

Konstrukce vstřikovací formy pro výrobu plastového dílu

Bc. Tomáš Johec

Diplomová práce
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Johec**
Osobní číslo: **T21404**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Konstrukce vstřikovací formy pro výrobu plastového dílu**

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární studii na dané téma.
2. Provedte konstrukci zadaného plastového dílu.
3. Navrhněte 3D sestavu vstřikovací formy pro výrobu zadaného dílu.
4. Nakreslete 2D výkresy sestavy a příslušných řezů.
5. Návrh ověřte pomocí analýz.

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

Seznam doporučené literatury:

OSSWALD, Tim A., Lih-Sheng TURNG a Paul J. GRAMANN. *Injection molding handbook*. 2nd ed. Munich: Carl Hanser Publishers, c2008, xvii, 764 s. ISBN 978-1-56990-420-6

BEAUMONT, John P. *Runner and gating design handbook: tools for successful injection molding*. 2nd ed. Munich: Hanser Publishers, c2007, xvi, 308 s. ISBN 978-1-56990-421-3

KENNEDY, Peter a Rong ZHENG. *Flow analysis of injection molds*. 2nd ed. Cincinnati: Hanser Publishers, [2013], 1 online zdroj (xxviii, 349 p.). ISBN 9781569905227

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Michal Staněk, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2023**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 7. února 2023

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, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem u 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:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá konstrukcí vstřikovací formy pro plastový díl, který je součástí nárazníku automobilu. Teoretická část zpracovává poznatky z oblasti vstřikování. Zabývá se základními vlastnostmi polymerních materiálů, vstřikovacím strojem, vstřikovací formou a vadami vzniklými při vstřikování. V praktické části jsou tyto znalosti aplikovány při návrhu vstřikovací formy pro daný díl a návrh je ověřen pomocí analýz.

Klíčová slova: vstřikování, vstřikovací forma, CAE simulace, polymer, vstřikovací stroj, vady.

ABSTRACT

The thesis deals with the design of an injection mold for a plastic part that is part of a car bumper. The theoretical part elaborates knowledge from the field of injection molding. It deals with the basic properties of polymeric materials, injection molding machine, injection mold and defects caused during injection molding. In the practical part, this knowledge is applied to the design of an injection mold for a given part and the design is verified by analysis.

Keywords: injection molding, injection mold, CAE simulation, polymer, injection molding machine, defects.

Za trpělivý a povzbuzující přístup při vytváření této diplomové práce děkuji prof. Ing. Michalu Staňkovi, Ph.D. Také bych tímto chtěl poděkovat všem přátelům, kteří mě při psaní podporovali.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 POLYMERNÍ MATERIÁLY A JEJICH VLASTNOSTI	12
1.1 MOLEKULÁRNÍ STRUKTURA	12
1.2 USPOŘÁDÁNÍ MONOMERŮ V MOLEKULE.....	13
1.3 ZPRACOVATELNOST POLYMERŮ	14
1.4 ZPŮSOB SYNTÉZY POLYMERŮ	15
1.5 USPOŘÁDÁNÍ MOLEKUL POLYMERU	15
1.5.1 Amorfní polymery.....	15
1.5.2 Semikrystalické polymery.....	16
1.6 PLASTY VHODNÉ PRO VSTŘIKOVÁNÍ.....	18
1.6.1 Polyethylen (PE)	18
1.6.2 Polypropylen (PP)	18
1.7 REOLOGIE POLYMERNÍCH TAVENIN	19
1.7.1 Viskozita.....	20
1.7.2 Debořino číslo	21
1.7.3 Hmotnostní (MFR) a objemový (MVR) index toku taveniny.....	21
2 VSTŘIKOVACÍ STROJ	23
2.1 VYTLAČOVACÍ ŠNEK A JEHO ZÓNY	24
2.2 PROCES TAVENÍ GRANULÁTU	25
2.3 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS	26
2.4 FONTÁNOVÝ TOK	30
3 VSTŘIKOVACÍ FORMA	31
3.1 ZÁKLADNÍ DVOUDESKOVÁ FORMA	32
3.1.1 Rozvržení základní dvoudeskové formy.....	33
3.2 BOČNÍ ODFORMOVÁNÍ.....	34
3.3 NAVRHOVÁNÍ FORMY.....	35
3.4 SIMULACE PLNĚNÍ	36
3.4.1 Metoda střední roviny (Midplane methods).....	36
3.4.2 Dual Domain	37
3.4.3 3D analýza.....	38
3.5 VTOKOVÝ SYSTÉM	39
3.5.1 Efektivní vtokový kanál	40
3.5.2 Studený vtokový systém.....	41
3.5.3 Horký vtokový systém	41
3.6 TEMPERAČNÍ SYSTÉM.....	43

3.7	ODVZDUŠNĚNÍ FOREM.....	46
3.8	VYHAZOVACÍ SYSTÉM.....	47
4	NEJČASTĚJŠÍ VADY VZNIKLÉ VSTŘIKOVÁNÍM.....	49
4.1	STUDENÝ SPOJ (WELD LINE).....	49
4.2	PROUDOVÉ ČÁRY (FLOW LINES)	50
4.3	PROPADLINY (SINK MARKS)	51
4.4	POVRCHOVÁ DELAMINACE (SURFACE DELAMINATION).....	52
4.5	NEDOTEČENÝ VÝROBEK (SHORT SHOTS)	53
4.6	DEFORMACE (WARP)	53
4.7	TRYSKOVÝ TOK (JETTING)	54
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	55
5	STANOVENÍ CÍLŮ PRÁCE	56
6	VSTŘIKOVANÝ VÝROBEK.....	57
6.1	MATERIÁL VÝROBKU	58
7	KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY.....	59
7.1	TVAROVÉ ČÁSTI FORMY	60
7.2	BOČNÍ ODFORMOVÁNÍ.....	62
7.3	VYHAZOVACÍ SYSTÉM.....	64
7.4	VTKOVÝ SYSTÉM	66
7.5	TEMPERAČNÍ SYSTÉM.....	67
7.6	ODVZDUŠNĚNÍ FORMY.....	68
7.7	PŘEPRAVA A ZAJIŠTĚNÍ FORMY.....	68
8	ANALÝZA VSTŘIKOVACÍHO PROCESU	69
8.1	TVORBA SÍTĚ.....	69
8.1.1	Síť zadaného výrobku	69
8.1.2	Síť temperačního systému a horkého vtoku	70
8.1.3	Síť bloku formy.....	71
8.2	NASTAVENÍ PROCESNÍCH PARAMETRŮ	71
8.3	VÝSLEDKY ANALÝZY PLNĚNÍ	72
8.3.1	Vstřikovací čas (Fill Time)	72
8.3.2	Teplota taveniny (Bulk Temperature).....	72
8.3.3	Rychlost smykové deformace (Shear Rate, Bulk)	73
8.3.4	Doba k dosažení vyhazovací teploty (Time to Reach Ejection Temperature)	74
8.3.5	Tlak v místě vtoku (Pressure at Injection Location)	74
8.3.6	Uzavírací síla (Clamp Force)	75
8.3.7	Vzduchové bubliny a studené spoje (Air Traps and Weld Lines).....	76
8.3.8	Propadliny (Sink Marks).....	76

8.4	VÝSLEDKY ANALÝZY TEMPERACE.....	77
8.4.1	Teplota temperačního média (Circuit Coolant Temperature)	77
8.4.2	Efektivita odvodu tepla (Circuit Heat Removal Efficiency).....	77
8.5	VÝSLEDKY ANALÝZY SMRŠTĚNÍ A DEFORMACE	78
8.5.1	Deformace, vliv všech efektů (Deflection, All Effects).....	78
9	VOLBA VSTŘIKOVACÍHO STROJE	80
	DISKUSE VÝSLEDKŮ.....	81
	ZÁVĚR	83
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	87
	SEZNAM OBRÁZKŮ	89
	SEZNAM TABULEK.....	92
	SEZNAM PŘÍLOH.....	93

ÚVOD

V době, kdy se klade důraz na nízkou cenu a váhu produktů, hrají plastové výrobky v průmyslu významnou roli. Plast, resp. polymer s přidanými aditivami, je materiál se skvělými vlastnostmi: je lehký, dobře se zpracovává a je poměrně levný, srovnáme-li jej ku příkladu s hliníkem či ocelí. Jeho zastoupení ve světě za posledních 100 let významně vzrostlo, a tak se plastové výrobky staly neodmyslitelnou součástí každodenního života. To představuje jak problémy s jeho recyklací, tak i pozitivní věci v podobě nových možností. Tato diplomová práce se bude zabývat, jak se plastové výrobky vyrábí, a to konkrétně metodou vstřikování.

Vstřikování je proces, kdy se plast v podobě granulátu roztaví v plastikační jednotce vstřikovacího stroje a pomocí pohyblivého šneku vpraví do dutiny vstřikovací formy, kde se roztavený plast ochladí a následně zchladlý vyhodí z formy. Samotný proces vstřikování je rychlý, řádově trvá několik sekund, samozřejmě v závislosti na velikosti vstřikovaného dílu, a tedy nachází široké uplatnění v sériové výrobě. Nevýhodou je složitost návrhu a výroby vstřikovací formy, od které se odvíjí cena, která se pohybuje až v řádu miliónu korun. S procesem vstřikování souvisí i vady vzniklé při vstřikování, celkem jich je popsáno 33. Některé vady se dají odstranit, avšak najdou se i takové, které vyžadují kompletní pozměnění konstrukce formy, případně i změnu samotného výrobku. Aby se předcházelo dodatečným změnám, jsou vstřikovací formy navrhovány pomocí CAD programu a následně zkoumány prostřednictvím analýz, které případné vady dokážou odhalit.

V této diplomové práci se navrhne vstřikovací forma pro výrobu plastového dílu části nárazníku auta. Práce je rozdělena na dvě části teoretickou a praktickou. Teoretická část se bude zabývat problematikou vstřikování, popíše základní vlastnosti polymerních materiálů, které jsou důležité znát pro správné navržení vstřikovací formy a také přiblíží časté vady. V praktické části budou nabyté znalosti aplikovány při návrhu vstřikovací formy, která bude vymodelována v Catii V5R19 a ověřena analýzou vstřikovacího procesu v programu Autodesk Moldflow.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERNÍ MATERIÁLY A JEJICH VLASTNOSTI

Polymery jsou makromolekulární látky, které se skládají z menších jednotek, tzv. monomerů, uspořádaných do řetězce. [1] Mohou se klasifikovat mnoha způsoby, a to na základě: molekulární struktury, podle uspořádání monomerů v molekule, zpracovatelnosti, nebo způsobu syntézy. [2]

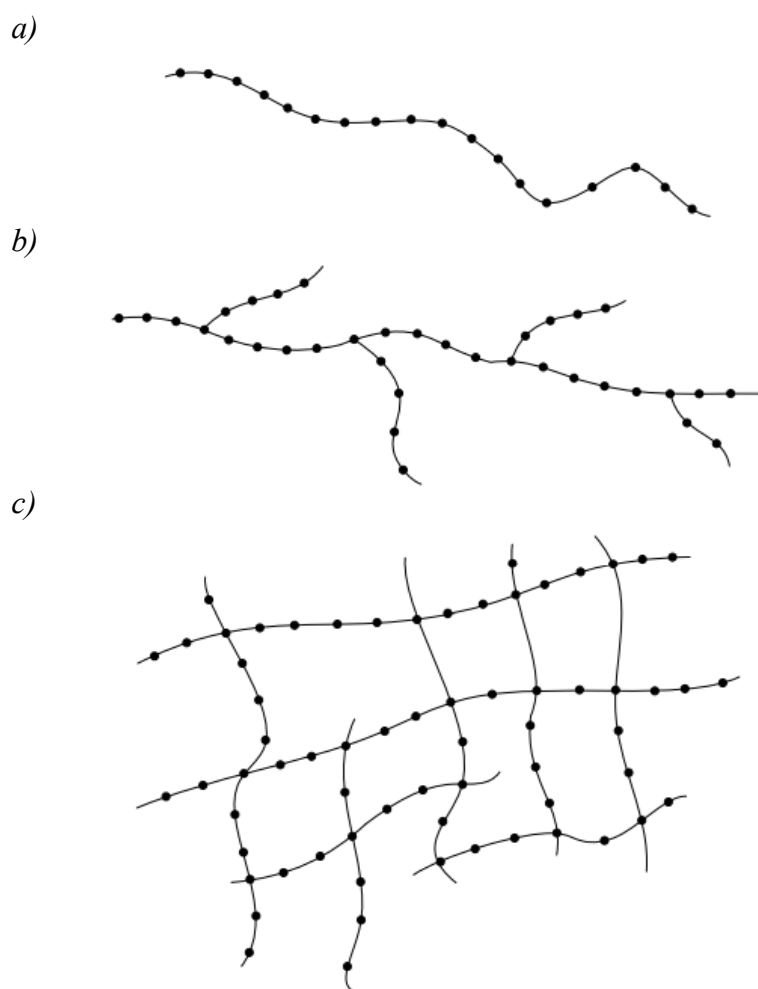
1.1 Molekulární struktura

Z pohledu molekulární struktury se polymery rozdělují na lineární, rozvětvené a zesíťované. Schematické znázornění jednotlivých struktur je na Obr. 1, kde čáry představují molekuly polymeru a černé tečky označují monomery. [2] Je známo, že větvení má významný vliv na reologii polymerů, zejména na jejich tažnost. Zajímavým materiálem je v tomto ohledu polyethylen (PE), který má různé stupně větvení v závislosti na způsobu polymerizace. [3]

Lineární struktura je spojení opakujících se monomerů do jednoho dlouhého řetězce bez bočních větví. Každý monomer v lineárním polymeru je tedy spojen pouze se dvěma dalšími, což vede k tomu, že vzniká dlouhá a úzká molekula. Mezi takové polymery se řadí: vysokohustotní polyethylen (HDPE), polyvinylchlorid (PVC) a některé polyamidy (nylon). [2]

Rozvětvenou strukturou se označují takové polymerní materiály, které mají nepravidelně rozmístěné boční větve v základním molekulovém řetězci. Tyto větve způsobují, že jsou rozvětvené polymery méně uspořádané, takže jsou méně husté, méně krystalické a snáze se zpracovávají. Množství a typ větví může ovlivnit některé důležité fyzikální vlastnosti materiálu, jako je viskozita a elasticita. Typickým rozvětveným materiálem je nízkohustotní polyethylen (LDPE). [2]

Zesíťovaná struktura obsahuje krátké postranní řetězce nebo příčné vazby, které spojují různé molekulové řetězce do mikrostruktury síťového typu. Síťová struktura způsobuje, že je plastický materiál pružnější, což znamená, že když na zesíťovaný materiál působí síla, tak se může deformovat a následně po odstranění síly se vrátit do původního stavu. Typický zesíťovaný polymer je polyakrylamid (PAM) anebo zesíťovaný polyethylen (PEX). [2]



Obrázek 1 Molekulární struktura plastů [2]

a) lineární struktura, b) rozvětvená struktura, c) zesíťovaná struktura

1.2 Uspořádání monomerů v molekule

Polymery jsou složeny z monomerů, a to z jednoho druhu monomerů (homopolymery), nebo více druhů monomerů (kopolymery). Monomer je základní jednotkou molekul polymeru. Mezi typické homopolymery patří: polyethylen (PE), polypropylen (PP), polystyrén (PS) a polykarbonát (PC). Mezi významné kopolymery patří: akrylonitrilbutadienstyren (ABS), kopolymer styrenu a butadienu (SBR) a ethylen-vinylacetát (EVA). [2]

Kopolymery se dále rozdělují podle uspořádání jednotlivých monomerů v molekulovém řetězci. Rozdělují se na střídavé (pravidelné střídání jednotek), statické (nahodilé střídání jednotek), blokové (pravidelné střídání jednotlivých úseků) a roubované (jeden typ monomerů je naroubovaný na základní řetězec). Jednotlivé typy řetězců jsou schematicky zobrazeny na Obr. 2. [2]



Obrázek 2 Uspořádání monomerů v molekule [2]

a) střídavé, b) statické, c) blokové, d) roubované

1.3 Zpracovatelnost polymerů

Další klasifikace založená na zpracovatelnosti rozděluje polymerní materiály na termoplasty a reaktoplasty. Obecně se rozlišují podle toho, jestli je lze opakovaně roztavit (termoplasty), nebo jsou plně zesíťované, a tak nelze tavením opětovně změnit jejich tvar (reaktoplasty). [2]

Termoplast je materiál, který je při nízké teplotě pevný a má značnou pružnost a při vysoké teplotě může přejít do viskózního stavu, takže se chová podobně jako kapalina a tato reakce je vratná. Vzhledem k tomu, že termoplasty lze opakovaně tavit působením tepla, tak se často používají při vstřikování. Do této třídy plastů se řadí: polyethylen (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS), polykarbonát (PC) a akrylonitrilbutadienstyren (ABS). [2]

Reaktoplasty jsou nejčastěji pryskyřice, které po vytvrzení nelze znovu tavit. Vytvrzování je proces síťování, při kterém vzniká zesíťovaný materiál. Obecně platí, že reaktoplasty jsou pevnější než termoplasty, protože molekulární řetězce vytvrzených termosetů jsou spojeny trojrozměrnou sítí vazeb. Z toho důvodu však nelze termoplasty recyklovat a vyrábět z nich nové výrobky. Typickými reaktoplasty jsou polyuretany (PU), polyimid (PI) a polyesterové pryskyřice. [2]

1.4 Způsob syntézy polymerů

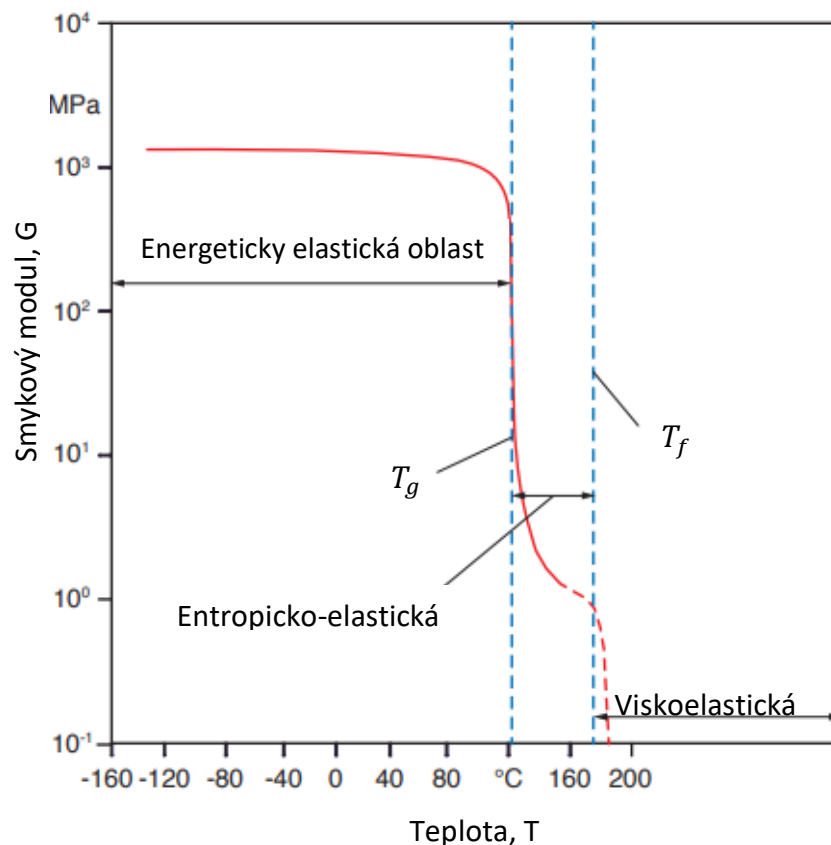
Další rozdělení polymerů je podle způsobu jejich výroby. Polymery vznikají polymerizací, což je chemický proces, při kterém se řetězí monomery a vzniká makromolekulární řetězec bez vedlejších produktů. Aby k polymerizaci došlo, musí se dodat určité množství aktivační energie. To se může provést několika způsoby, buď ohřevem systému, UV zářením, iniciátorem nebo katalyzátorem. Polymerizace se rozděluje podle mechanismu na polymeraci radikálovou, iontovou, polyinzerce, polykondenzaci a polyadici. [4]

1.5 Uspořádání molekul polymeru

Při tuhnutí nabývají termoplastické polymery dvou různých typů struktury: amorfní nebo semikrystalické. Amorfní polymery jsou takové, kde molekuly tuhnou v náhodném uspořádání, zatímco semikrystalické polymery mají molekuly z části uspořádané a zbytek tvoří amorfní část. [5] Fyzikální vlastnosti takových polymerů závisí na velikosti krystalů, morfologii krystalické a amorfní oblasti a na orientaci molekul. [3]

1.5.1 Amorfní polymery

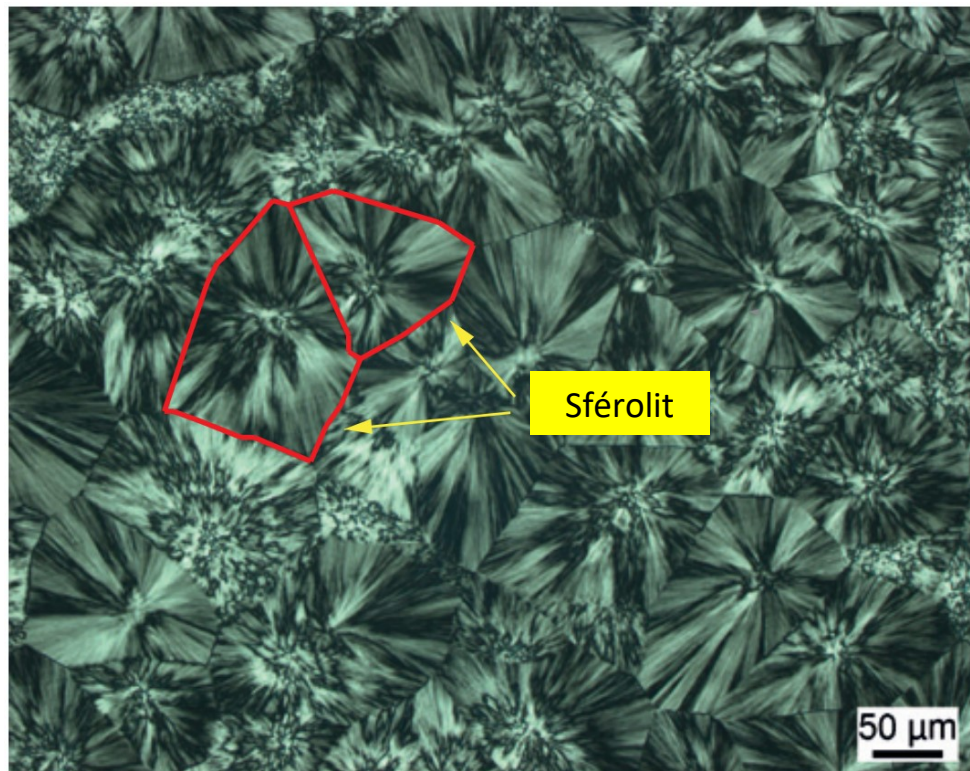
Amorfní stav je charakteristický pro všechny polymery při teplotách nad bodem tání (s výjimkou speciálních případů). [1] Do amorfních termoplastů, se řadí polymery, které mají v pevném stavu náhodně uspořádanou molekulární strukturu, díky které jsou amorfní termoplasty průhledné. Při zvyšování teploty přechází amorfní polymer z pevného skupenství do kapalného, přestože přechod není zřejmý, teplota, která dělí tyto dva stavy se označuje jako teplota skelného přechodu T_g . Za této teploty dochází k výraznému poklesu modulu pružnosti, jak je pro polystyrén znázorněno na Obr. 3. a u kterého je teplota skelného přechodu přibližně 110 °C. Při teplotách pod teplotou skelného přechodu se materiál chová jako viskoelastická pevná látka, oblast na křivce se označuje jako energeticky elastická oblast a materiál je křehký. Nad touto teplotou vstupuje polymer do tzv. entropicko-elastické oblasti. V této oblasti jej lze snadněji deformovat, jak se toho využívá například při tváření za tepla. Aby však polymer mohl téct, musí být překročena teplota tečení T_f , při které se chová jako viskoelastická kapalina. Teplota tečení je definována jako bod, kdy během deformace převažuje vliv viskózních sil nad elastickými. Obecně je tento bod u amorfních termoplastů 50 °C nad teplotou skelného přechodu. [5]



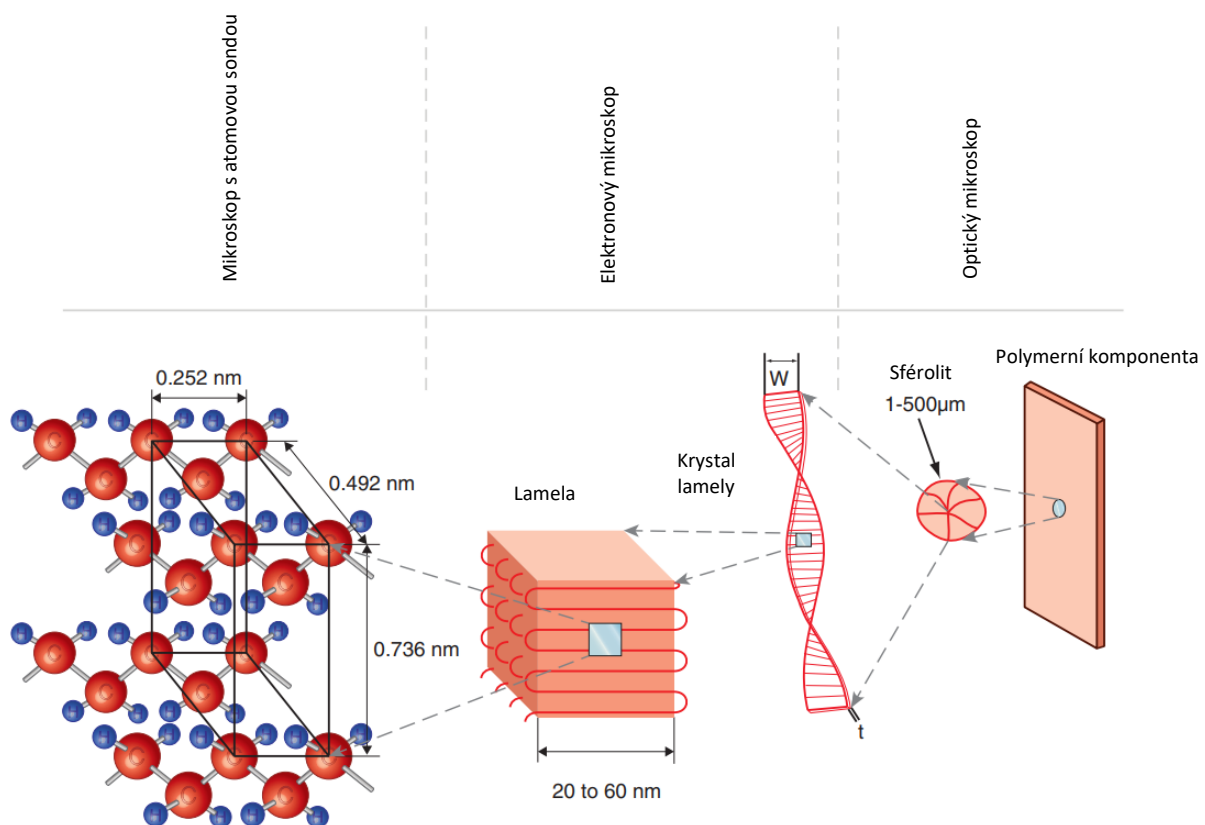
Obrázek 3 Smykový modul polystyrénu v závislosti na teplotě [5]

1.5.2 Semikrystalické polymery

Semikrystalické polymery vykazují větší uspořádanost než amorfni termoplasty. Molekuly jsou uspořádány do krystalické formy, jak je znázorněno na příkladu polypropylenu na Obr. 4. [5] Rozptyl rentgenového záření a elektronová mikroskopie ukázaly, že krystalická struktura (Obr. 4) je složena ze sférolitů s lamelárními krystaly, které jsou zase tvořeny polymerními řetězci. [1] Protože velikost sférolitických struktur, které mají charakteristickou velikost 1 až 500 μm , je mnohem větší než vlnová délka viditelného světla, jsou semikrystalické polymery pouze průsvitné. Obr. 5 schematicky ukazuje obecnou strukturu a uspořádání krystalů v případě polyethylenu. [5] Jelikož polymery jsou buď amorfni, nebo semikrystalické, tzn. obsahují amorfni i krystalickou fázi (nejsou nikdy 100% krystalické), rozlišují se podle stupně krystalinity. [3] Stupeň krystalinity se liší podle druhu termoplastu. Například u polyethylenu závisí krystalinita na počtu bočních větví řetězce a rychlosti chlazení. Nízkohustotní polyethylen (LDPE), který má dlouhé postranní větve může krystalizovat pouze do výše přibližně 40 až 50 %, zatímco polyethylen s vysokou hustotou (HDPE) krystalizuje až z 90 %. Od toho se odvíjí hustota a pevnost semikrystalických termoplastů, která se rovněž zvyšuje se stupněm krystalinity. [5]



Obrázek 4 Krystalická struktura polypropylenu [5]



Obrázek 5 Schematické znázornění obecné molekulární struktury [5]

1.6 Plasty vhodné pro vstřikování

Charakteristika plastů souvisí s jejich vlastnostmi, konkrétně s nízkou hustotou, širokým rozsahem mechanických vlastností, snadnou zpracovatelností, nízkou elektrickou/tepelnou vodivostí, vysokou chemickou odolností a možností opakovaného použití. Pro vstřikování je k dispozici široká škála plastových materiálů, dosud běžně používaných jich je více než 17 000. V rámci nejběžnějších skupin plastů existuje pět hlavních typů termoplastů, které tvoří dvě třetiny všech termoplastů, a to nízkohustotní polyethylen (LDPE); vysokohustotní polyethylen (HDPE); polypropylen (PP); polyvinylchlorid (PVC) a polystyren (PS). [6]

1.6.1 Polyethylen (PE)

Velký vývoj polyethylenu byl za druhé světové války, kdy probíhal experimentální vývoj pro použití jako izolace pro radarové kabely a tímto se i odstartovala jeho komerční výroba. [7]

Polyethylen je semikrystalický, nepolární polymer, který se vyrábí buď radikálovou nebo katalytickou polymerizací. [8] Polyethylen se rozděluje podle hustoty na nízkohustotní a vysokohustotní polyethylen. Vysokohustotní polyethylen je podstatně tužší než nízkohustotní, lze jej dobře tvarovat, má dobrou odolnost proti vlhkosti a nízká je i jeho cena. Oproti tomu je nízkohustotní polyethylen, který se vyznačuje postranními větvemi, pružnější, je průhledný a lépe se zpracovává. Polyethylen se používá hlavně na výrobu obalových fólií, desek, trubek a velkých vyfukovacích a rotačních výlisků. [7]

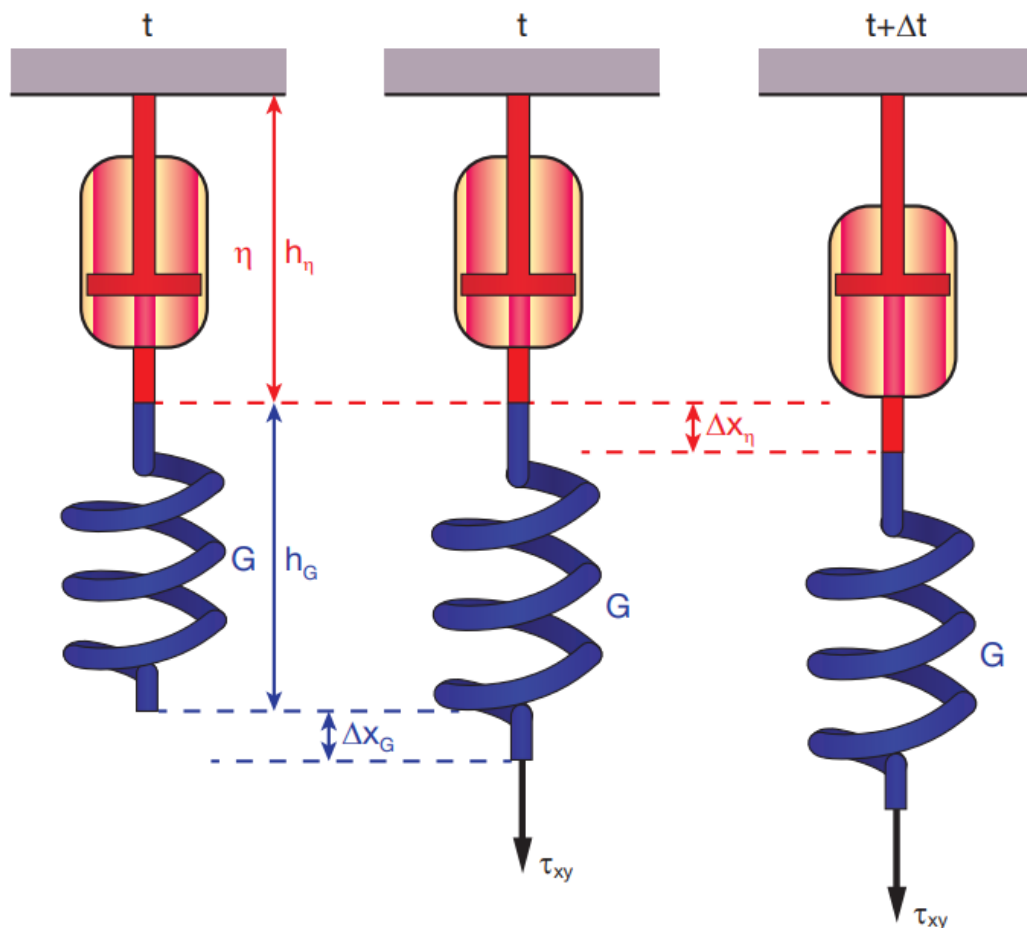
1.6.2 Polypropylen (PP)

Co se týče výroby je polypropylen jedním z nejprogresivnějších materiálů. Vyrábí se polymerizací monomeru polypropylenu s katalyzátorem na bázi titanu, ke spuštění reakce se pak používá druhý spolukatalyzátor (triethylaluminum) a ke kontrole molekulární hmotnosti se využívá vodíku. [7]

Existují tři struktury polypropylenu: izotaktická, syndiotaktická a ataktická. Izotaktický má základní strukturu ve formě šroubovice, díky které má dobré mechanické vlastnosti, jako je tuhost a pevnost v tahu. Syndiotaktický má pak lepší rázové vlastnosti, je pružnější a průhledný. Ataktický vzniká jako vedlejší produkt výrobního procesu polypropylenu a je tvrdý. Polypropylen se používá na výrobu fólií, spotřebičů až po různé výrobky vyrobené vstřikováním, jako jsou např. automobilové nárazníky. Všechny formy polypropylenu jsou náchylné k oxidaci díky přítomnosti terciárního vodíku. [7]

1.7 Reologie polymerních tavenin

Polymerní materiály se při mechanickém namáhání chovají oproti jiným materiálům odlišně, chovají se viskoelasticky. Viskoelastické chování je takové, které v sobě kombinuje vlastnosti ideálně pružného tělesa a ideálně viskózní kapaliny. Deformace u ideálně pružného tělesa vzniká okamžitě po zatížení a její velikost je přímo úměrná napětí, s časem se nemění a platí Hookův zákon elastického chování izotropních těles. K popisu deformace se používá modul pružnosti a pro modelování se ideálně pružné těleso znázorňuje zavěšenou pružinou. Deformace u ideálně viskózní kapaliny narůstá po celou dobu působení síly a po jejím zrušení zůstává deformační stav zachován. Vztah mezi smykovým napětím a deformací je vyjádřen Newtonovým zákonem síly. Při modelování se znázorňuje ideálně viskózní kapalina pomocí pístu. [4] Viskoelastické chování se popisuje Maxwellovým modelem, který reprezentuje sériové zapojení pístu a pružiny, schematicky je znázorněn na Obr. 6. Tento model kombinuje účinky elastické a viskózní síly, a tak vhodně popisuje chování polymerních tavenin. [9]



Obrázek 6 Schematické znázornění viskoelastického Maxwellova modelu [9]

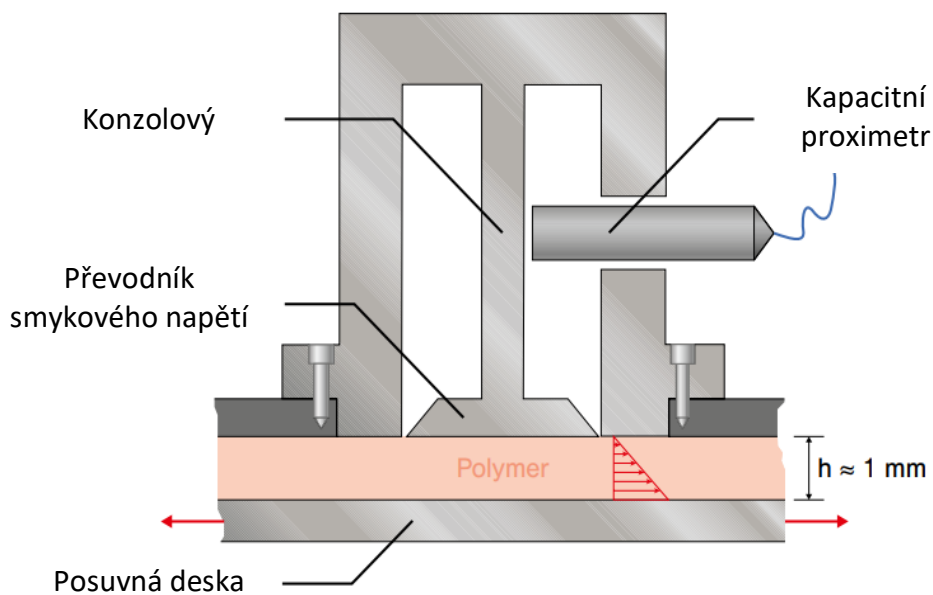
1.7.1 Viskozita

Viskozita je definovaná jako odpor vůči smykovému toku a zároveň je to nejpoužívanější materiálový parametr pro určování chování polymerů během technologického zpracování. Pro zjištění viskozity se využívá rychlosti smykové deformace, která dominuje při zpracování polymerů. Měří se prostřednictvím reometru, jak je zobrazeno na Obr. 7, kde se jedná o reometr s posuvnou deskou a viskozita vychází ze vztahu: [10]

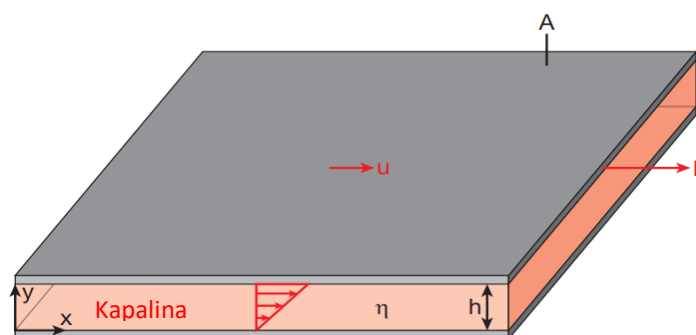
$$\eta = \frac{\tau_{xy}}{\dot{\gamma}} \quad (1)$$

kde η je smyková viskozita, τ_{xy} je smykové napětí a $\dot{\gamma}$ je rychlost smykové deformace.

