je také důležitá pro kontrolu správnosti zvolení vstřikovacího stroje. Zvolený stroj dosahuje vstřikovacího tlaku až 250 MPa a vyhovuje.

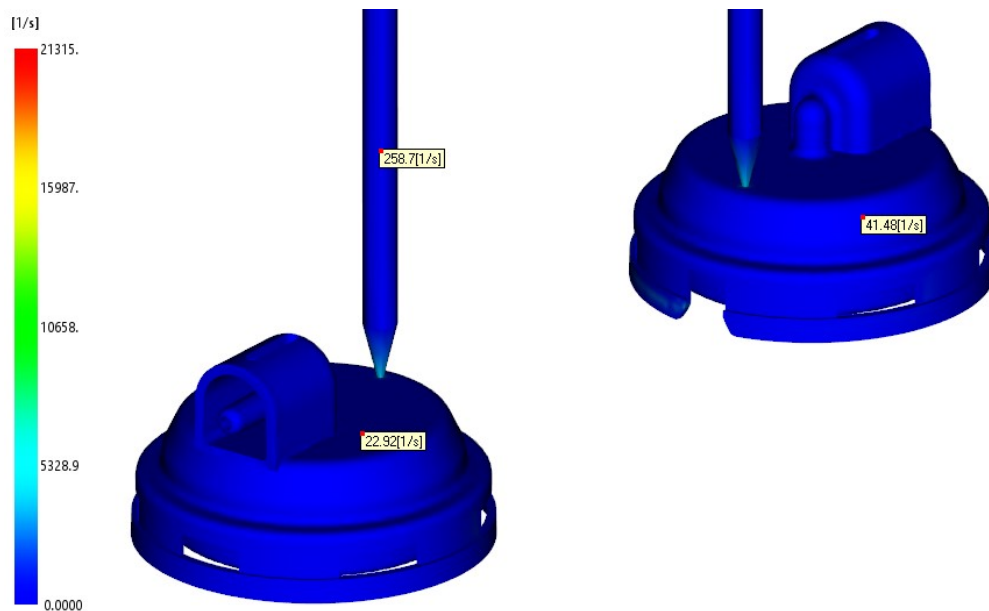


Obrázek 59 Vstřikovací tlak v místě vtokového ústí

11.3.3 Rychlost smykové deformace (Shear rate)

Rychlost smykové deformace je u vstřikování polymerů velmi důležitým parametrem. Každý materiál má mezní hodnotu rychlosti smykové deformace. Pokud je tato hodnota přesažena, dojde k degradaci polymeru a dojde ke vzniku povrchových vad na výstřiku a ztráty některých vlastností. Nejvyšší hodnota rychlosti smykové deformace nabývá v místech s úzkým průtokem, kde tavenina musí rapidně zrychlit. Takové místo je nejčastěji vtokové ústí. Materiál Ultramid B3WG6 má maximální dovolenou hodnotu rychlosti smykové deformace 60000 s^{-1} . Z obrázku 60 lze vyčíst, že maximální dosažená hodnota

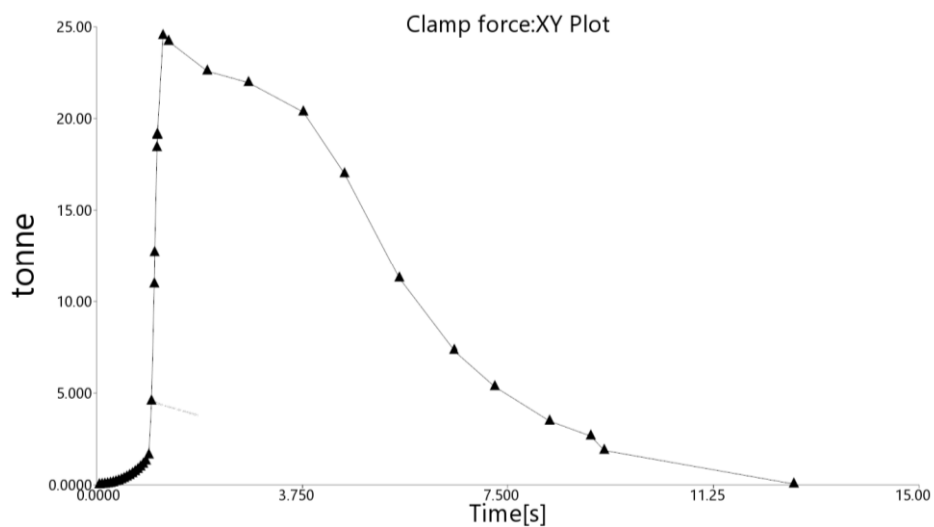
rychlosti smykové deformace u vypočtené analýzy je 21315 s^{-1} , což je daleko pod mezní hodnotou a výsledek vyhovuje.



Obrázek 60 Rychlost smykové deformace

11.3.4 Uzavírací síla (Clamp force)

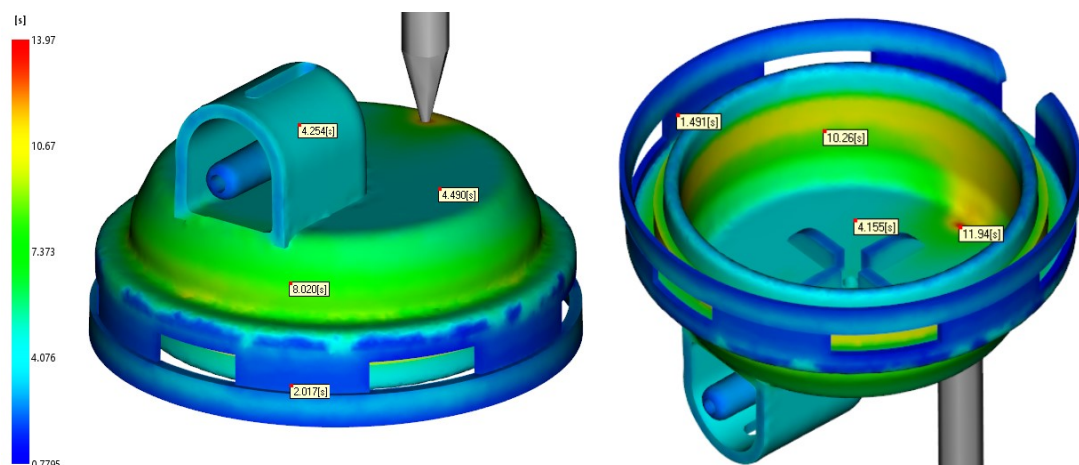
Tento výsledek ukazuje maximální uzavírací sílu potřebnou při procesu vstřikování. Tato hodnota je důležitá z hlediska kontroly, vhodnosti navrženého vstřikovacího stroje. Maximální dosažená hodnota uzavírací síly je 24,52 tun. Zvolený stroj dokáže vyvinout uzavírací sílu až 51 tun, a proto nehrozí pootevření formy během vstřikování. Na obrázku 61 je zobrazen průběh uzavírací síly během procesu vstřikování.



Obrázek 61 Uzavírací síla

11.3.5 Čas dosažení vyhazovací teploty (Time to reach ejection temperature)