Tato rovnice platí pro smykové proudění mezi dvěma deskami, kdy jedna se pohybuje a druhá je statická, jak je zobrazeno na Obr. 8. [9]



Obrázek 7 Schématické znázornění reometru s posuvnou deskou [10]



Obrázek 8 Schématické znázornění smykového toku mezi dvěma deskami [9]

1.7.2 Debořino číslo

Viskoelastické látky mají relaxační čas λ , kterým se definuje tzv. Debořino číslo (De) a používá se k odhadu elastických účinků při proudění. Toto číslo je vyjádřeno poměrem relaxačního času materiálu a doby pozorování, jak je uvedeno v následujícím vzorci: [11]

$$De = \frac{\lambda}{\theta} \quad (2)$$

kde De je Debořino číslo, λ je relaxační čas polymeru a θ je doba pozorování.

Debořino číslo vyjadřuje jakou rychlostí daný materiál teče. Při rychlých procesech je $De \gg 1$ (doba pozorování je velice krátká) a materiál se bude chovat elasticky, protože nemá dostatek času na relaxaci. Oproti tomu při pomalých procesech je $De \ll 1$ a materiál bude vykazovat viskózní chování. [11]

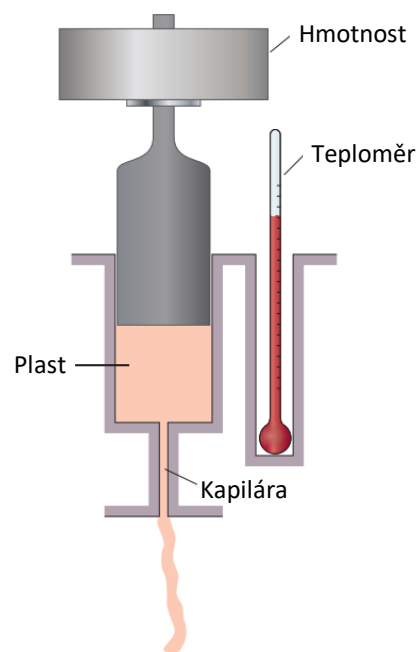
Pro praxi je důležité, aby Debořino číslo nebylo příliš vysoké, a tak nedocházelo k rozměrovým vadám jako je např. nabobtnání extrudátu, při vytlačování polymeru tzv. žraločí kůže (shark skin), anebo dokonce k praskání taveniny. Tyto popsání jevy ovlivňují i další činitele, přesto paměť taveniny polymeru se na tom podílí největší mírou. [12]

1.7.3 Hmotnostní (MFR) a objemový (MVR) index toku taveniny

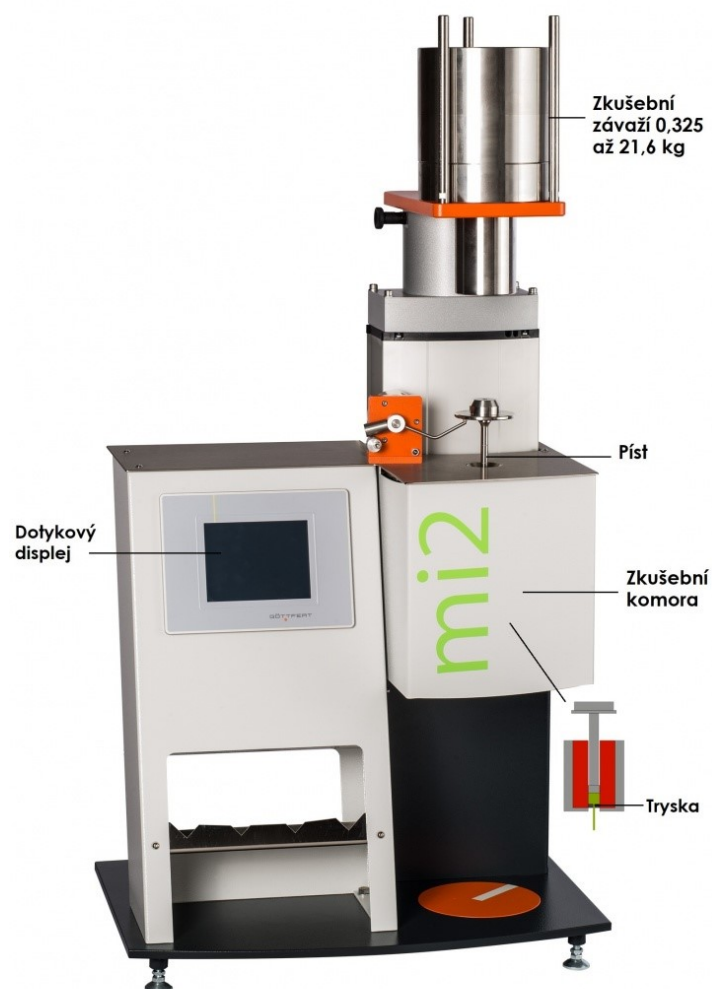
V průmyslu se používají různé způsoby, jak určit vlastnosti polymerní taveniny, jedním z nich je index toku taveniny. Tento index se používá jako jednoduchý a rychlý ukazatel charakteru polymerní taveniny a kvality polymeru. Touto metodou sice nezískáme kompletní obraz o chování polymerní taveniny, protože měření probíhá za konstantní teploty, ale je to spolehlivý nástroj, jak vyhodnotit a posoudit vlastnosti daného polymeru. [13]

Index toku taveniny (ITT, anglicky MFI) je standardizovaná zkušební metoda (ISO 1133), která udává, jaké množství taveniny v gramech (MFR) nebo v cm^3 (MVR) proteče tryskou výtlačného reometru za 10 minut při přesně definovaných teplotních a tlakových podmínkách. Z uvedené definice je vidět, že hmotnostní (MFR) a objemový (MVR) index toku taveniny se liší pouze ve vyjádření množství, kdy jednou je v gramech a podruhé je v cm^3 . Objemový index toku taveniny se používá pouze jako srovnávací ukazatel, pro výpočty však není vhodný. [14]

Na Obr. 9 je zobrazeno, jak se stanovuje objemový průtok pomocí průtokoměru a na Obr. 10 je zobrazen přístroj k určení indexu toku taveniny.



Obrázek 9 Schéma objemového toku taveniny (průtokoměr) [14]

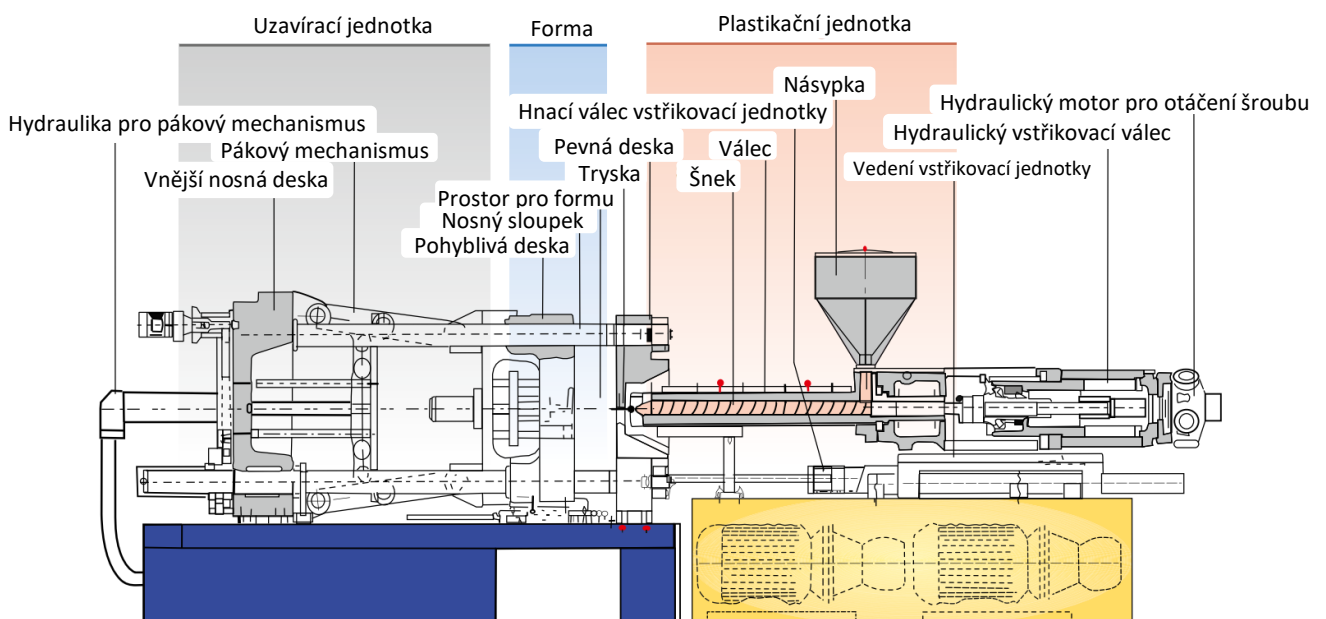


Obrázek 10 Přístroj k měření ITT [15]

2 VSTŘIKOVACÍ STROJ

Vstřikování je jedna z hlavních technologií ke zpracování polymerů. Prostřednictvím formy vytváří z roztaveného polymeru hotové výrobky různých tvarů, které jinými technologiemi nelze vytvořit. Výhodou této technologie je její výrobní rychlost, nákladová efektivnost a schopnost vyrábět složité výrobky s vysokou přesností. Hojně se využívá k přetváření termoplastů, ale také je vhodná pro vytváření výrobků z reaktoplastu. Vstřikování se provádí pomocí vstřikovacího stroje, který se z historického hlediska vyvinul z pístového stroje až po stroj se šnekem, který v roce 1951 vyvinul William H. Willert a tento koncept byl jen v průběhu let zdokonalován. V dnešní době se používají oba koncepty, jak vstřikovací stroj s pístem, tak stroj se šnekem, avšak díky dobrému výkonu, spolehlivosti a lepší rychlosti tavení je stroj se šnekem podstatně používanější variantou. [2]

Vstřikovací stroj se skládá ze vstřikovací jednotky, uzavírací jednotky a pohonné jednotky, jak je znázorněno na Obr. 11. V rámci stroje slouží vratný šnek jak k plastikaci materiálu, tak ke vstřikování taveniny do formy. Uzavírací jednotka slouží k pevnému uzavření formy a také k automatickému otvírání a zavírání formy, během formování výrobku. Pohonná jednotka generuje buď hydraulickou nebo elektrickou energii pro každý pohyb stroje. Pohyby stroje jsou řízeny řídicí jednotkou, díky čemuž je zajištěna požadovaná kvalita vyráběného dílu. Zároveň také monitoruje vstřikovací proces, což je důležité pro jeho případnou optimalizaci. [2]



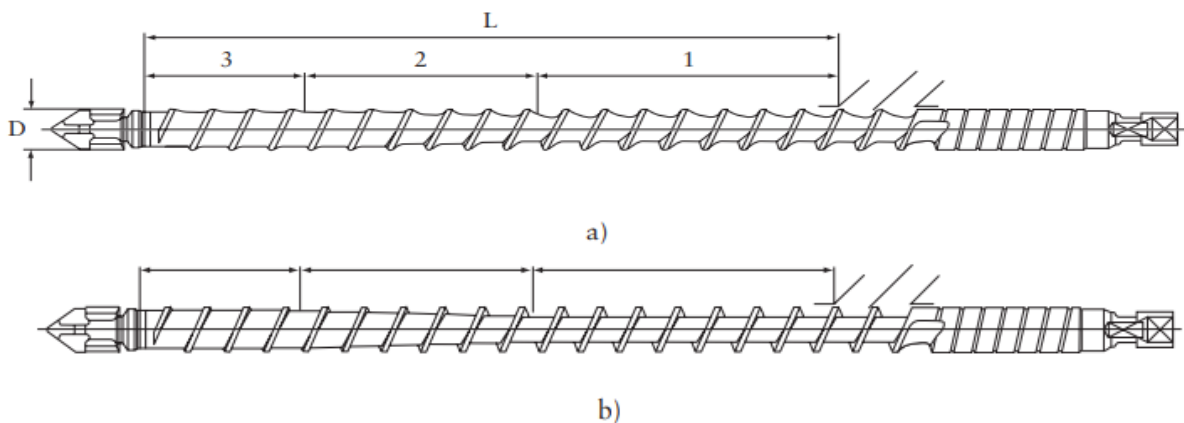
Obrázek 11 Schéma vstřikovacího stroje [10]

2.1 Vytlačovací šnek a jeho zóny

Jedna z nejdůležitějších specifikací šneku je poměr L/D , tedy délky a jeho průměru. Poměr se mění s ohledem na druh materiálu, který je zpracováván, u termoplastů je tento poměr přibližně 20:1. Vyšší poměr L/D se obvykle používá pro termoplasty s barevnými přísadami, zvláště u polypropylenu (PP) a polyethylenu (PE), protože umožňuje lepší promíchání barviva. Stejně tak se doporučuje vyšší poměr L/D pro stroje s rychlým cyklem a zvýšenou kapacitou. [16]

Z Obr. 12 je zřejmé, že konstrukce šneku se po jeho délce mění. Obecně se šnek rozděluje na tři zóny: 1) vstupní část, 2) plastikační (přechodová) zóna a 3) výstupní zóna. Velikost zón se liší podle druhu a materiálových charakteristik polymeru. Šnek se může rozdělit na pasivní a standardní šnek. Pasivní šnek má nízké hodnoty smykových napětí a nízký kompresní poměr, proto má malé míchací účinky a slouží pouze k dopravě a tavení materiálu, proto se také někdy označuje jako šnek dopravní. Standardní šnek má oproti tomu velké hodnoty smykového napětí a kompresního poměru, proto má výrazně vyšší míchací účinky. Kompresní poměr je poměr hloubky vstupní štěrbiny a hloubky výstupní štěrbin. Standardní kompresní poměr je u termoplastů zhruba 2:1 a u citlivějších termoplastů, jako je PVC je pak ještě nižší a to 1,6:1. [16]

Kompresní poměr a rychlost má velký vliv na výkon tavení. Jeli kompresní poměr příliš nízký, může být omezena schopnost vyvinout tlak ve směru proudění. Nižší tlak pak snižuje rychlost tavení, případně i rychlost vytlačování polymeru z extruderu. Pokud je naopak kompresní poměr příliš vysoký, může být tlak na konci přechodové zóny, čímž dojde k lokálnímu nárustu teploty a v tomto místě i k degradaci teplotně citlivých materiálů. [17]

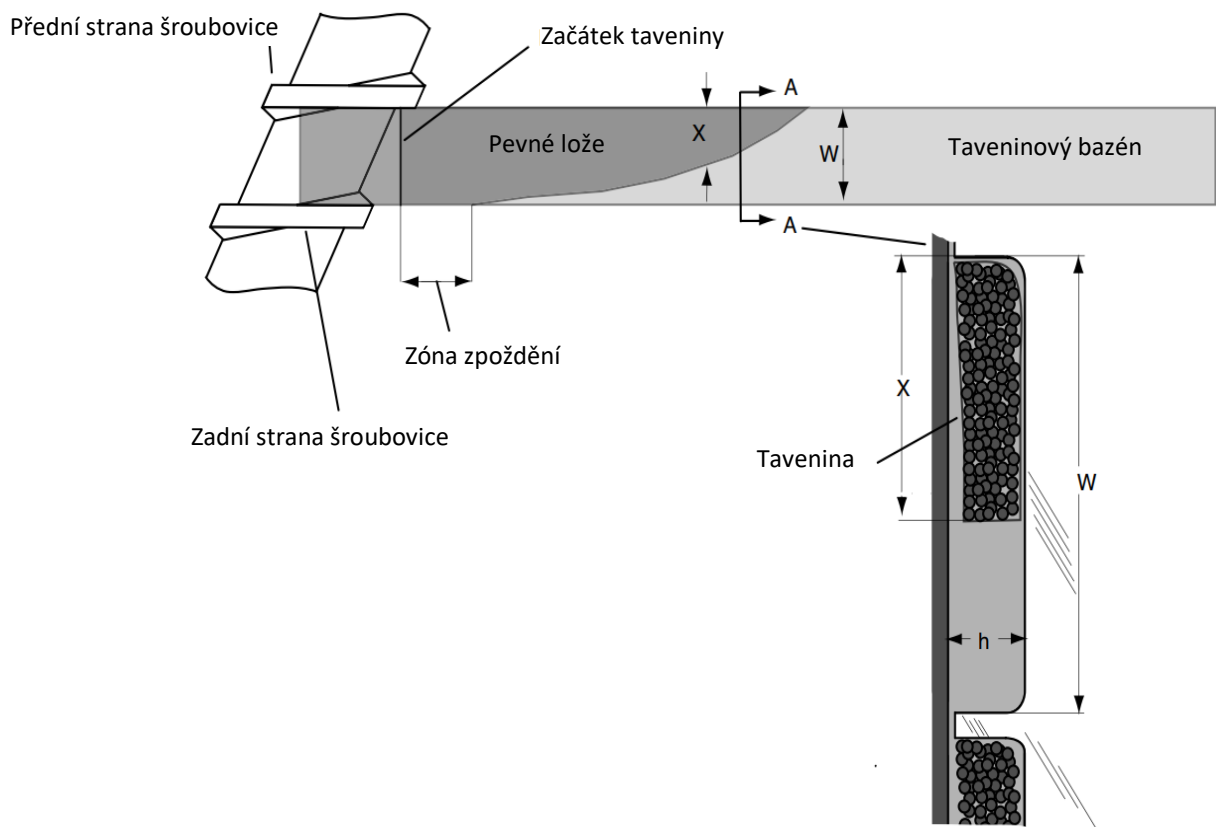


Obrázek 12 Zóny vstřikovacího šneku [16]

a) pasivní šnek, b) standardní šnek

2.2 Proces tavení granulátu

Vše začíná nasypaním granulátu do násypky stroje, z násypky se granulát dostane do vstupní zóny, odkud je dopravován pomocí šneku dál k ústí extrudéru. Ve vstupní zóně je potřeba šnek chladit, aby se granulát neroztavil předčasně a byl tak vygenerován dostatečný tlak, který dopraví polymer dál k ústí. Granule polymeru se taví v přechodové zóně šneku. Až ze dvou třetin je tavení polymeru způsobeno disipací, tedy třením granulátu o stěnu válce, čímž se uvolní energie, která polymer roztaví. Proto jsou válce extruderu různě zdrsněné nebo dokonce drážkované, aby se zvýšil třecí koeficient, a tedy i tření. Zbylá třetina energie, která taví polymer pochází od topných pásů. Délka přechodové zóny se stanovuje podle druhu materiálu, zejména podle jeho vlastností, dále podle geometrie šneku a podmínek zpracování. Proces přeměny polymerního granulátu je zobrazen na Obr. 13, na kterém vidíme jak se neroztavený granulát tzv. tuhé lože mění na taveninu. Na Obr. 13 je také znázorněn příčný řez šnekovým kanálem v zóně, kde se polymer taví. Tuhé lože (granulát) je tlačeno proti přední šroubovici šneku a čerstvě roztavený polymer je stírán dozadu, kde se vytváří tzv. taveninový bazén. [18]



Obrázek 13 Schématické zobrazení procesu tavení polymeru [18]

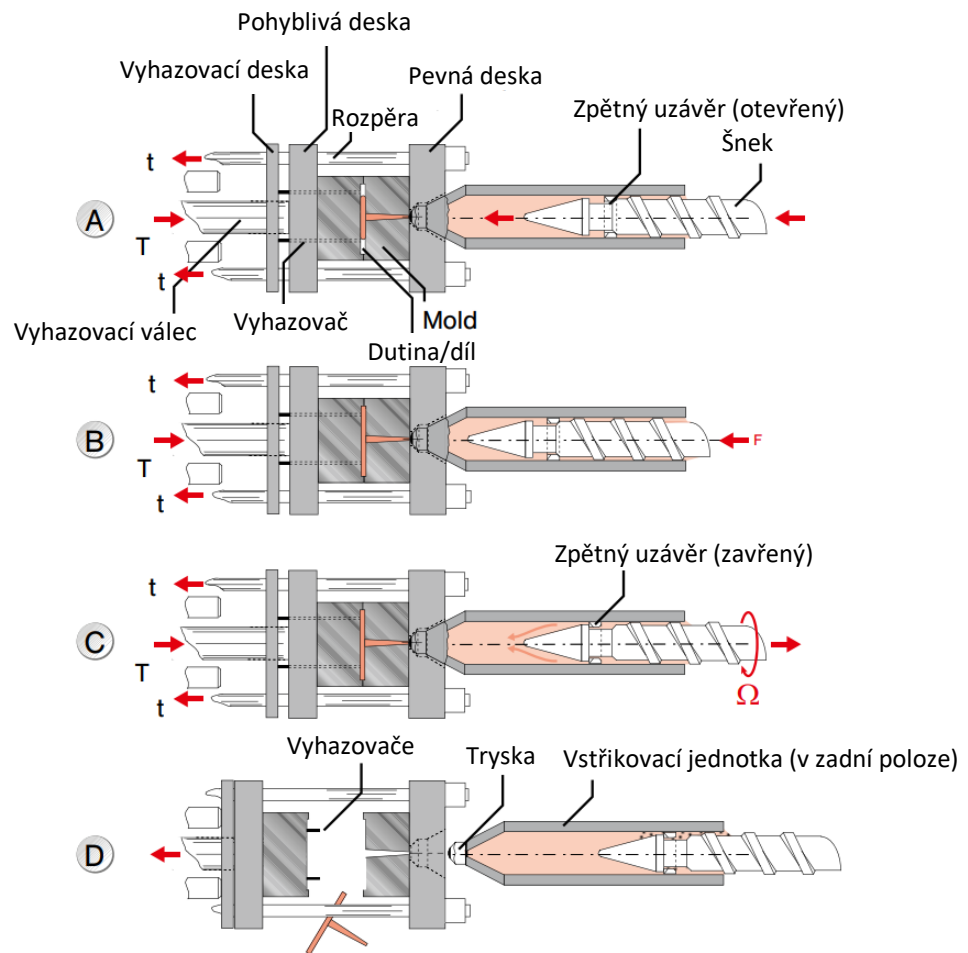
2.3 Vstřikovací cyklus

Vstřikovací cyklus je sled událostí, který začíná zavřením vstřikovací formy a končí vyhozením hotového výrobku z formy, jak je zobrazeno na Obr. 14. Detailně to probíhá tak, že se uzavře vstřikovací forma a vstříkne se polymerní materiál do dutiny formy. Po naplnění dutiny se stroj přepne na dotlak, který kompenzuje smrštění materiálu. Bez dotlaku by ve výrobku mohly vznikat vady, jako jsou propadliny. V dalším kroku dochází k nové plastifikaci materiálu. Probíhá to tak, že se šnek otáčí a zároveň posouvá zpět, čímž se materiál hromadí před čelo šneku a připravuje na další výstřik. Jakmile je díl dostatečně ochlazený, tak se forma otevře a výrobek je vyhazovači vyhozen z formy. [19]

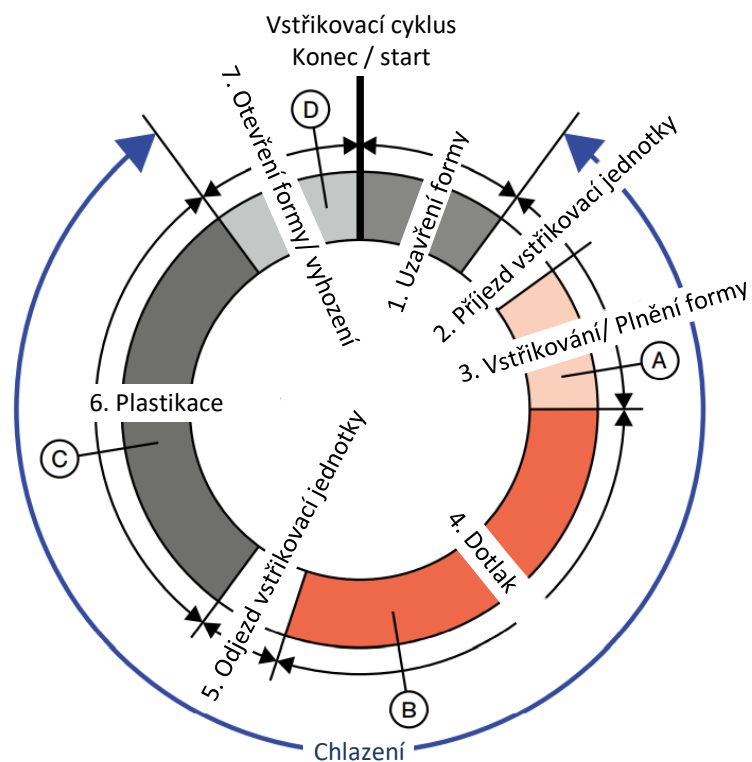
Posloupnost operací během vstřikovacího cyklu je schematicky zobrazena na Obr. 15. Z obrázku se dá vyčíst, že nejdelší čas z cyklu zabírá chlazení dílu ve formě. V některých případech může být však nejdelší operací plastifikace, a to v případě že je počet dutin formy pro plastikační jednotku vysoký, nebo stejně tak v případě že je díl tenkostěnný, pak je také doba plastifikace delší. Celková doba cyklu se vypočítá ze vztahu: [19]

$$t_{\text{cyklus}} = t_{\text{zavírání}} + t_{\text{dopřednýpohyb vstřikovací jednotky}} + t_{\text{vstřikování}} + t_{\text{chlazení}} + t_{\text{vyhazování}} \quad (3)$$

kde doba uzavření ($t_{\text{zavírání}}$) formy a vstřikování polymeru ($t_{\text{vstřikování}}$) může trvat desetiny sekundy až několik sekund. [19] Typický vstřikovací cyklus trvá mezi 15 sekundami až 1 minutou. [10]



Obrázek 14 Sled událostí během cyklu vstřikování [10]

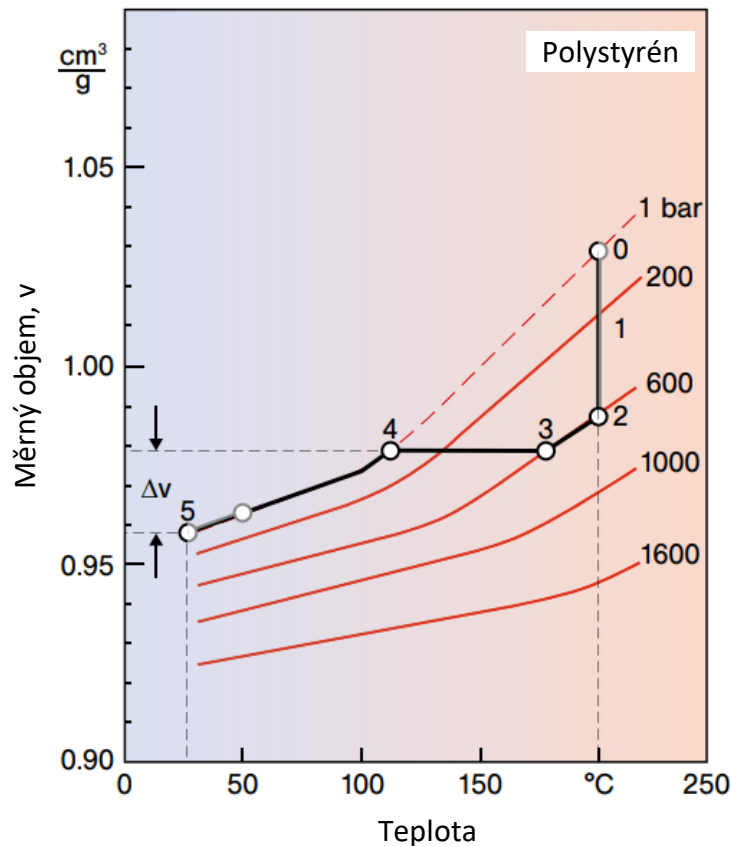


Obrázek 15 Vstřikovací cyklus [10]

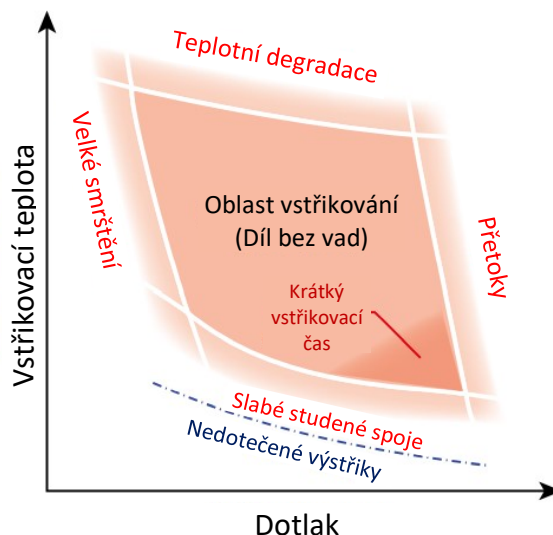
Průběh vstřikovacího cyklu se pro konkrétní materiál zaznamenává a dobře popisuje v pV diagramu. Na Obr. 16 je vstřikovací cyklus zaznamenán do pV diagramu pro polystyren. Diagram ukazuje čtyři základní procesy: izotermické (konstantní teplota) vstřikování (0-1) s nárůstem tlaku na dotlak (1-2), izobarický (konstantní tlak) proces chlazení během dotlaku (2-3), izochorický proces (konstantní objem) chlazení po zamrznutí brány s poklesem tlaku na atmosférický (3-4) a poté izobarické chlazení na pokojovou teplotu (4-5). Od bodu 4 do bodu 5 dochází k dodatečnému smrštění dílu, označeném jako Δv . Toto smrštění závisí na dvou parametrech – teplotě taveniny a udržovacím tlaku. [19]

Průběh vstřikovacího procesu probíhá v těchto krocích:

- Bod 0: Začíná proces vstřikování, kdy šnek posunem vpřed stlačí polymerní taveninu, která je připravena v plastikační komoře a dopraví ji vtokovým systémem formy do ústí vtoku na výstřiku.
- Bod 0-1: Dochází k objemovému plnění dutiny formy, až do bodu 1, kdy je dutina zcela zaplněna. Během tohoto procesu roste tlak vlivem odporu vtokových kanálků.
- Bod 1-2: V této fázi je tavenina v dutině stlačovaná a polymerní tavenina začíná od stěn formy chladnout.
- Bod 2: Přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak.
- Bod 2-3: Probíhá dotlaková fáze a chlazení výrobku ve formě. Jak se výrobek ochlazuje, dochází ke smrštění a toto smrštění je kompenzováno dotlakem, který doplňuje taveninu do formy. Dotlak končí v okamžiku zatuhnutí vtokového ústí. Při špatném nastavení bodu přepnutí může docházet k nedotokům (předčasné přepnutí) nebo naopak k přetokům (pozdní přepnutí).
- Bod 3: V tomto bodě došlo k zamrznutí vtokového ústí, další tlakové působení je zbytečné, a proto je dotlak zrušen.
- Bod 3-4: Dochází k postupnému snížení tlaku za konstantního objemu, a to až na atmosférický tlak (1bar).
- Bod 4-5: Probíhá chlazení výrobku za konstantního tlaku, dále vyhození z formy a dochlazení mimo formu na pokojovou teplotu. Vyhodnocení přesnosti výrobku se provádí až po cca 24 hodinách. [20]

Obrázek 16 Diagram $p-v-T$ pro polystyren [10]

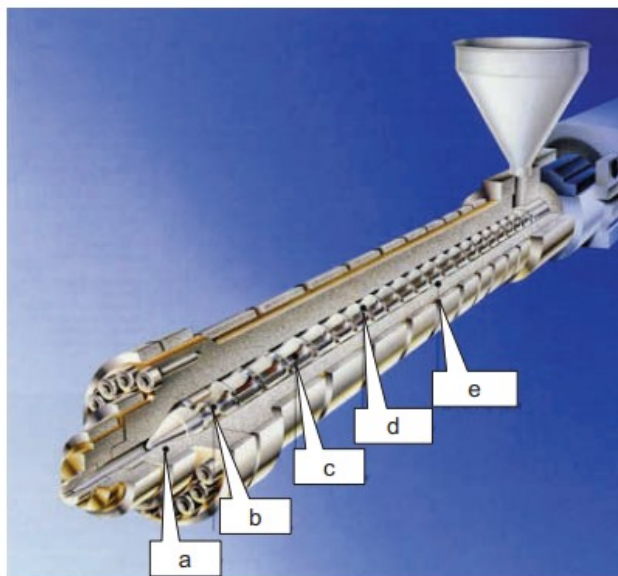
Na Obr. 17 je zobrazen diagram procesního okna pro vstřikování s krajními podmínkami. Diagram vyjadřuje závislost teploty a dotlaku. Teplota taveniny je ohraničená z jedné strany nízkou teplotou, která má za následek krátký výstřik, dojde tedy k nezaplnění dutiny formy. Z druhé strany je pak vysoká teplota, která vede k degradaci materiálu. Dotlak je ohraničen nízkým tlakem, který vede k nadměrnému smrštění, k tvorbě propadlin a nízké hmotnosti dílu. Z opačné strany je pak hranicí vysoký tlak, který vede k přetokům. [19]



Obrázek 17 Diagram vyjadřující závislost vstřikovací teploty a dotlaku [10]

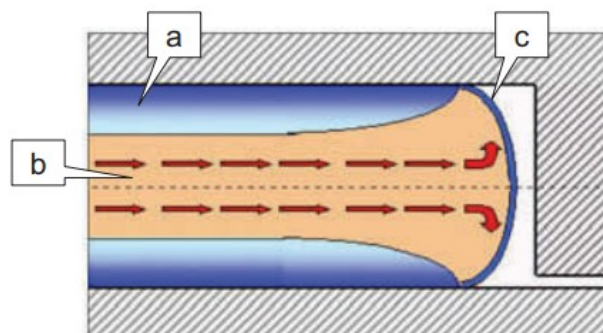
2.4 Fontánový tok

Díky zpětnému ventilu (Obr. 18) na konci šneku, může šnek pracovat zároveň jak dopravník materiálu, tak i vstřikovací píst, který dopravuje roztavený polymer do dutiny formy, a to je označováno jako objemové plnění. Polymer uvnitř dutiny formy teče tzv. fontánovým tokem, který je zobrazený na Obr. 19. K tomuto typu toku dochází, když se polymerní tavenina dotkne studené stěny formy, čímž zatuhnou okrajové stacionární vrstvy polymeru, a tak tavenina může téci pouze středem a doslova se převaluje přes zatuhnuté vrstvy, takže to připomíná proudění kapaliny z fontány. [21] Výsledkem je parabolický rychlostní profil, kdy nejvyšší rychlost je ve středu proudu taveniny. Je důležité poznamenat, že k fontánovému toku dochází pouze na čele proudu taveniny. [22]



Obrázek 18 Vstřikovací stroj [21]

- a) tryska, b) zpětný ventil, c) koncová pozice šneku na konci procesu plastifikace,
d) šroubovice šneku, e) topné pásy válce vstřikovacího stroje



Obrázek 19 Fontánový tok [21]

- a) stacionární zatuhlé vrstvy polymeru, b) nízkoviskózní jádro taveniny, c) čelo taveniny o vysoké viskozitě

3 VSTŘIKOVACÍ FORMA

Vstřikovací forma je v podstatě nástroj, kterým je roztavený polymer, převážně termoplast, vytvarován do požadovaného tvaru, následně ochlazen a vyhozen z formy v podobě hotového výrobku. Hlavní částí vstřikovací formy je dutina formy, která je negativním obrazem vstřikovaného výrobku. Forma se upevňuje mezi pohyblivou a nepohyblivou desku vstřikovacího stroje, jak je zobrazeno výše na Obr. 11. [23]

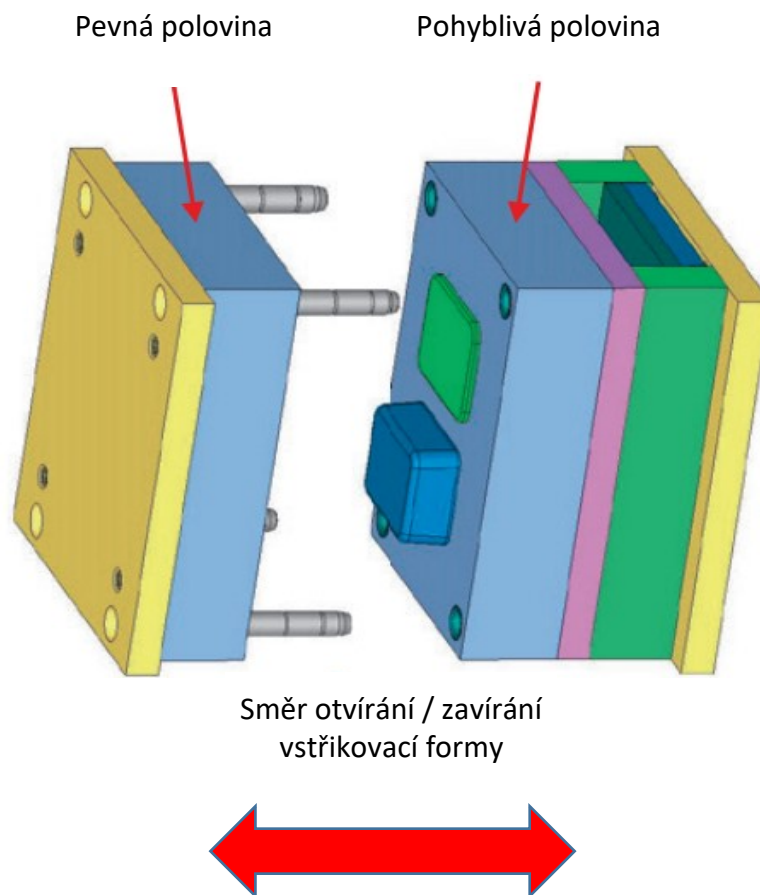
Z konstrukčního hlediska je vstřikovací forma složitý systém, který musí splňovat současně několik procesních požadavků. První primární funkcí je zadržet polymerní taveninu v dutině formy, tak aby se dutina zcela zaplnila a vytvořila plastovou součást, jejíž tvar je kopíruje tvar dutiny formy. Druhou primární funkcí vstřikovací formy je účinný a co nejrovnoměrnější přenos tepla z horké polymerní taveniny do kapaliny temperačního systému, aby bylo možné vyrábět vstřikované díly co nejrychleji a konzistentně. Třetí primární funkcí formy je účinné vyhození dílu z formy, tak aby nedocházelo k nadměrnému namáhání vstřikovaného dílu. Tyto tři primární funkce – zadržení taveniny, přenos tepla a vyhození výstřiku v sobě zahrnují sekundární požadavky vstřikovací formy. Například funkce zadržování taveniny ve formě vyžaduje, aby forma odolávala obrovským silám při vstřikování a nedošlo k její deformaci, otevření nebo posunu. Nadměrné posunutí může přímo ovlivnit rozměry vstřikovaného dílu, nebo způsobit otřepy kolem dělicí čáry vstřikovací formy. Této sekundární funkci se dosahuje použitím tuhých desek, podpěrných sloupů a vzájemně se blokujících součástí. [24]

Vstřikovací forma má mnoho konstrukčních řešení, takže existují různé typy forem. Mezi ty nejčastější patří základní dvoudesková forma, dále pak různé modifikace třideskových forem, formy s pohyblivými elementy, formy pro vytváření závitů, nebo formy pro multikomponentní vstřikování. [25]

Na začátku je důležité si také uvědomit, že vstřikovací formy nejsou levnou záležitostí, pohybují se v rozmezí deseti tisíců až milionů korun, proto při jejich navrhování je podstatné postupovat obezřetně a návrhy si ověřovat prostřednictvím softwarových simulací toku. A je dobré si také uvědomit, že náklady na formu jsou souhrnem skutečných nákladů vynaložených na výrobu formy, které zahrnují režijní náklady na výrobu formy, ale nezahrnují žádný příplatek za riziko, či jejich ziskovost. Skutečné náklady jsou součtem peněz vynaložených na suroviny, materiál, hardware a služby, plus cena práce těch, co se na procesu výroby vstřikovací formy podíleli. [26]

3.1 Základní dvoudesková forma

Základní dvoudesková forma má dvě části (2 sestavy), které do sebe zajišťují, a tak uzavírají dutinu formy. Směr, ve kterém se vstřikovací forma nebo vstřikovací stroj otevírá a zavírá se nazývá hlavní směr odformování. Všechny pohyby vstřikovacího stroje, vstřikovací formy a pohybujících se částí vstřikovací formy probíhají v axiálním směru. Základní dvoudesková forma je nejčastěji používanou formou. Její výhoda spočívá zejména ve snadnější údržbě, díky méně pohyblivým částím a také menšího počtu prvků, ze kterého je složena. Na Obr. 20 je znázorněn směr odformování formy, obě části, pevná i pohyblivá část se otevírají a zavírají v axiálním směru. Plastový díl musí být u této formy navržen tak, aby nedocházelo při otvírání formy k jeho kolizi a poškození, proto se klade důraz na správné zvolení dělicí roviny formy. [25]



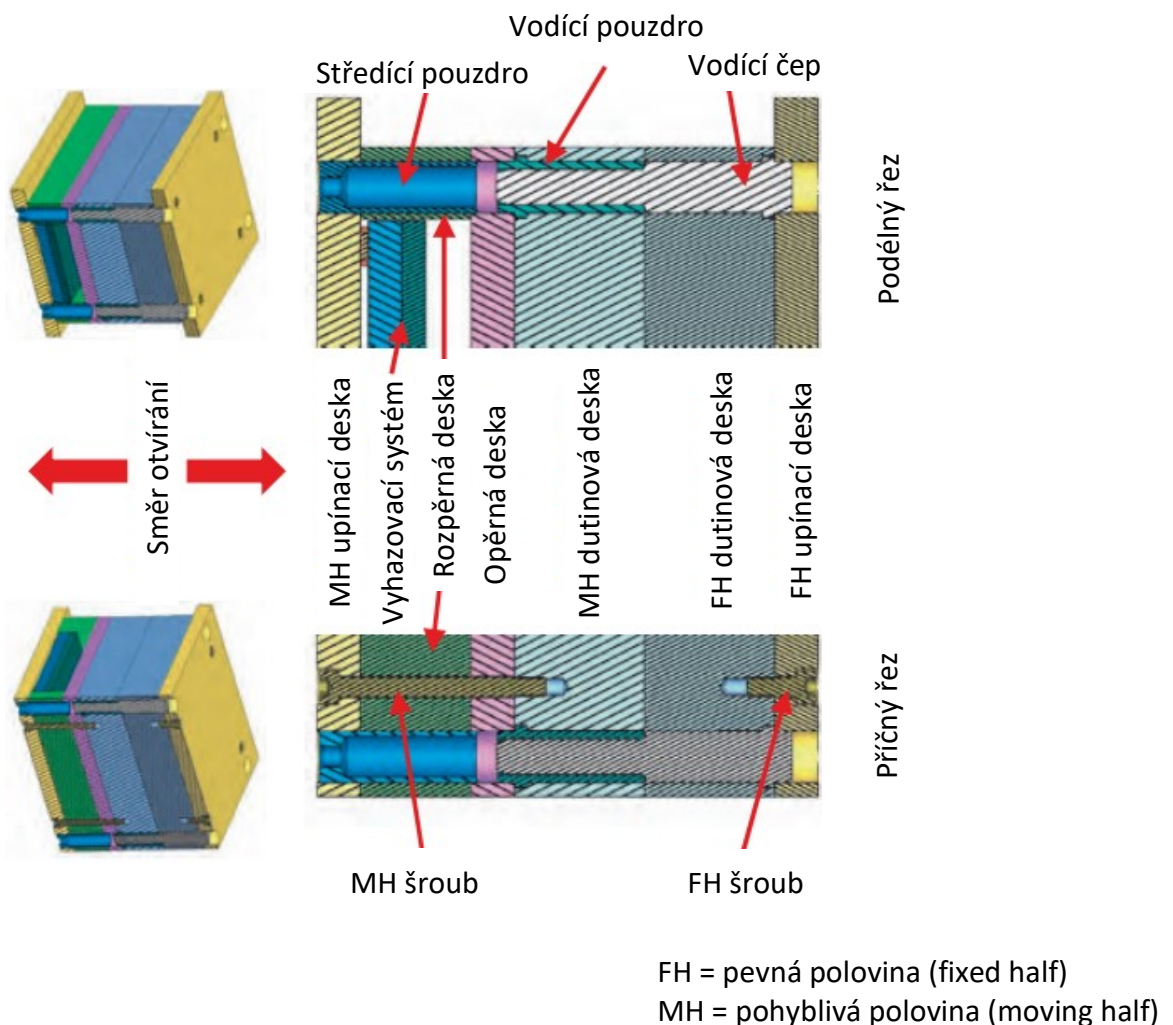
Obrázek 20 Směr odformování [25]

3.1.1 Rozvržení základní dvoudeskové formy

Základní dvoudesková forma se skládá z pevné a pohyblivé části, které jsou tvořeny z několika desek, vodících čepů a středících prvků. Vodící a středící prvky vůči sobě přesně vymezují jednotlivé desky formy. [25]

Pevná část se skládá z upínací desky a tvarové desky (cavity plane). Vodící čepy jsou instalovány ve tvarové desce. Na zadní straně jsou opatřeny přesahem, díky kterému jsou pevně v desce usazeny a proti posuvu jsou zajištěny upínací deskou, viz. Obr. 21. [25] Upínací deska by měla být z tvrdé oceli o minimální tloušťce 3 mm. [27]

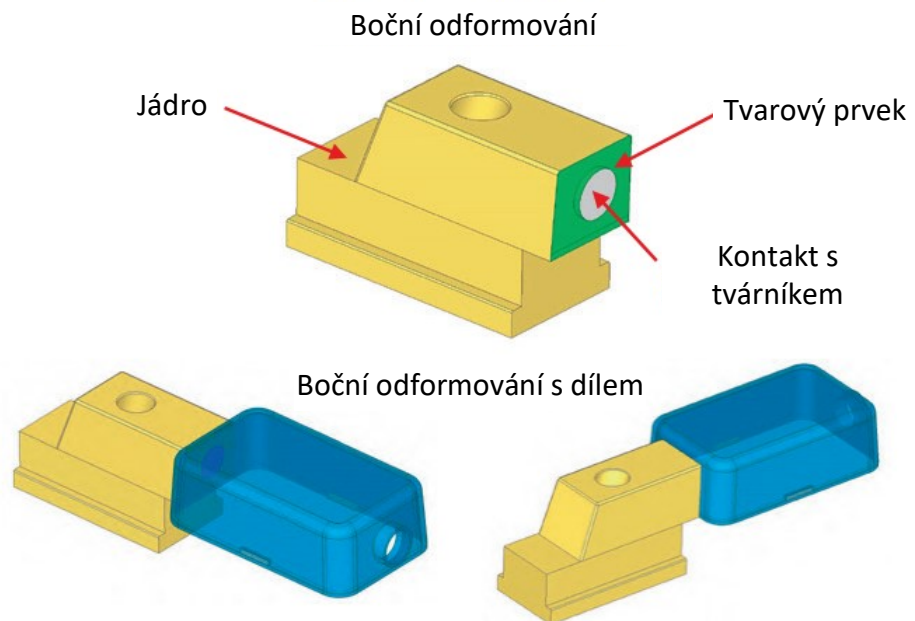
Pohyblivá část se skládá z tvarové desky, opěrné desky, ze dvou rozpěr, vyhazovací desky a upínací deska. Vodící pouzdra jsou zde opět opatřena přesahem a upevněna ve tvarové desce. Rozpěry se montují s upínací deskou a s přidavnými vodícími objímkami. Jednotlivé desky, kromě vyhazovacích desek, jsou k sobě spojeny šrouby, jak je v řezu zobrazeno na obr. 21. [25]



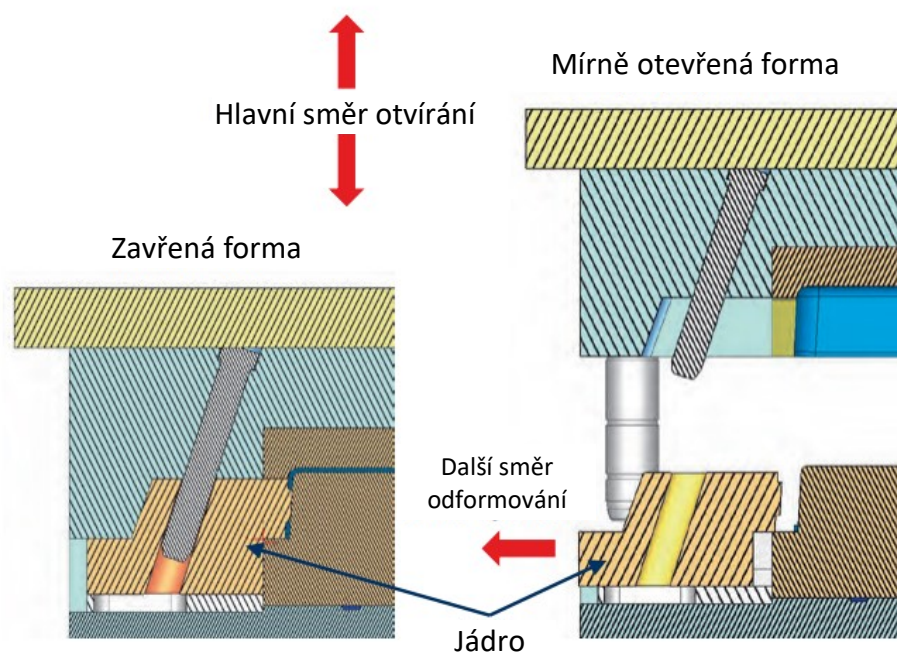
Obrázek 21 Podélný a příčný řez formou [25]

3.2 Boční odformování

V případě, že výrobek obsahuje boční otvory je nutné zařadit do systému vstřikovací formy boční pohyblivá jádra (Obr. 22), která se během otvírání formy posouvají v radiálním směru a tím dochází k odformování bočních otvorů. Pohyb jádra je realizovaný hydraulicky, anebo pomocí šikmého kolíku, jak znázorněno na Obr. 23. Šikmý kolík využívá toho, že jak se otvírá forma, tak se zároveň po kolíku posouvá pohyblivé jádro směrem od výrobku. Kolík je pevně spojen s horní nepohyblivou částí formy. [25]



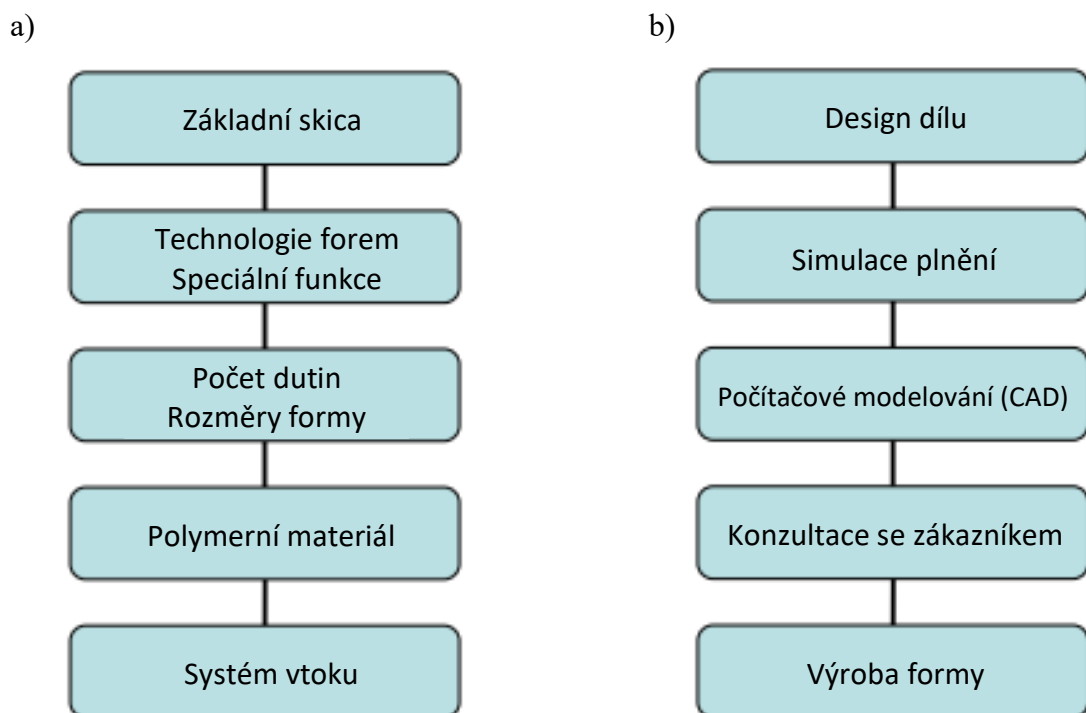
Obrázek 22 Boční odformování [25]



Obrázek 23 Boční odformování [25]

3.3 Navrhování formy

Navrhování formy (viz. Obr. 24) zpravidla začíná základní skicou formy, aby se zjistilo, jakým způsobem bude řešeno odformování výrobku. Je nezbytné určit, jaké speciální funkce jsou potřebné k odformování výrobku a ověřit, zda je tento koncept vhodný pro plně automatizovanou výrobu. Poté se určí počet dutin, který ovlivní rozměry vstřikovacího stroje a vstřikovací formy. Dalším krokem je určení materiálu, pro který se vstřikovací forma vyrábí, u tohoto kroku je potřeba si odpovědět na následující otázky: Jak dobře polymerní materiál teče (jakou má viskozitu)? Potřebuje být forma chlazená, nebo zahřívána? Jaký systém vtoků bude použit? Po zodpovězení všech otázek, lze začít s návrhem formy. Za prvé se vytvoří 3D model vstřikovaného dílu. V dalším kroku se provádí simulace plnění vstřikovací formy. U dílu, který je vystaven velkému mechanickému namáhání, může být také nutná analýza konečných prvků (MKP) a simulační proces. Dále se v CAD softwaru, jako je např. CATIA, SolidWorks nebo AutoCad, vymodeluje kompletní vstřikovací forma se všemi náležitostmi. Po dokončení této fáze se doporučuje konzultace se zákazníky, za účelem detailnějšího vyjasnění všech požadavků, které měly být naplněny. Poté dojde ke schválení návrhu a forma se včetně individuálních součástí vyrábí. [28]



Obrázek 24 Proces návrhu formy [28]

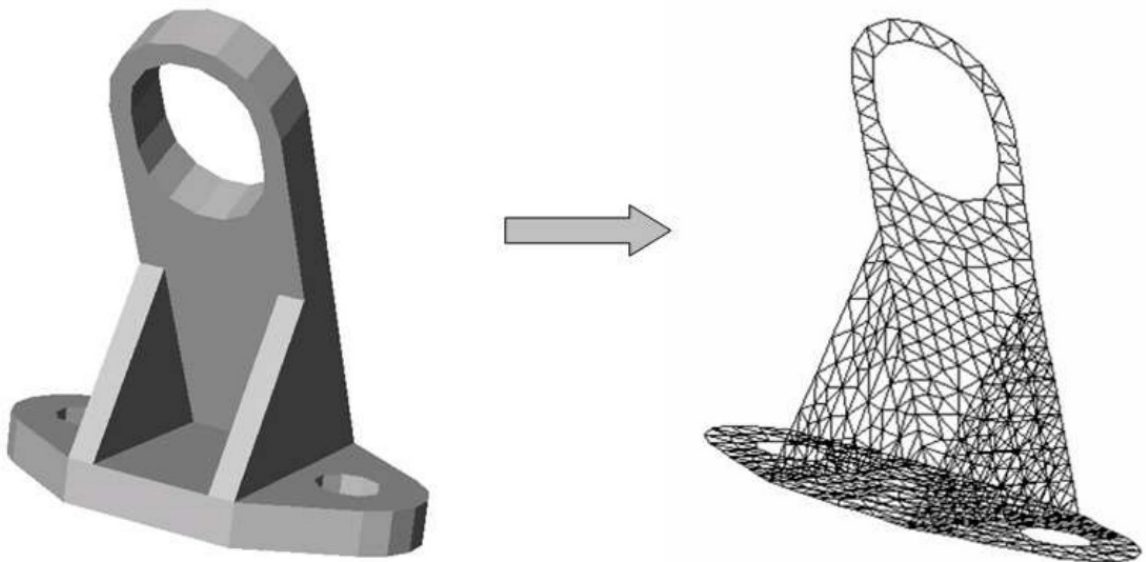
a) informační fáze, b) návrhová fáze

3.4 Simulace plnění

K řešení polymerního toku je nutné použít numerický přístup, u kterého je využívána metoda konečných diferencí a konečných prvků. Konkrétní použitá numerická technika pro vytvoření simulace toku polymeru se hodnotí na základě požadované přesnosti výpočtu a výkonu procesoru a paměti zvoleného počítače. V praxi se používají tři numerické techniky, první je metoda střední roviny, druhá je Dual Domain a poslední metodou je 3D analýza. [29]

3.4.1 Metoda střední roviny (Midplane methods)

Metoda střední plochy je nejstarší a spočívá ve vygenerování střední rovinné sítě, kde síť se skládá z trojúhelníků. Dříve byla hojně používána, avšak pro její nedostatky se od ní v současnosti opouští a spíše se přechází na metodu Dual Domain (popsanou níže). Nevýhodou této metody je nutnost vytvoření střední roviny s definovanou tloušťkou ze skutečného 3D modelu, jak je zobrazeno na Obr. 25. Vygenerovaná síť měla často nespojitosti, které se musely upravit ručně, což z komerčního hlediska není žádoucí. Druhou nevýhodou je, že čas potřebný k vytvoření střední roviny se většinou pohybuje v řádu hodin. [29]

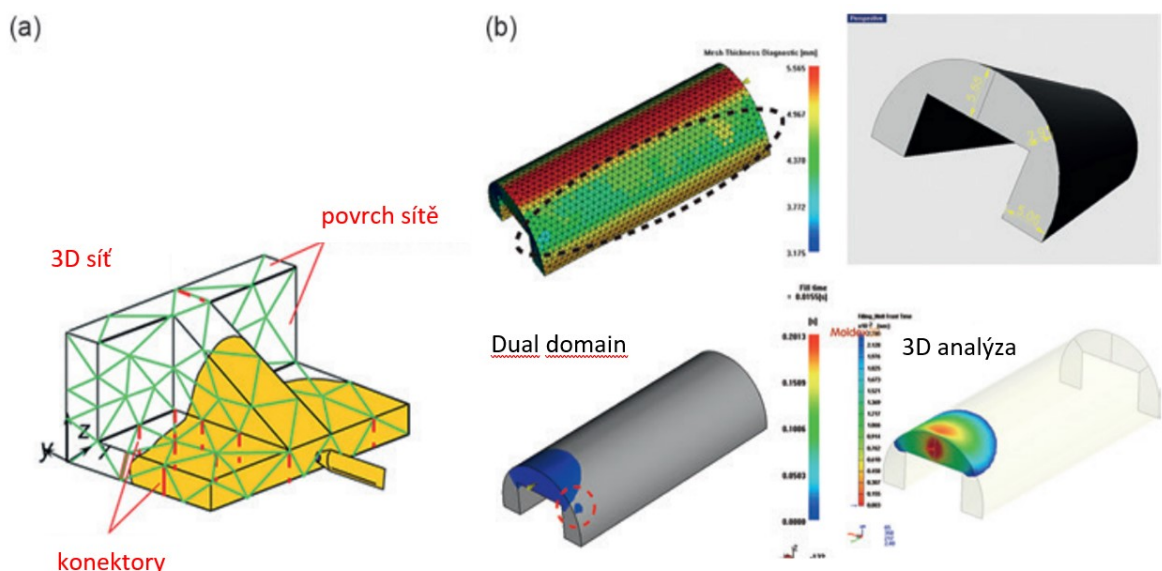


Obrázek 25 Generování střední roviny [29]

3.4.2 Dual Domain

Dalším přístupem, kdy namísto určení střední roviny z 3D geometrie je převedení 3D geometrie na ekvivalentní 2,5D geometrii. Tak vznikla metoda Dual Domain. V základu se jedná o to, že se nejprve vygeneruje povrchová stereolitografická síť, která je tvořena trojúhelníky a je dále zpřesňována. V dalším kroku se vytvoří vztah mezi prvky na horním a dolním povrchu modelu a to tak, aby bylo možné nadefinovat tloušťku. Posledním krokem je přidání spojovacích prvků pro zachování fyzikálně realistických vzorců proudění. Odtud se odvodil anglický název Dual Domain, protože došlo k propojení horní a dolní sítě v bodě vstřikování a materiál pak proudí současně horním a dolním povrchem modelu (ve skutečnosti to znamená, že se provádí dvě analýzy, každá pro jednu stranu povrchu sítě). Jelikož jsou vygenerované dvě sítě (horní a dolní povrch), na kterých se řeší analýzy, je celkový počet operací přibližně dvojnásobný, než tomu je v případě střední roviny. V důsledku toho vyžaduje tento přístup více výpočetního času. [29]

Ačkoliv je metoda dvou domén jednoduchá, skrývá v sobě riziko, pokud jde o díly, u nichž je obtížné definovat tloušťku. Takový díl je zobrazen na Obr. 26, kdy vnější strana je kruhová a vnitřní je obdélníková, kde mohou právě vznikat chyby jako např. nespojitosti taveniny. Proto se pro takovéto případy používá 3D analýza, která je popsána níže a přináší správné výsledky. [30]



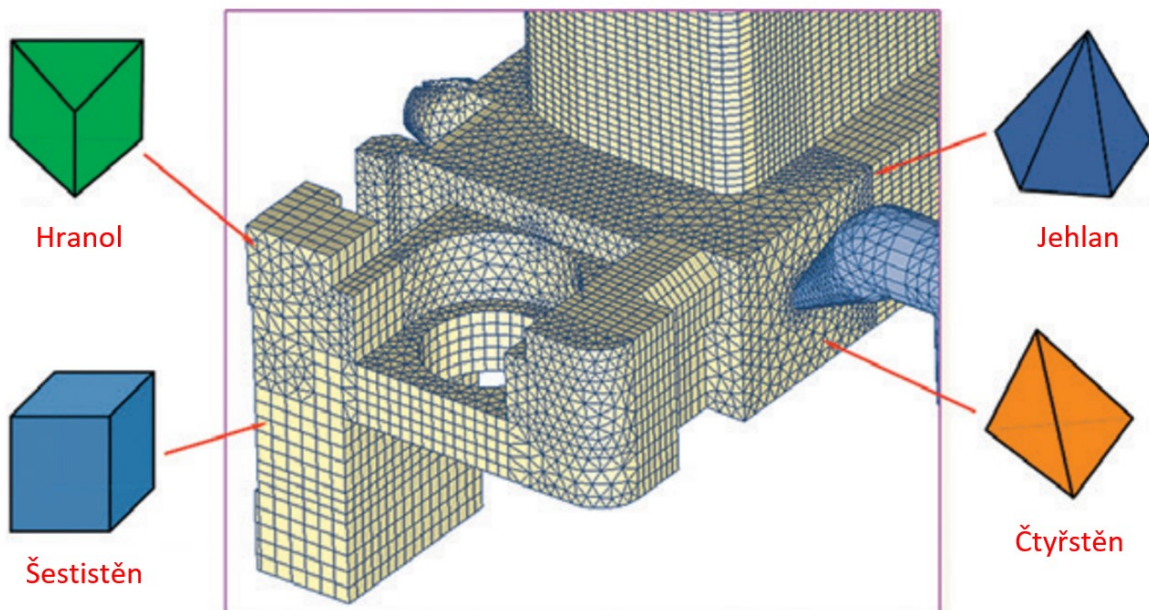
Obrázek 26 Vygenerovaná síť výrobku metodou Dual Domain [30]

a) Dual domain, b) model s obtížně definovatelnou tloušťkou

3.4.3 3D analýza

Na rozdíl od metody Dual Domain, která používá jak konečné diferenciály, tak metodu konečných prvků, 3D analýza se omezuje pouze na jednu numerickou metodu a tou je metoda konečných prvků. [29] Pro vygenerovanou síť se v zásadě používají následující typy trojrozměrných sítí: šestistěn, hranol, jehlan a čtyřstěn (tetraedr), jak je znázorněno na Obr. 27. [30] Přičemž se upřednostňuje tetraedrické síťování, které může být provedeno automaticky. [29] Zároveň platí, že tetraedry jsou vhodné pro tlustostěnné výrobky a pro hybridy jsou vhodnější kombinace. Vysoce kvalitní síť, která nejlépe vystihuje geometrické charakteristiky dílu je velmi žádoucí pro dosažení přesných analýz plnění vstřikovacích forem. Proto zvolení správného typu sítě je zásadní, pokud se má dosáhnout co nejvyšší přesnosti. [30] Metoda 3D analýzy je nejvíce výpočetně náročná, z důvodu velkého počtu prvků, které tvoří síť a zároveň i nejpřesnější z uvedených metod. [29]

Pro řešení simulací se používá různých softwaru, v diplomové práci se bude využívat software Moldflow. Tento software umožňuje si zvolit jednu ze tří typů analýz: midplane (střednicové plochy), dual domain a 3D analýza. Pro složitý tvar vstřikovaných výrobků se midplane, tzn. metoda založená na modelech středních rovin, téměř nevyužívá, protože z důvodu složitých tvarů by bylo její použití komplikované a časově náročné. [31]

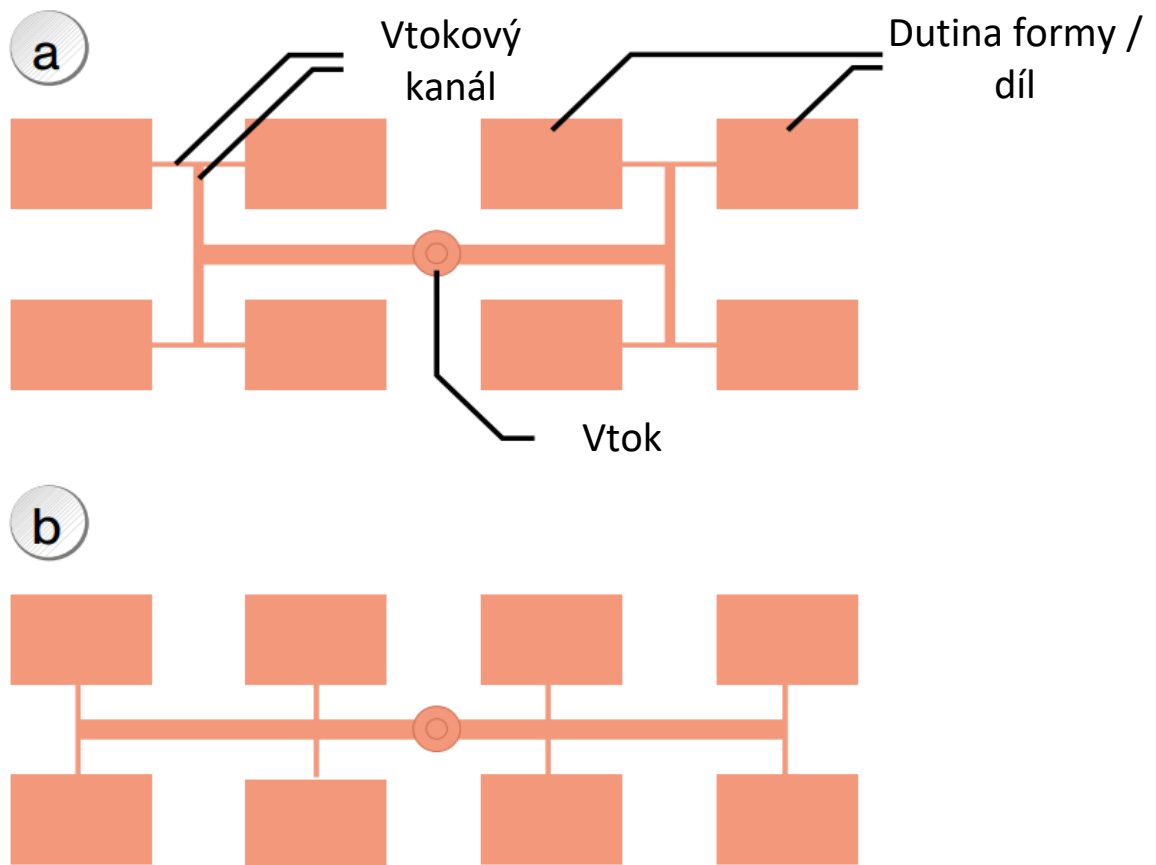


Obrázek 27 Kombinace různých druhů sítě na jednom dílu [30]

3.5 Vtokový systém

Vtokový systém je vlastně sestava různých kanálů, kterým proudí tavenina polymeru do dutiny formy. Podle toho, jestli je vyhříváný nebo ne, se rozděluje na horký vtokový systém a studený vtokový systém. Navržení funkčního vtokového systému má mnoho specifik. Vtokové kanály by měly být co nejkratší, aby došlo ke zkrácení vstřikovacích dob a k úspoře materiálu. Také rozvržení vtokových kanálů má nemalý vliv na kvalitu vstřikovaného dílu. [10]

Na Obr. 28 je zobrazeno nejčastější rozvržení vtokového systému. V prvním případě (Obr. 28 a) je to systém symetrický, tzn. všechny dutiny jsou zaplněny stejným způsobem a za stejnou dobu. Nevýhodou tohoto vyváženého vtokového systému je, že průtokové cesty jsou dlouhé, což vede k vysoké spotřebě materiálu a tlaku. Na druhou stranu asymetrický systém ve druhém případě (Obr. 28 b) vede k dílům různé kvality. Zde se však nabízí možnost vybalancovat systém různými průměry kanálů. [10]



Obrázek 28 Schématické zobrazení různého rozvržení vtokového systému [10]