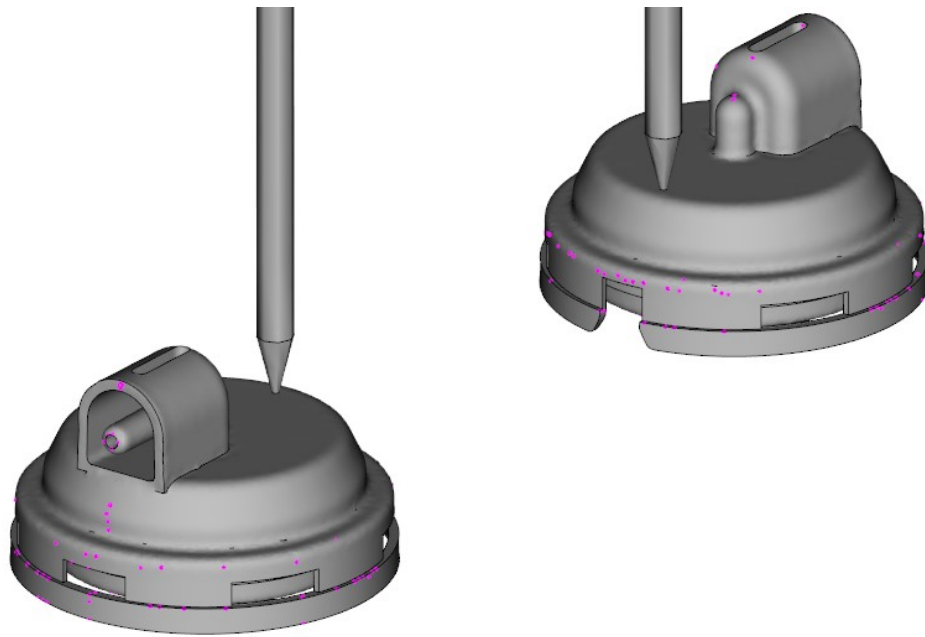
Při vstřikování je jeden z nejdůležitějších parametrů délka celého vstřikovacího cyklu. Tato hodnota udává celkovou rychlost výroby. Jelikož je ochlazování polymeru uvnitř dutiny formy nejdelší fází vstřikovacího cyklu, je žádoucí tuto hodnotu co nejvíce snížit. Vyhazovací teplota materiálu Ultramid B3WG6 je dle materiálového listu 184 °C. Pokud má být celých 100 % výstřiku ochlazeno na vyhazovací teplotu, doba k tomu potřebná je 13,97 s. Není podmínkou, že výstřik musí dosahovat při vyhození ve všech místech této teploty. Důležité jsou místa, kde dochází ke styku s vyhazovači. V těchto místech je výstřik ochlazen na vyhazovací teplotu už při zhruba 4,5 s. Vyhození výstřiku by dle zkušeností mohlo být například při 8 s a celý vstřikovací cyklus by mohl trvat zhruba do 15 s. Na obrázku 62 lze vidět výsledek analýzy času potřebného k dosažení vyhazovací teploty na celém výstřiku. Červená barva značí místa s nejdelším časem a modrá naopak.



Obrázek 62 Čas dosažení vyhazovací teploty

11.3.6 Vzduchové kapsy (Air traps)

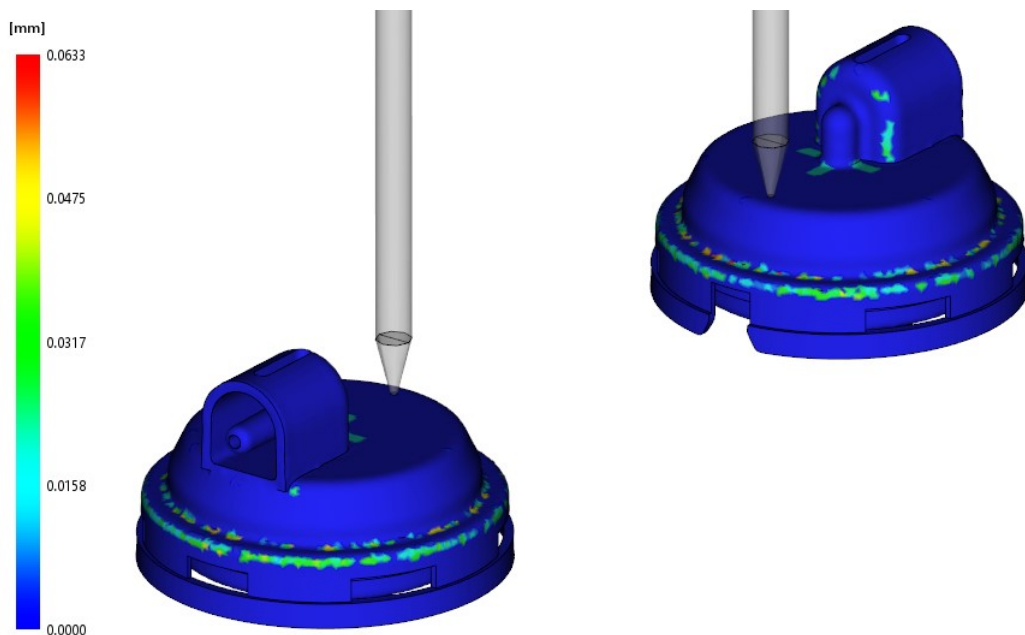
Výsledkem této analýzy je nalezení míst s největší pravděpodobností výskytu vzduchových kapes. Tyto kapsy mohou způsobovat optické vady, nedotečení materiálu nebo tzv. dieselův efekt, kdy vzduch nemá kam uniknout, je stlačován, jeho teplota roste a dochází ke spálení polymeru. Na obrázku 63 lze vidět místa s největší pravděpodobností výskytu vzduchových kapes. Jelikož je výrobek poměrně členitý a jeho zaformování je provedeno pomocí celkem 3 posuvných čelistí s výměnnými trny, dochází v těchto místech zároveň i k odvzdušnění. Pokud by toto odvzdušnění nestačilo, bylo by zapotřebí dodělat do tvarových vložek odvzdušňovací kanály.



Obrázek 63 Vzduchové kapsy

11.3.7 Propadliny (Sink marks)

Jak již bylo popsáno v teoretické části, propadliny se tvoří v místech s větší tloušťkou stěn, zesílených oblastí nebo napojení žeber. Na obrázku 64 lze vidět, právě místa s větším množstvím materiálu a místa žeber. V těchto místech se tvoří propadliny, které jsou znázorněny na obrázku pomocí barev. Maximální hodnota propadlin u výstřiku je pouze 0,06 mm což, je zanedbatelné.



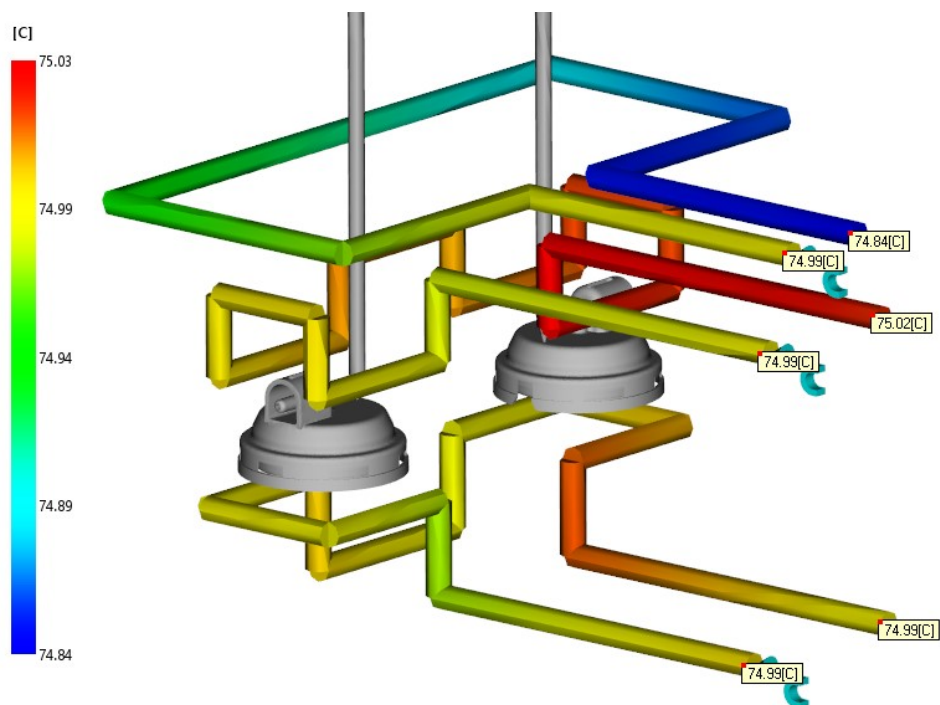
Obrázek 64 Propadliny

11.4 Výsledky analýzy teploty

V této podkapitole jsou podrobně popsány výsledky analýzy týkající se teploty a chlazení jako: teplota média v temperačním okruhu, průtok média v temperačním okruhu, tlak v temperačním okruhu, reynoldsovo číslo, účinnost temperačního okruhu a teplota dutiny formy. Vstřikovací forma obsahuje celkem 3 samostatné temperační okruhy, z nichž je na obrázcích spodní okruh č. 1, prostřední č.2 a horní č. 3.