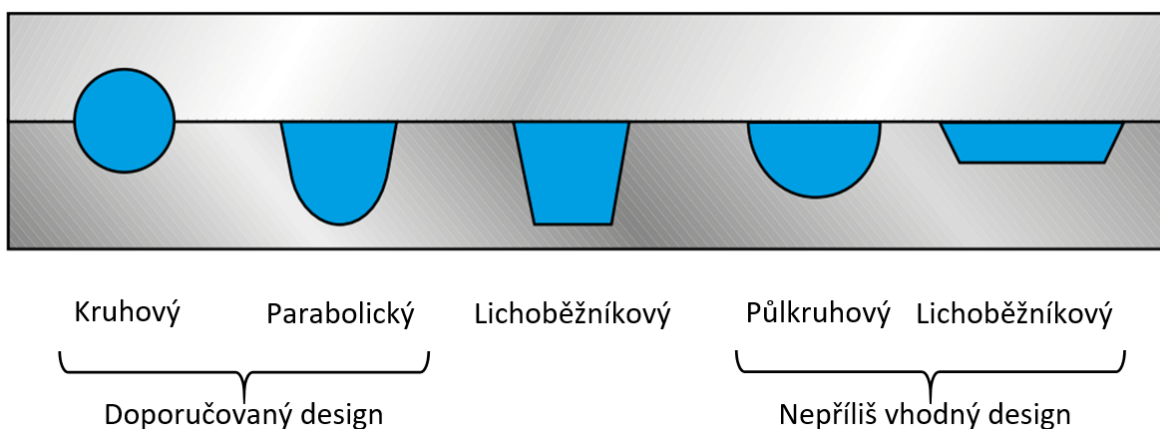
a) symetrické rozložení, b) asymetrické rozložení

3.5.1 Efektivní vtokový kanál

Vtokový kanál je určen pro dopravení taveniny ze vstřikovacího stroje do dutiny vstřikovací formy. Aby se dobře konstruoval, tak se nejčastěji obrábí do dělicí roviny vstřikovací formy. [32]

Má různé tvary průřezů, pro svou efektivitu se nejčastěji používá kanál s kruhovým průřezem, který má nejnižší tlakové ztráty na spotřebovaný materiál. Kruhový nebo prstencový průřez vtokového kanálu se výhradně používá pro horké vtoky. Prstencový průřez bývá často zevnitř vyhříván a oproti kruhovému je méně efektivní. Dalšími tvary průřezů jsou parabolické nebo lichoběžníkové, jak je zobrazeno na Obr. 29. Pro studené vtoky jsou nejvíce vhodné kruhové nebo parabolické profily, případně lichoběžníkové. Výhodou parabolického a lichoběžníkového oproti kruhovému je, že se obrábí pouze jedna deska a díky tomu se zkracují časy na výrobu tohoto typu kanálu. Výhodou kruhového profilu je největší poměr průřezu k ploše, tím se zmenšuje odpor povrchu a tepelná výměna mezi formou a materiálem. Kruhový kanál také minimalizuje oblasti s nízkým průtokem v kanálu, což vede ke konzistentnějším podmínkám taveniny polymeru. Redukce oblastí s nízkým průtokem taveniny je důležitá zejména u horkých vtokových kanálů, kde delší setrvání polymeru v dané oblasti zvyšuje možnost degradace materiálu. [22]

Velikost a konstrukce vtokových kanálů má významný vliv na kvalitu vstřikovaných dílů a dobu vstřikovacího cyklu. Příliš velké průřezy kanálů neúměrně prodlužují dobu vstřikování a zároveň se spotřebovává i více materiálu. Naopak malé průřezy vtokových kanálů značně zvyšují vstřikovací tlak, což může vést k různým vstřikovacím vadám, jako je např. tryskový tok (Jetting), který je popsán níže. [32]

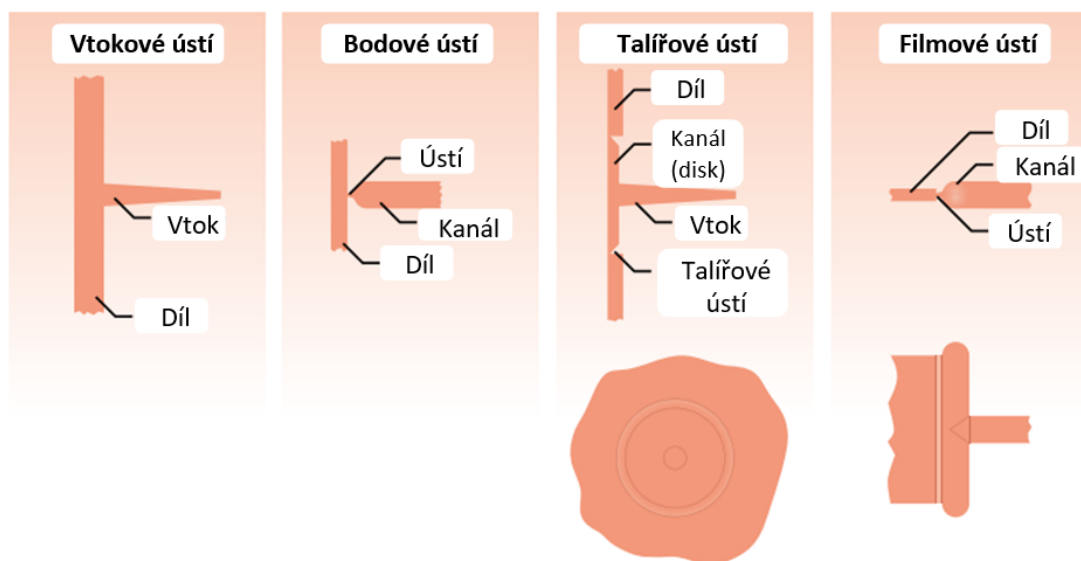


Obrázek 29 Průřezy vtoků používané ve vstřikovaných formách [22]

3.5.2 Studený vtokový systém

Studený vtokový systém se vyhazuje spolu se vstříkovaným dílem a po vyjmutí z formy se ořízne. Výhodou formy se studeným vtokem jsou nižší pořizovací náklady, nevýhodou je však viditelná stopa po vtoku. [10]

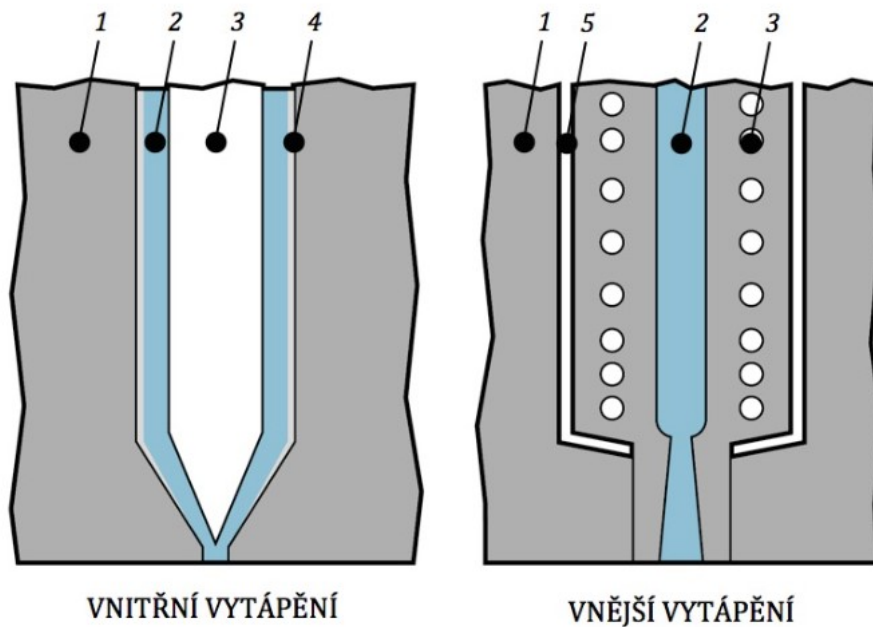
Při vstříkování velkých dílů slouží někdy vtok zároveň i jako ústí vtoku, jak ukazuje Obr. 30. Vtok je následně oříznut, což vyžaduje další povrchovou úpravu, v případě, že se jedná o pohledovou stranu. Dalším případem je bodové ústí vtoku, které je malé, dá se dobře odlomit a nezanechává na výrobku takovou viditelnou stopu. [10] U většiny termoplastů nepřesahuje průměr 1,5 mm. [1] Posledními typy vtoků jsou filmový vtok, který se využívá k eliminaci orientace, nebo talířové ústí vtoku pro válcové výrobky. [10]



Obrázek 30 Schématické zobrazení různých typů vtoku [10]

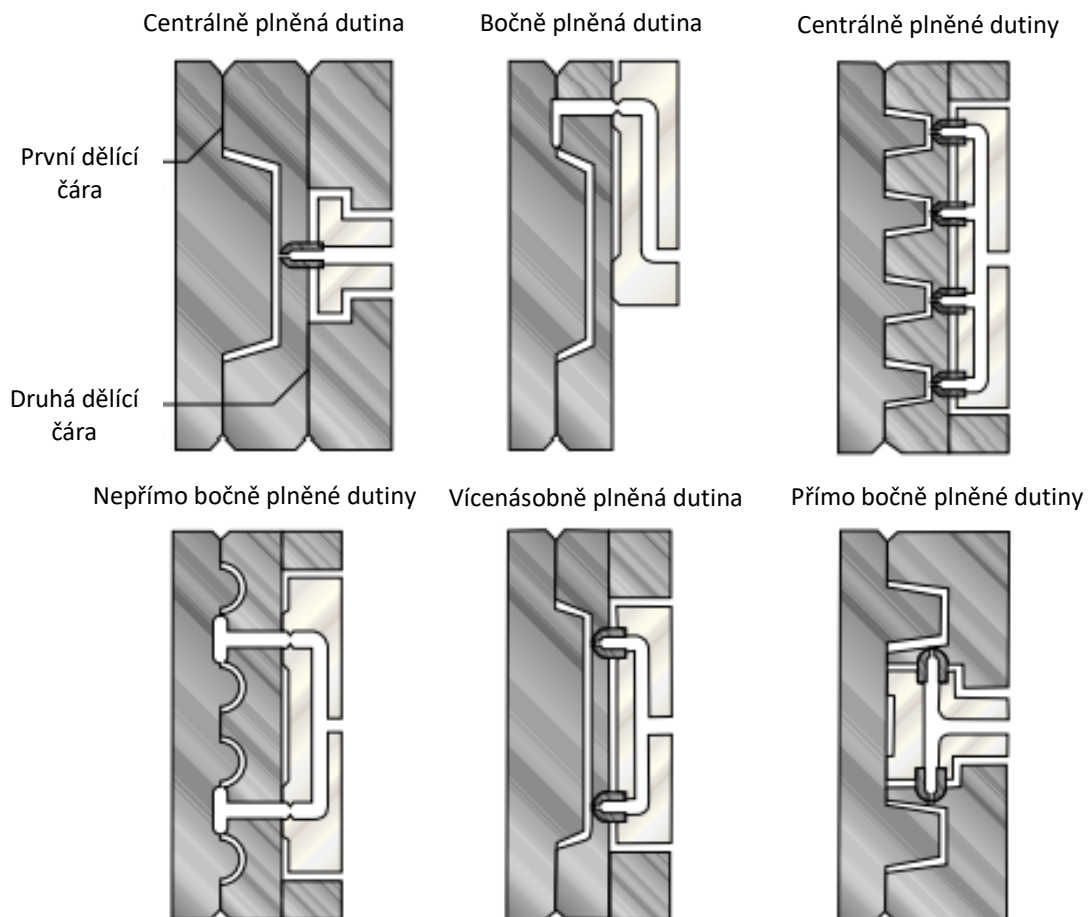
3.5.3 Horký vtokový systém

Horký vtokový systém udržuje polymer v kanálu ve stavu taveniny a polymerní materiál zůstává v systému vtoku i po vyhození a je do dutiny vstříkován v následujícím cyklu. Existují dva typy horkých vtokových systémů: s vnějším a vnitřním ohřevem, jak je zobrazeno na Obr. 31. Vnější vyhřívání rozvodné kanály mají topné těleso obklopující rozvodný kanál, které udržuje polymer při konstantní teplotě a ve stavu taveniny. U vnitřně vyhříváných kanálů je topné těleso vedeno podél středu kanálu a udržuje polymer roztavený. V případě vnitřního vyhřívání je polymer ve svém středu teplejší než na okraji, kde může být dokonce zatuhnutý. Přestože horký vtokový systém výrazně zvyšuje náklady na formu, tak má mnoho výhod, jako je eliminace ořezu vtoku a nižší tlaky při vstříkování. Na Obr. 32 jsou pak schématicky zobrazena různá uspořádání Horkých vtokových kanálů. [10]



Obrázek 31 Základní provedení vyhřívání horkého rozvodu [32]

1 – studený materiál formy, 2 – kanál pro proudění taveniny, 3 – topné těleso, 4 – zamrzlá vrstva plastu, 5 – izolační vzduchová mezera



Obrázek 32 Různé uspořádání horkého vtokového systému [10]

3.6 Temperační systém

Chlazení začíná v momentě naplnění formy, avšak větší množství tepla se vymění během doby chlazení, to je doba, než se forma otevře a výstřik se vyhodí. Konstrukce chladicího systému se navrhuje podle nejdéle chlazené části vstřikovaného dílu. Jedná se většinou o nejširší místo na výrobku, které se nejdéle chladí. [33]

Zdvojnásobení tloušťky stěny vstřikované součásti může zvýšit dobu chlazení až čtyřnásobně. Je to z důvodu nízké tepelné vodivosti většiny polymerních materiálů. Zpravidla tedy platí, že s rostoucí tloušťkou stěny se doba chlazení zvyšuje v poměru 1: 1². [23]

Doba chlazení představuje asi 60 % času z celého vstřikovacího cyklu, proto má také zásadní vliv na produktivitu výroby a také kvalitu vstřikovaných dílů. [23] Pro zvýšení účinnosti chlazení je zapotřebí dosáhnout turbulentního proudění, tzn. vhodnou konstrukcí nastolit stav, kdy se kapalina víří a mísí. Turbulentní proudění závisí na viskozitě kapaliny a její rychlosti. Popisuje se Reynoldsovým číslem (Re), které by pro správnou funkci chlazení mělo dosáhnout hodnoty okolo 10 000, protože turbulentní tok nastává, když Reynoldsovo číslo překročí hodnotu 2300. Reynoldsovo číslo se vypočítá ze vztahu: [22]

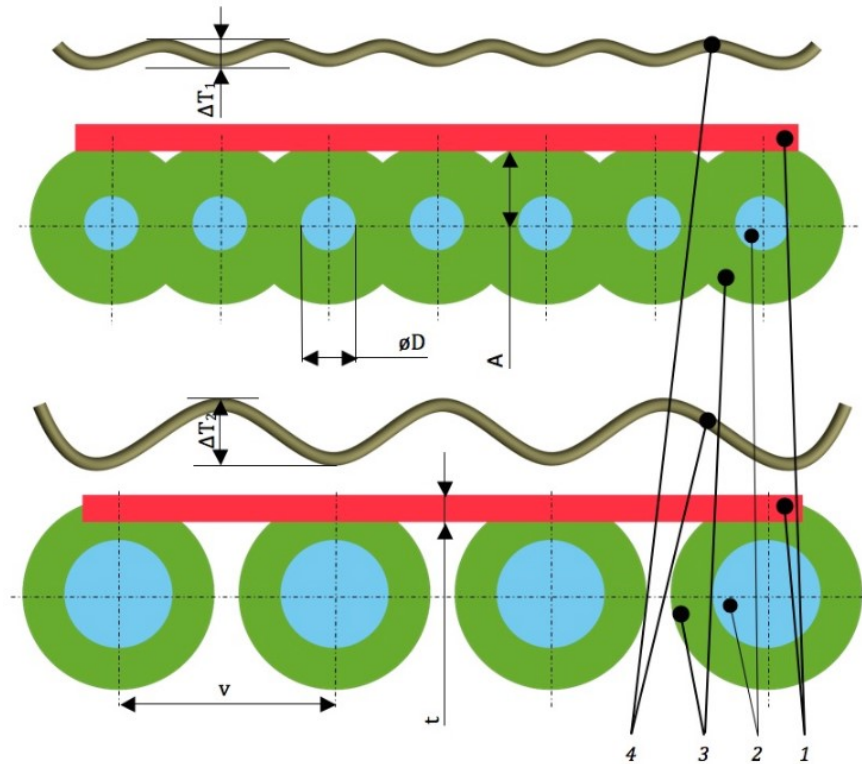
$$Re = \frac{v_s d}{\nu} \quad (4)$$

kde v_s je rychlost toku, d je průměr a ν je kinematická viskozita.

Temperace se skládá z vrtaných děr v desce utěsněnými ucpávkami, nebo různě propojenými hadicemi. Nejohospodárnější geometrie chladících kanálků je kruhová s obvyklými průměry v rozmezí 6–14 mm. Temperace se navrhuje na základě simulačních programů, tak aby byl výrobek patřičně uchlazen. [28] Vhodné je volit více kanálů s menším průměrem než malý počet kanálů s velkým průměrem. Je to z důvodu rovnoměrnějšího rozložení teplot povrchu dutiny formy, jak je schematicky porovnáno na Obr. 33. [32] Je však potřeba brát v potaz, že dlouhé kanálky s malým průměrem vedou k tlakovým ztrátám. [28]

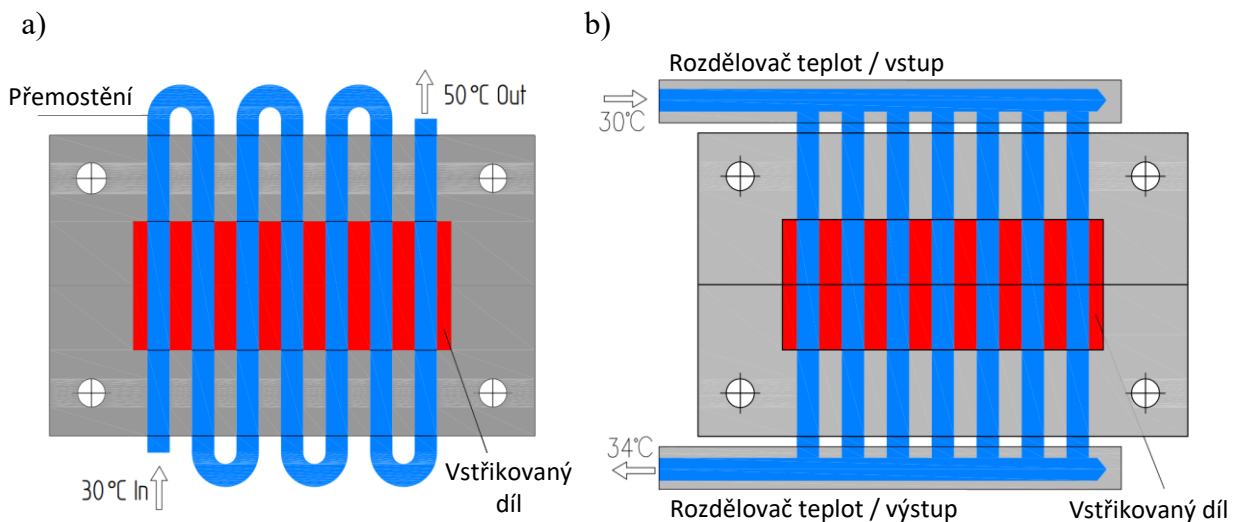
Pro řízení teploty se používá systém, který je buď sériový nebo paralelní. Při sériovém způsobu regulace teploty se používá pouze jeden kanál se vstupem a výstupem, jak je znázorněno na Obr. 34 a. Nevýhodou je, že se teplota média napříč kanálem zvyšuje, a tak mají různé části formy, různou teplotu. [28] Toto je potřeba brát v potaz, pokud rozdíl teplot na vstupu a výstupu temperačního systému přesáhl 3 °C. [30] Při paralelním řízení teploty

(Obr. 34 b) je přívodní kanál rozdělen na několik paralelních kanálů, čímž se dosáhne rovnoměrné teploty napříč formou. Nevýhodou je, že v případě zablokování některého paralelního kanálu, se tato vada velice těžko odhaluje a může vést k různým degradacím výrobku. [28]



Obrázek 33 Porovnání efektu různého průměru temperačních kanálů [32]

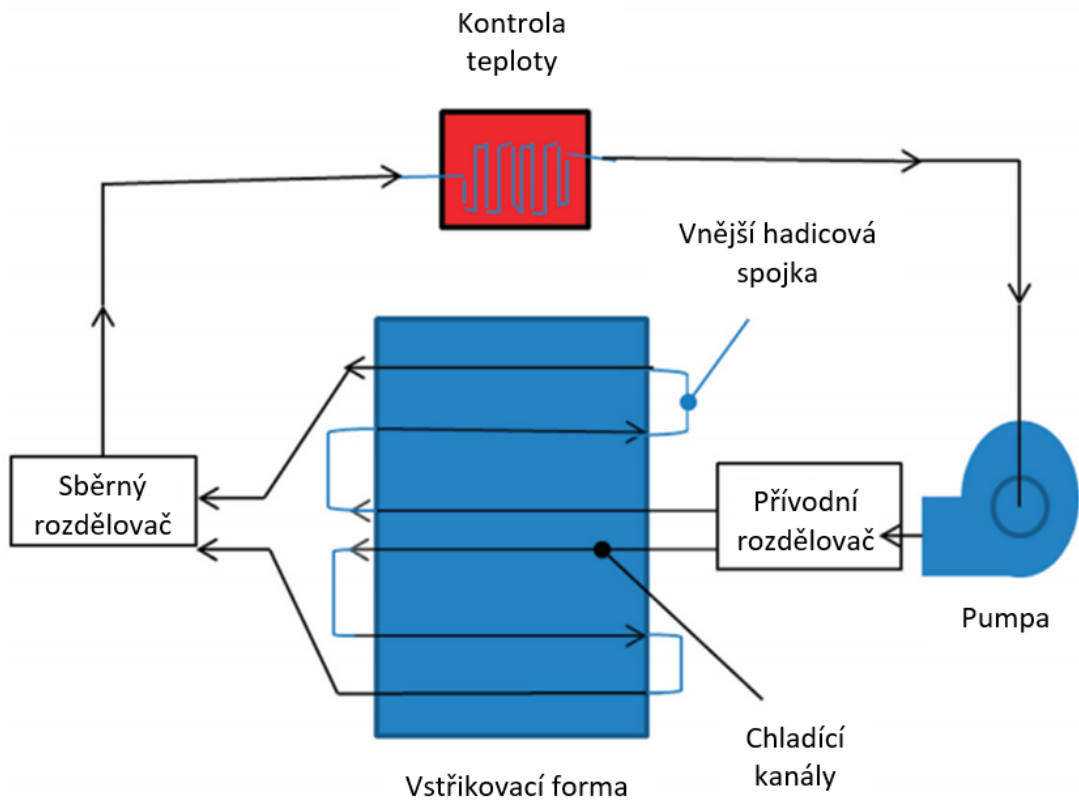
1 – vstřikovaný díl, 2 – temperační kanál, 3 – pole působení temperačního kanálu,
4 – průběh teploty povrchu dutiny vstřikovací formy



Obrázek 34 Dva základní typy temperace [28]

a) sériová regulace teploty, b) paralelní regulace teploty

Typický temperační systém funguje jako výměník a je zobrazen na Obr. 35. Teplo z roztaveného polymeru se přenáší do formy, odkud je pomocí chladicí kapaliny odváděno skrze chladicí kanály ven z formy. Nejjednodušší temperační systémy používají jako chladicí medium vodu. Pokud je však potřeba dosáhnout vyšší teploty, tak se používají různé oleje, které mohou pracovat až do teplot 330 °C. Naopak pro teploty nižší než 25 °C je nutné vodu smíchat s nemrznoucí směsí, jako je např. glykol. Dalšími metodami, jak lze vstřikovací formu ohřívat a chladit jsou indukční ohřev nebo různé vysokotlaké vodní systémy. [23]



Obrázek 35 Typický temperační systém pro vstřikovací formy [23]

3.7 Odvzdušnění forem

Špatné odvzdušnění vstřikovací formy může negativně ovlivnit vstřikovací cyklus. Pro každou formu je důležité, aby se zajistilo odvzdušnění, a tak mohl roztavený polymer volně pronikat do všech částí dutiny, aniž by mu v tom bránil vzduch uzavřený ve formě. Odvzdušnění je důležité zejména u forem, které mají krátký vstřikovací cyklus, tedy pracují s poměrně vysokými vstřikovacími rychlostmi. Zde může docházet k zachycení vzduchu, nebo nějakého plynu, a to může vést k různým vstřikovacím vadám, jako je neúplné zaplnění formy a spálená místa. Obecně je důležité odvzdušnit ta místa, kde polymerní tavenina dokončí plnění výrobku. Někdy však není zapotřebí odvzdušnění řešit, protože vzduch uniká mikromezerami v dělicí rovině. [26]

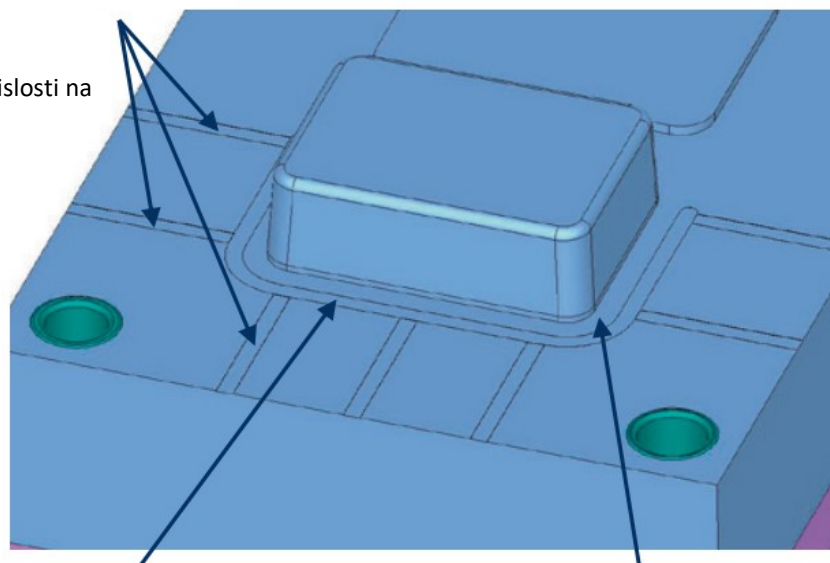
Běžnými metodami odvzdušnění jsou odvzdušňovací otvory, odvzdušňovací zátky a kolíky. Aktuální vývoj se ubírá směrem k použití porézních kovů, které umožňují únik plynů, aniž by unikal polymerní materiál. Výhodou porézních kovů je, že odvětrávání probíhá na větší ploše. [16]

Obr. 36 zobrazuje odvzdušňovací kanály v pohyblivé části formy, ty jsou rozmístěny ze tří stran obrysu formy a odvádí vzduch, který by byl uzavřen, ven z formy. Hloubka odvzdušňovacích kanálů závisí na tom, jak daleko od kraje formy je umístěn obrys výrobku. [25]

Odvzdušňovací kanály vedoucí
směrem ven

šířka 5 až 10 mm

hloubka 0,1 až 0,3 mm v závislosti na



První odvzdušňovací kanál
šířka 4 až 6 mm
hloubka 0,01 až 0,03 mm
v závislosti na materiálu

Dělicí čára, 3 až 5 mm od
obrysu plastového dílu

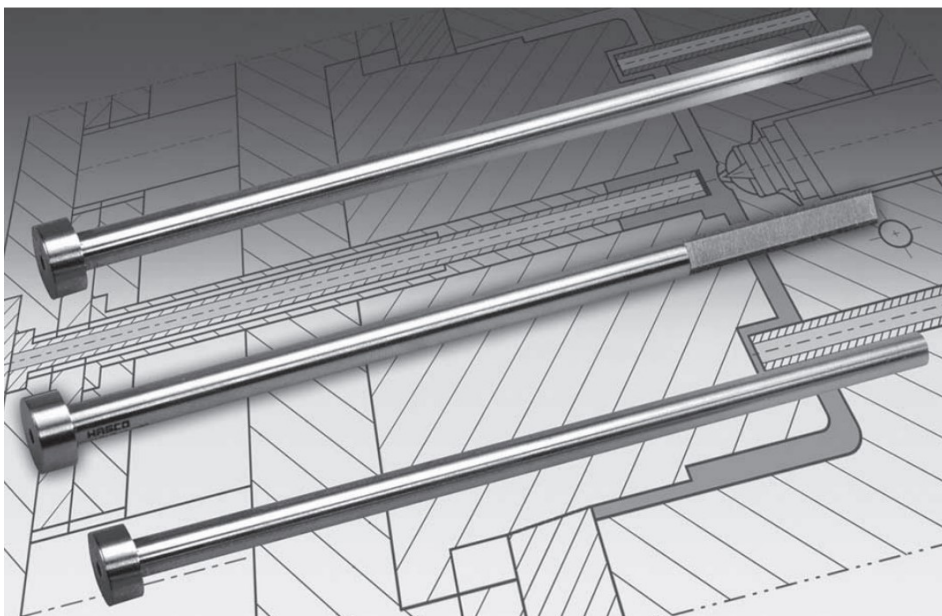
Obrázek 36 Odvzdušňovací kanály v pohyblivé části formy [25]

3.8 Vyhazovací systém

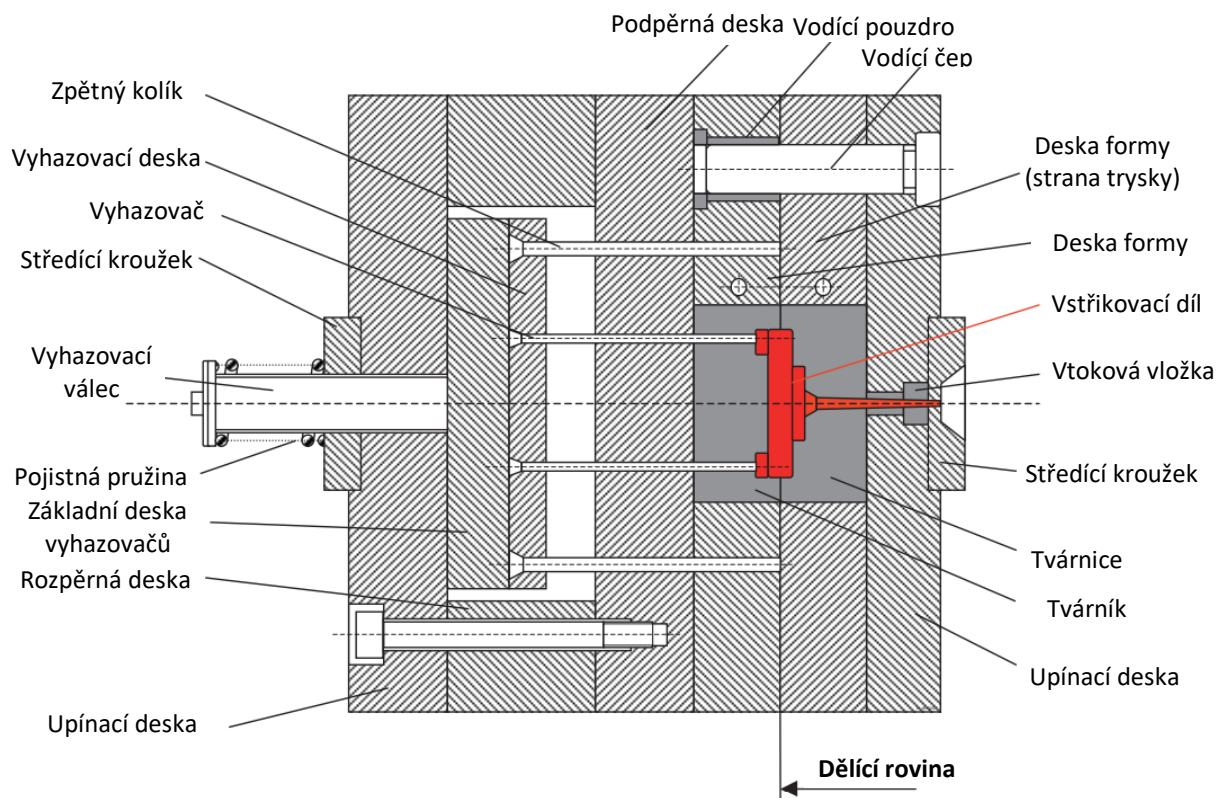
Jak z názvu vypovídá je určen k vyhození hotového výrobku z formy. Způsobů, jak vyhodit výrobek z formy, je mnoho, nejčastěji se používá vyhazovacích kolíků, nebo se vyhazuje pomocí stlačeného vzduchu, případně může být výrobek vyndán z formy pomocí přísavky, umístěné na robotickém rameni. [34]

Vyhazovací kolíky, viz. Obr. 37, jsou vzhledem k obrobiteľnosti a rozměrové přesnosti nejčastěji kruhového průřezu, ale ve speciálních případech se používají i různě tvarované kolíky, vyhazovací pouzdra nebo stahovací desky. Typ vyhazovače závisí na tvaru vstřikovaného dílu a navrhují se tak, aby tlak na povrch výstřiku byl co nejnižší a nedošlo k výrazným stopám po vyhazovačích, případně i k porušení vstřikovaného dílu. Je důležité dát si pozor na profilované vyhazovací kolíky a zajistit je proti pootočení např. tvarovým prvkem. [35]

Kolíky jsou uchycené ve vyhazovací desce, která se pomocí hydrauliky vysouvá, a tak dochází k vyhození výrobku, z toho důvodu musí být vyhazovací kolíky odolné proti opotřebení a taky rozměrově přesné. Vyhazovací deska se skládá ze dvou plochých desek, z jedné hlavní a druhé přídržovací, obě jsou k sobě spojeny šrouby. Podle požadovaného zdvihu se volí rozpěra (Obr. 38), která je mezi upínací deskou a podpěrnou deskou, výška podpěry se určí jako součet zdvihu a tloušťky vyhazovací desky. Vyhazovací systém obsahuje také zpětné kolíky (Obr. 38), které vrací desku při zavření desky do výchozí polohy. Vratné kolíky jsou připevněné spolu s vyhazovači k vyhazovacímu paketu. [34]



Obrázek 37 Kalené vyhazovače [21]



Obrázek 38 Schéma formy s vyhazovacím paketem [21]

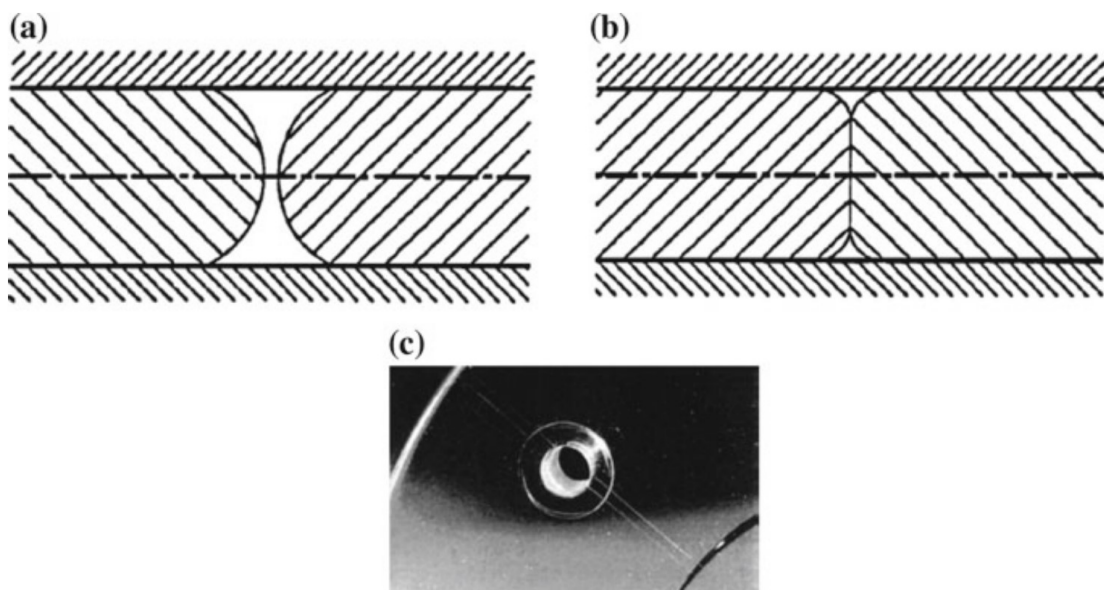
4 NEJČASTĚJŠÍ VADY VZNIKLÉ VSTŘIKOVÁNÍM

4.1 Studený spoj (Weld Line)

Studené spoje vznikají, když se setkají alespoň dva nebo více toků taveniny. Při takovém vzájemném dotyku se čela taveniny zploští a spojí. Pokud teplota a tlak nejsou dostatečně vysoké, dochází v místě spoje ke vzniku zářezu, což jsou místa, která nejsou dobře vyplněna materiálem. Kromě toho se čela toku již důsledně nespojí, a to může vést ke vzniku opticky a mechanicky slabého místa, jak je znázorněno na Obr. 39. Zářezy jsou viditelné zejména na tmavých nebo průhledných dílech s hladkým, vysoce leštěným povrchem. [6]

Pokud tavenina (roztavený polymer) obsahuje přísady (např. barevné pigmenty), může v blízkosti studeného spoje dojít k silné orientaci těchto přísad, a to vede k lokální změně barvy výrobku. Barevné změny jsou nejlépe vidět na dílech s metalickými pigmenty. [6]

Odstranění studených spojů je možné lokálním zvýšením teploty, umístěním např. topného článku, nebo změnou temperačního systému, tak aby daná oblast nebyla tolik chlazena. Dalším možným řešením je zvýšení teploty formy, avšak s tím se pojí i zvýšení doby vstřikovacího cyklu, kdy na 1 °C se doba cyklu prodlouží až o 2 %. [36] V souhrnu se dá říct, že jsou dva hlavní faktory, které ovlivňují pevnost studených spojů ve vstřikovaném dílu a tím jsou konstrukční řešení dílu a procesní parametry. [6]



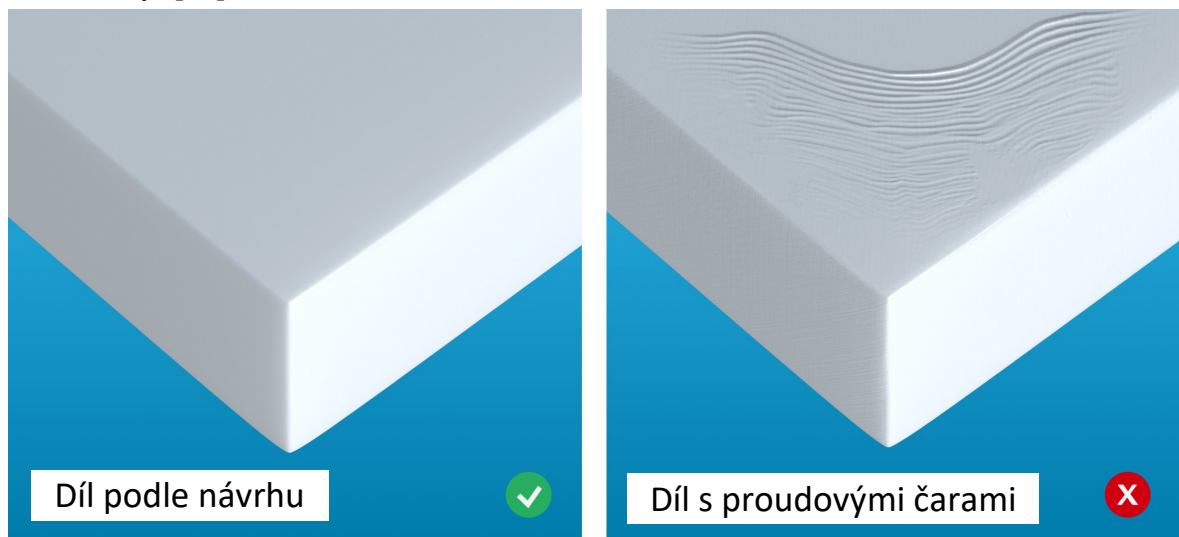
Obrázek 39 Studený spoj (Weld Line) [6]

a) dvě čela taveniny před samotným dotykem, b) vznik studeného spoje, c) viditelný zářez na horní a spodní straně průhledného dílu

4.2 Proudové čáry (Flow Lines)

Proudové čáry, viz. Obr. 40, jsou nebarevné čáry, smyčky a jiné vzory, které se objevují na povrchu dílu. Jsou způsobeny tím, že se tavenina roztaveného plastu ve formě pohybuje různou rychlostí, což ve výsledku vede k různým rychlostem tuhnutí taveniny a k její viditelné deformaci. Deformaci způsobuje nízká vstřikovací rychlost, nízký vstřikovací tlak, teplota taveniny, nebo teplota formy. Dalším kritériem možného výskytu proudových čar jsou plniva, která obecně zvyšují pravděpodobnost, že se projeví vada toku, jak je zobrazeno na Obr. 41. Je to z důvodu, že plniva vedou ke zvýšení viskozity. [37]

Proudové čáry se mohou objevit také v případě, že polymer prochází různou tloušťkou stěny, z toho důvodu je zapotřebí udržovat stejnou tloušťku stěny nebo, aby zkosení a zaoblení bylo dostatečně plynulé. Řešením tohoto problému může být umístění vtoku do tenkostěnné části dutiny. [37]



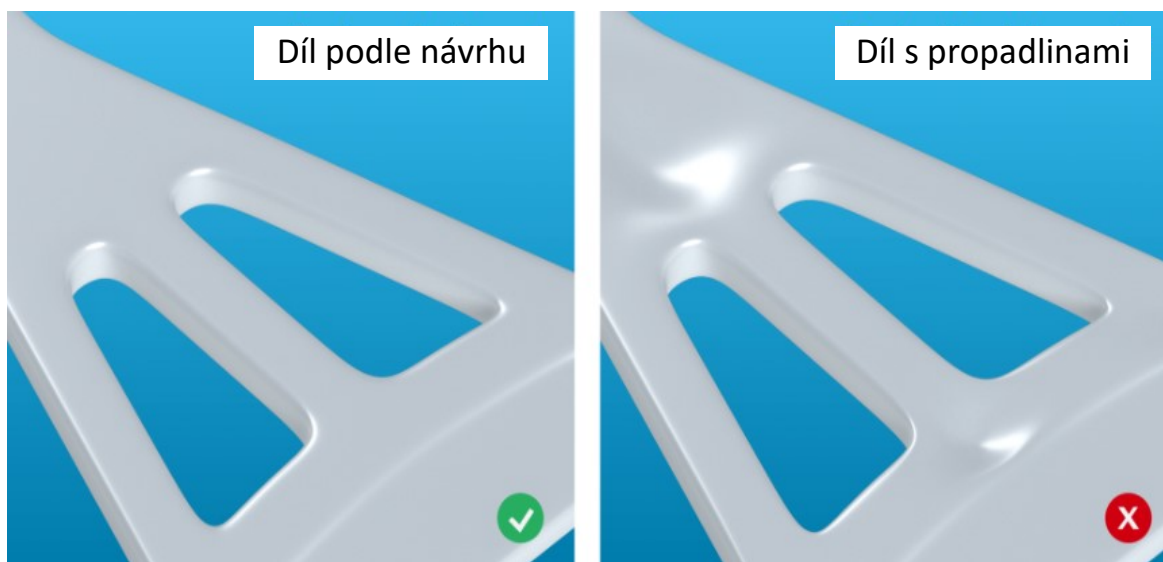
Obrázek 40 Proudové čáry (Flow Lines) [38]



Obrázek 41 Proudové čáry (Flow Lines) s kovovým plnivem [37]

4.3 Propadliny (Sink Marks)

Stopy po propadnutí se projevují jako malé důlky, prohlubně nebo krátery v silných částech dílu, jak je vidět na Obr. 42. Je to z důvodu, že tlustší části se ochlazují déle, což často vede k různým rychlostem smrštění vnitřních a vnějších částí dílu. [38] Silnější části dílu se smršťují více než tenčí části. [39] Smrštění může být jen ukazatelem, že polymer ve formě potřebuje víc času na ochlazení. Někdy je ovšem zapotřebí zmenšit tloušťky nejširších částí výrobku, což vede k rovnoměrnějšímu a důkladnějšímu ochlazení. Se vznikem vad může taky souviset nedostatečný tlak v dutině formy, anebo vysoká teplota. Z konstrukčního hlediska lze vznik propadlin eliminovat navržením správné tloušťky žeber a stěn výrobku. [38] Propadliny objevující se na pohledových stranách zhoršují estetickou kvalitu výrobku a často vyžadují přepracování návrhu formy. Proto je snaha navrhovat díl, pokud možno s konstantní tloušťkou. [40]



Obrázek 42 Propadliny (Sink Marks) [38]

4.4 Povrchová delaminace (Surface Delamination)

Delaminace je proces, kdy se povrch dílu v tenkých vrstvách odděluje, jak je znázorněno na Obr. 43. Tyto vrstvy vypadají jak nějaké povlaky, jdou sloupnout a jsou často způsobeny nečistotami v materiálu. [37]

Delaminace může být skrytá i uvnitř dílu, když dojde k selhání adheze mezi vrstvami polymeru. K delaminaci dochází z několika důvodů, jak už bylo uvedeno, prvním z nich jsou nečistoty v materiálu, které se nemohou spojit s polymerem, a tak vytvářejí tyto poruchy. Druhým důvodem je použití nekompatibilních plastů při vícekomponentním vstřikování. [41] Někdy i špatně vysušený polymer způsobuje delaminaci, resp. nadměrná vlhkost obsažená v materiálu, proto v některých případech pomůže materiál vysušit. [38]

Dalšími možnými vlivy, které vedou k delaminaci jsou procesní nastavení, jako je: teplota taveniny, vstřikovací rychlost a doba setrvání materiálu ve vstřikovacím stroji. Vysoká teplota taveniny vede k degradaci materiálu, která může způsobit, že se vrstvy začnou odlupovat. Nadměrná vstřikovací rychlost může v ojedinělých případech vést k nadměrnému smykovému napětí, které opět může zapříčinit delaminaci. Doba setrvání materiálu ve vstřikovacím stroji je obdobně jak u teploty taveniny rozhodující v tom, že při dlouhých zdržných dobách materiál degraduje, což opět vede k delaminaci. [37]



Obrázek 43 Povrchová delaminace (Surface Delamination) [38]

4.5 Nedotečený výrobek (Short Shots)

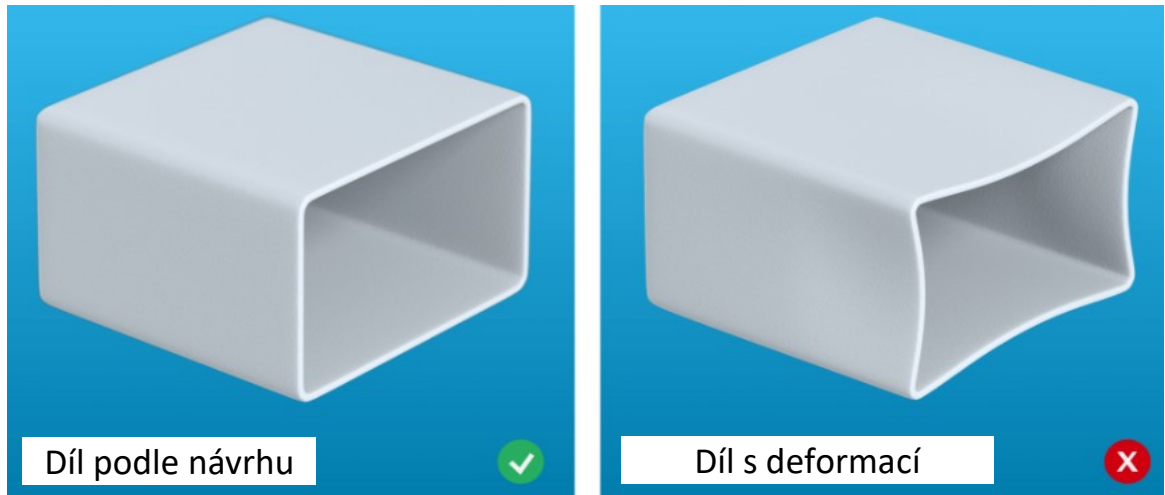
Nedotečení výrobku znamená, že polymer zcela nezaplnil dutinu formy, jak je vidět na Obr. 44. Nejčastější příčinou je nedostatek předplastikovaného materiálu, ale dochází k tomu také, když je nějakým způsobem omezen průtok taveniny dutinou formy. Takovým omezením může být např. příliš úzký vtok, zablokovaný vtok, výskyt vzduchových kapes nebo nedostatečný vstřikovací tlak. Přispívá k tomu také nízká teplota formy a vysoká viskozita vstřikovaného polymeru. Pro odstranění této vady se většinou zvýší teplota formy, nebo se do konstrukce formy dodatečně začlení odvzdušnění, které umožní únik zachyceného vzduchu. [38]



Obrázek 44 Nedotečený výrobek (Short Shots) [38]

4.6 Deformace (Warp)

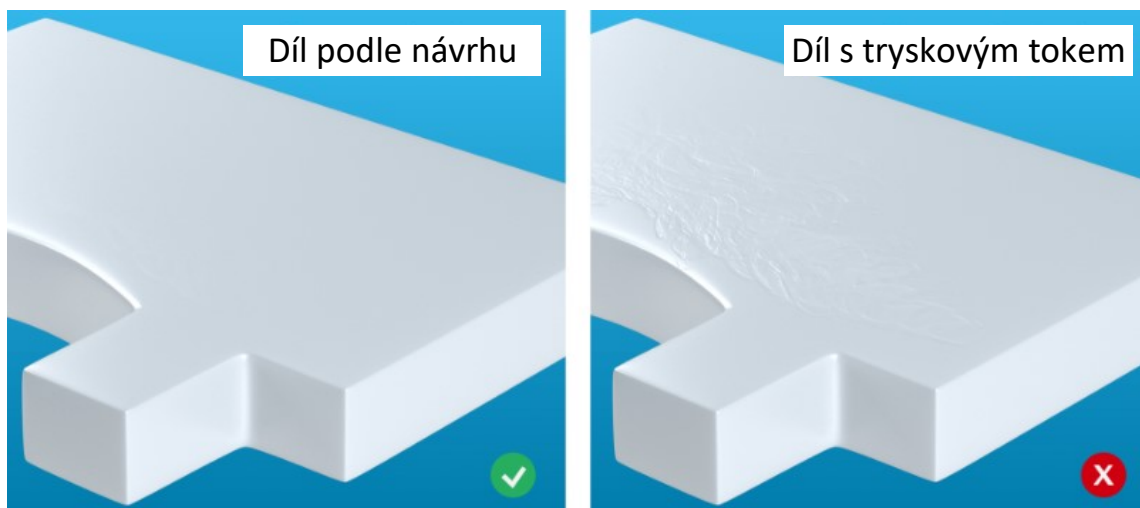
K deformaci výrobku dochází, pokud je vstřikovací forma nedostatečně chlazená, díky tomu dochází ve výrobku ke kumulaci napětí, které se na výrobku projeví po vyjmutí z formy. Projevem této deformace je nechtěné zkroucení výrobku (Obr. 45), způsobené nerovnoměrným vnitřním smršťováním během procesu chlazení. Tato vada se dá odstranit prodloužením doby chlazení výrobku ve formě. Dalším řešením je zajištění rovnoměrné tloušťky stěny výrobku již při konstrukci formy, tím se dosáhne, že polymer v dutině formy teče jedním směrem. Stojí také za zmínku, že u semikrystalických materiálů je větší pravděpodobnost vzniku deformací. [38] Nejčastějším důvodem vzniku deformace je rozdílné smrštění vstřikovaného dílu. Na smrštění má vliv několik faktorů: rozdílný tlak v dutině, nerovnoměrné chlazení výrobku nebo rozdílná orientace, zejména u semikrystalických materiálů. [37]



Obrázek 45 Deformace (Warping) [38]

4.7 Tryskový tok (Jetting)

Tento problém nastává, když se polymerní tavenina vstříkuje z malého vtokového ústí do velké dutiny formy, tavenina tak rychle postupuje napříč formou, dokud se nezastaví o stěnu formy. Jakmile se tavenina dotkne stěny, která je naproti vtokovému ústí, začne rychle chladnout, a tak v dílu vytvoří samostatný celek, který není v celém objemu spojený. Jsou případy, kdy tryskový tok není vidět a je schovaný pod povrchem, ale může se projevit i na povrchu, jak je vidět na Obr. 46. [38] Většina problémů s tryskovým tokem souvisí s konstrukcí formy, je to např. špatné umístění vtokového ústí, velikost vtokového ústí a délka vtokového ústí. Vtokové ústí je vhodné umístit tak, aby polymer vstupující do dutiny narážel např. na stěnu a netryskal volně do prostoru dutiny, čímž by vznikala tryskový tok. [37] Stejně tak jsou na tryskový tok problematické polymery s plnivými, kdy k této vadě dochází při nižších rychlostech než u neplněných polymerů. [34]



Obrázek 46 Tryskový tok (Jetting) [38]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 STANOVENÍ CÍLŮ PRÁCE

Cíle pro tuto diplomovou práci byly následující:

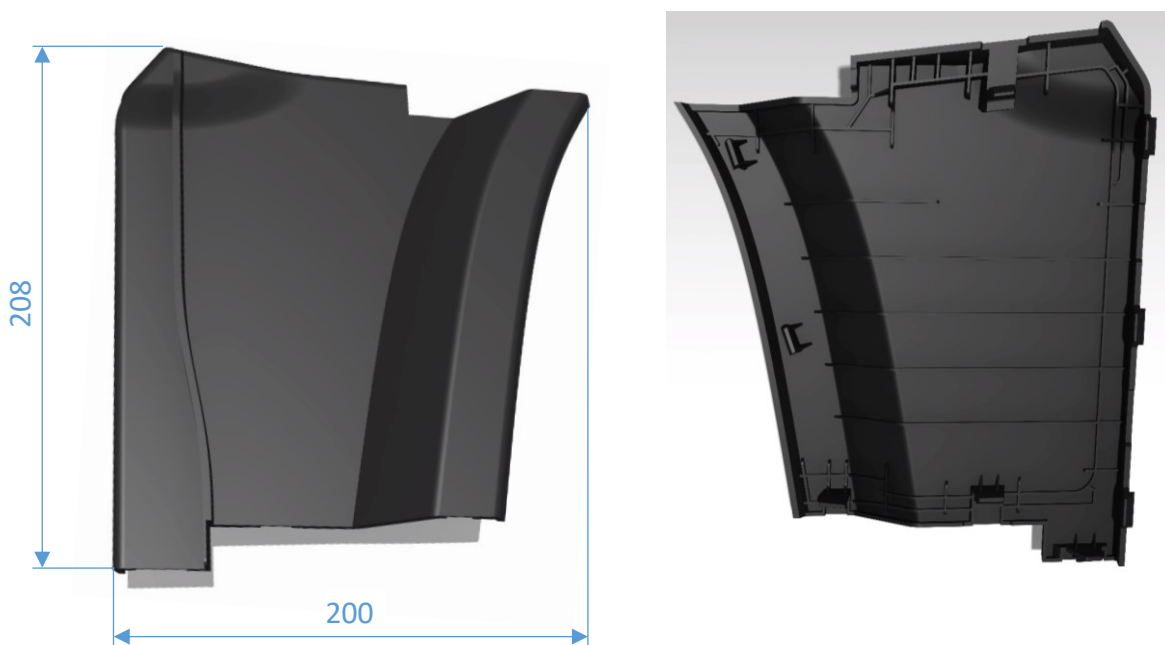
1. Vypracujte literární studii na dané téma.
2. Proved'te konstrukci zadaného plastového dílu.
3. Navrhněte 3D sestavu vstřikovací formy pro výrobu zadaného dílu.
4. Nakreslete 2D výkresy sestavy a příslušných řezů.
5. Návrh ověřte pomocí analýz.

6 VSTŘIKOVANÝ VÝROBEK

Vstříkovaným výrobkem je část krytu nárazníku automobilu značky HONDA, který je vidět na Obr. 47. Kryt má převážně funkci estetickou, je součástí karoserie, a tak nevyžaduje zvýšené nároky na pevnost. Ze zadaného výrobku se vytvořil 3D model v programu CATIA V5R19, který je zobrazen na Obr. 48. Kryt má rozměry 208 x 200 x 60 mm (délka, šířka, výška).



Obrázek 47 Vstříkovaný díl



Obrázek 48 3D model vstříkovaného dílu

6.1 Materiál výrobku

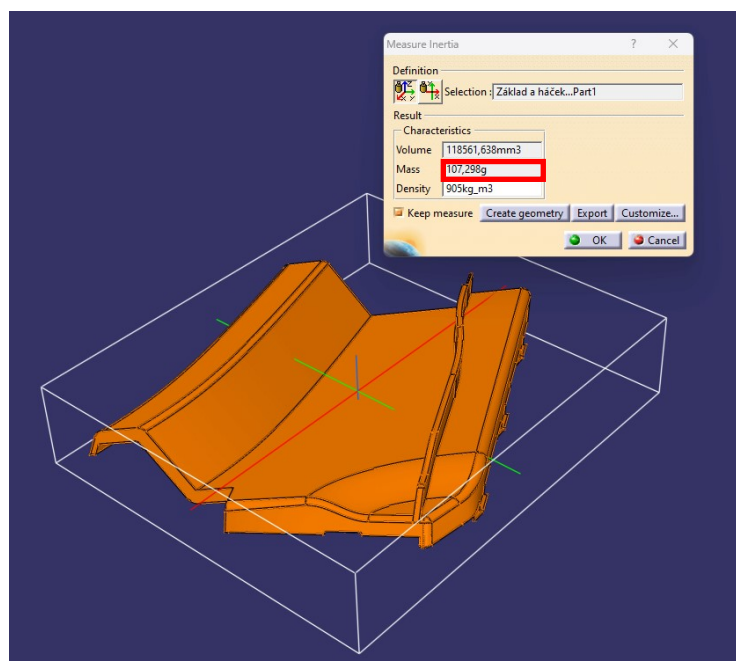
Jelikož má kryt hlavně funkci estetickou, tak pro jeho výrobu byl vybrán polypropylen bez plniv, která by jej vyztužovala. Konkrétně byl vybrán materiál SABIC PP 575P, který má dobré tokové vlastnosti a pro pozdější analýzy je možné jej přímo zvolit i v programu Autodesk Moldflow, čímž se dosáhne přesnějších výsledků analýzy. Podrobnější informace o vlastnostech materiálu jsou uvedeny v materiálovém listě, který je níže přiložen v příloze diplomové práce. Zvolený materiál koresponduje s materiálem uvedeným na zadní straně krytu, jak je zobrazeno na Obr. 49.

Od vybraného materiálu se odvíjí hmotnost krytu, která se určila z programu CATIA V5R19, jak je vidět z Obr. 50. Program vypočítal objem krytu a pouze se ručně zadala hustota zvoleného materiálu, která je 905 kg/m^3 a tím se zjistilo, že hmotnost krytu je 0,107 kg.

S materiálem dále souvisí smrštění, které se pro polypropylen běžně pohybuje v rozmezí 1,5 – 3 %. Pro zvolený materiál uvádí výrobce hodnoty smrštění v rozmezí 1,2 – 2,5 % v závislosti na tloušťce a procesních parametrech. U zadaného krytu bylo uvažováno se smrštěním 2 % a podle toho byla i zvětšena dutina vstřikovací formy.



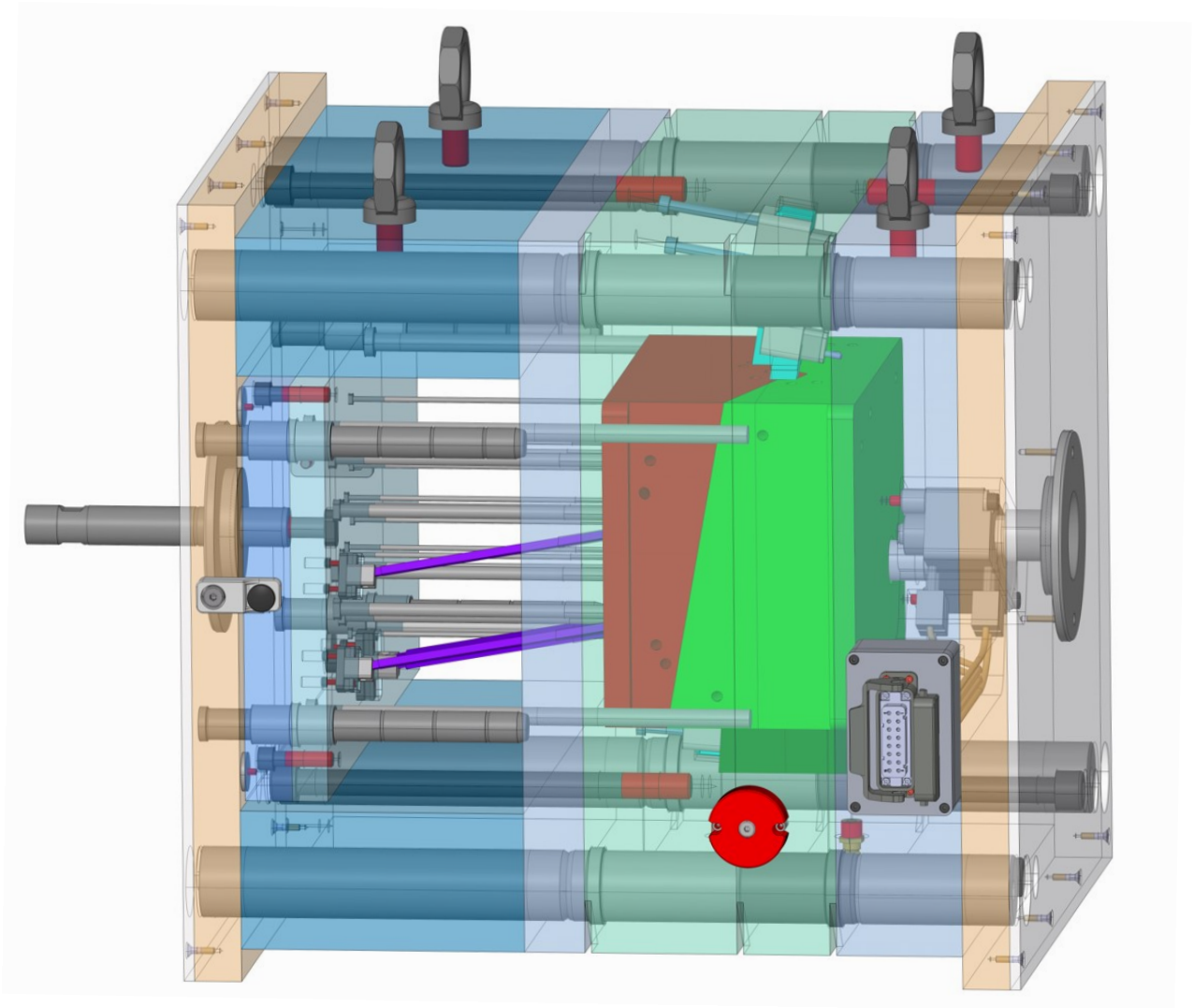
Obrázek 49 Zadní strana krytu s uvedeným materiálem



Obrázek 50 Určení hmotnosti krytu v programu CATIA V5R19

7 KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY

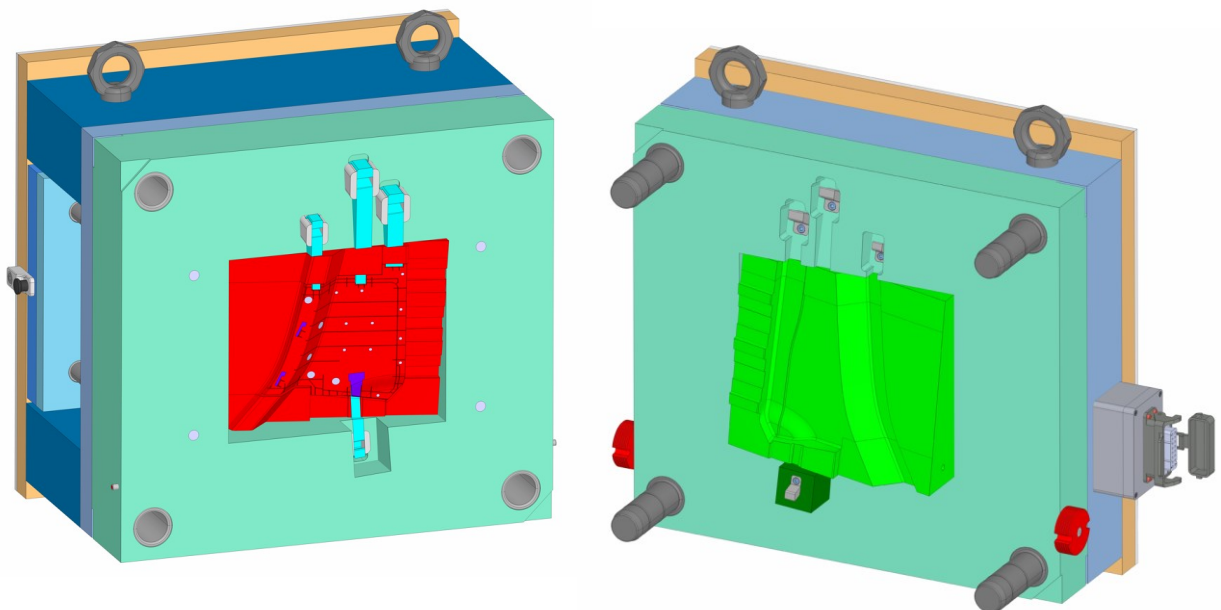
Vstřikovací forma je navržena s ohledem na zadaný díl. Pro větší počet bočních odformování a vzhledem k rozměrům zadaného dílu byla zvolena jednonásobná forma, která bude tudíž menší a vleze se i do menších vstřikovacích strojů. Forma je složena z normálií od firmy Meusbuerger a doplněna o tvarové prvky (tvárník, tvárnice, boční odformování), které by se případně vyráběly přímo v nástrojárně. Modelování tvarových prvků a úpravy normálií probíhaly v programu CATIA V5R19. Normálie vstřikovací formy byly staženy z online katalogu firmy Meusbuerger. Ta má na svých stránkách i online generátor desek forem, včetně šroubů a vodicích prvků a dále také generátor horkých vtoků. Při navrhování vstřikovací formy byla snaha dosáhnout, co nejmenších rozměrů. Navržená forma má



rozměry 596 x 596 x 638 mm (délka, šířka, výška) a je zobrazena na Obr. 51.

Obrázek 51 Navržená konstrukce vstřikovací formy

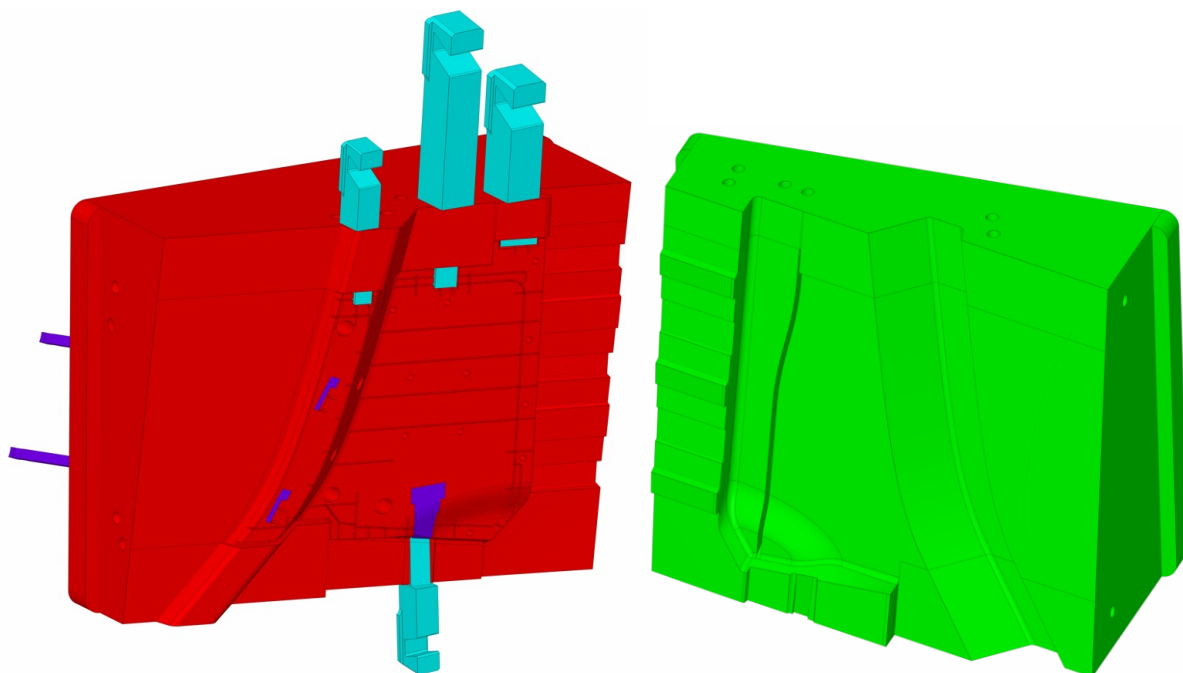
Vstřikovací forma je sešroubovaná do dvou částí, jak je vidět na Obr. 52. Jedna část je pohyblivá a při vyhazování výrobku odjíždí od nepohyblivé. Pohyblivá část formy se skládá z izolační desky, upínací desky, dvou rozpěrných desek, opěrné desky a kotevní desky. V této části se také nachází vyhazovací systém, který po otevření formy z ní vyhodí výrobek. Nepohyblivá část formy se skládá z izolační desky, upínací desky, opěrné desky a kotevní desky. V této části se nachází horký vtokový systém. Obě části, jak pohyblivá a nepohyblivá, jsou připevněné přes upínací desky k deskám vstřikovacího stroje. Izolační desky mají za úkol zamezit přestupu tepla mezi formou a vstřikovacím strojem. V kotevních deskách jsou ukotveny tvarové části formy. Desky jsou vůči sobě vystředěny prostřednictvím středících pouzder, vodících čepů a vodících pouzder.



Obrázek 52 Model vstřikovací formy, vlevo pohyblivá část, vpravo nepohyblivá část

7.1 Tvarové části formy

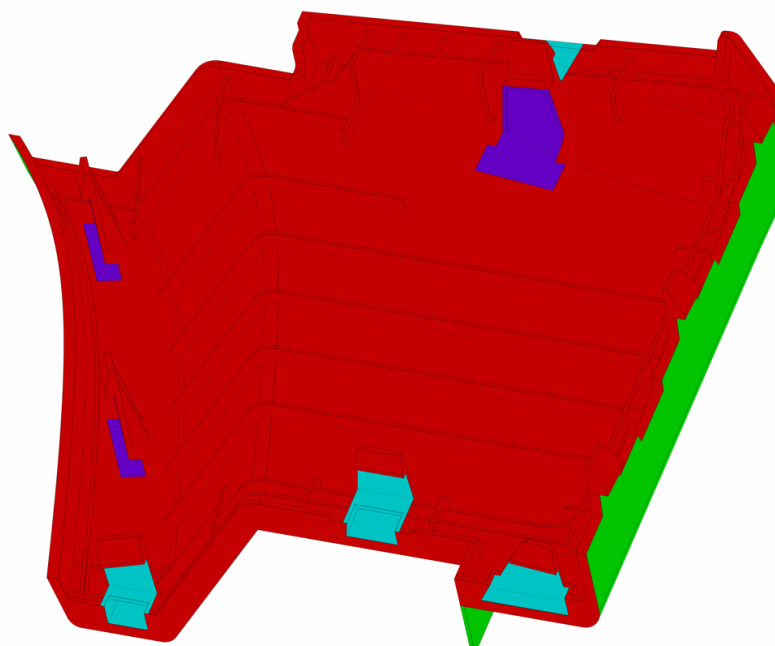
Tvarové části formy přetvářejí vstřikovaný polymer do požadovaného tvaru. Zadaný výrobek má na spodní straně množství funkčních prvků (háčky pro uchycení krytu), proto je zapotřebí použít boční čelisti a šikmé vyhazovače, jak je zobrazeno na Obr. 53. Základ tvarových částí tvoří tvárník a tvárnice. V tvárníku jsou vedeny čtyři boční čelisti a tři šikmé vyhazovače, které se podílejí na odformování háčků. Všechny tvarové části formy jsou kaleny na tvrdost 60 HRC.



Obrázek 53 Tvarové části vstřikovací formy

*zelená barva – tvárnice, červená barva – tvárník, modrá barva – boční čelisti,
fialová barva – šikmé vyhazovače*

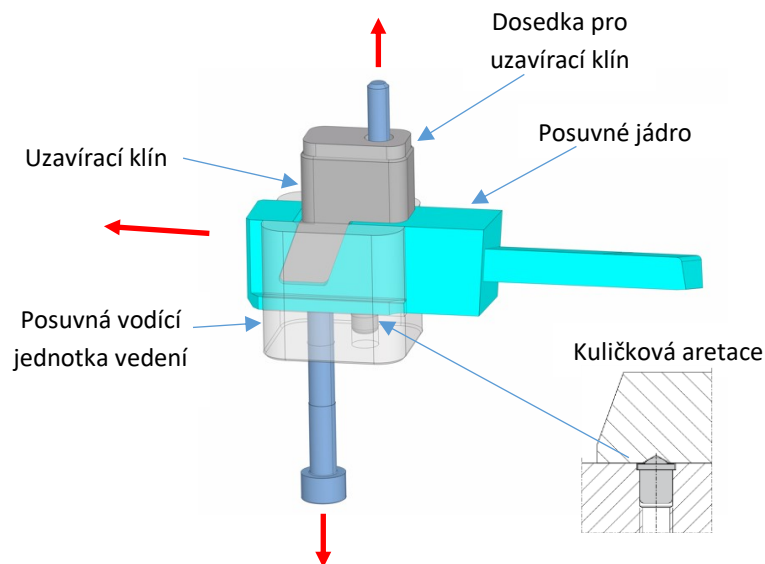
Jakým způsobem se jednotlivé tvarové části podílejí na odformování výrobku je vidět na Obr. 54, ve kterém jsou místa styků tvarových částí se vstřikovaným výrobkem barevně znázorněny na modelu krytu.