11.4.1 Teplota média v temperačním okruhu (Circuit coolant temperature)

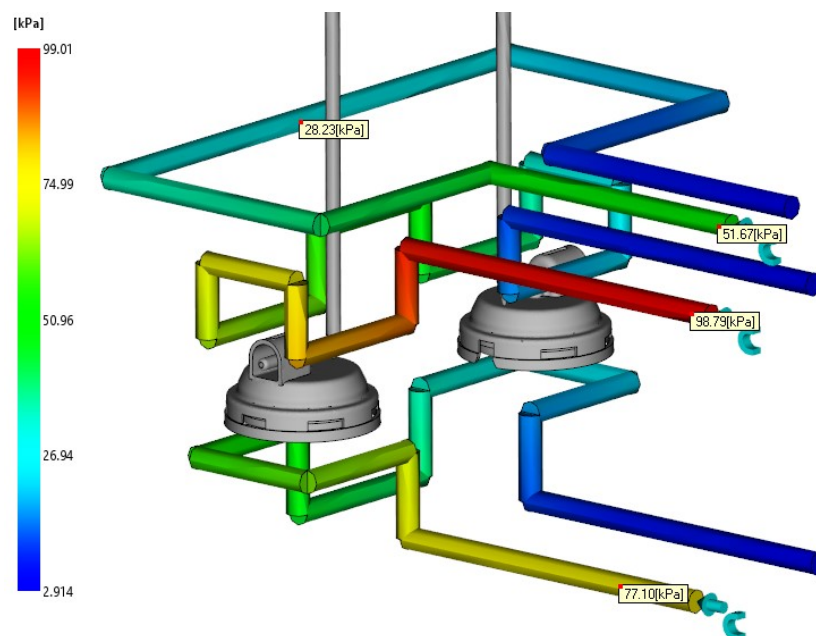
Tento výsledek zobrazuje změnu teploty temperačního média při průchodu v jednotlivých temperačních okruzích. Rozdíl teploty temperačního média mezi vstupem a výstupem by neměl přesahovat hodnotu 3 °C. Na vstupech temperačních okruhů má médium vždy stejnou nastavenou hodnotu 75 °C a mění se ohříváním od vstřikovací formy. Ve všech okruzích je rozdíl mezi vstupní a výstupní teplotou zanedbatelný. Výsledek ukazuje, že ve třetím okruhu dochází prouděním média temperačním kanálem naopak k jeho ochlazení. Takto navržený temperační systém je chybný, avšak zde je použit pro odvod možného přebytečného tepla z vyhřívaného vtokového systému, se kterým software přesně nepočítá. Na obrázku 65 je graficky zobrazena teplota temperačního média v temperačních okruzích.



Obrázek 65 Teplota média v temperačním okruhu

11.4.2 Tlak v temperačním okruhu (Circuit pressure)

Dalším výsledkem je tlak uvnitř temperačních okruhů. Při návrhu temperačních kanálů je podstatné, aby v žádném místě kanálu nebyl nulový tlak. Pokud by tomu tak bylo, nedocházelo by ke správnému proudění temperačního média a tvořili by se tzv. „mrtvá místa“. Maximální tlak v temperačních okruzích je nejvyšší v místech vstupu temperačního média a tato hodnota dosahuje až 99,01 kPa. Při proudění média temperačními kanály dochází ke tlakovému spádu, který je způsoben složitou geometrií kanálů. I když je tlakový spád v temperačních okruzích poměrně vysoký a tlak klesá až na hodnotu 2,914 kPa, navržený temperační systém vyhovuje. Na obrázku 66 je graficky zobrazen tlak v navržených temperačních okruzích.



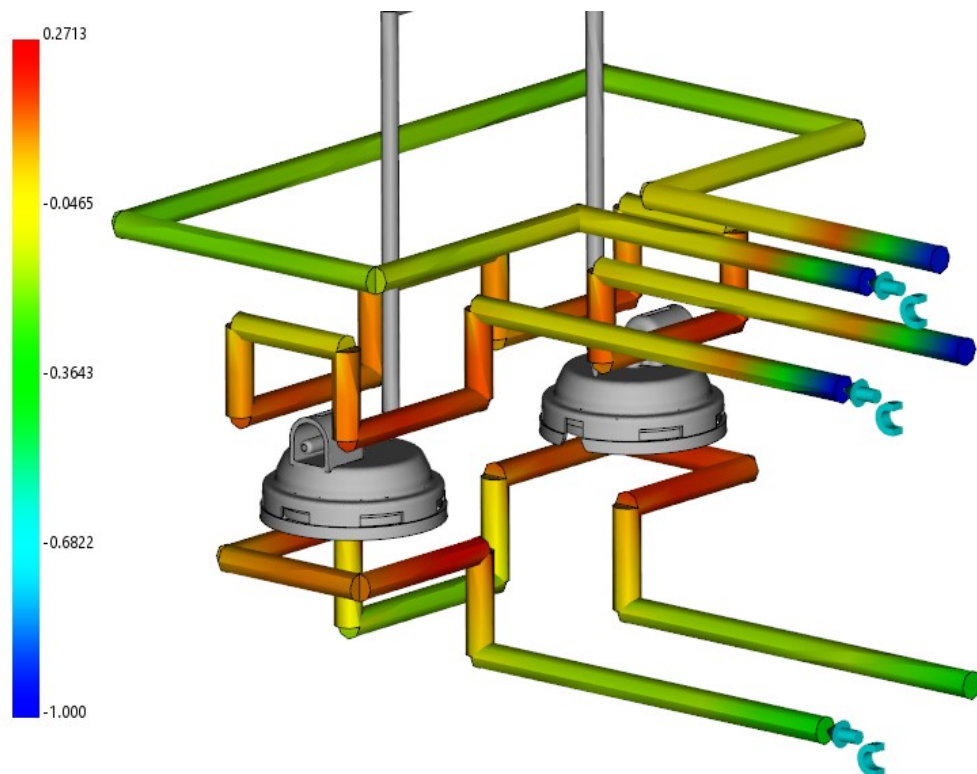
Obrázek 66 Tlak v temperačním okruhu

11.4.3 Reynoldsovo číslo (Circuit Reynolds number)

Z důvodu konstantního průměru temperačních kanálů a konstantní hodnoty proudění 10 l/min je i hodnota Reynoldsova čísla konstantní a dosahuje hodnoty 70091. Podmínkou je, aby Reynoldsovo číslo dosahovalo minimálně hodnoty 10000, což je hraniční hodnota turbulentního proudění. Tato hodnota je mnohanásobně překročena a navržený temperační systém vyhovuje.

11.4.4 Účinnost temperačního systému (Circuit heat removal efficiency)

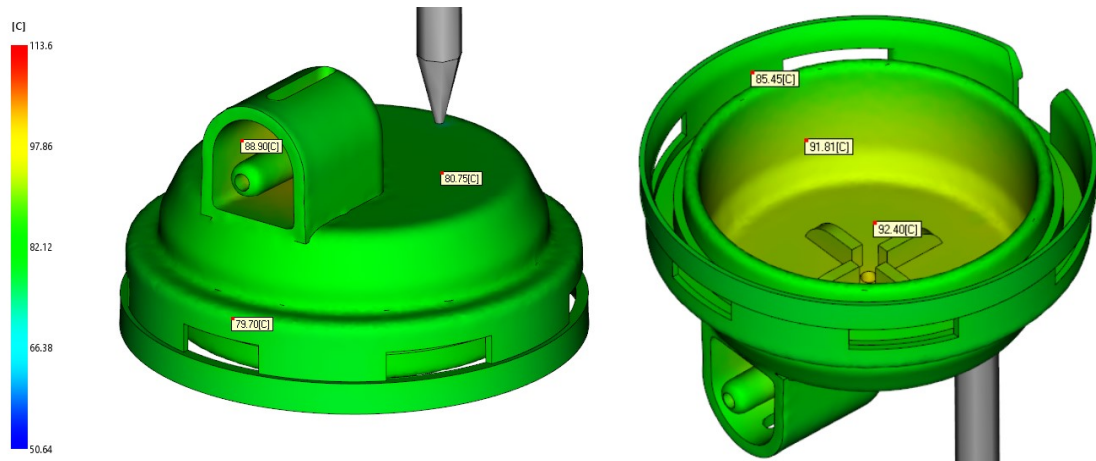
Tento výsledek zobrazuje účinnost temperačního systému. Účinnost vychází z množství odvedeného tepla z dutiny formy pomocí temperačního média. Na obrázku 67 lze vidět, že neúčinnější je temperační systém v těsné blízkosti dutiny formy. Neúčinnější místa jsou zvýrazněna červenou barvou a maximální dosažená účinnost temperačního systému je 0,27. Tato hodnota není příliš vysoká, ale z důvodu konstrukce součásti a formy nebylo možné temperační systém upravit a takto navržený temperační systém je nejlepší možnou variantou.