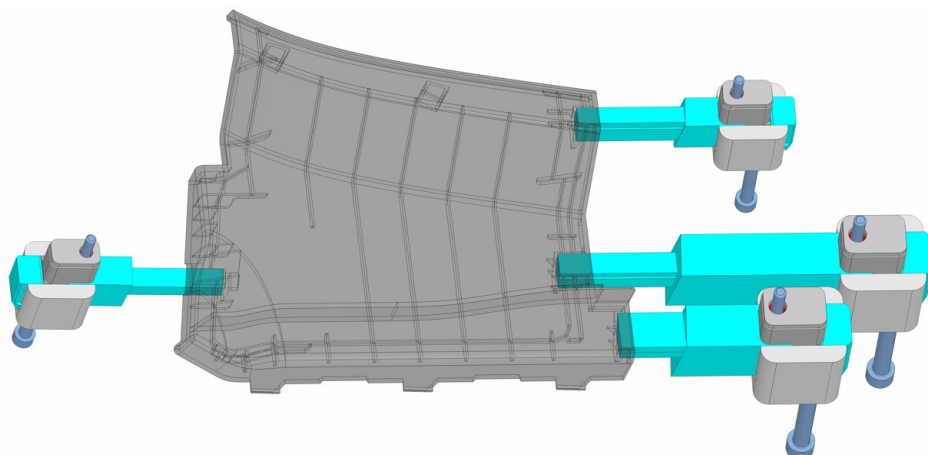
Obrázek 54 Barevně vyznačená místa styku tvarových částí formy se vstřikovaným dílem
na modelu krytu

7.2 Boční odformování

Pro boční odformování byly použity kompaktní posuvné jednotky od firmy Meusburger s označením E 3330. Byly vybrány dvě velikosti po dvou kusech podle zdvihu, tak aby se pohyblivá jádra dostatečně odsunula, a nedošlo ke kolizi s hotovým výrobkem. Menší posuvné jednotky mají zdvih 4,4 mm a větší 6,4 mm. Popis kompaktní jednotky je na Obr. 55. Jednotka je připevněna z jedné půlky do pohyblivé části formy, druhá je připevněna do nepohyblivé. Pohyb posuvného jádra je realizován otevřením vstřikovací formy prostřednictvím uzavíracího klínu. Aby jednotka po odsunutí zůstala v zadní poloze je ze spodní strany opatřena pojistkou. Pojistkou je kulička na pružině, která po odsunutí jednotky zapadne do drážky a zaaretuje posuvné jádro v přesné poloze. Během uzavírání formy klín tuto pojistku přetlačí a vrátí jádro do výchozí polohy. Rozmístění posuvných jednotek vůči výrobku je zobrazeno na Obr. 56.

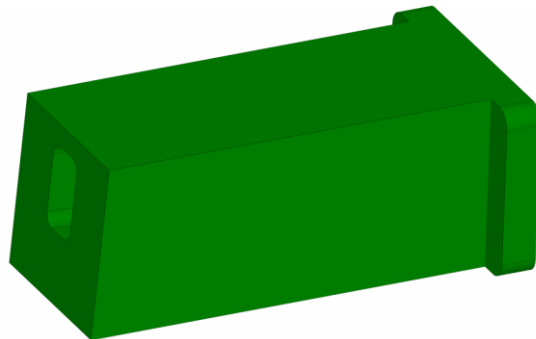


Obrázek 55 Kompaktní posuvná jednotka firmy Meusburger

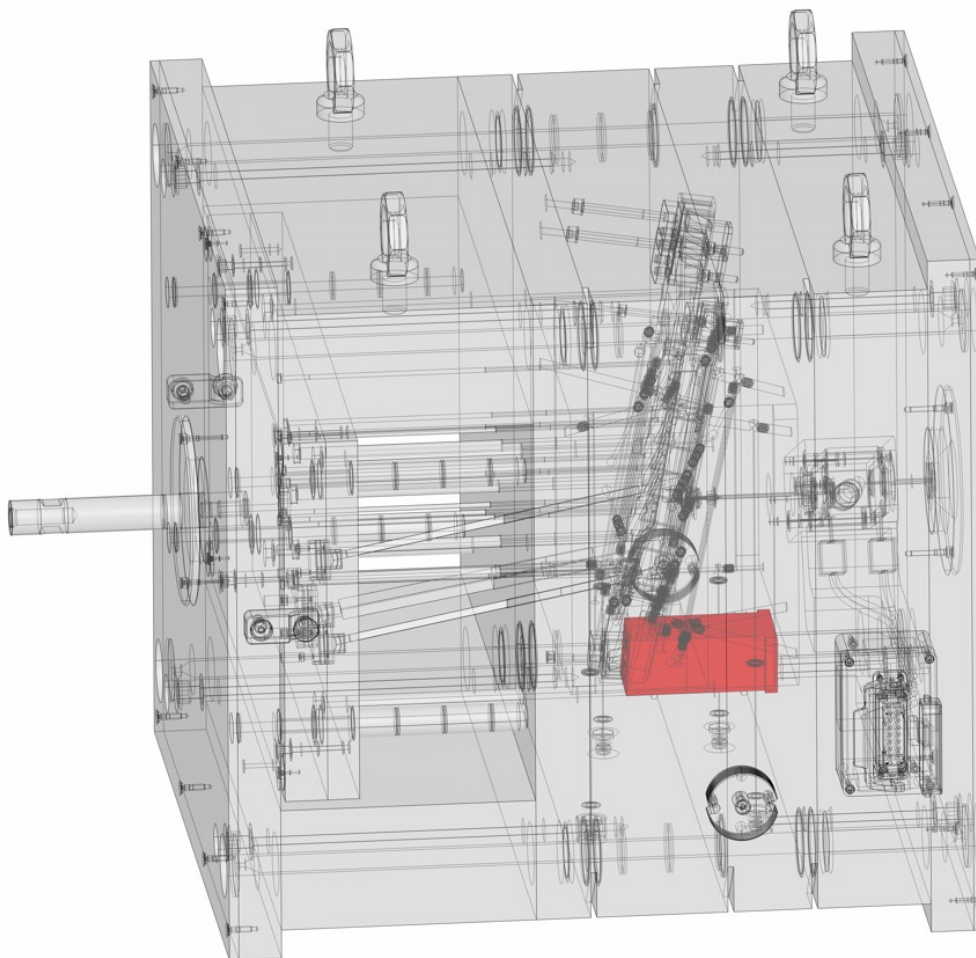


Obrázek 56 Rozmístění kompaktních posuvných jednotek vůči výrobku

Vlivem natočení dílu, tak aby mohl být odformováný došlo k utopení jedné posuvné jednotky, takže nemohla být přímo uchycena do pevné části formy. Tato situace byla vyřešena vymodelováním speciálního bloku, který je upevněn mezi kotevní a opěrnou desku nepohyblivé části formy. Do tohoto bloku je uchycen šroubem uzavírací klín, který pohybuje posuvnou jednotkou. Na Obr. 57 je zobrazeno konstrukční řešení bloku a na Obr. 58 jeho umístění ve formě (blok je zde zvýrazněn červenou barvou).



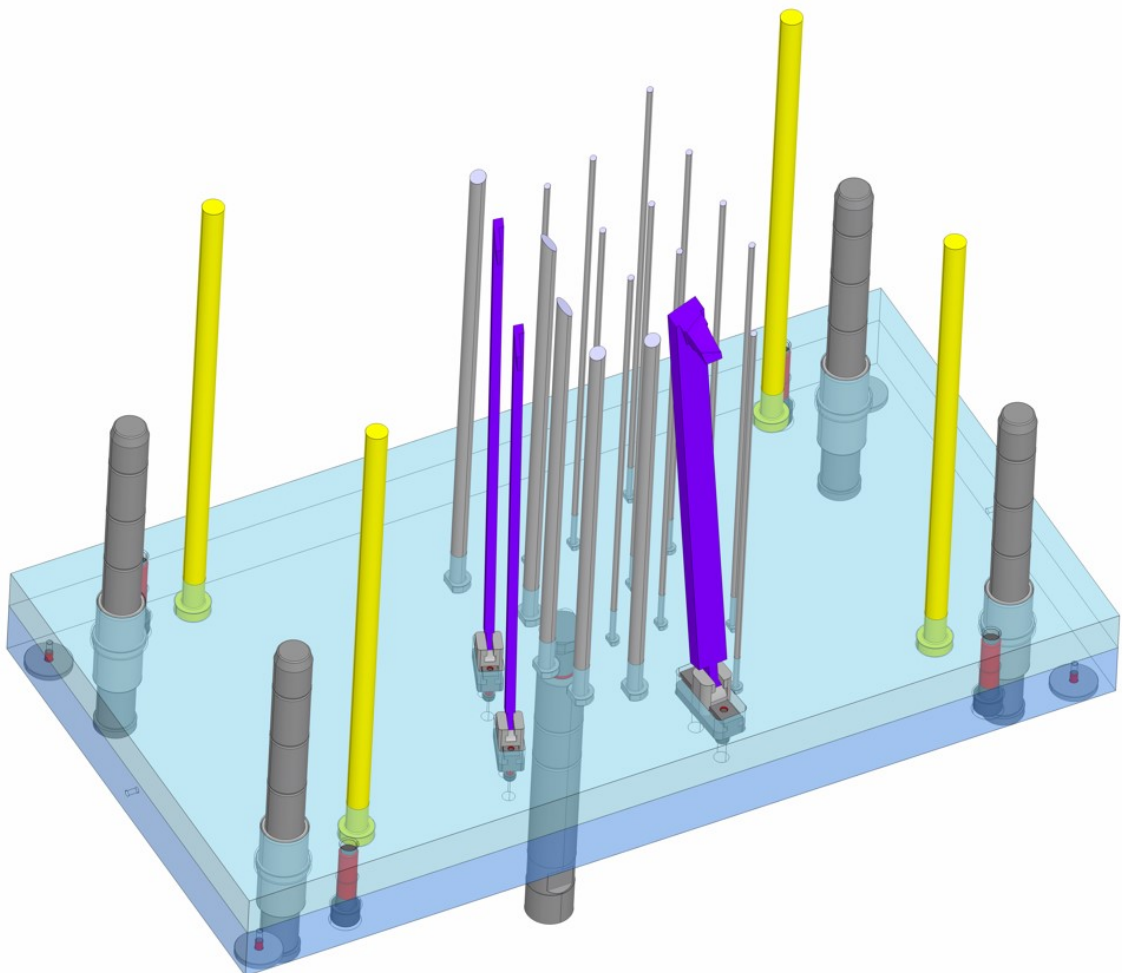
Obrázek 57 Speciální blok pro boční odformování



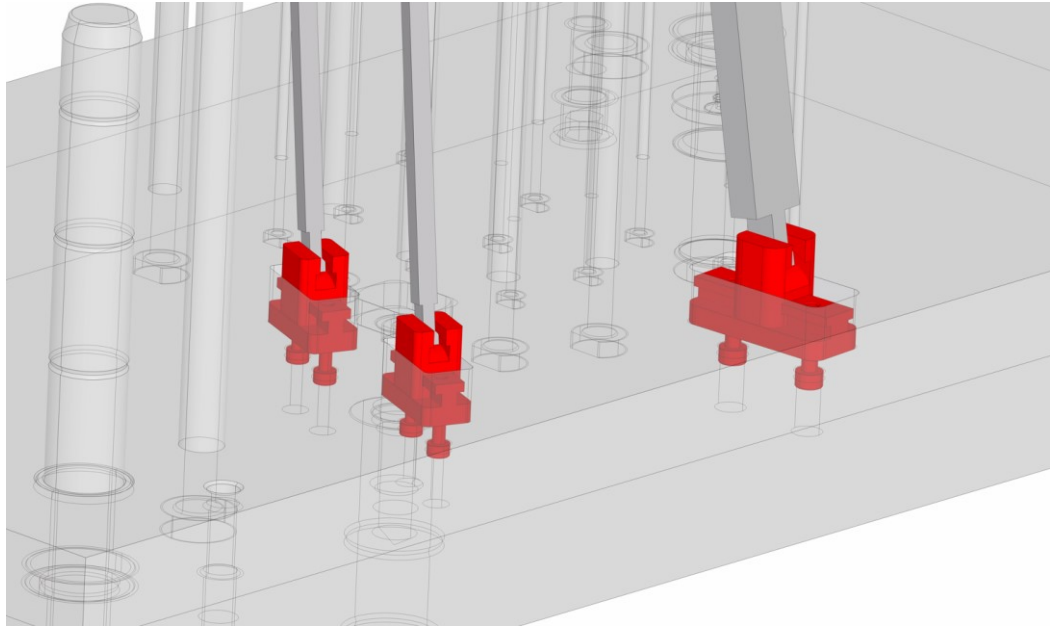
Obrázek 58 Umístění bloku ve formě zvýrazněného červenou barvou

7.3 Vyhazovací systém

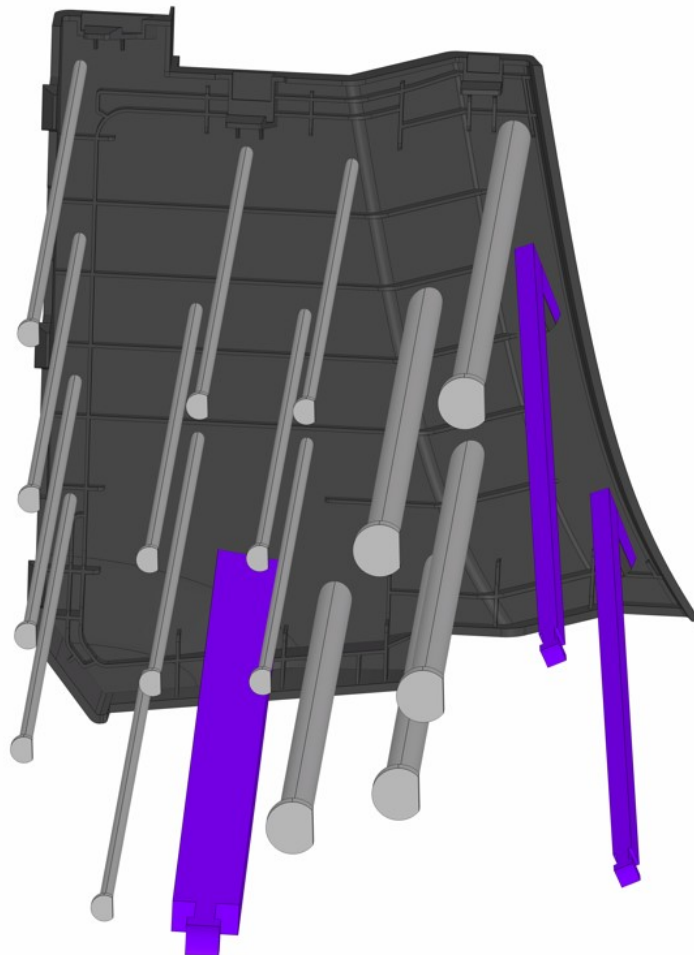
Vyhazovací systém slouží k odformování výrobku z dutiny formy. Skládá se ze dvou desek (opěrná deska, kotevní deska) mezi kterými jsou uchyceny vyhazovače. Obě desky jsou k sobě spojeny šrouby. Vyhazovací desky jsou vedeny skrze vodící pouzdra vodícími čepky a přes táhlo jsou připojeny k uzavírací jednotce vstřikovacího stroje, která koná dopředný pohyb a tím je výrobek vyhozen z formy. Do počáteční polohy vrátí vyhazovací desky vracecí kolíky, které jsou na Obr. 59 zvýrazněny žlutou barvou. Ze spodní strany opěrné desky se nachází dosedka, což je pryžový doraz, aby nedošlo k prudkému nárazu mezi opěrnou a upínací deskou. Vyhazovače mají mezi deskami jednostranné zajištění proti pootočení. K vyhazovacím deskám jsou šrouby uchyceny tři šikmé vyhazovací jednotky (obr. 60), ve kterých jsou vedeny šikmé vyhazovače (na Obr. 59 jsou zvýrazněny fialovou barvou), které se podílejí na odformování vstřikovaného výrobku. Rozmístění vyhazovačů vůči výrobku je znázorněno na Obr. 61.



Obrázek 59 Vyhazovací systém



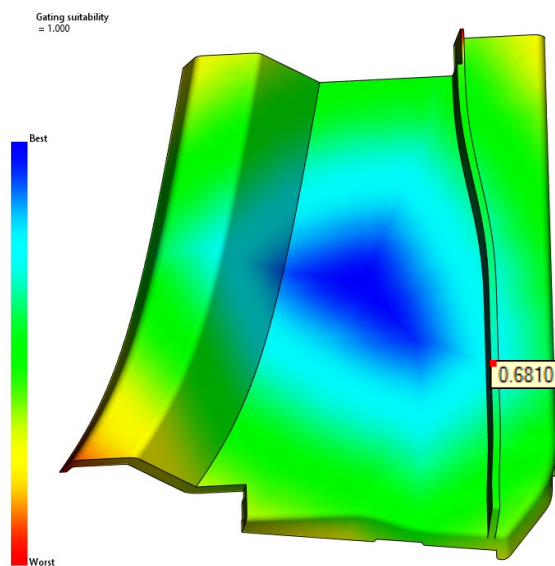
Obrázek 60 Šikmé vyhazovací jednotky



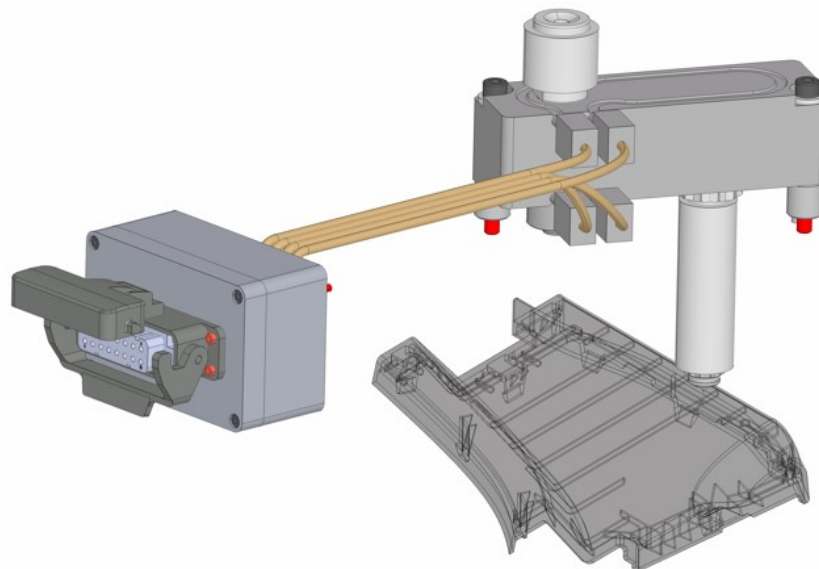
Obrázek 61 Rozmístění vyhazovačů vůči výrobku

7.4 Vtokový systém

V rámci zadání byl zadán horký vtokový systém, který byl sestaven v online generátoru firmy Meusburger. K jeho vytvoření bylo zapotřebí zjistit pomocí Moldflow analýzy vhodně umístění vtokového ústí. Proto byla na vytvořeném modelu dílu provedena analýza vhodnosti umístění vtoku. Výsledek analýzy je vidět na Obr. 62, včetně vyznačeného bodu, kde bylo rozhodnuto umístit vtok. Na základě místa ústí vtoku byl vygenerován blok horkého vtoku s označením EH 61001 IMT1, který je vidět na Obr. 63. Pro tento blok byla zvolena tryska smartFill RT. K horkému vtoku byla od firmy Meusburger vybrána 16 A zástrčka do sítě, která je namontovaná na kabelovém krytu a rovněž zobrazena na Obr. 63.



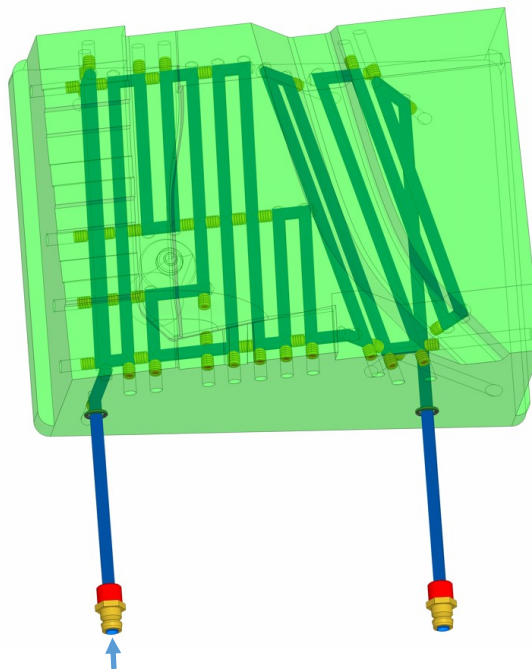
Obrázek 62 Výsledek analýzy vhodnosti umístění vtoku



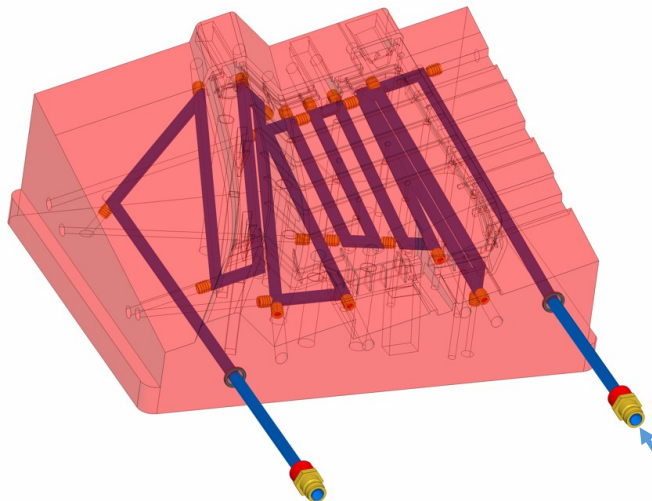
Obrázek 63 Horký vtok a zástrčka pro připojení do sítě

7.5 Temperační systém

Temperační systém má za úkol vytemperovat formu na požadovanou teplotu a poté chladit vstříkovaný výrobek. Temperačním médiem je filtrovaná voda. Temperace navržené formy byla rozdělena na dva samostatné okruhy, jeden okruh byl vytvořen pro tvárnici a druhý pro tvárník, jak je vidět na Obr. 64 a Obr. 65. Okruhy byly vytvořeny vrtáním s průměrem kanálků 8 mm. K utěsnění vrtaných děr a vytvoření temperačního okruhu byly použity zásepky s průměrem 8 mm. Pro utěsnění mezery mezi tvarovými jádry a deskami formy byly použity O – kroužky. Okruh je prostřednictvím přípojek s ventilem a hadic připojen k temperační jednotce, kde je ohřáté médium chlazeno na požadovanou teplotu.



Obrázek 64 Temperační okruh tvárnice



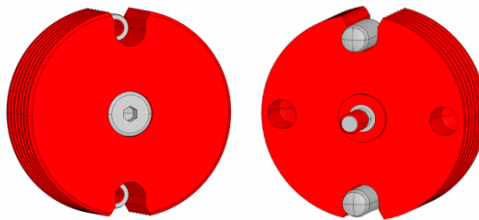
Obrázek 65 Temperační okruh tvárníku

7.6 Odvzdušnění formy

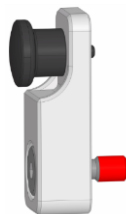
Na základě výsledků z analýz (uvedených níže) se předpokládá, že vzduch bude unikat mezerami mezi pohyblivými částmi formy a mezerou v dělicí rovině.

7.7 Přeprava a zajištění formy

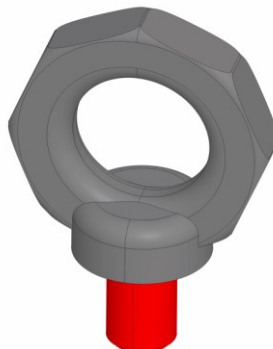
Aby se forma dala přepravit, musí být nejprve zajištěny všechny pohyblivé části formy a k tomuto účelu slouží transportní zámky. Pro zajištění pohyblivé a nepohyblivé části formy byl vybrán otočný transportní zámek o průměru 60 mm, zobrazený na Obr. 66. Na Obr. 67 je pak plastový transportní zámek vyhazovacích desek, který při přepravě zajišťuje vyhazovací systém. Jelikož forma váží okolo 1650 kg, je nutné ji opatřit závěsnými oky (Obr. 68), která jsou určena pro přepravu formy a dají se odšroubovat. Pro formu byly zvolena čtyři závěsná oka, aby se s formou dobře manipulovalo. Nosnost závěsného oka záleží na způsobu uchycení k formě, u zvolených ok se vždy pohybuje nad 2000 kg.



Obrázek 66 Transportní zámek formy Meusburger E 1936



Obrázek 67 Transportní zámek vyhazovacích desek Meusburger E 1938



Obrázek 68 Otočné závěsné oko Meusburger E 1271

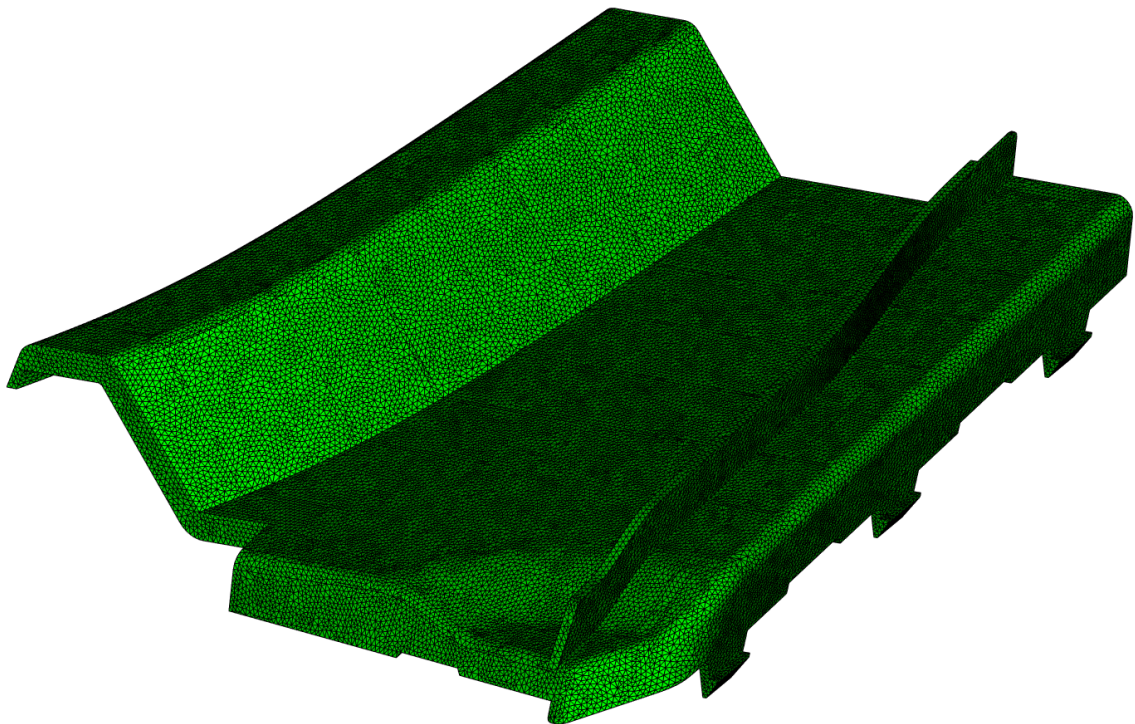
8 ANALÝZA VSTŘIKOVACÍHO PROCESU

Funkčnost navržené vstřikovací formy byla ověřena pomocí analýzy vstřikovacího procesu v programu Autodesk Moldflow. K ověření se použila numerická metoda Dual Domain. Pro spuštění analýzy se nejprve vygenerovaly sítě jednotlivých prvků, jako je zadaný kryt, temperační systém, horký vtok a blok formy. Poté následovalo nastavení procesních parametrů a spuštění analýzy.

8.1 Tvorba sítě

8.1.1 Síť zadaného výrobku

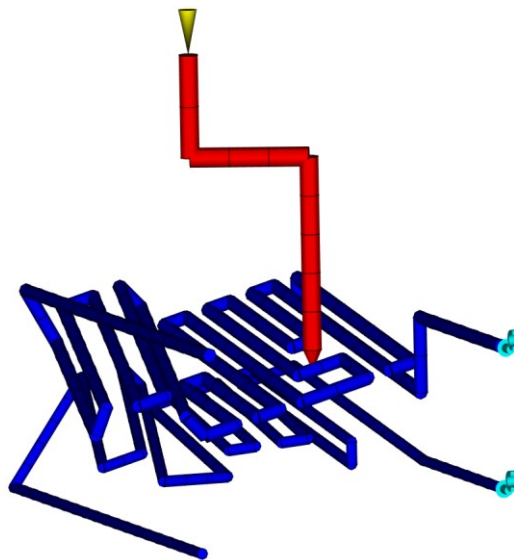
Do programu Autodesk Moldflow byl nejprve vložen 3D model zadaného dílu, vybrala se metoda Dual Domain a bylo spuštěno automatické generování sítě. Vygenerovaná síť je složena z trojúhelníků a je zobrazena na Obr. 69. Délka trojúhelníkových elementů byla nastavena na 1,5 mm. Jelikož vytvoření sítě probíhá automaticky, generuje ji počítač, je zapotřebí zkontrolovat kvalitu sítě. Kontroluje se velikost prvků sítě, různé překrytí elementů nebo případné mezery v síti, které by znemožnily výpočet analýzy. Ve všech těchto aspektech byla síť zkontrolována a vyhovuje požadavkům.



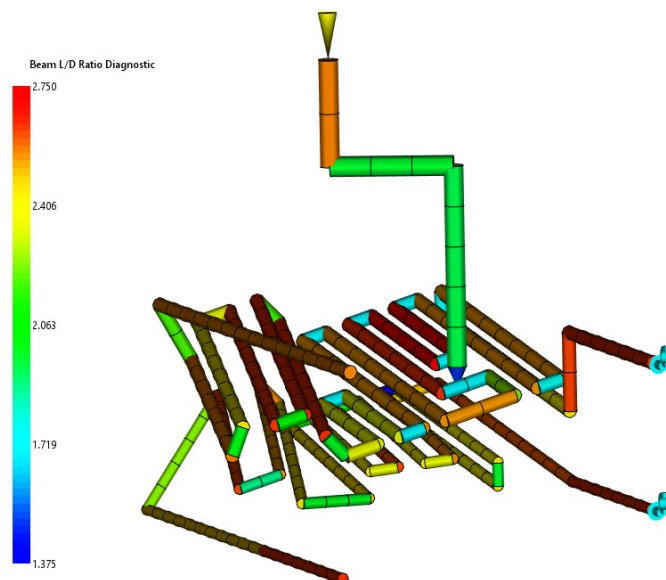
Obrázek 69 Vygenerovaná síť výrobku

8.1.2 Síť temperačního systému a horkého vtoku

K vytvoření sítě horkého vtoku a temperačního systému bylo zapotřebí nejprve vymodelovat v programu CATIA V5R19 křivky, které v ose kopírují skutečný tvar navrženého vtokového a temperačního systému. Poté se každé křivce v programu Autodesk Moldflow přiřadila funkce a tvar a následně se vygenerovaly Beam elementy, které jsou na Obr. 70. U vygenerovaných Beam elementů byl zkontrolován poměr délky a průměr elementů (L/D poměr), který by se měl nejčastěji pohybovat v rozmezí hodnot 2–3. Z Obr. 71 je patrné, že vygenerovaná síť tuto podmínku splňuje. Horký vtok, zobrazený na Obr. 70 červenou barvou má průměr vtokového kanálku 14 mm a vygenerované temperační kanálky mají průměr 8 mm.



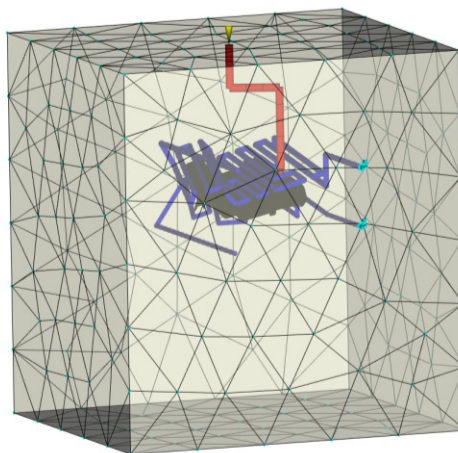
Obrázek 70 Beam elementy temperace a horkého vtoku



Obrázek 71 Kontrola L/D poměru

8.1.3 Síť bloku formy

Vstřikovací forma je v programu Autodesk Moldflow nahrazena blokem, který je vysítovaný a má rozměry navržené formy, tedy 596 x 596 x 638 mm (délka, šířka, výška). Blok se modeluje přímo v programu Autodesk Moldflow a je zobrazen na Obr. 72 spolu s předešlými sítěmi jednotlivých prvků.



Obrázek 72 Síť bloku formy

8.2 Nastavení procesních parametrů

Temperační systém je složen ze dvou samostatných okruhů (pravá a levá strana formy) a tak má dva regulovatelné vstupy. Pro oba vstupy byly nastaveny stejné parametry. Jako temperační médium byla zvolena filtrovaná voda o teplotě 30 °C a průtoku 10 l/min.

Další nastavení procesních parametrů je přehledně zapsáno v Tab. 1. Čas vstřikování, dotlaku a chlazení byl řízen automaticky. Po nastavení parametrů, byla spuštěna analýza.

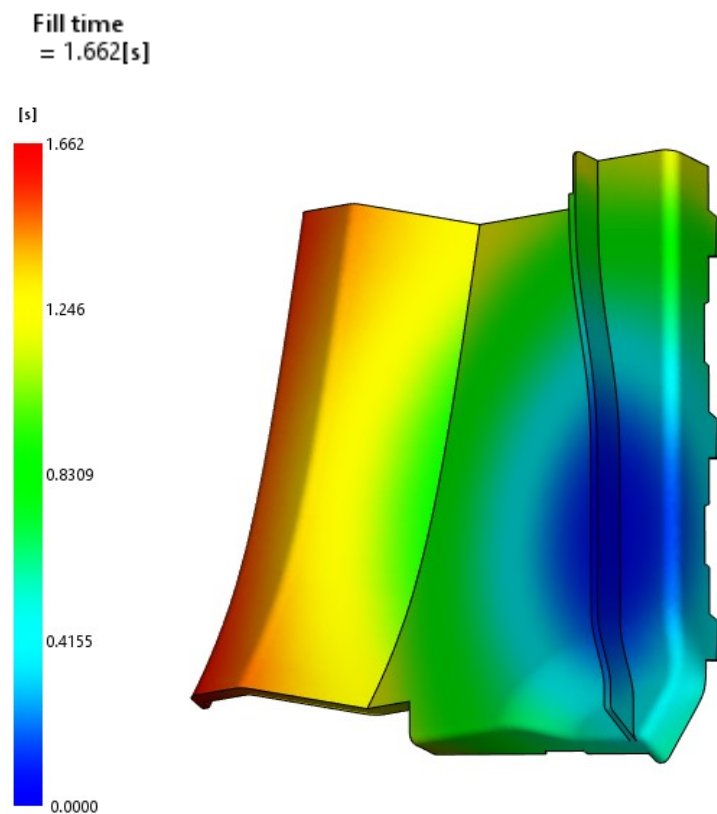
Tabulka 1 Nastavené procesní parametry pro Moldflow analýzy

Procesní parametr	Nastavená hodnota	Jednotky
Teplota taveniny	230	[°C]
Čas otevření formy	5	[s]
Teplota povrchu formy	40	[°C]
Vyhazovací teplota	70	[°C]
Minimální procentuální počet zatuhnutých vrstev při vyhazovací teplotě	90	[%]
Doba plnění	1,5	[s]
Přepnutí na dotlak při zaplnění	98	[%]

8.3 Výsledky analýzy plnění

8.3.1 Vstřikovací čas (Fill Time)

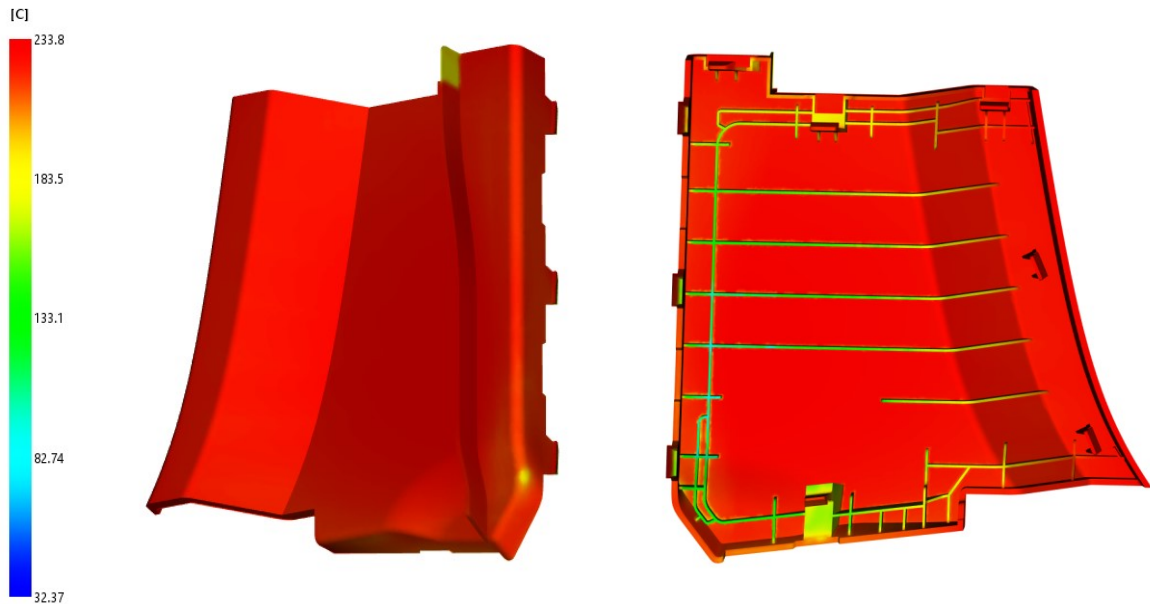
Touto analýzou se zjistilo, jak dlouho bude trvat zaplnění dutiny formy vstřikovaným polypropylenem. Obr. 73 barevně zobrazuje, jak daleko doputuje materiál napříč formou v daném čase. Kompletní zaplnění vstřikovaného krytu nastane za 1,662 s, což se jen nepatrně liší od nastaveného času 1,5 s v procesních parametrech.