Obrázek 67 Účinnost temperačního systému

11.4.5 Teplota dutiny formy (Temperature mold)

Teplota dutiny formy je důležitá pro správný průběh vstřikovacího cyklu. Požadovaná hodnota teploty dutiny formy je 85 °C. Ideálně by měla mít celá dutina formy stejnou teplotu. Příliš velké rozdíly teplot mohou způsobit prodloužení vstřikovacího cyklu nebo nežádoucí deformace. Na obrázku 68 je zobrazen pohled na dutinu formy se zvýrazněnými hodnotami teplot. Rozdíly teplot dutiny formy jsou v rozmezí zhruba 10 °C, což je vyhovující. V místě styku dvou trnů je hodnota teploty formy až 113,6 °C. Tuto hodnotu však nelze korigovat temperačním systémem ani jiným způsobem.



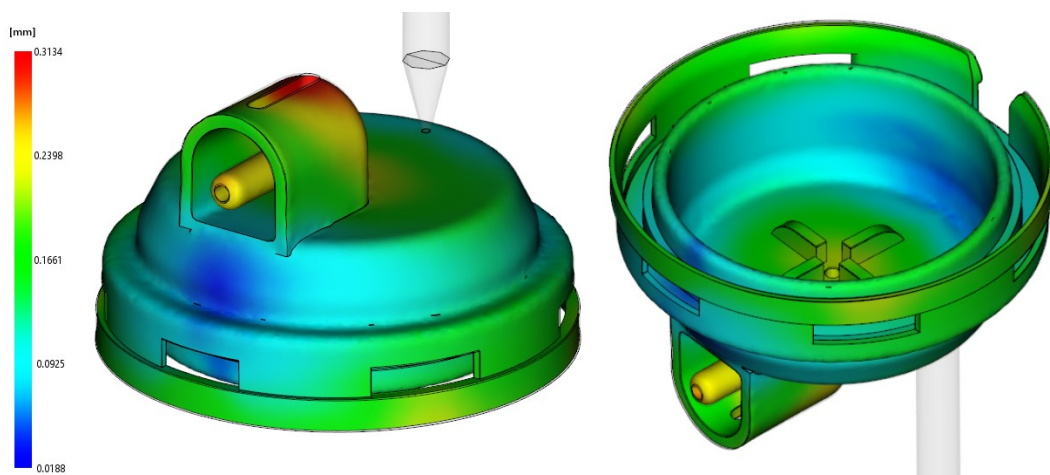
Obrázek 68 Teplota dutiny formy

11.5 Výsledky analýz smrštění a deformace

V této podkapitole je podrobně popsán výsledek analýzy smrštění a deformace od všech vlivů.

11.5.1 Celková deformace od všech vlivů (Deflection, all effects deflection)

Tento výsledek zobrazuje celkové deformace způsobené vlivem smrštění, orientací plniv a chlazením na vstřikované součásti. Červenou barvou jsou zobrazeny místa, kde dojde k největší deformaci a to 0,3134 mm. Tato deformace však nemá na funkčnost výrobku žádný vliv. Deformaci součásti je při návrhu formy nutné přezkoumat. Změna tvaru vstřikované součásti totiž může mít vliv na jeho funkčnost nebo vzhled. Největší podíl na deformaci součásti má nerovnoměrná tloušťka součásti a její smrštění. Tomuto smrštění je předejito zvětšením dutiny formy oproti finálnímu produktu.



Obrázek 69 Celková deformace výstřiku

12 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Provedené analýzy hrají roli jak při návrhu vstřikovací formy, tak i při ověření její funkčnosti. Prvním zmínkou výsledků analýz je volba vtokového systému a místa vtokového ústí. V práci se rozhoduje mezi výběrem studeného a vyhřívaného VS. Podrobněji je tento výběr popsán v kapitole 9.2 a 9.3. Při porovnání těchto VS bylo dosaženo výsledků, kde při času plnění 1 s je rozdíl ve vstřikovacím tlaku a uzavírací síle zanedbatelný. Velké rozdíly však přicházejí v čase ochlazení na vyhazovací teplotu, kde délka ochlazení 100 % součásti u studeného VS je 31,79 s a u vyhřívaného VS je 13,31 s. Vyhazovací teplota v místě vyhazovačů je u obou variant asi 4,5 s. U studeného VS však není možné v tomto čase výstřik odformovat, kvůli nedostatečnému ochlazení vtokového systému. Dalším rozdílným parametrem je maximální rychlost smykové deformace, kde byla u studeného VS překročena kritická hodnota. Největší roli při výběru VS však hrála spotřeba materiálu, kde hmotnost výstřiku u vyhřívaného VS je 26 g a u studeného VS 34 g. Tento rozdíl je při průměrné ceně materiálu 3 eur markantní a návrat investic na vyhřívaný VS je pouze 8 dní nepřetržitého provozu. Z těchto důvodů byl pro vstřikovací formu vybrán vyhřívaný VS.

Ověření funkčnosti formy je provedeno pomocí analýzy v kapitole 11. Při zvolených procesních parametrech vyšly hodnoty uvedené v tabulce 8.

Tabulka 8 Výsledky analýz

Parametr	Jednotka	Hodnota
Čas plnění	s	1,107
Vstřikovací tlak v místě vtok. ústí	Mpa	61,86
Max. rychlost smykové deformace	1/s	21315
Uzavírací síla	t	24,52
Čas dosažení vyhazovací teploty u 100 % součásti	s	13,97
Max. rozdíl teplot na vstupu a výstupu temp. kanálů	°C	0,15
Max. tlak v temperačním okruhu	kPa	99,01
Reynoldsovo číslo		70091
Maximální deformace na vstřikované součásti	mm	0,3134

Všechny výsledky odpovídají optimálním hodnotám a vstřikovací forma i procesní parametry jsou navrženy správně.

ZÁVĚR

Výsledkem této diplomové práce je návrh vstřikovací formy pro výrobu dílu motoru automobilu včetně simulace funkčnosti. Diplomová práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část.

Teoretická část diplomové práce je zaměřena na přehled polymerních materiálů, jejich využití, princip metody vstřikování, zásady při návrhu součástí pro metodu vstřikování a konstrukci vstřikovacích forem.

Praktická část diplomové práce je rozdělena na 3 části. První částí je vytvoření 3D modelu vyráběné součásti, dle obecných pravidel, jejíž rozměry jsou odměřeny z fyzického výrobku. Vyráběná součást je víčko nádoby podtlaku, která je součástí motoru automobilu. Materiál zvolený pro vyráběnou součást je Polyamid plněný sklem s označením Ultramid B3WG6. U součásti byla provedena analýza vhodnosti umístění vtokového ústí a porovnání ekonomické náročnosti studeného a vyhřívaného vtokového systému. Investice na vyhřívaný vtokový systém se vrátí zhruba za 8 dní. Při násobnosti formy 2 byl vybrán vyhřívaný vtokový systém. Druhá část se zabývá samotným návrhem vstřikovací formy. Desky vstřikovací formy a mnoho dalších normalizovaných dílů bylo pro usnadnění výroby použito z knihoven společnosti Meusburger. Zaformování jednoho výstřiku je provedeno pomocí 2 tvarových vložek a 3 posuvných čelistí, které jsou ovládány pomocí šikmých kolíků. Jelikož vede skrze vyráběnou součást průchozí otvor, ve tvarové vložce a posuvné čelisti jsou zasazeny výměnné trny, které umožňují snazší údržbu a výrobu. Posuv posuvných čelistí je veden skrze vodící lišty a desky s mazacími drážkami. Vstřikovací forma obsahuje celkem 3 samostatné temperační okruhy, které temperují formu na teplotu 80 °C. Temperačním médiem je čistá voda. Vyhazovací desky jsou osazeny celkem 8 mi válcovými vyhazovači. Poslední částí je ověření funkčnosti formy pomocí simulace vstřikovacího procesu a navržení vhodných procesních parametrů. Rozměry formy jsou navrženy co nejmenší možné, aby mohla být použita na co nejširší škále strojů. Zvolený vstřikovací stroj je ARBURG 370 S. V diplomové práci jsou popsány některé výsledky analýzy týkající se plnění, dotlaku, teploty a celkových deformací vyráběné součásti. Všechny výsledky analýz vyšly v normě a forma je funkční.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PLASTICSEUROPE, Plastics – the Facts 2020 – An analysis of European plastics production, demand and waste data. *Plasticseurope.org*. [online] Brussels, 2020. [cit. 2021-02-15].
Dostupné z: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/4312-plastics-facts-2020>
- [2] CANEVAROLO, Sebastião V. Jr. *Polymer science: a textbook for engineers and technologists*. 2020. Mnichov: Hanser Publications. ISBN 978-1-56990-726-9.
- [3] DYNISCO, Understanding Plastics and Polymers. *Azom.com*. [online] 2019. [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=17477>
- [4] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 1., [online]. 2006. [cit. 2021-02-28] Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. ISBN 80-7080-617-6. Dostupné z http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-617-6/pages-img/001.html
- [5] VALERO, José R. Lerma. *Plastics Injection Molding Scientific Molding, Recommendations, and Best Practices*. 2020. Mnichov: Hanser Publications. ISBN 978-1-56990-690-3.
- [6] OSSWALD, Tim A. a Georg MENGES. *Materials Science of Polymers for Engineers*. 2012. Mnichov: Hanser Publications. ISBN 978-1-56990-514-2.
- [7] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. 2016. [cit. 2021-02-20]. Code Creator, s.r.o. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z WWW: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [8] STRITZKE, Bernie. *Custom molding of thermoset elastomers: a comprehensive approach to materials, mold design, and processing*. 2009. Mnichov: Hanser Publications. ISBN 978-1-56990-467-1.
- [9] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů, teorie a praxe*. 2018. Praha: Grada Publishing. ISBN 978-80-271-0614-1.
- [10] AGASSANT, Jean-François et al. *Polymer Processing 2E: Principles and Modeling*. 2017. Mnichov: Hanser Publications. ISBN 978-1-56990-606-4.
- [11] ZHOU, Huamin. *Computer Modeling for Injection Molding: Simulation, Optimization, and Control*. 2013. New Jersey: John Wiley. ISBN 978-0-470-60299-7.

- [12] WANG, Maw-Ling, Rong-Yeu CHANG a Chia-Hsiang (David) HSU. *Molding Simulation: Theory and Practice*. 2018. Mnichov: Hanser Publications. ISBN 978-1-56990-620-0.
- [13] AMBROGI, Veronica et al. Additives in Polymers. *Modification of Polymer Properties* [online]. 2016. *Plastics Design Library*, s. 87-108 [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/309055045_Additives_in_Polymers
- [14] OSSWALD, Tim A. *Understanding Polymer Processing: Processes and Governing Equations*. 2017. Mnichov: Hanser Publications. ISBN 978-1-56990-647-7.
- [15] KHEMKA, Priyanka, *Plastics in the Automotive Industry – Which Materials Will Be the Winners and Losers*. *nexant.com*. [online] 2019. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://www.nexant.com/resources/plastics-automotive-industry-which-materials-will-be-winners-and-losers>
- [16] ŠTRUMBERGER, Nada et al. *Polymeric Materials in Automobiles* [online]. Zagreb: Promet, 149-160 [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/298685046_Polymeric_Materials_in_Automobiles
- [17] DOBROŇ, Martin. *Plasty v automobilovém průmyslu*. *Mmspektrum.com* [online] 2013. [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/cla-nek/plasty-v-automobilovem-prumyslu.html>
- [18] ROWE, Jason. *Advanced Materials in Automotive Engineering*. 2012. Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing. ISBN 978-1-84569-561-3.
- [19] CAMPO, E. Alfredo. *The complete part design handbook for injection molding of thermoplastics*. 2006. Mnichov: Hanser Publications. ISBN 1-56990-375-1.
- [20] WIESE, Mathias, Christoph HERMANN a Sebastian THIEDE. Rapid manufacturing of automotive polymer series parts: A systematic review of processes, materials and challenges. *Additive Manufacturing* [online]. [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/344226316_Rapid_manufacturing_of_automotive_polymer_series_parts_A_systematic_review_of_processes_materials_and_challenges

- [21] GOODSHIP, Vanessa. *ARBURG Practical Guide to Injection Moulding, 2nd Edition*. 2017. Shawbury UK: Smithers Rapra. ISBN 978-1-91024-294-0.
- [22] KUTZ, Myer. *Applied Plastics Engineering Handbook. Processing, Materials, and Applications*. 2016. Oxford: Plastics Design Library. ISBN 978-0-323-39040-8.
- [23] Internetové stránky firmy ARBURG: www.arburg.com [cit. 2021-02-25]
- [24] SEIDL, Martin. *Stroje pro zpracování polymerních materiálů* [online]. 2016. [2021-02-26]. Code Creator, s.r.o. ISBN 978-80-88058-71-7. Dostupné z <https://publi.cz/books/181/Cover.html>
- [25] SVOBODA, Rostislav. *Stroje na vstřikování plastů? Pomůžeme vám vyznat se v nich.* factoryautomation.cz [online] 2017. [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/stroje-na-vstrikovani-plastu-pomuzeme-vam-vyznat-se-v-nich/>
- [26] DAYA. *How to check the technical parameters of injection molding machine.* [dayamachinery.com](http://www.dayamachinery.com) [online] 2019. [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: <http://www.dayamachinery.com/how-to-check-the-technical-parameters-of-injection-molding-machine/>
- [27] CRAWFORD, R. J a P. J MARTIN. *Plastics engineering*. 2020. Oxford: Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0-08-100709-9.
- [28] BOBČÍK, Ladislav. *Formy pro zpracování plastů: I. Díl-Vstřikování termoplastů*. 1. vydání. Brno: Uniplast, 1999.
- [29] PRUNER, Harry a Wolfgang NESCH. *Understanding Injection Molds*. 2020. Mnichov: Hanser Publications. ISBN 978-1-56990-527-2.
- [30] KAZMER, David O. *Injection Mold Design Engineering*. 2016. Mnichov: Hanser Publications. ISBN 978-1-56990-571-5.
- [31] DANGEL, Rainer. *Injection Molds for Beginners*. 2020. Mnichov: Hanser Publications. ISBN 978-1-56990-819-8.
- [32] BOBEK, Jiří. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů* [online]. 2014. [2021-02-27]. Code Creator, s.r.o. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné z <https://publi.cz/books/179/Cover.html>
- [33] BOBČÍK, Ladislav. *Formy pro zpracování plastů: II. Díl-Vstřikování termoplastů*. 1. vydání. Brno: Uniplast, 1999.

- [34] SHOEMAKER, Jay. *Moldflow Design Guide: 'A Resource for Plastics Engineers*. 2006. Mnichov: Hanser Publications. ISBN 978-3-446-41854-7.
- [35] HALAŠKA, Petr. Snižování výrobních nákladů pomocí simulační analýzy. *mmspektrum.com* [online] 2010. [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/snizovani-vyrobnich-nakladu-pomoci-simulacni-analyzy>
- [36] AUTODESK Help. Mesh types. *knowledge.autodesk.com* [online] 2018. [cit. 2021-03-06]. Dostupné z: <https://knowledge.autodesk.com/support/moldflow-insight/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/MoldflowInsight-Modelprep/files/GUID-4B1EA908-C18E-44E3-9BD9-14FE7F160291-htm.html>
- [37] CATIA Řešení pro 3D modelování. *dytron.cz* [online]. [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: https://www.dytron.cz/products/catia/?gclid=Cj0KCQjwPdQDBhCSARIsAEUJ0hNZBKyy4ZvMIWjdMHxpG8RJsvfKUQL_t7HREy3DB5KrU4GWI-95IYUaAgrhEALw_wcB
- [38] VDI 3400 VS SPI Finish Surface. *Upmold.com* [online]. [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://upmold.com/vdi-3400-vs-spi-finish-surface-roughness-comparison/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