Obrázek 73 Výsledek doby plnění

8.3.2 Teplota taveniny (Bulk Temperature)

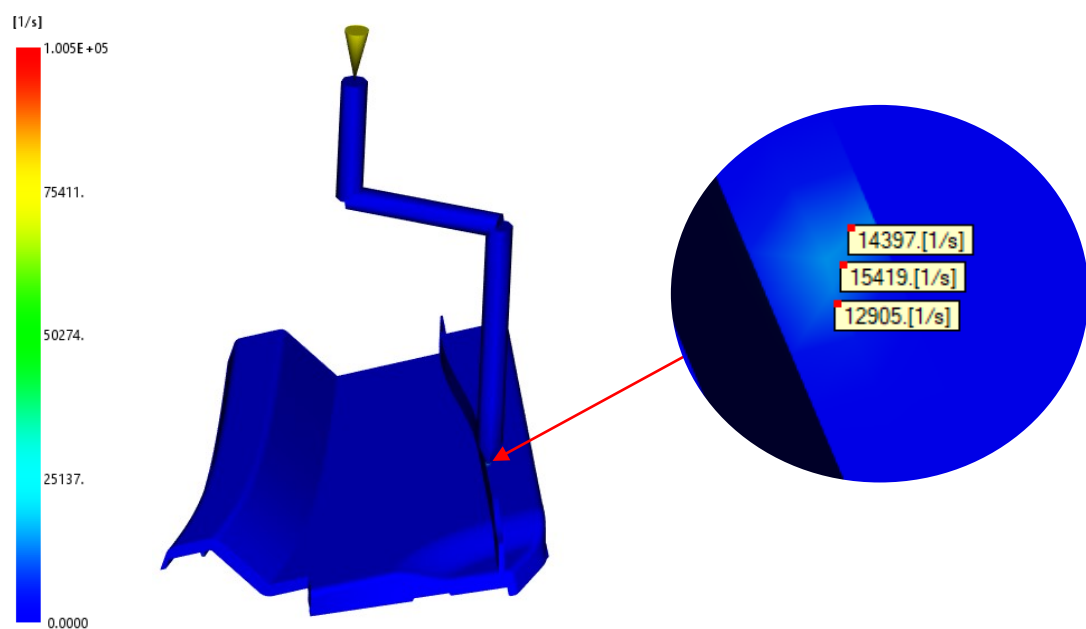
Aby nedošlo k degradaci materiálu, nesmí teplota taveniny překročit teplotu degradace materiálu, která je nad hranicí zpracovatelských teplot. Pro vstřikovaný polypropylen (viz. materiálový list v příloze) jsou zpracovatelské teploty v rozmezí 200–250 °C. Z uvedené analýzy bylo zjištěno, že v době kompletního zaplnění dutiny formy je maximální teplota taveniny 233,8 °C, a tedy se nachází ve výrobcem stanoveném rozsahu. Výsledek analýzy je zobrazen na Obr. 74 a je na něm vidět, že nejrychleji chladnou žebra na spodní straně vstřikovaného krytu.



Obrázek 74 Výsledek analýzy teploty taveniny v čase 1,662 s

8.3.3 Rychlost smykové deformace (Shear Rate, Bulk)

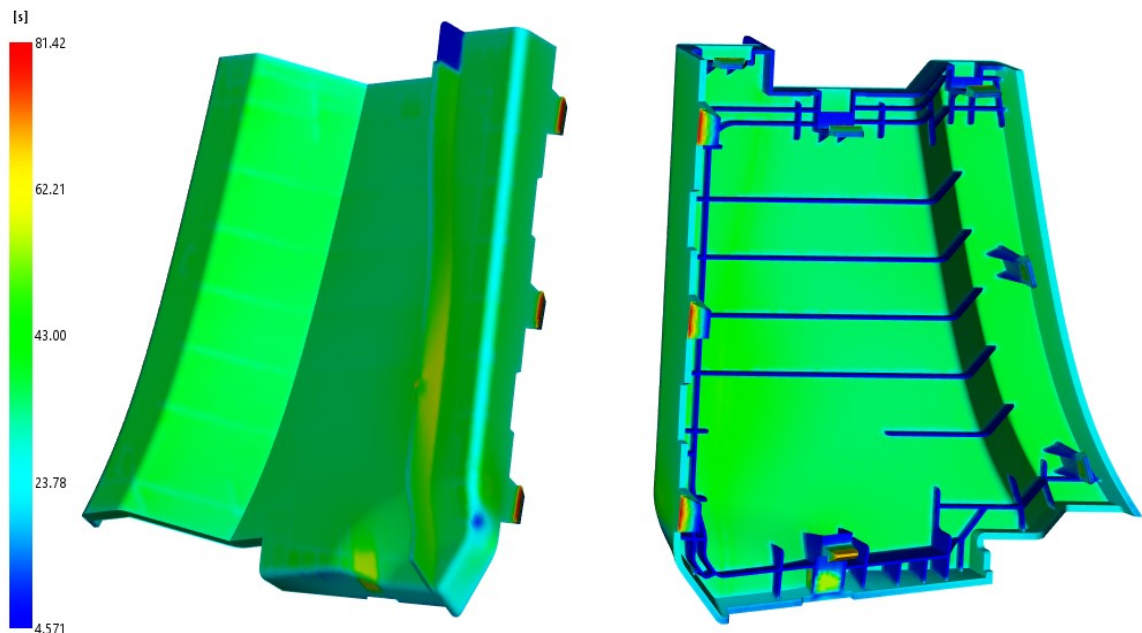
Vysoká rychlost smykové deformace způsobuje degradaci materiálu, proto je zapotřebí nepřekročit přípustné hodnoty. Pro polypropylen jsou kritické hodnoty, které přesahují hodnotu $100\,000\text{ s}^{-1}$. Na Obr. 75 by byly znázorněny červenou barvou, avšak z analýzy vyplývá, že těchto hodnot nebylo dosaženo. Jak je vidět z Obr. 75 nejvyšší rychlost smykové deformace je v místě vtokového ústí, kde dosahuje hodnot okolo $15\,000\text{ s}^{-1}$ a z toho plyne, že nebude docházet k degradaci materiálu.



Obrázek 75 Výsledek analýzy rychlosti smykové deformace

8.3.4 Doba k dosažení vyhazovací teploty (Time to Reach Ejection Temperature)

Táto analýza je důležitá z pohledu vyhazování výrobku ze vstřikovací formy. Pokud by v místech styku vyhazovacích kolíků s výrobkem nebyl materiál dostatečně ochlazen, mohlo by dojít k poškození výrobku. Analýza tak ukazuje, ve který moment je již možné výrobek z formy vyhodit. Z Obr. 76 plyne, že na vyhazovací teplotu bude celý díl ochlazený za 81,42 s, ale z formy je možné jej vyhodit již po uplynutí 43 s, protože místa, kde jsou umístěny vyhazovače jsou zatuhlé.

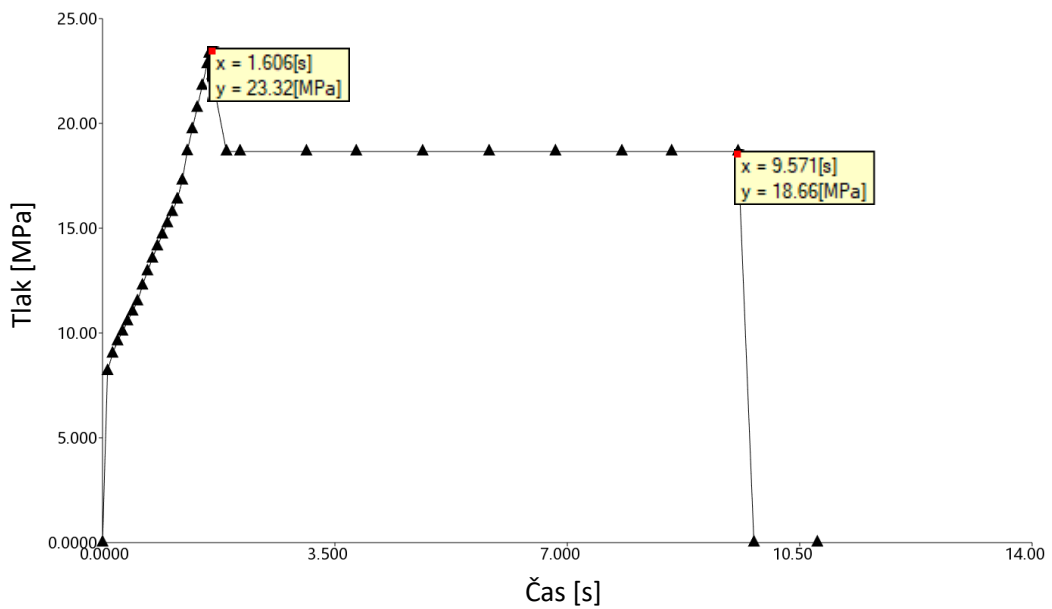


Obrázek 76 Výsledek analýzy doby k dosažení vyhazovací teploty

8.3.5 Tlak v místě vtoku (Pressure at Injection Location)

Křivka na Obr. 77 zachycující průběh tlaku v závislosti na čase, odpovídá procesnímu nastavení. V místě vtoku se tlak nejprve prudce zvýší do maximální hodnoty 23,32 MPa v čase 1,606 s, tedy do fáze, než je zaplněna dutina formy. Po zaplnění se přepne na dotlak, který byl nastaven na 8 s a má 80 % hodnotu vstřikovacího tlaku. Z výsledku analýzy vyplývá, že skutečný dotlak má v čase 9,571 hodnotu 18,66 MPa.

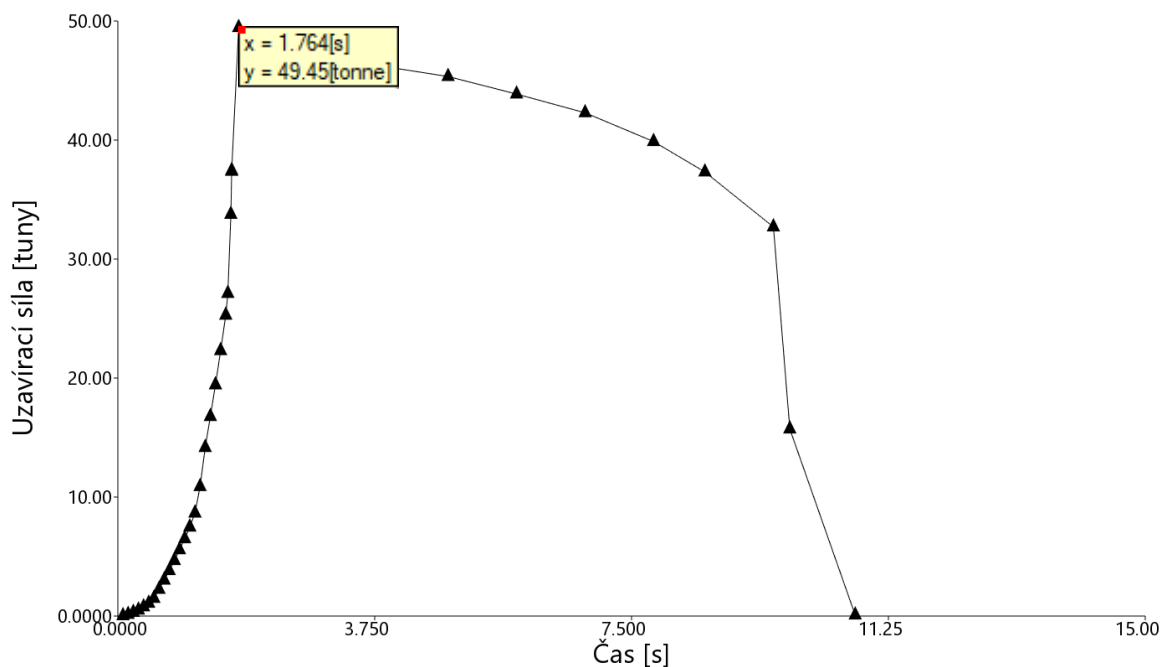
Maximální hodnota 23,32 MPa je zásadní pro výběr vstřikovacího stroje. Stroj by měl být schopen tento tlak vyvinout a v praxi se k němu přidává ještě 10 % rezervy. Minimální hodnota vstřikovacího tlaku je tedy v tomto případě 25,652 MPa (256,52 bar).



Obrázek 77 Výsledek analýzy tlaku v místě vtoku

8.3.6 Uzavírací síla (Clamp Force)

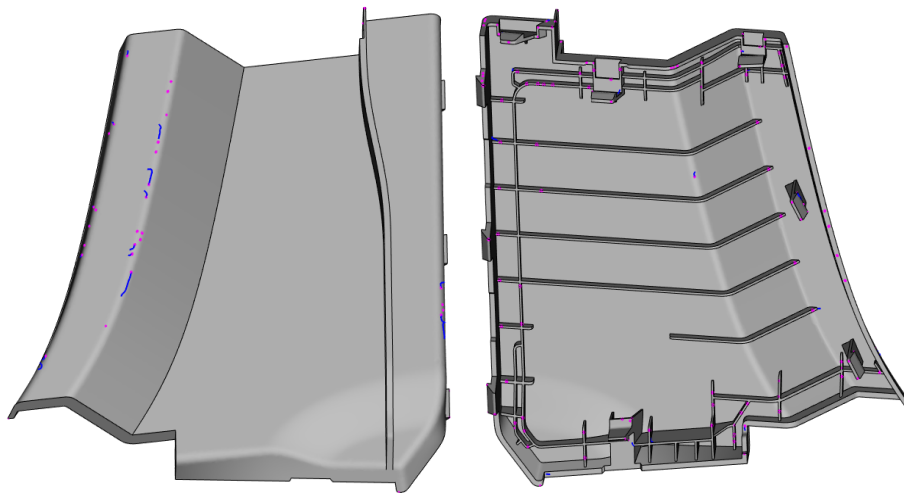
Tato analýza ukazuje závislost uzavírací síly na čase. Tak jak polymerní materiál plní dutinu formy, tak roste i uzavírací síle, která dosáhne maximální hodnoty krátce po zaplnění dutiny formy. Z Obr. 78 se dá vyčíst, že maximální uzavírací síla byla dosažena v čase 1,764 s a dosáhla hodnoty 50 tun, to je v přepočtu 500 kN. Výsledek analýzy uzavírací síly určuje výběr vstřikovacího stroje, který by měl být schopen vyvinout o 20 % vyšší uzavírací sílu, než byla určena z analýzy, tzn. alespoň 600 kN.



Obrázek 78 Výsledek analýzy uzavírací síly

8.3.7 Vzduchové bubliny a studené spoje (Air Traps and Weld Lines)

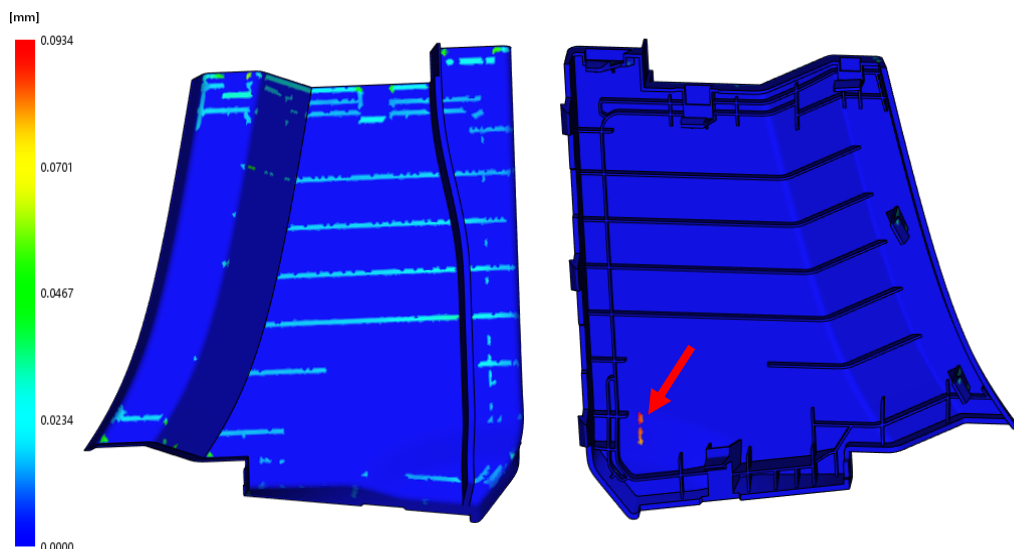
Výsledek analýzy zobrazuje potenciální místa vzniku vzduchových bublin a studených spojů, jak je vidět na Obr. 79. Výskyt vzduchových bublin je zejména na spodní straně výrobku, kde se nachází žebrování, které vzduch často zachytává. Výskyt není tak enormní, dá se předpokládat, že uniknou mikromezerami v dělicích rovinách. Studené spoje představují problém zejména pro pevnost výrobku, většina se však nachází na nefunkčních částech výrobku, a tak je jejich vliv zanedbatelný.



Obrázek 79 Výsledek analýzy vzduchových bublin a studených spojů

8.3.8 Propadliny (Sink Marks)

Propadliny vznikají v místech, kde se materiál nerovnoměrně smršťuje, tedy jak je vidět z Obr. 80 v místech pod žebry, nebo kde je širší stěna výrobku. Nejhlubší propadlina vznikne na spodní straně výrobku a má hloubku 0,0934 mm.

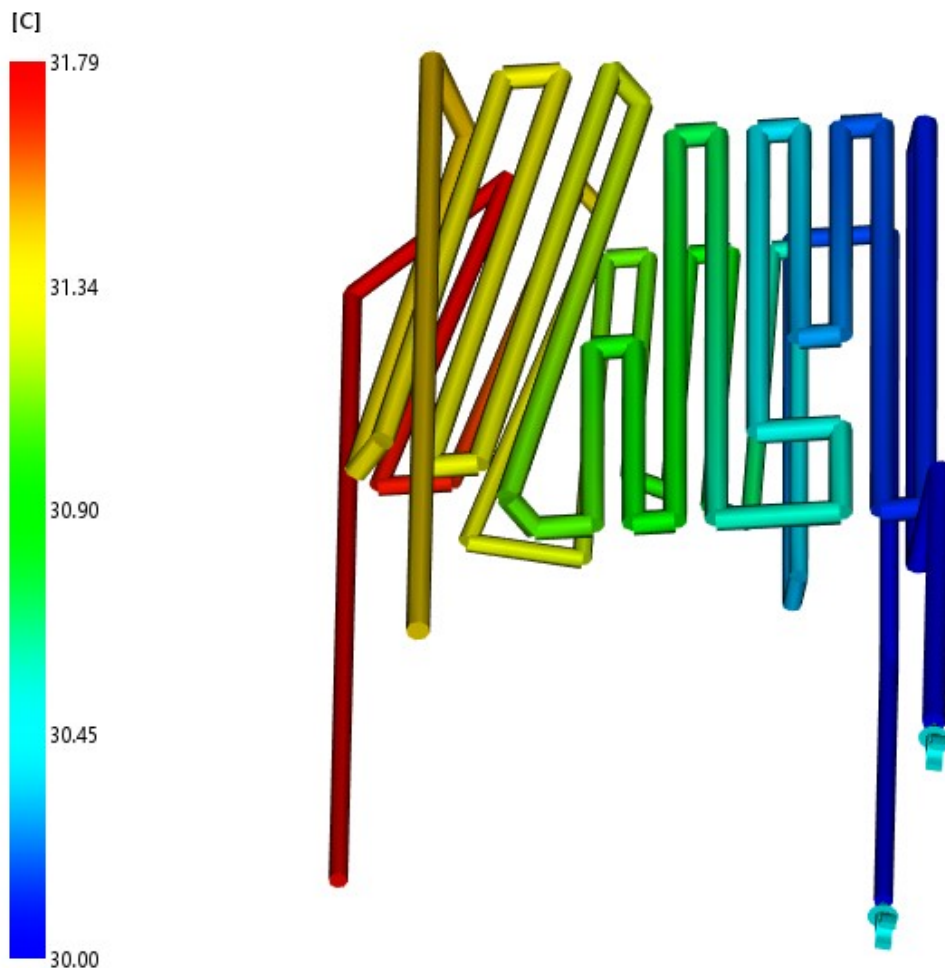


Obrázek 80 Výsledek analýzy propadlin

8.4 Výsledky analýzy teploty

8.4.1 Teplota temperačního média (Circuit Coolant Temperature)

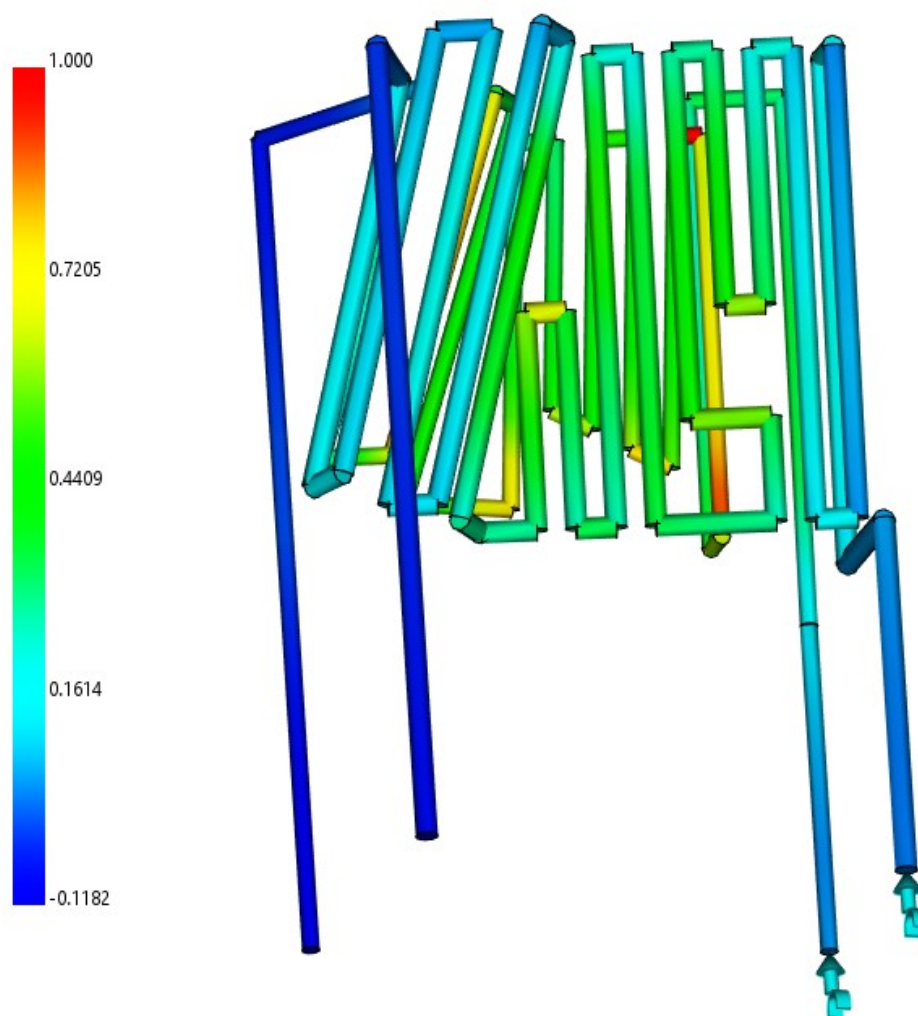
Analýza temperačního média, zobrazena na Obr. 81 ukazuje, jak se mění teplota média, kterým je filtrovaná voda, napříč temperačním systémem. Aby byl temperační systém funkční, nesmí rozdíl teplot na vstupu a výstupu překročit hodnotu 3 °C. Navržený temperační systém podmínku splňuje a rozdíl teplot na vstupu a na výstupu dosáhl hodnoty 1,79 °C.



Obrázek 81 Výsledek analýzy teploty temperačního média

8.4.2 Efektivita odvodu tepla (Circuit Heat Removal Efficiency)

Skrze tuto analýzu se zjistí, která místa nejlépe odvádějí teplo z prostoru dutiny formy, jak je vidět na Obr. 82. Červená místa znamenají, že teplo z formy je v těchto místech odváděno nejintenzivněji, naopak tmavě modrá označují místa, kde temperační systém teplo do formy dodává. Problém dodávání tepla do formy nastává na konci temperačních okruhů.

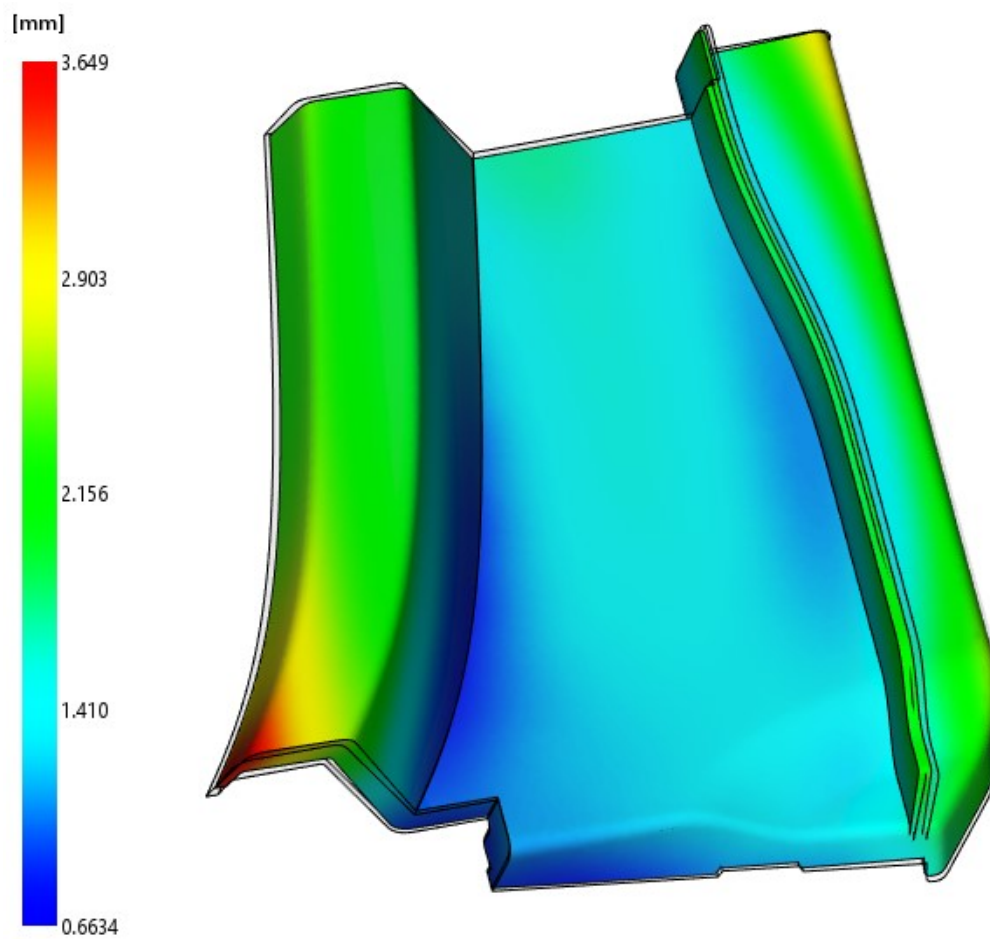


Obrázek 82 Výsledek analýzy efektivity odvodu tepla

8.5 Výsledky analýzy smrštění a deformace

8.5.1 Deformace, vliv všech efektů (Deflection, All Effects)

Výsledek analýzy zobrazuje na Obr. 83 vliv deformace všech efektů, mezi které patří vliv chlazení a smrštění materiálu. Obdobně jako u propadlin, nejvíce vznikají deformace v místech, kde je tloušťka stěny největší, v Obr. 83 jsou zobrazeny červenou barvou. Výrobek se nejvíce zdeformuje na kraji, kde deformace dosáhla hodnoty 3,649 mm.



Obrázek 83 Deformace, vliv všech efektů

9 VOLBA VSTŘIKOVACÍHO STROJE

Ke vstřikování polymerního materiálu byl vybrán stroj od firmy Arburgr s označením ALLROUNDER 630 S 2500-800 (45). Výběr stroje byl učiněn na základě požadovaných parametrů, které jsou přehledně sepsány v Tab. 2. Požadovaná hmotnost vstřikované dávky je určena z hmotnosti výrobku, zvětšené o rezervu 10 %. Hmotnost vstřikované dávky činí tedy 117,7 g a na základě toho byla vybrána vstřikovací jednotka 800 (podle EUROMAP) s průměrem šneku 45 mm.

Tabulka 2 Porovnání parametrů vstřikovacího stroje s požadovanými parametry

Parametr	Parametry stroje	Požadované parametry
Rozměr mezi vodícími sloupky [mm]	630x630	596x596
Uzavírací síla [kN]	2500	600
Vstřikovací tlak [bar]	2470	256,52
Hmotnost vstřikované dávky [g]	232	117,7
Výška formy [mm]	300–700	638
Průměr středícího kroužku [mm]	160	160

DISKUSE VÝSLEDKŮ

V této práci byla navržena vstřikovací forma na výrobu plastového krytu části nárazníku automobilu. Byla navržena jako jednonásobná s horkým vtokovým systémem, kterým je dutina formy zaplněna polymerem. Vstřikovaným materiálem je polypropylen SABIC PP 575P, který je levný a má dobré tokové vlastnosti. Forma má rozměry 596 x 596 x 638 mm (délka, šířka, výška), které byly určeny na základě rozměrů vstřikovaného krytu a rozměrů prvků formy nutných k jeho odformování. Základ tvarové části formy tvoří tvárník a tvárnice, které jsou doplněny o čtyři boční čelisti a tři šikmé vyhazovače. Tvarové části jsou kaleny na 60 HRC. Pro boční odformování byly od firmy Meusburger vybrány čtyři kompaktní jednotky ve dvou provedeních podle zdvihu. V menším provedení mají kompaktní jednotky maximální zdvih 4,4 mm a ve větším provedení 6,4 mm. Pro odformování výrobku byly použity válcové a šikmé vyhazovače. Jelikož válcové vyhazovače nejsou orientovány kolmo na plochu vstřikovaného dílu, tak mají jednostranné zajištění proti pootočení. Horký vtokový systém byl sestaven v online generátoru firmy Meusburger na základě analýzy umístění vtokového ústí. Temperační systém je vrtaný, s průměrem kanálek 8 mm a má dva samostatné okruhy. Temperačním médiem je filtrovaná voda. Odvzdušnění formy není navrženo, na základě analýz se předpokládá, že vzduch bude unikat mezerami mezi pohyblivými částmi a mezerou dělicí roviny formy. Forma váží 1650 kg a pro přepravu byla opatřena čtyřmi transportními oky a transportními zámky.

Dále byla provedena analýza vstřikovacího procesu, která slouží k odhalení chyb a k optimalizaci navrhované vstřikovací formy. Předchází se tak odhalení vad až na vyrobené formě, jejichž následná oprava je nákladná a v některých případech vyžaduje kompletní předělání formy. Výsledky analýzy vstřikovacího procesu jsou sepsány v Tab. 3.

První analýza, která se při návrhu vstřikovací formy provádí, je umístění vtokového ústí. Podle této analýzy vycházelo neoptimálnější místo pro umístění vtokového ústí uprostřed vstřikovaného dílu. S ohledem na konstrukci temperačního systému a horkého vtoku bylo toto místo o kousek posunuto.

Provedením analýzy plnění se zkontrolovalo kompletní zaplnění dutiny formy vstřikovaným polypropylenem a vstřikovací čas dosáhl hodnoty 1,662 s. Teplota taveniny v čase zaplnění formy dosáhla hodnoty 233,8 °C a je tak ve výrobcem stanoveném rozmezí zpracovatelských teplot, které jsou pro vstřikovaný polypropylen v rozmezí 200–250 °C. Nebude tedy docházet k degradacím materiálu vlivem zvýšené teploty. Další vliv na degradaci materiálu

má rychlost smykové deformace. Analýzou byla zjištěna maximální hodnota $15\,419\text{ s}^{-1}$, která je nízko pod kritickou hodnotou $100\,000\text{ s}^{-1}$ a tak k degradacím nebude docházet. Doba dosažení vyhazovací teploty je 81,42 s, avšak výrobek může být vyhozený z formy již po 43 s, protože v místech, kde se stýká s vyhazovačemi je dostatečně ochlazený. V místě vtoku vstříkovaného dílu byl dosažen maximální tlak o hodnotě 23,32 MPa. Tento tlak je minimálně nutný pro kompletní zaplnění formy a je důležitý při výběru vstříkovacího stroje, který by měl být schopen požadovaný tlak vyvinout i s dostatečnou rezervou. Dalším výsledkem analýzy byla maximální uzavírací síla, která má pro navrhovanou formu hodnotu 500 kN. Opět je výsledek této analýzy rozhodující při výběru vstříkovacího stroje, kdy stroj musí dosahovat minimálně o 20 % vyšší hodnotu uzavírací síly, v tomto případě je to 600 kN. Analýzou byly zjištěny také místa vzniku vzduchových bublin a studených spojů, která však na funkčnost výrobku nemají zásadní vliv. Dle analýzy propadlin, vznikají propadliny zejména pod žebry a maximální hloubka propadlin je 0,0934 mm.

Navržená temperace byla rovněž ověřena analýzou teploty temperačního média. Rozdíl teplot média na vstupu a výstupu, z důvodu dobrého chlazení výrobku, nesmí překročit 3°C . Analýzou bylo ověřeno, že u navrženého temperačního systému je rozdíl $1,79^{\circ}\text{C}$ a tak je podmínka splněna. Poslední analýzou je analýza deformace při vlivu všech efektů, z té bylo zjištěno, že maximální deformace vzniká na kraji výrobku a má hodnotu 3,649 mm.

Tabulka 3 Výsledky analýzy vstříkovacího procesu

Výsledek	Hodnota	Jednotky
Vstříkovací čas	1,662	[s]
Maximální teplota taveniny	233,8	[$^{\circ}\text{C}$]
Maximální zjištěná rychlost smykové deformace	15 419	[s^{-1}]
Doba k dosažení vyhazovací teploty	81,42	[s]
Maximální tlak v místě vtoku	23,32	[MPa]
Maximální uzavírací síla	500	[kN]
Maximální hloubka propadlin	0,0934	[mm]
Maximální rozdíl teplot temperačního média	1,79	[$^{\circ}\text{C}$]
Maximální deformace	3,649	[mm]

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá návrhem vstřikovací formy pro zadaný díl. Je rozčleněna do teoretické a praktické části. V teoretické části byla zpracována literární studie, která ve stručnosti popisuje základní vlastnosti polymerních materiálů, vstřikovací stroj, vstřikovací formu, analýzu vstřikovacího procesu a nejčastější vady vzniklé vstřikováním. Při vypracovávání literární studie byl kladen důraz zejména na informace týkající se vstřikovací formy, o které tato diplomová práce pojednává.