LDPE	Nízko hustotní polyethylen
HDPE	Vysoko hustotní polyethylen
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
PVC	Polyvinylchlorid
PET	Polyethyltereftalát
ABS	Akrylonitril butadien styrén
SAN	Styrén akrylonitril
PMMA	Polymethylmethakrylát
PA	Polyamid
PC	Polykarbonát
PUR	Polyuretan
PAN	Polyakrylonitril
PPS	Polyfenylénsulfid
PEI	Polyéterimid
PEEK	Polyétereterketon
PI	Polyimid
TPE	Termoplastický elastomer
TPU	Termoplastický polyuretanový elastomer
POM	Polyoxymetylén
C	Uhlík
H	Vodík
O	Kyslík

Zkratky použitých veličin

T_g	Teplota skelného přechodu
T_f	Teplota tečení
T_m	Teplota tání

Použité jednotky

°C	stupeň Celsia
mm	milimetr
kg	kilogram
g	gram
s	sekunda
min	minuta
hod	hodina
%	procento
eur	euro
t	tuna
kPa	kilopascal
MPa	megapascal

Další zkratky

GIT	Vstřikování s pomocí plynu
WIT	Vstřikování s pomocí vody
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
2D	dvozměrný objekt
3D	trojrozměrný objekt
VVS	vyhřívání vtokový systém

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Využití jednotlivých typů materiálů v různých odvětvích v Evropě (2019) [1]	12
Obrázek 2 Rozdělení polymerních materiálů	13
Obrázek 3 Plnění dutiny formy [11]	19
Obrázek 4 Fontánový tok [12]	19
Obrázek 5 Aplikace plastových dílů v automobilu [15].....	22
Obrázek 6 Maximální teploty plastových dílů automobilu v extrémních podmínkách [20]	24
Obrázek 7 Vstřikovací stroj a) horizontální b) vertikální [23]	26
Obrázek 8 Schéma hydraulického vstřikovacího stroje [6].....	26
Obrázek 9 Šroub vstřikovacího stroje [21].....	28
Obrázek 10 Cyklus vstřikovacího stroje [14]	31
Obrázek 11 Vstřikovací cyklus.....	31
Obrázek 12 Průběh a) tlaku a b) teploty v dutině formy během procesu vstřikování [9] ...	32
Obrázek 13 Zpracovatelské okno [12]	33
Obrázek 14 Místa vzniku vad vlivem rozdílné tloušťky stěny v rohu výstřiku []	38
Obrázek 15 Návrh přechodu tloušťky stěny výstřiku [12]	38
Obrázek 16 Závislost faktoru koncentrace napětí na poměru R/t [5], [12]	40
Obrázek 17 Parametry žebra [12]	40
Obrázek 18 Vstřikovací forma [30]	42
Obrázek 19 Vstřikovací forma v řezu [30].....	43
Obrázek 20 Standartní prvky rámu formy [29].....	45
Obrázek 21 Studený vtokový systém dvojnásobné formy [31].....	46
Obrázek 22 Druhy rozváděcích kanálů [33].....	47
Obrázek 23 Přidržovače vtoku a), jímka b) [33].....	48
Obrázek 24 Druhy vtokových ústí [33].....	48
Obrázek 25 vyhřívaný vtokový systém v řezu formy [31].....	49
Obrázek 26 Blok vyhřívaného vtokového systému [31]	50
Obrázek 27 Temperační kanály v řezu formy [31].....	51
Obrázek 28 Odvzdušnění dutiny formy [31].....	53
Obrázek 29 Boční odformování [31].....	54
Obrázek 30 Analýza plnění v Moldflow Synergy 2016.....	57
Obrázek 31 Druhy sítí [36]	58
Obrázek 32 Vstřikovaný výrobek	62
Obrázek 33 Úkosity na vstřikované součásti	63
Obrázek 34 Výsledek vhodnosti umístění vtokového ústí	66

Obrázek 35 Výsledek indikace odporu vůči toku taveniny	66
Obrázek 36 Výsledek analýzy plnění a) u vyhřívaného b) studeného vtok. systému.....	67
Obrázek 37 Dělicí roviny na vstříkované součásti.....	70
Obrázek 38 Kompletní sestava vstříkovací formy 1	71
Obrázek 39 Kompletní sestava vstříkovací formy 2	71
Obrázek 40 Pravá (pevná) polovina vstříkovací formy.....	73
Obrázek 41 Levá (pohyblivá) polovina vstříkovací formy	74
Obrázek 42 Tvarové vložky.....	75
Obrázek 43 Výměnný trn tvarové vložky.....	75
Obrázek 44 Vodící prvky posuvných čelistí.....	76
Obrázek 45 Posuvné čelisti.....	77
Obrázek 46 Trn posuvné čelisti	77
Obrázek 47 Vyhřívaný vtokový systém Meusburger.....	78
Obrázek 48 Vyhazovací systém.....	79
Obrázek 49 Temperační systém.....	80
Obrázek 50 Prvky temperačního systému	81
Obrázek 51 Transportní prvky	81
Obrázek 52 Součást s navrženou sítí a její parametry.....	83
Obrázek 53 Parametry temperace formy	84
Obrázek 54 Procesní parametry 1	85
Obrázek 55 Procesní parametry 2	85
Obrázek 56 Procesní parametry 3	86
Obrázek 57 procesní parametry 4	86
Obrázek 58 Čas plnění.....	87
Obrázek 59 Vstříkovací tlak v místě vtokového ústí	88
Obrázek 60 Rychlost smykové deformace	89
Obrázek 61 Uzavírací síla.....	89
Obrázek 62 Čas dosažení vyhazovací teploty.....	90
Obrázek 63 Vzduchové kapsy	91
Obrázek 64 Propadliny.....	91
Obrázek 65 Teplota média v temperačním okruhu.....	92
Obrázek 66 Tlak v temperačním okruhu	93
Obrázek 67 Účinnost temperačního systému.....	94
Obrázek 68 Teplota dutiny formy	95
Obrázek 69 Celková deformace výstříku	95

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Nejpoužívanější amorfni termoplasty a jejich charakteristické teploty [7]	15
Tabulka 2 Nejpoužívanější semikrystalické termoplasty a jejich char. teploty [7]	16
Tabulka 3 Doporučené rozmezí poměru L/t u jednotlivých materiálů [12]	39
Tabulka 4 Doporučené teploty formy [33]	52
Tabulka 5 Parametry materiálu Ultramid B3WG6	64
Tabulka 6 Srovnání studeného a vyhřívání vtokového systému	68
Tabulka 7 Parametry stroje	82
Tabulka 8 Výsledky analýz.....	96

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I	Materiálový list BASF Ultramid B3WG6
Příloha P II	Technická data stroje ARBURG Allrounder 370 S
Příloha P III	Výkresová dokumentace
	<ul style="list-style-type: none">- Výkres vstříkované součásti- Výkres sestavy formy- Kusovník

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST BASF ULTRAMID B3WG6

Ultramid® B3WG6 BK00564



Processing Data Sheet

	Test method	Unit	Values
Properties			
Polymer abbreviation	-	-	PA6-GF30
Density	ISO 1183	kg/m ³	1360
Drying			
Moisture, max.	-	%	0.15
Moisture, optimal ¹⁾	-	%	0.03 - 0.06
Dryer temperature ²⁾	-	°C	80
Drying time ³⁾	-	h	4
Injection molding			
Melt temperature range	-	°C	270 - 290
Melt temperature, optimal	-	°C	280
Mold temperature range	-	°C	80 - 90
Mold temperature, optimal	-	°C	80
Residence time, max.	-	min	10
Machine Settings			
Temperature hopper throat	-	°C	80
Cylinder temperature 1 (feed zone)	-	°C	260
Cylinder temperature 2 (compression)	-	°C	270
Cylinder temperature 3 (metering-zone, in front of the screw)	-	°C	280
Cylinder temperature 4 (nozzle)	-	°C	280
Peripheral screw speed	-	m/s	≤ 0.3
Shrinkage			
Molding shrinkage (parallel)	ISO 294-4	%	0.25
Molding shrinkage (normal)	ISO 294-4	%	0.74
Processing shrinkage, constrained, longitudinal (TM = 280 °C, TW = 80 °C) ⁴⁾	-	%	0.31

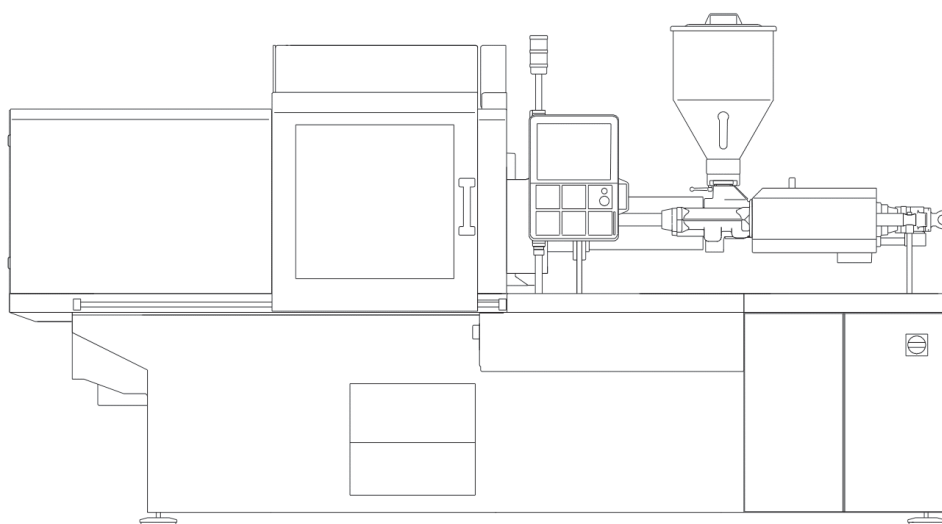
Footnotes

- 1) Excessive drying of the granules may lead to an increase of melt viscosity during processing.
- 2) Dry air dryer; drying time is dependent on the initial moisture content of the granules, drying temperature and the dew point of the dried air.
- 3) In case of improper storage (e.g. open packages) drying time may have to be extended.
- 4) Model housing with central sprue, measures of the base: 107 x 47 x 1.5 mm.

BASF SE

67056 Ludwigshafen, Germany

PŘÍLOHA P II: TECHNICKÁ DATA STROJE ARBURG 370 S



ALLROUNDER 370 S

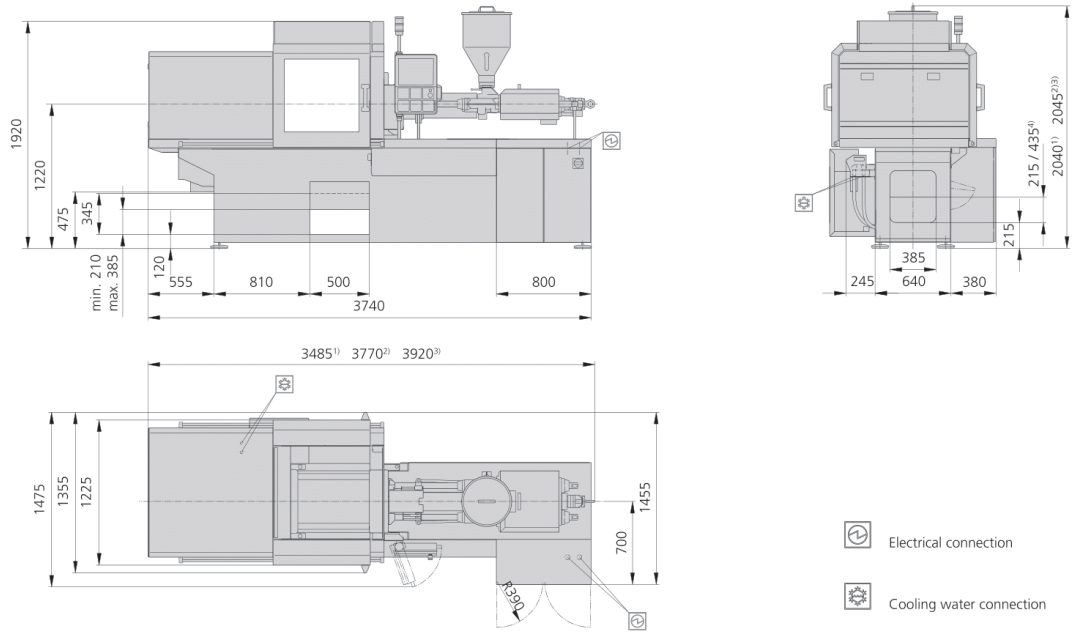
Distance between tie bars: 370 x 370 mm

Clamping force: 500, 600, 700 kN

Injection unit (acc. to EUROMAP): 100, 170, 290

ARBURG

MACHINE DIMENSIONS | 370 S



- 1) injection unit 100
- 2) injection unit 170
- 3) injection unit 290
- 4) Conveyor belt

TECHNICAL DATA | 370 S

Clamping unit			370 S		
with clamping force	max. kN		500	600	700
Opening force stroke	max. kN mm		160 400		
Mould height, fixed variable	min. mm		200 ---		
Platen daylight fixed variable	max. mm		600 ---		
Distance between tie bars (w x h)	mm		370 x 370		
Mould mounting platens (w x h)	max. mm		510 x 510		
Weight of movable mould half	max. kg		360		
Ejector force stroke	max. kN mm		30 125		
Dry cycle time EUROMAP ²	1 pump	min. s - mm	2,1 1,9 - 259		
	2 pumps	min. s - mm	1,4 - 259		
	Accum.	min. s - mm	1,3 - 259		

Injection unit			100			170			290		
with screw diameter	mm		20	25	30	25	30	35	30	35	40
Effective screw length	L/D		25	20	16,7	24	20	17	23,3	20	17,5
Screw stroke	max. mm		100			120			150		
Calculated stroke volume	max. cm ³		31	49	71	59	85	115	106	144	188
Shot weight	max. g PS		29	45	65	54	77	105	97	132	172
Material throughput	max. kg/h PS		5,5	8	9,5	10	13,5	16	17	20,5	24,5
	max. kg/h PA6.6		2,8	4	4,9	5	7	8	8,5	10,5	12,5
Injection pressure	max. bar		2500	2000	1390	2500	2000	1470	2500	2000	1530
Holding pressure	max. bar		2500	2000	1390	2500	2000	1470	2500	2000	1530
Injection flow ²	1 pump	max. cm ³ /s	64 90	100 142	146 204	66 94	96 136	132 186	102	140	182
	2 pumps	max. cm ³ /s	64 90	100 142	146 204	66 94	96 136	132 186	102	140	182
	Accum.	max. cm ³ /s	172	268	388	216	312	424	316	430	562
Screw circumferential speed ²	1 pump	max. m/min	28 39	35 49	42 59	35 49	42 59	49 69	46	54	62
	2 pumps	max. m/min	28 39	35 49	42 59	35 49	42 59	49 69	46	54	62
	Accum.	max. m/min	11	14	17	14	17	19	20	24	27
Screw torque	max. Nm		120	150	180	210	250	290	320	380	430
Nozzle contact force retraction stroke	max. kN mm		50 180			50 210			60 240		
Heating capacity zones	kW		4,9 5			9,4 5			6,4 5		
Feed hopper	l		50			50			50		

Drive and connection			1 pump			2 pumps			Accum.		
with injection unit			100	170	290	100	170	290	100	170	290
Net weight of machine	kg		3200	3250	3300	3200	3250	3300	---		
Sound press. level Insecurity ⁴	dB(A)		67 3			67 3			67 3		
Oil filling	l		135			135			135		
Drive power ²	max. kW		15			15			15		
Electrical connection ³		kW	22	27	24	22	27	23	22	27	23
	Total	A	63	80	80	63	80	80	63	80	80
	Machine	A	---			---			---		
	Heating	A	---			---			---		
Cooling water connection	max. °C		30			30			30		
	min. Δp bar		1,5 DN 25			1,5 DN 25			1,5 DN 25		