Praktická část se zabývá návrhem vstřikovací formy pro díl krytu části nárazníku automobilu. Jako materiál dílu byl zvolen polypropylen od firmy SABIC s označením PP 575P. Nejprve byl v programu CATIA V5R19 vymodelován díl, u kterého byla provedena analýza vhodnosti umístění vtoku, podle které bylo vybráno místo pro vstup taveniny do vstřikovací formy. Forma se bude plnit prostřednictvím horkého vtoku, který byl vygenerován v online generátoru od firmy Meusburger současně s deskami vstřikovací formy. Veškeré normálie, ze kterých je forma složena, byly buď vygenerovány online generátorem od firmy Meusburger (např. desky formy, horký vtok, vodící čepy, transportní prvky), nebo byly vytvořeny v programu CATIA V5R19 (tvarové části). Navržená forma má rozměry 596 x 596 x 638 mm (délka, šířka, výška), je jednonásobná a má hmotnost 1650 kg. Na odformování výrobku se podílelo celkem devět tvarových částí. Základ tvarové části tvoří tvárník a tvárnice, které byly doplněné o čtyři boční čelisti a tři šikmé vyhazovače. Pro formu byly navrženy dva temperační okruhy o průměru 8 mm a jako temperační médium byla zvolena filtrovaná voda.

Návrh formy byl ověřen v programu Autodesk Moldflow analýzou vstřikovacího procesu. Analýzou byly získány informace o plnění dutiny formy, jako je například vstřikovací čas 1,662 s a doba dosažení vyhazovací teploty 81,42 s, která může být snížena na 43 s, protože výrobek bude v místech, kde se nacházejí vyhazovače, dostatečně ochlazený. Analýzou byl pro vstřikovací stroj určen vstřikovací tlak, který činí 256,52 bar a uzavírací síla 600 kN.

Na závěr praktické části byl vybrán stroj od firmy Arburgr s označením ALLROUNDER 630 S 2500-800 (45), který byl vybrán na základě výsledků analýzy a parametrů vstřikovací formy.

10 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CHANDA, Manas. *Plastics Technology Handbook*. Fifth Edition. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2018. ISBN 978-1-4987-8621-8.
- [2] YANG, Yi, Xi CHEN, Ningyun LU a Furong GAO. *Injection molding process control, monitoring, and optimization*. Cincinnati: Hanser Publishers, 2017. ISBN 978-1-56990-592-0.
- [3] BAIRD, Donald a Dimitris COLLIAS. *Polymer Processing: Principles and Design*. Second Edition. New jersey: John Wiley & Sons, 2014. ISBN 978-0-470-93058-8.
- [4] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů 2: Simulace, analýzy, odstraňování vad, 3D tisk Teorie a praxe*. První vydání. Praha: Grada Publishing, 2021. ISBN 978-80-271-4247-7.
- [5] OSSWALD, Tim a Georg MENGES. *Material Science of Polymers for Engineers*. 3rd Edition. Munich: Carl Hanser Verlag, 2012. ISBN 978-1-56990-514-2.
- [6] MOAYYEDIAN, Mehdi. *Intelligent Optimization of Mold Design and Process Parameters in Injection Molding*. Imprint: Springer, 2019. Springer Theses, Recognizing Outstanding Ph.D. Research. ISBN 978-3-030-03355-2.
- [7] ALFREDO CAMPO, E. *The Complete Part Design: For Injection Molding of Thermoplastics*. Munich: Carl Hanser Verlag, 2006. ISBN 978-3-446-40309-3.
- [8] KOLTZENBURG, Sebastian, Michael MASKOS a Oskar NUYKEN. *Polymer Chemistry*. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 2017. ISBN 9783662492772.
- [9] OSSWALD, Tim a Natalie RUDOLPH. *Polymer Rheology: Fundamentals and Applications*. Munich: Carl Hanser Verlag, 2015. ISBN 978-1-56990-517-3.
- [10] OSSWALD, Tim A. *Understanding Polymer Processing: Processes and Governing Equations*. 2nd ed. Munich: Carl Hanser Verlag, 2017. ISBN 978-1-56990-647-7.
- [11] ZHENG, Rong, Xi-Jun FAN a Roger TANNER. *Injection Molding: Integration of Theory and Modeling Methods*. 1 st ed. Heidelberg: Springer Berlin, 2011. ISBN 978-3-642-21262-8.
- [12] OSSWALD, Tim a Juan HERNÁNDEZ-ORTIZ. *Polymer Processing: Modeling and Simulation*. 1 st ed. Munich: Carl Hanser Verlag, 2006. ISBN 978-3-446-40381-9.
- [13] NARANJO, Alberto, María NORIEGA E., Tim OSSWALD, Alejandro ROLDÁN-ALZATE a Juan SIERRA. *Plastics Testing and Characterization: Industrial Applications*. Munich: Carl Hanser Verlag, 2008. ISBN 978-3-446-41315-3.
- [14] BAUR, Erwin, Tim OSSWALD a Natalie RUDOLPH. *Plastics Handbook: The Resource for Plastics Engineers*. 5th ed. Munich: Carl Hanser Verlag, 2019. ISBN 978-1-56990-559-3.
- [15] Hmotnostní (MFR) a objemový (MVR) index toku taveniny. In: *Testsysteme.cz* [online]. Praha: JD Dvořák [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://www.testsysteme.cz/stanoveni-hmotnostniho-mfr-objemoveho-mvr-indexu-toku-taveniny>
- [16] GOODSHIP, Vanessa. *Practical Guide to Injection Moulding*. 2nd Edition. Shawbury: Smithers Rapra, 2017. ISBN 978-1-91024-294-0.
- [17] CAMPBELL, G. a Mark SPALDING. *Analyzing and troubleshooting single-screw extruders*. Cincinnati, Ohio: Hanser Publishers, 2013. ISBN 978-1-56990-448-0.

- [18] AGASSANT, Jean-François, Pierre AVENAS, Pierre CARREAU, Bruno VERGNES a Michel VINCENT. *Polymer Processing: Principles and Modeling*. 2nd Edition. Munich: Carl Hanser Verlag, 2017. ISBN 978-1569906057.
- [19] NARANJO, Alberto, Ma. NORIEGA, Juan SIERRA a Juan SANZ. *Injection molding processing data*. 2nd edition. Cincinnati, Ohio: Hanser Publications, 2019. ISBN 978-1-56990-666-8.
- [20] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN isbn978-80-271-0614-1.
- [21] MENNIG, Günter a Klaus STOECKHERT. *Mold-Making Handbook*. 3rd Edition. Munich: Carl Hanser Verlag, 2013. ISBN 978-1-56990-446-6.
- [22] BEAUMONT, John a Mark SMITH. *Runner and gating design handbook: tools for successful injection molding*. 3rd. Cincinnati: Hanser Publications, 2019. ISBN 978-1-56990-590-6.
- [23] GOODSHIP, Vanessa. *Design and manufacture of plastic components for multifunctionality: structural composites, injection molding, and 3D printing*. Amsterdam: William Andrew, 2016. ISBN 978-0-323-34061-8.
- [24] KAZMER, David O. *Injection Mold Design Engineering*. 2nd Edition. Munich: Carl Hanser Verlag, 2016. ISBN 978-1-56990-570-8.
- [25] DANGEL, Rainer. *Injection Moulds for Beginners*. 2nd Edition. Munich: Carl Hanser Verlag, 2020. ISBN 978-1-56990-818-1.
- [26] REES, Herbert a Bruce CATOEN. *Selecting Injection Molds: Weighing Cost vs Productivity*. Munich: Carl Hanser Verlag, 2006. ISBN 978-3-446-40308-6.
- [27] STRITZKE, Bernie. *Custom Molding of Thermoset Elastomers: A Comprehensive Approach to Materials, Mold Design, and Processing*. Munich: Carl Hanser Verlag, 2009. ISBN 978-1-56990-467-1.
- [28] PRUNER, Harry a Wolfgang NESCH. *Understanding Injection Molds*. 2nd Edition. Munich: Carl Hanser Verlag, 2020. ISBN 978-1-56990-843-3.
- [29] KENNEDY, Peter a Rong ZHENG. *Flow Analysis of Injection Molds*. 2nd Edition. Munich: Carl Hanser Verlag, 2013. ISBN 978-1-56990-512-8.
- [30] WANG, Maw-Ling, Rong-Yeu CHANG a Chia-Hsiang HSU. *Molding Simulation: Theory and Practice*. Munich: Carl Hanser Verlag, 2018. ISBN 978-1-56990-619-4.
- [31] ZHOU, Huamin. *Computer modeling for injection molding: simulation, optimization, and control*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2013. ISBN 978-0-470-60299-7.
- [32] BOBEK, Jiří. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů* [online]. Svitavy: Code Creator, s.r.o., 2016 [cit. 2023-02-21]. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/Cover.html>
- [33] MENGES, Georg, Walter MICHAELI a Paul MOHREN. *How to make injection molds*. 3rd ed. Munich: Hanser, 2001. ISBN 978-1569902820.
- [34] LIU, Shih-Jung a Musa KAMAL, ed., Avraam ISAYEV. *Injection Molding: Technology and Fundamentals*. Munich: Carl Hanser Verlag, 2009. ISBN 978-3-446-41685-7.
- [35] UNGER, Peter. *Gastrow Injection Molds: 130 Proven Designs*. 4th Edition. Munich: Carl Hanser Verlag, 2006. ISBN 978-1-56990-402-2.
- [36] GOODSHIP, Vanessa. *Troubleshooting Injection Moulding*. iSmithers Rapra Publishing, 2004. ISBN 9781859574706.

- [37] KERKSTRA, Randy a Steve BRAMMER. *Injection molding advanced troubleshooting guide*. Munich: Hanser Publications, 2018. ISBN 978-1-56990-645-3.
- [38] 7 common injection molding defects and how to avoid them. In: *Fastradius.com* [online]. Chicago: Fast Radius, 2022 [cit. 2023-02-22]. Dostupné z: <https://www.fastradius.com/resources/injection-molding-defects/>
- [39] INUI, Masatomo, Shunsuke ONISHI a Nobuyuki UMEZU. Visualization of potential sink marks using thickness analysis of finely tessellated solid model. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2018, 5(4), 409-418. ISSN 2288-4300. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcde.2018.02.003>
- [40] Eliminating the Sink Mark Before It Occurs. In: *Wevolver.com* [online]. RPWORLD, 2022 [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/article/eliminating-the-sink-mark-before-it-occurs>
- [41] WHAT CAUSES DELAMINATION IN INJECTION MOLDING?. In: *Midstatemold.com* [online]. MIDSTATE MOLD, 2020 [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://www.midstatemold.com/what-causes-delamination-in-injection-molding/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Význam symbolu
PE	-	polyethylen
HDPE	-	vysokohustotní polyethylen
PVC	-	polyvinylchlorid
LDPE	-	nízkohustotní polyethylen
PAM	-	polyakrylamid
PEX	-	zesíťovaný polyethylen
PP	-	polypropylen
PS	-	polystyrén
PC	-	polykarbonát
ABS	-	akrylonitrilbutadienstyren
SBR	-	kopolymer styrenu a butadienu
EVA	-	ethylen-vinylacetát
PU	-	polyuretan
PI	-	polyimid
T_g	°C	teplota skelného přechodu
T_f	°C	teplota tečení
T_m	°C	teplota tání
G	MPa	smykový modul
η	Pa*s	smyková viskozita
τ_{xy}	Pa	smykové napětí
$\dot{\gamma}$	s ⁻¹	rychlost smykové deformace
λ	s	relaxační čas
De	-	Debořino číslo
θ	s	čas pozorování
ITT/MFI	g/10min	index toku taveniny/ Melt Flow Index
MFR	g/10min	hmotnostní index toku taveniny
MVR	cm ³ /10min	objemový index toku taveniny
L	m	délka
D/d	m	průměr
Obr.	-	obrázek
MKP	-	metoda konečných prvků

CAD	-	Computer Aided Design
Re	-	Reynoldsovo číslo
v_s	m/s	rychlost toku
ν	m ² /s	kinematická viskozita
Tab.	-	tabulka
např.	-	například

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Molekulární struktura plastů [2]</i>	13
<i>Obrázek 2 Uspořádání monomerů v molekule [2]</i>	14
<i>Obrázek 3 Smykový modul polystyrénu v závislosti na teplotě [5]</i>	16
<i>Obrázek 4 Krystalická struktura polypropylenu [5]</i>	17
<i>Obrázek 5 Schematické znázornění obecné molekulární struktury [5]</i>	17
<i>Obrázek 6 Schematické znázornění viskoelastického Maxwellova modelu [9]</i>	19
<i>Obrázek 7 Schématické znázornění reometru s posuvnou deskou [10]</i>	20
<i>Obrázek 8 Schématické znázornění smykového toku mezi dvěma deskami [9]</i>	20
<i>Obrázek 9 Schéma objemového toku taveniny (průtokoměr) [14]</i>	22
<i>Obrázek 10 Přístroj k měření ITT [15]</i>	22
<i>Obrázek 11 Schéma vstřikovacího stroje [10]</i>	23
<i>Obrázek 12 Zóny vstřikovacího šneku [16]</i>	24
<i>Obrázek 13 Schématické zobrazení procesu tavení polymeru [18]</i>	25
<i>Obrázek 14 Sled událostí během cyklu vstřikování [10]</i>	27
<i>Obrázek 15 Vstřikovací cyklus [10]</i>	27
<i>Obrázek 16 Diagram pvT pro polystyren [10]</i>	29
<i>Obrázek 17 Diagram vyjadřující závislost vstřikovací teploty a dotlaku [10]</i>	29
<i>Obrázek 18 Vstřikovací stroj [21]</i>	30
<i>Obrázek 19 Fontánový tok [21]</i>	30
<i>Obrázek 20 Směr odformování [25]</i>	32
<i>Obrázek 21 Podélný a příčný řez formou [25]</i>	33
<i>Obrázek 22 Boční odformování [25]</i>	34
<i>Obrázek 23 Boční odformování [25]</i>	34
<i>Obrázek 24 Proces návrhu formy [28]</i>	35
<i>Obrázek 25 Generování střední roviny [29]</i>	36
<i>Obrázek 26 Vygenerovaná síť výrobku metodou Dual Domain [30]</i>	37
<i>Obrázek 27 Kombinace různých druhů sítě na jednom dílu [30]</i>	38
<i>Obrázek 28 Schématické zobrazení různého rozvržení vtokového systému [10]</i>	39
<i>Obrázek 29 Průřezy vtoků používané ve vstřikovaných formách [22]</i>	40
<i>Obrázek 30 Schématické zobrazení různých typů vtoku [10]</i>	41
<i>Obrázek 31 Základní provedení vyhřívání horkého rozvodu [32]</i>	42
<i>Obrázek 32 Různé uspořádání horkého vtokového systému [10]</i>	42
<i>Obrázek 33 Porovnání efektu různého průměru temperačních kanálů [32]</i>	44
<i>Obrázek 34 Dva základní typy temperace [28]</i>	44

<i>Obrázek 35</i> Typický temperační systém pro vstřikovací formy [23].....	45
<i>Obrázek 36</i> Odvzdušňovací kanály v pohyblivé části formy [25].....	46
<i>Obrázek 37</i> Kalené vyhazovače [21]	47
<i>Obrázek 38</i> Schéma formy s vyhazovacím paketem [21].....	48
<i>Obrázek 39</i> Studený spoj (Weld Line) [6].....	49
<i>Obrázek 40</i> Proudové čáry (Flow Lines) [38]	50
<i>Obrázek 41</i> Proudové čáry (Flow Lines) s kovovým plnivem [37].....	50
<i>Obrázek 42</i> Propadliny (Sink Marks) [38]	51
<i>Obrázek 43</i> Povrchová delaminace (Surface Delamination) [38]	52
<i>Obrázek 44</i> Nedotečený výrobek (Short Shots) [38].....	53
<i>Obrázek 45</i> Deformace (Warping) [38].....	54
<i>Obrázek 46</i> Tryskový tok (Jetting) [38]	54
<i>Obrázek 47</i> Vstřikovaný díl.....	57
<i>Obrázek 48</i> 3D model vstřikovaného dílu.....	57
<i>Obrázek 49</i> Zadní strana krytu s uvedeným materiálem	58
<i>Obrázek 50</i> Určení hmotnosti krytu v programu CATIA V5R19	58
<i>Obrázek 51</i> Navržená konstrukce vstřikovací formy	59
<i>Obrázek 52</i> Model vstřikovací formy, vlevo pohyblivá část, vpravo nepohyblivá část	60
<i>Obrázek 53</i> Tvarové části vstřikovací formy	61
<i>Obrázek 54</i> Barevně vyznačená místa styku tvarových částí formy se vstřikovaným dílem na modelu krytu	61
<i>Obrázek 55</i> Kompaktní posuvná jednotka firmy Meusburger	62
<i>Obrázek 56</i> Rozmístění kompaktních posuvných jednotek vůči výrobku	62
<i>Obrázek 57</i> Speciální blok pro boční odformování	63
<i>Obrázek 58</i> Umístění bloku ve formě zvýrazněného červenou barvou	63
<i>Obrázek 59</i> Vyhazovací systém.....	64
<i>Obrázek 60</i> Šikmé vyhazovací jednotky	65
<i>Obrázek 61</i> Rozmístění vyhazovačů vůči výrobku	65
<i>Obrázek 62</i> Výsledek analýzy vhodnosti umístění vtoku.....	66
<i>Obrázek 63</i> Horký vtok a zástrčka pro připojení do sítě	66
<i>Obrázek 64</i> Temperační okruh tvárnice	67
<i>Obrázek 65</i> Temperační okruh tvárníku	67
<i>Obrázek 66</i> Transportní zámek formy Meusburger E 1936	68
<i>Obrázek 67</i> Transportní zámek vyhazovacích desek Meusburger E 1938	68
<i>Obrázek 68</i> Otočné závěsné oko Meusburger E 1271	68

<i>Obrázek 69 Vygenerovaná síť výrobku</i>	69
<i>Obrázek 70 Beam elementy temperace a horkého vtoku</i>	70
<i>Obrázek 71 Kontrola L/D poměru</i>	70
<i>Obrázek 72 Síť bloku formy</i>	71
<i>Obrázek 73 Výsledek doby plnění</i>	72
<i>Obrázek 74 Výsledek analýzy teploty taveniny v čase 1,662 s.</i>	73
<i>Obrázek 75 Výsledek analýzy rychlosti smykové deformace</i>	73
<i>Obrázek 76 Výsledek analýzy doby k dosažení vyhazovací teploty</i>	74
<i>Obrázek 77 Výsledek analýzy tlaku v místě vtoku</i>	75
<i>Obrázek 78 Výsledek analýzy uzavírací síly</i>	75
<i>Obrázek 79 Výsledek analýzy vzduchových bublin a studených spojů</i>	76
<i>Obrázek 80 Výsledek analýzy propadlin</i>	76
<i>Obrázek 81 Výsledek analýzy teploty temperačního média</i>	77
<i>Obrázek 82 Výsledek analýzy efektivity odvodu tepla</i>	78
<i>Obrázek 83 Deformace, vliv všech efektů</i>	79

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Nastavené procesní parametry pro Moldflow analýzy	71
Tabulka 2 Porovnání parametrů vstřikovacího stroje s požadovanými parametry.....	80
Tabulka 3 Výsledky analýzy vstřikovacího procesu	82

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Materiálový list polypropylenu SABIC PP 575 P

Příloha P II: Datový list vstřikovacího stroje ALLROUNDER 630 S 2500-800 (45)

Příloha P III: Výkresová dokumentace

- Sestava formy

Příloha P IV: CD

- 3D model vstřikovací formy
- 3D model zadaného výrobku
- Moldflow analýza vstřikování

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST



SABIC[®] PP 575P

POLYPROPYLENE HOMOPOLYMER FOR INJECTION MOLDING

DESCRIPTION

SABIC[®] PP 575P is specially developed for producing rigid injection molding articles for general purpose applications. It gives consistent processability and high gloss in the products.

TYPICAL APPLICATIONS

SABIC[®] PP 575P can be used for houseware articles, caps, closures, containers and toys.

TYPICAL PROPERTY VALUES

Revision 20181012

PROPERTIES	TYPICAL VALUES	UNITS	TEST METHODS
POLYMER PROPERTIES			
Melt Flow Rate ⁽¹⁾			
@ 230°C & 2.16kg load ⁽¹⁾	11	g/10 min	ASTM D 1238
Density at 23°C	905	kg/m ³	ASTM D1505
MECHANICAL PROPERTIES			
Tensile Strength at Yield ⁽²⁾	35	MPa	ASTM D638
Tensile Elongation at Yield	11	%	ISO 527-1/-2
Flexural Modulus (1% Secant)	1600	MPa	ASTM D790 A
Notched Izod Impact Strength at 23°C	22	J/m	ASTM D256
Rockwell Hardness, R-Scale	104	-	ASTM D785
THERMAL PROPERTIES			
Vicat Softening Point	153	°C	ASTM D1525
Heat Deflection Temperature at 455kPa	98	°C	ASTM D648

(1) Typical values; not to be construed as specification limits.

(2) Based on injection molded specimens

PROCESSING CONDITIONS

Barrel temperature range: 200 - 250°C Mold Shrinkage: 1.2 - 2.5% depending on wall thickness and Processing conditions. Mold Temperature: Normally 15 - 40°C, up to 65°C for thick parts.

HEALTH, SAFETY AND FOOD CONTACT REGULATIONS

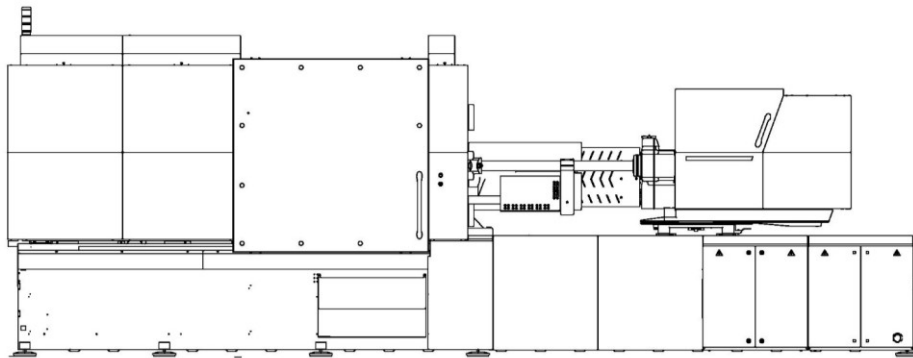
Material Safety Data Sheets (MSDS) and Product Safety declarations are available on our Internet site <http://www.SABIC.com>. For additional specific information please contact SABIC local representative.

DISCLAIMER: This product is not intended for and must not be used in any pharmaceutical / medical applications.

STORAGE AND HANDLING

Polypropylene resin should be stored in a manner to prevent a direct exposure to sunlight and/or heat. The storage area should also be dry and preferably do not exceed 50°C. SABIC would not give warranty to bad storage conditions which may lead to quality deterioration such as color change, bad smell and inadequate product performance. It is advisable to process PP resin within 6 months after delivery.

PŘÍLOHA P II: DATOVÝ LIST VSTŘIKOVACÍHO STROJE



ALLROUNDER 630 S

Clamp-Design

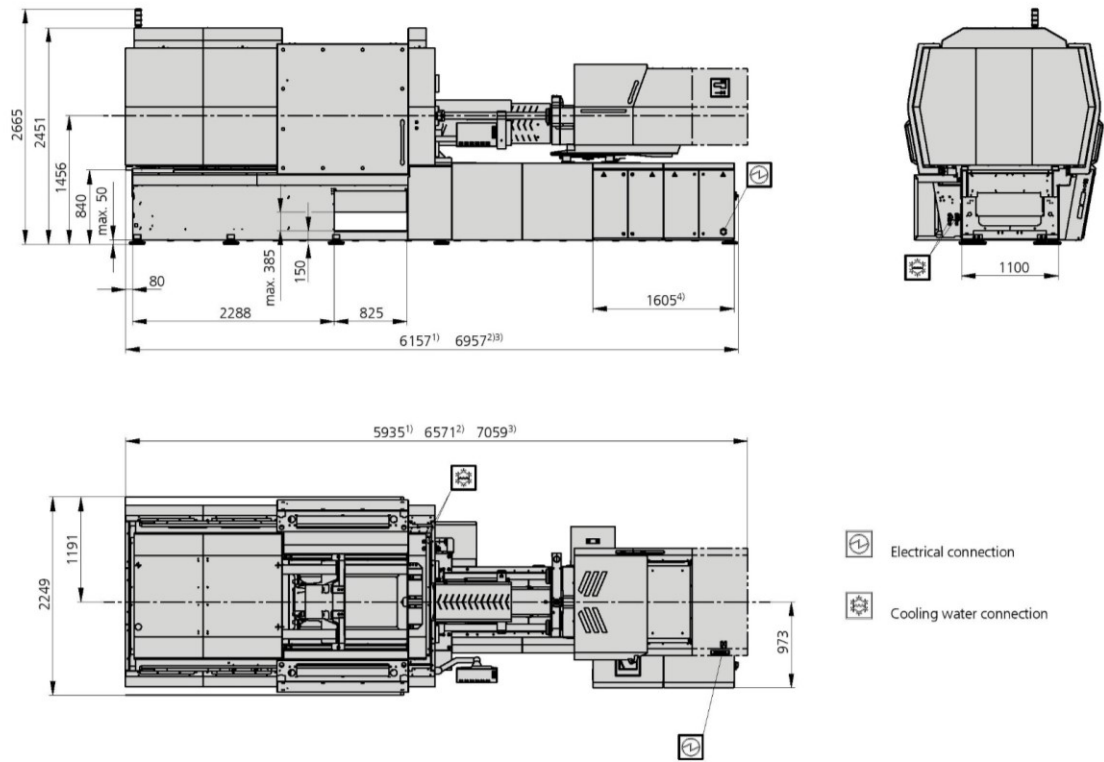
Distance between tie bars: 630 x 630 mm

Clamping force: 2500 kN

Injection unit (acc. to EUROMAP): 800, 1300, 2100

ARBURG

MACHINE DIMENSIONS | 630 S



1) Injection unit 800
 2) Injection unit 1300
 3) Injection unit 2100
 4) Subject to performance variant and injection unit size

TECHNICAL DATA | 630 S

Clamping unit		630 S	
with clamping force	max. kN	2500	
Opening force stroke	max. kN mm	725 600	
Mould height, fixed variable	min. mm	700 [300-700]	
Platen daylight fixed variable	max. mm	1300 [900-1300]	
Distance between tie bars (w x h)	mm	630 x 630	
Mould mounting platens (w x h)	max. mm	900 x 900	
Weight of movable mould half	max. kg	2500	
Ejector force stroke	max. kN mm	90 225	
Dry cycle time EUROMAP ²	1 pump	min. s - mm	3,8 - 441
	2 pumps	min. s - mm	2,3 - 441
	Accum.	min. s - mm	1,7 - 441

Injection unit		800			1300			2100			
with screw diameter	mm	45	50	55	55	60	70	60	70	80	
Effective screw length	L/D	22	20	18	22	20	17	23	20	17,5	
Screw stroke	max. mm	200			240			280			
Calculated stroke volume	max. cm ³	318	392	474	558	664	904	792	1078	1407	
Shot weight	max. g PS	291	359	434	510	607	826	723	984	1286	
Material throughput	max. kg/h PS	46	53	59	86	96	115	125	145	175	
	max. kg/h PA6.6	23	27	30	43	48	58	62	74	88	
Injection pressure	max. bar	2470	2000	1650	2380	2000	1470	2500	2000	1530	
Holding pressure	max. bar	2470	2000	1650	2380	2000	1470	2500	2000	1530	
Injection flow ²	1 pump	max. cm ³ /s	242	300	364	238	284	388	---		
	2 pumps	max. cm ³ /s	242	300	364	238	284	388	224	306	400
	Accum.	max. cm ³ /s	530	656	792	714	848	1156	1132	1540	2012
Screw circumferential speed ²	1 pump	max. m/min	54	60	66	40	43	51	---		
	2 pumps	max. m/min	54	60	66	40	43	51	43	51	58
	Accum.	max. m/min	15	17	19	19	21	25	21	25	28
Screw torque	max. Nm	880			1510	1640	1920	2140	2500	2550	
Nozzle contact force retraction stroke	max. kN mm	70 400			90 550			110 600			
Heating capacity zones	kW	19,9 8			22,9 8			31,4 8			

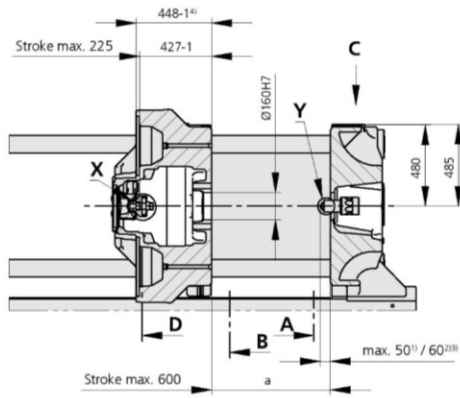
Drive and connection		1 pump (servo)			2 pumps			Accum.		
with injection unit		800	1300		800	1300	2100	800	1300	2100
Net weight of machine	kg	12200	12500		12200	12500	13200	---		
Sound press. level Insecurity ⁴	dB(A)	< 65			73 3			< 70		
Oil filling	l	330	410		330	410	410	360	460	530
Drive power ²	max. kW	45	45		45	45	55	30	37	45
Electrical connection ³	kW	68	74		68	71	89	53	63	70
	Total	A	---			---			---	
	Machine	A	125	125		100	100	125	80	100
Cooling water connection	max. °C	30			30			30		
	min. Δp bar	1,5 DN 25			1,5 DN 25			1,5 DN 32		

Machine type		Drive
with EUROMAP size designation ¹		Drive
630 S 2500-800		1 2 Accum.
630 S 2500-1300		1 2 -
630 S 2500-2100		1 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 variant / drive configuration.
 - 3) Specifications relate to 400 V/50 Hz.
 - 4) Detailed info in the operating instr.
- [] Specifications apply to alternative equipment.

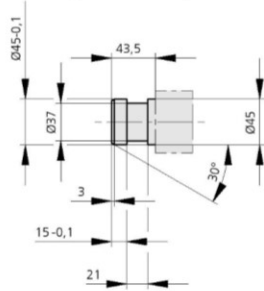
MOULD INSTALLATION DIMENSIONS | 630 S



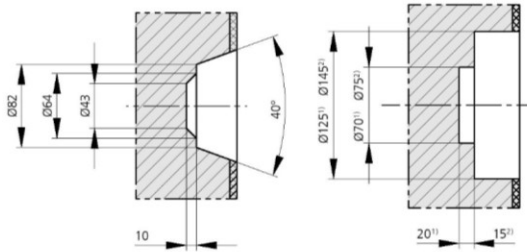
Mould installation height	a min.	a max.
Fixed	700	1300
variable, manually	[400, 500, 600]	[1000, 1100, 1200]
variable, automatically	300-700	900-1300

[] Specifications apply to alternative equipment

Ejector bolt | X

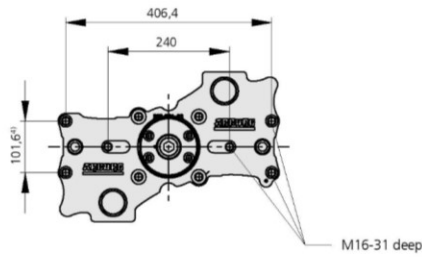


Bore in mould (if required) | Y

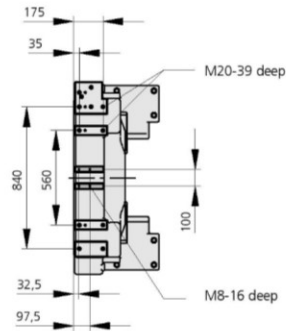


Injection unit 800⁽¹⁾ and 1300⁽²⁾
 Thermoset execution -
 2100 injection unit on request

Ejector plate | D



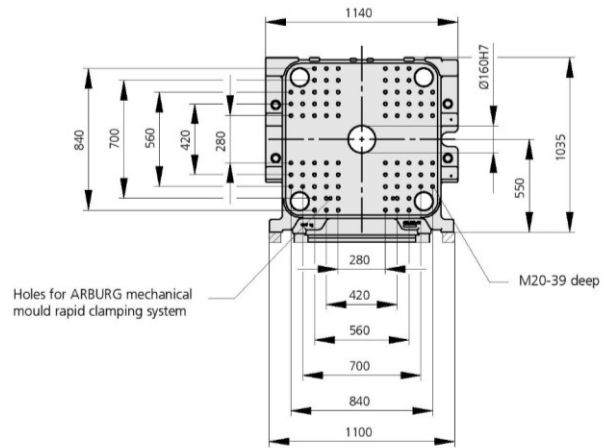
Robotic system mounting | C



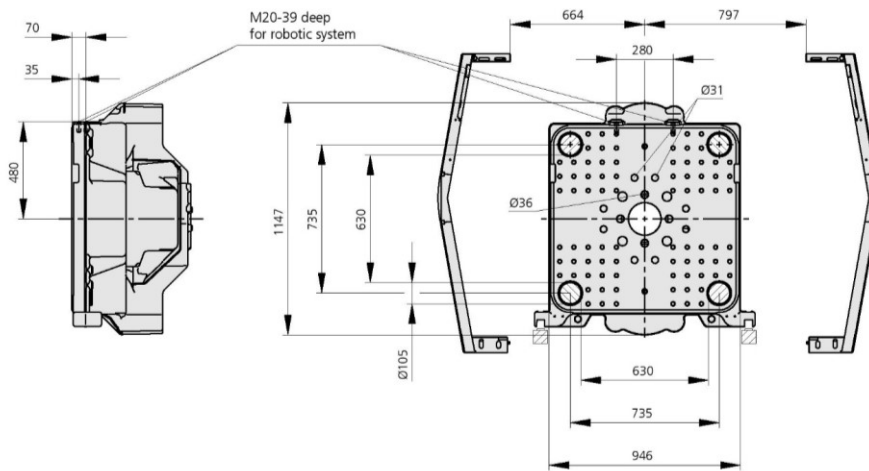
- 1) Injection unit 800
- 2) Injection unit 1300
- 3) Injection unit 2100
- 4) Positions of ejector plate

MOULD INSTALLATION DIMENSIONS | 630 S

Fixed mould mounting platen | A



Moving mould mounting platen | B



SHOT WEIGHTS | 630 S

Theoretical shot weights for the most important injection moulding materials

Injection units according to EUROMAP		800			1300			2100		
Screw diameter	mm	45	50	55	55	60	70	60	70	80
Polystyrene	max. g PS	291	359	434	510	607	826	723	984	1286
Styrene heteropolymerizates	max. g SB	284	350	424	498	593	807	707	962	1256
	max. g SAN, ABS ¹⁾	278	344	416	488	581	791	693	943	1231
Cellulose acetate	max. g CA ¹⁾	327	404	488	574	683	930	814	1108	1447
Celluloseacetobutyrate	max. g CAB ¹⁾	304	375	454	534	635	865	757	1030	1346
Polymethyl methacrylate	max. g PMMA	300	371	449	527	627	854	747	1017	1329
Polyphenylene ether, mod.	max. g PPE	270	333	403	473	563	767	671	914	1194
Polycarbonate	max. g PC	305	377	456	536	638	868	760	1034	1351
Polysulphone	max. g PSU	316	390	471	554	659	897	785	1069	1396
Polyamides	max. g PA 6.6 PA 6 ¹⁾	289	357	431	507	603	821	719	978	1278
	max. g PA 6.10 PA 11 ¹⁾	270	333	403	473	563	767	671	914	1194
Polyoximethylene (Polyacetal)	max. g POM	359	443	536	630	749	1020	893	1215	1588
Polyethylene terephthalate	max. g PET	346	427	517	607	723	984	861	1172	1531
Polyethylene	max. g PE-LD	219	271	328	385	458	624	546	744	971
	max. g PE-HD	227	280	339	398	473	644	564	768	1003
Polypropylene	max. g PP	232	286	346	406	484	658	576	784	1025
Fluoropolymerides	max. g FEP, PFA, PCTFE ¹⁾	465	574	695	816	971	1322	1157	1575	2058
	max. g ETFE	408	504	609	716	852	1160	1015	1382	1805
Polyvinyl chloride	max. g PVC-U	351	434	525	616	734	998	874	1190	1554
	max. g PVC-P ¹⁾	324	401	485	569	678	922	808	1099	1436

1) average value

ARBURG GmbH + Co KG

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

© 2023 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.