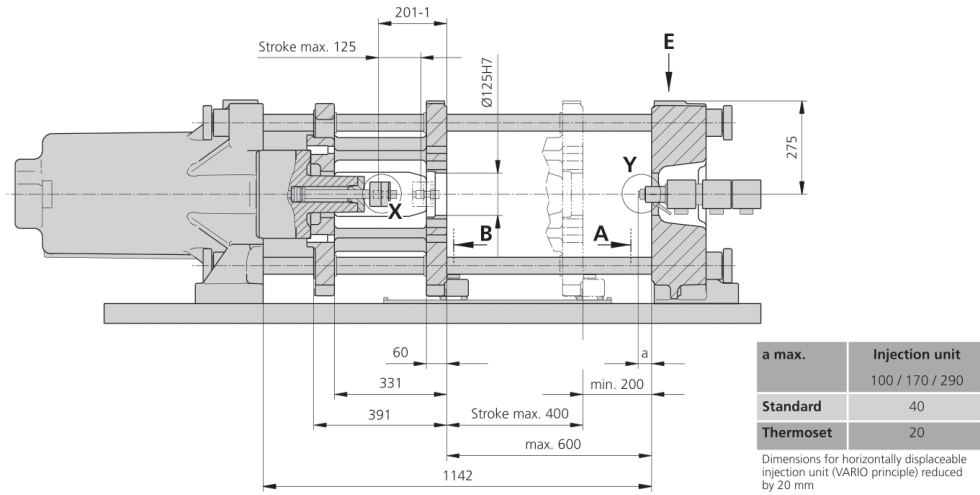
Machine type	
with EUROMAP size designation ¹	Drive
370 S 500-100 170	1 2 Accum.
370 S 600-100 170 290	1 2 Accum.
370 S 700-100 170 290	- 2 Accum.

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

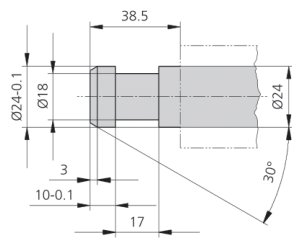
All specifications relate to the basic machine version. Deviations are possible depending on variants, process settings and material type. Depending on the drive, certain combinations, e.g. max. injection pressure and max. injection flow may be mutually exclusive.

- 1) Clamping force (kN) - size of injection unit = max. stroke volume (cm³) x max. injection pressure (kbar).
 - 2) Specifications depend on the drive config. - 1st value applies to the lowest clamping force.
 - 3) Specifications relate to 400 V/50 Hz.
 - 4) Detailed info in the operating instr.
- [] Specifications apply to alternative equipment.

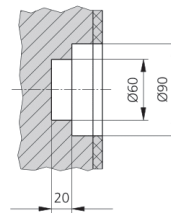
MOULD INSTALLATION DIMENSIONS | 370 S



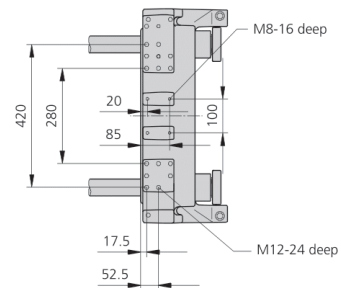
Ejector bolt | X



Bore in mould (if required) | Y

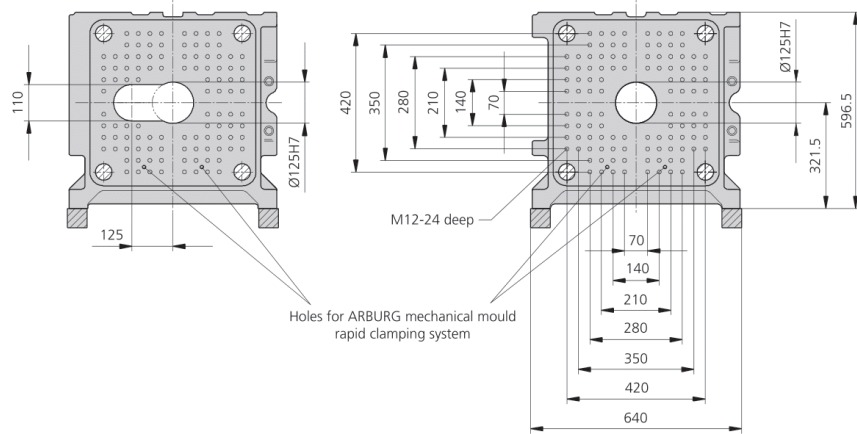


Robotic system mounting | E

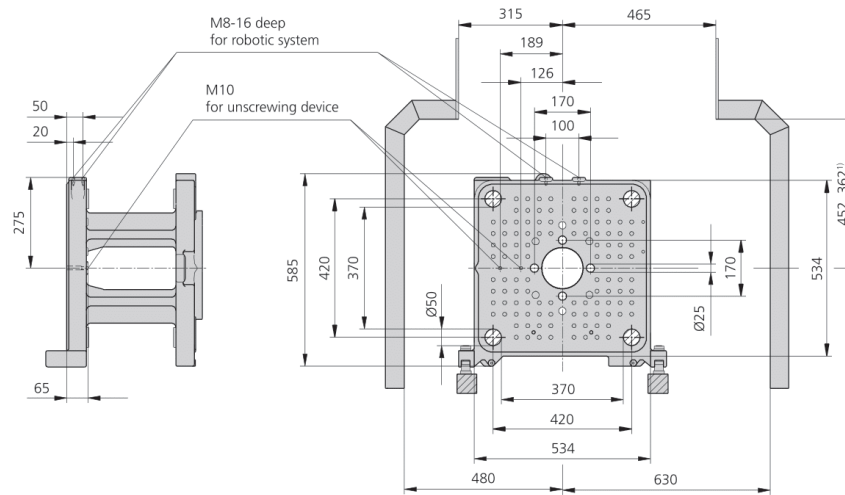


MOULD INSTALLATION DIMENSIONS | 370 S

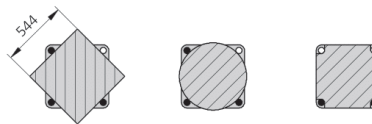
Fixed mould mounting platen | A



Moving mould mounting platen | B



Useful clamping surface when pulling the tie rods



1) Pivoting clamping unit – guard closed at the top

SHOT WEIGHTS | 370 S

Theoretical shot weights for the most important injection moulding materials

Injection units according to EUROMAP		100			170			290		
Screw diameter	mm	20	25	30	25	30	35	30	35	40
Polystyrene	max. g PS	29	45	65	54	77	105	97	132	172
Styrene heteropolymerizates	max. g SB	28	44	63	53	76	103	95	129	168
	max. g SAN, ABS ¹⁾	27	43	62	52	74	101	93	126	165
Cellulose acetate	max. g CA ¹⁾	32	50	73	61	87	119	109	148	194
Celluloseacetobutyrate	max. g CAB ¹⁾	30	47	68	56	81	110	101	138	180
Polymethyl methacrylate	max. g PMMA	30	46	67	56	80	109	100	136	178
Polyphenylene ether, mod.	max. g PPE	27	42	60	50	72	98	90	122	160
Polycarbonate	max. g PC	30	47	68	57	81	111	102	139	181
Polysulphone	max. g PSU	31	49	70	58	84	115	105	143	187
Polyamides	max. g PA 6.6 PA 6 ¹⁾	28	44	64	53	77	104	96	131	171
	max. g PA 6.10 PA 11 ¹⁾	26	41	60	50	72	98	90	122	160
Polyoximethylene (Polyacetal)	max. g POM	35	55	80	66	96	130	120	163	213
Polyethylene terephthalate	max. g PET	34	53	77	64	92	126	115	157	205
Polyethylene	max. g PE-LD	22	34	49	41	59	80	73	100	130
	max. g PE-HD	22	35	50	42	60	82	76	103	134
Polypropylene	max. g PP	23	36	51	43	62	84	77	105	137
Fluoropolymerides	max. g FEP, PFA, PCTFE ¹⁾	46	72	103	86	124	169	155	211	276
	max. g ETFE	40	63	91	76	109	148	136	185	242
Polyvinyl chloride	max. g PVC-U	35	54	78	65	94	127	117	159	208
	max. g PVC-P ¹⁾	32	50	72	60	87	118	108	147	192

1) average value

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

© 2018 ARBURG GmbH + Co KG | All data and technical information have been compiled with great care. However we accept no responsibility for correctness. Individual illustrations and information may deviate from the actual delivery condition of the machine. The relevant valid operating instructions are applicable for the installation and operation of the machine.